

Implementierung des Trockenschadenmodells in einem Geographischen Informationssystem (GIS) als Grundlage für die praktische Anwendung

A. SCHAUMBERGER

1. Einleitung

Die Nutzung von Grund und Boden und die daraus resultierende Produktion von qualitativ hochwertigen Nahrungsmitteln und Rohstoffen ist die wichtigste Aufgabe der Landwirtschaft und wird von vielen Faktoren beeinflusst. Zum einen ist die Art und Qualität des Bodens für die Bewirtschaftung maßgeblich. Zum anderen hängt die Nutzungsart und Ertragssituation ganz wesentlich von klimatischen Einflüssen ab. Nicht zuletzt spielt auch die Topographie hinsichtlich der verschiedenen Höhenlagen, der Hangneigung und der Exposition eine entscheidende Rolle.

Alle Parameter, die auf die Landbewirtschaftung Einfluss nehmen, haben eines gemeinsam: es handelt sich um räumlich verteilte Information. Untersuchungen und räumliche Analysen, die einen oder mehrere Faktoren betreffen, können somit in einem Geographischen Informationssystem (GIS) optimal bearbeitet werden. In den letzten Jahren ist in Österreich ein Geobasisdatenbestand entstanden, der hinsichtlich Quantität und Qualität eine gute Verarbeitung von landwirtschaftlichen Fachdaten ermöglicht. Die wichtigsten Daten, die hier zur Verfügung stehen, sind vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) das *Digitale Höhenmodell (DHM)* mit einer Bodenauflösung von 10 m und die *Digitale Katastralmappe (DKM)*, die seit 2004 flächendeckend zur Verfügung steht. Zu den wichtigsten Geofachdaten bei der Bearbeitung landwirtschaftlicher Fragestellungen zählen die *Digitale Bodenkarte*, welche Ende 2004 vom Bundesamt und Forschungszentrum für Wald (BFW) fertig gestellt wurde und die *meteorologischen Daten* von Messstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Die konkreten landwirtschaftlichen Informa-

tionen, wie Betriebsstruktur, Flächennutzung, Tierbesatz usw. können aus den *Daten des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (INVEKOS)* entnommen werden. Diese werden zu Agrarförderungszwecken von der Agrarmarkt Austria (AMA) direkt bei den Landwirten erhoben und vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) ausgewertet.

Auf Grund der zur Verfügung stehenden Daten können verschiedenste Themen aus dem Bereich der Landwirtschaft in einem GIS effizient und effektiv bearbeitet werden.

Die besondere Problematik bei der Bearbeitung im GIS besteht in der Bewältigung einer enormen Datenmenge, da sich alle Berechnungen auf das gesamte Bundesgebiet beziehen. Viele unterschiedliche Datenbestände von diversen Institutionen mussten zusammengeführt und mit großem Rechenaufwand weiterverarbeitet werden. Dazu war auch die Anschaffung einer leistungsfähigen Hard- und Software erforderlich.

Die Grundlage für die Modellierung der Grünlandertragssituation in Hinblick auf

Trockenheit ist die flächendeckende Erstellung eines Bodenwasserbilanzmodells auf Tagesbasis. Die Bilanzierung von Wassereintrag in den Boden und Verdunstung hängt von vielen Faktoren ab. Neben der Charakteristik des Bodens selbst sind die wichtigsten Parameter der Niederschlag, die Temperatur, die Luftfeuchte, der Wind und die Globalstrahlung. Hier wiederum besteht ein enger Zusammenhang mit der Topographie. Ebenso hat auch die Bewirtschaftung des Grünlandes einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag.

Ausgehend vom Bodenwasserbilanzmodell wird dieser mit Hilfe eines Wachstums- und Ertragsmodells geschätzt. Dazu ist die Bewirtschaftungsintensität bzw. Düngung zu berücksichtigen, die sich aus der Analyse der INVEKOS-Daten näherungsweise bestimmen lässt.

Abbildung 1 fasst die wichtigsten Komponenten für die Implementierung in einem Geographischen Informationssystem zusammen. Der Aufbau ist hierarchisch angeordnet, wobei die einzelnen Module selbst die Teilbereiche im GIS darstellen. Nur so ist die gemeinsame räumliche Analyse gewährleistet.

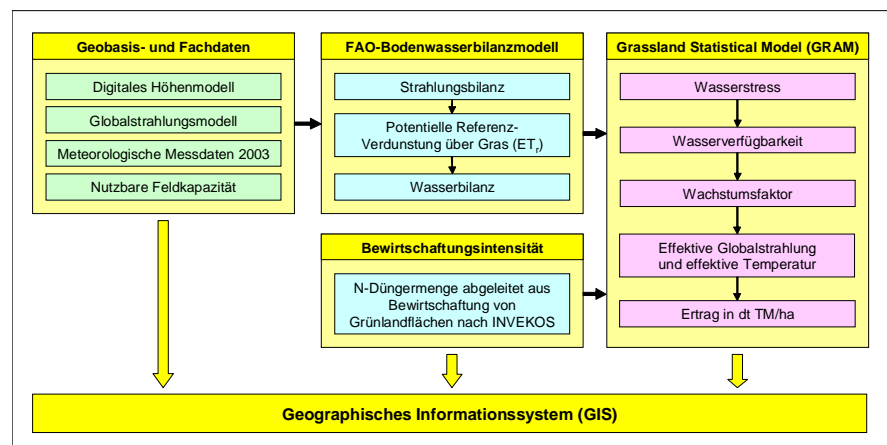


Abbildung 1: Komponenten des Bewertungsmodells für Trockenschäden und deren Integration in einem GIS

Autoren: Mag. Andreas SCHAUMBERGER, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Geoinformation im ländlichen Raum, A-8952 IRDNING

2. Problem- und Aufgabenstellung

Sämtliche GIS-Analysen beziehen sich auf die Daten des Jahres 2003, wo es in weiten Teilen Österreichs nur wenig Niederschlag und extrem hohe Temperaturen gab. Dies führte vor allem im Dauergrünland des östlichen und südlichen Bundesgebietes zu enormen Ertragseinbußen. Der erste Aufwuchs konnte noch Erträge von 60 %, verglichen mit Normaljahren, aufweisen. Die Folgeaufwüchse fielen jedoch so bescheiden aus, dass es sich oft gar nicht lohnte, sie zu mähen. Im niederschlagsreichen Berggebiet, insbesondere in den nördlichen Staulagen, führten hingegen die erhöhten Temperaturen zu optimalen Erträgen und Futterqualitäten.

Die von der Trockenheit betroffene Fläche von mehr als 500.000 ha wies Ertragsausfälle von 2.000 bis 7.500 kg Trockenmasse (TM) pro ha auf. Umgelegt auf Gesamtsummen heißt dies, dass im Grünland mit normalerweise 6,5 Millionen Tonnen TM-Ertrag im Jahr 2003 rund 1 Million Tonnen TM oder 15 % weniger geerntet werden konnte (BUCHGRABER et al., 2004).

Bei der Dürrekatastrophe des Jahres 2003 handelte es sich zwar um ein Extremereignis, die Klimaprognosen zeigen jedoch, dass wir in Zukunft öfter mit derartigen Situationen umgehen werden müssen. Die Entwicklung eines Bewertungsmodells für Trockenschäden ermöglicht eine genaue Analyse der Auswirkung derartiger Katastrophen und hinsichtlich der Absicherung des Risikos die Grundlage für eine etwaige Versicherung. Da die Schäden großräumig und auch intensiv auftreten können, sind mit einer Risikoabdeckung auch extrem hohe Kosten verbunden, welche die Bedeutung einer gut abgesicherten Berechnungsgrundlage unterstreichen.

Die GIS-Implementation beinhaltet im Wesentlichen die konkrete Ausgestaltung zweier Modelle.

2.1 Entwicklung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells mittels GIS

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Bodenwasserbilanzmodells nach einer vereinfachten und von



Abbildung 2: Im Jahr 2003 traten in manchen Teilen Österreichs extreme Schäden durch Trockenheit und in Folge auch durch Engerlinge auf

der FAO empfohlenen Methode. Da sich dieses Modell nicht auf bestimmte Standorte bezieht, sondern flächendeckend für ganz Österreich erstellt wird, ist es notwendig, sämtliche Daten in einem GIS zu verarbeiten.

Einer der wichtigsten Faktoren eines Bodenwasserbilanzmodells ist die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (PET).

Ist eine Pflanze ausreichend mit Wasser versorgt, so richtet sich ihr Verbrauch an Wasser nach der PET. Die Höhe der PET hängt ausschließlich von meteorologischen Einflüssen ab, die durch die „Penman-Monteith-Formel“ (MONTEITH and UNSWORTH, 1990) mathematisch beschrieben werden. Sie erreicht in Österreich an schönen Sommertagen um die 5 bis 8 mm (Liter pro Quadratmeter). Wenn Pflanzen dem Boden aufgrund fehlender Bodenfeuchte nicht so viel Wasser entziehen können, wie sie laut PET transpirieren sollten, kommen sie unter Trockenstress und müssen die Photosynthese und damit das Wachstum reduzieren.

Die wichtigsten Faktoren der PET sind das Sättigungsdefizit und die Strahlungsbilanz. Unter Sättigungsdefizit versteht man ein Maß für die Menge an Wasserdampf, den die Luft aufnehmen kann und wird aus der Temperatur und relativen Luftfeuchte berechnet. Die Strahlungsbilanz gibt an, wie viel Strahlungsenergie eine Oberfläche absorbiert und da-

her für Evaporations- und Transpirationsvorgänge zur Verfügung hat. Der wichtigste Parameter dafür ist die meteorologische Globalstrahlung (FORMAYER, 2003).

