

Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter dem Einfluss von Wasserstress

Andreas Schaumberger^{1*} und Alexander Kowarik²

Zusammenfassung

Grünland ist in Österreich mit über der Hälfte der landwirtschaftlichen Nutzfläche eine der wichtigsten Kulturen. 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. Auf Basis von langjährigen Grünlandversuchen in ganz Österreich wurde ein statistisches Modell (Grassland Statistical Model – GRAM) entwickelt und für eine räumliche Implementierung mittels Geographischem Informationssystem (GIS) optimiert. Die Herausforderung dieser Entwicklung liegt zum einen in der Berücksichtigung vieler verschiedener Standorte bei der Modellkalibrierung und -verifizierung und zum anderen in der Komplexität des Zusammenspiels von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren im Grünland. In diesem Ansatz wurde besonders auf die klimatischen Bedingungen und deren Einfluss auf den Ertrag eingegangen. Ein Bodenwasserbilanzmodell liefert Informationen über die Wasserverfügbarkeit und ermöglicht die Bestimmung von Wasserstress. Temperatur und Globalstrahlung als wichtige Faktoren für das Wachstum werden bei deren Summenbildung über die Aufwuchsdauer von der Limitierung an verfügbarer Bodenfeuchte beeinflusst und bilden auf diese Weise die wichtigsten Prädiktoren im Schätzmodell. Statistische Auswertungen von Erntertragsmengen für unterschiedliche räumliche Einheiten sind neben der Berechnung von Grundfutterbilanzen eine wichtige Anwendung des Modells. Die Integration von historischen Wetterdaten zeigt die Ertragsentwicklung in der Vergangenheit, werden jedoch Klimamodelldaten für die Berechnung der Bodenwasserbilanz herangezogen, sind ebenso Ertragsschätzungen im Rahmen von Zukunftsszenarien möglich. Eine Klimaveränderung und deren Auswirkungen auf den Grünlandertrag können auf diese Weise im Modell abgebildet werden. Die sich aus dem Vergleich mit Referenzperioden ergebenden Abweichungen zeigen räumliche und zeitliche Verschiebungen von Bewirtschaftungsbedingungen und liefern damit einen wichtigen Anhaltspunkt für die Entwicklung von Anpassungsstrategien in der Grünlandwirtschaft.

Schlagwörter: Grünlanderträge, Bodenwasserbilanz, Geographisches Informationssystem, Wasserstress, Klimawandel

Summary

Grassland is one of Austria's most important cultures and covers more than half of the agriculturally used area. The increase of drought periods caused by climate change requires the estimation of yield in order to respond to production changes in time. A statistical model (Grassland Statistical Model – GRAM) based on long-term grassland experiments throughout Austria was developed and optimised for GIS implementation. The involvement of many experiment sites for model calibration and verification on the one hand and the complex interaction of site and management factors on the other hand posed a challenge. The focal point of this approach was the consideration of climate impact on yield. A soil water balance model provides information about water availability and water stress. The accumulated temperature and global radiation are important factors for growth and are both reduced in case of restricted soil water content. These are the most significant predictors of the model. The implementation of differentiated cutting regimes on grassland was derived from spatio-temporal temperature analysis (thermal growing season) combined with theoretical cutting dates determined on the base of substantial observations. Grassland yield is correlated to the number of cuts and this approach of area-wide and growth-related yield estimation allows calculating yield for each cutting regime on each field. The qualification of fields with intensive or extensive utilization can be applied on the according yield result. Statistical reports of yield on several spatial entities and the analysis of forage balance are the main applications of the developed model. The use of observed weather data shows the yield trend in the past. However, the integration of climate model data for calculation of soil water balance provides future prospects of yield development in context of climate scenarios. Thus, climate impact on grassland yield can be represented by the model. Deviations from previous reference periods concern spatio-temporal shifts of management conditions and provide an important indication for development of adaptation strategies for grassland management.

Keywords: grassland yield, soil water balance, Geographic Information System, water stress, climate change

¹ LFZ Raumberg-Gumpenstein, Referat für Geoinformation im ländlichen Raum, A-8952 Irnding

² Bundesanstalt Statistik Austria, Guglgasse 13, A-1110 Wien

* Ansprechpartner: Mag. Andreas Schaumberger, MSc, email: andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

1. Einleitung

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

Die Art der Bewirtschaftung hängt im Wesentlichen von naturbedingten Faktoren (Klima, Wetter, Bodenverhältnisse, Topographie), von der Entfernung zum Hof und von der geometrischen Form der Grünlandflächen ab (BUCHGRABER und GINDL, 2004). Sie reicht vom extensiven Grünland (Almen, Bergmähder, Hutweiden, einmähdige Wiesen und Streuwiesen) über intensives Wirtschaftsgrünland (mehrmähdige Wiesen, Kulturweiden) bis hin zum Feldfutterbau (Klee-, Klee gras- und Reingrasbestände) (BMLFUW, 2008).

Das Grünland bildet die wichtigste Komponente in der Fütteration des Raufutter verzehrenden Viehs in über der Hälfte der landwirtschaftlichen Betriebe; im Berggebiet sind rund 70 % der Betriebe auf die Grünlandbewirtschaftung angewiesen. Neben dem Ertrag aus Wiesen und Weiden für die Tierfütterung ist das Grünland ein wesentliches Element der Kulturlandschaft. Die Erhaltung eines abwechslungsreichen und offenen Landschaftsbildes ist insbesondere in vielen vom Tourismus geprägten Gebieten des Alpenraumes von großer Bedeutung. Auch die alternative Nutzung der Grünlandbiomasse zur Stoff- und Energiegewinnung wird zunehmend zu einem wichtigen Aspekt der Landnutzung (PÖTSCH, 2007). Der Ertrag im Wirtschaftsgrünland beträgt rund 6,9 t Trockenmasse (TM) pro ha und Jahr, das sind in Summe rund 6,2 Millionen t TM/Jahr. Diese Flächen liefern rund 72 % des gesamten Grundfutterbedarfs und sind deshalb für die Viehwirtschaft maßgeblich (BMLFUW, 2008). Wirtschaftsgrünland ist hauptsächlich in den Gunstlagen des Alpenvorlandes zu finden, durchzieht aber auch die Täler des Alpenhauptkamms. Grünland findet sich grundsätzlich überall dort, wo aus natürlichen und/oder produktionstechnischen Gründen Ackerbau nicht oder kaum betrieben wird (BUCHGRABER und GINDL, 2004).

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 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.

Wie der aktuelle UNO-Klimabericht 2007 zeigt, sind die Durchschnittstemperaturen der Nordhemisphäre in den letzten 50 Jahren so stark angestiegen wie noch in keiner anderen 50-Jahr-Periode der letzten 1300 Jahre davor. Für die nächsten beiden Dekaden ist mit einer Erwärmung um 0,2 °C pro Dekade zu rechnen und wird selbst im Fall der Einhaltung des Emissionsniveaus aus dem Jahr 2000 trotzdem noch 0,1 °C erreichen. Am Ende des 21. Jahrhunderts wird die Erwärmung im Vergleich zur Periode 1980 bis 1999 bei optimistischem Szenario zwischen 1,1 und 2,9 °C und nach pessimistischer Prognose zwischen 2,4 und 6,4 °C betragen (IPCC, 2007b).

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

Standortfaktoren, die Veränderungen des Klimas und eine sehr differenzierte Bewirtschaftung macht die Bestimmung von Grünlanderträgen zu einem schwierigen Thema. Die verschiedenen Einflüsse weisen zahlreiche wechselseitige Abhängigkeiten auf und sind deshalb nur schwer nach Prioritäten zu ordnen. Vor allem die Bewirtschaftungsmaßnahmen werden durch das individuelle Management eines Landwirtes viel stärker gestaltet, als dies aus objektiven, dem Standort zuzuordnenden Parametern abgeleitet werden kann. Allerdings fällt bei der Untersuchung der

Einflussfaktoren auf, dass viele einen massiven Raumbezug aufweisen und deshalb der Einsatz eines Geographischen Informationssystems (GIS) zur Analyse von Zusammenhängen außerordentlich sinnvoll erscheint. Daraus ergibt sich die Frage, ob und wie eine raumzeitliche Betrachtung einer derart komplexen Problemstellung möglich ist.

2. Modelle als Grundlage der räumlichen Implementierung

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 näherungsweise beschrieben wird.

Bei der hier vorgestellten Schätzung 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 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. In *Abbildung 1* wird ein Überblick über die einzelnen Systemkomponenten gezeigt, welche in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

Die Standortbedingungen, das Klima und die Wetterverhältnisse können in räumlichen Modellen 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 grundsätzlich zum Wachstum 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. Eine räumliche Implementierung erfordert aufgrund der im Gegensatz zu punktuellen Berechnungen

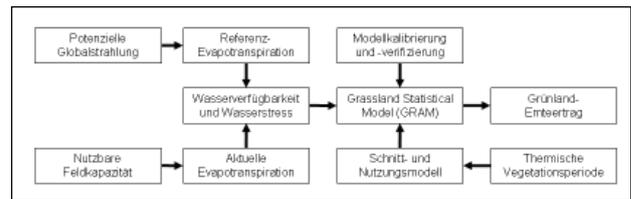


Abbildung 1: Modelle und Systemkomponenten zur Schätzung des Grünlandertrages

oft nicht zur Verfügung stehenden raumbezogenen Geodaten möglichst einfache Ansätze.

Die technische Grundlage für eine flächendeckende und fachübergreifende Analyse von räumlichen Daten in einem GIS bildet das Rasterdatenmodell. Diese Form der Datenrepräsentation bietet die Möglichkeit, ein Untersuchungsgebiet in quadratische Einheiten gleich einer Matrix mit Spalten und Zeilen zu teilen und jeder Zelle einen Wert zuzuweisen. Die einzelnen Zellen können verschiedene Wetterwerte (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, usw.), die Beschreibung der Topographie (Seehöhe, Hangneigung, Exposition), aber auch die Ergebnisse aus Modellrechnungen (z.B. die Dauer der Vegetationsperiode) beinhalten. 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. Für die vorliegende Arbeit wurde für die gesamte Fläche Österreichs eine Auflösung von 250 Meter gewählt.

3. Modellierung der Wasserverfügbarkeit

Das Pflanzenleben im System Klima-Boden-Pflanze wird wesentlich durch Wasserangebot und Transpirationsleistung bestimmt. Ein Bodenwasserbilanzmodell ermöglicht die Berechnung der Wasserverfügbarkeit, aus der in weiterer Folge auch auf Wasserstress geschlossen werden kann. Je nach Komplexität des implementierten Modells werden hier mehr oder weniger Einflussgrößen berücksichtigt. In Hinblick auf die räumliche Modellierung und den zur Verfügung stehenden Geodaten wurde im vorliegenden Ansatz ein Modell gewählt, welches sich auf die Bilanzierung von Niederschlag und Evapotranspiration unter Berücksichtigung des Wasserhaltevermögens des Bodens beschränkt. Die Evapotranspiration beschreibt die Verdunstung auf der mit Vegetation bewachsenen Erdoberfläche und setzt sich aus der Evaporation über offenem Boden und der Transpiration von Pflanzen zusammen. Sie ist ein bestimmender Parameter des Wasserhaushaltes von Pflanzenbeständen und maßgeblich für die Felderträge in der Landwirtschaft verantwortlich (EHLERS, 1996).

3.1 Referenz-Evapotranspiration

In einem ersten Schritt wird die potenzielle Evapotranspiration einer genau definierten Oberfläche berechnet. Bei dieser so genannten Referenz-Evapotranspiration wird die Betrachtung auf den zeitlich variablen Witterungseinfluss reduziert und vorausgesetzt, dass für die Verdunstung des angenommenen Pflanzenbestandes stets ausreichend Was-

ser zur Verfügung steht. Die Referenz-Evapotranspiration stellt somit jene Wassermenge dar, welche bei unlimitierter Wasserverfügbarkeit verdunsten könnte. Ausschlaggebend dafür sind der für den Verdunstungsprozess notwendige Energieeintrag in Form von Strahlung und Temperatur sowie der Feuchtigkeitstransfer durch Wind und Luftfeuchtigkeit in der bodennächsten Atmosphärenschicht (BROWN, 2000).

