



Master Thesis

im Rahmen des Universitätslehrganges
„Geographical Information Science & Systems“

(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

GIS zur Bestimmung von Grünlanderträgen

Implementierung eines Ertragmodells

vorgelegt von

Mag. Andreas Schaumberger

u1218, UNIGIS MSc Jahrgang 2005

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science
(Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)“

Gutachter:

Ao. Univ.Prof. Dr. Josef Strobl

Irdning, 29. Mai 2007

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Irdning, am 29. Mai 2007

Mag. Andreas Schaumberger

Kurzfassung

Grünland ist in Österreich mit über der Hälfte der landwirtschaftlichen Nutzfläche eine der wichtigsten Kulturen. Die Erträge stellen die Grundfuttermittellieferung des Raufutter verzehrenden Viehs sicher und werden sowohl in extensiver als auch intensiver Form erwirtschaftet. Eine Abschätzung der Ertragssituation ist insbesondere in der durch den Klimawandel bedingten Zunahme von Trockenperioden eine wichtige Maßnahme, um zeitgerecht auf Veränderungen der Ertragssituation reagieren zu können. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der technischen Umsetzung von Modellen zur Bestimmung des Grünlandertrages. Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren beeinflussen die Ertragsfähigkeit des Grünlandes und können mittels GIS räumlich modelliert werden. Die hohe Komplexität im Zusammenspiel der Einflussfaktoren erfordert ein exploratives Vorgehen in der Modellentwicklung und einen ständigen Vergleich von Modellierungsvarianten und deren Ergebnissen. Zu diesem Zweck wurde ein GIS implementiert, welches unabhängig von einer Standard-GIS-Oberfläche verschiedene Komponenten miteinander in Beziehung setzt. Das System ermöglicht die Berechnung von Wasserverfügbarkeitsfaktoren über ein Bodenwasserbilanzmodell unter Einbeziehung der wichtigsten meteorologischen Parameter, die Bestimmung der thermischen Vegetationsperiode mit Berücksichtigung der Schneebedeckung und daraus abgeleiteter Nutzungshäufigkeiten am Grünland sowie die Berechnung des Grünlandertrages auf Basis einer Kombination aller implementierten Systemkomponenten. Die räumliche Repräsentation spielt dabei eine herausragende Rolle und gewährleistet eine großräumige Applikation der Modelle. Die entwickelte Software entspricht modernen objektorientierten Anforderungen und bezieht die Klassenbibliothek von ESRI ArcObjects zur Umsetzung sämtlicher GIS-Funktionalität ein. Das System wurde in Microsoft Visual C# 2005 programmiert und besonders hinsichtlich der Vermeidung von Benutzereingriffen und Performance optimiert. Damit ist für die Modellweiterentwicklung ein Werkzeug geschaffen, das mit Hilfe von Standardmethoden der Geoinformatik in der Lage ist, die räumliche Anwendung von Modellkonzepten effizient und effektiv rechnerisch umzusetzen.

Schlagerworte: Grünlandertrag, GIS, Visual C#, ArcObjects, Bodenwasserbilanz, Vegetationsperiode, Schneebedeckung, Ertragsmodell

Abstract

Grassland is one of Austria's most important cultures and covers more than a half of the agriculturally used area. Extensively and intensively produced grassland yield ensures forage supply for livestock. The increase of drought periods caused by climate change requires the estimation of yield in order to respond to production changes in time. This master thesis deals with a technical implementation of models for calculating grassland yield. Factors based on site and cultivation affect the yield and can be spatially modelled by GIS. High complexity of interaction of these factors needs an explorative approach of model development and a permanent comparison between model versions and their results. For these purposes a GIS was implemented which relates the several model components independently of a standard GIS user interface. The system allows the calculation of water availability information from a soil water balance model which includes the most important meteorological parameters. The vegetation period in consideration of snow cover is another important part of the system and the basis of determination of utilization frequency. All system components are finally combined for calculation of yield. The spatial distribution of model parameters plays the major role and provides for their area-wide application. The developed software meets the standard of a modern object-oriented programming language and takes into account the class library of ESRI ArcObjects for implementation of all GIS functionality. The system was developed with Microsoft Visual C# 2005 and was optimised concerning user interaction and performance. The resulting tool for further model development uses standard methods of geoinformatics which support an efficient and effective computational implementation of spatial model concepts.

Keywords: grassland yield, GIS, Visual C#, ArcObjects, soil water balance, vegetation period, snow cover, yield model

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1. Einleitung und Problemstellung.....	1
1.1 Einflussfaktoren auf den Ertrag im Grünland	2
1.2 Methodik der Ertragsbestimmung	4
1.3 Vorarbeiten und Projektumfeld.....	5
1.4 Zielsetzung und Lösungsansätze.....	6
1.5 Struktur der Arbeit	9
2. Literaturüberblick.....	13
3. Material und Methoden	19
3.1 Systemumgebung	19
3.2 Datengrundlage für die Implementierung	19
3.2.1 Digitales Höhenmodell.....	19
3.2.2 Meteorologische Messdaten.....	20
3.2.3 Daten aus externen Modellen.....	22
3.3 Rasterdatenmodell.....	24
3.4 Untersuchungsgebiet und -zeitraum.....	25
3.5 Beschreibung der implementierten Modelle	26
3.5.1 Referenz-Evapotranspiration nach Penman-Monteith	26
3.5.2 Modell der Vegetationsperiode	28
3.5.3 Modell der Schneebedeckung	28
3.5.3.1 Berechnung der täglichen Schneemenge	28
3.5.3.2 Berechnung der täglichen Schmelzwassermenge	33
3.5.3.3 Berechnung der Schneeakkumulation.....	34

3.5.4	Modell der Schnitthäufigkeit und des Schnittzeitpunktes.....	35
3.5.5	Bodenwasserbilanzmodell	39
3.5.6	Grassland Statistical Model (GRAM).....	41
3.6	Ertragshebung zur Ergebnisvalidierung.....	42
3.7	Objektorientierte Programmierung mit Visual C#.....	44
3.7.1	Auswahl grundlegender objektorientierter Konzepte	44
3.7.2	C# und das .NET-Framework	47
3.8	Softwareentwicklung mit ArcObjects.....	49
4.	Implementierung	52
4.1	Systemstruktur	52
4.2	Programmablauf.....	54
4.3	Datenzugriff	56
4.4	Berechnung von Regressionen.....	60
4.5	Beispielanwendung für Raster-Algebra	64
4.6	Bildung von Zeitreihen zur Validierung	71
5.	Ergebnisse	74
5.1	Schwerpunkte der Aktivitäten des Modellanwenders.....	76
5.2	Referenz-Evapotranspiration.....	76
5.3	Vegetationsperiode.....	78
5.4	Schneebedeckung.....	79
5.5	Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkt.....	84
5.6	Bodenwasserbilanz und aktuelle Evapotranspiration.....	85
5.7	Grassland Statistical Model (GRAM).....	87
6.	Zusammenfassung.....	92
7.	Diskussion und Ausblick	95
8.	Literaturverzeichnis.....	98
9.	Quellenverzeichnis.....	103

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1:</i>	Räumliche Verteilung des österreichischen Grünlandes.....	2
<i>Abbildung 2:</i>	Zonierung der potentiellen Wasserverfügbarkeit für Grünland im Jahr 2003.....	3
<i>Abbildung 3:</i>	Modellkomponenten und deren Abhängigkeiten.....	10
<i>Abbildung 4:</i>	Räumliche Verteilung der Messstationen.....	21
<i>Abbildung 5:</i>	Untersuchungsgebiet für die Ertragsermittlung.....	25
<i>Abbildung 6:</i>	Zusammenhang zwischen Temperatur und Seehöhe getrennt nach Stationen im Tal- und Berggebiet am Beispiel der Stationsmittel- werte im Februar 2003.....	31
<i>Abbildung 7:</i>	Klassifizierung von Tal- und Berggebiet für die Temperaturinterpolation.....	31
<i>Abbildung 8:</i>	Schematische Darstellung der Modellierung von Vegetations- und Nutzungsperiode.....	36
<i>Abbildung 9:</i>	Wachstumsverlauf auf Mähweiden in Abhängigkeit des Wasserhaushalts (Quelle: BOHNER, 2003).....	37
<i>Abbildung 10:</i>	Relative Verteilung der Aufwuchszeiten und daraus ableitbarer Schnitttermine.....	38
<i>Abbildung 11:</i>	Standorte der Ertragsmessungen im Raum Hartberg.....	43
<i>Abbildung 12:</i>	Grobarchitektur des .NET-Frameworks.....	48
<i>Abbildung 13:</i>	Paketdiagramm des modellierten Systems.....	53
<i>Abbildung 14:</i>	Vereinfachtes Ablaufdiagramm des Gesamtsystems.....	55
<i>Abbildung 15:</i>	Klassendiagramm des Paketes Workspace.....	57
<i>Abbildung 16:</i>	Klassendiagramm des Paketes DataAccess.....	58
<i>Abbildung 17:</i>	Zusammenhang von Evapotranspiration und Sättigungsdefizit an den Messstationen der ZAMG im Mai 2000.....	60
<i>Abbildung 18:</i>	Ablaufdiagramm Regressionsberechnung.....	61
<i>Abbildung 19:</i>	Pflanzenfaktor am Beispiel des 15. Mai 2006.....	65
<i>Abbildung 20:</i>	Zeitlicher Verlauf des Pflanzenfaktors an ausgewählten Standorten.....	66
<i>Abbildung 21:</i>	Räumliche Verteilung der theoretischen Nutzungshäufigkeit für das Jahr 2006.....	66

<i>Abbildung 22:</i>	Theoretische Wuchsdauer des 1. Aufwuchses 2006 nach modelliertem Schnittzeitpunkt	67
<i>Abbildung 23:</i>	Ablaufdiagramm Validierung	72
<i>Abbildung 24:</i>	Verlauf der Globalstrahlung von März bis Oktober im Jahr 2006 am Standort Kirchberg am Walde (Bezirk Hartberg)	73
<i>Abbildung 25:</i>	Klassenübersicht des Gesamtsystems (Visual Studio 2005).....	74
<i>Abbildung 26:</i>	Referenz-Evapotranspiration am 30.06. 2006 im Untersuchungsgebiet	77
<i>Abbildung 27:</i>	Durchschnittlicher Vegetationsbeginn im Untersuchungsgebiet	78
<i>Abbildung 28:</i>	Durchschnittliches Vegetationsende im Untersuchungsgebiet	79
<i>Abbildung 29:</i>	Schneebedeckung in mm Wasseräquivalent am Beispiel des 27.03. 2004	80
<i>Abbildung 30:</i>	Übereinstimmung der vom Modell gerechneten Schneebedeckung mit Messwerten an 740 HZB-Stationen und die gesamte schneebedeckte Fläche Österreichs im Winter 2003/2004	81
<i>Abbildung 31:</i>	Verlauf der Schneebedeckung im Winter 2003/2004 an vier Messstationen im Vergleich zwischen Mess- und Modellergebnissen	82
<i>Abbildung 32:</i>	Anzahl der Schneetage im Vergleich von Modellergebnissen und Schneehöhenmessungen an 740 HZB-Stationen	83
<i>Abbildung 33:</i>	Nutzungsstadien und Entwicklung des Qualitätsertrages des Grünlandfutters (Quelle: BUCHGRABER, 1998).....	84
<i>Abbildung 34:</i>	Aktuelle Evapotranspiration am 30.06. 2006 im Untersuchungsgebiet.....	85
<i>Abbildung 35:</i>	Modell der aktuellen Evapotranspiration im Vergleich zu Messdaten.....	86
<i>Abbildung 36:</i>	Referenz- und aktuelle Evapotranspiration im Vergleich für die Jahre 2003 und 2006 am Standort Hatzendorf (Bezirk Feldbach).....	87
<i>Abbildung 37:</i>	Niederschlag und Wachstumsfaktor im Vergleich für die Jahre 2003 und 2006 am Standort Hatzendorf (Bezirk Feldbach)	88
<i>Abbildung 38:</i>	Räumliche Verteilung des Bruttogrünlandertrages in dt TM/ha für das Jahr 2006	89
<i>Abbildung 39:</i>	Werte Verteilung des Grünlandbruttoertrages in dt TM/ha für das Jahr 2006	90
<i>Abbildung 40:</i>	Vergleich der Modellergebnisse mit Ertragsdaten aus der Praxis	91

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1:</i>	Anzahl von Tagen vom Ø Vegetationsbeginn (1990 - 2006) und das Verhältnis der Aufwuchsdauer zwischen den Aufwüchsen (Auswertung von 4733 Erhebungsdaten von 1990 - 2006)	37
-------------------	--	----

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
CIL	Common Intermediate Language
CLR.....	Common Language Runtime
CLS	Common Language Specification
CMF	Combined Melt Factor
COM.....	Component Object Model
CTS	Common Type System
DHM	Digitales Höhenmodell
dt.....	Dezitonnen
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO.....	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FM.....	Frischmasse
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GI	Geoinformation
GIS	Geographisches Informationssystem
GRAM.....	Grassland Statistical Model
HBLFA.....	Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
HZB.....	Hydrographisches Zentralbüro
LAN	Local Area Network
MJ.....	Megajoule
RAID.....	Redundant Array of Independent Disks
RAM.....	Random Access Memory
RCW.....	Runtime Callable Wrapper
TB.....	Terabyte
TM.....	Trockenmasse
UML.....	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
VPD.....	Vapour pressure difference
ZAMG.....	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

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 mit rund 1,8 Millionen Hektar (ha) bedeckt ca. 55 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs (BMLFUW, 2006).

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, 2004). Sie reicht vom extensiven Grünland (Almen, Bergmäher, Hutweiden, einmähdige Wiesen und Streuwiesen) über intensives Wirtschaftsgrünland (mehrmähdige Wiesen, Kulturweiden) bis hin zum Feldfutterbau (Klee-, Klee gras- und Reingrasbestände) (BMLFUW, 2006).

Das Grünland bildet die wichtigste Komponente in der Futtermittelversorgung 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 auf einer Fläche von über 909.000 Hektar 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 Grundfutterbedarfs und sind deshalb für die Viehwirtschaft maßgeblich (BMLFUW, 2006). Wirtschaftsgrünland ist hauptsächlich in den Gunstlagen des Alpenvorlandes zu finden, durchzieht aber auch die Täler des Alpenhauptkamms. *Abbildung 1* 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 werden kann (BUCHGRABER, 2004).

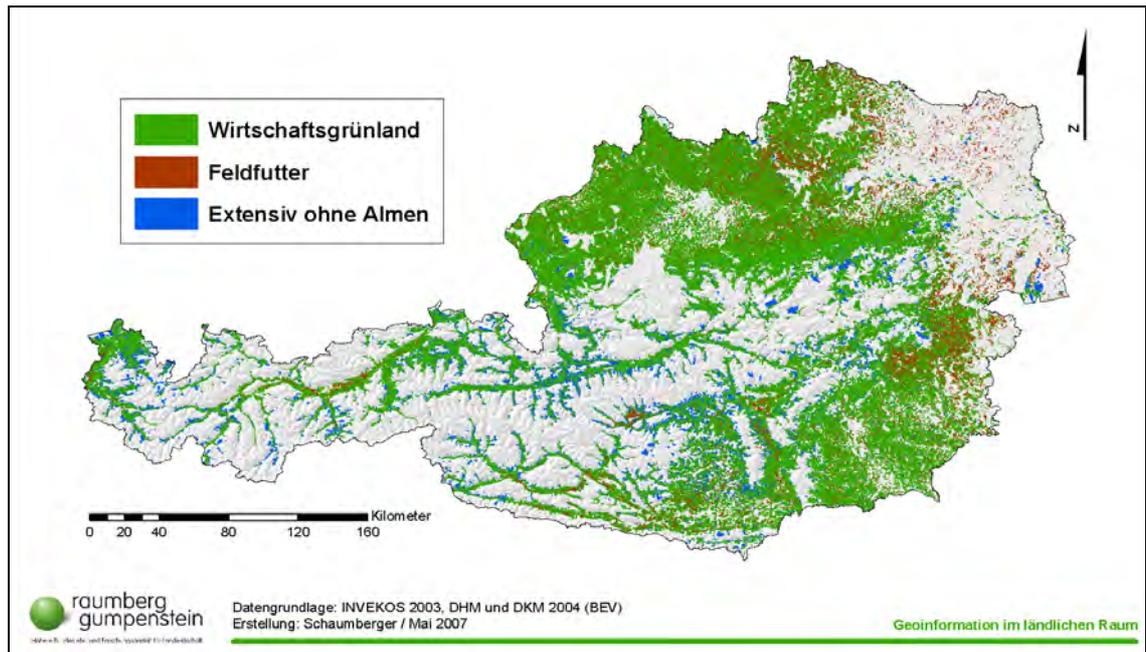


Abbildung 1: Räumliche Verteilung des österreichischen Grünlandes

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 2* zeigt Zonen der Wasserverfügbarkeit nach einer Berechnung des Jahresminimums aus der akkumulierten Differenz von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration auf Tagesbasis (nettopotentielle 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.

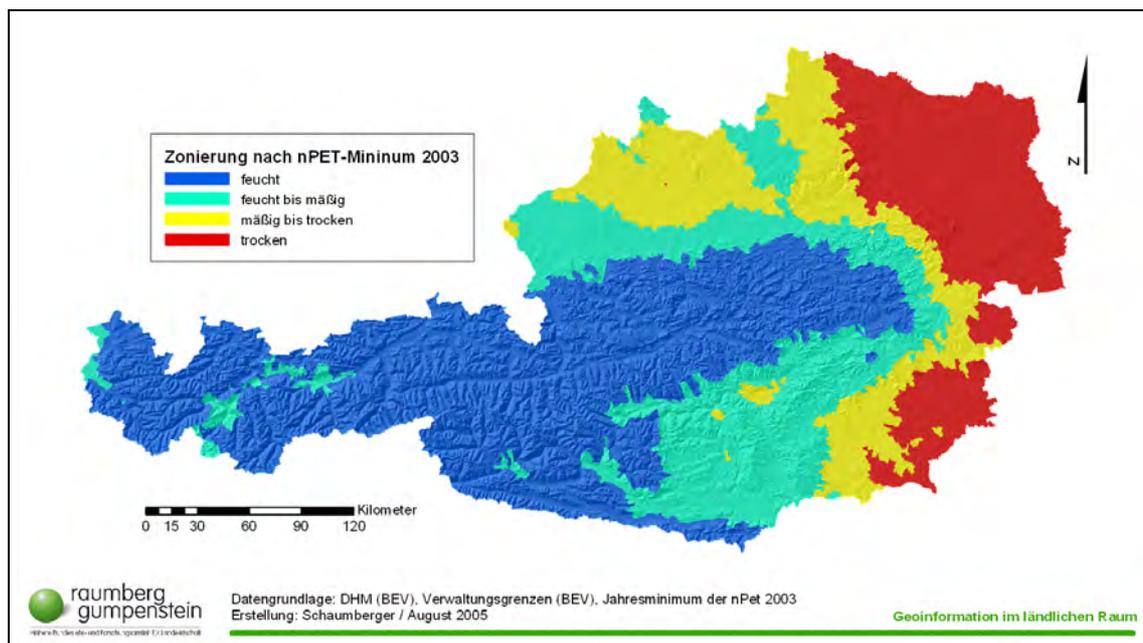


Abbildung 2: Zonierung der potentiellen Wasserverfügbarkeit für Grünland im Jahr 2003

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, 2007a).

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, 2007b). Eine Temperaturzunahme um 1 - 2 °C wirkt sich auf die Dauer der Schneedecke in etwa 1500 m Seehöhe mit einer Reduzierung um 20 - 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, 2004).

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.

1.3 Vorarbeiten und Projektumfeld

Die Entwicklung von Modellen zur Ertragschätzung bildet einen wichtigen Schwerpunkt in der landwirtschaftlichen Forschung. Sie dienen als Grundlage für statistische Auswertungen über Ertragspotentiale 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 gegenwärtig 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 ist in eine Projektumgebung eingebettet, die schon seit dem Jahr 2002 intensiv an der Problemstellung zur Bestimmung von Grünlanderträgen unter dem Einfluss von Trockenperioden arbeitet. Die Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (HBLFA) Raumberg-Gumpenstein als Dienststelle des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft bearbeitete zusammen mit dem Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur das Projekt „Entwicklung eines Modells für die konkrete Ermittlung von Trockenschäden in den einzelnen Regionen Österreichs“. Im Rahmen dieses Projektes, welches 2005 abgeschlossen und in BUCHGRABER *et al.* (2006) und in KROMP-KOLB *et al.* (2005) dokumentiert wurde, entstand eine Arbeit des Autors (SCHAUMBERGER, 2005), die sich in einem ersten Ansatz schon mit der räumlichen Umsetzung der entwickelten Modelle beschäftigte.

In einem zweijährigen Folgeprojekt unter dem Titel „Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen“ unter der Projektleitung des Autors wird die Bearbeitung des Themas fortgeführt. Die vorliegende Arbeit bildet mit dem Schwerpunkt der Implementierung dafür einen wichtigen Teil und schafft die technische Voraussetzung für das weitere explorative Vorgehen zur Modellverbesserung.

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 jenem 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 ermöglicht und dabei insbesondere die explorative Modellerweiterung und -verbesserung unterstützt.** Die Arbeit richtet sich aus diesem Grund auch hauptsächlich an Experten aus dem Fachbereich der Geoinformatik und an Entwickler von Modellen mit dem Schwerpunkt der räumlichen Implementierung. Aus dieser Zielformulierung sind wichtige 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 Datenzugriff, dem objektübergreifenden Datenaustausch und der Abspeicherung 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.

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 ist der Einsatz dieses Systems im EU-Projekt „Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe“ (<http://www.clavier-eu.org>) erforderlich und kann ohne großen Aufwand eingesetzt werden. Die in diesem Fall notwendige Einbeziehung von Klimamodelldaten ist ebenso unproblematisch, wie die Anwendung auf Testgebiete in Rumänien und Ungarn.

Die Validierung einzelner Komponenten und Ergebnisse bildet einen wichtigen Teil der Modellierung, der hier jedoch nicht im vollen Umfang ausgeführt wurde. Der Schwerpunkt dieses Projektabschnittes liegt in der Implementierung. Zwar wurden technische Voraussetzungen für entsprechende Auswertungen geschaffen, aber nur zum Teil angewandt. Für eine Validierung der Ertragsergebnisse sind im Jahr 2006 im Raum Hartberg Ertragsmessungen durchgeführt worden, die für eine Prüfung der Ergebnisse herangezogen werden können und auch für zukünftige Modellanpassungen als Qualitätsmaßstab dienen.

Das System ist für die Einbindung in eine Windows-Oberfläche vorbereitet, diese wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert und wird auch nicht weiter erläutert. 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.

1.5 Struktur der Arbeit

Im **Literaturüberblick** wird auf die wichtigsten der verwendeten Modelle eingegangen, wobei den im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Systemkomponenten besonderes Gewicht verliehen wird. Die Auseinandersetzung mit einer Auswahl zu den jeweiligen Themen verfügbaren wissenschaftlichen Arbeiten nimmt Bezug auf den aktuellen Stand des Wissens und begründet die Verwendung der verschiedenen Modelle.

Das Kapitel **Material und Methoden** zeigt die für die Implementierung entscheidenden Vorgehensweisen. Eine Erläuterung der verwendeten Daten, Systeme und Programmierkonzepte gibt neben der theoretischen Beschreibung der eingesetzten Modelle einen Überblick über die Durchführung der Arbeit. Weiters findet sich eine Beschreibung der für die Validierung maßgeblichen Ertragsdatenerhebung im Untersuchungsgebiet.

Das Kapitel über die **Implementierung** geht auf die erarbeiteten Algorithmen ein und beschreibt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Objektklassen. Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, wenn der Programmcode hier lückenlos interpretiert

werden würde. Deshalb findet sich in diesem Kapitel eine repräsentative Auswahl von interessanten Implementierungskonzepten.

Die **Ergebnisse** zeigen einige der in den einzelnen Systemkomponenten entstandenen Geodaten. Eine Interpretation mit Einbeziehung statistischer Analysen stellt in dem einen oder anderen Bereich das Verbesserungspotential des Gesamtsystems dar.

In der **Zusammenfassung** wird in kompakter Form die gesamte Arbeit beschrieben und soll dem Leser einen Überblick der angewandten Methodik, Implementierung und Ergebnisinterpretation geben.

Das abschließende Kapitel **Diskussion und Ausblick** zeigt diese Arbeit im Umfeld eines großen Forschungsprojektes, in dem noch intensiv an der Weiterentwicklung und Verbesserung der Ertragsmodellierung für Grünland gearbeitet wird.

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 3* zu lenken, um die wichtigsten Zusammenhänge verstehen und richtig einordnen zu können.

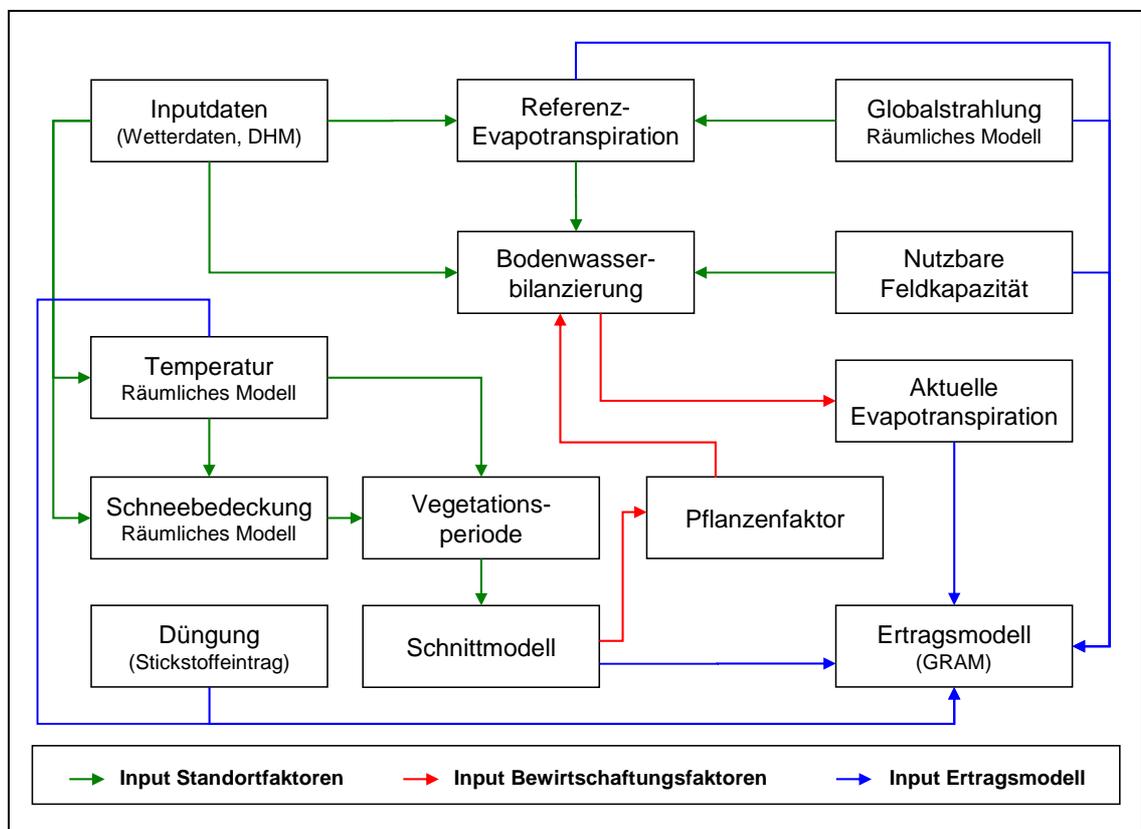


Abbildung 3: Modellkomponenten und deren Abhängigkeiten

Die einzelnen Komponenten werden in *Abbildung 3* 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 3* dient der Zuordnung von Problembereichen und den davon betroffenen Komponenten im Gesamtbild des Systems.

In *Abbildung 3* wurden teilweise Begriffe eingeführt, die zum allgemeinen Verständnis einer Erklärung bedürfen. Im Folgenden wird jede Komponente kurz beschrieben, um deren Aufgabe klarzustellen.

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.

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 Schnitanzahl. 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 Rolle und die aktuelle Verdunstung im für Grünlandpflanzen relevantem Bodenhorizont kann davon abgeleitet werden.

Ertragsmodell: Im Zuge der Vorarbeiten zu dieser Arbeit 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.

2. Literaturüberblick

Evapotranspiration und Bodenwasserbilanz

Für viele wissenschaftliche Untersuchungen spielt die räumliche Verteilung eines Phänomens eine große Rolle. Die Verbindung von Modell und GIS ist deshalb für die meisten Fachbereiche ein entscheidender Schritt der Umsetzung, welcher VAN DEURSEN (1995) in seiner Arbeit zur Entwicklung eines Prototyp-Raster-GIS für dynamische Modelle (PCRaster) beschreibt. Im Rahmen der Anwendungsbeispiele für dieses System wird auch auf die Bodenwasserbilanz Bezug genommen und deren Implementierung beschrieben. PCRaster (<http://pcraster.geo.uu.nl>) findet mittlerweile in zahlreichen Projekten Verwendung und wird laufend weiterentwickelt und ausgebaut.