Durch die Reduzierung der Transpiration verliert die Pflanze einen wichtigen Kühlmechanismus und die Blätter setzen die gesamte absorbierte Strahlungsenergie in Wärme um. Bei heißen Temperaturen und strahlendem Sonnenschein kann dies zu Eiweißschädigungen und Nekrosen führen. Erfolgt keine Wasserzufuhr in den Boden, entziehen die Pflanzen unter steigendem Trockenstress dem Boden so lange Wasser, bis der Welkepunkt erreicht und dem Boden kein Wasser mehr entzogen werden kann. Der Welkepunkt gibt die Saugspannung an, bis zu der Wurzeln dem Boden Wasser entziehen können. Diese hängt von den Bodeneigenschaften und dem Wassergehalt des Bodens ab (FORMAYER, 2003).

Die Beschreibung der Problemstellung zeigt, dass für die Berechnung eines Bodenwasserbilanzmodells eine Fülle von Daten notwendig ist. In erster Linie handelt es sich dabei um meteorologische Daten, die unter Berücksichtigung der Topographie räumlich zu interpolieren sind. Weiters sind die Bodeneigenschaften und die auf Grünlandflächen erfolgte Bewirtschaftung wichtige Inputparameter des Modells.

Die meteorologischen Daten sind die wichtigste Basis für die Berechnung der

PET. Außerdem wird für die Strahlungsbilanz ein Modell benötigt, das die Interpolation der Globalstrahlung zwischen den Messstationen verfeinert. In diesem Zusammenhang spielen die topographischen Parameter eine große Rolle. Auch der Niederschlag muss zwischen den Messstationen in geeigneter Weise räumlich interpoliert werden.

Die für die Erstellung der Bodenwasserbilanz erforderlichen Bodeneigenschaften sind die Feldkapazität und der Welkepunkt. Unter Feldkapazität versteht man jene Wassermenge, die ein Boden gegen seine Schwerkraft halten kann. Aus Feldkapazität lässt sich durch Abzug jener Wassermenge, die mit hohen Saugspannungen festgehalten wird (Welkepunkt), die nutzbare Feldkapazität, d.h. jene Wassermenge, die für landwirtschaftliche Nutzpflanzen zur Verfügung steht, errechnen. Die nutzbare Feldkapazität als flächendeckender Datenbestand wird für verschiedene Bodenschichten auf Grundlage der Digitalen Bodenkarte erstellt.

Die Bewirtschaftungsdaten können nicht flächendeckend gewonnen werden, da diese Werte auf ein vom Landwirt bewirtschaftetes Grundstück bezogen sind und eine sinnvolle Interpolation natürlich nicht möglich ist. Aus der Bewirtschaftungsweise lässt sich der Pflanzenfaktor ableiten. Dieser hängt von der Bestandeshöhe und vom Schnittzeitpunkt ab. Er ist eine Maßzahl für die im Verdunstungsprozess involvierte Blattfläche. Um die Schnittzeitpunkte richtig einzuschätzen, muss der temperaturabhängige Vegetationsbeginn ermittelt und darauf aufbauend die Abstände zwischen den einzelnen Schnitten berechnet werden.

2.2 Implementierung des Wachstums- und Ertragsmodells im GIS

Neben der Aufbereitung von Geodaten zur Berechnung der Bodenwasserbilanz ist die Implementierung des Wachstums- und Ertragsmodells ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die Ertragsmodellierung wurde vom Projektpartner an der Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie, vorgenommen und als Ergebnis eine multiple Regressionsgleichung ermittelt. Die Gleichung setzt sich aus den in der Modell-

rechnung bestimmten empirischen Koeffizienten und aus in der Bodenwasserbilanzierung berechneten Parametern zusammen. Neben der Berücksichtigung meteorologischer Messungen und topographischer Charakteristika ist auch die Düngung eine Größe, die in die Ertragsbestimmung einfließt. Mit der Auswertung von INVEKOS-Daten kann eine näherungsweise Festlegung der Stickstoffdüngung vorgenommen werden. Dazu wird für jeden Betrieb der Tierbesatz pro ha ermittelt und auf jede Teilfläche des Betriebes angewendet.

Für die Ertragsbestimmung auf Grünlandflächen ist es notwendig, sämtliche Daten mit Hilfe GIS-gestützter Methoden zu kombinieren. Ziel des Projektes „Trockenschäden im Grünland“ ist es, eine möglichst flächendeckende Berechnung zu realisieren. Aus diesem Grund werden die verschiedenen Zwischenergebnisse aus der FAO-Bodenwasserbilanzrechnung und der Düngermengenbestimmung auf Basis von Rasterdaten berechnet. Um die Auswirkung von Trockenperioden auf den Ertrag nachvollziehen zu können, ist eine zeitpunktbezogene Betrachtung unbrauchbar. Der Bodenwasserhaushalt muss demnach über eine längere Periode untersucht werden. Durch Akkumulation der Tageswerte von Tagesmitteltemperatur, Globalstrahlungssumme und Verdunstungswerten wird ein Wasserstressfaktor ermittelt, mit dem unter anderem auch das Pflanzenwachstum unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Wassermenge im Boden simuliert wird. Das Endergebnis besteht in einer Darstellung des Ertrages in dt Trockenmasse pro ha für die verschiedenen Aufwüchse.

Die Aufbereitung einer flächendeckenden Datenbasis für die Bodenwasserbilanzierung und Ertragsmodellierung erfordert die Integration in ein GIS, welches hohen Leistungsansprüchen genügt. Um für ganz Österreich Geodaten zu rechnen, bestehen besondere Anforderungen an Hard- und Software. Darüber hinaus muss die Verarbeitung durch eine geeignete Erweiterungsprogrammierung der Standard-GIS-Software unterstützt werden, da die großen Datenmengen manuell nicht bearbeitbar sind. Alle Berechnungen erfolgen nicht nur für das gesamte Bundesgebiet, sondern auch auf

Tagesbasis, d.h. für jeden Tag entstehen zahlreiche flächendeckende Datenbestände. Eine zusätzliche Herausforderung ist die Wahl und Implementierung geeigneter geostatistischer Interpolationsverfahren.

Die für die Integration im GIS notwendigen Basisdaten stammen aus verschiedenen Quellen, welche für das Projekt „Trockenschäden im Grünland“ akquiriert werden mussten. Dazu war es notwendig, sich intensiv mit der Geodatsituation in Österreich auseinanderzusetzen.

Im nachfolgenden Kapitel „Material und Methoden“ wird auf die verwendeten Geodaten und auf die einzelnen Verarbeitungsprozesse und -methoden eingegangen und diese genau beschrieben. Es wird dabei in der Reihenfolge der von einander abhängigen und aufbauenden Komponenten der Modelle vorgegangen und soll einen gut nachvollziehbaren Einblick in den Arbeitsprozess des Teilbereiches „GIS“ im Rahmen des Gesamtprojektes „Trockenschäden im Grünland“ bieten. Die große Bedeutung von GIS für die praktische Umsetzung des Projektes kann aus den bisherigen Ausführungen gut eingeschätzt werden, wird jedoch im Folgenden noch klarer zum Ausdruck kommen.

3. Material und Methoden

3.1 Systemumgebung und Datengrundlage

Als GIS-Software wurde für dieses Projekt ArcGIS ArcInfo 8.3 von ESRI verwendet. Die Extension Spatial Analyst kam bei der Bearbeitung der Rasterdaten, Geostatistical Analyst bei der Wahl geeigneter Interpolationsverfahren zum Einsatz. Die Verarbeitung von Massendaten wurde mit Programmen vorgenommen, die in der in ArcGIS integrierten Entwicklerumgebung für Visual Basic for Applications (VBA) unter Verwendung der Klassenbibliothek von ArcObjects entwickelt wurden. Für die Berechnung eines Strahlungsmodells auf Grundlage des Digitalen Höhenmodells (DHM) wurde die ArcView-Extension Solar Analyst 1.0 verwendet.

Kleine Programme zur Berechnung von Formeln und zur Generierung von Ergebnislisten wurden in der Entwicklungsumgebung Eclipse 3.0 mit JAVA

realisiert. Die Verwaltung und Abfrage von Sachdaten wurde mit Microsoft Access 2002 durchgeführt, die Aufbereitung von Daten mit Microsoft Excel 2002. Die Abspeicherung sämtlicher Geodaten erfolgte dateibasiert, da zur Projektlaufzeit keine Infrastruktur für die Ablage in einem Datenbankmanagementsystem mit Geodatenerweiterung vorhanden war.

3.2 Räumliches Bezugssystem und Projektion

Um Geodaten in einem GIS vernünftig bearbeiten zu können, müssen diese einem Bezugssystem zugeordnet werden. Die räumliche Lage von Objekten in einem bestimmten Raum lässt sich damit eindeutig über Koordinaten bestimmen.

Ein Bezugssystem wird durch ein geodätisches Datum und durch die Ausrichtung seines Koordinatensystems im Raum definiert.

Um das gesamte Bundesgebiet zu erfassen, bietet sich die Lambert-Projektion an, die auch in der amtlichen Kartographie verwendet wird. Im Projekt „Trockenschäden im Grünland“ werden Geodaten verarbeitet, die sich immer auf ganz Österreich beziehen und für alle verwendeten Daten ist deshalb dieses Abbildungsmodell relevant und soll näher vorgestellt werden.