Eine der meistverwendeten Formeln zur Berechnung der Referenz-Evapotranspiration ist die Gleichung nach Penman-Monteith, welche auch von der Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO) empfohlen wird. Die FAO-Gleichung gehört zu den komplexen, physikalisch basierten Ansätzen und benötigt daher auch eine Reihe von meteorologischen Parametern wie die Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte oder aerodynamische Einflussgrößen. Die Arbeit von ALLEN *et al.* (1998) bildet mit ihrer detaillierten Beschreibung zur Verwendung der FAO-Penman-Monteith-Gleichung die theoretische Grundlage der hier durchgeführten Berechnungen. Für diese Gleichung wird eine Referenzoberfläche mit Grasbedeckung und einer Schnittlänge von 12 cm, einem Albedowert von 0,23 und einem aerodynamischen Widerstandsbeiwert mit 70 s m^{-1} definiert. Die Einführung dieser Referenzoberfläche erleichtert den Vergleich von räumlich und zeitlich differenzierten Ergebnissen und erlaubt auch eine pflanzenartenspezifische Erweiterung durch das zusätzliche Anbringen eines Pflanzenfaktors. Die Erweiterung der Referenz-Evapotranspiration auf nicht standardisierte Bedingungen hinsichtlich einer limitierten Wasserverfügbarkeit ist insbesondere für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte GIS-Implementierung der Bodenwasserbilanz eine wichtige Grundlage. Eine detaillierte Beschreibung zur relativ umfangreichen Berechnung der Referenz-Evapotranspiration findet sich in SCHAUMBERGER *et al.* (2008b).

3.2 Aktuelle Evapotranspiration

Die im Zusammenhang mit der Bestimmung von Wasserstress wichtigste Größe, welche aus dem Bodenwasserbilanzmodell hervorgeht, ist die aktuelle Evapotranspiration. Im Gegensatz zur Referenz-Evapotranspiration enthält sie Informationen über den Wassereintrag in Form des Niederschlags und über die für den Wasserhaushalt relevanten Bodeneigenschaften. Die aktuelle Evapotranspiration beschreibt also jene Verdunstungsmenge, die aufgrund der tatsächlichen Wasserverhältnisse im Boden stattfindet; im Gegensatz dazu wird bei der Referenz-Evapotranspiration von einem wassergesättigten Zustand ausgegangen.

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

Die Bodeneigenschaften sind in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung und werden im Modell in Form der nutzbaren Feldkapazität berücksichtigt. Sie drückt die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens aus und wurde vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt mit Hilfe von Pedotransferfunktionen nach MURER *et al.* (2004) gerechnet. Die Grundlage dafür bilden Kennwerte über Korngrößenverteilung, Humus- und Kalkgehalt, sowie pH-Wert aus der Österreichischen Bodenkartierung in digitaler Form. Die Berechnung bezieht sich auf die mineralischen Bodenformen der landwirtschaftlichen Nutzfläche (MURER, 2009).

Im Laufe einer Vegetationsperiode ist Wasser je nach Klimaregion oft ein limitierender Faktor, der bei der Berechnung der aktuellen Evapotranspiration berücksichtigt werden muss und die Referenz-Evapotranspiration (ET_0) entsprechend dem Niveau der Wasserknappheit verändert. Nach ALLEN *et al.* (1998) wird daher noch ein zusätzlicher Faktor, der Wasserstresskoeffizient K_s , angebracht:

$$ET_a = ET_0 \cdot K_s \quad (1)$$

ET_a ist die aktuelle Evapotranspiration [mm d^{-1}], welche aus der Gewichtung der Referenz-Evapotranspiration ET_0 [mm d^{-1}] mit dem Wasserstresskoeffizienten K_s hervorgeht. Die Berechnung von K_s ist umfangreich und erfolgt nach ALLEN *et al.* (1998) über den Verlauf der Vegetationsperiode kumulativ und in den nachfolgend vorgestellten Schritten.

Total Available Water (TAW)

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

$$TAW = 1000 \cdot aFC \cdot Z_r \quad (2)$$

TAW als insgesamt verfügbares Wasser [mm] hängt von der nutzbaren Feldkapazität aFC [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$] als Differenz zwischen Feldkapazität und Welkepunkt sowie von der Durchwurzelungstiefe Z_r [m] ab.

Readily Available Water (RAW)

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

$$RAW = p \cdot TAW \quad (3)$$

$$p = p_r + 0.04 \cdot (5 - ET_0) \quad (4)$$

wobei RAW als leicht verfügbares Bodenwasser [mm] mit Hilfe von p als einen an ET_0 angepassten Fraktionsfaktor [0-1] von TAW errechnet wird. p_r ist ein auf Grünland

abgestimmter Wert nach ALLEN *et al.* (1998) für $ET_0 \approx 5$ mm d⁻¹ und geht mit dem Wert 0.6 in die Gleichung (4) ein. Die numerische Annäherung durch eine Anpassung von p unter Einbeziehung von ET_0 wird auf den Wertebereich $0.1 \leq p \leq 0.8$ eingeschränkt.

Water Stress Coefficient (K_s)

Der Wasserstresskoeffizient wirkt sich direkt auf die Referenz-Evapotranspiration aus und reduziert diese bei eingeschränkter Wasserverfügbarkeit; daraus ergibt sich nach (1) die aktuelle Evapotranspiration. Durch die Berücksichtigung der Bodenwasserabsenkung D_r des Vortages kommt es zu einer kumulativen Fortschreibung der Wasserhältnisse. Damit ist die kontinuierliche Beschreibung der Entwicklung von Wasserstress über eine ganze Vegetationsperiode möglich. Die Gleichung hat die Form

$$K_s = \frac{TAW - D_{r,i-1}}{TAW - RAW} \quad (5)$$

wobei K_s als Wasserstresskoeffizient [0-1] aus den in (2) und (3) entwickelten Werten TAW und RAW gebildet wird. Die Einbeziehung der Bodenwasserabsenkung D_r [mm] bezieht sich auf den Wert des Vortages ($i-1$). Die Initialisierung am Beginn der Vegetationsperiode wird mit 0 angenommen, dies entspricht einem ausreichend mit Wasser gesättigtem Boden, wie er in der Regel nach einem Winter mit ausreichend Niederschlägen besteht.

Die durch einen abnehmenden Wert von K_s zum Ausdruck kommende Verknappung des Bodenswassers ist relativ zur Feldkapazität zu betrachten. Beim Zustand der Feldkapazität beträgt die Bodenwasserabsenkung D_r 0 und erhöht sich mit zunehmender Austrocknung bis zum Wert von RAW ohne Auswirkung auf K_s . Trockenstress tritt erst dann auf, wenn RAW überschritten wird. Ab diesem Zeitpunkt nimmt K_s beginnend beim Wert 1 ab und erreicht 0, wenn D_r beim Wert von TAW angelangt ist. Damit kommt es bei Anwendung eines $K_s < 1$ in der Gleichung (1) zu einer Reduzierung der ET_0 .

Root Zone Depletion (Dr) – Bodenwasserabsenkung

Dieser Parameter beschreibt die tägliche Wasserbilanz für die jeweilige Bodenschicht. In der vorliegenden Arbeit wurde zwischen zwei Bodenschichten (TopSoil: 0-20 cm; SubSoil: 20-40 cm) unterschieden. Dem Wassereintrag in Form von Niederschlag (im Fall der oberen Bodenschicht) bzw. Tiefenversickerung (aus der ersten in die zweite Bodenschicht) steht der Wasseraustrag in Form von Verdunstung bzw. Tiefenversickerung in untere, nicht durchwurzelte Bodenschichten gegenüber. Durch die Berücksichtigung des Vortages zur Errechnung des aktuellen Tages wird eine Entwicklung der Bodenwasserabsenkung beschrieben. Die Gleichung für die Bodenschicht Topsoil hat die Form:

$$D_{r,top,i} = D_{r,top,i-1} - (P_i - I_i) + ET_{0,top,i} + DP_{top,i} \quad (6)$$

für Subsoil sub die Form:

$$D_{r,sub,i} = D_{r,sub,i-1} - DP_{top,i} + ET_{0,sub,i} + DP_{sub,i} \quad (7)$$

D_r ist die Bodenwasserabsenkung [mm] am Tag i bzw. am Vortag ($i-1$). Der Wassereintrag wird ausgedrückt als Niederschlag P [mm] am Tag i in der Gleichung (6) und DP_{top} [mm] am Tag i in der Gleichung (7). Bilanziert wird gegen die Referenz-Evapotranspiration ET_0 [mm] und die Tiefenversickerung DP [mm]. Der Wertebereich von D_r geht von 0 bei vollständiger Sättigung (Feldkapazität) und nimmt bis zum Maximalwert von TAW zu.

Der Niederschlag P wird abzüglich der Interzeption I [mm] in die Gleichung (6) integriert. Dazu wird eine stark vereinfachte Annahme getroffen, nämlich dass sich die Interzeption mit 1,6 mm konstant verhält und sich auf die Referenz-Grasoberfläche bezieht. Wenn die Niederschlagsmenge eines Tages den Wert von $0.2 ET_0$ unterschreitet, wird angenommen, dass diese sofort verdunstet und daher $P-I$ für diesen Tag mit 0 in die Gleichung (6) eingeht.

ALLEN *et al.* (1998) verwenden in der Gleichung (6) auch den Oberflächenabfluss und den Kapillarhub. Diese Parameter werden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, wären jedoch bei zukünftigen Verbesserungen und Erweiterungen der Bodenwasserbilanzierung ein wichtiger Beitrag.

Deep Percolation (DP) – Tiefenversickerung

Wenn der Wassergehalt in der Bodenschicht die Feldkapazität erreicht, der Boden also gesättigt ist, versickert das überschüssige Wasser in tiefere Schichten bzw. fließt an der Oberfläche ab. Die Tiefenversickerung DP wird für TopSoil und SubSoil wie folgt gerechnet:

$$DP_{top,i} = (P_i - I_i) - ET_{0,top,i} - DP_{r,top,i-1} \quad (8)$$

$$DP_{sub,i} = DP_{top,i} - ET_{0,sub,i} - DP_{r,sub,i-1} \quad (9)$$

Die Tiefenversickerung DP [mm] weist nur dann Werte > 0 auf, wenn die Feldkapazität überschritten wird. Solange die Feldkapazität nicht erreicht und damit auch $D_r > 0$ ist, findet kein Wasserabfluss aus der jeweiligen Bodenschicht statt. Wird der Wert von RAW erreicht, reduziert sich die Referenz-Evapotranspiration ET_0 in den Gleichungen (8) bzw. (9) um den Faktor K_s und wird daraus folgend als ET_a berücksichtigt.

In allen Perioden, in denen kein Wasserstress auftritt, sind die Werte der aktuellen Evapotranspiration ident mit jenen der Referenz-Evapotranspiration, da keine Reduzierung durch den Wasserstresskoeffizienten K_s stattfindet. Ergibt sich zwischen diesen beiden Werten eine Kluft, d.h. tritt Wasserstress auf, so stellt die Höhe der Abweichung den Wasserstress dar. In der Regel wird dieser als Verhältniszahl (ET_a / ET_0) angegeben. *Abbildung 2* zeigt den Verlauf beider Varianten der Evapotranspiration grafisch. Dabei wird die Akkumulation der aktuellen Evapotranspiration deutlich, die bei ausbleibenden Niederschlägen deutlich abfällt und sich nur dann erholt, wenn ein entsprechender Wassereintrag erfolgt. Als Beispiel wurde die Station Kirchberg/Walde (Steiermark) herangezogen, da hier im Jahr 2003 extrem trockene Bedingungen herrschten und als Veranschaulichung des hier dargestellten Zusammenhangs besonders geeignet erscheint.