ZHANG (2006) beschäftigt sich ebenfalls mit dem Einsatz von PCRaster zur Berechnung der Bodenwasserbilanz. Den Schwerpunkt bildet hier jedoch die Bestimmung des Oberflächenabflusses. Die Evapotranspiration als Parameter der Bodenwasserbilanzierung wird nach HAUDE (1955) ermittelt, wobei das Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf in Kombination mit einem empirischen monatlichen Pflanzenfaktor für verschiedene Kulturen herangezogen wird.

Einen der wichtigsten Standards zur Berechnung der Evapotranspiration stellt die FAO-Penman-Monteith-Methode dar, welche von ALLEN *et al.* (1998) ausführlich beschrieben wird. FANK (2007) hat sich mit einer Untersuchung dieser Methode beschäftigt und sie mit exakten Messungen in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung verglichen. 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. BACHMANN (1996) beschäftigte sich ebenfalls mit einer räumlichen Implementierung der Evapotranspiration nach Penman, wobei für die vorliegende Arbeit dem FAO-Standardwerk von ALLEN *et al.* (1998) aufgrund der großen internationalen Bedeutung der Vorzug gegeben wurde.

Als Steuergröße für den Bodenwasserhaushalt spielt die Evapotranspiration neben Bodenwassergehalt und bodenhydrologische Faktoren eine zentrale Rolle. WEBER (2004) hat sich in einer umfangreichen Arbeit mit diesen verschiedenen Steuergrößen intensiv

auseinandergesetzt und beschreibt die räumliche Implementierung der Bodenwasserdynamik entlang von Höhen- und Ariditätsgradienten.

Für das Verständnis von bodenhydrologischen Vorgängen wurden von HÖRMANN (1997) einfache Bodenwassermodelle in ein System namens SIMPEL zusammengefasst, das zur Einführung in hydrologische Modelle gut geeignet ist und in einem Modellvergleich (HÖRMANN, 2000) weiteren sechs Berechnungsansätzen gegenübergestellt wird.

Vegetationsperiode und Schneebedeckung

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 (2004) zeigt mit Hilfe langjähriger phänologischer 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. Die Analyse der Schneebede-

ckung ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Arbeiten, die sich entweder auf die lokale, stationsbezogene Untersuchung des Schnees beziehen, oder sich auf kleinräumige Studien beschränken. Die angewandten Methoden der räumlichen Repräsentation unterscheiden sich dabei im Wesentlichen in ihrer Komplexität. Eine Modellapplikation für große Untersuchungsgebiete stellt eher die Ausnahme dar.

In der Arbeit von PARAJKA *et al.* (2001) wird der Fragestellung von Schneeakkumulation und -schmelze 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 räumliche Modellierung der Schneebedeckung wurde von WEIBEL *et al.* (2002) mit einem sehr 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 für ausgewählte Stationen durchgeführt.

Für die 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) ist 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 kurzwelligem Spektralbereich nutzt (HALL *et al.*, 2001). PARAJKA and 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.

CAZORZI and DELLA FONTANA (1996) beschreiben in ihrer Arbeit die flächendeckende Bestimmung der Schneebedeckung mit Hilfe der Parameter Temperatur, Niederschlag und potentielle Globalstrahlung für ein kleinräumiges Gebiet in den Dolomiten. 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 und vor allem auch die verschiedenen topographischen Bedingungen berücksichtigt. Aus diesen Gründen wurde dieses Modell für die GIS-Implementierung in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Räumliche Interpolation von Wetterdaten

Die Interpolation von Wetterdaten bildet eine wichtige Grundlage für einige der verwendeten Modelle (Schneebedeckung, Temperaturoberflächen, Evapotranspiration, usw.). Es ist deshalb notwendig, Methoden einzusetzen, welche bei der Interpolation

auftretende Fehler so gering wie möglich halten. In den hier bearbeiteten Modellen spielt die Höhenabhängigkeit der Temperatur 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 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. Temperatur) 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 mit der räumlichen Repräsentation der Referenz-Evapotranspiration auseinander. Dazu findet sich auf einer eigenen Homepage (<http://cc.usu.edu/~shujunli/ArcET>) eine ausführliche Beschreibung (LI *et al.*, 2003b) sowie eine Implementierung für ArcGIS.

Die Anwendung dieser Methode kann wie in der Arbeit von PARAJKA *et al.* (2005) dargestellt, durch Verwendung von lokalen Regressionen verbessert werden, da eine globale Regression auf regionale Unterschiede keine Rücksicht nimmt. In der vorliegenden Arbeit wird dies bei der unterschiedlichen Temperaturinterpolation für Berg- und Talgebiete im Schneebedeckungsmodell angewandt.

Eine ausführliche Beschreibung der Georegression findet sich in einer Arbeit von CLARK and CLAUSEN (1981). Im Rahmen von COST-719 – The use of geographical information systems in climatology and meteorology – wurde von TVEITO and SCHÖNER (2002) die Methode als Residual Kriging oder Detrended Kriging beschrieben. Eine interessante Erweiterung des Residual Kriging durch Artificial Neural Networks (ANN) wird in DEMYANOV *et al.* (1998) vorgestellt. Dabei wird ANN zur Datenana-

lyse und zur Verbesserung der räumlichen Interpolation der Residuen eingesetzt, insbesondere, wenn in den Daten räumliche Trends existieren. MONESTIEZ *et al.* (2001) schlagen zur Verfeinerung der Temperaturinterpolation die Einbeziehung des Messstationsumfeldes vor, welches aus CORINE Land-Cover-Daten abgeleitet wird. Der Einfluss lokaler Umwelteffekte wird mittels External Drift Kriging räumlich verarbeitet.

Ertragsmodelle für Grünland

Ertragsmodelle sind in der Regel äußerst komplex, da insbesondere bei der Grünlandbewirtschaftung viele Faktoren auf den Ertrag einwirken, die in geeigneter Weise kombiniert werden müssen. TRNKA *et al.* (2006) nehmen sich in ihrem Modell (GRAM) besonders der Trockenstresssituation an. Aus diesem Grund spielt die Bodenwasserbilanz als Input eine besondere Rolle. Die Modellierung baut hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit auf die Arbeit von HAN *et al.* (2003) auf. Das Modell ist gut geeignet, die Konsequenzen von Trockenperioden am Grünland abzubilden und bietet sich in Kombination mit der Aufbereitung von Wetter- und Klimadaten für eine räumliche Implementierung an, die in vorliegender Arbeit technisch umgesetzt wurde.

KÄDING *et al.* (2005) verfolgen einen ähnlichen Ansatz, wobei weniger auf die Abhängigkeit von aktuellen Witterungseinflüssen eingegangen wird. Das Modell liefert gute Ergebnisse bei der Schätzung von Ertrag und Qualität am Grünland, ist jedoch nicht für eine räumliche Anwendung ausgelegt.

Der Frage nach den Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungsdaten zur Bestimmung des Vegetationsverlaufs von Grünland gehen NOUVELLON *et al.* (2001) nach. Mit Hilfe der Daten aus Landsat Thematic Mapper (TM) und Enhanced TM Plus (ETM+) wird ein Modell räumlich verfeinert, welches mit Hilfe meteorologischer Daten und Bodeninformation Wachstum und Wasserverfügbarkeit abbildet.

Die einzelnen Themenbereiche, die in der vorliegenden Arbeit behandelt werden, sind wissenschaftlich intensiv bearbeitet worden und der Überblick verfügbarer Literatur kann sich nur auf eine sehr begrenzte Auswahl beziehen. Im nächsten Kapitel wird beschrieben, wie einige der vorgestellten Arbeiten zur methodischen Umsetzung der Implementierung eines Grünlandertragsmodells herangezogen werden.

3. 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.

3.1 Systemumgebung

Eine leistungsfähige Hardware ist die Voraussetzung für die Durchführung oft tagelanger Rechenprozeduren. Der Entwicklungsrechner ist mit Intel Xeon 3,4 GHz, 4 GB RAM und einem RAID-Festplattensystem mit SCSI-Schnittstelle ausgestattet. Zum Datenbankserver mit ähnlicher Systemkonfiguration besteht eine 1-GBit-LAN-Verbindung. Beide Rechner laufen mit dem Betriebssystem Microsoft Windows Server 2003.

Die Implementierung erfolgt mit der objektorientierten Programmiersprache Visual C# 2005 im .NET-Framework. Als Entwicklungsumgebung kommt Microsoft Visual Studio 2005 zum Einsatz. Als GIS-Software wird ESRI ArcGIS 9.1 genutzt, wobei hier nur die Programmbibliothek ArcObjects 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 2003 und der Spatial Extension ArcSDE von ESRI. Die Abspeicherung von Zwischenergebnissen wird filebasiert vorgenommen.

3.2 Datengrundlage für die Implementierung

Das konzipierte System ist dadurch gekennzeichnet, dass nur wenige Inputdaten einfließen. Dies erleichtert die im Vorfeld notwendige Aufbereitung der Datengrundlage.

3.2.1 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 (vgl. BARTELME, 2000, 153f).

3.2.2 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 würden.

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 4* zeigt die räumliche Verteilung der Messstationen für alle in die Interpolationen einbezogenen meteorologischen Daten. 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.

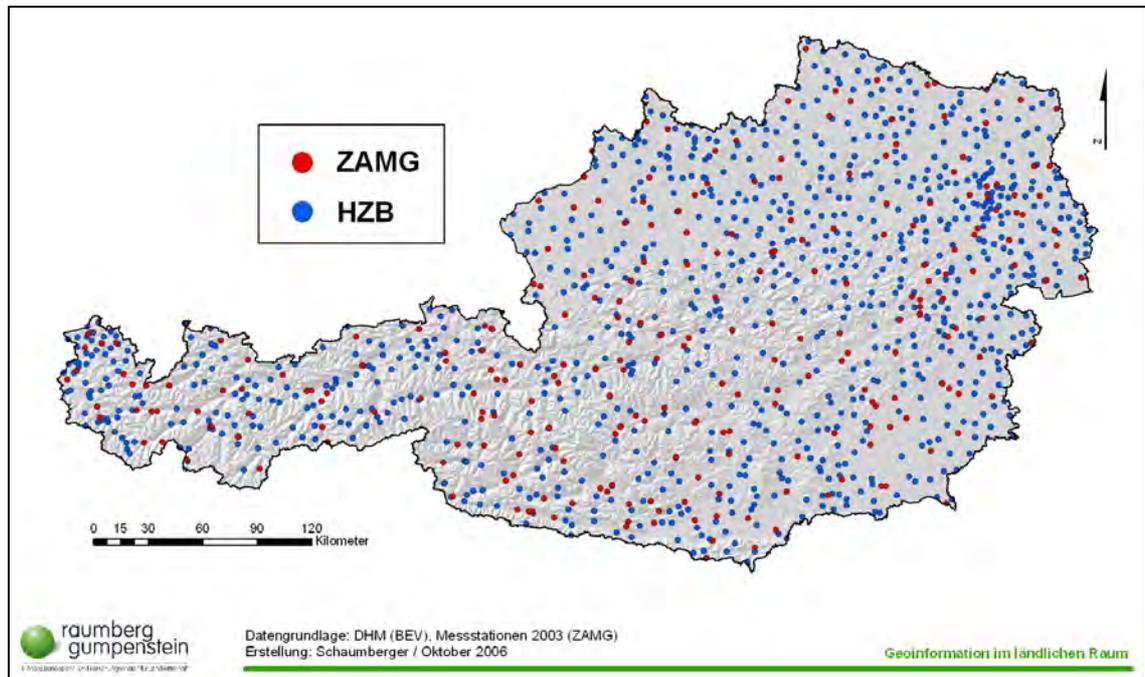


Abbildung 4: Räumliche Verteilung der Messstationen

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 Föhneffekten 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.

3.2.3 Daten aus externen Modellen

Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität wurde am Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt mit Hilfe von Pedotransferfunktionen nach MURER *et al.* (2004) für die Bodenschichten 0-10 cm, 10-20 cm und 20-40 cm gerechnet. Als Grundlage dafür wurden die Parameter der Porengrößenverteilung aus der Digitalen Österreichischen Bodenkarte 1:25.000 herangezogen. Für die Berechnung sind nur mineralische Böden landwirtschaftlicher Nutzflächen berücksichtigt worden.

Die Integration in das Bodenwasserbilanzmodell erfolgt in Form von Rasterdatensätzen für die jeweilige Bodenschicht. Die Ergebnisse aus der Bodenwasserbilanzierung, insbesondere die aktuelle Evapotranspiration ist auf jene Fläche eingeschränkt, für die

Werte für die nutzbare 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.

Räumliches Modell der potentiellen Globalstrahlung

Die Berechnung der potentiellen Globalstrahlung erfolgte mit der ArcView-Extension Solar Analyst 1.0 (FU and RICH, 1999). Zwischenzeitlich wurde diese externe, frei verfügbare Extension in die aktuelle ArcGIS-Version 9.2 von ESRI integriert.

Unter Einbeziehung eines DHM wird für jede Rasterzelle die Horizontabschattung ermittelt, die diffuse und direkte Strahlung in Abhängigkeit der topographischen Ausprägung und der Sonnenstandswinkel in 30-Minuten-Abständen gerechnet und miteinander kombiniert. Die Anforderung an technische Ressourcen ist bei einer flächendeckenden Berechnung für ganz Österreich in einer 50-Meter-Auflösung derart hoch, dass dies nur für jeweils einen charakteristischen Tag des Monats nach KLEIN (1977) durchgeführt wurde. Die Werte für die dazwischen liegenden Tage wurden mittels linearer Interpolation festgesetzt.

Die somit für jeden Tag des Jahres verfügbaren Daten werden zur Verbesserung der räumlichen Interpolation der Referenz-Evapotranspiration eingesetzt. Die kontinuierliche Oberfläche der potentiellen Globalstrahlung eines Tages wird mit dem Globalstrahlungswert desselben Tages eines ebenen, tief liegenden, unbeschatteten Standorts (ZAMG-Wetterstation Groß-Enzersdorf) normiert. Der daraus entstandene flächendeckende Faktor repräsentiert die topographiebedingte Variabilität der potentiellen Globalstrahlung. Dieser Faktor wird mit dem Interpolationsergebnis der Referenz-Evapotranspiration multipliziert und ermöglicht somit eine hoch aufgelöste Einbeziehung der strahlungsabhängigen topographischen Unterschiede.

Räumliches Modell der Düngung (Stickstoffeintrag)

Dieser zu den kritischen Bewirtschaftungsfaktoren zählende Input wurde von GUGGENBERGER (2006) in einem äußerst aufwendigen Modell errechnet und für die grünlandgenutzten Flächen zur Verfügung gestellt. Das Modell baut auf landwirtschaftliche Bewirtschaftungsdaten auf und beschreibt unter anderem die aus der Tierhaltung anfallenden Ausscheidungen mit Berücksichtigung des gesamten Bedarfs an Futtermitteln. Damit werden die Flächen eines landwirtschaftlichen Betriebes gedüngt. Bei Grünland-

betrieben erfolgt in der Regel kaum eine zusätzliche mineralische Stickstoffdüngung, sodass die ausgebrachte Düngermenge mit den aus der Nährstoffbilanzierung gewonnenen Daten weitgehend korrespondiert.

Der Stickstoffwert fließt direkt in das Ertragsmodell ein und beschränkt die Gebiete für die Ertragsermittlung auf jene Grundstücke, die einem Betrieb angehören, der mehr als 75 % seiner Betriebsfläche mit Dauergrünland und Feldfutterbau bewirtschaftet.

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

3.4 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 5*) 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 5*).

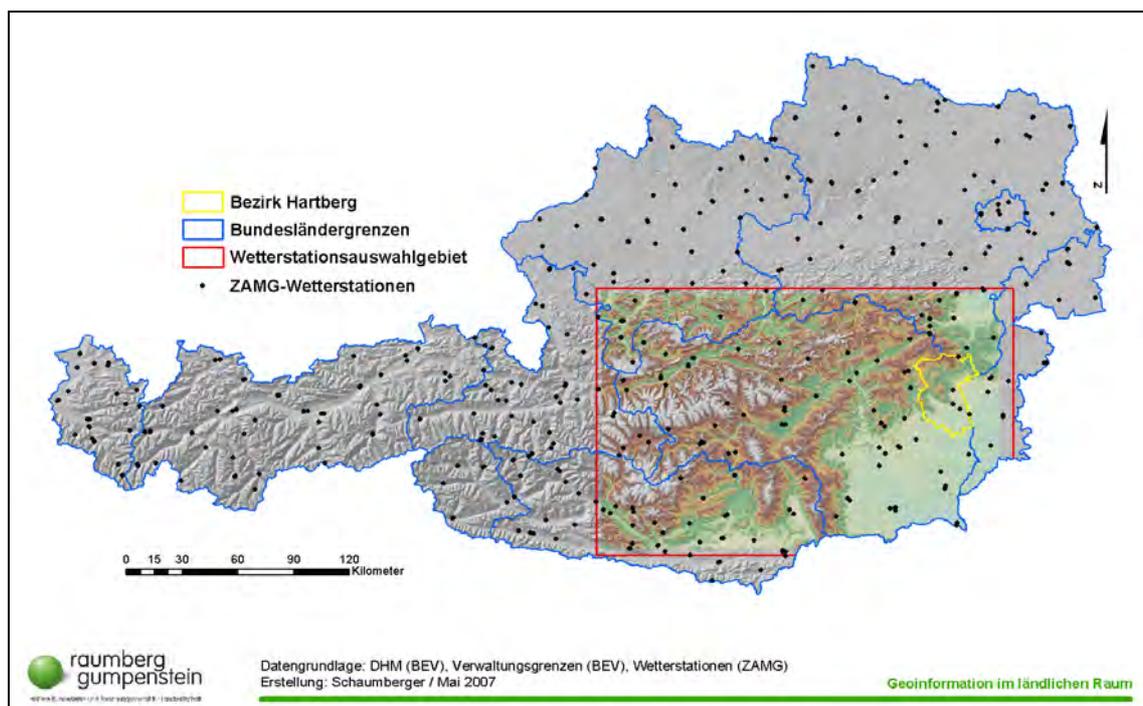


Abbildung 5: Untersuchungsgebiet für die Ertragsermittlung

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 Monate in Anspruch nehmen würde und sich auch schon für die Steiermark im Bereich von einigen Wochen befindet.

Für den Untersuchungszeitraum wurde das Jahr bzw. die Vegetationsperiode (März bis Oktober) 2006 ausgewählt. Die Aufbereitung der Wetterdaten erfolgte allerdings für den Zeitraum 1990 bis 2006. Es ist also jederzeit möglich, die Berechnungen auf eine andere Periode auszudehnen. 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.

3.5 Beschreibung der implementierten Modelle

Die verschiedenen Modelle, welche für die Ertragsermittlung in einer gewissen hierarchischen Reihenfolge Verwendung finden, werden in diesem Abschnitt möglichst kompakt beschrieben, um die in der Folge gezeigten Implementierungsbeispiele einem fachlichen Hintergrund zuordnen zu können. In SCHAUMBERGER (2005) findet sich zu jenen Modellen, die Grundlage der bisherigen Arbeiten waren, eine detaillierte Beschreibung. Modelle, welche im Rahmen vorliegender Arbeit neu entstanden sind, werden dagegen ausführlich erläutert.

3.5.1 Referenz-Evapotranspiration nach Penman-Monteith

Die nach ALLEN *et al.* (1998) implementierte Referenz-Evapotranspiration gilt als Standard für die Berechnung des Wasserbedarfs landwirtschaftlicher Kulturen. Das Modell ist darauf ausgelegt, leicht verfügbare meteorologische Parameter zu verwenden.

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot R_n + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (3.5.1-1)$$

*ET*₀Referenz-Evapotranspiration [mm d⁻¹]
 Δ Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa °C⁻¹]
*R*_nStrahlungsbilanz an der Referenzoberfläche [MJ m⁻² d⁻¹]

γ Psychrometerkonstante [kPa °C⁻¹]
 T Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]
 u_2 Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m s⁻¹]
 e_s Sättigungsdampfdruck [kPa]
 e_a Aktueller Dampfdruck [kPa]

Die Standardhöhe für die Windmessung an meteorologischen Messstationen beträgt 10 Meter über dem Boden. Sie muss für die Verwendung in Gleichung (3.5.1-1) auf eine Höhe von 2 m über Boden korrigiert werden:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 \cdot z - 5.42)} \quad (3.5.1-2)$$

u_2 Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m s⁻¹]
 u_z Windgeschwindigkeit in z m Höhe [m s⁻¹]
 z Messhöhe über dem Boden [m]

Für die Berechnung von R_n , Δ , e_s und γ gilt:

$$R_n = R \cdot 0.52 \quad (3.5.1-3)$$

R_n Strahlungsbilanz an der Referenzoberfläche [MJ m⁻² d⁻¹]
 R Globalstrahlung [MJ m⁻² d⁻¹]

$$\Delta = \frac{4098 \cdot 0.6108 \cdot e^{\frac{17.27 \cdot T}{T+237.3}}}{(T+237.3)^2} \quad (3.5.1-4)$$

Δ Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa °C⁻¹]
 T Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]

$$\gamma = 0.665 \cdot 0.001 \cdot 93 \quad (3.5.1-5)$$

γ Psychrometerkonstante [kPa °C⁻¹]

$$e_s = 6.1078 \cdot e^{\left(\frac{17.08085 \cdot T}{234.175 + T}\right)} \quad (T > 0) \quad (3.5.1-6)$$

$$e_s = 6.1078 \cdot e^{\left(\frac{17.84362 \cdot T}{245.425 + T}\right)} \quad (T < 0) \quad (3.5.1-7)$$

e_s Sättigungsdampfdruck [hPa]
 T Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]

An vielen Messstationen erfolgt keine Erhebung der Globalstrahlung. Da ohne diesen Parameter die Referenz-Evapotranspiration nicht gerechnet werden kann, wird eine näherungsweise Berechnung über den Zusammenhang zwischen Referenz-Evapotranspiration und Sättigungsdefizit ($e_s - e_a$) durchgeführt. Dies ist deshalb wichtig, um die notwendige Anzahl an Stützstellen für die räumliche Interpolation nicht zusätzlich reduzieren zu müssen.

$$ET_0 = a_m \cdot (e_s - e_a)^2 + b_m \cdot (e_s - e_a) + c_m \quad (3.5.1-8)$$

ET_0 Referenz-Evapotranspiration [mm d⁻¹]
 a_m, b_m, c_m Regressionskoeffizienten auf Monatsbasis
 e_s Sättigungsdampfdruck [kPa d⁻¹]
 e_a Aktueller Dampfdruck [kPa d⁻¹]

3.5.2 Modell der Vegetationsperiode

Die Grenzen der Vegetationsperiode werden vereinfacht über die anhaltende Über- bzw. Unterschreitung einer Temperaturgrenze von 2 °C Tagesminimumtemperatur definiert. Voraussetzung dafür sind flächendeckende Temperaturnester in der für jede Zelle der Tag von Beginn und Ende der Vegetationsperiode wie folgt bestimmt wird:

$$Veg_{Beg} = d_i \quad i = 61, \dots, 152 \quad (T_{d_i} > 2 \wedge T_{d_{i+1}} > 2 \wedge T_{d_{i+2}} > 2 \wedge T_{d_{i+3}} > 2 \wedge T_{d_{i+4}} > 2) \quad (3.5.2-1)$$

$$Veg_{End} = d_i \quad i = 244, \dots, 334 \quad (T_{d_i} < 2 \wedge T_{d_{i-1}} < 2 \wedge T_{d_{i-2}} < 2 \wedge T_{d_{i-3}} < 2 \wedge T_{d_{i-4}} < 2) \quad (3.5.2-2)$$

Veg_{Beg} Vegetationsbeginn [d]

Veg_{End} Vegetationsende [d]

d_i Tag des Jahres (März bis Mai und September bis November)

T Tagesminimumtemperatur [°C]

Der Vegetationsbeginn tritt trotz Erfüllung obigen Kriteriums nur dann ein, wenn keine Schneebedeckung gegeben ist, deren Berechnung nachfolgendes Modell ermöglicht.

3.5.3 Modell der Schneebedeckung

Die Modellierung von meteorologischen Phänomenen steht im Spannungsfeld zwischen Komplexität und Genauigkeit. Die Schneebedeckung bildet hier keine Ausnahme, im Gegenteil, sie hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Eine vollständige Abbildung der physikalischen Zusammenhänge von Schneeakkumulation und -schmelze ist vor allem bei einer räumlich differenzierten Anwendung nicht möglich. Die stochastische, auf Niederschlag, Temperatur und potentieller Globalstrahlung beruhende Modellierung von Schnee scheint jedoch eine mit GIS durchaus zu bewältigende Aufgabe zu sein.

Eine Modellierung der räumlichen Verteilung des Schnees kann nicht auf exakte Messergebnisse zurückgreifen und muss deshalb Kompromisse hinsichtlich der Modellkomplexität eingehen. 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 Reduktion auf die wesentlichen Einflussgrößen der Schneeakkumulation und -schmelze sind die großen Herausforderungen für die räumliche Analyse. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Implementierung eines einfachen Modells, welches auf jene Parameter beschränkt bleibt, die mit GIS-Methoden entsprechend aufbereitet werden können. Mit einer täglichen Berechnung der

Fläche mit und ohne Schneebedeckung kann die ermittelte Vegetationsperiode und hier vor allem deren Beginn genauer spezifiziert werden.

Datenbasis sind Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung unter Einbeziehung eines DHM. Die Globalstrahlung wird in Form des potentiellen Energieeintrags in MJ/m² einbezogen. Im Gegensatz zur realen Globalstrahlung werden hier die Wolkenbedeckung und die variierende Transmissivität der Atmosphäre nicht berücksichtigt. Die Strahlungsmenge wird lediglich aufgrund topographischer Bedingungen, Jahres- und Tageszeit, eines statischen Transmissivitätswertes und eines ebenfalls statischen Anteilwertes der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlung bestimmt.

Die Verarbeitung der Daten auf Tagesbasis erfordert eine weitgehende Automatisierung der Berechnungen und damit eine umfangreiche Programmierung. Um der Problematik der variablen Schneedichte auszuweichen, wird sowohl bei der Akkumulation als auch bei der Schmelze lediglich mit dem Wasseräquivalent des Schnees gearbeitet, wodurch Aussagen über die Schneehöhe nur bedingt möglich sind. Der zu betrachtende Zeitraum erstreckt sich pro Berechnungsperiode auf sechs Monate (November bis April) mit jeweils täglichen Ergebnissen.

3.5.3.1 Berechnung der täglichen Schneemenge

Eine geeignete Kombination von Temperatur und Niederschlag führt zu Schnee. Der Temperaturschwellwert beträgt analog dem Modell von CAZORZI and DELLA FONTANA (1996) 0,5 °C. Um die Temperaturen im Tagesverlauf möglichst gut abbilden zu können, wird zwischen Tages- (3.5.3-1) und Nachtmittel (3.5.3-2) unterschieden. Eine höhere zeitliche Auflösung wäre zwar wünschenswert, auf Grund der begrenzten technischen Möglichkeiten sowie fehlender Messwerte jedoch praktisch nicht durchführbar. Die Mittelwerte werden aus folgenden Messwerten gebildet (Indexzahlen geben den Zeitpunkt der Messung an):

$$T_{day_i} = \frac{T_{7_i} + T_{14_i} + T_{19_i} + T_{max_i}}{4} \quad (3.5.3-1)$$

T_{day} Tagesmitteltemperatur [°C]
 T_7, T_{14}, T_{19} Zeitbezogene Temperaturmessungen [°C]
 T_{max} Temperaturmaximum des aktuellen Tages [°C]

$$T_{night_i} = \frac{T_{19_i} + T_{7_{i+1}} + T_{min_{i+1}}}{3} \quad (3.5.3-2)$$

T_{night} Nachtmitteltemperatur [$^{\circ}C$]
 T_{19}, T_7 Zeitbezogene Temperaturmessungen [$^{\circ}C$]
 T_{min} Temperaturminimum des aktuellen Tages [$^{\circ}C$]

Da die Temperatur einen starken Zusammenhang mit der Seehöhe aufweist, muss dieser höhenabhängige Anteil vor der Interpolation der jeweiligen Stationsmessdaten abgespalten werden, um Interpolationsfehler so gering wie möglich zu halten. Dazu wird mittels linearer Regression eine Trendgerade ermittelt, welche den minimalen Abstand zu allen Messungen in unterschiedlicher Seehöhe darstellt. Die verbleibenden täglichen Residuen an den Stationen werden dann einer räumlich-statistischen Interpolation zugeführt. Damit entsteht ein flächendeckender Datensatz der interpolierten Residuen.

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 (siehe *Abbildung 6*), 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.

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. 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 (siehe *Abbildung 7*). Damit werden 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 Verwendung der Monatsmittelwerte hat einerseits praktische Gründe hinsichtlich der technischen Realisierung und andererseits werden dadurch die räumlich bedingten täglichen Unterschiede in der Höhenabhängigkeit geglättet. Eine genaue Verifizierung

dieses Ansatzes würde den Einsatz zahlreicher Messstationen bedingen und wurde in der vorliegenden Arbeit nur indirekt über die Endergebnisse durchgeführt.