Bei der Lambertschen Projektion (Lambert Conformal Conic) handelt es sich um eine winkeltreue Schnittkegelprojektion. Bei winkeltreuen Projektionen wird die Form verzerrungsfrei dargestellt, ge-

ringfügige Veränderungen beziehen sich auf Fläche, Distanz und Richtung, die jedoch minimal sind, da die Kegelprojektion optimal für Gebiete der nördlichen Hemisphäre in mittlerer Breite mit West-Ost-Ausdehnung passt.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der Schnittkegelprojektion und deren Anwendung auf Österreich. Die Parameter der verwendeten Lambert-Projektion können der Abbildung entnommen werden. Der Vorteil einer Schnittkegelprojektion liegt darin, dass der Kegel den Erdkörper nicht nur an einer Stelle tangential berührt, sondern zwei Berührungslinien den Raum mit geringer Verzerrung erheblich erweitern.

3.3 FAO-Bodenwasserbilanzmodell

In der Arbeit „Ein Trockenschadenmodell für das österreichische Grünland“ von EITZINGER und TRNKA (2005) wird ausführlich auf die einzelnen Modellparameter eingegangen. In diesem Abschnitt konzentriert sich die Darstellung auf die technische Umsetzung im Rahmen eines GIS.

Der modulartige Aufbau von der Berechnung der Globalstrahlung über die potentielle Evapotranspiration bis hin zur Einbeziehung des Niederschlags und des Bodens muss auch hier genau eingehalten werden, da auch im GIS der hierarchische Modellaufbau eine wichtige Rolle spielt. Die Ergebnisse der verschiedenen Zwischenschritte sind dem Kapitel „Ergebnisse“ zu entnehmen.

3.3.1 Berechnung der täglichen Globalstrahlung

Ein äußerst wichtiger Parameter zur Bestimmung von Trockenheit ist der Strahlungseintrag. Für die Modellierung der FAO-Bodenwasserbilanz ist die Ermittlung der Globalstrahlung notwendig.

Die Erde nimmt ununterbrochen die Strahlung der Sonne in einer Größenordnung von $4,3 \cdot 10^{15}$ kWh/d auf. Als Solarkonstante wird jene Strahlung bezeichnet, die an der Obergrenze der Atmosphäre senkrecht auf eine Fläche von 1 cm^2 einfällt, sie beträgt $33,0 \text{ kWh/m}^2\text{d}$. Davon gelangen jedoch nur 31 % als *direkte Sonnenstrahlung* auf die Erdoberfläche. 14 % werden schon in der Atmosphäre absorbiert, 3 % verschlucken die Wolken, die auch 24 % wieder in den Weltraum abstrahlen. 12 % werden an den Luftteilchen in der Atmosphäre ohne bestimmte Richtung zerstreut, jeweils zur Hälfte in den Weltraum und zur Erdoberfläche. Die Strahlung wird *diffuse Himmelsstrahlung* genannt. Auch jene Strahlung, welche durch die Wolken dringt oder von ihnen reflektiert wird (16 %), ist diffus zerstreut. Die auf die Erde gelangte direkte und diffuse Strahlung wird als *Globalstrahlung* bezeichnet. Sie bewirkt die Erwärmung des Erdbodens und wird von den Pflanzen zur Photosynthese genutzt (VAN EIMERN und HÄCKEL, 1984, S. 20f).

Die Strahlungsmenge wird hauptsächlich durch die Tages- und Jahreszeit sowie durch die geographische Breite be-

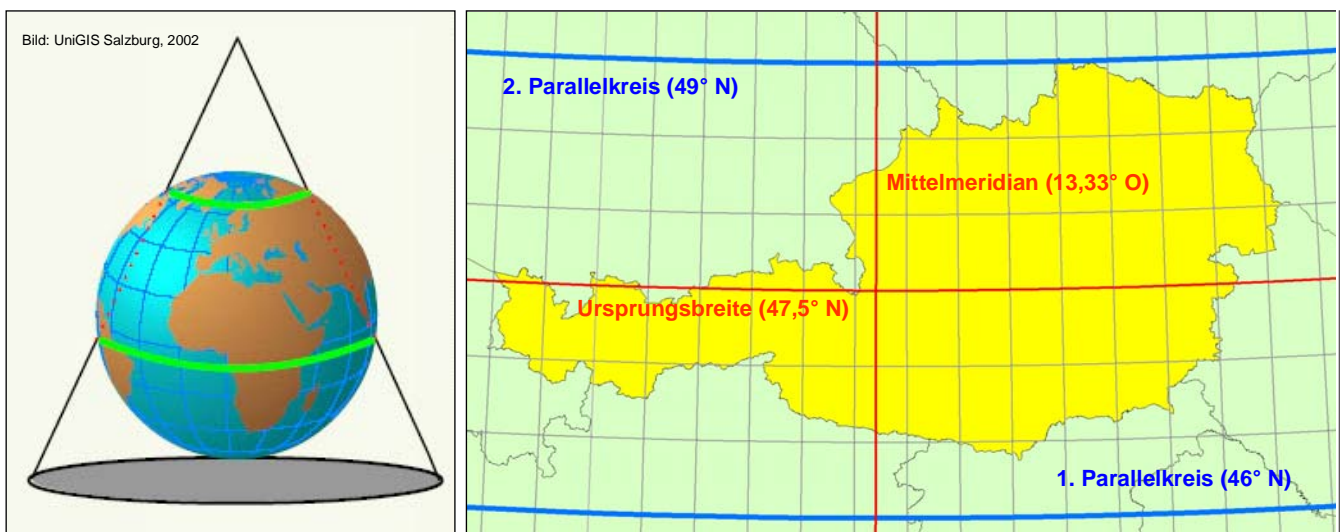


Abbildung 3: Schnittkegelprojektion und Parameter der österreichischen Lambert-Projektion

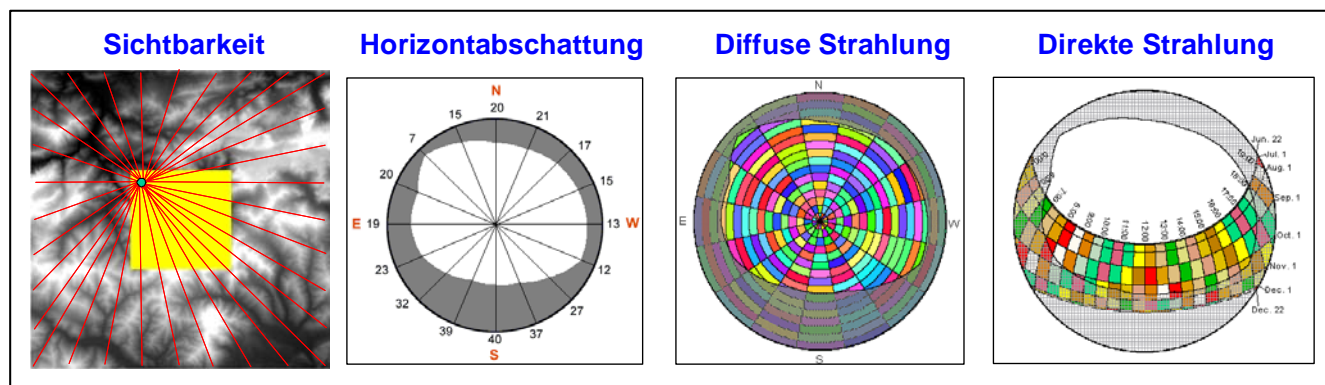


Abbildung 4: Berechnungsschema der ArcView-Extension „Solar Analyst“

stimmt. Auch die Topographie spielt eine Rolle, da sie unter anderem bestimmt, in welchem Winkel die Strahlen auf die Fläche auftreffen. Je flacher dieser Winkel ist, desto größer ist auch die Fläche, auf der sich die Sonnenenergie verteilt.

In der vorliegenden Arbeit wurde zur direkten Ermittlung der Globalstrahlung die ArcView-Extension Solar Analyst 1.0 verwendet, da sie die Möglichkeit schafft, zusätzliche Parameter in die Berechnung einfließen zu lassen. Die Sonnenstandsberechnung ist natürlich auch hier von großer Bedeutung, weshalb die Darstellung des Prinzips im vorigen Abschnitt nicht unwesentlich zum Verständnis der Funktionalität des Solar Analyst beiträgt. Das Programm wurde von Mitarbeitern der University of Kansas entwickelt und stellt ein wissenschaftlich gut abgesichertes Werkzeug zur Berechnung von direkter Strahlung, diffuser Strahlung, Globalstrahlung und Strahlungsdauer zur Verfügung. Daneben kann damit für beliebige Punkte eine Übersicht über die diffuse Strahlung sowie der Sonnenverlauf an definierten Punkten unter Berücksichtigung der Horizontabschattung dargestellt werden (FU and RICH, 1999a).