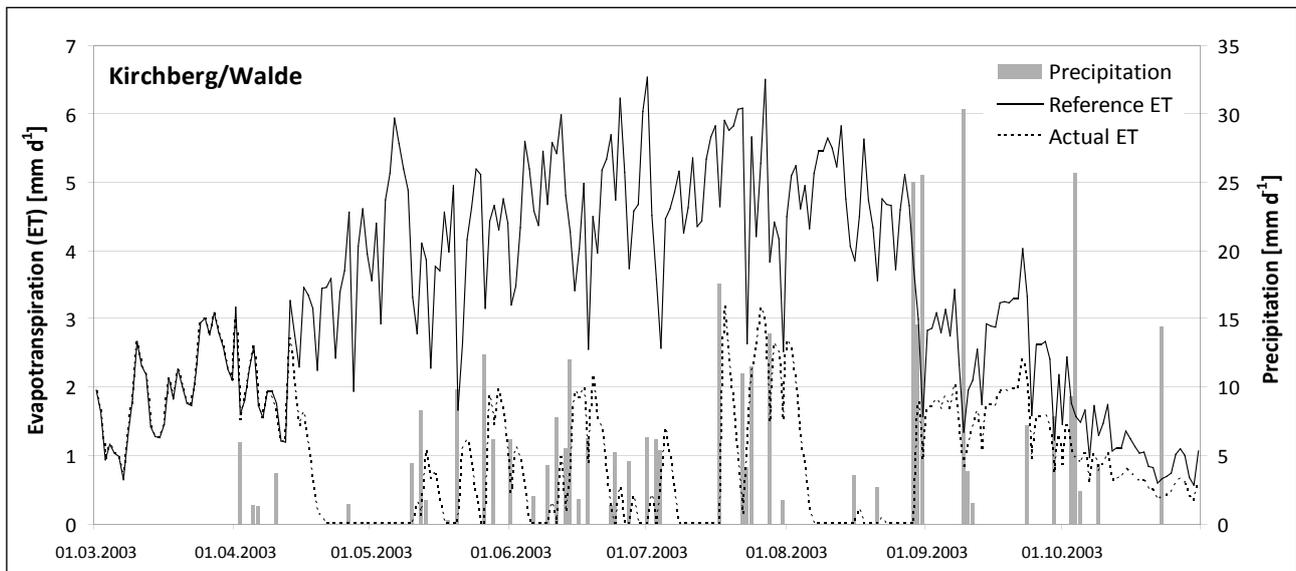


Abbildung 2: Verlauf von Referenz- und aktueller Evapotranspiration in Kirchberg/Walde im Jahr 2003

3.3 Räumliche Implementierung der Evapotranspiration

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

Die Wetterstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie die Niederschlagsmessstellen des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) bilden die Datenbasis und somit die Stützstellen für die räumliche Interpolation. In *Abbildung 3* wird die geographische Verteilung der Stationen dargestellt. Die mittlere Nachbarschaftsdistanz zwischen den ZAMG-Stationen beträgt 10.289 m. Für den Niederschlag wird das wesentlich dichtere Netzwerk der HZB-Niederschlagsmessstellen hinzugezogen und damit die mittlere Nachbarschaftsdistanz für die räumliche Interpolation des Niederschlags auf 4.790 m verringert.

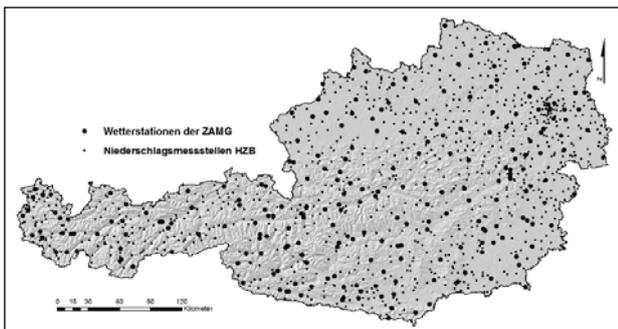


Abbildung 3: Geographische Verteilung der Wetterstationen in Österreich

Die geostatistische Interpolation unter Einbeziehung zusätzlicher Information, in diesem Fall der Seehöhe, erfährt in der Literatur eine besondere Aufmerksamkeit. GOOVAERTS (2000) beschreibt drei multivariate geostatistische Algorithmen für die räumliche Schätzung von Niederschlag unter Einbeziehung eines DHM, die aber ebenso auf Temperatur bzw. Evapotranspiration anwendbar sind. Eine ausführliche methodische Auseinandersetzung zu diesem Thema findet sich in GOOVAERTS (1997). Eine dieser beschriebenen Methoden wird als „simple kriging with varying local means“ bezeichnet und ist für die vorliegende Arbeit relevant. Die auch als Georegression bezeichnete Methode wird von BLÖSCHL und MERZ (2002) ebenfalls für die Niederschlagsinterpolation mit Höhenabhängigkeit angewendet.

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

Im vorliegenden Projekt wird gemäß der in der Literatur angegebenen Methodik ein in den Monaten der Vegetationsperiode starker linearer Zusammenhang zwischen

Referenz-Evapotranspiration und Seehöhe genutzt (SCHAUMBERGER, 2005). Man ermittelt zunächst die Koeffizienten a_m und b_m der Regressionsgeraden mit der Referenz-Evapotranspiration ET_0 [mm d⁻¹] als abhängiger sowie der Seehöhe z [m] an der Wetterstation als unabhängiger Variablen aus den Beobachtungsdaten eines gesamten Monats m in der Form

$$\hat{ET}_{0_m} = a_m \cdot z + b_m \quad (10)$$

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

$$e_i = ET_{0_i} - \hat{ET}_{0_m} \quad (11)$$

angewendet. Die so errechneten täglichen Residuen werden im Anschluss mittels Ordinary Kriging zu einer kontinuierlichen Oberfläche $Raster(e_i)$ interpoliert. Aus dem höhenabhängigen Anteil der Referenz-Evapotranspiration wird unter Verwendung der in (10) ermittelten Koeffizienten a_m und b_m und mit den Seehöhen z [m] des Digitalen Höhenmodells DEM in der Form

$$Raster(ET_{0_m}) = a_m \cdot z_{DEM} + b_m \quad (12)$$

ebenfalls eine kontinuierliche Oberfläche $Raster(ET_0)$ für den Monat m erzeugt. Für die Erzeugung einer Rasteroberfläche, welche die täglichen Werte der Referenz-Evapotranspiration enthält und damit das Ergebnis des räumlichen Interpolationsprozesses darstellt, werden der höhenabhängige Anteil mit den Werten der täglichen Residuen addiert:

$$Raster(ET_{0_i}) = Raster(ET_{0_m}) + Raster(e_i) \quad (13)$$

Um die Oberfläche der täglichen Referenz-Evapotranspiration zusätzlich mit Informationen über die topographischen Parameter Exposition und Hangneigung zu kombinieren, wird ein Strahlungsfaktor R_f verwendet, welcher aus der Berechnung der potenziellen Globalstrahlung abgeleitet wird.

Die Berechnung der Globalstrahlung für Oberflächen wird durch die Extension „Spatial Analyst“ mit dem Tool „Solar Radiation“ der ESRI GIS-Software ArcGIS unterstützt. Die methodische Grundlage basiert auf einer Arbeit von FU und RICH (1999). Unter Einbeziehung eines Digitalen Höhenmodells kann für zu definierende Zeiträume ein Ergebnistrasterdatensatz erzeugt werden, der in den Rasterzellen die jeweilige Summe an Globalstrahlungsenergie für den angegebenen Zeitraum enthält. Dabei wird für jede Rasterzelle in der Auflösung des zugrundeliegenden DHM die Horizontabschattung ermittelt, die diffuse und direkte Strahlung in Abhängigkeit der topographischen Ausprägung und der Sonnenstandswinkel in 30-Minuten-Abständen gerechnet und miteinander kombiniert. Einstellungen hinsichtlich des Verhältnisses von direkter und diffuser Strahlung bzw. der Transmittivität der Atmosphäre variieren monatlich und wurden in SCHAUMBERGER (2005) durch Vergleich von Modellergebnissen und einem Durchschnitt

von monatlichen Maximumwerten aus Beobachtungen angepasst.

Das ArcGIS-Tool bietet grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die Globalstrahlung für ein definiertes Gebiet zu ermitteln. Eine Variante bezieht die aus dem DHM abgeleitete Exposition und Neigung jeder Zelle in die Analyse ein (R_{topo}), beim zweiten Ansatz werden diese beiden Parameter auf null gesetzt (R_{flat}). Die topographische Abschattung hingegen wird in jedem Fall berücksichtigt. Die Veränderungen im Einstrahlungswinkel aufgrund der verschiedenen Oberflächenstruktur führen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Strahlungssummen. Die Ergebnisse aus beiden Berechnungsvarianten unterscheiden sich lediglich in ihrer Abhängigkeit von der Topographie. Für die Berechnung des Strahlungsfaktors R_f also jenes Faktors, der die topographiebedingte Änderung in der Strahlungsinformation repräsentiert, werden diese beiden Datensätze in der Form

$$R_f = \frac{R_{topo}}{R_{flat}} \quad (14)$$

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

Damit kann die in Gleichung (13) beschriebene räumliche Interpolation der Referenz-Evapotranspiration um den Raster des Strahlungsfaktors R_f erweitert werden und damit die topographischen Unterschiede Berücksichtigung finden. Die Gleichung zur täglichen (i) Berechnung dafür lautet:

$$Raster(ETr_{0_i}) = Raster(ET_{0_i}) + Raster(R_f) \quad (15)$$

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

Für die räumliche Repräsentation der aktuellen Evapotranspiration werden die täglichen Rasteroberflächen der Referenz-Evapotranspiration (Gleichungen (10) bis (14)) mit den interpolierten Tagesniederschlagssummen und dem Raster der nutzbaren Feldkapazität miteinander gemäß den Gleichungen (1) bis (9) kombiniert. Da die gesamte Fläche Österreichs in einer Auflösung von 250 Meter auf Tagesbasis gerechnet werden muss, bedeutet dies einen erheblichen Rechenaufwand und besondere Performanceanforderungen an die eingesetzte Hardware und an die dafür entwickelte Software.

4. Modellierung von Vegetationsperiode und Schnittterminen

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

möglich. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz geht von der potenziell zur Verfügung stehenden Vegetationsdauer aus. Diese wird vereinfacht über ein temperaturabhängiges Modell beschrieben.

4.1 Berechnung der thermischen Vegetationsperiode

Das in der Literatur am häufigsten zu findende Kriterium, nämlich eine Überschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5 °C über eine Dauer von fünf aufeinanderfolgenden Tagen, wird auch in der vorliegenden Arbeit angewandt. Das Ende der Vegetationsperiode ist durch die Umkehrung dieser Anforderung, also die Unterschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5 °C über eine Dauer von fünf aufeinanderfolgenden Tagen, definiert.

In diesem Zusammenhang muss eingeräumt werden, dass die hier definierten Grenzen der Vegetationsperiode auf der Annahme einer ausschließlichen Temperaturabhängigkeit beruhen und andere signifikante Einflüsse (z.B. Frosttage) zugunsten einer für die räumliche Implementierung notwendigen Vereinfachung ausgeschlossen werden. In einem erweiterten Ansatz ist beispielsweise auch die Einbeziehung der Schneedecke sinnvoll, welche den Vegetationsbeginn verzögern kann. Dafür wird ebenfalls ein räumliches Modell benötigt, welches als zusätzliche Einschränkung für Beginn bzw. Ende der Vegetationsperiode herangezogen wird. (vgl. SCHAUMBERGER *et al.*, 2008a). In der vorliegenden Arbeit wurde die Schneebedeckung nicht einbezogen, da in den meisten Fällen auf den Flächen des Wirtschaftsgrünlandes das Temperaturkriterium ausreicht.

Die Temperatur wird in gleicher Weise wie die Referenz-Evapotranspiration mittels Georegression auf Tagesbasis, beginnend mit 1. März, interpoliert (vgl. Abschnitt 3.3) und anschließend mittels Raster-Algebra-Operationen auf die

Erfüllung des Temperaturkriteriums geprüft. In *Abbildung 4* wird die Bestimmung des Vegetationsbeginns beispielhaft am Standort Gumpenstein gezeigt. Bei dem erstmaligen Auftreten einer Fünf-Tages-Periode mit Tagesmitteltemperaturen über 5 °C, in diesem Beispiel ab 24. März 1999, wird der Beginn der thermischen Vegetationsperiode festgesetzt.