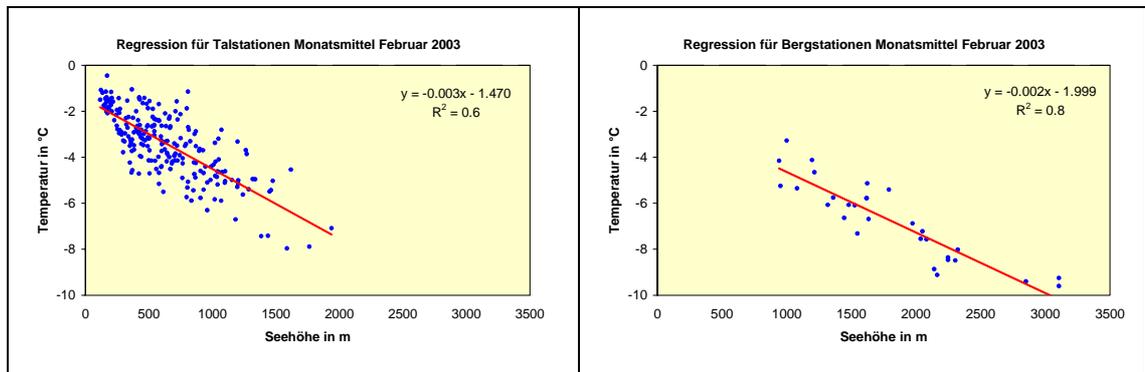


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Temperatur und Seehöhe getrennt nach Stationen im Tal- und Berggebiet am Beispiel der Stationsmittelwerte im Februar 2003

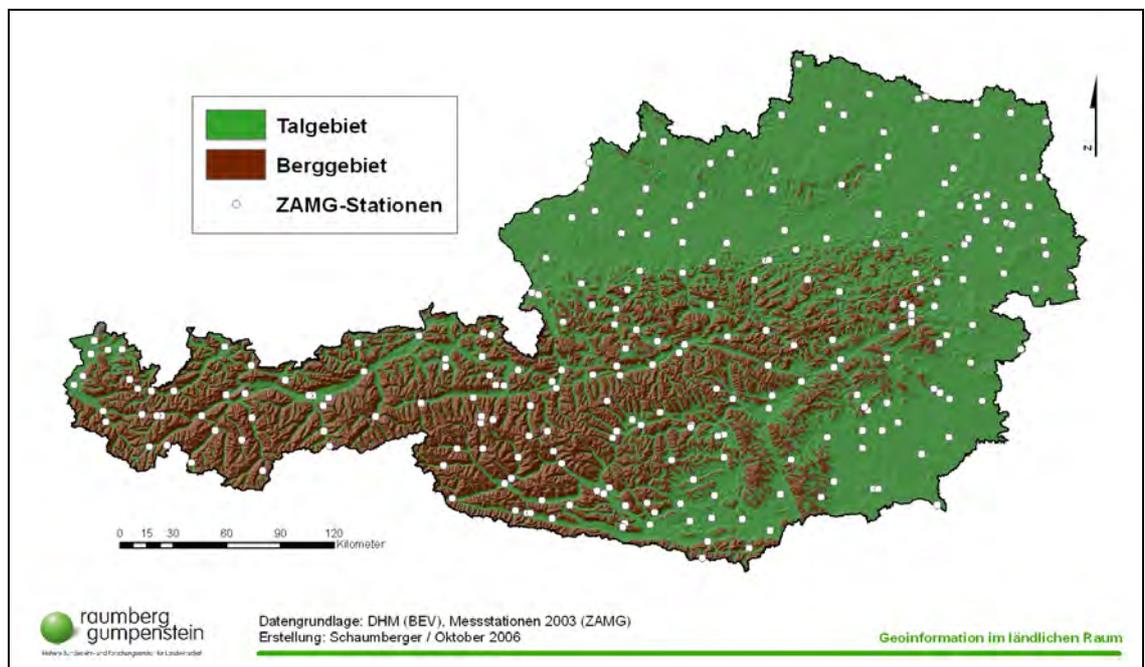


Abbildung 7: Klassifizierung von Tal- und Berggebiet für die Temperaturinterpolation

Die Regressionen werden monatsweise jeweils für Tal- und Berggebiet sowie für Tag und Nacht gebildet und daraus die täglichen Residuen an den Stationsmesswerten berechnet. 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, da für 360 Interpolationen pro Rechenperiode ein manueller Eingriff nicht denkbar ist. 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. In beiden Fällen beträgt die verwendete Rasterauflösung 500 Meter.

Nachdem die täglichen Residuen der Messwerte flächendeckend interpoliert worden sind, muss auch der höhenabhängige Anteil der Temperatur in die Fläche gerechnet werden (3.5.3-3). Dies lässt sich sehr einfach durch die Einbeziehung der Höhenwerte aus dem DHM als unabhängige Variable (*elev*) durchführen.

$$T_{elev_j} = a_j * elev + b_j \quad (3.5.3-3)$$

T_{elev}Oberfläche der Monatsmitteltemperaturen [°C]
a_j, b_jRegressionskoeffizienten auf Monatsbasis
elevSeehöhe aus DHM [m]

Durch Addition des täglichen Residueninterpolationsraster (*T_{res}*) und des dazugehörigen monatlichen Temperatur-Höhen-Rasters (*T_{elev}*) entsteht eine Temperaturoberfläche auf Tagesbasis, getrennt nach Tal- und Berggebiet (*M_V*, *M_{Mt}*), die in dieser Rechenphase zusammengezogen werden, sowie Tag und Nacht in der DHM-Auflösung von 50 Meter.

$$T_{raster_i} = (T_{elevV_j} + T_{resV_i}) * M_V + (T_{elevMt_j} + T_{resMt_i}) * M_{Mt} \quad (3.5.3-4)$$

T_{raster}Temperaturoberfläche auf Tagesbasis [°C]
T_{elevV}Oberfläche der Monatsmitteltemperatur für Talgebiet [°C]
T_{elevMt}Oberfläche der Monatsmitteltemperatur für Berggebiet [°C]
T_{resV}Oberfläche der Temperaturresiduen für Talgebiet auf Tagesbasis [°C]
T_{resMt}Oberfläche der Temperaturresiduen für Berggebiet auf Tagesbasis [°C]
M_V, M_{Mt}Maske für Tal- und Berggebiet [0,1]

Das Ergebnis dieses Schrittes (3.5.3-4) sind zwei Raster (*T_{raster}*) für die Temperaturoberfläche des Tages- und des Nachtmittels, die unter Verwendung des Schwellwertes von 0,5 °C binär reklassifiziert (*T_{rec}*) werden. Temperaturen <= 0,5 °C werden durch den Wert 1 ersetzt, alle anderen Werte nehmen 0 an.

In weiterer Folge wird der Niederschlag an den Messstationen der ZAMG und des HZB wie die Temperaturresiduen mit der Methode Ordinary Kriging interpoliert. Um die unterschiedlichen Temperaturegebnisse 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 Verschneidung mit dem reklassifizierten Temperaturraster bleiben nur jene Flächen erhalten, die Schneefall aufweisen. Tages- und Nachtschneefall werden anschließend zu einem Gesamtschneefallraster addiert (3.5.3-5).

$$Snow_i = (N_{day_i} * T_{recDay_i}) + (N_{night_i} * T_{recNight_i}) \quad (3.5.3-5)$$

SnowOberfläche mit Schneebedeckung in Wasseräquivalent auf Tagesbasis [mm]
N_{day}Oberfläche des Tagesniederschlags [mm]
N_{night}Oberfläche des Nachtniederschlags [mm]
T_{recDay}Gebiet mit Temperaturbedingungen für Schneefall am Tag [°C]
T_{recNight}Gebiet mit Temperaturbedingungen für Schneefall in der Nacht [°C]

3.5.3.2 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 and DELLA 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 (3.5.3-4) für Tag und Nacht einbezogen. Daneben hat der Strahlungsenergieeintrag in Form der potentiell verfügbaren Globalstrahlung in MJ/m² (*Rad*) für die Bestimmung der Schmelze eine große Bedeutung. Diese Daten stammen aus der Berechnung mit dem Solar Analyst 1.0 (FU and RICH, 1999).

Die Modellgleichungen für die Schmelze werden nach CAZORZI and DELLA FONTANA (1996) für Tag und Nacht unterschiedlich angesetzt:

$$Melt_{day_i} = CMF * Rad_i * T_{rasterDay_i} \quad (T_{rasterDay_i} \geq 0) \quad (3.5.3-6)$$

Melt_{day}Oberfläche der Schneeschmelze während des Tages [mm]
CMFKalibrierungsfaktor (konstanter Wert von 0,24) in [mm]
RadOberfläche der potentiellen Globalstrahlung [MJ m⁻² d⁻¹]
T_{rasterDay}Oberfläche der Temperatur während des Tages [°C]

$$Melt_{night_i} = CMF * T_{rasterNight_i} \quad (T_{rasterNight_i} \geq 0) \quad (3.5.3-7)$$

Melt_{night}Oberfläche der Schneeschmelze während der Nacht [mm]
CMFKalibrierungsfaktor (konstanter Wert von 0,24) [mm]
T_{rasterNight}Oberfläche der Temperatur während der Nacht [°C]

Die Schmelzrate (mm) in der Nacht (*Melt_{night}*) sinkt im Vergleich zu jener während des Tages (*Melt_{day}*), da hier die Strahlungsenergie vernachlässigt werden kann (3.5.3-7). Der Energietransfer in dieser Zeit wird durch die Lufttemperatur in ausreichender Genauig-

keit repräsentiert. Der für das Modell signifikante Kalibrierungsfaktor CMF (Combined melt factor) wurde von CAZORZI and DELLA 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 and DELLA 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 eigenen 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 and DELLA 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 $Melt_{day}$ bedeutet dies eine Umrechnung des Stundenwertes auf einen Tageswert (12 Stunden) und ergibt damit $0,24 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ Rad}^{-1}$.

3.5.3.3 Berechnung der Schneeakkumulation

Nachdem alle Faktoren der Schneebildung und -schmelze berechnet sind, wird die Differenz zwischen diesen beiden Werten gebildet (3.5.3-8). Es entsteht ein Rasterdatensatz, der die Schneebilanz als Wasseräquivalent in mm des aktuell berechneten Tages darstellt.

$$SC_i = Snow_i - (Melt_{day_i} + Melt_{night_i}) \quad (3.5.3-8)$$

SC Oberfläche der Neuschneebildung auf Tagesbasis [mm]

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.

$$AccSnow = SC_{i-1} + SC_i \quad (3.5.3-9)$$

AccSnow Oberfläche der akkumulierten Schneemenge in Wasseräquivalent [mm]

Die effiziente Verarbeitung der großen Datenmenge erfordert ein entsprechend umfangreiches und komplexes Programm zur Durchführung der Berechnungen.

3.5.4 Modell der Schnitthäufigkeit und des Schnittzeitpunktes

Der Zeitpunkt für die Grünlandnutzung hängt sowohl von Standort- als auch Bewirtschaftungsfaktoren ab. Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Quantität und Qualität des Grünlandertrages wird bei einer Nutzung im Vegetationsstadium „Ähren- und Rispschieben“ erreicht und hängt von den klimatischen Bedingungen, der Pflanzenbestandszusammensetzung und den Bewirtschaftungsmaßnahmen des Landwirtes ab (BUCHGRABER, 2004, 56f). Eine Modellierung ist aus diesem Grund nur näherungsweise möglich.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz geht von der potentiell zur Verfügung stehenden Vegetationsdauer aus. Diese wird vereinfacht über das in Abschnitt 3.5.2 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 potentiell zur Verfügung stehende Vegetationszeit bzw. Nutzungsperiode über eine entsprechende Anzahl an Wachstumstagen verfügen. Durch den engen Zusammenhang von Temperatur und Seehöhe nimmt die Anzahl dieser Tage in höheren Lagen ab. 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 8* zeigt diesen 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.

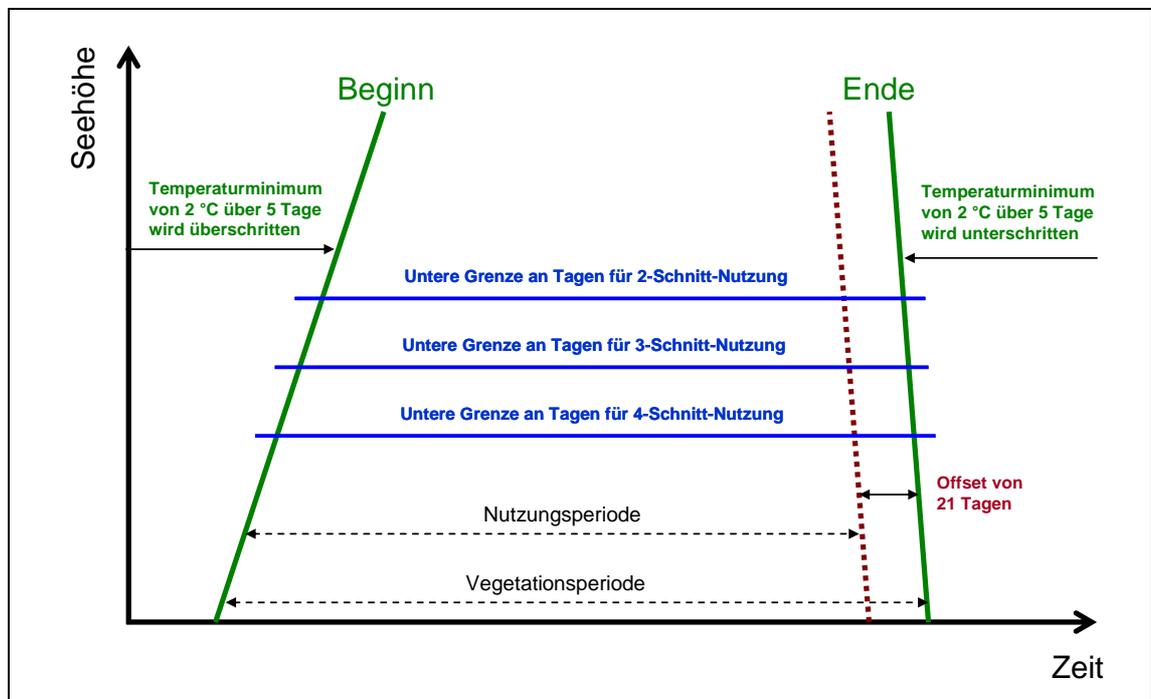


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Modellierung von Vegetations- und Nutzungsperiode

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, 2004, 53).

In *Abbildung 9* 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.

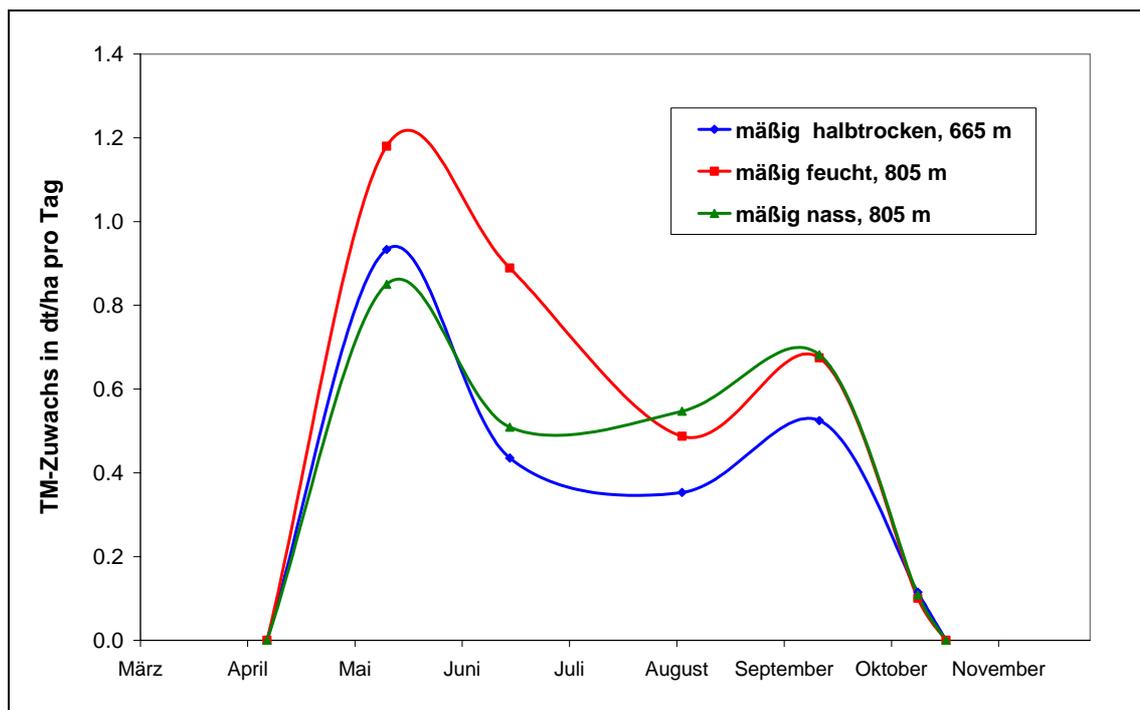


Abbildung 9: Wachstumsverlauf auf Mähweiden in Abhängigkeit des Wasserhaushalts (Quelle: BOHNER, 2003)

An der HBLFA 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 wurden zur Berechnung theoretischer Schnitttermine in den für eine bestimmte Schnitthäufigkeit definierten Bereich herangezogen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass innerhalb eines Nutzungsbereiches der Schnitttermin dynamisch auf die Veränderungen der zur Verfügung stehenden Nutzungsperiode reagieren kann. Das Schema dieses Ansatzes ist in *Abbildung 10* dargestellt.

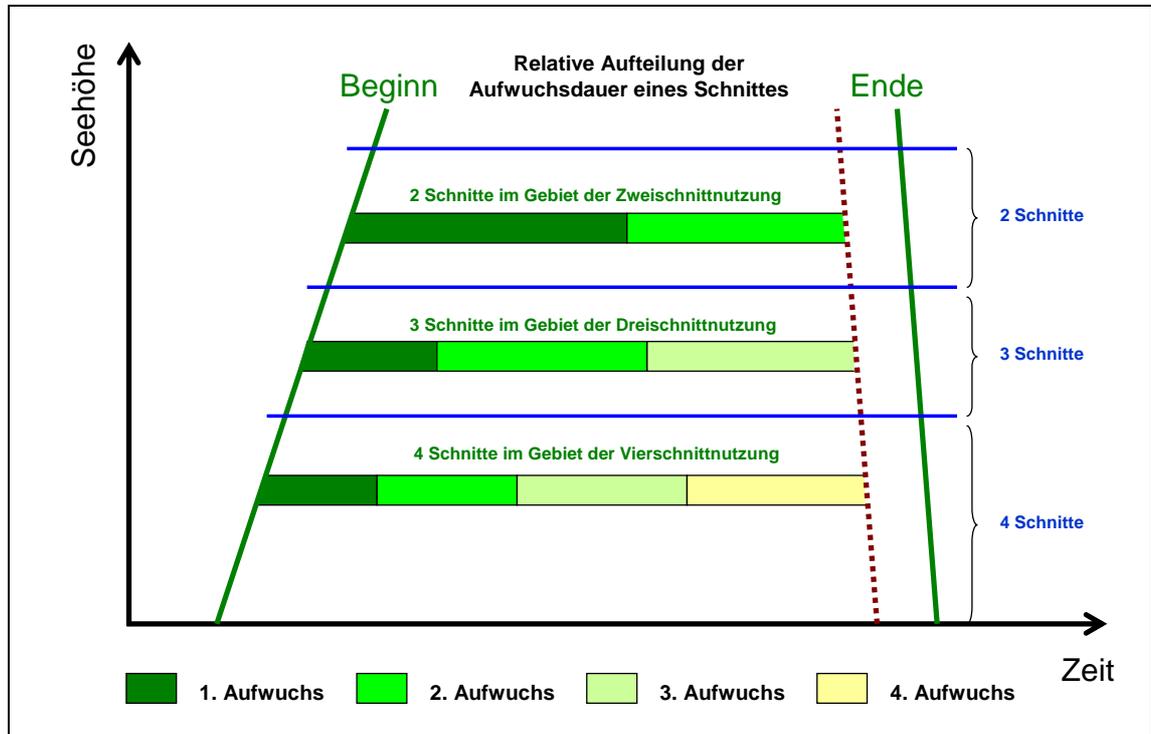


Abbildung 10: Relative Verteilung der Aufwuchszeiten und daraus ableitbarer Schnitttermine

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

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

3.5.5 Bodenwasserbilanzmodell

Das Bodenwasserbilanzmodell stellt das zentrale Modell im Vorfeld des eigentlichen Ertragmodells (GRAM) dar und wurde im Rahmen der Vorarbeiten vom Projektpartner an der Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie nach dem FAO-Bodenwasserbilanzmodell (ALLEN *et al.*, 1998) zusammengestellt.

Bodenschicht 0 – 10 cm:

$$E_i = K_e \cdot ET_0 \quad (3.5.5-1)$$

E_i Evaporation am Tag i [mm]
 K_e Bodenevaporationskoeffizient [0.2]
 ET_0 Referenz-Evapotranspiration [$mm\ d^{-1}$]

$$DP_{i,10} = (P_i - I_i) - E_i - D_{r,i-1,10} \quad (DP_{i,10} \geq 0) \quad (3.5.5-2)$$

$DP_{i,10}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-10 cm [mm]
 P_i Niederschlag am Tag i [mm]
 I_i Interzeption am Tag i [mm]
 E_i Evaporation am Tag i [mm]
 $D_{r,i-1,10}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 0-10 cm, Startwert 0 [mm]

$$D_{r,i,10} = D_{r,i-1,10} - (P_i - I_i) + E_i + DP_{i,10} \quad (3.5.5-3)$$

$D_{r,i,10}$ Bodenwasserabsenkung am Tag i für 0-10 cm [mm]
 $D_{r,i-1,10}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 0-10 cm, Startwert 0 [mm]
 P_i Niederschlag am Tag i [mm]
 I_i Interzeption am Tag i [mm]
 E_i Evaporation am Tag i [mm]
 $DP_{i,10}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-10 cm [mm]

Bodenschicht 0 – 20 cm:

$$TAW_{i,20} = 1000 \cdot nFK_{20} \cdot Z_r \quad (3.5.5-4)$$

$TAW_{i,20}$ Bodenwasserspeicher am Tag i für 0-20 cm [mm]
 nFK_{20} Nutzbare Feldkapazität für 0-20 cm [$cm^3\ cm^{-3}$]
 Z_r Bodentiefe [0.2]

$$RAW_{i,20} = TAW_{i,20} \cdot p \quad (3.5.5-5)$$

$RAW_{i,20}$ Verfügbarer Bodenwassergehalt am Tag i für 0-20 cm [mm]
 $TAW_{i,20}$ Bodenwasserspeicher am Tag i für 0-20 cm [mm]
 p Fraktionsfaktor [0.65]

$$K_s = \frac{TAW_{i,20} - D_{r,i-1,20}}{TAW_{i,20} - RAW_{i,20}} \quad (3.5.5-6)$$

K_s Transpirationsreduktionsfaktor [0-1]
 $TAW_{i,20}$ Bodenwasserspeicher am Tag i für 0-20 cm [mm]
 $D_{r,i-1,20}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 0-20 cm, Startwert 0 [mm]
 $RAW_{i,20}$ Verfügbarer Bodenwassergehalt am Tag i für 0-20 cm [mm]

$$ET_{c,adj,20} = K_s \cdot K_{cb} \cdot ET_0 \cdot pf_{20} \quad (3.5.5-7)$$

$ET_{c,adj,20}$ Aktuelle Evapotranspiration für 0-20 cm [$mm\ d^{-1}$]
 K_s Transpirationsreduktionsfaktor [0-1]
 K_{cb} Pflanzenfaktor [0.8-1.15]

ET_0 Referenz-Evapotranspiration [mm d⁻¹]
 pf_{20} Proportionalitätsfaktor für 0-20 cm [0.8]

$$DP_{i,20} = DP_{i,10} - ET_{c,adj,20} - D_{r,i-1,20} \quad (DP_{i,20} \geq 0) \quad (3.5.5-8)$$

$DP_{i,20}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-20 cm [mm]
 $DP_{i,10}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-10 cm [mm]
 $ET_{c,adj,20}$ Transpirationsreduktionsfaktor für 0-20 cm [mm d⁻¹]
 $D_{r,i-1,20}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 0-20 cm, Startwert 0 [mm]

$$D_{r,i,20} = D_{r,i-1,20} - DP_{i,10} + ET_{c,adj,20} + DP_{i,20} \quad (3.5.5-9)$$

$D_{r,i,20}$ Bodenwasserabsenkung am Tag i für 0-20 cm [mm]
 $D_{r,i-1,20}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 0-20 cm, Startwert 0 [mm]
 $DP_{i,10}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-10 cm [mm]
 $ET_{c,adj,20}$ Transpirationsreduktionsfaktor für 0-20 cm [mm d⁻¹]
 $DP_{i,20}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-20 cm [mm]

Bodenschicht 20 – 40 cm:

$$TAW_{i,40} = 1000 \cdot nFK_{40} \cdot Z_r \quad (3.5.5-10)$$

$TAW_{i,40}$ Bodenwasserspeicher am Tag i für 20-40 cm [mm]
 nFK_{40} Nutzbare Feldkapazität für 20-40 cm [cm³ cm⁻³]
 Z_r Bodentiefe [0.2]

$$RAW_{i,40} = TAW_{i,40} \cdot p \quad (3.5.5-11)$$

$RAW_{i,40}$ Verfügbarer Bodenwassergehalt am Tag i für 20-40 cm [mm]
 $TAW_{i,40}$ Bodenwasserspeicher am Tag i für 20-40 cm [mm]
 p Fraktionsfaktor [0.65]

$$K_s = \frac{TAW_{i,40} - D_{r,i-1,40}}{TAW_{i,40} - RAW_{i,40}} \quad (3.5.5-12)$$

K_s Transpirationsreduktionsfaktor [0-1]
 $TAW_{i,40}$ Bodenwasserspeicher am Tag i für 20-40 cm [mm]
 $D_{r,i-1,40}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 20-40 cm, Startwert 0 [mm]
 $RAW_{i,40}$ Verfügbarer Bodenwassergehalt am Tag i für 20-40 cm [mm]

$$ET_{c,adj,40} = K_s \cdot K_{cb} \cdot ET_0 \cdot pf_{40} \quad (3.5.5-13)$$

$ET_{c,adj,40}$ Aktuelle Evapotranspiration für 20-40 cm [mm d⁻¹]
 K_s Transpirationsreduktionsfaktor [0-1]
 K_{cb} Pflanzenfaktor [0.8-1.15]
 ET_0 Referenz-Evapotranspiration [mm d⁻¹]
 pf_{40} Proportionalitätsfaktor für 20-40 cm [0.2]

$$DP_{i,40} = DP_{i,20} - ET_{c,adj,40} - D_{r,i-1,40} \quad (DP_{i,40} \geq 0) \quad (3.5.5-14)$$

$DP_{i,40}$ Tiefenversickerung am Tag i für 20-40 cm [mm]
 $DP_{i,20}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-20 cm [mm]
 $ET_{c,adj,40}$ Transpirationsreduktionsfaktor für 20-40 cm [mm d⁻¹]
 $D_{r,i-1,40}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 20-40 cm, Startwert 0 [mm]

$$D_{r,i,40} = D_{r,i-1,40} - DP_{i,20} + ET_{c,adj,40} + DP_{i,40} \quad (3.5.5-15)$$

$D_{r,i,40}$ Bodenwasserabsenkung am Tag i für 20-40 cm [mm]
 $D_{r,i-1,40}$ Bodenwasserabsenkung am Vortag von i für 20-40 cm, Startwert 0 [mm]
 $DP_{i,20}$ Tiefenversickerung am Tag i für 0-20 cm [mm]
 $ET_{c,adj,40}$ Transpirationsreduktionsfaktor für 20-40 cm [mm d⁻¹]
 $DP_{i,40}$ Tiefenversickerung am Tag i für 20-40 cm [mm]

3.5.6 Grassland Statistical Model (GRAM)

Die Ertragsberechnung beruht auf einem statistischen Modell, das mit Daten aus Ertragsmessungen an 27 in ganz Österreich verteilten Standorten seit dem Jahr 2002 kalibriert wurde. An diesem Modell wird nach wie vor intensiv gearbeitet und Verbesserungen aus den vorgelagerten Modellen eingebracht bzw. durch iterative Kalibrierung weiterentwickelt. Das Modell wird in TRNKA *et al.* (2006) genau beschrieben, sodass hier nur die Modellgleichungen angeführt werden, deren Ergebnisse in eine multiple Regressionsgleichung zusammen mit den anderen Inputdaten (siehe *Abbildung 3*) einfließen.

$$W_L = t_{CL} \frac{ET_{aSE}}{ET_{0SE}} \quad (3.5.6-1)$$

W_L Langfristiger Wasserverfügbarkeitsfaktor [$mm\ mm^{-1}$]
 t_{CL} Grenzwert der langfristigen Wasserverfügbarkeit [2.0]
 ET_{aSE} Akkumulierte aktuelle Evapotranspiration vom Vegetationsbeginn [mm]
 ET_{0SE} Akkumulierte Referenz-Evapotranspiration vom Vegetationsbeginn [mm]

$$W_S = t_{CS} \frac{ET_{aW}}{ET_{0W}} \quad (3.5.6-2)$$

W_S Kurzfristiger Wasserverfügbarkeitsfaktor [$mm\ mm^{-1}$]
 t_{CS} Grenzwert der kurzfristigen Wasserverfügbarkeit [2.0]
 ET_{aW} Akkumulierte aktuelle Evapotranspiration der letzten 6 Tage [mm]
 ET_{0W} Akkumulierte Referenz-Evapotranspiration der letzten 6 Tage [mm]

$$W_A = [C \cdot W_L^M + (1 - C) \cdot W_S^M]^{1/M} \quad (3.5.6-3)$$

W_A Wasserverfügbarkeit [$mm\ mm^{-1}$]
 C Modellkoeffizient [0.55]
 M Modellkoeffizient [3.0]
 W_L Langfristiger Wasserverfügbarkeitsfaktor [$mm\ mm^{-1}$]
 W_S Kurzfristiger Wasserverfügbarkeitsfaktor [$mm\ mm^{-1}$]

$$g_S = \exp^{\alpha \cdot \exp^{\beta W_A^\gamma}} \quad (3.5.6-4)$$

g_S Wachstumsfaktor [0-1]
 α Modellkoeffizient [-2.9]
 β Modellkoeffizient [-2.1]
 γ Modellkoeffizient [8.0]
 W_A Wasserverfügbarkeit [$mm\ mm^{-1}$]

$$T_e = \int_{t_0}^{t_n} T_{AVG} \cdot g_S \cdot dt \quad (3.5.6-5)$$

T_e Effektive Temperatur (Akkumulation über Zeitraum t)
 T_{AVG} Mitteltemperatur [$^{\circ}C$]
 g_S Wachstumsfaktor [0-1]

$$G_e = \int_{t_0}^{t_n} R_G \cdot g_S \cdot dt \quad (3.5.6-6)$$

G_e Effektive Globalstrahlung (Akkumulation über Zeitraum t)
 R_G Globalstrahlung [$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$]
 g_S Wachstumsfaktor [0-1]

3.6 Ertragserhebung zur Ergebnisvalidierung

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

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 heimatlichen Betriebes die Erhebungen durchzuführen. Von der HBLFA 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 Formularmappe, 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 11*). 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 Ertragmodells 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 (2007) 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 3.2.3 beschrieben, wird die Fläche für Ergebnisse aus dem Ertragsmodell durch die räumliche Abgrenzung verfügbarer Werte der nutzbaren Feldkapazität sowie der räumlich beschränkten Anwendung des Düngermodells reduziert. In *Abbildung 11* sind jene Gebiete, welche letztlich für den Vergleich von Ertragsmodell und Ertragsmessung zur Verfügung stehen, blau dargestellt.