Die Berechnung der diversen Strahlungsgrößen kann entweder für bestimmte Punkte oder auch für Flächen vorgenommen werden. In beiden Fällen ist die Eingabe eines DHM notwendig, dem auch ein Hangneigungs- und Expositionsraster mit gleicher räumlicher Ausdehnung angeschlossen werden kann. Jede Zelle des DHM wird wie ein einzelner Punkt behandelt. Von jedem dieser Punkte wird für eine frei einstellbare Anzahl von Richtungen die Sichtbarkeit berechnet. Letztendlich entsteht daraus ein „Sky-

view“, der die Horizontabschattung an diesem Punkt darstellt. Um an den Rändern des Kalkulationsbereiches, sprich DHM, auch ein gültiges Abschattungsergebnis für jede Himmelsrichtung zu bekommen, ist es notwendig, über den Kalkulationsbereich hinaus auf die Daten eines umgebenden DHM zugreifen zu können. Zu diesem Zweck kann der Kalkulationsbereich auf eine frei definierbare Maske eingeschränkt werden. *Abbildung 4* zeigt dies mit dem Bild „Sichtbarkeit“ sehr anschaulich. Der gelbe Bereich entspricht dem zu berechnenden Gebiet und wird als Maske eingegeben, das zu berücksichtigende DHM geht darüber hinaus. Von jedem Punkt wird nach und nach eine Sichtbarkeitsanalyse in 32 Richtungen (entspricht der Einstellung in diesem Projekt) durchgeführt. Daraus entsteht ein „Skyview“, wie er im Bild „Horizontabschattung“ dargestellt ist. Zwischen den Sichtbarkeitslinien wird linear interpoliert (FU and RICH, 1999b).

Für die Berechnung der Strahlung sind „Sky Parameters“ festzulegen. Dazu gehört die geographische Breite. In diesem Projekt wurde dafür der Mittelpunkt eines jeden Kalkulationsbereiches gewählt. Weiters ist der jeweilige Tag des Jahres, für den die Berechnung durchgeführt wird, und das Zeitintervall festzulegen. Im Projekt wurde ein Intervall von 30 Minuten eingegeben. Diese Einstellung bezieht sich auf die Diskretisierung der Sonnenposition.

Tabelle 1: Einstellungen von Diffuse Proportion und Transmittivity in Abhängigkeit des Monats

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Diffuse Proportion	0.35	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35
Transmittivity	0.70	0.70	0.70	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.70	0.70	0.70	0.70

Diffuse Strahlung und Direkte Strahlung (siehe *Abbildung 4*) werden unter Berücksichtigung der Horizontabschattung addiert und ergeben somit die Globalstrahlung. Sie kann im Modell nur angenähert werden, da die Daten der tatsächlichen Wolkenbedeckung mit Hilfe eines Durchschnittswertes ersetzt werden. Die Ausgabeneinheit der Berechnung ist WH/m^2 . Für die weitere Verwendung im Bodenwasserbilanzmodell wird in MJ/m^2 umgerechnet. Ein Joule entspricht einer Wattsekunde, eine Wattstunde sind daher 3600 Joule.

Die Ergebnisse können durch zeitlich differenzierte Einstellung der Parameter „Diffuse Proportion“ und „Transmittivity“ entscheidend verbessert werden. Diffuse Proportion drückt den Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlung aus und Transmittivity beschreibt die Transparenz der Atmosphäre bezüglich einer ungehinderten Einstrahlung. Um diese beiden Werte optimal berücksichtigen zu können, wurden die Modellrechnungsergebnisse des Solar Analyst jenen der in einem Monat gemessenen Strahlungsmaxima auf ausgewählten Standorten gegenübergestellt und iterativ optimiert. Zwischen beiden Größen besteht eine inverse Abhängigkeit, welche bei der Anpassung berücksichtigt werden muss. Die so ermittelten Parameter für die einzelnen Monate sind in *Tabelle 1* angegeben.

Die Skyviews der jeweiligen Stationen in *Abbildung 6* zeigen einen guten Zu-

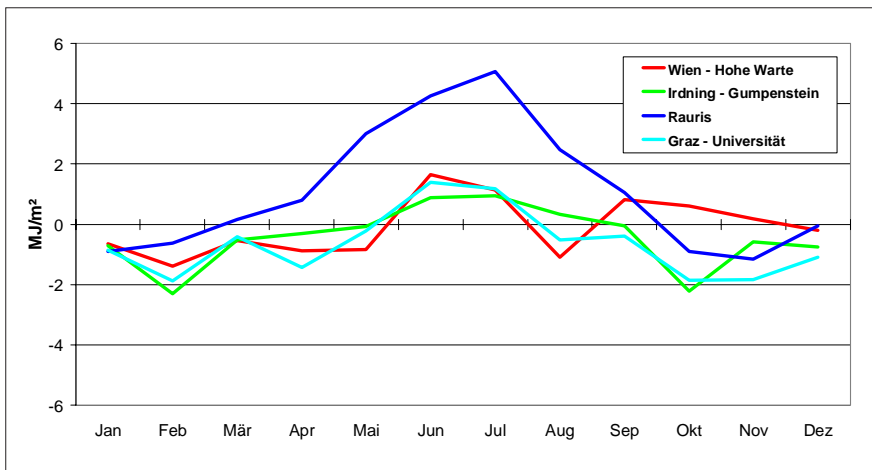


Abbildung 5: Differenzen zwischen Ergebnissen des Globalstrahlungsmodells des Solar Analyst an vier Standorten mit monatlich angepasster Diffuse Proportion bzw. Transmittivity und gemessenen Monatsmaxima (entsprechen der 0-Linie)

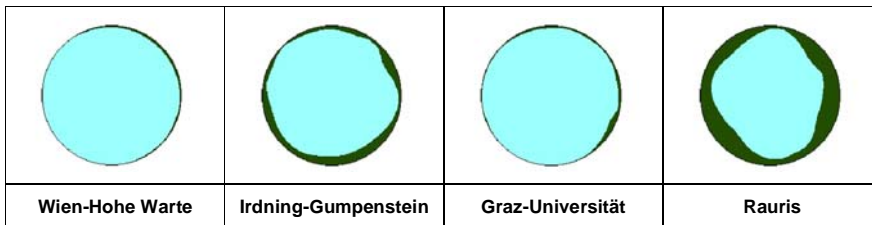


Abbildung 6: Skyview der vier Standorte unter Verwendung des DHM 50 m mit 32 Sichtbarkeitslinien

sammenhang mit dem Kurvenverlauf der Strahlungsdifferenzen in *Abbildung 5*. Standorte mit massiven Abschattungen werden vom Modell in den Sommermonaten stark überbewertet. Die Ursache für die signifikante Abweichung von Rauris kann damit begründet werden.

Die Berechnung der Globalstrahlung mit Hilfe des Solar Analyst ist eine äußerst rechenintensive Prozedur. Aus diesem Grund waren Maßnahmen notwendig, dass die sich exponentiell verhaltende Rechenzeit in einem akzeptablen Rahmen gehalten werden konnte. Die wichtigste Einschränkung betrifft das DHM – es wurde nicht das zur Verfügung stehende Modell mit 10 m Auflösung verwendet, sondern eines mit 50 m Rasterweite.

Bei der Berechnung von Sichtbarkeitslinien wirkt sich eine Verringerung der Auflösung geringfügig negativ auf das Ergebnis aus, da die Konturen der Topographie etwas verwischt werden.

Als weitere Maßnahme, die intensive Rechenzeit zu bewältigen, wurde das für die Berechnung der Sichtbarkeiten zu berücksichtigende Gebiet auf 20 km um

den Kalkulationsbereich herum beschränkt. In *Abbildung 7* wird der Berechnungsalgorithmus graphisch dargestellt. Das DHM des gesamten Bundesgebietes liegt in Kacheln mit einem Blattschnitt von 50 x 50 km vor. Für den aktuellen Kalkulationsbereich, der als Maske in einem Gebiet von 70 x 70 km definiert ist, wird die Globalstrahlung gerechnet. Ist dieser Schritt erledigt, wird

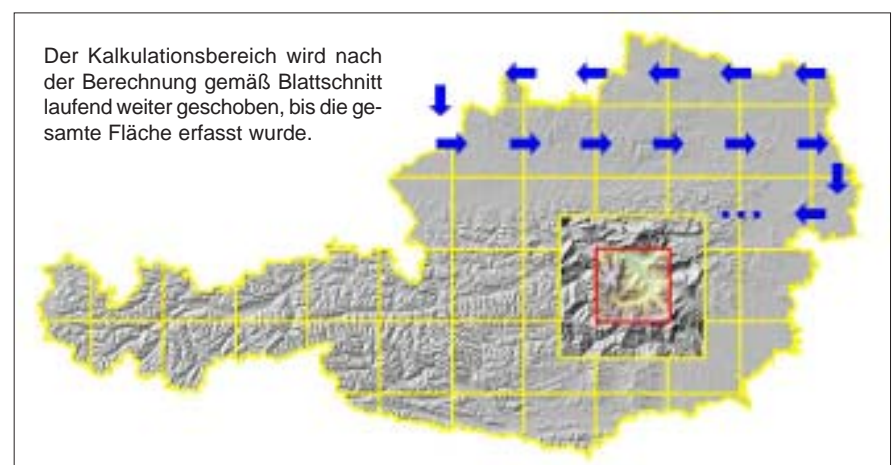


Abbildung 7: Berechnung der Globalstrahlung mit Kalkulationsbereichen von 50 x 50 km und der berücksichtigten topographischen Oberfläche mit 70 x 70 km für das gesamte Bundesgebiet

zur nächsten Kachel weitergegangen, dort wieder ein quadratisches Gebiet mit 70 km Seitenlänge definiert und erneut gerechnet. Das setzt sich so lange fort, bis alle Kacheln nach diesem Schema bearbeitet worden sind.

Die Durchführung der Rechenoperationen ist mit einem gut ausgerüsteten Standardcomputer nicht zu machen. Deshalb übernahm das Land- und forstwirtschaftliche Rechenzentrum (LFRZ) im Auftrag des BMLFUW diese Tätigkeit. Vom LFRZ wurde auch die Funktionalität des Solar Analyst in ein Avenue-Script für ArcView 3 integriert, das die automatische Abarbeitung der in *Abbildung 27* dargestellten Schritte nach den in dieser Arbeit durchgeführten Analysen und den darauf abgestimmten Vorgaben ermöglichte.