4.2 Schätzung der Schnittermine

Da die Bewirtschaftung kaum modellhaft abgebildet werden kann, wird in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe von Standortfaktoren, in diesem Fall der thermischen Vegetationsperiode, die Dauer der einzelnen Aufwüchse und damit die Termine der Schnittnutzung näherungsweise abgeleitet. Jeder Aufwuchs benötigt eine gewisse Zeit des Wachstums bis zur Ernte und mit Zunahme der Schnitffrequenz muss auch die potenziell zur Verfügung stehende Vegetationszeit bzw. Nutzungsperiode über eine entsprechende Anzahl an Wachstumstagen verfügen. Durch den starken Zusammenhang von Temperatur und Seehöhe nimmt die Anzahl dieser Tage in höheren Lagen ab. Mit Einführung von Grenzen als minimale Anzahl von Tagen, die ein bestimmtes Nutzungsregime benötigt, kann das Gebiet in Bereiche geteilt werden, in denen theoretisch eine bestimmte Nutzungshäufigkeit auftritt bzw. möglich ist (vgl. *Abbildung 5*). Eine Schnittnutzung erfolgt meist nicht bis zum Ende der Vegetationsperiode, sondern die Grünfläche wird in der Regel nach dem letzten Schnitt bis zum Erreichen der klimatisch bedingten Ruheperiode durch eine entsprechende Nachnutzung (Weide) bewirtschaftet. Die Periode für Schnittnutzung ist aus diesem Grunde kürzer als die Vegetationsperiode (vgl. *Abbildung 5*).

Um eine relative Verteilung der Aufwuchszeit einzelner Aufwüchse abschätzen zu können, wurden zahlreiche Einzelversuche am LFZ Raumberg-Gumpenstein hinsicht-

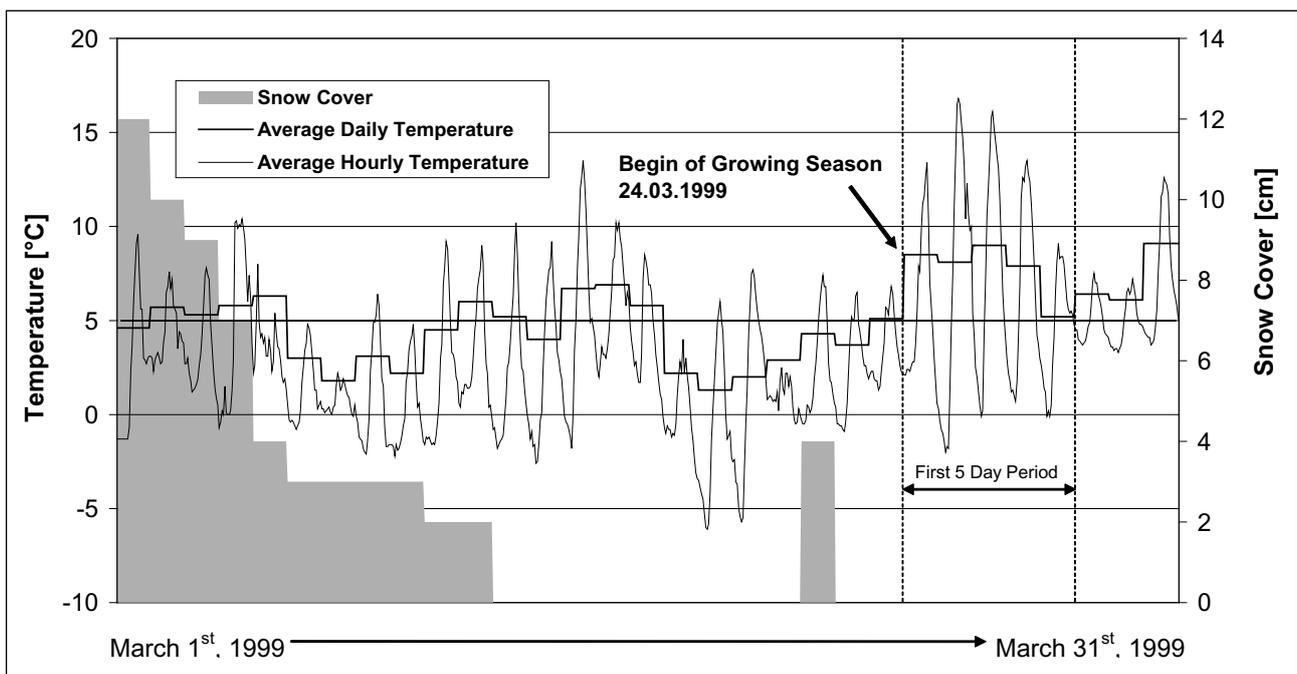


Abbildung 4: Temperaturverlauf und Schneebedeckung im März 1999 an der Station Gumpenstein

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)

	Zweischchnittnutzung		Dreischchnittnutzung		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) %

lich 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 (Werte in Klammer) auf Basis von Erfahrungen aus der Praxis vorgenommen und analog dazu im Modell implementiert.

Die Verhältniszahlen wurden zur Berechnung theoretischer Schnitttermine in den für eine bestimmte Schnitthäufigkeit definierten Bereich herangezogen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass innerhalb eines Nutzungsbereiches der Schnitttermin dynamisch auf die Veränderungen der zur Verfügung stehenden Nutzungsperiode und damit der höhenabhängigen Dauer der Vegetationsperiode reagieren kann. Das Schema dieses Ansatzes ist in *Abbildung 5* dargestellt. Durch das Einziehen von Schwellwerten mit einer minimalen zeitlichen Anforderung für ein bestimmtes Nutzungsregime werden die einzelnen Schnittsysteme voneinander abgegrenzt. Durch die temperatur- und damit höhenbedingte Veränderung der für die Nutzung zur Verfügung stehenden Zeitspanne ergibt sich auch eine geographische Abgrenzung, welche die Voraussetzung für die Einbeziehung in das räumliche Modell einer an das Nutzungsregime angepassten Ertragschätzung ist.

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. Die Anwendung dieses Modells

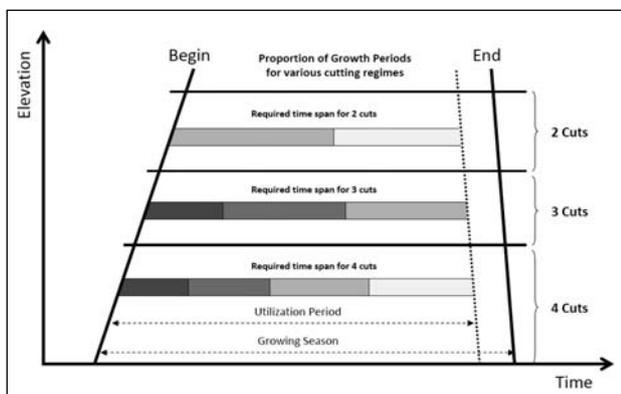


Abbildung 5: Relative Verteilung der Aufwuchsperioden und der daraus ableitbaren Schätzung für die Schnitttermine

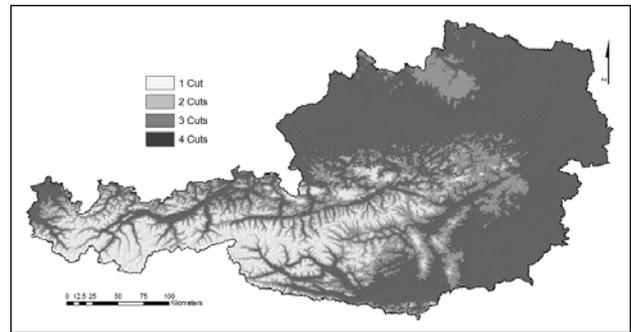


Abbildung 6: Räumliche Verteilung der aus dem Schnittmodell abgeleiteten Gebiete für die Schnittnutzung des Grünlandes am Beispiel des Jahres 1999

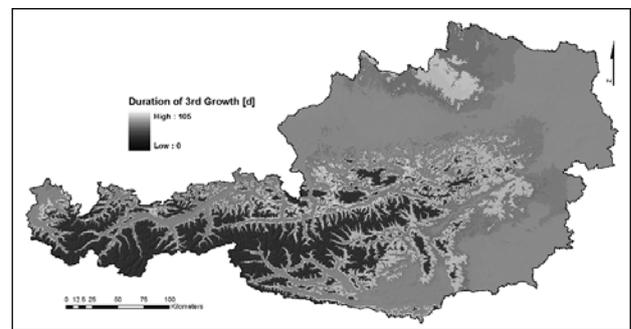


Abbildung 7: Dauer des dritten Aufwuchses im Jahr 1999

für das Jahr 1999 ergibt eine in *Abbildung 6* dargestellte räumliche Verteilung der einzelnen Schnittregime. Die Klassifizierung der Gebiete umfasst die gesamte Oberfläche und ist in den Hochgebirgsregionen natürlich nur theoretischer Natur.

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. Da die Grünlanderträge aufwuchsbezogen berechnet werden, spielt die Aufwuchsdauer und damit die einzelnen Nutzungstermine eine wichtige Rolle. Als Beispiel ist in *Abbildung 7* die Dauer des dritten Aufwuchses dargestellt. Für Ein- bzw. Zweischchnittregime ist der dritte Aufwuchs natürlich nicht existent – diese Zellen nehmen den Wert 0 an.

5. Ertragschätzung mittels Grassland Statistical Model (GRAM)

Die Ertragsberechnung beruht auf einem statistischen Modell nach TRNKA *et al.* (2006), das mit seit dem Jahr 2002 erhobenen Daten aus Ertragsmessungen an 24 in ganz Österreich verteilten Standorten kalibriert wurde. Den Erträgen stehen die Ergebnisse aus der Bodenwasserbilanzierung und den daraus abgeleiteten Informationen über Wasserverfügbarkeit und Wasserstress gegenüber. In *Abbildung 8* sind alle in die Modellkalibrierung und -verifizierung einbezogenen Versuchsstandorte dargestellt. Die Standorte befinden sich in den unterschiedlichsten Klimaregionen und decken damit die klimatische Variabilität der österreichischen Grünlandgebiete ab.