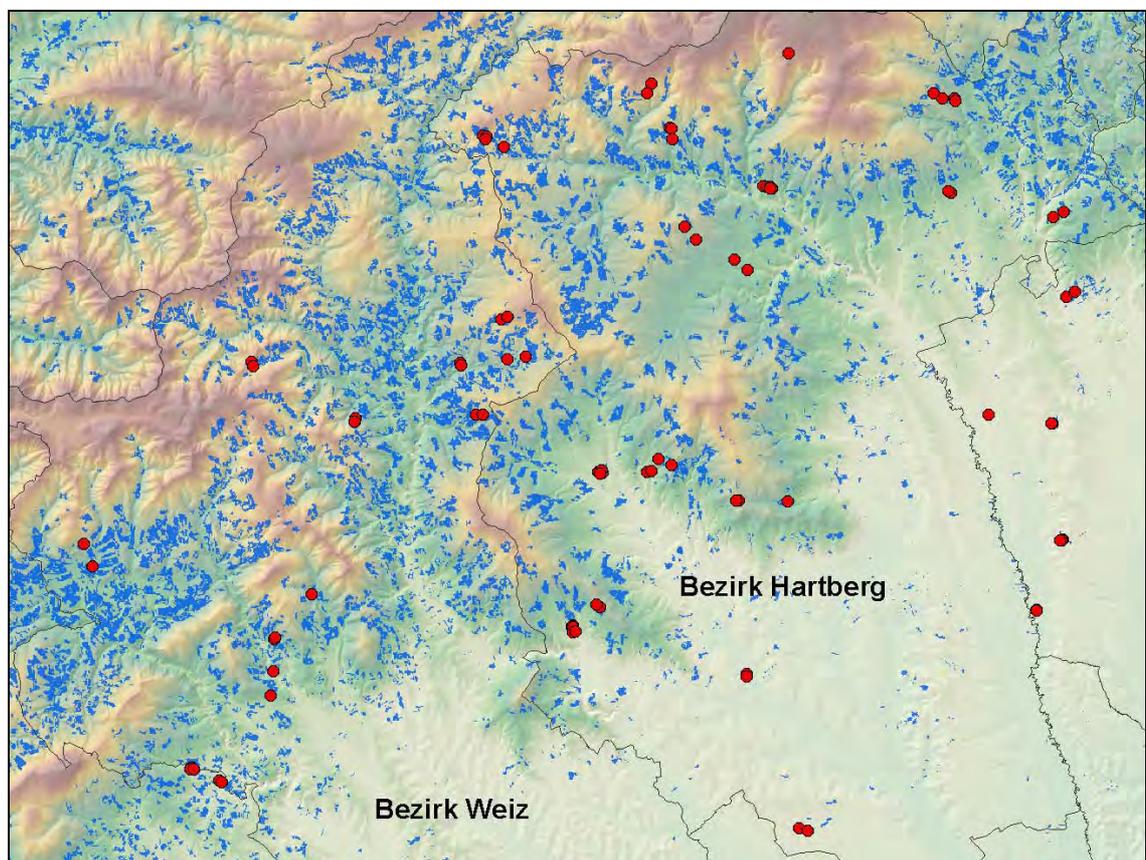


Abbildung 11: Standorte der Ertragsmessungen im Raum Hartberg

Von den ursprünglich 317 Ertragsdaten können durch diese räumliche Einschränkung nur noch 94 herangezogen werden, jene also, die sich auf Flächen beziehen, deren Ertrag auch mit Hilfe des Ertragsmodells berechnet werden kann. Künftige Modellerweiterungen werden die Verwendbarkeit der erhobenen Daten verbessern.

3.7 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.

3.7.1 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 Wertzuweisungen 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.

3.7.2 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 verfolgt. 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 Speicherbereinigung (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 12* dargestellt sind und die obigen Aussagen grafisch zusammenfassen.

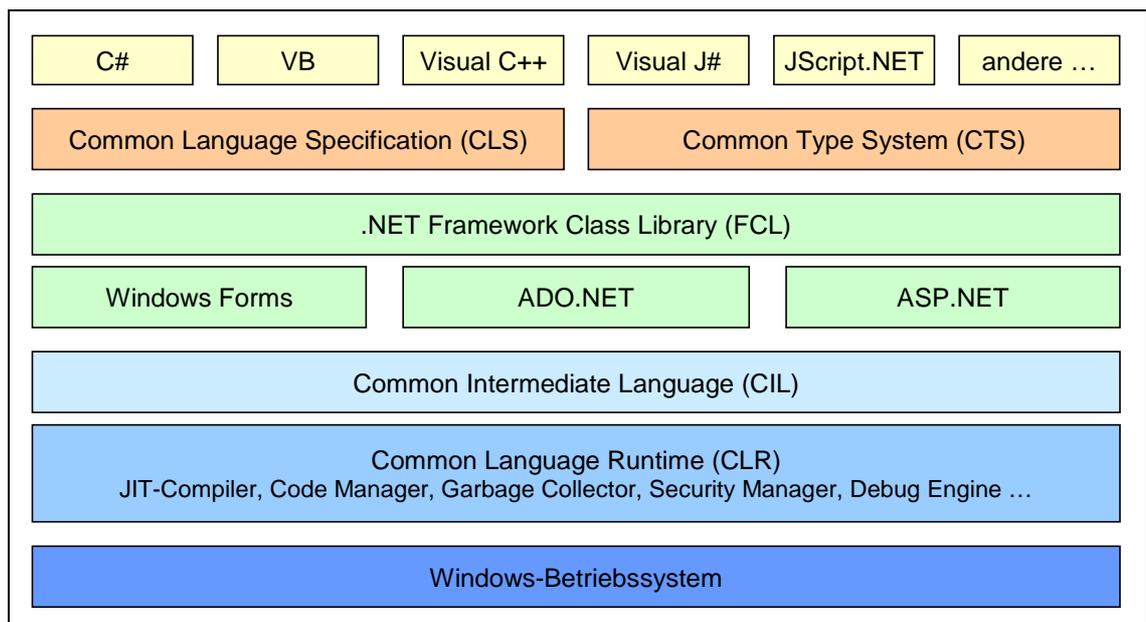


Abbildung 12: Grobarchitektur des .NET-Frameworks

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.

3.8 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 eingezeichnet 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 er-

zeugt 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 Arc-Objects 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.

4. Implementierung

Die Weiterentwicklung und Verbesserung der Modelle zur Bestimmung des Grünland-ertrages wird im Projekt „Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen“ intensiv verfolgt. Viele der bereits dargestellten Modelle arbeiten auf Tagesbasis und müssen über längere Zeiträume akkumuliert werden. Es entstehen viele Geodaten in Form von kontinuierlichen Oberflächen, die erst nach intensiven Rechenprozeduren und durch geeignete Kombination Ergebnisse für die Evaluierung von eingebrachten Änderungen liefern.

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 die Modellweiterentwicklung darstellt. Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit bestand darin, ein solches Werkzeug für die weitere Projektarbeit zur Verfügung zu stellen. Dabei entstanden 12 Programmpakete (Namensräume), welche insgesamt 40 Klassen mit 228 Methoden enthalten und in über 6000 Lines Of Code (LOC) codiert wurden.

4.1 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 13* stellt das Strukturdiagramm in UML-

Paketdiagrammnotation dar. 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.

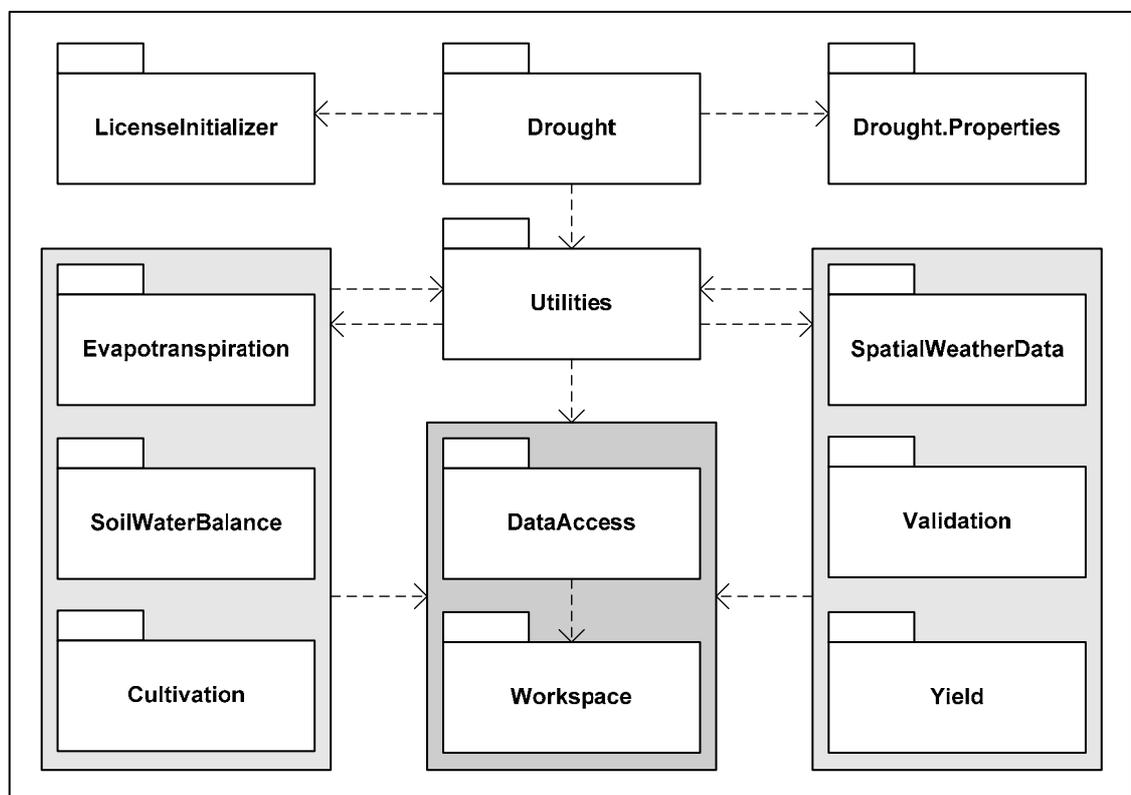


Abbildung 13: Paketdiagramm des modellierten Systems

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).

4.2 Programmablauf

In *Abbildung 13* 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. Das Ablaufdiagramm in *Abbildung 14* 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 Kapitel *Material und Methoden* theoretisch beschrieben. Auf die jeweilige Implementierung wird hier nicht in vollem Umfang eingegangen, sondern die technische Umsetzung nur an Hand ausgewählter Beispiele gezeigt.

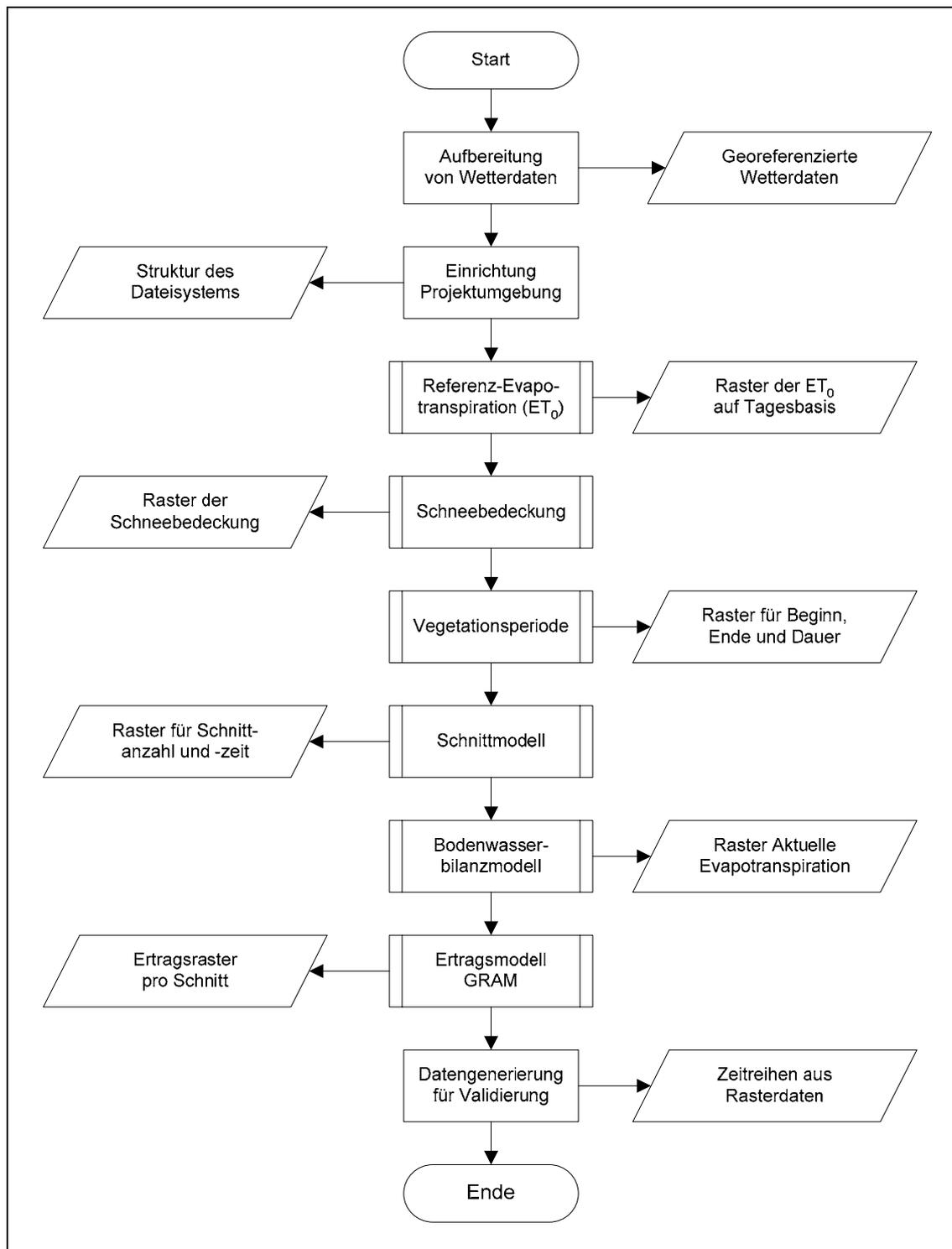


Abbildung 14: Vereinfachtes Ablaufdiagramm des Gesamtsystems

4.3 Datenzugriff

Wie bereits in *Abbildung 13* ersichtlich, 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 *SdeWorkspaceFactoryClass()* als Implementierung der abstrakten CoKlasse *WorkspaceFactory*). Diesem *WorkspaceFactory*-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 Schnittstelle *IWorkspace* kompatibel.

Diese Objektverflechtung ist die Voraussetzung für die in *Abbildung 15* als Klassendiagramm in UML-Notation dargestellte Implementierungsvariante.

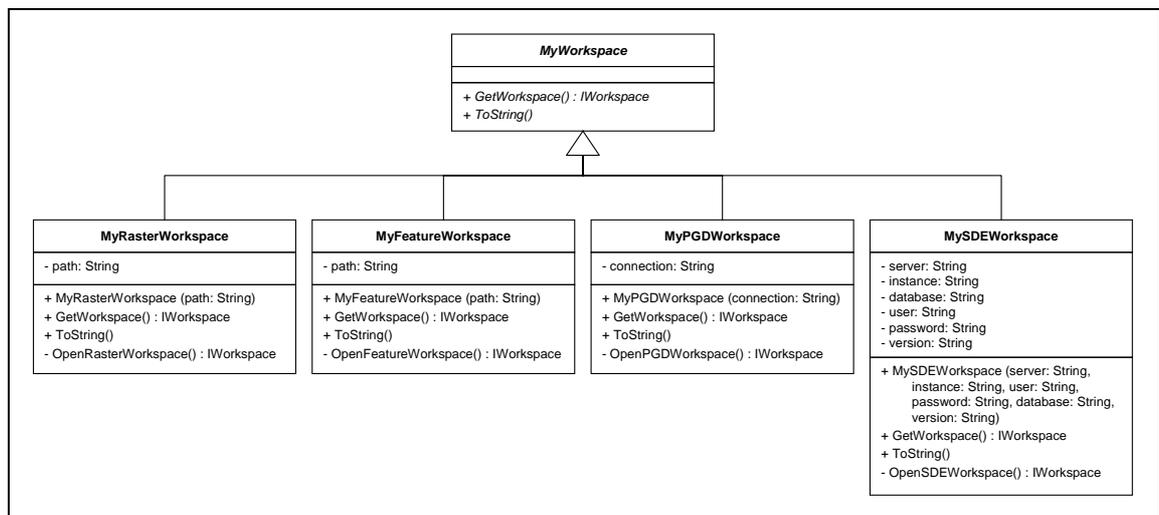


Abbildung 15: Klassendiagramm des Paketes Workspace

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* ererbenden 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 16* zeigt das Klassendiagramm in UML-Notation im dafür eingerichteten Programmpaket und auch die Verknüpfung zum Paket *Workspace*.

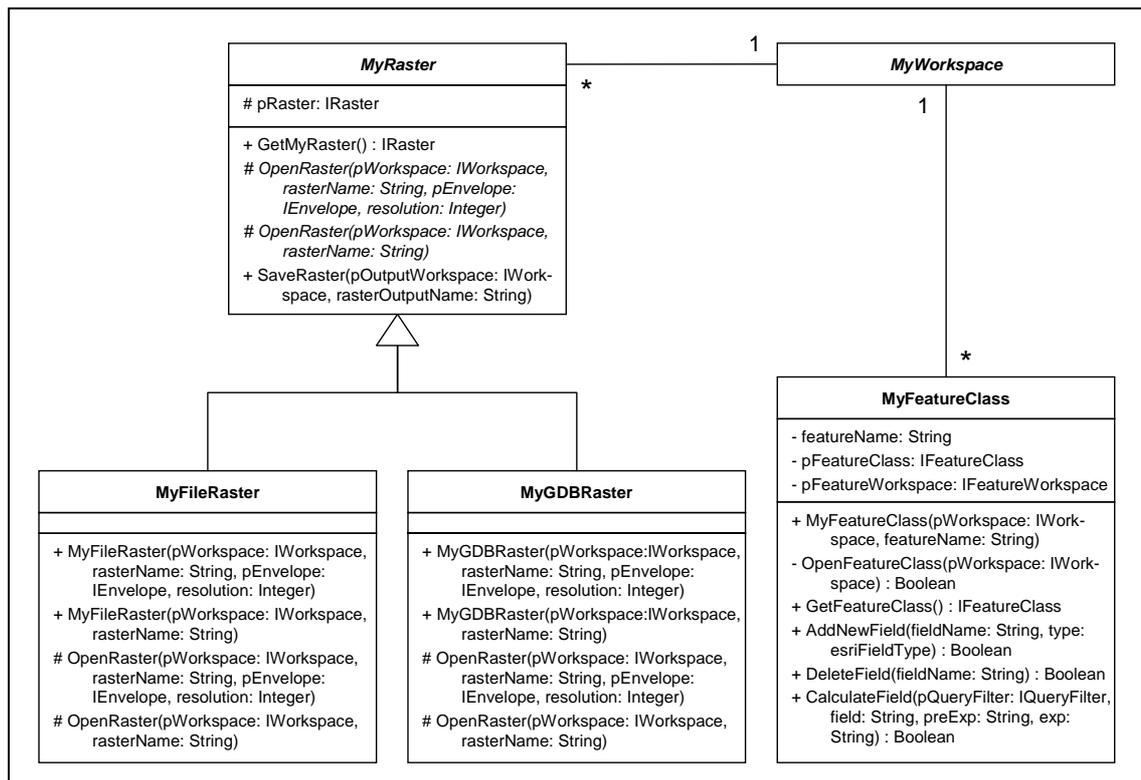


Abbildung 16: Klassendiagramm des Paketes DataAccess

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 Auflösungswert 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 Featurodaten entspricht in etwa den Operationen für Rasterdaten. Über den Konstruktor werden die Parameter für Workspace und Datei- bzw. Tabellennamen übergeben, die Featurodatei 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(XXX)* eine Abfrage auf bestimmte Datensätze erfolgen (QueryFilter) – im Beispiel wird mit *null* keine Einschränkung vorgenommen.

4.4 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.

Der Zusammenhang zwischen zwei Variablen wird z.B. bei der Berechnung der Evapotranspiration an Messstationen ohne Globalstrahlungsmessung dazu verwendet, um aus dem Sättigungsdefizit (Differenz aus aktuellem Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck – VPD (Vapour pressure difference)) direkt auf den Evapotranspirationswert zu schließen. *Abbildung 17* 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.

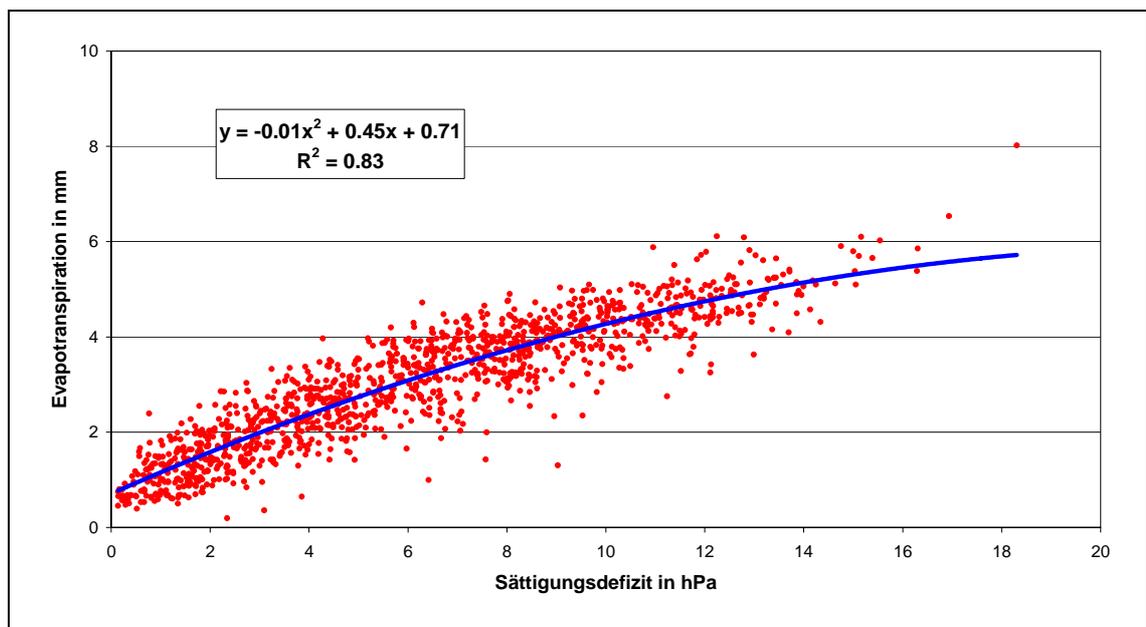


Abbildung 17: Zusammenhang von Evapotranspiration und Sättigungsdefizit an den Messstationen der ZAMG im Mai 2000

Ausgangspunkt für die technische Umsetzung bildet die Modellgleichung 3.5.1-8, für die eine quadratische Regressionsrechnung erforderlich ist. 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.

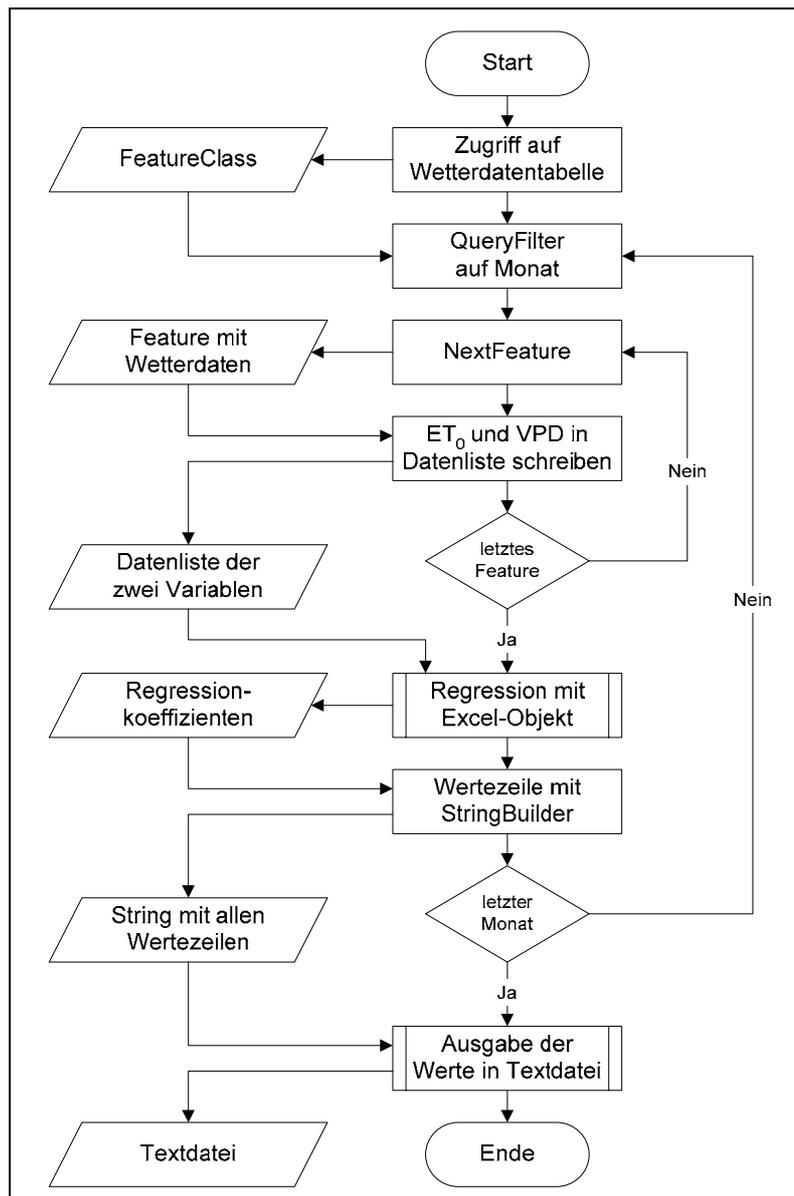


Abbildung 18: Ablaufdiagramm Regressionsberechnung

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. 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.

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 beispielsweise 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 Werkzeug. 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 Wertelistenaufbau 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.

4.5 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.