Ein weiterer Inputparameter für die Berechnung der Globalstrahlung ist ein bestimmter Tag des Jahres, d.h. die Ergebnisse stellen die Strahlungssumme eines Tages dar. Für die FAO-Bodenwasserbilanzmodellierung ist die tägliche Veränderung abzubilden. Aus diesem Grund ist auch für jeden Tag des Jahres, insbesondere alle Tage der Vegetationsperiode, ein flächendeckendes Globalstrahlungsraster zu rechnen. Auch hier wurde eine Maßnahme getroffen, um den enormen Rechenaufwand einzuschränken. In einer Veröffentlichung von KLEIN (1977) mit dem Titel „Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces“ werden Tage vorgeschlagen, die für einen bestimmten Monat charakteristisch sind. Die Berechnungen des LFRZ beziehen sich auf diese Tage.

In *Tabelle 2* wird neben den Daten auch eine Überprüfung der Repräsentativität dieser Methode am Beispiel des 162. Tag des Jahres bzw. des 11. Juni gezeigt. Dazu wurde die Summe der Sonnenscheindauer mittels Hillshade in ArcGIS auf Basis der berechneten Sonnenposition eines jeden Tages im Juni im Intervall von 30 Minuten mit jener Berechnung verglichen, die nur für den 11. Juni erfolgte und mit 30 multipliziert wurde. Die sehr hohe Übereinstimmung wird durch einen Korrelationskoeffizienten von 0,9943 bei einer Streuung von 3,38 Monatsstunden (0,8 %) bestätigt. Gleichzeitig liegt der Steigungswert k der linearen Regression, die sich aus dem Modell ableiten lässt, mit 1,0025 ideal.

Der Solar Analyst produziert als Ergebnisse Integer-Grids, diese sind in Floating-Grids zu konvertieren und anschließend von Wh/m^2 mit dem Faktor 0.0036 in MJ/m^2 umzurechnen. Für die Globalstrahlungssumme aller dazwischen liegenden Tage wurde das Ergebnis in MJ/m^2 linear interpoliert. Auch diese rechenintensive Operation wurde vom LFRZ durchgeführt.

Die Modellierung der Globalstrahlung mit Hilfe des Solar Analyst bezieht sich auf theoretische Werte, da die jeweilige Wettersituation mit der entsprechenden Wolkenbedeckung keine Berücksichtigung findet. In Österreich wird an vielen Messstationen der ZAMG auch die Globalstrahlung gemessen, welche die realen Wetterbedingungen wiedergeben. Dieses Stationsnetz für die Messung der Globalstrahlung ist jedoch nicht besonders dicht und eine einfache Interpolation, die topographische Parameter unberücksichtigt ließe, würde zu keinen befriedigenden Resultaten führen.

Aus diesem Grund muss die Interpolation der potentiellen Evapotranspiration, in die auch die Werte der gemessenen Globalstrahlung einfließen, mit einem Faktor korrigiert werden, der die Änderungen in der Topographie (Höhenlage, Hangneigung und Exposition) zum Ausdruck bringt.

Dazu werden die Ergebnisse des Globalstrahlungsmodells mit einem Wert normiert, der sich auf eine horizontale und unbeschattete Fläche bezieht, um die topographischen Abhängigkeiten zu isolieren. Als Punkt für die Berechnung der

Tabelle 2: Empfohlene Durchschnittstage für jeden Monat nach KLEIN (1977) und deren Überprüfung

Monat	Tag des Jahres	Datum	Überprüfung der Repräsentativität
Jänner	17	17. Jänner	
Februar	47	16. Februar	
März	75	16. März	
April	105	15. April	
Mai	135	15. Mai	
Juni	162	11. Juni	
Juli	198	17. Juli	
August	228	16. August	
September	258	15. September	
Oktober	288	15. Oktober	
November	318	14. November	
Dezember	344	10. Dezember	

Normwerte wurde die Messstation Großenzersdorf ausgewählt und das umgebende DHM mit $5 \times 5 \text{ km}$ Ausdehnung und einer Auflösung von 50 m für die Berechnung im Solar Analyst einbezogen.

Auch hier wurden analog zu den flächendeckenden Berechnungen die monatlichen Einstellungen von Diffuse Proportion und Transmittivity berücksichtigt und die Ermittlung der Globalstrahlungswerte für die Tage nach KLEIN (1977) vorgenommen. Durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Tagen erhält man die Werte von Großenzersdorf für alle Tage des Jahres. Die Normierung des Globalstrahlungsmodells mit diesen Werten liefert dann den gewünschten Faktor, mit dem in späterer Folge die Interpolation der potentiellen

Evapotranspiration näherungsweise berichtigt wird.

Die technische Umsetzung wurde in ArcGIS mit VBA programmiert. Dabei wird die Berechnung unter Berücksichtigung von Schaltjahren vorgenommen. Eine Übersicht der einzelnen Berechnungsschritte zeigt *Abbildung 8*. Hier wurden die Basisdaten, Zwischenergebnisse und vor allem der Datenfluss bis zur Erstellung der Strahlungsraster in einem Schema dargestellt, das auch als Ablaufdiagramm interpretiert werden kann.

3.3.2 Berechnung der täglichen potentiellen Evapotranspiration

Auf Grund von Wärmezufuhr in Form von Strahlung und vorbeistreichender Luft wird von feuchten Oberflächen

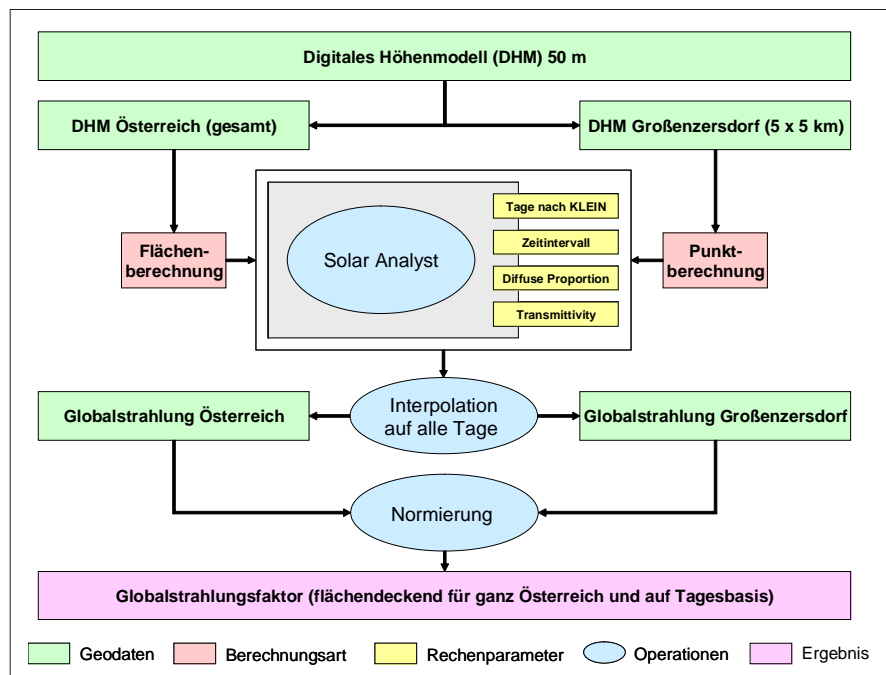


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Berechnung des Globalstrahlungsfaktors

Wasser verdunstet. Die unmittelbare Verdunstung über Land- oder Wasserflächen wird *Evaporation* bezeichnet. Ist die Oberfläche mit Pflanzen bewachsen, so findet auch über deren Blattoberfläche (*Cuticula*) bzw. Spaltöffnungen (*Stomata*) eine Verdunstung statt, die *Transpiration* genannt wird. Bei geschlossenen Pflanzendecken überwiegt die Transpiration im Vergleich zur Evaporation. Die gesamte, an die Luft abgegebene Wasserdampfmenge ist die *Evapotranspiration*. Zweck dieses Vorgangs ist der Abbau von Wärmeenergie, wodurch, solange genügend Wasser im Boden zur Verfügung steht, eine Überhitzung verhindert wird (VAN EIMERN und HÄCKEL, 1984, S. 44f).

Die Evapotranspiration steigt mit zunehmender Strahlungsintensität und Windgeschwindigkeit, mit wachsender Luft- und Bodentemperatur und abnehmender Luftfeuchtigkeit. Sie entwickelt sich parallel zur Differenz aus dem Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der verdunstenden Oberfläche und dem Dampfdruck der Luft. Solange die Pflanze ungehindert Wasser aufnehmen kann, ist die Stärke der Evapotranspiration nur von der Zufuhr an Wärmeenergie, d.h. vom Wetter abhängig. Diese dann maximal mögliche Verdunstung eines geschlossenen Pflanzenbestandes wird *potentielle Verdunstung* (*Evapotranspiration*) genannt (VAN EIMERN und HÄCKEL, 1984, S. 45).

Mit Hilfe eines Formelwerkes (EITZINGER und TRNKA, 2005) wird auf Grundlage meteorologischer Aufzeichnungen und deren Verarbeitung im GIS ein Datenbestand erzeugt, der die tägliche und flächendeckende potentielle Evapotranspiration über Gras beinhaltet.