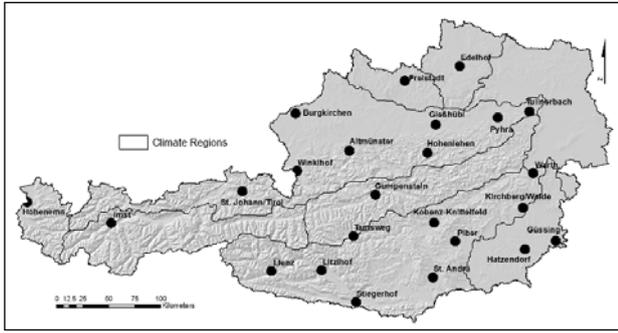


Abbildung 8: Geographische Verteilung der Versuchsstandorte und Abgrenzung der Klimaregionen nach HARFLINGER und KNEES (1999)

5.1 Berechnung von Wasserverfügbarkeit und Wachstumsbedingungen

Der Wasserstress ergibt sich aus dem Verhältnis von ET_a und ET_0 , (vgl. *Abbildung 2*) wobei eine Reduktion der Biomassezunahme erst eintritt, wenn die Werte von ET_a kleiner als die Hälfte der ET_0 sind (t_{CS} bzw. $t_{CL} = 2$). Nach TRNKA *et al.* (2006) wird der kurzfristige Wasserstress (W_S) der letzten sechs Tage sowie der langfristige Wasserstress (W_L) vom Beginn der Vegetationsperiode für den Wasserverfügbarkeitsfaktor (W_A) herangezogen:

$$W_S = t_{CS} \cdot \frac{ET_{a,S}}{ET_{0,S}} \quad (16)$$

$$W_L = t_{CL} \cdot \frac{ET_{a,L}}{ET_{0,L}} \quad (17)$$

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

$$W_A = [CW_L^M + (1 - C)W_S^M]^{1/M} \quad (18)$$

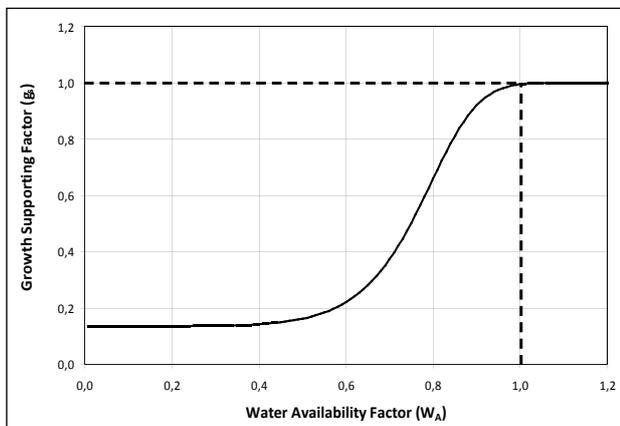


Abbildung 9: Zusammenhang von Wasserverfügbarkeit W_A und Wachstumsbedingungen g_s

ergibt den Wasserverfügbarkeitsfaktor W_A . C und M sind empirisch bestimmte Modellkoeffizienten. Die Wachstumsbedingungen werden mit Hilfe eines Wachstumsfaktors (Growth Supporting Factor g_s) [0..1] in der Form

$$g_s = \exp^{\alpha \exp^{\beta W_A^\gamma}} \quad (19)$$

ausgedrückt. Der Zusammenhang mit der Wasserverfügbarkeit W_A wird durch die Koeffizienten α , β und γ beeinflusst, welche ebenfalls empirisch festgesetzt wurden.

Bei maximaler Wasserverfügbarkeit entsteht keine Beeinträchtigung des Wachstums: g_s liegt bei 1,0. Wie die Funktion in *Abbildung 9* zeigt, nimmt g_s mit zunehmendem Wassermangel rapide ab und flacht bei einem W_A -Wert von etwa 0,5 ab. Die Wachstumsbedingungen, ausgedrückt im g_s , gehen auf einen Minimumwert von 0,13 zurück. Gemäß der Gleichungen (16) bis (19) ergibt sich aus dem Verhältnis von Referenz- und aktueller Evapotranspiration der Wasserstress, welcher durch Akkumulation verschieden langer Perioden die Wachstumsbedingungen am Grünland beschreibt.

In *Abbildung 10* wird der Verlauf der wasserstressrelevanten Parameter W_A und g_s in Zusammenschau mit der Evapotranspiration veranschaulicht. Der Growth Supporting Factor g_s beginnt sich erst dann zu verändern, wenn die aktuelle Evapotranspiration gegenüber der Evapotranspiration um mehr als die Hälfte abfällt (Gleichungen (16) und (17)). Eine Erholung der Wachstumsbedingungen erfolgt in diesem extrem trockenen Sommer 2003 kaum; leichte Anstiege sind auf den Wassereintrag in Form des Niederschlags zurückzuführen (vgl. *Abbildung 2*).

In weiterer Folge wird g_s mit der täglichen Temperatur- bzw. Globalstrahlung kombiniert und wirkt demzufolge bei einer Limitierung der Wasserverfügbarkeit reduzierend auf die Temperatur- und Globalstrahlungssumme, welche als Prädiktoren in das Modell eingehen. Die Gleichungen dazu sind wie folgt definiert:

$$T_e = \int_{t_0}^{t_n} T_d g_s dt \quad G_e = \int_{t_0}^{t_n} R_d g_s dt \quad (20)$$

Die effektive Temperatur (T_e) und Globalstrahlung (G_e) sind das Resultat der Akkumulation von täglichen Temperatur- und Globalstrahlungswerten (T und G), gewichtet mit dem Growth Supporting Factor g_s über den Zeitraum t_0 bis t_n , wobei t_0 der Beginn der Vegetationsperiode bzw. der erste Tag nach einer Schnittnutzung und t_n der Tag des Schnittes ist. Der jährliche Ernteertrag im Grünland wird in diesem Ansatz aufwuchsbezogen ermittelt und anschließend für den Jahresertrag aufsummiert. Dies gewährleistet eine differenzierte Berücksichtigung der klimatischen Parameter für jede einzelne Wachstumsphase. Die effektive Temperatur und Globalstrahlung werden als die treibenden Kräfte des Wachstums angenommen, welche durch die hier vorgenommene Implementierung auch die Limitierung des verfügbaren Bodenwassers berücksichtigt.

5.2 Modellkalibrierung und -verifizierung

Für das Modell wurden 1.465 Versuchsdaten von 24 Standorten (siehe *Abbildung 8*) über den Zeitraum 2002

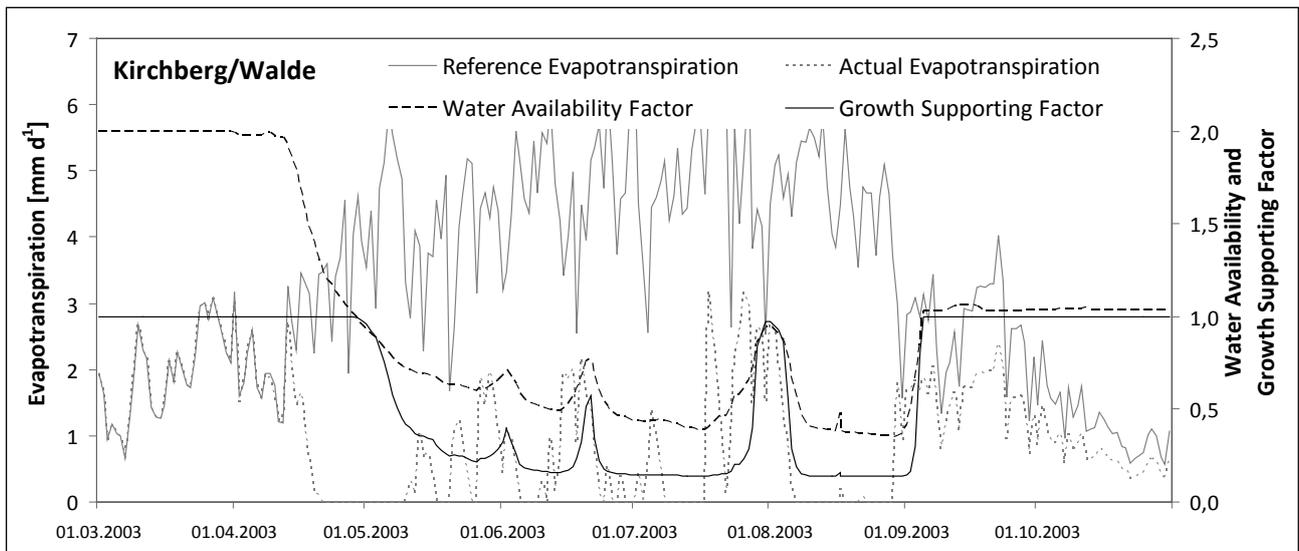


Abbildung 10: Verlauf von Wasserverfügbarkeit W_A und Wachstumsbedingungen g_s in Abhängigkeit des Verhältnisses von Referenz- und aktueller Evapotranspiration am Beispiel des Standortes Kirchberg/Walde im Jahr 2003

bis 2007 herangezogen. Die an den Versuchsstellen erhobenen Ernteerträge [dt TM ha⁻¹] dreier unterschiedlicher Nutzungssysteme (Zwei-, Drei- und Vierschnitte) bilden die Grundlage für die Modellentwicklung. Die Standortbedingungen sind für die optimale Wahl des Schnittsystems entscheidend; es gibt zum Beispiel Standorte, die das Potenzial einer Vierschnittnutzung nicht erfüllen. Eine Übersicht über die Schnittpotenziale ist in *Abbildung 11* dargestellt. Dazu wurden die Jahreserträge der einzelnen Standorte im Durchschnitt über alle Versuchsjahre hinsichtlich der numerischen Abstände zwischen den Schnittklassen differenziert. Da in der Pra-

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

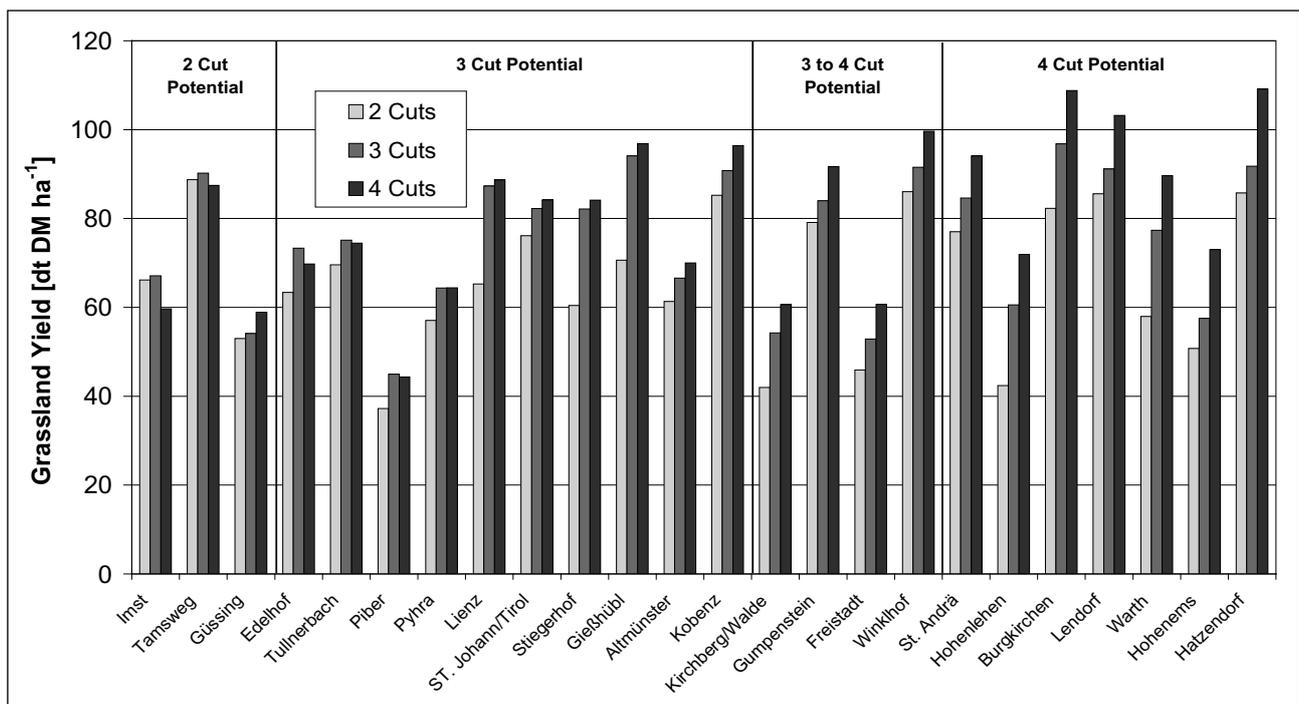


Abbildung 11: Schnittpotenzial der 24 Versuchsstandorte aus dem Ertragsdurchschnitt 2002 bis 2007

Die Düngung spielt für den Ertrag eine wichtige Rolle. An allen Standorten wurde der Nutzung entsprechend gedüngt – eine Standardisierung für alle Standorte schafft jedoch für alle Experimente weitgehend gleiche Nährstoffversorgungsbedingungen. An vier Standorten (Gumpenstein, Piber, Winklhof und Kobenz-Knittelfeld) wurde neben der Düngervariante Gülle auch Stallmist geprüft, damit stehen an diesen Standorten doppelt so viele Beobachtungen zur Verfügung. In das Modell geht nach Prüfung des Signifikanzniveaus weder die Art der Düngung noch die Menge ein. Bei der räumlichen Implementierung würde dieser Bewirtschaftungsfaktor erhebliche Schwierigkeiten verursachen, da ein Modell kaum in der Lage ist, das von Landwirt zu Landwirt stark variierende Düngemanagement adäquat abzubilden.