Der Pflanzenfaktor im Rasterdatenmodell

Den fachlichen Hintergrund bildet die Berechnung des Pflanzenfaktors (K_{cb}) für die Modellgleichungen 3.5.5-7 und 3.5.5-13 sowie der Interzeption (I) in den Gleichungen 3.5.5-2 und 3.5.5-3. Der Pflanzenfaktor beschreibt den Biomassezuwachs im Laufe der Vegetationsperiode unter Berücksichtigung der Schnittnutzung. Im Wertebereich von 0,8 bis 1,15 wird die Entwicklung des Grünlandbestandes vom Vegetationsbeginn bzw. nach der Ernte bis zum Nutzungszeitpunkt näherungsweise und vereinfacht linear beschrieben. Für die Interzeption im Wertebereich von 0,5 bis 2 mm wird ein linearer Zusammenhang mit dem Pflanzenfaktor angenommen ($I = 4,2857 * K_{cb} - 2,9286$).

Der Pflanzenfaktor wird tageweise und flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet und resultiert aus einer umfangreichen Kombination verschiedenster Rasterdaten. Das Beispiel in *Abbildung 19* zeigt die modellierte Entwicklung des Pflanzenbestandes am 15. Mai 2006. Dunkelgrün dargestellte Gebiete stehen kurz vor der Ernte, in den hellen Bereichen beginnt das Wachstum (hypothetisch für die Gesamtfläche ohne Eingrenzung auf die tatsächlichen Grünlandflächen).

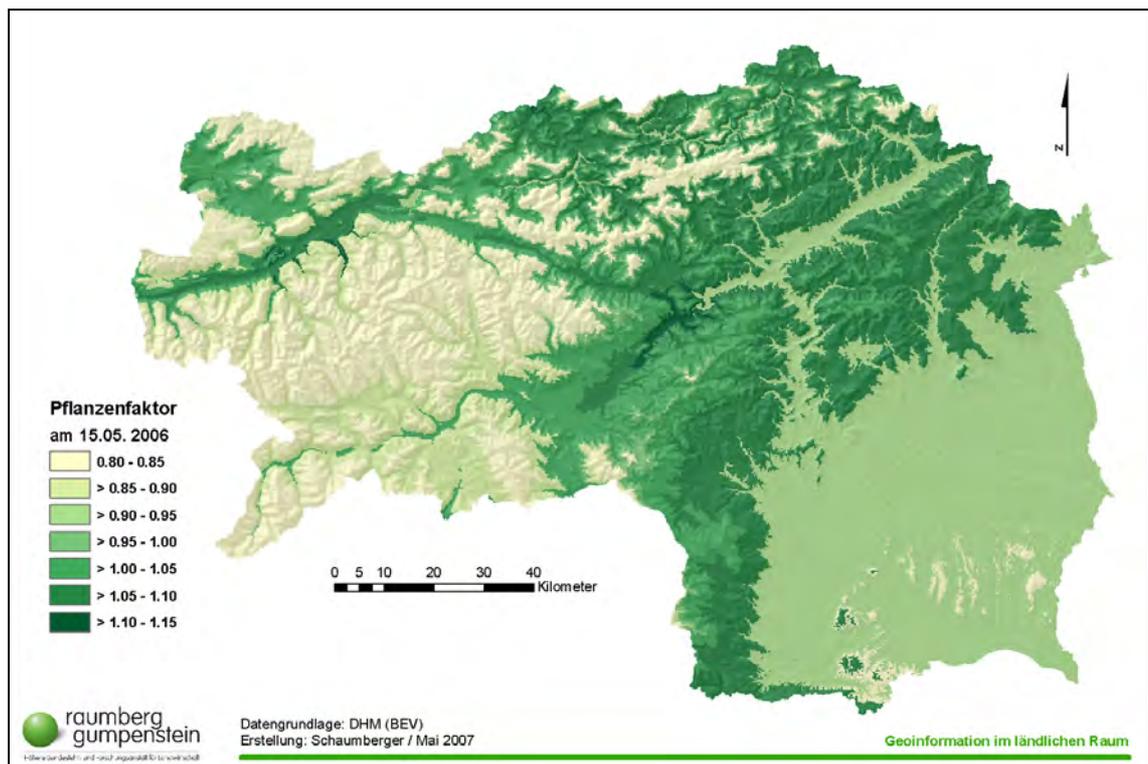


Abbildung 19: Pflanzenfaktor am Beispiel des 15. Mai 2006

Einflüsse auf den Verlauf des Pflanzenfaktors

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 20* wird dieser Verlauf an ausgewählten Standorten grafisch dargestellt. Es handelt sich um vier-, drei- und zweifach genutzte Flächen, wie sie im Rahmen der Schnittmodellierung definiert wurden. Der Schnittzeitpunkt entspricht der relativen Verteilung der Aufwuchsdauer für die einzelnen Nutzungen. Nach der letzten Ernte verläuft die Kurve für die Nachnutzung etwas flacher – es wird nur noch mit 70 % der Steigung des ersten Aufwuchses gerechnet. Das Pflanzenwachstum verläuft naturgemäß nicht linear und wird auch von vielen, vor allem wetterbedingten Faktoren beeinflusst. Die vorgenommene Annäherung an die Realität ist ein erster Schritt, der zukünf-

tig sicherlich weiterentwickelt werden muss. Am Vorgehen hinsichtlich Raster-Algebra-Implementierung wird sich jedoch nicht wesentlich viel ändern.

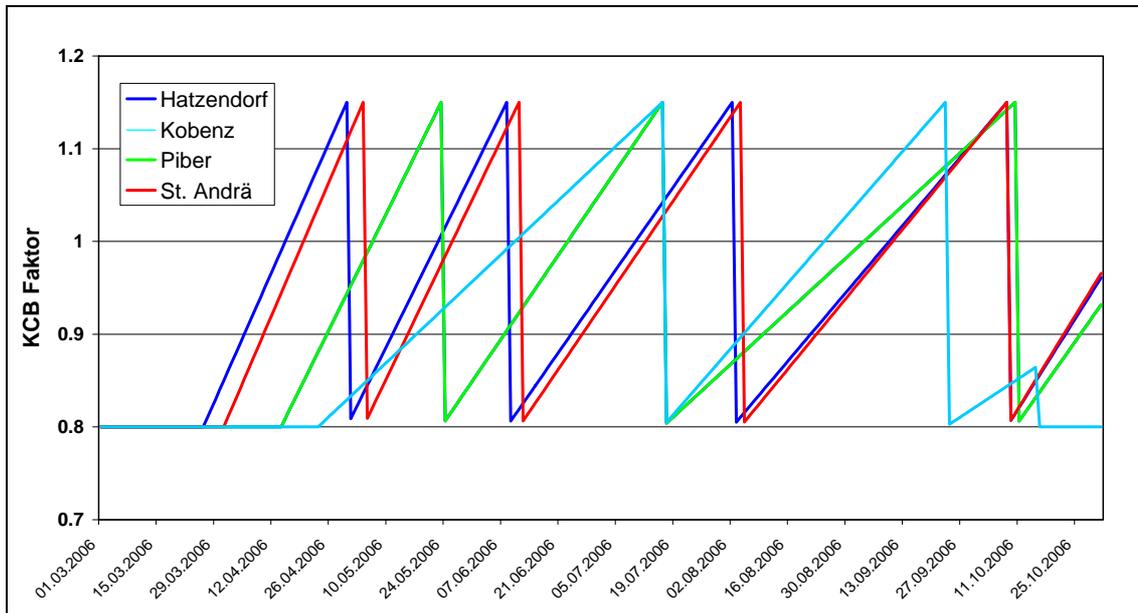


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf des Pflanzenfaktors an ausgewählten Standorten

Auf Grundlage der Vegetationsperiode (siehe Abschnitt 3.5.2) wird nach der Modellbeschreibung im Abschnitt 3.5.4 die Anzahl der Schnitte bestimmt, deren räumliche Verteilung für das Jahr 2006 aus *Abbildung 21* hervorgeht.

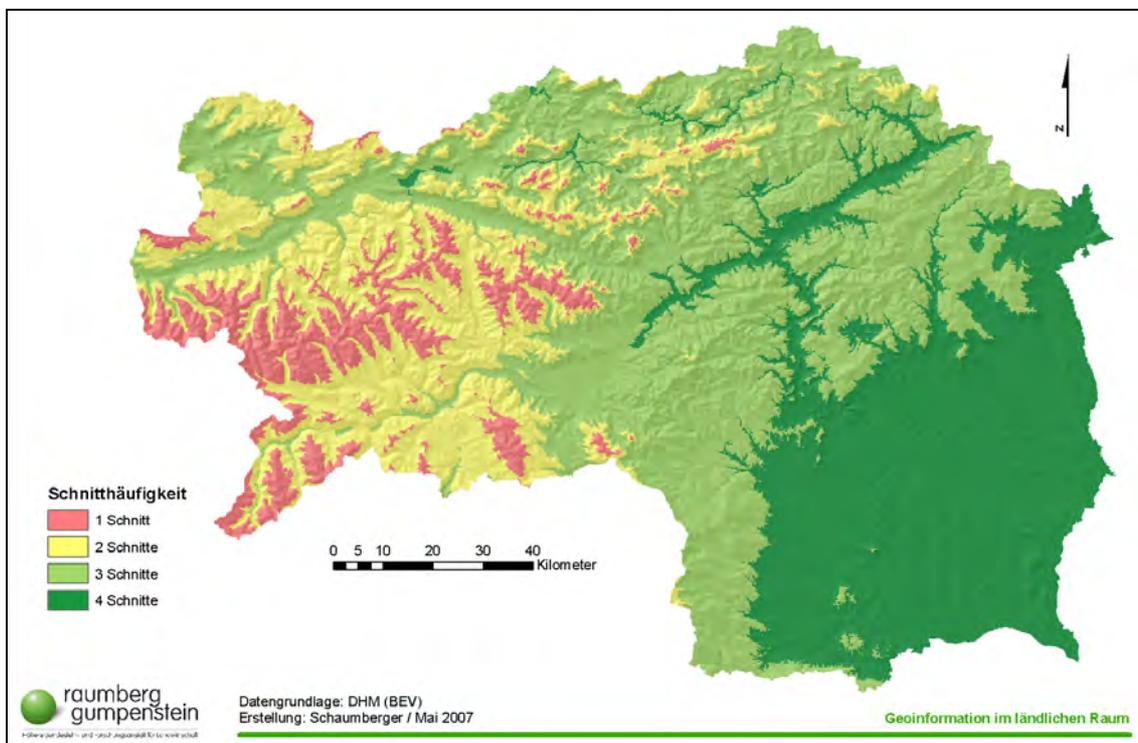


Abbildung 21: Räumliche Verteilung der theoretischen Nutzungshäufigkeit für das Jahr 2006

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 22* die Dauer des 1. Aufwuchses dargestellt.

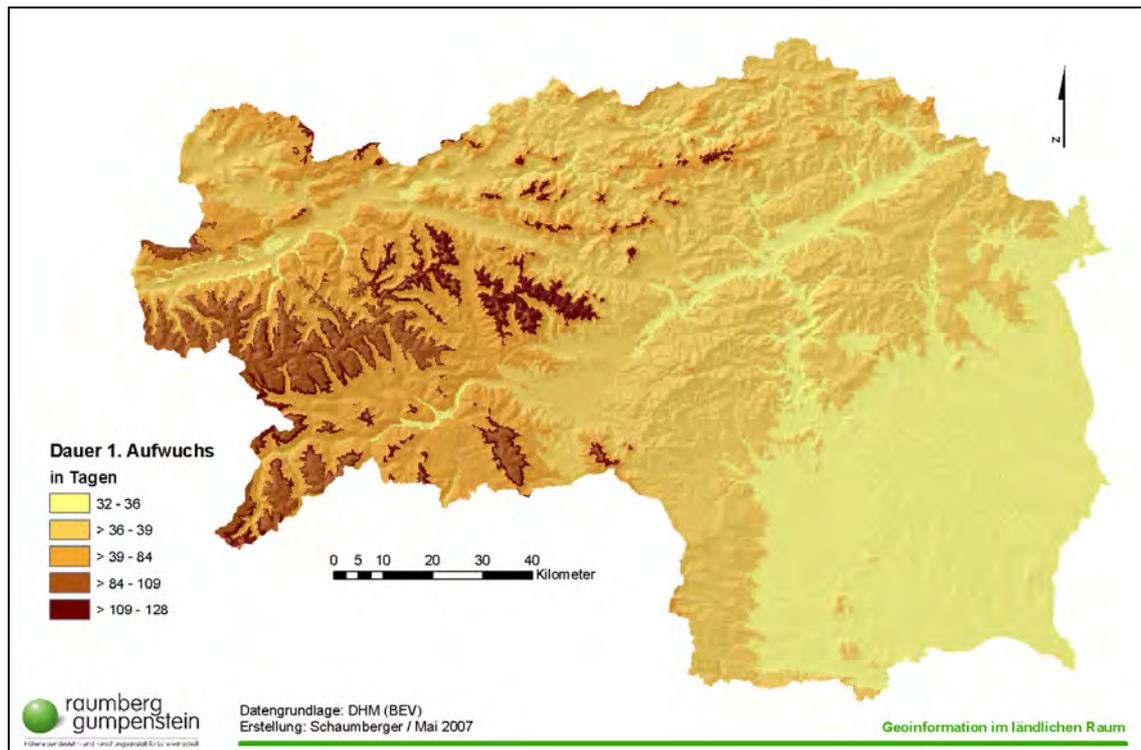


Abbildung 22: Theoretische Wuchsdauer des 1. Aufwuchses 2006 nach modelliertem Schnittzeitpunkt

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.

[time1reg1cutRaw] = [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 Ergebnisraster (*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 Einzelraster nur dort Werte enthalten, wo entsprechend maskiert wurde und somit keine Überlappungsbereiche vorhanden sind. Das Ergebnis von *dur1* ist in *Abbildung 22* dargestellt.