3.3.2.1 Aufbereitung der meteorologischen Daten

Für dieses Projekt wurden meteorologische Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) aus dem Jahr 2003 verwendet. Zusätzlich mussten die Stationen der ZAMG georeferenziert werden, um davon ausgehend eine räumliche Interpolation diverser Wetterdaten vornehmen zu können.

Die Tabelle der meteorologischen Aufnahmen enthält zu jeder Station pro Tag einen Datensatz mit folgenden Attributen:

- Mittlere, maximale und minimale Temperatur in °C
- Temperatur um 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr in °C
- Mittlere relative Luftfeuchte in %
- Relative Luftfeuchte um 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr in %
- Globalstrahlung in MJ/m²
- Sonnenscheindauer in Stunden
- Wind in m/s
- Niederschlag in mm

Einige Stationen liefern für einzelne Tage keine gültigen Werte. Dies trifft insbesondere auf die Globalstrahlung zu, die nicht an allen Stationen gemessen wird. Die Datenfelder enthalten in diesen Fällen Fehlercodes. Eine Abfrage in der Datenbank eliminiert sämtliche Datensätze, die bei Temperatur und Luftfeuchte keine gültigen Werte aufweisen. Fehlercodes der Globalstrahlung und Sonnenscheindauer werden auf die einheitliche Zahl von -1 gebracht. Dies erleichtert eine spätere Selektion der Datensätze mit fehlenden Werten.

Zusammen mit den Stationsdaten (Name, Stationsnummer und XYZ-Koordinaten) bilden diese aufbereiteten Daten die Basis für eine weitere Verarbeitung im GIS. Die MS Access-Datenbank enthält alle für die Datenaufbereitung notwendigen Abfragen und sollte bei der Verwendung von Messdaten eines anderen Kalenderjahres keinen Mehraufwand verursachen. Dies ist deshalb äußerst wichtig, da für die Erstel-

lung eines Versicherungsmodells eine Reihe von Jahren näher untersucht werden müssen. Es ist lediglich die Basis-tabelle der meteorologischen Daten eines bestimmten Jahres auszutauschen.

3.3.2.2 Vorbereitungen für die Messdatenverarbeitung im GIS

Um auf Grund meteorologischer Daten zu flächendeckenden Analysen zu kommen, ist es notwendig, diese zu interpolieren. Stützstellen der Interpolation bilden die Messstationen, die über ganz Österreich verteilt installiert sind. Allen Stationen sind geographische Koordinaten zugeordnet, die, wie im Abschnitt 3.4.1 beschrieben, als Dezimalgradwerte die Ausgangsbasis für eine Georeferenzierung bilden. Mit der ArcGIS-Funktion „Add XY Data“ kann aus der Tabelle „Messstationen“ ein Punkte-Shape erstellt werden, das anschließend korrekt projiziert werden muss. *Abbildung 9* zeigt die Verteilung der ZAMG-Messstationen mit einer Klassifizierung nach der Globalstrahlungsdatenerhebung.

Die Projektion der Stationen erfolgt, wie sämtliche im Projekt verwendeten Daten, in Lambert. Für die Ermittlung der dieser Projektion entsprechenden Koordinaten wurde ein kleines Werkzeug entwickelt, das die Rechts- und Hochwerte von Point-Shapefiles als Attribute der Datentabelle anfügt. Dieses VBA-Programm ist allgemein gehalten, sodass auch andere Parameter wie Fläche und Umfang bei Polygon-Shapefiles oder die Länge bei Linien-Shapes berechnet wer-

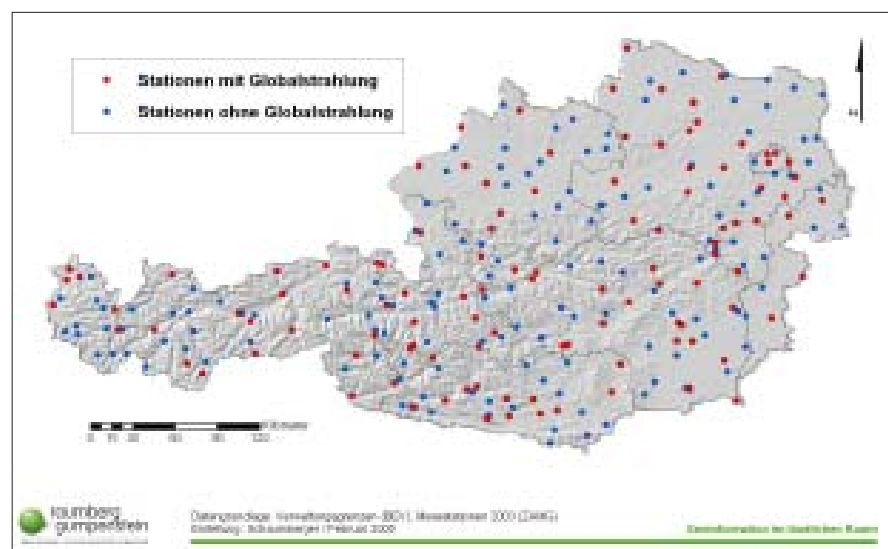


Abbildung 9: Verteilung der Messstationen der ZAMG mit und ohne Messung der Globalstrahlung

den können. Die Bedienung erfolgt durch die Einbindung als Makro in ArcCatalog, indem eine projizierte Shapedatei, die erweitert werden soll, markiert und das Programm dann darauf angewendet wird.

Neben den Lagekoordinaten muss auch die Z-Koordinate einer kritischen Betrachtung unterzogen werden. In der Tabelle der Messstationen sind zu den jeweiligen Stationen Höhenangaben enthalten, die der räumlichen Interpolation von meteorologischen Daten als Stützpunkte dienen sollen. Für die flächendeckende und höhenabhängige Darstellung von Messdaten wird der Interpolation ein DHM mit der Auflösung von 250 m zu Grunde gelegt.

Diese grobe Auflösung kann deshalb verwendet werden, da die Ergebnisse einer Interpolation zwischen den relativ weit entfernten Stationen (siehe *Abbildung 9*) mit höherer Auflösung nicht verbessert

werden kann. Für die Seehöhe der Stationen ist deshalb der Z-Wert des DHM ausschlaggebend, um die höhenabhängige Interpolation nicht zu verfälschen.

3.3.2.3 Berechnung der Evapotranspiration an den Messstationen

Die Berechnung der Evapotranspiration (ETP) kann an den Messstellen mit den von EITZINGER und TRNKA (2005) angeführten Formeln vorgenommen werden. Die meteorologischen Inputparameter sind dabei Temperatur, relative Luftfeuchte, Wind und die Strahlung. Wie in *Abbildung 9* dargestellt, werden an wesentlich weniger Stationen Messungen der Globalstrahlung durchgeführt. Um für eine gut angepasste Interpolation möglichst viele Stationen berücksichtigen zu können, ist es deshalb außerordentlich wichtig, fehlende Werte zu modellieren.

Zunächst wird an jenen Stationen, für die alle Messwerte vorhanden sind, die Eva-

potranspiration gerechnet. Zwischen Evapotranspiration und Sättigungsdefizit (VPD) besteht ein sehr guter Zusammenhang, sodass mit der Bestimmung des Sättigungsdefizits auch auf die Evapotranspiration geschlossen werden kann. In *Abbildung 10* wird für jeden Monat eine Regressionsgleichung dargestellt, die als Polynom 2. Grades für die Bestimmung der Evapotranspiration der einzelnen Tage im jeweiligen Monat angewendet wird.

Bei der Berechnung des Sättigungsdefizits werden lediglich die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte benötigt. Aus diesem Grund können alle Stationen, unabhängig davon, ob dort Strahlung gemessen wurde oder nicht, als Stützstellen für die Interpolation herangezogen werden. Davon sind immerhin 114 von insgesamt 272 Stationen betroffen. Durch diese Maßnahme erfährt eine flächendeckende Berechnung der Eva-