Datenaufbereitung

Zur Modellschätzung wurde für den gesamten Datensatz eine robuste Regression, implementiert als MM-Estimator, verwendet (RIPLEY, 2004). Diese Methode verwendet zur Schätzung der Regressionsparameter den gesamten Datensatz, allerdings werden die Beobachtungen gewichtet, sodass potenzielle Ausreißer weniger Einfluss auf die Regression haben (vgl. *Abbildung 12*).

In weiterer Folge wurde eine *Least Squares (LS) Regression* auf alle Beobachtungen, welche ein aus der robusten Regression ermitteltes Gewicht von mehr als 0,6 erhielten, berechnet. Mit Hilfe der LS-Regression können übliche Kenngrößen, wie z.B. das Bestimmtheitsmaß, berechnet werden, um das Modell mit anderen Modellen vergleichbar zu machen. Die robuste Schätzung unterscheidet sich nicht wesentlich von der LS-Schätzung auf den um die Ausreißer bereinigten Datensatz.

Die angewandte Methode führt zu 75 Datensätzen, welche mit einem Gewicht unter 0,6 in die Schätzung eingehen und in weiterer Folge als Ausreißer betrachtet werden. Zwischen den verschiedenen Einflussparametern herrschen zahlreiche Wechselbeziehungen, die für die Beurteilung eines Datenpunktes als Ausreißer entscheidend sind. Die betroffenen Datensätze wurden unter Berücksichtigung dieser verschiedenen Beziehungen mit Hilfe von Häufigkeitsanalysen, eines eingehenden Vergleiches mit dem Gesamtdatensatz und der Versuchsaufzeichnungen auf Plausibilität geprüft.

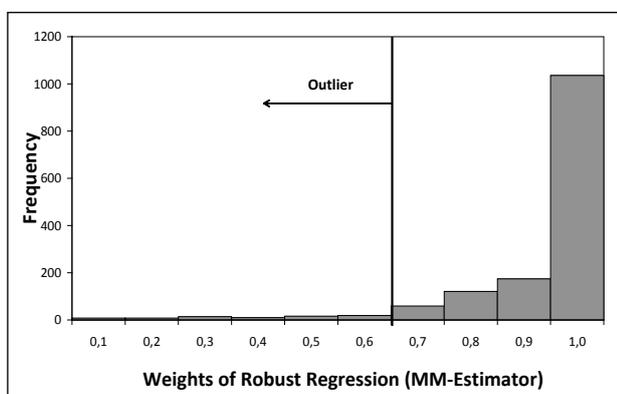


Abbildung 12: Ausreißerqualifizierung durch Datenpunktgewichtung aus einer robusten Regression

Besonders auffällig sind darunter drei Stationen, Kobenz (773), Edelfhof (782) und Gießhübl (783), mit insgesamt 39 % der Fälle. Im Vergleich dazu sind die weiteren 14 Versuchsstationen im Durchschnitt nur mit 4,35 % vertreten. Der vordringliche Grund für die geringe Gewichtung dieser Daten sind überdurchschnittlich hohe Erträge der Einzelaufwüchse – der Median in diesem Datensatz beträgt 44 dt TM/ha und ist im Vergleich zum Median des Ertrages im Gesamtdatensatz mit 22,5 dt TM/ha etwa doppelt so hoch.

Von den drei angewandten Schnittregimen ist besonders das Zweischnittregime mit 41,3 % vertreten. Der erste Aufwuchs mit 63 % tritt signifikant häufiger auf, der zweite Aufwuchs mit immerhin noch 24 %. Dies weist darauf hin, dass hauptsächlich die hohen Erträge der beiden Aufwüchse eines Zweischnittregimes als Ausreißer qualifiziert werden.

Das Jahr 2003 ist durch extreme Trockenheit gekennzeichnet und das entwickelte Modell zielt vor allem darauf ab, die Ertragssituation unter dem Gesichtspunkt einer Limitierung der Wasserverfügbarkeit zu erklären. Es ist deshalb besonders wichtig, die Bandbreite in Richtung Trockenheit modellhaft abzubilden. In den Ausreißern sind nur 4 % aller Fälle dem Jahr 2003 zuzuordnen, d.h. die Wechselbeziehungen mit den einbezogenen Klimaparametern werden im Modell gut abgebildet.

Das Jahr 2002 ist unter den Ausreißern mit 25,3 % am stärksten vertreten; es handelt sich um das erste Versuchsjahr. Die Anwendung differenzierter Nutzungsintensitäten wirkte sich offensichtlich maßgeblich auf Pflanzenbestand und Biomasseentwicklung im Jahr der Versuchsinstitution aus. Zum Beispiel fallen 9 von 12 Datensätzen am Standort Kobenz (16 % der Ausreißer) in das Jahr 2002, wo überdurchschnittlich hohe Erträge gemessen wurden. Die Ausgangssituation im Pflanzenbestand und dessen Veränderungen in den nachfolgenden Jahren werden im Modell nicht berücksichtigt, sind jedoch eine wichtige Erklärung für die Ertragsquantität.

Der Einfluss von Düngerart und Düngermenge ist aufgrund der weitgehenden Vereinheitlichung des Versuchsaufbaus an den unterschiedlichen Standorten im Modell nicht signifikant. Die Düngung spielt jedoch bei den Erträgen naturgemäß eine wichtige Rolle. Biogas- und Schweinegülle wurden nur minimal eingesetzt (7,1 % im Gesamtdatensatz). Diese sind jedoch mit 18,7 % im Ausreißerdatensatz überproportional betroffen.

Modellverifizierung

Für die Variablenselektion wurde mit einem Modell gestartet, das alle zur Verfügung stehenden Variablen und ihrer Kreuzprodukte beinhaltet hat. Mittels Kreuzvalidierung ($\frac{3}{4}$ der Daten als Trainingsdatensatz, $\frac{1}{4}$ der Daten als Testdatensatz) wurde die Anzahl an Variablen schrittweise reduziert, so dass durch Eliminierung einer Variablen kein Informationsverlust eintrat bzw. die Prognose am Testdatensatz verbessert wurde. Anschließend wurden noch nicht signifikante Variablen entfernt, welche ebenfalls so gut wie keinen Erklärungswert hatten. Als Parameter gehen Temperatursumme, Globalstrahlungssumme, effektive Temperatur und Globalstrahlung, Nutzungsregime, Aufwuchs, Auf-

wuchsdauer und die topographischen Variablen Seehöhe, Hangneigung und Exposition ein. Alle einbezogenen Parameter sind zu einem Niveau von 95 % signifikant; das Modell insgesamt ist als hoch signifikant einzustufen.

Der Wertebereich der Hangneigung aller landwirtschaftlichen Flächen in Österreich ist deutlich größer, als der durch die Grünlandexperimente abgedeckte Bereich. Die Versuchsanlagen befinden sich auf Hangneigungen zwischen 0,08 und 12,45 Grad. Im Gegensatz dazu geht der Raum für die Anwendung des Modells mit 0,01 bis 44,08 deutlich darüber hinaus und die Schätzung des Grünlandertrages wird durch die notwendige Extrapolation der Hangneigung im Fall einer linearen Berücksichtigung unrealistisch. Um das Modell zu stabilisieren und die Ertragsschätzung durch hohe Hangneigungswerte nicht zu verzerren, wurde deshalb eine Box-Cox-Transformation auf diesen Parameter in der Form

$$Y^{(\lambda)} = \frac{(Y + c)^\lambda - 1}{\lambda} \quad (21)$$

angewendet. $Y^{(\lambda)}$ stellt die transformierte Hangneigung dar, Y ist die Hangneigung [°], für c wurde der Wert 1, für λ -1 festgesetzt. Wie in *Abbildung 13* dargestellt, verhält sich der Einfluss der Hangneigung auf die Schätzung nach dem Verlassen des für die Modellkalibrierung relevanten Wertebereiches annähernd konstant. Das Modell wurde mit der transformierten Hangneigung neu geschätzt, wodurch sich die Qualität des Modells nicht wesentlich verschlechtert, aber die Schätzung in Bezug auf die Hangneigung stabilisiert wird.

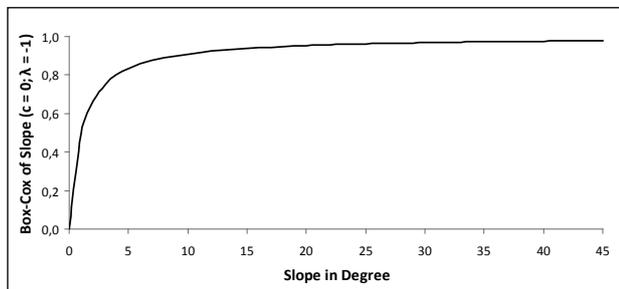


Abbildung 13: Box-Cox-Transformation der Hangneigung

In *Abbildung 14* sind beobachtete und geschätzte Ernteerträge dargestellt. Die Anwendung einer robusten Regression lässt die Beobachtungen mit unterschiedlichem Gewicht in die Schätzung eingehen. Das Schätzergebnis zeigt die grafische Trennung der Gewichtsklassen (vgl. *Abbildung 12*). Die statistischen Kennzahlen beziehen sich auf jene Werte, welche Gewichte > 0.6 aufweisen. Das Modell zeigt einen mittleren Zusammenhang, wobei sämtliche Beobachtungen an den 24 Standorten einbezogen wurden.

Die Schätzung für einzelne Jahre ergibt keine systematischen Verzerrungen. In *Abbildung 15* sind beispielhaft die beiden Versuchsjahre 2003 und 2006 dargestellt. Der Sommer 2003 war durch eine extreme Trockenheit gekennzeichnet und führte beim Grünland zu deutlichen Mindererträgen. Im Jahr 2006 herrschten gute Wachstumsbedingungen – die Erträge erreichten in dieser Periode die höchsten Werte über den gesamten bisherigen Versuchszeitraum (2002 bis 2007).

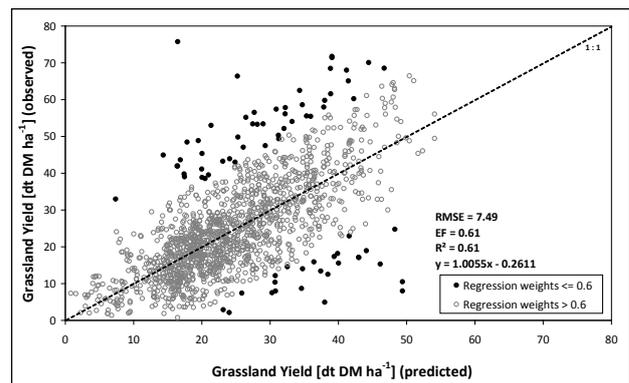


Abbildung 14: Schätzung der Grünlandernteerträge unter Berücksichtigung aller Beobachtungen, gewichtet nach ihrem Einfluss auf die Robuste Regression

Die Unterschiede in den Einzelaufwuchserträgen der beiden Jahre sind in *Abbildung 15* deutlich zu erkennen. Standardfehler und Bestimmtheitsmaß verhalten sich ähnlich, d.h. das Modell bildet die Bandbreite verschiedener klimatischer Bedingungen, insbesondere das Schätzverhalten bei niedriger Wasserverfügbarkeit gut ab.

Die Einbeziehung von 24 unterschiedlichen Standorten ist für eine Ertragsschätzung in ganz Österreich eine wesentliche Voraussetzung, für die Modellentwicklung allerdings eine Herausforderung. Im Gegensatz zur Kalibrierung auf einzelnen Standorten sind bei diesem Ansatz nicht alle Einflussfaktoren vollständig abzudecken. Beispiele dafür sind die Nährstoffverhältnisse im Boden oder die exakte Pflanzenbestandszusammensetzung. Prädiktoren, welche nicht allgemein auf eine kontinuierliche Oberfläche zu transformieren sind, wie z.B. Klimaparameter oder topographische Charakteristika, können für eine flächendeckende Applikation des Modells nicht herangezogen werden. Die Modellgüte sinkt daher naturgemäß.