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 Ergebnisraster aus der obigen Raster-Algebra-Operation.

```

[kcbDay1Growth] = 0.35 / [dur1]
// Der tägliche Anteil des Pflanzenfaktors wird aus dem Range
// (0,8 bis 1,15) 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] = 0.35 / ([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 Schnitte 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 0,8 wird bis zum Erreichen des Schnittzeitpunktes bei dem Faktorwert von 1,15 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 0,8 bis 1,15 reicht. Der Anwender muss lediglich im Kopf der Schleife den Zeitraum definieren, für den er die Berechnungen durchführen möchte. Die Ergebnisraster werden nach der Ausführung der beschriebenen Algebra-Operationen in Rasterdaten auf Tagesbasis abgelegt. Das Ergebnis der vorgestellten Operationen ist am Beispiel des 15. Mai 2006 in *Abbildung 19* dargestellt. Als Beispiel für die Verwendung von Raster-Algebra zeigt diese Anwendung sehr gut die vielfältigen Möglichkeiten, die sich mit diesem Datenmodell ergeben.

4.6 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 4.5 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. Wichtigster Anhaltspunkt für eine fehlerfreie Implementierung waren in diesem Fall die in *Abbildung 20* dargestellten Zeitreihen über den Verlauf des Pflanzenfaktors, die auf einer Abfrage aller Rasterdaten der Vegetationsperiode 2006 an den ausgewählten Standorten basiert.

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 23* 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.

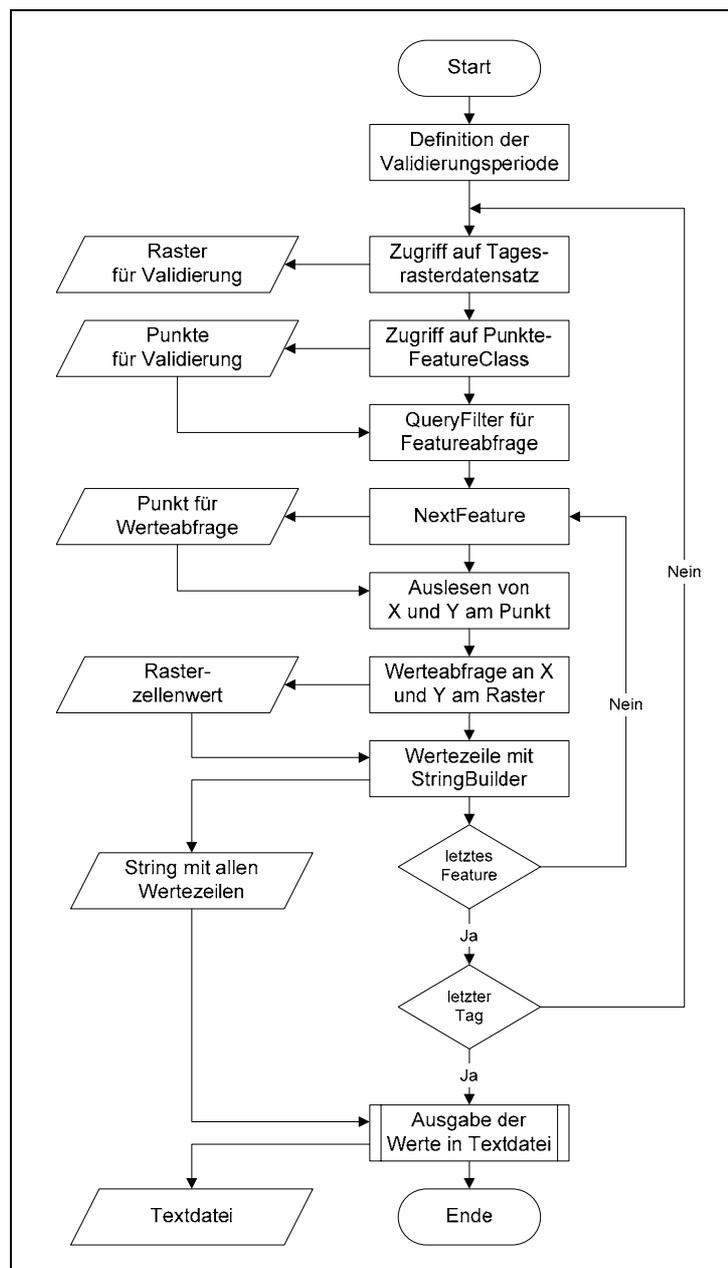


Abbildung 23: Ablaufdiagramm Validierung

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 Textausgabe erfolgt, wie bereits im Abschnitt 4.4 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 umgesetzt werden, wie das am Beispiel der in *Abbildung 24* dargestellten Auswertung des Globalstrahlungsverlaufes ersichtlich ist.

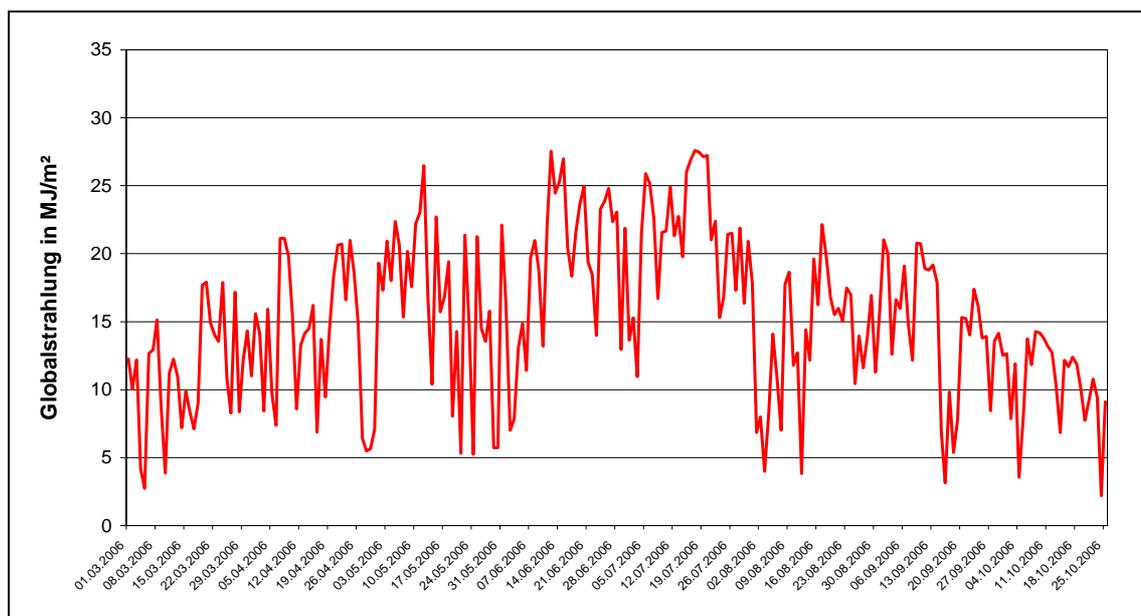


Abbildung 24: Verlauf der Globalstrahlung von März bis Oktober im Jahr 2006 am Standort Kirchberg am Walde (Bezirk Hartberg)

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.

5. Ergebnisse

Die Bestimmung von Grünlanderträgen mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems baut auf eine Reihe von Modellen auf, deren räumliche Repräsentation im Mittelpunkt steht. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei auf die technische Umsetzung und macht sich die Methoden und Werkzeuge der Geoinformatik zunutze. Die Fragestellung der Ertragsbestimmung auf Grünlandflächen kann unter zwei Aspekten betrachtet werden. Einerseits geht es darum, geeignete naturwissenschaftliche Modelle so zu kombinieren, dass damit eine Aussage über den Ertrag möglich ist. Andererseits müssen diese Modelle in einem Informationssystem verarbeitet werden, um zu entsprechenden Ergebnissen zu gelangen.

Nachdem die hier verwendeten Modelle keine endgültigen Lösungen darstellen, sondern laufend weiterentwickelt und verbessert werden müssen, kommt der Entwicklungsumgebung eine besondere Bedeutung zu. Sie beeinflusst maßgeblich, in welcher Qualität auf explorative Modellveränderungen und deren Abbildung in Ergebnisdatensätzen reagiert werden kann. Aus diesem Grund stellt das hier entwickelte System unter dem Gesichtspunkt der Implementierung eines Ertragmodells das eigentliche Ergebnis dar.

In *Abbildung 25* sind sämtliche Klassen aufgelistet, die in dieser Arbeit nur strukturell und zu einem kleinen Teil konkret beschrieben wurden.

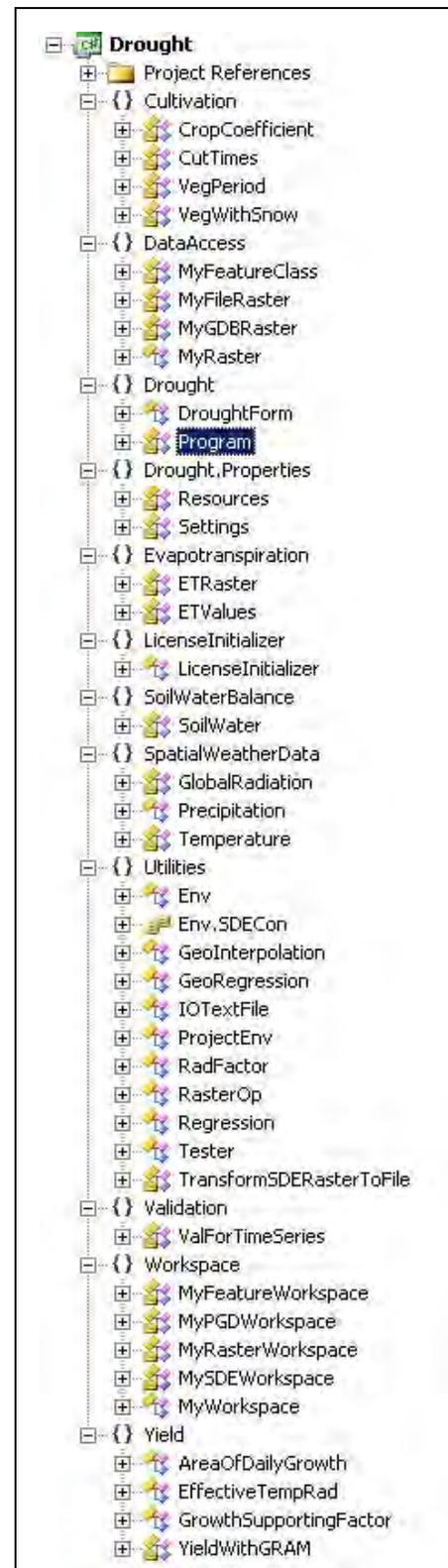


Abbildung 25: Klassenübersicht des Gesamtsystems (Visual Studio 2005)

Aus den in Kapitel 4 dargestellten Implementierungsbeispielen geht hervor, dass nach objektorientierten Grundsätzen vorgegangen wurde. Damit werden wichtige Zielsetzungen dieser Arbeit verwirklicht. Kapselung von Information und der Zugriff mittels wohlgeformter Schnittstellen unterstützen die Wartbarkeit des Systems und gewährleisten eine effiziente Weiterentwicklung des Programmcodes. Eine wichtige Systemeigenschaft stellt die verwirklichte Unabhängigkeit von einer Standard-GIS-Oberfläche dar. Sie reduziert Benutzereingriffe auf ein Minimum und schafft ein performantes Laufzeitverhalten.

Die gesamte Anwendung ist für die Erweiterung hinsichtlich einer Präsentationsschicht vorbereitet und entsprechende Anknüpfungspunkte wurden durch die Variablendeklaration und -initialisierung in einer zentralen Klasse geschaffen. Alle Variablen des Systems können dort geändert und in Zukunft über Benutzerangaben aus einer Windows-Oberfläche zugewiesen werden. Die Verknüpfung von Windows Forms mit der Programmlogik ist ebenfalls vorbereitet und muss nur aktiviert und implementiert werden.

Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang stellt die Fehlerbehandlung dar. Das in einer Benutzeroberfläche ausgeführte Programm darf nicht unkontrolliert abstürzen. Dafür wurden sämtliche Funktionen in *try-catch-Clauses* verpackt, die beim Auftreten eines Problems vordefinierte Fehlerbehandlungen ausführen. Besonders im Zusammenhang mit den COM-Objekten aus ArcObjects wird stets gewährleistet, dass nicht mehr benötigte Objekte rechtzeitig aus dem Speicher entfernt werden, um Konflikte zu vermeiden. Der in .NET integrierte *Garbage Collector* muss zu diesem Zweck öfters ausgeführt werden, als dies vom System vorgesehen ist. Alle kritischen Klassen mit Objekten aus der Klassenbibliothek ArcObjects erben aus diesem Grund vom Interface *IDisposable*. Diese Schnittstelle schreibt die Implementierung der Methode *Dispose()* vor, in der explizit Objekte zerstört und anschließend vom *Garbage Collector* aus dem Speicher entfernt werden können. Diese Vorgehensweise hat sich als notwendig erwiesen, da ansonsten in einigen Komponenten durch die vielen Schleifenoperationen Speicherkonflikte vorprogrammiert waren.

Der Programmablauf wurde ausführlich getestet, indem 17 Vegetationsperioden (1990 bis 2006) vollständig gerechnet wurden. Die hier gemachten Erfahrungen hinsichtlich Laufzeitverhalten und Benutzereingriffe fanden ihren Niederschlag in zahlreichen Verbesserungen am Programmcode.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus der Bearbeitung in den einzelnen Systemkomponenten vorgestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass diese Ergeb-

nisse eine Momentaufnahme des aktuellen Fortschritts bei der Modellentwicklung darstellen. Die Ergebnisinterpretation wird sich aus diesem Grund hauptsächlich auf die Beschreibung von Problemen im Zusammenhang mit der Umsetzung und auf eine Diskussion des Verbesserungspotentials beschränken.

5.1 Schwerpunkte der Aktivitäten des Modellanwenders

Die Erstellung einer Tabelle von meteorologischen Messdaten stellt sich als die für den Anwender aufwendigste Tätigkeit im gesamten Ablauf der Ertragsbestimmung dar. Die Rohdaten der ZAMG müssen von einer Textdatei in die Datenbank transferiert und auf die vom Programm geforderten Einheiten angepasst werden. Die HZB-Daten werden ebenfalls in einer Textdatei zur Verfügung gestellt, die allerdings nur mit aufwendigen Stringoperationen automatisiert gelesen werden können. Dazu wurde in Microsoft Access ein VBA-Programm geschrieben, das aus den Textangaben der für jede Station separat vorliegenden Datei eine geeignete Tabelle aller Messwerte zusammenstellt.

Die Voraussetzung für die Verwendung der Daten im Programm stellt die Georeferenzierung der Messdaten dar. Der Niederschlagsdatenbestand muss zusätzlich aus ZAMG- und HZB-Daten zusammengeführt und in einer eigenen Tabelle mit georeferenzierten Stationen aus beiden Quellen verbunden werden. Diese Tätigkeiten können nicht automatisiert werden und müssen für jeden neu übernommenen Datenbestand von Hand über Funktionen der Standard-GIS-Oberfläche bzw. in der Datenbank ausgeführt werden.

Die Qualität der Daten hat entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Daher ist auch eine Überprüfung des Wertebereiches der einzelnen Parameter durchzuführen. Fehlerhafte Werte können sich vor allem bei der räumlichen Interpolation in einer erheblichen Verzerrung niederschlagen. Eine genaue Analyse erfordert die Bearbeitung durch einen Meteorologen und wurde im Rahmen dieser Arbeit von der Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie, durchgeführt.

Die weitere Anwendung der Modelle stellt keinen Aufwand für den Anwender dar, da diese Prozesse nur mit einem Befehl angestoßen werden müssen.

5.2 Referenz-Evapotranspiration

Die Referenz-Evapotranspiration ist nach einer von der FAO publizierten Standardmethode (ALLEN *et al.*, 1998) an den Messstationen der ZAMG berechnet worden. Anschließend wurden die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit in-

terpoliert (Georegression). Im Gegensatz dazu würden sich bei der räumlichen Interpolation der einzelnen meteorologischen Parameter und einer anschließenden flächendeckenden Berechnung der Referenz-Evapotranspiration die durch die Einzelinterpolation auftretenden Fehler aufsummieren und zu größeren Abweichungen führen. Ein genauer Methodenvergleich wurde in dieser Arbeit allerdings nicht vorgenommen.

Die Kombination der interpolierten Evapotranspiration mit dem Globalstrahlungsfaktor, welcher die Variabilität der Topographie enthält, wurde über eine Plausibilitätsprüfung des Wertebereichs geprüft. In einer nächsten Projektphase müssen jedoch Messungen der potentiellen Evapotranspiration für eine Evaluierung dieser Ergebnisse herangezogen werden. An HZB-Stationen wird teilweise diese aufwendige Datenerhebung durchgeführt, eine Verfügbarkeit der Daten ist allerdings nur bis zu drei Jahren zeitversetzt gegeben. Eventuell durchzuführende Modellmodifikationen auf Basis dieser Prüfung sind durch die Art und Weise der Implementierung jederzeit ohne Probleme möglich.

In *Abbildung 26* wird an einem Beispieltag das Ergebnis der implementierten Algorithmen gezeigt, die auf den Modellgleichungen im Abschnitt 3.5.1 basieren. Die Auflösung dieses Ergebnisses beträgt 50 Meter – interpoliert wurde mit 250 Meter Auflösung und durch Kombination mit dem Globalstrahlungsfaktor auf 50 Meter verfeinert.

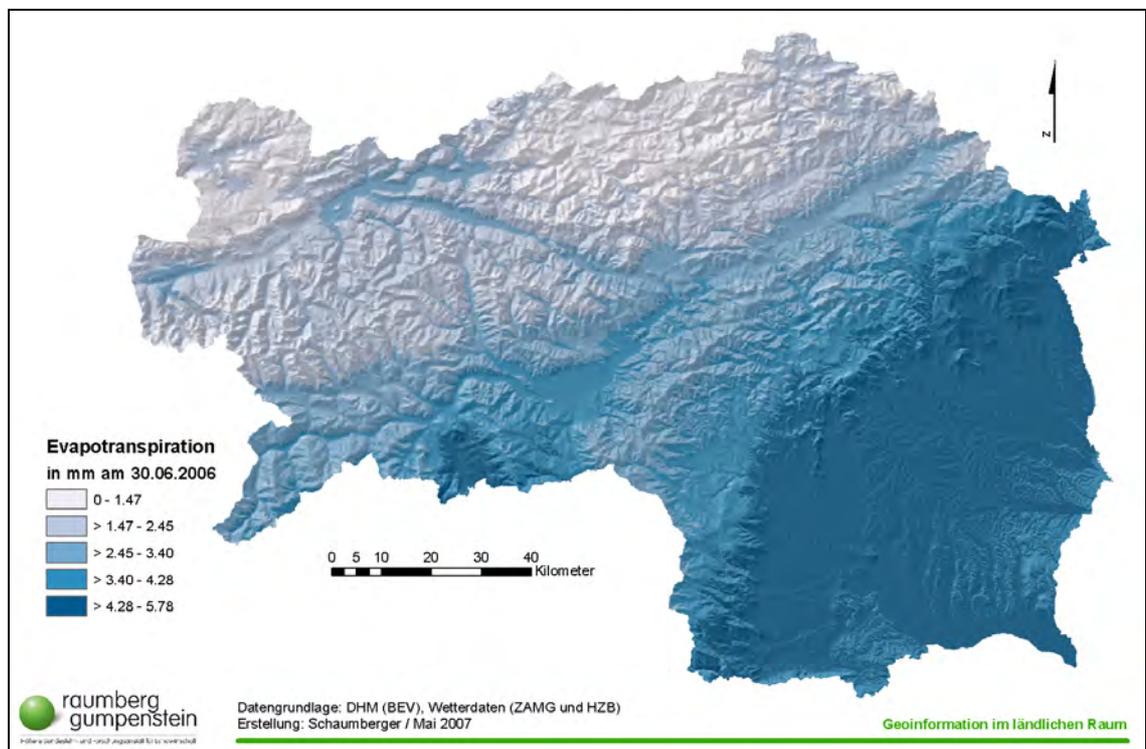


Abbildung 26: Referenz-Evapotranspiration am 30.06. 2006 im Untersuchungsgebiet

5.3 Vegetationsperiode

Die Vegetationsperiode wurde nur hinsichtlich eines Temperaturkriteriums (siehe Abschnitt 3.5.2) ermittelt und der Beginn mit Hilfe des Modells der Schneebedeckung verbessert. Die so genannte thermische Vegetationsperiode ist jedoch nur eine Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse in der Natur. Eine Kombination mit phänologischen Aufzeichnungen, wie sie in der Literatur empfohlen wird, konnte in der vorliegenden Arbeit noch nicht umgesetzt werden. Dazu ist eine aufwendige Modellierung als Grundlage notwendig, die in der Implementierungsphase auf einen thermischen Ansatz vereinfacht wurde.

Eine Erweiterung hinsichtlich der genauen Bestimmung von Vegetationsbeginn und -ende ist für die Ertragsmodellierung entscheidend, da andere wichtige Parameter (z.B. Schnittzeitpunkt und Nutzungshäufigkeit) in hohem Maß davon abhängig sind. Neben der Bewirtschaftung selbst stellt diese Komponente einen besonders kritischen Bereich im Gesamtsystem dar und muss zukünftig einer genauen wissenschaftlichen Betrachtung unterzogen werden. Der aktuelle Stand von Modellierung und räumlicher Umsetzung wird in *Abbildung 27* und *Abbildung 28* dargestellt. Für die Bildung von mittleren Werten für Beginn und Ende der Vegetationsperiode wurden insgesamt 3.111 Temperaturraster in einer Auflösung von 250 Meter eingebunden.

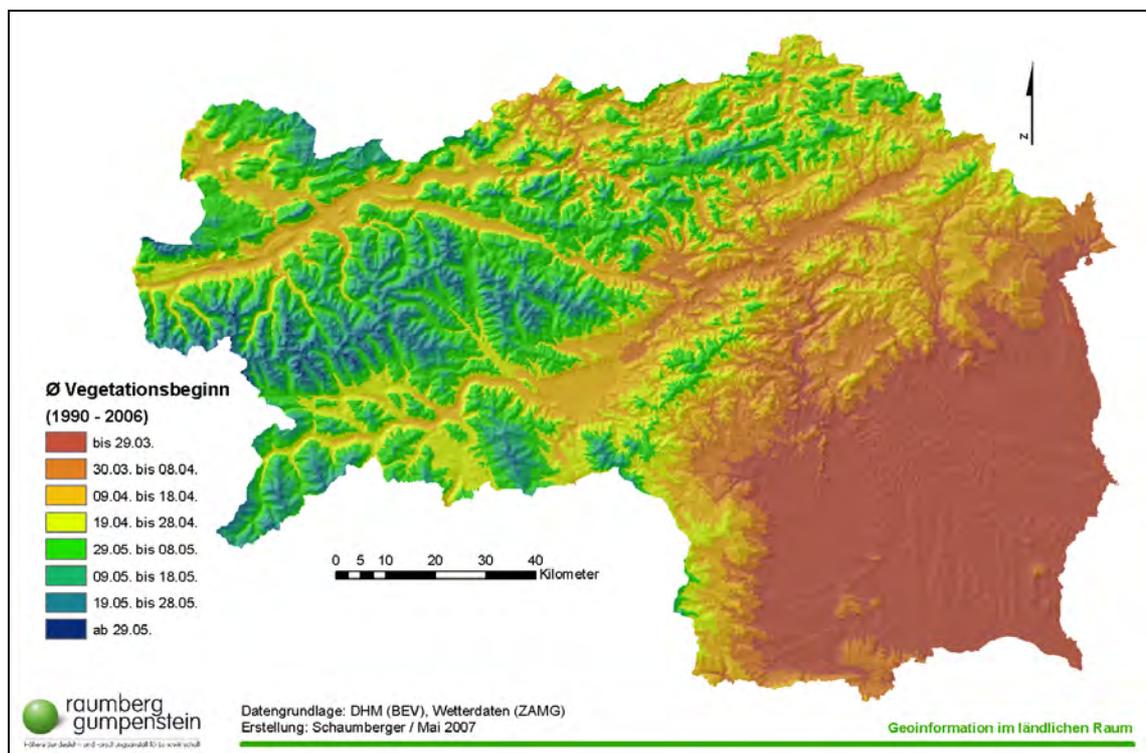


Abbildung 27: Durchschnittlicher Vegetationsbeginn im Untersuchungsgebiet

Im Gegensatz zum Beginn der Vegetationsperiode verläuft das Ende homogener. Auf einem Großteil der Fläche geht ab Mitte Oktober die Wachstumsphase in eine Ruhephase über. Der Vegetationsbeginn ist zwar im südlichen Flachland relativ einheitlich, differenziert jedoch im Berggebiet stark.

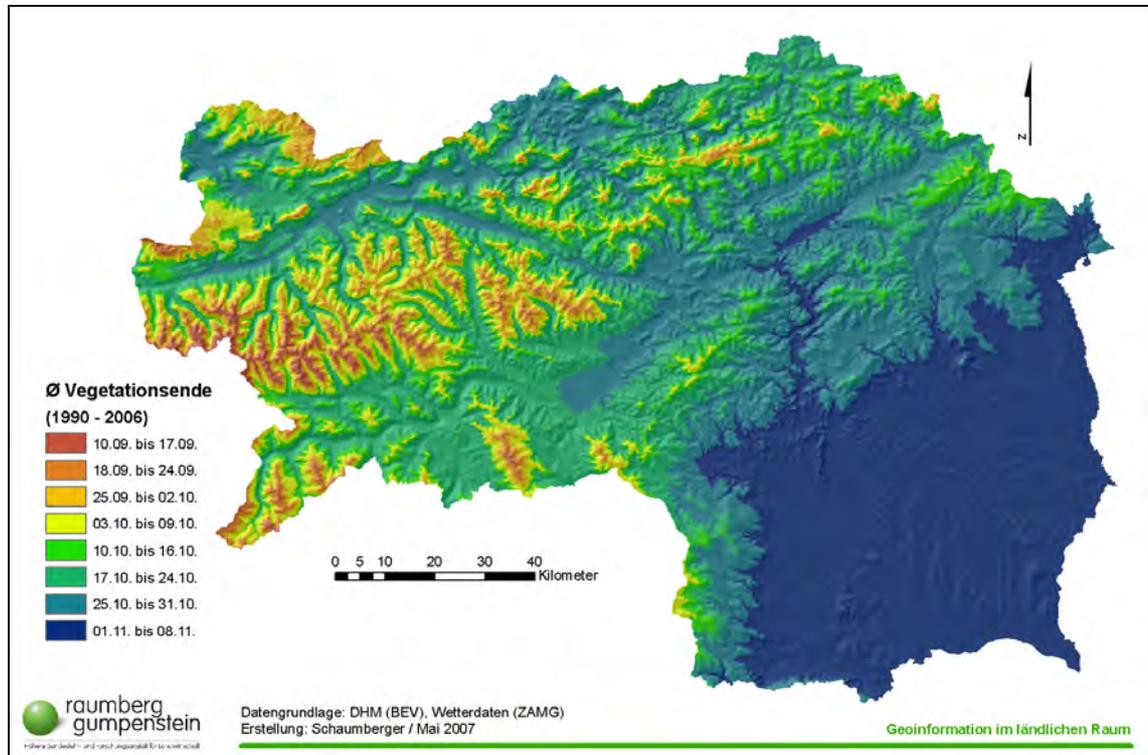


Abbildung 28: Durchschnittliches Vegetationsende im Untersuchungsgebiet

5.4 Schneebedeckung

Das Modell der Schneebedeckung hängt eng mit dem Vegetationsmodell zusammen. Allerdings ist dieses Modell nicht nur auf die Anwendung im Ertragsmodell beschränkt, sondern liefert auch einen Beitrag für hydrologische Fragestellungen (z.B. Wasserversorgung des Bodens im Frühjahr). Interessant für die Landwirtschaft ist nicht nur die Einschränkung für den Beginn der Vegetationsperiode, sondern auch die Anzahl an Tagen mit durchgehender Schneedecke (z.B. Frostgefährdung durch fehlende Wärmeschutzwirkung, Schneeschimmelgefährdung, Auswirkungen auf die Pflanzenbestandszusammensetzung, Einfluss auf die Verrottung von Wirtschaftsdüngern, usw.).

Die Ergebnisse aus der Modellierung der Schneebedeckung liegen in Form von Rasterdaten in einer Auflösung von 50 Meter für das gesamte Bundesgebiet vor. Sie enthalten Werte des Wasseräquivalents des Schnees in mm pro Tag, die indirekt auf die Schnee-

höhe hinweisen. In erster Linie sind die Ergebnisse für die Beurteilung des Vorhandenseins von Schnee zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort konzipiert. In *Abbildung 29* wird das Ergebnis der Berechnungen am Beispiel eines Tages im Untersuchungsgebiet visualisiert.

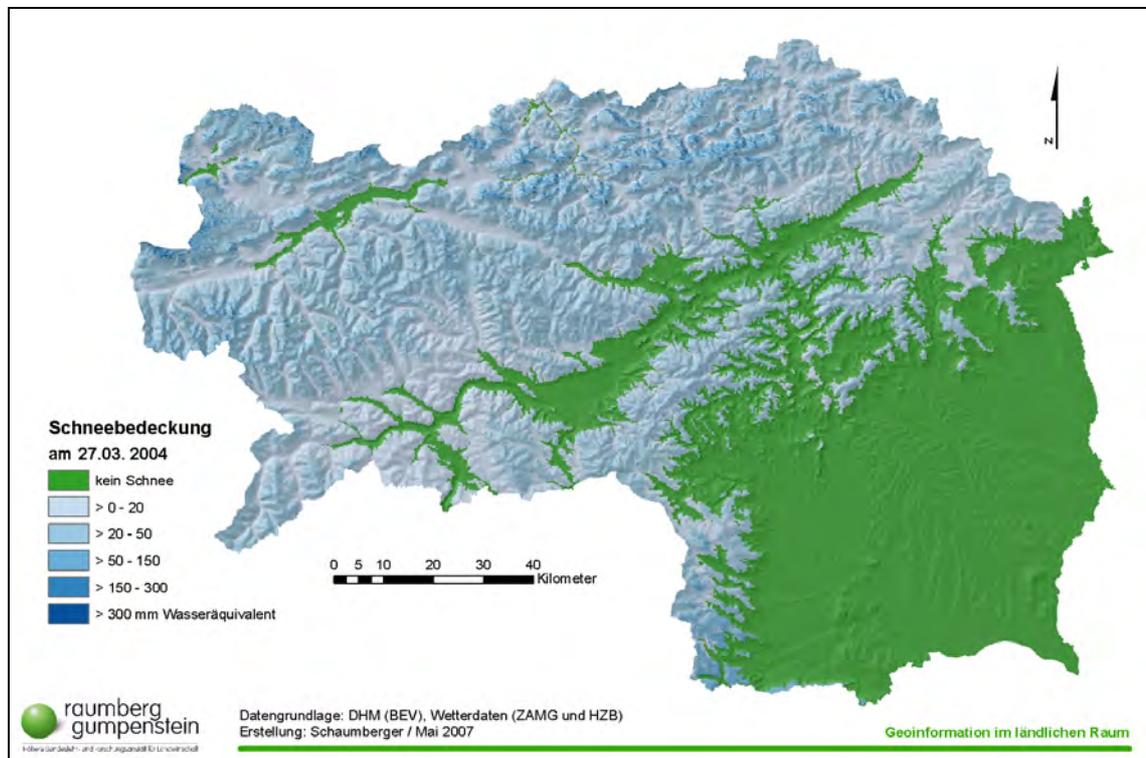


Abbildung 29: Schneebedeckung in mm Wasseräquivalent am Beispiel des 27.03. 2004

Der dargestellte zeitliche und räumliche Ausschnitt zeigt eine mehr oder weniger massive Bedeckung in den Alpen, wobei einige Abschnitte in den breiten Tälern schneefrei waren. Der Süden blieb weitgehend niederschlagsfrei.

Die Beurteilung der Ergebnisse ist auf Grund der Größe des Untersuchungsgebietes und der zahlreichen Einflussfaktoren der 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 and DELLA 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 Ergebnisse erfolgte unter Einbeziehung des gesamten Bundesgebietes mit Hilfe von Schneehöhenmessungen an den rund 740 HZB-Stationen. 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. *Abbildung 30* zeigt 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.

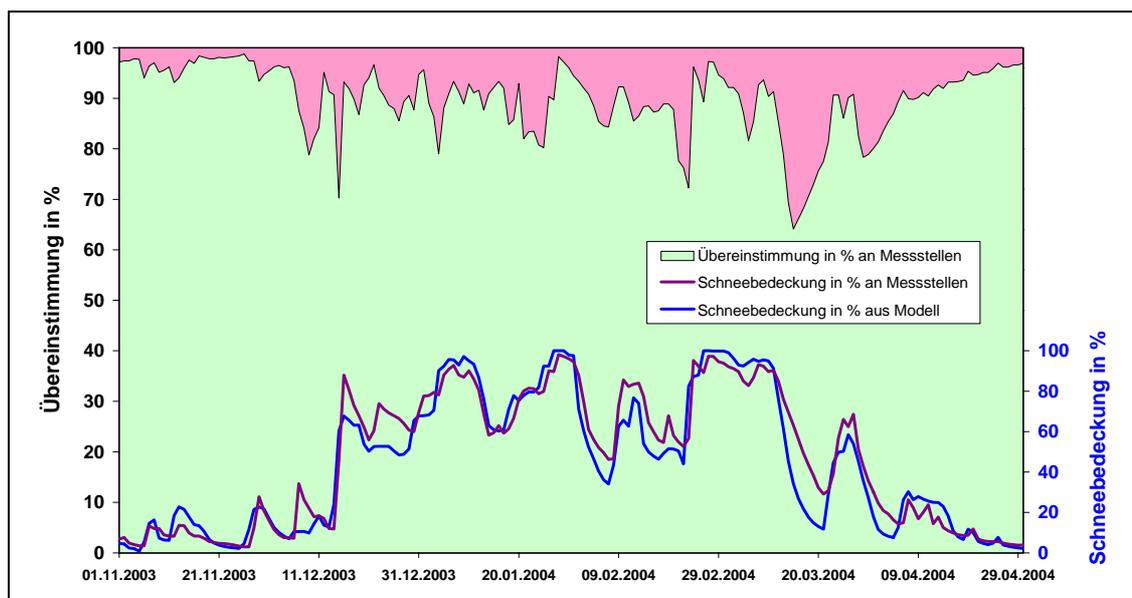


Abbildung 30: Übereinstimmung der vom Modell gerechneten Schneebedeckung mit Messwerten an 740 HZB-Stationen und die gesamte schneebedeckte Fläche Österreichs im Winter 2003/2004

Die Grafik zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen massiven Änderungen in der Schneebedeckung und der, wenn auch nur kurzfristigen, Fehlabbildung des Modells. 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). Die Modellergebnisse am Beginn und Ende des Winters sind auf Grund der großen schneefreien Fläche sehr gut, aber auch im Hochwinter durchaus akzeptabel.

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 31* 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.

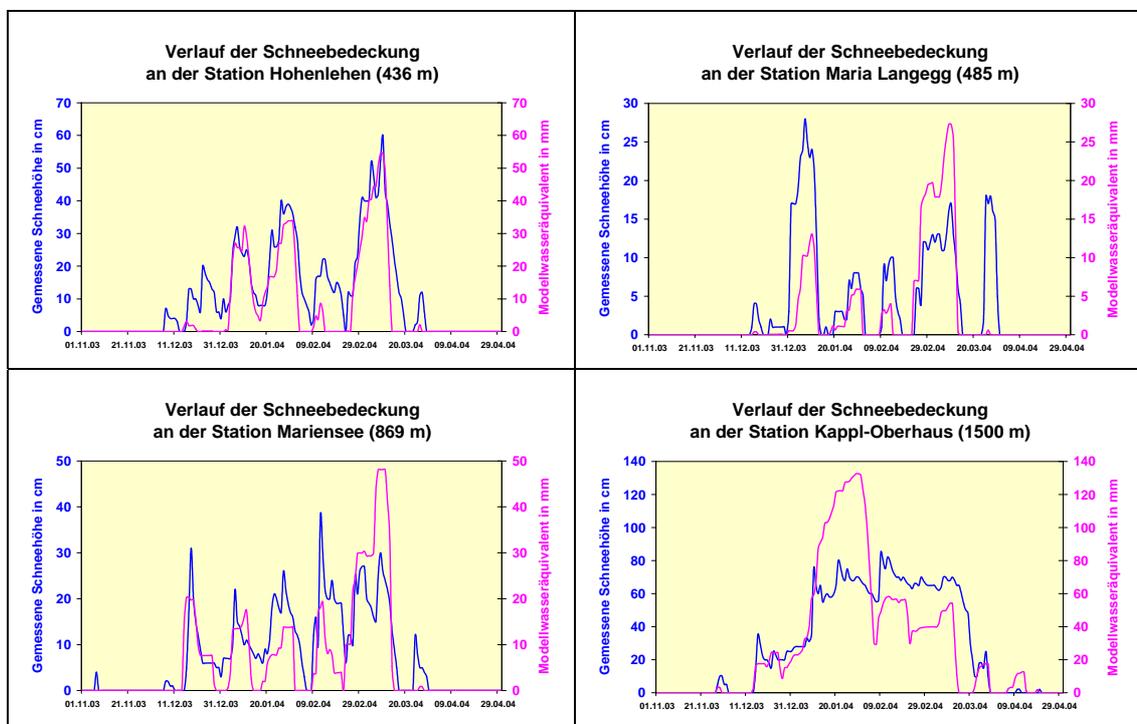


Abbildung 31: Verlauf der Schneebedeckung im Winter 2003/2004 an vier Messstationen im Vergleich zwischen Mess- und Modellergebnissen

Mehrfach 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.

Die durchschnittliche Übereinstimmung (siehe *Abbildung 30*), ob an den Messstationen Schnee liegt oder nicht, beträgt im Winter 2003/2004 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.

Eine weitere Evaluierungsvariante vergleicht die gemessene Anzahl der Schneetage mit jener der modellierten Schneetage (siehe *Abbildung 32*). Unter Berücksichtigung der einfachen Modellkonzeption sind diese Ergebnisse äußerst zufrieden stellend und bringen den Nachweis, dass auch eine großflächige Modellapplikation für den praktischen Einsatz durchaus verwendet werden kann.

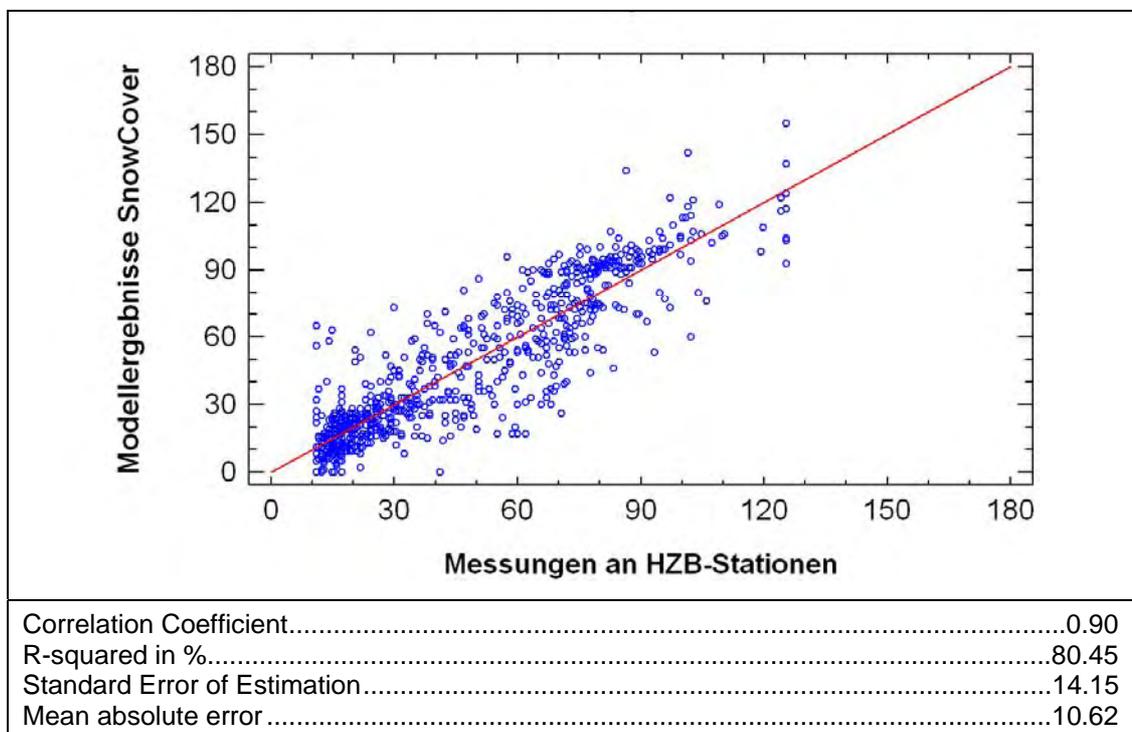


Abbildung 32: Anzahl der Schneetage im Vergleich von Modellergebnissen und Schneehöhenmessungen an 740 HZB-Stationen

5.5 Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkt

Qualität und Quantität des Grünlandertrages werden vom Schnittzeitpunkt bestimmt. Eine Modellierung dieses Datums ist für ein funktionierendes Ertragsmodell entscheidend. Klimabedingungen und Bewirtschaftungsintensität haben großen Einfluss auf die Aufwuchsdauer der einzelnen Nutzungen, deren möglichst genaue Abschätzung das Ziel einer intensiven Modellweiterentwicklung sein muss. Die vorliegende Implementierung nutzt einen sehr einfachen und daher auch ungenauen Ansatz, dessen Ergebnisse in *Abbildung 21* und *Abbildung 22* exemplarisch dargestellt sind. Zusammen mit einer verbesserten Methode zur Bestimmung der Vegetationsperiode bietet diese Systemkomponente das größte Verbesserungspotential. Wie entscheidend der Nutzungszeitpunkt für den Ertrag in quantitativer und qualitativer Hinsicht ist, geht aus *Abbildung 33* hervor.

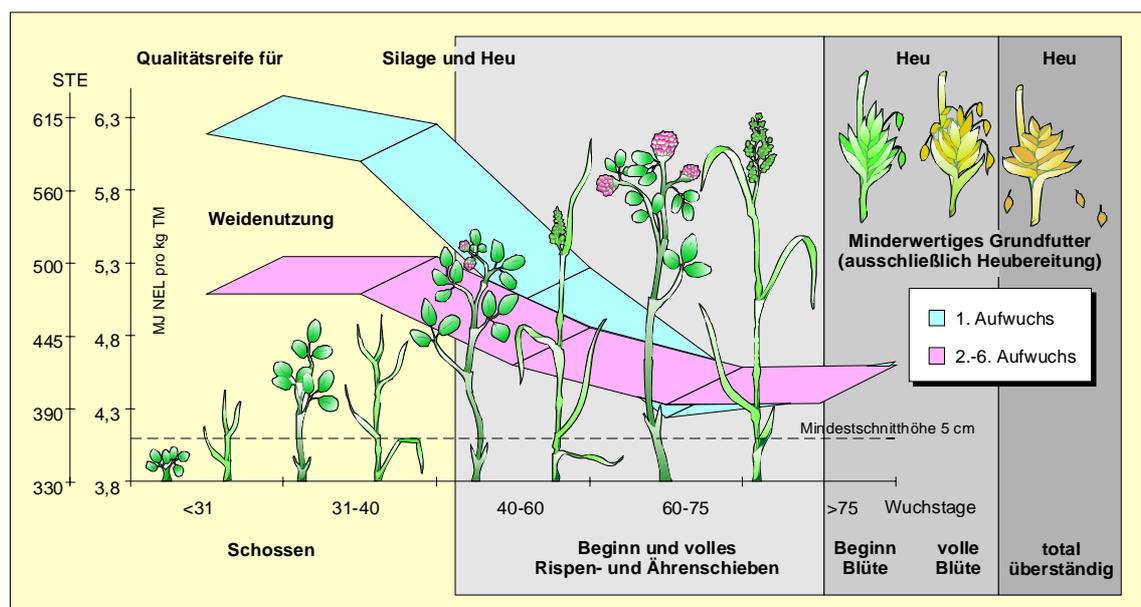


Abbildung 33: Nutzungsstadien und Entwicklung des Qualitätsertrages des Grünlandfutters (Quelle: BUCHGRABER, 1998)

Ein viel versprechender Ansatz für eine genauere zeitliche Abgrenzung von Nutzung und Aufwuchszeit ist die Einbeziehung von Fernerkundungsdaten (MINO *et al.*, 1998; JIANLONG *et al.*, 1998; WHITE *et al.*, 1997; BELLA *et al.*, 2004), der in einer späteren Projektphase eingehend verfolgt werden muss. Über Vegetationsindizes können in Kombination mit GIS-Landnutzungsdaten die schnittbedingten Veränderungen des Pflanzenbestandes nachvollzogen werden.

5.6 Bodenwasserbilanz und aktuelle Evapotranspiration

Die Berechnung der Bodenwasserbilanz ist für die Fragestellungen in Zusammenhang mit Trockenstress und Trockenheit besonders wichtig und wird, wie bereits die Referenz-Evapotranspiration, nach den Empfehlungen von ALLEN *et al.* (1998) vorgenommen. Aus dem Verhältnis zwischen der Referenz-Evapotranspiration und der aktuellen Evapotranspiration, die aus dem Bodenwasserbilanzmodell abgeleitet wird, kann Trockenstress quantifiziert werden. Neben den meteorologischen Inputparametern spielt das Wasserspeichervermögen des Bodens eine zentrale Rolle und fließt als nutzbare Feldkapazität in das Modell ein. Für die vorliegende Implementierung wurde ein vorläufiger Datensatz dieses Parameters verwendet, der in einer späteren Projektphase durch Felderhebungen im Raum Hartberg noch verbessert wird. An den Algorithmen selbst ändert sich durch die neuen Werte, welche als Rasterdaten in das Modell integriert werden, nichts. Allerdings ist durch diese Weiterentwicklung eine signifikante Ergebnisverbesserung zu erwarten.

In *Abbildung 34* wird das Ergebnis aus der Bodenwasserbilanzrechnung an Hand der aktuellen Evapotranspiration an einem Beispieltag gezeigt. Es liegen hier keine flächendeckenden Werte vor, da die nutzbare Feldkapazität nur für landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Verfügung steht und das Ergebnis sich deshalb auch nur auf diese beziehen kann.

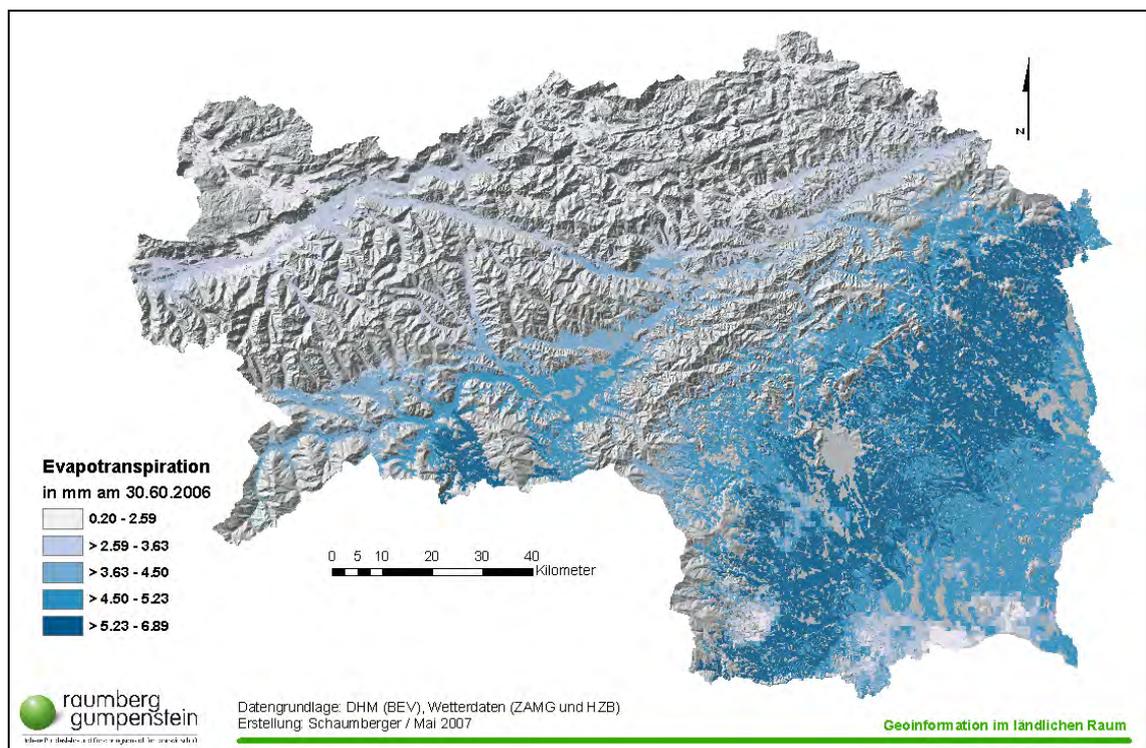


Abbildung 34: Aktuelle Evapotranspiration am 30.06. 2006 im Untersuchungsgebiet