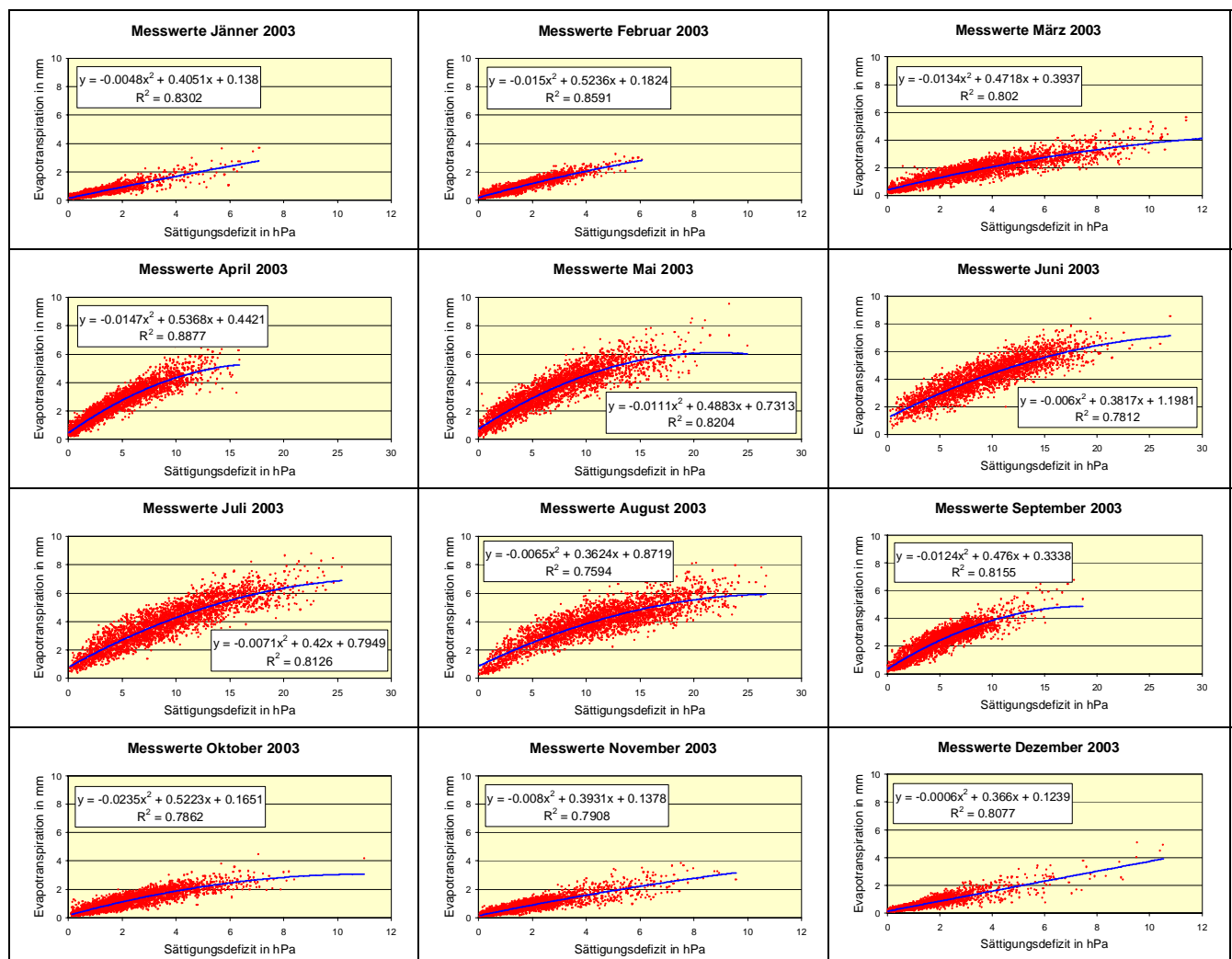


Abbildung 10: Korrelation von Evapotranspiration und Sättigungsdefizit eines jeden Monats

potranspiration eine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit. Bevor die gemessenen ETP-Werte in die Regressionsrechnung einfließen, werden sie auf Plausibilität geprüft. Ausgeschlossen werden alle Werte kleiner 1 bzw. jene, die ein bestimmtes Maximum übersteigen. Außerdem werden alle Messungen mit Windgeschwindigkeiten über 15 m/s nicht berücksichtigt. Die monatlichen Strahlungsmaxima beziehen sich auf beobachtete Strahlungswerte in Großenzersdorf der Jahre 2001 und 2002 (FORMAYER, 2005).

Die Programmierung der Berechnung erfolgte in VBA (ArcGIS). *Abbildung 11* zeigt schematisch die Arbeitsweise des Algorithmus im erstellten Programm. Zunächst werden in der Tabelle der Messdaten zwei zusätzliche Spalten eingefügt, in welche die berechneten Werte für ETP und VPD eingetragen werden. Wie bereits ausgeführt, kann ETP nicht überall berechnet werden. Deshalb werden die vorhandenen ETP-Werte eines ausgewählten Monats einem MS Excel-Objekt übergeben, mit dem eine polynomische Regression 2. Grades gerechnet wird. Die in MS Excel verfügbare LINEST-Funktion ist grundsätzlich für lineare Regressionen konzipiert, kann jedoch auch für nichtlineare Zusammenhänge modifiziert werden.

Die Ergebnisfunktion dieser Prozedur kann nun in ArcGIS zur Berechnung der fehlenden ETP-Werte eines Monats angewendet werden. Der Algorithmus befindet sich in einer Schleife über alle Monate, sodass letztendlich für sämtli-

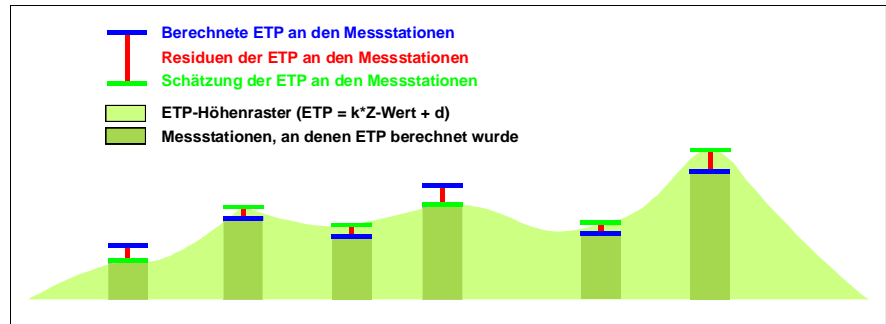


Abbildung 12: Schematische Darstellung der ETP-Residuen und der höhenabhängigen ETP-Regression unter Verwendung des Digitalen Höhenmodells

che Stationen und alle Tage des Jahres, welche gültige Messwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte aufweisen, ein lückenloser Bestand an ETP-Daten für die weitere Berechnung einer flächendeckenden Evapotranspiration zur Verfügung steht.

3.3.2.4 Ermittlung der monatlichen ETP-Höhenraster und ETP-Residuen

Für eine flächendeckende Berechnung der Evapotranspiration werden nicht die ermittelten ETP-Werte verwendet, sondern eine Kombination von Höhenwerten aus dem DHM und den Residuen, die sich aus einer höhenabhängigen Schätzung und den gerechneten ETP-Werten ergeben. Die Evapotranspiration weist zumindest in den wärmeren Monaten April bis September eine Höhenabhängigkeit auf, die für die Ermittlung und Interpolation von Residuen genutzt werden kann. In *Abbildung 12* wird gezeigt, dass eine lineare Regression über die Evapotranspiration und Seehöhe die

Möglichkeit schafft, den höhenabhängigen Anteil der Evapotranspiration ohne räumliche Interpolationsmethode in die Fläche zu bringen. Die Differenz zwischen berechneten und auf diese Weise ermittelten ETP-Werten an den Messstationen (Residuen) bilden nun die Stützpunkte für die weitere Verarbeitung im Rahmen der räumlichen Interpolation.

Grundsätzlich führt eine Interpolation von Werten mit Abhängigkeiten zu systematischen Fehlern, die durch Anwendung der beschriebenen Methode ausgeschlossen werden können. Für die Ermittlung der Regressionsgleichung ist es notwendig, die ETP-Werte eines ganzen Monats zusammen zu ziehen, um die Einflüsse von täglichen Wetterschwankungen weitgehend auszuschließen. Dies verursacht jedoch eine große Streuung der an einer bestimmten Station berechneten Werte.

In *Abbildung 13* werden die Ergebnisse der Regressionsrechnung dargestellt. Ganz deutlich ist der Zusammenhang in den warmen Monaten ausgeprägt. In den Wintermonaten kommt es bei schönem Wetter bzw. Inversionswetterlagen zu einer Umkehrung der Temperaturverhältnisse – in höheren Lagen ist es dann oft wärmer als im Tal. Wird für diese Monate ein Mittelwert gebildet, hebt sich der Zusammenhang von Evapotranspiration und Seehöhe auf und drückt sich, wie in den Abbildungen dargestellt, durch ein minimales Bestimmtheitsmaß aus. In der Vegetationsperiode nimmt die Evapotranspiration pro 1000 m Seehöhe durchschnittlich um einen Millimeter ab.

Mit Hilfe der monatlich gerechneten Regressionsgleichung kann der in *Abbildung 12* schematisch dargestellte ETP-Höhenraster entwickelt werden. Dazu

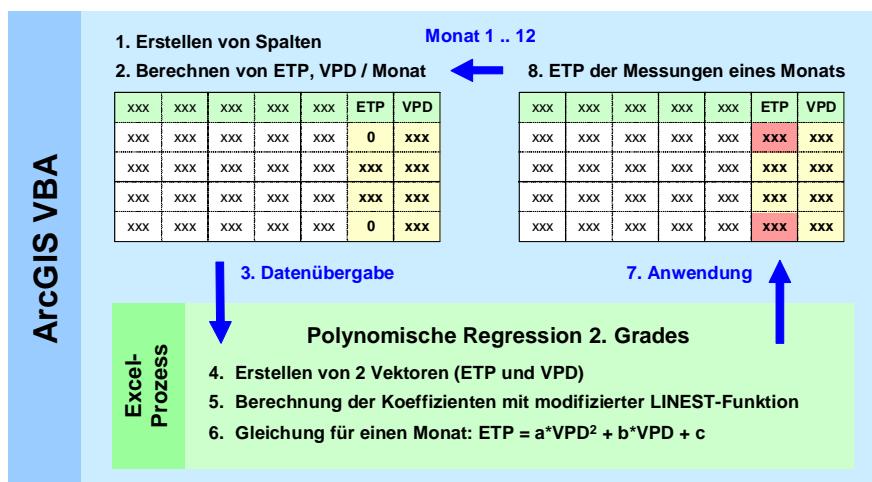


Abbildung 11: Abbildung des Berechnungsprozesses für die geschätzte Evapotranspiration an Stationen ohne Globalstrahlungsmessung mit einer monatsbezogenen Regressionsgleichung