Das entwickelte Modell schätzt die Erträge an den verschiedenen Standorten unterschiedlich gut – wichtig ist allerdings die Anwendbarkeit auf allen Standorten. In *Abbildung 16* werden die Ergebnisse an zwei Standorten präsentiert, die sich in zwei unterschiedlichen Klimaregionen befinden. In beiden Fällen herrscht ein mittlerer bis starker Zusammenhang zwischen geschätzten und beobachteten Werten. Auch im Vergleich der einzelnen Stationen können extreme systematische Verzerrungen ausgeschlossen werden.

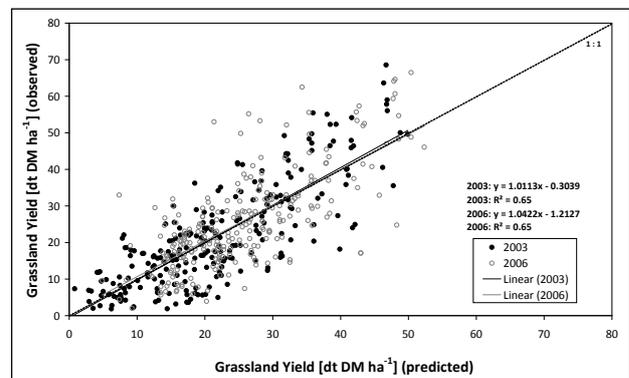


Abbildung 15: Anwendung des Modells zur Schätzung der Grünlandernteerträge für die Jahre 2003 und 2006

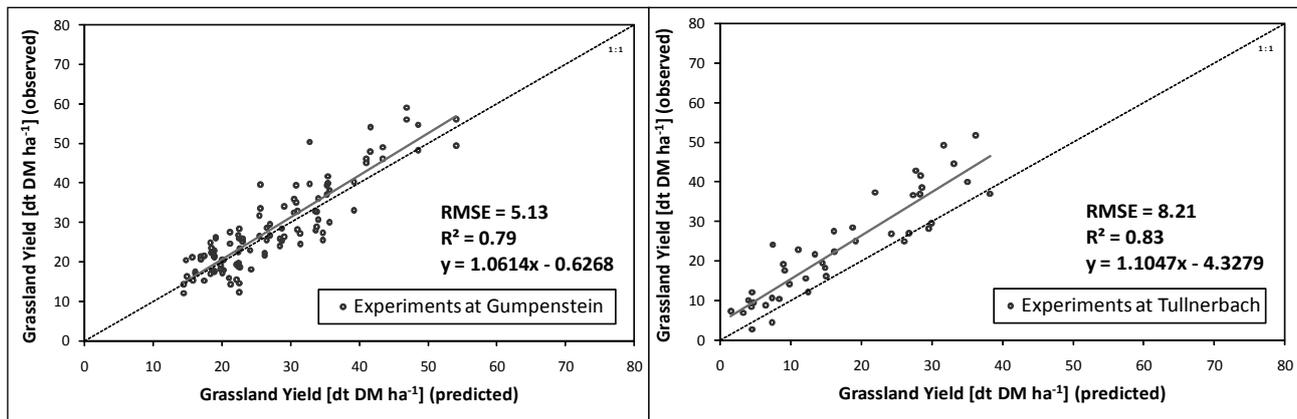


Abbildung 16: Anwendung des Modells zur Schätzung der Grünlanderträge auf den ausgewählten Standorten Gumpenstein und Tullnerbach

Kreuzvalidierung

Als Trainingsdatensatz wurden $\frac{3}{4}$ der Daten herangezogen, für den Testdatensatz $\frac{1}{4}$ der Beobachtungen. Die durchschnittliche mittlere absolute Abweichung bei 1000 zufälligen Durchläufen ergab 6,2 dt TM ha⁻¹ (vgl. Tabelle 2 und 3).

Der Vergleich zwischen empirischen und theoretischen Quantilen der Abweichungen ist aus dem Q-Q Plot in *Abbildung 17a* zu entnehmen. Die Hypothese einer Normalverteilung der Residuen der LS-Regression wird durch die in *Abbildung 17b* dargestellte Dichtekurve veranschaulicht und durch einen statistischen Test auf Normalverteilung bestätigt. Dazu wurde der *Lilliefors test for normality*, eine Spezialversion des Kolmogorov-Smirnov-Test, angewendet: D = 0,0227, p-value = 0,0898; die Normalverteilungshypothese wird nicht verworfen. In *Abbildung 17a* ist zwar eine leichte Abweichung von der Normalverteilung erkennbar, diese ist jedoch nicht signifikant.

6. Räumliche Implementierung der Modelle

Bei der Anwendung des Modells werden sämtliche Variablen als kontinuierliche Oberflächen aufbereitet und mittels Raster-Algebra den Modellvorgaben entsprechend in einem Geographischen Informationssystem verarbeitet. Die topographischen Parameter werden von einem Digitalen Höhen-

Tabelle 2: Vergleich der absoluten Fehler in dt TM ha⁻¹ für alle Standorte im Versuchszeitraum 2002 bis 2007

Absolutfehler	Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max
Robuste Regression	6.531	6.977	7.233	7.222	7.456	7.868
LS-Regression	5.657	6.093	6.241	6.234	6.341	6.790

Tabelle 3: 95%-Konfidenzintervall des mittleren absoluten Fehlers (aus Kreuzvalidierung ($\frac{1}{4}$ Testdatensatz)) in dt TM ha⁻¹ für alle Standorte im Versuchszeitraum 2002 bis 2007

Absolutfehler	Min	Mean	Max
Robuste Regression	6.665	7.222	7.827
LS-Regression	5.928	6.234	6.640

modell (DHM) in einer Auflösung von 250 m abgeleitet. Die technische Implementierung wurde mit Hilfe der ESRI ArcGIS-Klassenbibliothek ArcObjects, eingebunden in objektorientierte Programmierung mit Visual C#, realisiert. Eine detaillierte Darstellung der hier verwendeten GIS-Konzepte kann SCHAUMBERGER (2005) entnommen werden und eine umfassende Beschreibung der technischen Umsetzung findet sich in SCHAUMBERGER (2007).

In *Abbildung 18* wird als Beispiel der räumlichen Schätzung der Ernteertrag eines Dreischnittregimes im Jahr 1999 dargestellt. Die Erträge beziehen sich nur auf jene Flächen,

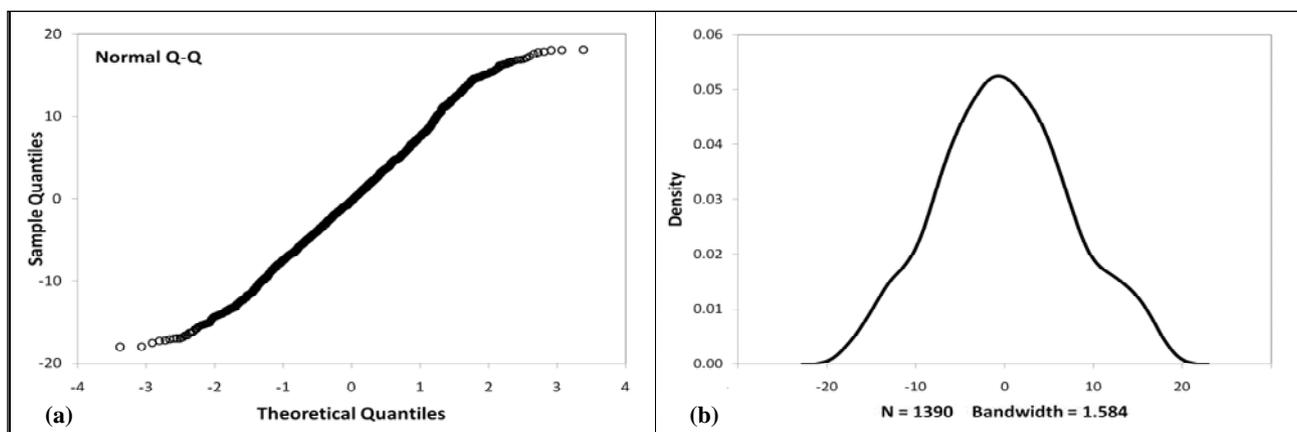


Abbildung 17: (a) Q-Q Plot der Residuen; (b) Dichtekurve der Residuen

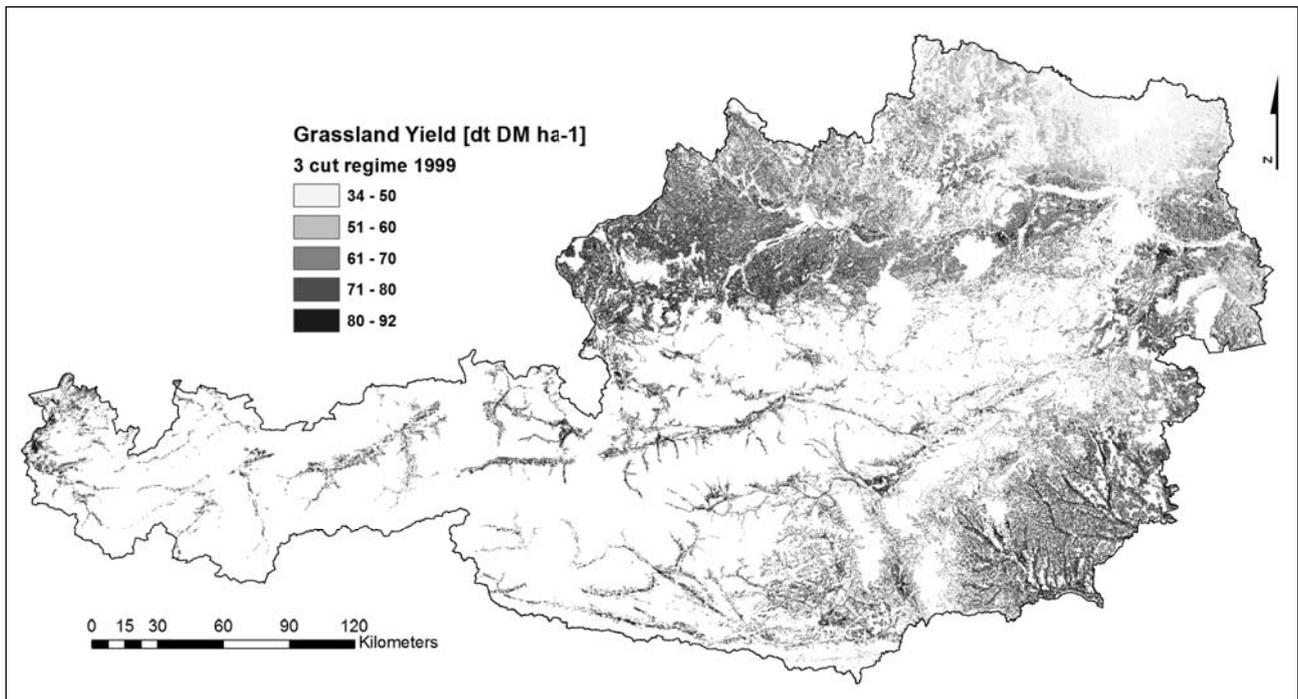


Abbildung 18: Räumliche Verteilung des Ernteertrages eines Dreischnittregimes im Jahr 1999

für die eine durchgängige Datenbasis vorhanden ist. In diesem Fall wird die Darstellung von der Verfügbarkeit der Bodendaten (nutzbare Feldkapazität) bestimmt. Die berechenbare Fläche beschränkt sich also auf die mineralischen Bodenformen der landwirtschaftlichen Nutzfläche (MURER, 2009).

Eine Statistik der Ergebniskarte aus *Abbildung 18* kann der *Abbildung 19* entnommen werden. Hier ist vor allem die Häufigkeitsverteilung der Zellwerte ein wichtiger Anhaltspunkt zur Beurteilung von realistischen Wertebereichen. Die Ernteerträge bei einer Dreischnittfläche mit landesüblicher Bewirtschaftung liegen bei etwa 65 bis 85 dt TM ha⁻¹ (BUCHGRABER, 2000).