Die Ergebnisse der aktuellen Evapotranspiration wurden mit Messdaten am Standort Wagna-Leibnitz (Bezirk Leibnitz) verglichen. Die Auswertung ist in *Abbildung 35* dargestellt. Trotz der vorläufigen Werte aus der nutzbaren Feldkapazität kann ein moderater Zusammenhang zwischen Modell- und Messergebnissen festgestellt werden. Die Messung der aktuellen Evapotranspiration ist sehr aufwendig und kann nur mit besonders ausgestatteten Lysimeteranlagen durchgeführt werden. Die Messdaten wurden vom Joanneum Research Graz im Rahmen der Arbeit von FANK (2007) zur Verfügung gestellt.

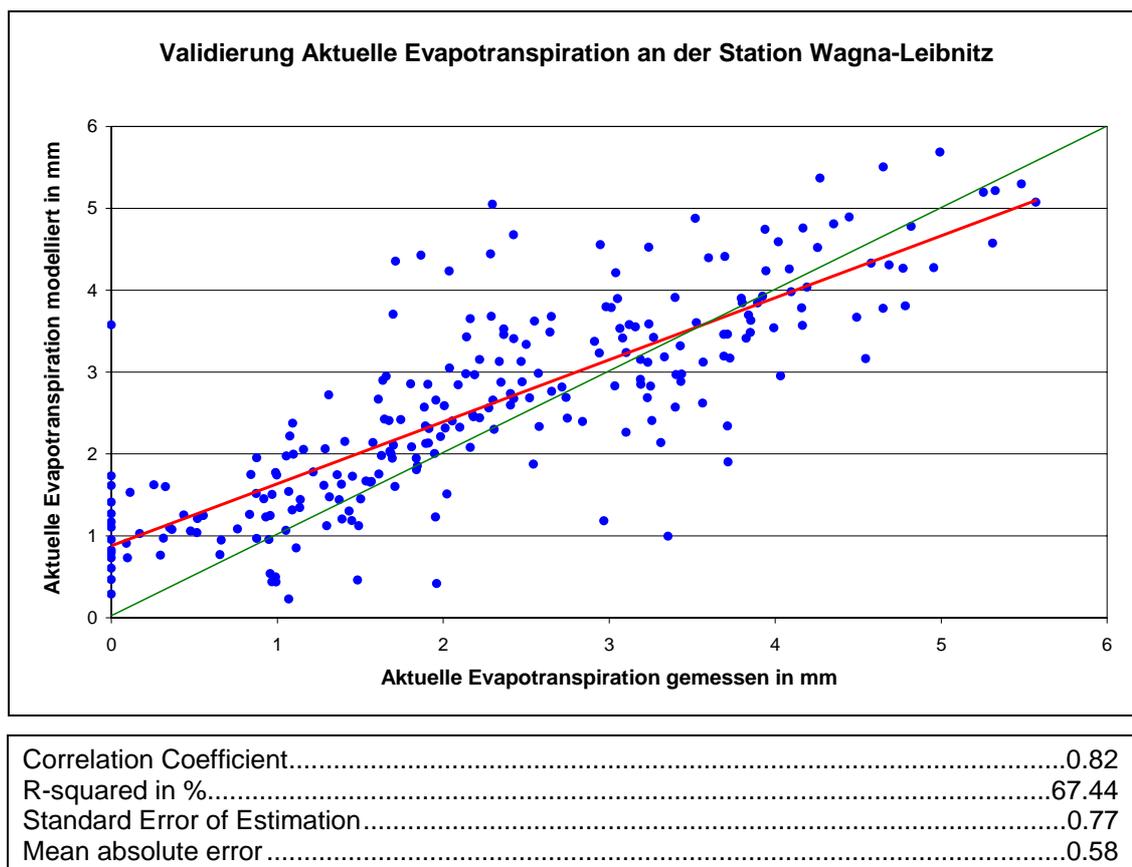


Abbildung 35: Modell der aktuellen Evapotranspiration im Vergleich zu Messdaten

Der Vergleich von Referenz- und aktueller Evapotranspiration durch Zeitreihenbildung aus den täglichen Rasterdatensätzen zeigt deutlich, in welchen Zeitabschnitten Trockenstress aufgetreten ist. Unterschreitet die Kurve der aktuellen Evapotranspiration jene der Referenz-Evapotranspiration, muss davon ausgegangen werden, dass die Pflanzen nicht ausreichend mit Wasser versorgt wurden. In *Abbildung 36* werden am Beispiel des Standortes Hatzendorf (Bezirk Feldbach) für die Jahre 2003 und 2006 Zeitreihen beider Parameter dargestellt. Während das Jahr 2006 eher normal verlief, kam es im extrem heißen und trockenen Sommer 2003 zu einer enormen Differenz, die sich in massiven Trockenschäden auf landwirtschaftlichen Kulturen äußerte.

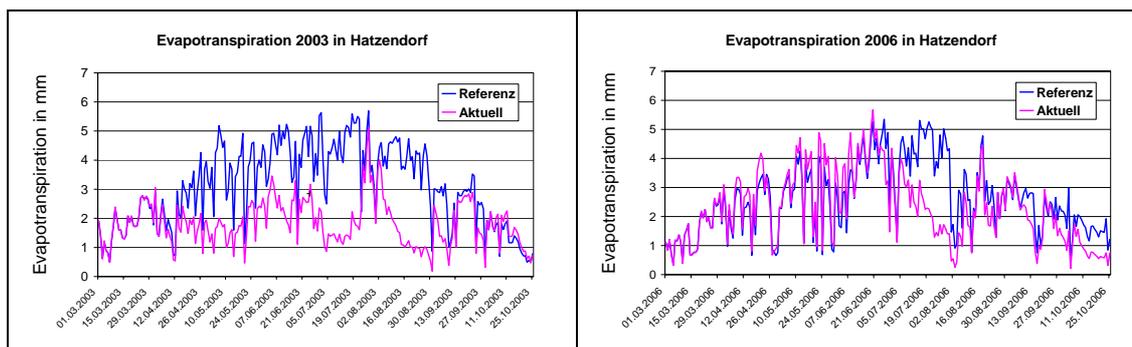


Abbildung 36: Referenz- und aktuelle Evapotranspiration im Vergleich für die Jahre 2003 und 2006 am Standort Hatzendorf (Bezirk Feldbach)

Aus dem Bodenwasserbilanzmodell kann neben der aktuellen Evapotranspiration auch der Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodenschichten berechnet werden. Eine Analyse der zeitlichen Veränderung im Bodenwasser kann im weiteren Projektfortschritt als zusätzlicher Indikator für Trockenheit verwendet werden. Eine entsprechende Implementierung für diese Untersuchung wurde noch nicht umgesetzt.

Ein großes Defizit dieses Modells besteht darin, dass der Oberflächenabfluss nicht berücksichtigt wurde. Es ist jedoch von der Bundesanstalt für Wasserwirtschaft geplant, mit Hilfe von Versuchsanlagen an der Land- und forstwirtschaftlichen Fachschule Kirchberg am Walde (Bezirk Hartberg) ein Modell zu entwickeln, das unter Umständen auch für eine räumliche Umsetzung genutzt werden kann. Auf jeden Fall ist eine Berücksichtigung des Abflussverhaltens notwendig und stellt eine wichtige zukünftige Erweiterung der gesamten Ertragsmodellierung dar.

5.7 Grassland Statistical Model (GRAM)

Sämtliche Systemkomponenten werden direkt oder indirekt vom GRAM zur Bestimmung des Grünlandertrages herangezogen (siehe *Abbildung 3*). Die Modellvereinfachungen in den einzelnen Komponenten finden somit ihren Niederschlag im Endergebnis. Die notwendige Weiterentwicklung und Verbesserung muss deshalb durch eine geeignete Implementierung in einer Weise unterstützt werden, dass möglichst effizient auf Veränderungen reagiert werden kann. Eine kleine Korrektur in den Formeln der Referenz-Evapotranspiration bedeutet zum Beispiel für den Anwender, dass er mit einem einzigen Befehl den gesamten Programmablauf neu startet und das Endergebnis auf die Auswirkungen dieser Änderung prüfen kann. Die Implementierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit bietet diese wichtige Systemeigenschaft.

Die aktuellen Ergebnisse aus GRAM werden hier vorgestellt, im Vordergrund steht jedoch die Art der Ergebnisrepräsentation und nicht so sehr deren Inhalt. Wie in Abschnitt 3.5.6 dargestellt, ist der Wachstumsfaktor für die Gewichtung von Temperatur- und Globalstrahlungssumme ein zentrales Element, das auf dem Verhältnis zwischen Referenz- und aktueller Evapotranspiration beruht und die Wasserverfügbarkeit zum Ausdruck bringt. In *Abbildung 37* wird der Wachstumsfaktor dem Niederschlag gegenübergestellt. Es ist sehr gut erkennbar, wie die Wasserverfügbarkeit auf anhaltende und/oder ergiebige Niederschläge reagiert. Dabei ist die Menge der akkumulierten Niederschläge für die Aufrechterhaltung guter Wachstumsbedingungen entscheidend. Wie schon in *Abbildung 36* wird auch hier das Jahr 2003 als Extremjahr vorgestellt, welches noch beeindruckender als das Jahr 2006 den Verlauf beider Parameter und deren Abhängigkeit voneinander beschreibt. Nach einer Periode mit wenigen Niederschlägen sank der Wachstumsfaktor ab und erholte sich nur dann, wenn ein entsprechender Wassereintrag verzeichnet wurde.

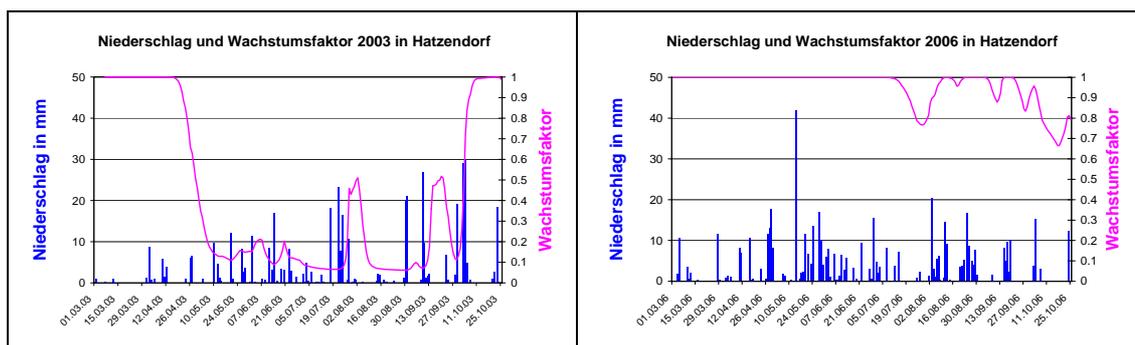


Abbildung 37: Niederschlag und Wachstumsfaktor im Vergleich für die Jahre 2003 und 2006 am Standort Hatzendorf (Bezirk Feldbach)

Das statistische Modell wird in Form einer multiplen Regressionsgleichung mit den durch Ertragsmessungen auf Exaktversuchen in ganz Österreich kalibrierten Modellkoeffizienten und den zahlreichen hier erarbeiteten Variablen, mittels Raster-Algebra-Operationen räumlich verarbeitet. Die hier dargestellte Gleichung soll beispielhaft zeigen, wie die Daten miteinander kombiniert werden.

$$\begin{aligned}
 TM(dt/ha) = & 159.8513 + 4.6329 * SOIL\ RETENTION * FERTILIZATION\ TYPE + \\
 & 0.6682 * SOIL\ RETENTION * ALTITUDE + 6.3726 * CUT\ NUMBER * NUMBER\ OF \\
 & CUTS + 4.3627 * CUT\ NUMBER * FERTILIZATION\ TYPE + 2.4223 * CUT\ NUMBER * \\
 & ALTITUDE + 3.3078 * NUMBER\ OF\ CUTS * DURATION - 1.6859 * NUMBER\ OF\ CUTS \\
 & * ALTITUDE - 20.6931 * NUMBER\ OF\ CUTS * GE - 2.3897 * DURATION * FER- \\
 & TILIZATION\ TYPE + 12.9416 * DURATION * TE + 17.1797 * DURATION * GE + \\
 & 1.6182 * FERTILIZATION\ TYPE * NITROGEN\ DOSE - 9.9659 * FERTILIZATION \\
 & TYPE * ALTITUDE + 23.5912 * FERTILIZATION\ TYPE * GE + 0.5435 * NITROGEN \\
 & DOSE * ALTITUDE - 92.1956 * TE * GE + 1.1994 * SOIL\ RETENTION^2 - 32.5148 \\
 & * SOIL\ RETENTION - 4.6455 * CUT\ NUMBER^2 - 26.8325 * CUT\ NUMBER - 2.5614 \\
 & * DURATION^2 - 5.6785 * NITROGEN\ DOSE + 1.4345 * ALTITUDE^2
 \end{aligned}$$

Es handelt sich dabei meist um Rasterdaten (SOIL RETENTION = Raster der nutzbaren Feldkapazität, ALTITUDE = Digitales Höhenmodell, NUMBER OF CUTS = Ergebnis-raster des Schnittmodells, DURATION = Raster mit der Dauer des zu berechnenden Aufwuchses, NITROGEN DOSE = Raster des Stickstoffeintrages, GE = Raster der effektiven Globalstrahlung, TE = Raster der effektiven Temperatur) oder um Konstante (FERTILIZATION TYPE = z.B. 2 für Gülledüngung, CUT NUMBER = z.B. 1 für die Berechnung des 1. Aufwuchses).

Wird die obige Formel im GIS grafisch umgesetzt, so ergibt sich als Summe aus allen vier Aufwüchsen die in *Abbildung 38* dargestellte Ertragssituation nach dem Stand der aktuellen Modellentwicklung.

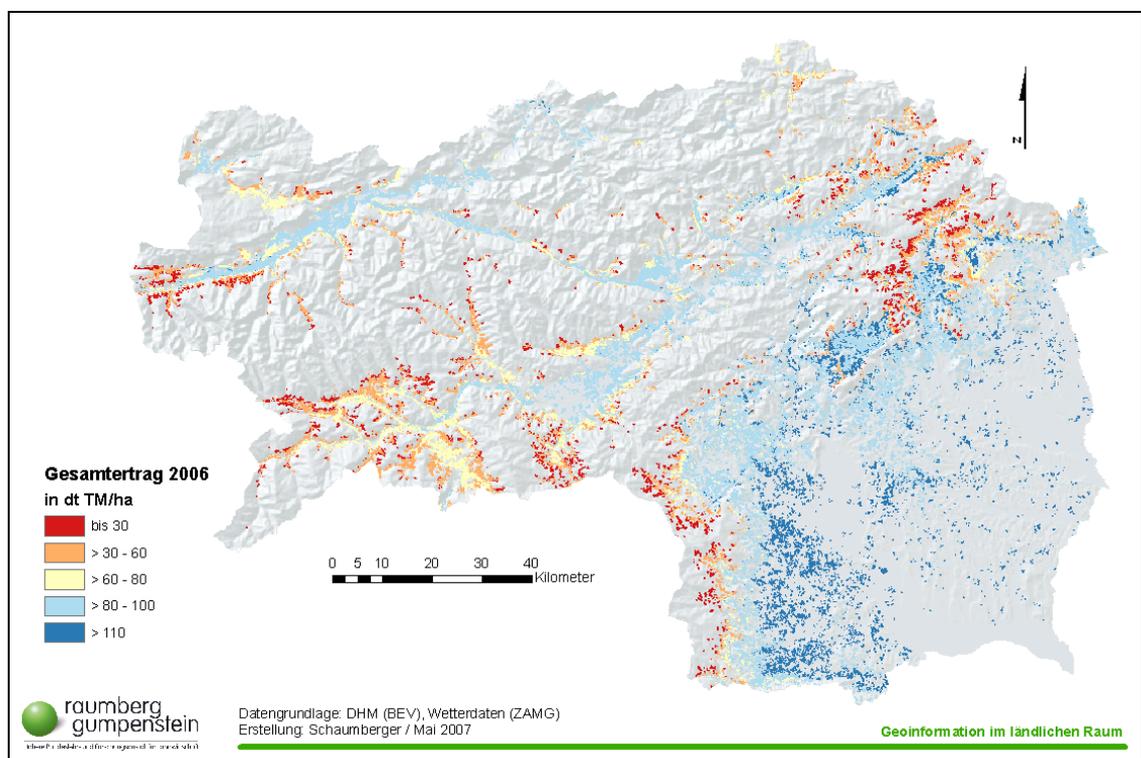


Abbildung 38: Räumliche Verteilung des Bruttogrünlandertrages in dt TM/ha für das Jahr 2006

Die räumliche Auflösung des Ergebnisrasters beträgt 50 Meter. Damit ist eine Wertezuordnung auf Parzellen mit Grünlandnutzung möglich und kann zum Beispiel für die Auswertung von trockenheitsbedingten Ertragseinbußen im Rahmen einer Grünlandversicherung gegen Trockenschäden verwendet werden. Das Ergebnis in der aktuellen Version ist durch markante Sprünge im Ertragsniveau innerhalb kleinster räumlicher Einheiten gekennzeichnet. Hervorgerufen wird dies durch die Anwendung des Schnittmodellrasters, wo zum Beispiel eine Dreischnittnutzung unmittelbar an eine Vierschnitt-

nutzung angrenzt und der Ertrag sich dadurch erheblich unterscheidet. Aus diesem Grund ist geplant, keine Abgrenzung der Schnitthäufigkeit vorzunehmen, sondern flächendeckend vier verschiedene Nutzungsregime zu berechnen. Es entstehen damit für jede Nutzungsintensität eigene Ergebnisraster, aus denen je nach Nutzung ausgewählt werden kann. Wird zum Beispiel für eine Grundstücksparzelle mit Zweischnittnutzung der Ertrag bzw. die Ertragseinbuße benötigt, so spielt es keine Rolle, ob diese Fläche gemäß Schnittmodell auch in einem theoretischen Zweischnittgebiet liegt oder nicht. Allerdings sind dadurch keine flächendeckenden statistischen Aussagen mehr möglich, wie dies in der vorliegenden Variante durchgeführt werden kann. Beispielsweise kann die Verteilung der Werte aus *Abbildung 38* in einer statistischen Auswertung zur Untersuchung des Gesamtertragspotentials eingesetzt werden (siehe *Abbildung 39*).

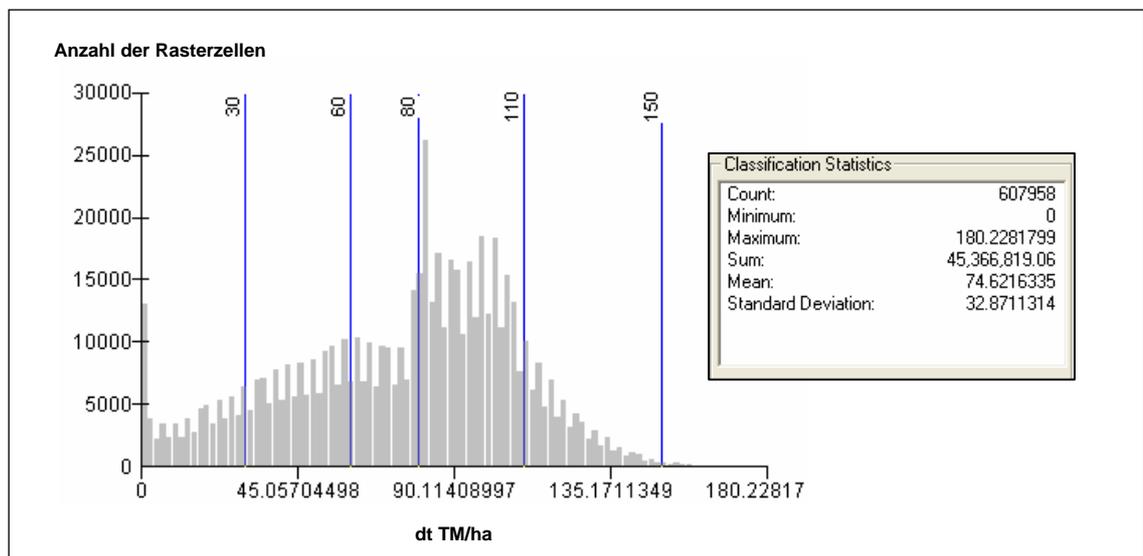


Abbildung 39: Werteverteilung des Grünlandbruttoertrages in dt TM/ha für das Jahr 2006

Die Verteilung der Rasterzellenwerte des Endergebnisses zeigt einen einigermaßen plausiblen Wertebereich mit Ausreißern im unteren Bereich (0-Werte) und eine nicht geringe Fläche ab 110 dt TM/ha. Dieses Ertragsniveau wird allerdings nur in Ausnahmefällen erreicht. Damit kann aus dem Ergebnis auf eine Überschätzung des Modells im oberen Wertebereich geschlossen werden, die hauptsächlich auf die problematische Abbildung der Nutzungszeitpunkte zurückzuführen ist.

Im Raum Hartberg wurden zur Ergebnisvalidierung zahlreiche Ertragsdaten aus der Praxis erhoben. Ein Vergleich mit den Modellergebnissen ist allerdings enttäuschend ausgefallen und zeigt keinerlei statistischen Zusammenhang, wie dies aus der *Abbildung 40* deutlich hervorgeht. Die Anzahl der für diese Auswertung verwendbaren Daten wird

durch die notwendige Übereinstimmung der Nutzungshäufigkeit mit jener des Schnittmodells sowie der eingeschränkt verfügbaren Düngungsinformation deutlich reduziert - es können nur 31 Gesamtertragsdatensätze verwendet werden. Die Streuung der Vierschnittterträge ist in der Praxis deutlich höher, als dies vom Modell geschätzt wird. Hier spielen Bewirtschaftungsmaßnahmen eine große Rolle. Aus den Dreischnittnutzungen kann keine Tendenz abgeleitet werden.

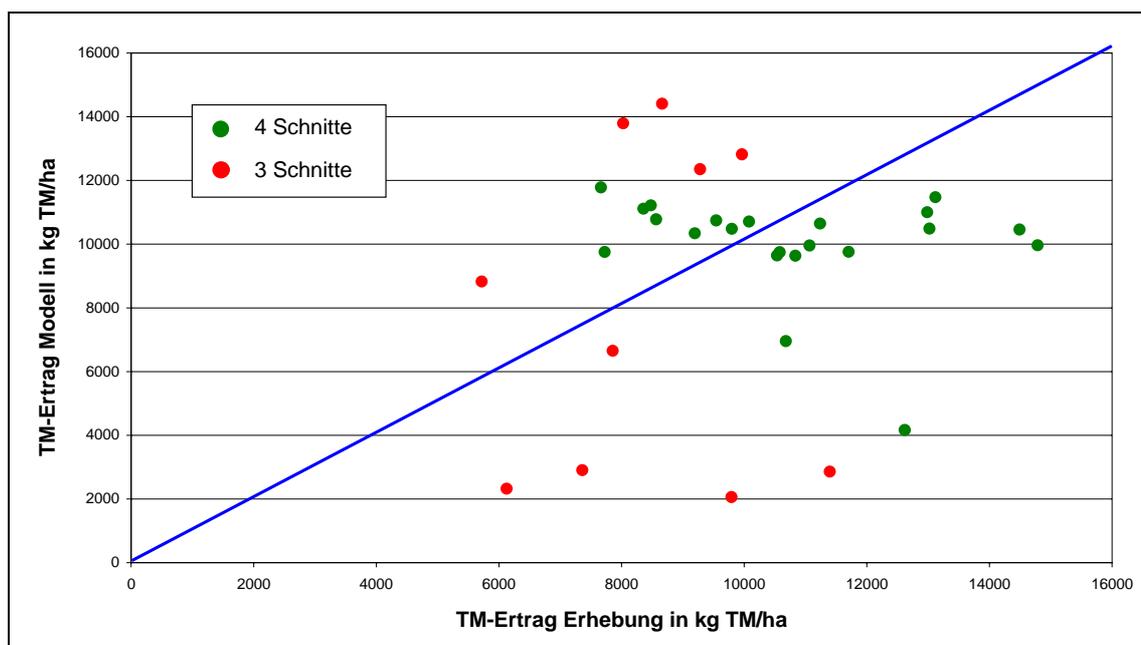


Abbildung 40: Vergleich der Modellergebnisse mit Ertragsdaten aus der Praxis

Die Anzahl der Werte ist für eine statistische Auswertung zu gering und nur durch weitere Modellverbesserungen (Schnitthäufigkeit, Düngungsinformation) kann vermieden werden, dass rund die Hälfte der Messungen herausfallen. Ein weiteres Problem ist die Tatsache, dass es sich um keine exakt gemessenen Erträge handelt, sondern um TM-Werte, die aus dem Frischmassegewicht geschätzt wurden.

Die Datensätze dieser Ertragshebungen sind jedoch für zukünftige Evaluierungen als Anhaltspunkt unverzichtbar, da nur so eine gezielte Modellentwicklung möglich ist.

Wenn die Ergebnisse des aktuellen Modellentwicklungsstandes auch keine optimale Lösung der räumlichen Umsetzung zeigen, ist nach TRNKA *et al.* (2006) die Modellkonzeption ein viel versprechender Weg der Ertragsbestimmung für Grünland. Umso größer ist die Bedeutung des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Werkzeuges zur technischen Umsetzung von Modellerweiterungen und -veränderungen.

6. Zusammenfassung

Die Bestimmung des Grünlandertrages mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) erfordert die Einbindung verschiedener Modelle, um die vielfältigen Einflüsse von Standort und Bewirtschaftung abbilden zu können. Grünland wird im Gegensatz zu Ackerkulturen mehrmals in der Vegetationsperiode genutzt und weist je nach Bewirtschaftungsmaßnahmen erhebliche quantitative und qualitative Ertragsunterschiede auf. Dies macht eine Schätzung für eine ganze Region durch Feldbegehungen nahezu unmöglich. Dagegen bietet die räumliche Modellierung eine Möglichkeit, die erwirtschafteten Grünlanderträge für große Gebiete rechnen zu können.

Grünland ist eine der wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen in Österreich, insbesondere in den Berglagen, und nimmt mehr als die Hälfte der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche ein. Grünland wird in Abhängigkeit von Standortfaktoren wie Klima, Topographie und Bodeneigenschaften auf intensiven und extensiven Flächen bewirtschaftet. In der alpenländischen Kulturlandschaft ist die offene Grünlandfläche ein zentrales Element und in den vom Tourismus geprägten Tälern des Alpenhauptkammes neben der Futtergrundlage für die Viehwirtschaft von besonderer Bedeutung.

In den östlichen und südlichen Teilen Österreichs sind in den letzten Jahren vermehrt intensive Trockenperioden aufgetreten, die infolge des Klimawandels mit hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft noch häufiger werden. Die Schaffung einer Möglichkeit zur Abschätzung, der durch Trockenheit auftretenden Ertragseinbußen ist eine wichtige Motivation der vorliegenden Arbeit.

Die dafür notwendigen Modelle wurden und werden in mehreren Forschungsprojekten des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft bearbeitet. Die komplexe Verflechtung von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren macht eine explorative Modellentwicklung notwendig, die noch nicht zum Abschluss gelangt ist. Um die Vorgehensweise der Weiterentwicklung und Verbesserung in optimaler Weise zu unterstützen, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Software mit dem Schwerpunkt der räumlichen Analyse entwickelt, welche auf Änderungen der Modelle effizient reagieren kann. Der iterative Prozess von Modellmodifikation und deren Evaluierung muss sich durch ein performantes Laufzeitverhalten und möglichst wenig Benutzereingriffen auszeichnen.

Erreicht wurden diese Anforderungen durch eine Implementierung in Microsoft Visual C# 2005 im .NET-Framework unter Beachtung objektorientierter Grundsätze und Verwendung der Klassenbibliothek von ESRI ArcObjects. Auf die Einbeziehung der ArcGIS-Standardoberfläche wurde vollständig verzichtet, da es sich bei den Algorithmen hauptsächlich um umfangreiche Schleifenoperationen zur tageweisen Berechnung von kontinuierlichen Oberflächen im Rasterdatenmodell handelt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Benutzereingriffe auf ein Minimum zu reduzieren und gezielt einzusetzen.

Bei der Entwicklung einzelner Systemkomponenten wurde darauf geachtet, dass sie über dieses Projekt hinaus auch in andere Applikationen eingebaut werden können (z.B. Datenzugriffskonzept, Regressionsberechnungen, Standortbezogene Zeitreihenbildung aus Rasterdaten, usw.). Voraussetzung dafür sind exakt definierte Schnittstellen und die konsequente Kapselung der zusammenhängenden Programmlogik.

Den fachlichen Hintergrund der Implementierung bildet eine Reihe von Modellen. Über ein von der FAO publiziertes Bodenwasserbilanzmodell werden Wasserverfügbarkeitsfaktoren aus meteorologischen Parametern und Bodeneigenschaften berechnet, welche in ein statistisches Ertragsmodell zur Bestimmung des Trockenmasseertrages pro Hektar einfließen. Neben den Standortfaktoren werden auch die wichtigsten Bewirtschaftungsfaktoren näherungsweise definiert. Informationen über den Stickstoffeintrag (Düngung) finden in Form eines räumlichen Modells der Bewirtschaftungsintensität Eingang in das Ertragsmodell. Über die Berechnung der thermischen Vegetationsperiode wird die Dauer einzelner Aufwüchse abgeleitet und damit der für das Ertragsmodell entscheidende Schnittzeitpunkt festgelegt. Eine Verbesserung der Bestimmung des Vegetationsbeginns wird durch die Berücksichtigung der Schneebedeckung erreicht. Ein einfaches, auf Temperatur und Globalstrahlung basierendes Modell bildet die räumliche und zeitliche Veränderung der Schneedecke in hoher Auflösung ab. Die möglichst genaue räumliche und zeitliche Repräsentation der Vegetationsperiode ist für eine Modellierung von Bewirtschaftungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung, da deren Einfluss auf das Ertragsmodell signifikant hoch ist. Hier bietet sich ein reichhaltiges Verbesserungspotential für die Bearbeitung in künftigen Forschungsprojekten an.

Das statistische Ertragsmodell wird laufend neu kalibriert, indem aktuelle Daten aus einem über ganz Österreich verteilten Versuchsstellennetz einbezogen werden. Die sich daraus ergebenden Änderungen können sofort in die Applikation übertragen und in

Form von Ergebnisrasterdatensätzen hinsichtlich der räumlichen Abbildung ausgewertet werden. Deshalb müssen die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse auch unter dem Aspekt einer Momentaufnahme des aktuellen Modellentwicklungsstandes gesehen werden. Für die Validierung wurde im Jahr 2006 eine Ertragserhebung von Landwirten im und um den Bezirk Hartberg durchgeführt. Diese Daten dienen zunächst dazu, den aktuellen Entwicklungsstand beurteilen zu können und einen Anhaltspunkt für künftige Erweiterungen und Verbesserungen zu liefern. Der in dieser Arbeit durchgeführte Vergleich von Modellergebnissen und Erhebungsdaten hat noch keinen zufrieden stellenden Zusammenhang nachweisen können.

Die verschiedenen Systemkomponenten werden in 40 Klassen abgebildet, die so strukturiert sind, dass Erweiterungen problemlos umgesetzt werden können. Die Verwendung des Modells für andere Untersuchungsgebiete bzw. Zeiträume ist durch eine dafür geeignete Implementierung gewährleistet. Eine Präsentationsschicht (Windows-Oberfläche) wurde bislang nicht implementiert, jedoch durch entsprechende Schnittstellengestaltung vorgesehen.

Eine Verwendung der entwickelten Software ist nicht nur für die Bestimmung von Grünlanderträgen geeignet, sondern bietet auch Anknüpfungspunkte für die Klimafolgenforschung mit räumlicher Ergebnisrepräsentation, insbesondere der trockenheitsbedingten Konsequenzen für die Landwirtschaft. Die Berechnung von Erträgen anderer landwirtschaftlicher Kulturen (Mais, Weizen, Zuckerrübe, usw.) ist in einem künftigen Forschungsprojekt geplant und wird durch die in dieser Arbeit realisierte Implementierung unterstützt werden.

7. Diskussion und Ausblick

Die mehrjährigen Erfahrungen in der Bearbeitung zur Bestimmung von Grünlanderträgen und deren räumliche Umsetzung haben gezeigt, dass ein Schlüsselfaktor für eine laufende Weiterentwicklung in einer geeigneten technischen Plattform liegt. Die vielen bislang vorgenommenen Modelländerungen erfordern immer wieder einen neuen Berechnungsdurchlauf, um an Hand der Ergebnisse die Konsequenzen der durchgeführten Veränderungen erkennen zu können. Die Fortführung der Forschung im Projekt „Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen“ des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft hat die Notwendigkeit zur Schaffung einer entsprechenden Software zur Unterstützung des iterativen Entwicklungsprozesses deutlich vor Augen geführt. Der Zeitaufwand, um von einer geringfügigen Modifikation zum Ergebnis zu gelangen, muss so weit reduziert werden, dass es keine Rolle spielt, wie oft und wie viel geändert wird.

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Implementierung ist die Voraussetzung für die zukünftige intensive Arbeit an den Modellen selbst. Die Ausführungen zu den Methoden und Ergebnissen haben klar auf das große Verbesserungspotential Bezug genommen. In den kommenden Jahren geht es also darum, dieses Potential umzusetzen und durch die hier entwickelte Software kaum noch Ressourcen für technische Maßnahmen aufwenden zu müssen. Die Tatsache, dass die mit dieser Implementierung erstmals umgesetzten Ergebnisse nicht den Erwartungen entsprachen, bekräftigt umso mehr die Relevanz des hier verfolgten Ansatzes.