Die Berechnung für ein jeweiliges Schnittregime wird auf allen Flächen durchgeführt. Der Ertrag für eine bestimm-

te Fläche ist jedoch von der tatsächlichen Schnittanzahl abhängig. Beispielsweise sind die Erträge eines Dreischnittregimes, wie sie in *Abbildung 18* dargestellt sind, nachträglich mit den nach bestimmten Kriterien ermittelten Dreischnittflächen zu maskieren. Erfolgt dies nach klimatischen bzw. topographischen Gesichtspunkten, kann dafür das in Abschnitt 4.1 dargestellte Schnittmodell angewendet werden. Eine weitere Möglichkeit der Abgrenzung ist die Einbeziehung der Schnittinformationen aus den INVEKOS-Daten.

Der Vorteil einer Berechnung der Erträge unterschiedlicher Schnittregime für sämtliche Flächen liegt darin, dass nachträglich eine Zuordnung vorgenommen werden kann, die sich nicht nur auf objektive Kriterien stützt, sondern auch das individuelle Management eines Landwirtes berücksichtigt. Es können so intensiv und extensiv genutzte Flächen unabhängig von ihrer Lage mit dem auf die Nutzung abgestimmten Ergebnis ausgewertet werden.

Ein Nebeneffekt dieser Vorgehensweise ist ein deutlich größerer Wertebereich der Ergebnisse für ein bestimmtes Schnittregime. Zu hohe bzw. zu niedrige Werte finden sich dort, wo aus standortbedingten Faktoren eine bestimmte Nutzungsfrequenz nicht möglich ist, das Modell aber dennoch Ergebnisse liefert (vgl. *Abbildung 19*). Beispielsweise kann auf Flächen in höheren Lagen, welche für ein Zweischnittregime gut geeignet sind, der Ertrag einer Vierschnittnutzung deutlich geringer ausfallen, als dies an einem Standort mit Vierschnitteignung der Fall ist. Umgekehrt wird das Modell für die Zweischnittnutzung auf Vierschnittstandorten aufgrund der längeren Aufwuchszeiten auch deutlich höhere Erträge berechnen. Diese Beispiele zeigen, dass die Zuordnung der Modellergebnisse auf die jeweilige Nutzung der Fläche abgestimmt werden muss. Da für alle Flächen die Ergebnisse von Zwei-, Drei- und Vierschnitt-

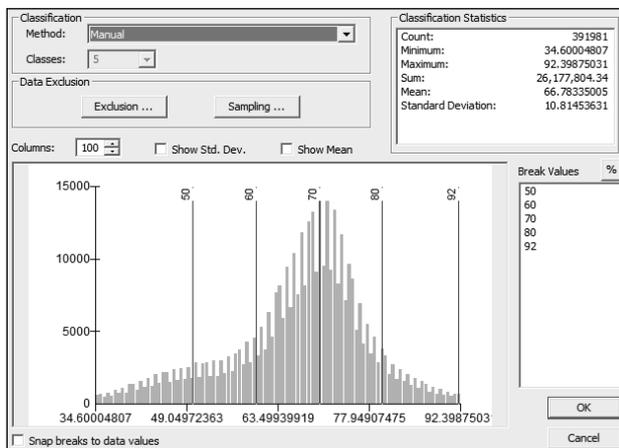


Abbildung 19: Verteilung und Statistik der Zellwerte der Ernteertragsoberfläche eines Dreischnittregimes im Jahr 1999

nutzungen verfügbar sind, ist eine flexible Handhabe der nachträglichen Zuordnung gewährleistet.

7. Diskussion und Ausblick

Die Entwicklung von Modellen zur Ertragsschätzung bildet einen wichtigen Schwerpunkt in der landwirtschaftlichen Forschung. Sie dienen als Grundlage für statistische Auswertungen über Ertragspotentiale und deren Veränderungen, zur Grundfutterbilanzierung, aber auch zur Unterstützung markt- und agrarpolitischer Entscheidungen, vor allem auch in Hinblick auf die nicht-agrarische Nutzung (Stichwort „Biomasse zur Energiegewinnung“). Ebenso stehen die Konsequenzen der mit dem Klimawandel einhergehenden Ertragseinbußen im Mittelpunkt des Interesses. Die große Bedeutung dieses Themenbereichs belegen zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte, welche sich unter anderem auch den Grünlanderträgen widmen. Die große Herausforderung bei der Modellierung des Ertrages liegt in einer geeigneten Abbildung der komplexen natürlichen Prozesse. Beim Wirtschaftsgrünland spielt zusätzlich noch die unterschiedliche Bewirtschaftung und die heterogene Zusammensetzung des Pflanzenbestandes aus verschiedenen Arten und Sorten eine große Rolle. Eine räumliche Umsetzung erfordert darüber hinaus noch die Prüfung der Modellparameter auf ihre Eignung für eine räumliche Repräsentation.

Grundlage jeden Modells ist die Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten, welche die verschiedenen Einflussfaktoren abdecken. Bei der vorliegenden Arbeit wurden Versuchsdaten aus 24 über ganz Österreich verteilten Standorten ausgewertet. Die bereits seit dem Jahr 2002 laufenden Grünlandversuche liefern eine umfangreiche Grundgesamtheit zur Kalibrierung und Verifizierung des Modells und sind die Voraussetzung für eine Anwendung, welche sich über das gesamte Bundesgebiet erstreckt. Im Gegensatz zur Kalibrierung eines Modells für einen einzelnen Standort, ist die Zahl an Einflussfaktoren und deren Wechselbeziehungen hier unvergleichlich höher und wirkt sich letztendlich auf die Modellgüte aus. Mit dem Ergebnis eines mittleren statistischen Zusammenhangs für alle Standorte ist die Eignung des Modells für eine räumliche Applikation jedoch gegeben. Der Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit liegt in der Berücksichtigung von klimatischen Effekten, insbesondere der Wasserverfügbarkeit. Das Modell zielt demnach darauf ab, die Erträge unter dem Einfluss von Trockenheit zu quantifizieren und damit die Ertragssituation in Hinblick auf klimatische Veränderungen vor allem in den trockengefährdeten Gebieten im Osten und Süden Österreichs zu beschreiben.

Für die Modellierung wurden Daten aus den Jahren 2002 bis 2007 herangezogen. Allerdings bestehen die Versuche weiterhin und die Einbeziehung aktueller Jahre wird eine Weiterentwicklung des Modells ermöglichen. Die vorgenommene Implementierung nimmt darauf Rücksicht und unterstützt eine Ausweitung der Datenbasis ohne programmiertechnische Veränderungen. Damit ist eine effektive und effiziente Weiterentwicklung des vorliegenden Modells gewährleistet.

Neben der Verwendung von historischen Wetterdaten ist auch die Einbeziehung von Klimamodelldaten möglich

und damit eine Abschätzung der Veränderung des Grünlandertrages in Hinblick auf den Klimawandel. Eine Beurteilung der Veränderung von Standortbedingungen in klimatischer Hinsicht und deren Auswirkungen auf den Ertrag ist ein erster Schritt, Anpassungsstrategien zu entwickeln und rechtzeitig auf räumliche und zeitliche Verschiebungen der Anbaueignung landwirtschaftlicher Kulturen und deren Bewirtschaftungsmaßnahmen zu reagieren.

Danksagung und Anmerkung

Wir danken der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und dem Hydrographischen Zentralbüro (HZB) für die zur Verfügung gestellten Wetterdaten.

Teilweise ist die Lesbarkeit von Grafiken bzw. Karten durch die Schwarz-Weiß-Wiedergabe stark eingeschränkt. Diese Abbildungen sind auf Anfrage beim Ansprechpartner in Farbe erhältlich.

8. Literatur

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. und SMITH, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- BLÖSCHL, G. und MERZ, R. (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlags-Abflussmodellierung. In Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer, 164 S.
- BMLFUW (2008): Grüner Bericht 2008 - Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 322 S.
- BROWN, P. (2000): Basics of Evaporation and Evapotranspiration. University of Arizona, Tucson, 4 S., <http://cals.arizona.edu/pubs/water/az1194.pdf>, (14.04.2009).
- BUCHGRABER, K. und GINDL, G. (2004): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung, Leopold Stocker Verlag, 192 S.
- CLARK, I. und CLAUSEN, F.L. (1981): Simple alternative to disjunctive kriging. Trans. Instn. Min. Metall. **90**, 13-24.
- EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 272 S.
- FU, P. und RICH, P.M. (1999): Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. Environmental Systems Research Institute (ESRI), ESRI International User Conference, San Diego, 23 S.
- GOOVAERTS, P. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series, Oxford University Press, New York, Oxford, 483 S.
- GOOVAERTS, P. (2000): Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. Journal of Hydrology **228** (1-2), 113-129.
- HÄCKEL, H. (2005): Meteorologie. Ulmer UTB, Eugen Ulmer KG, Regensburg, 446 S.
- HARFLINGER, O. und KNEES, G. (1999): Klimahandbuch der Österreichischen Bodenschätzung, Klimatographie, Teil 1, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 196 S.

- IPCC (2007a): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S.
- IPCC (2007b): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18 S.
- KROMP-KOLB, H. (2003): Ursachen der globalen und regionalen Klimaveränderung und deren mögliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft. BAL Gumpenstein, 1. Klimaseminar zum Generalthema „Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft“, Irnding, 3 S.
- LI, S., TARBOTON, D. und McKEE, M. (2003a): GIS-based temperature interpolation for distributed modelling of reference evapotranspiration. 23rd AGU Hydrology Days, Fort Collins, Colorado, AGU Hydrology Days 2003, Colorado State University, 2 S.
- LI, S., TARBOTON, D. und McKEE, M. (2003b): Development of an ArcMap Toolbar for Regional Evapotranspiration Modeling. ESRI, ESRI International User Conference, San Diego, 12 S.
- MURER, E. (2009): Überprüfung und Verbesserung der Pedotransferfunktion zur Ermittlung der Wasserspeicherfähigkeit im Boden, Abschlussbericht, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 54 S.
- MURER, E., WAGENHOFER, J., AIGNER, F. und PFEFFER, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT: Schriftenreihe BAW, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 72-78 S.
- PÖTSCH, E.M. und RESCH, R. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfütter. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Irnding, 14 S.
- PÖTSCH, E.M. (2007): Austrian agriculture - data and facts. In HELGADOTTIR, A. and PÖTSCH, E.M.: Quality Legume-Based Forage Systems for Contrasting Environments, COST 852, LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Austria, 242 S.
- RIPLEY, B.D. (2004): Robust Statistics. Department of Statistics, University of Oxford, Oxford, 11 S., <http://www.stats.ox.ac.uk/pub/StatMeth/Robust.pdf> (20.08.2009).
- SCHAUMBERGER, A. (2005): Ertragsanalyse im österreichischen Grünland mittels GIS unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Veränderungen. Veröffentlichungen 42, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, 66 S.
- SCHAUMBERGER, A. (2007): GIS zur Bestimmung von Grünlanderträgen: Implementierung eines Ertragmodells. Master Thesis, Zentrum für Geoinformatik Salzburg, Salzburg, 103 S.
- SCHAUMBERGER, A., FORMAYER, H., TIEFENBACH, P., GRILLENBERGER, J. und STROBL, J. (2008a): Modellierung des raumzeitlichen Verlaufs der Schneebedeckung. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft **150** (2008), 163-182.
- SCHAUMBERGER, A., EITZINGER, J. und FORMAYER, H. (2008b): Räumliche Modellierung der potenziellen Evapotranspiration. Herbert Wichmann Verlag, 20. AGIT-Symposium „Angewandte Geoinformatik 2008“, Salzburg, 626-635 S.
- TRNKA, M., EITZINGER, J., GRUSZCZYNSKI, G., BUCHGRABER, K., RESCH, R. und SCHAUMBERGER, A. (2006): A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. *Grass and Forage Science* **61** (3), 253-271.
- TVEITO, O.E., WEGEHENKEL, M., Van der WEL, F. und DOBESCH, H. (2006): The use of Geographic Information Systems in Climatology and Meteorology, Final Report, COST Action 719, 245 S.