Das moderne Softwarekonzept beschreibt den Aufbau einer Applikation meist in mehreren Schichten. Bei Desktop-Anwendungen ist in der Regel eine Drei-Tier-Architektur realisiert, die von den Daten über die Programmlogik bis hin zur Benutzerschnittstelle reicht. Die vorliegende Arbeit hat sich hauptsächlich mit der Programmlogik befasst und die von ArcGIS zur Verfügung gestellte Datenschicht eingebunden. Die Benutzerschnittstelle ist zurzeit eine Testklasse, in der Methodenaufrufe mit den gewünschten Parametern direkt im Programmcode eingegeben und die verschiedenen Berechnungsroutinen damit ausgeführt werden. Allerdings ist geplant, in einer nächsten Überarbeitung dafür eine benutzerfreundliche Windows-Oberfläche zu schaffen, in der die An-

wendung komfortabel bedient werden kann. Dies ist auch deshalb wichtig, damit sich außer dem Programmierer auch andere Projektbeteiligte mit der Software zurechtfinden können. In der aktuellen Projektphase steht die Benutzerführung jedoch nicht im Vordergrund, da während der Modellentwicklung noch zahlreiche Eingriffe in die Logik selbst notwendig sind und eine Bedienung über die Oberfläche allein nicht ausreicht.

Die Verwendung von C# und ArcObjects hat sich als optimale Kombination herausgestellt. Durch die große Ähnlichkeit von C# und Java konnten die bereits vorhandenen Java-Programmierenkenntnisse voll genutzt und die Programmierung ohne Einarbeitung in die Sprache vorgenommen werden. Erfahrungen mit ArcObjects bestanden ebenfalls aus den Vorarbeiten im Projektumfeld. Allerdings ist die Klassenbibliothek von ESRI derart umfangreich, dass es zur Lösung eines Problems viele Wege gibt und die Suche nach einer optimalen und performanten Umsetzung äußerst aufwendig ist. Nur aufgrund der bereits gesammelten Erfahrungen konnte die Implementierung in einem vertretbaren Zeitrahmen vorgenommen werden.

Schwerpunkt dieser Arbeit war die technische und insbesondere die räumliche Umsetzung von Modellen zur Bestimmung des Grünlandertrages aus der Sicht der Geoinformatik. Für die Ergebnisse des Systems sind allerdings die Modelle bzw. deren Kombination verantwortlich. Das Hauptaugenmerk für die zukünftige Entwicklung liegt deshalb bei der Modellgestaltung. Die Kompetenz für die Erstellung eines derart vielschichtigen Systems mit verschiedenen fachlichen Aspekten kann nicht durch den Fachbereich Geoinformatik abgedeckt werden. Aus diesem Grund ist die Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen notwendig. Landwirtschaft, Agrarmeteorologie, Hydrologie, Statistik, usw. müssen gemeinsam zur Problemlösung beitragen. Das Forschungsprojekt, in dem diese Arbeit eingebettet ist, vereinigt die unterschiedlichen Bereiche durch die Beteiligung zahlreicher Projektpartner, die ihren fachlichen Teil umsetzen und in das Gesamtsystem einbringen.

Die große Herausforderung bei der Grünlandertragsermittlung besteht darin, eine Balance der statistischen Abhängigkeiten des Ertrages zwischen Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren zu finden. Der Einfluss von in der Regel relativ gut repräsentierbaren Standardfaktoren muss gegenüber den schlecht zu modellierenden Bewirtschaftungsfaktoren in ein Verhältnis gebracht werden, dass damit ein gewisser Genauigkeitsanspruch der Ertragsrechnung realisiert werden kann. Befinden sich die Abweichungen

vom Realertrag im Bereich von rund 20 bis 30 %, ist das Ziel erreicht. Besonders jene Bewirtschaftungsmaßnahmen, die von Standortfaktoren abgeleitet werden können, stehen zukünftig im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses.

Die wichtigsten Parameter in diesem Zusammenhang sind der Schnittzeitpunkt und die Schnitthäufigkeit. Eine möglichst genaue Abbildung dieser beiden Größen ist für das Gelingen des gesamten Projektes entscheidend. Wie in der Arbeit bereits dargestellt, ist der Bezug zur Vegetationsperiode ein möglicher Ansatz, der nur dann erfolgreich verfolgt werden kann, wenn diese für das Wachstum relevante Zeit der Realität auch hinsichtlich der räumlichen Umsetzung bestmöglich entspricht. Neben der Bestimmung von Beginn und Ende muss auch eine Methode gefunden werden, wie die Pflanzenbestandesentwicklung während der Vegetationsperiode nachgebildet werden kann. Dazu müssen Abhängigkeiten gefunden und auf deren räumliche Anwendbarkeit hin untersucht werden. Die Integration von Fernerkundungsdaten bietet für die Evaluierung viele Möglichkeiten und es wird unerlässlich sein, diese auch zu nutzen.

Das Ertragsmodell GRAM wird seit dem Jahr 2003 mit Ertragsdaten aus 27 über ganz Österreich verteilten Exaktversuchen kalibriert. Die Ertragsmessungen werden noch mindestens drei Jahre fortgeführt und bieten für die laufende Kalibrierung des statistischen Modells ein großes Verbesserungspotential. Der Zusammenhang zwischen Modellergebnissen und Ertragsmessungen ist an den Standorten sehr gut, allerdings sind dort Pflanzenbestand, Schnitttermine und exakte Düngungsmaßnahmen bekannt. Die praktische Verwendung des Modells ist eng mit der Möglichkeit der räumlichen Repräsentation verknüpft und alle Anstrengungen in diese Richtung sind in Anbetracht der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten eines funktionierenden Systems in jedem Fall gerechtfertigt. Das große Interesse an der Ertragsmodellierung belegt die Tatsache, dass weltweit zahlreiche Forschungsprojekte an dieser Problemlösung im Kontext des globalen Klimawandels arbeiten.

Geoinformationstechnologie ist damit integraler Bestandteil eines interdisziplinären Prozesses und der Beitrag mit Arbeiten wie der vorliegenden eine große Motivation für künftige Weiterentwicklungen, die einem besseren Verständnis von Zusammenhängen und Vorgängen in der uns umgebenden Welt dienen.

8. Literaturverzeichnis

- AASA, A. (2005): Changes in Phenological Time Series in Estonia and Central and Eastern Europe 1951-1998. Relationships with Air Temperature and Atmospheric Circulation. Dissertation, Institute of Geography, Faculty of Biology and Geography, University of Tartu, Estonia, Tartu University Press, 130 S.
- ALLEN, G.A, PEREIRA, L.S, RAES, D. and SMITH, M. (1998): Crop Evapotranspiration – guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome, 300 S.
- BACHMANN, A. (1996): Verdunstungsmodellierung im unteren Thurgau. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Zürich, Geo-Processing Reihe Vol. 24, 49 S.
- BAILER-JONES, D. M. (2002): Naturwissenschaftliche Modelle: Von Epistemologie zu Ontologie. In: BECKERMANN A. und NITZ C. (Hrsg.): Argument und Analyse - Sektionsvorträge, GAP4 e-Proceedings <http://www.gap-im-netz.de/gap4Konf/Proceedings4/pdf/6%20WT01%20Bailer-Jones.pdf> (29.05.2007), Mentis Verlag, Paderborn, 1-11.
- BARTELME, N. (2000): Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen. Dritte, erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 419 S.
- BELLA, D., FAIVRE, R., RUGET, F. SEGUIN, B., GUÉRIF, M., WEISS, M. and REBELLA, C. (2004): Remote sensing capabilities to estimate pasture production in France. *International Journal of Remote Sensing* 25 (23), 5359-5372.
- BERNHARDSEN, T. (2002): Geographic Information Systems – An Introduction. Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 428 S.
- BLÖSCHL, G. und MERZ, R. (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. *Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer* 164 (2002), 149-178.
- BMLFUW (2006): Grüner Bericht 2006. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung II 5, Wien, 320 S.
- BOHNER, A. (2003): Floristische Diversität im Spannungsfeld zwischen Landwirtschaft und Naturschutz. 9. Alpenländisches Expertenforum, 27.-28. Mai 2003, BAL Gumpenstein, Irnding, 29-39.
- BUCHGRABER, K. (1998): Nutzung und Konservierung des Grünlandfutters im österreichischen Alpenraum. Habilitationsschrift, Universität für Bodenkultur Wien, Mai 1998, 113 S.
- BUCHGRABER, K. (2007): Persönliche Mitteilung, 22.01. 2007.
- BUCHGRABER, K. und GINDL, G. (2004): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung. 2. Auflage. Leopold Stocker Verlag, 192 S.
- BUCHGRABER, K., RESCH, R., SCHAUMERGER, 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, Irnding, 233 S.

- CAZORZI, F. and DALLA FONTANA G. (1996): Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *Journal of Hydrology* 181 (1996), 169-187.
- CLARK, I. and CLAUSEN, F.L. (1981): Simple alternative to disjunctive kriging. *Trans. Inst. Min. Metall.* 90 (1981), A13-A24.
- DEMYANOV, V., KANEVSKY, M., CHERANOV, S., SAVELIEVA, E. and TIMONIN, V. (1998): Neural Network Residual Kriging Application for Climatic Data. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 2 (2), 215-232.
- ELLER, F. (2006): *Visual C# 2005: Grundlagen, Programmier Techniken, Datenbanken*. Addison-Wesley Verlag, München, 1096 S.
- ESRI (2000): *Developing Applications with ArcInfo: An Overview of ArcObjects*. ESRI Technical Paper, Redlands, California, http://www.discovergis.com/Pdf/ai8_arcobjects.pdf (29.05.2007), 18 S.
- ESRI (2004): *ArcGIS Desktop Developer Guide, ArcGIS 9.1*. ESRI, Redlands, California, 335 S.
- FANK, J. (2007): Die Gras-Referenzverdunstung: Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit von Messgerät und Messintervall. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, 17.-18. April 2007, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irnding, 53-56.
- FOWLER, M. (2004): *UML konzentriert – Eine kompakte Einführung in die Standard-Objektmodellierungssprache*. 3. Auflage, Addison-Wesley Verlag, München, 192 S.
- FU, P. and RICH, P.M. (1999): Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm> (29.05.2007).
- GOOS, G. (2001): *Vorlesungen über Informatik. Band 2: Objektorientiertes Programmieren und Algorithmen*. 3. Auflage, 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 (2000), 113-129.
- GUGGENBERGER, T. (2006): Befunde zur österreichischen Grünlandwirtschaft: Gutes ökologisches Verhalten bei hoher Energieabhängigkeit der Tierproduktion. *Landkalender 2007*, Leopold Stocker Verlag, Graz, 97-102.
- HÄCKEL, H. (2005): *Meteorologie*. 5. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 447 S.
- HALL, D.K., RIGGS, G.A., SALOMONSON, V.V., BARTON, J.S., CASEY, K., CHIEN, J.Y.L., DIGIROLAMO, N.E., KLEIN, A.G., POWELL, H. W. and TAIT, A.B. (2001): Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms. <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/atbd01.html> (29.05.2007).
- HAN, D., O'KIELY, P. and SUN, D. (2003): Application of Water-stress Models to estimate the Herbage Dry Matter Yield of a Permanent Grassland Pasture Sward Regrowth. *Biosystems Engineering* 84 (1), 101-111.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. - *Mitteilungen Deutscher Wetterdienst* 2 (11), Bad Kissingen.

- HÖCK, M. und MANEGOLD, J. (2006): ArcMap –Programmierung mit VBA. 4. überarbeitete Auflage, Eigenverlag, 831 S.
- HOOGENBOOM, G. (2000): Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and Forest Meteorology* 103 (2000), 137-157.
- HÖRMANN, G. (1997): SIMPEL - ein einfaches, benutzerfreundliches Bodenwassermodell zum Einsatz in der Ausbildung. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 41 (2), 67-72.
- HÖRMANN, G. und MEESENBURG, H. (2000): Die Erfassung und Modellierung des Wasserhaushaltes im Rahmen des Level II-Programms in der Bundesrepublik Deutschland. *Forstarchiv* 71 (2000), 70-75.
- IPCC (2007a): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers, http://www.ipcc.ch/WG1_SPM_17Apr07.pdf (29.05.2007).
- IPCC (2007b): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, <http://www.ipcc.ch/SPM13Apr07.pdf> (29.05.2007).
- JIANLONG, L. TIANGANG, L. and QUANGONG, C. (1998): Estimating grassland yields using remote sensing and GIS technologies in China. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Vol. 41, 31-38.
- KÄDING, H., KAISER, T. and WERNER, A. (2005): Model for calculating grassland yields and forage quality in North-East Germany on the basis of site and management characteristics, *Archives of Agronomy and Soil Science* 51 (4), 417-431.
- KLEIN, S.A. (1977): Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, Vol. 19, Pergamon Press 1977, 325-329.
- KROMP-KOLB, H. (2003): Ursachen der globalen und regionalen Klimaveränderung und deren mögliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft. 1. Klimaseminar zum Generalthema „Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft“, 22. April 2003, BAL Gumpenstein, 5-8.
- 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“, BOKU, Institut für Meteorologie und Physik, Wien, 88 S.
- LI, S., TARBOTON, D.G. and MCKEE, M. (2003a): GIS-based temperature interpolation for distributed modelling of reference evapotranspiration. Poster, AGU Hydrology Days 2003, March 31 – April 2, 2003, Colorado State University, 2 S.
- LI, S., TARBOTON, D.G. and MCKEE, M. (2003b): Development of an ArcMap Toolbar for Regional Evapotranspiration Modeling. 23rd ESRI International User Conference, San Diego, California, Juli 7-11, 12 S.
- LIBERTY, J. (2005): Programmieren mit C#. 2. Auflage, O'Reilly Verlag Köln, 655 S.
- LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. and RHIND, D.W. (2005): *Geographic Information Systems and Science*. Second Edition, John Wiley & Sons, UK, 517 S.

- MERZ, R. (2006): Regionalisierung von statistischen Hochwasserkenngrößen. Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer 197 (2006), 22 S.
- MINO, N., SAITO, G. and OGAWA, S. (1998): Satellite monitoring of changes in improved grassland management. International Journal of Remote Sensing, 19 (3), 439-452.
- MONESTIEZ, P., COURAULT, D., ALLARD, D. and RUGET, F. (2001): Spatial interpolation of air temperature using environmental context: Application to a crop model. Environmental and Ecological Statistics 8 (2001), 297-309.
- MÖSSENBÖCK, H. (2006): Softwareentwicklung mit C# 2.0. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, dpunkt.Verlag, Heidelberg, 272 S.
- MURER, E., WAGENHOFER, J., AIGNER, F. und PEFFER, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. Schriftenreihe BAW, 20, 72-78.
- NOUVELLON, Y., MORAN, M.S., SEEN, D.L., BRYANT, R., RAMBAL, S., NI, W., BEGUE, A., CHEHBOUNI, A., EMMERICH, W.E., HEILMAN, P. and QI, J. (2001): Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets. Remote Sensing of Environment 78 (2001), 131-149.
- PARAJKA, J. and G. BLÖSCHL (2006): Validation of MODIS snow cover images over Austria. Hydrology Earth System Sciences, 10, European Geosciences Union, 679-689.
- PARAJKA, J., HOLKO, L. and KOSTKA, Z. (2001): Distributed modelling of snow water equivalent – coupling a snow accumulation and melt model and GIS. GISdevelopment.net – The Geospatial Resource Portal, <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/mountain/mount0007.htm>, (29.05.2007).
- PARAJKA, J., MERZ, R. and BLÖSCHL, G. (2005): A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. European Geosciences Union, Hydrology Earth System Sciences Discussions, 2, 509-542.
- PÖTSCH, E.M. (2007): Austrian agriculture – data and facts. In: HELGADOTTIR, A. and PÖTSCH, E.M. (Eds.): Quality Legume-Based Forage Systems for Contrasting Environments. Proceedings of the Final COST Meeting, 30th August - 3rd September 2006, Federal Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Austria, 11-14.
- PÖTSCH, E.M. und RESCH, R. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter. 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 13.-14. April 2005, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 1-14.
- RECHENBERG, P. (2000): Was ist Informatik? Eine allgemeinverständliche Einführung. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 256 S.
- SCHAUMBERGER, A. (2005): Ertragsanalyse im österreichischen Grünland mittels GIS unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Veränderungen. Veröffentlichungen der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Heft 42, 66 S.
- SCHEPPLER, P. (2000): Schneedeckenmodellierung und Kalibrationsmöglichkeiten für ausgewählte Beobachtungsstationen. Diplomarbeit, Universität Bern, 111 S.

- TRNKA, M., EITZINGER, J., GRUSZCZYNSKI, G., BUCHGRABER, K., RESCH, R. and SCHAUMBERGER, A. (2006): A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. *Grass and Forage Science* 61 (3), 253-271.
- TVEITO, O.E. and SCHÖNER, W. (Eds.) (2002): Applications of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS). Report No. 1/WG2 Spatialisation/COST-719, 44 S.
- VAN DEURSEN, W.P.A (1995): Geographical Information Systems and Dynamic Models; development and application of a prototype spatial modelling language. Knag/Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, 206 S.
- WEBER, B (2004): Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt und Modellierung der Bodenwasserflüsse entlang eines Höhen- und Ariditätsgradienten (SE Marokko). Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 229 S.
- WEIBEL, D., WUNDERLE S. and KLEINDIENST, H. (2002): A distributed snow model to simulate the snow cover combining GIS and Remote Sensing. *EARSel Proceedings, Symposium Prague, 2002*, 383-388.
- WHITE, M., THORNTON, P.E. and RUNNING, S.W. (1997): A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles* 11 (2), 217-234.
- ZAMG (2004): Klima-Monatsübersicht - Witterungsübersicht März 2004. http://www.zamg.ac.at/zamg2/na_pro/wrapper/media.php3?filename=/dot/project/www/mmedia/webuse/documents/klima/wiewars03-04.pdf (29.05. 2007)
- ZHANG, X. (2006): Test and application of hydrological models with a spatial modelling language (PCRaster) for the discharge simulation of a wetland dominated catchment in Northern Germany. Master thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Ökologiezentrum, 99 S.
- ZHANG, X., FRIEDL, M.A., SCHAAF, C.B. and STRAHLER, A.H. (2004): Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology* 10 (2004), 1133-1145.

9. Quellenverzeichnis

- BAYER, J. (2006): Das C# 2005 Codebook. Addison-Wesley Verlag, München, 1022 S.
- BURKE, R. (2003): Getting to know ArcObjects – Programming ArcGIS with VBA. ESRI Press, Redlands, California, 422 S.
- DOBERENZ, W. und GEWINNUS, T. (2006): Datenbankprogrammierung mit Visual C# 2005 – Grundlagen, Rezepte und Anwendungsbeispiele. Microsoft Press Deutschland, 1040 S.
- ESRI (2004): ArcGIS Desktop Developer Guide, ESRI Press, Redlands, California, 335 S.
- MITCHELL, A. (1999): The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 1: Geographic Patterns & Relationships. ESRI Press, Redlands, California, 186 S.
- PETZOLD, C. (2005): Microsoft Windows Forms-Programmierung mit Visual C# 2005. Microsoft Press Deutschland, 385 S.
- SCHWICHTENBERG, H. (2006): Microsoft .net 2.0 Crashkurs. 2. Auflage, Microsoft Press Deutschland, 529 S.
- SHARP, J. (2006): Microsoft Visual C# 2005 Schritt für Schritt. Microsoft Press Deutschland, 600 S.
- TOMLINSON, R. (2003): Thinking about GIS. Geographic Information System Planning for Managers. ESRI Press, Redlands, California, 283 S.
- ZEILER, M. (1999): Modeling our World – The ESRI Guide to Geodatabase Design. ESRI Press, Redlands, California, 199 S.
- ZEILER, M. (2001): Exploring ArcObjects. Vol. I – Applications and Cartography. ESRI Press, Redlands, California, 725 S.
- ZEILER, M. (2001): Exploring ArcObjects. Vol. II – Geographic Data Management. ESRI Press, Redlands, California, 725 S.