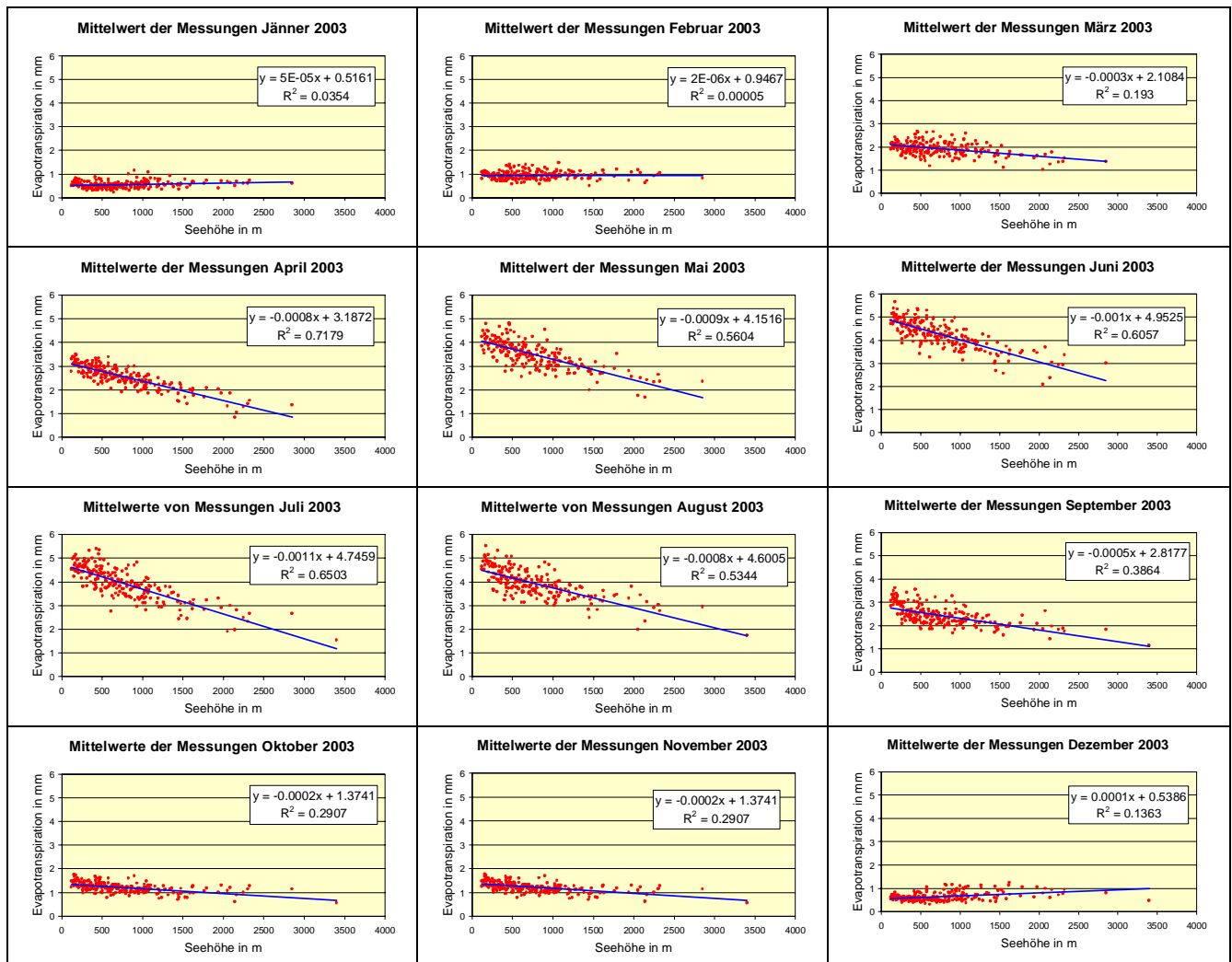


Abbildung 13: Korrelation von Evapotranspiration (monatliches Mittel an den Stationen) und Seehöhe

übergibt das VBA-Programm in ArcGIS die ETP-Werte eines Monats und die Seehöhe der Station einem MS Excel-Prozess, der mittels LINEST-Funktion eine lineare Regression rechnet. Die daraus ermittelten Koeffizienten werden dann mit den Rasterwerten des DHM als unabhängige Variable zur Berechnung einer geschätzten, flächendeckenden Evapotranspiration weiterverwendet.

Die Residuen von geschätzter und berechneter Evapotranspiration entstehen dann durch die Anwendung der Regressionsgleichung an den Messstationen. Die dazu notwendigen Prozeduren wurden in VBA (ArcGIS) entwickelt.

3.3.2.5 Interpolation der ETP-Residuen

Die berechneten Residuen der Evapotranspiration an den Messstationen werden mittels geostatistischer Methoden

interpoliert und so zu flächendeckenden Rasterdaten erweitert.

Im Projekt „Trockenschäden im Grünland“ wurde die Methode „Kriging“ verwendet, die auch in den meisten anderen meteorologischen Problemstellungen zum Einsatz kommt. In einem VBA-Programm wird die Interpolationsmethode „Kriging“ entsprechend parametrisiert und die Einstellungen für Auflösung und Ausdehnung so vorgenommen, dass eine korrekte Rasterkalkulation mit den ETP-Höhenrastern möglich ist.

3.3.2.6 Berechnung der ETP-Ergebnisse

Mit der Zusammenführung der monatlich gerechneten ETP-Höhenraster, in denen der höhenabhängige Anteil der Evapotranspiration Berücksichtigung findet, und der täglichen ETP-Residuen-Interpolation entsteht eine für ganz Ös-

terreich flächendeckende Information der potentiellen Evapotranspiration auf Tagesbasis. Bei der durchgeführten Rasterkalkulation (Addition zweier Raster) wird der Ergebnistraster zusätzlich noch „ausgeschnitten“. Dazu wird ein binäres Maskenraster in der Ausdehnung des DHM eingeführt und als Multiplikand in die Operation miteinbezogen. *Abbildung 14* zeigt die Rasterdaten, die mittels Addition und Multiplikation miteinander kombiniert werden und letztendlich eine flächendeckende Darstellung der Evapotranspiration ergeben. Die Automatisierung dieser Vorgehensweise, die sich für alle Tage des Jahres wiederholt, wurde in einem VBA-Programm in ArcGIS realisiert.

Für die Monate Dezember, Jänner und Februar wird für die potentielle Evapotranspiration eine generelle Obergrenze von 0.5 MJ/m^2 eingezogen. In diesen



Abbildung 14: Operationen zur Berechnung der Evapotranspiration am Beispiel des 1. Juni 2003

Monaten ist das Auftreten höherer Werte unwahrscheinlich, da hier die in diesem Projekt nicht modellierte Schneedecke bzw. die im Allgemeinen niedrigeren Temperaturen des Bodens im Vergleich zur Lufttemperatur eine maßgebliche Rolle spielen.

Die ermittelte Evapotranspiration beinhaltet noch zur Gänze den Wert der Globalstrahlung. Er wurde, wie auch alle anderen Parameter, in die Fläche gerechnet. Eine Verfeinerung der Ergebnisse erhält man nun dadurch, dass der Globalstrahlungsfaktor, wie er im Abschnitt 3.3.1. beschrieben wurde, auf das Ergebnis der Evapotranspirationsrechnung angebracht wird. Dieser Faktor beinhaltet die modellierten Strahlungsverhältnisse in Abhängigkeit der Topographie. Auf diese Weise finden Hangneigung, Exposition und auch die Höhenlage Eingang in das Endergebnis. Mit diesem Schritt wird auch die Auflösung der Ergebnisse

von 250 m (meteorologische Daten) auf 50 m erhöht.

Damit ist Modul 2 des FAO-Bodenwasserbilanzmodells implementiert und kann nun für weitere Berechnungen, die sich hauptsächlich mit den Komponenten Niederschlag, Pflanzenbestand und Boden beschäftigen, verwendet werden. *Abbildung 15* zeigt nochmals schematisch alle Rechenschritte zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration.

Das Ergebnis dieser Berechnungen stellt nur die potentielle Evapotranspiration dar, d.h. die maximal mögliche Verdunstung eines geschlossenen Pflanzenbestandes und ist somit nur als Zwischenergebnis zu betrachten. Bei der potentiellen Evapotranspiration wird unterstellt, dass der Boden eine volle Wassersättigung aufweist. Dies ist natürlich nicht immer der Fall und deshalb muss die tatsächlich vorhandene Bodenfeuchte mit Hilfe der Parameter „Niederschlag“ und

„nutzbare Feldkapazität“ entsprechend modelliert werden. Auch diese Berechnungen werden auf Tagesbasis durchgeführt und ergeben zusammen mit der potentiellen Evapotranspiration letztendlich ein Bodenwasserbilanzmodell, aus dem auf Trockenheit und trockenbedingte Schäden geschlossen werden kann.

3.3.3 Berechnung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells

Mit der Berechnung der täglichen Strahlungsbilanz und der darauf aufbauenden Ermittlung der täglichen potentiellen Evapotranspiration wurde die Basis für die Erstellung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells geschaffen. In diesem Abschnitt wird das Modell durch die Hinzunahme der Parameter Niederschlag, Bodenbedeckung und Boden vervollständigt.

Die Berechnung der Wasserbilanz erfolgt für drei unterschiedliche Bodenhorizonte. In einer ersten Stufe wird die Evaporation für die Bodenschicht von 0 bis 10 cm ermittelt. Die Evapotranspiration bezieht sich im nächsten Schritt auf den Boden von 0 bis 20 cm Tiefe. Letztlich wird für die Wasserbilanz die Transpiration der Bodenschicht 20 bis 40 cm gerechnet.

Neben dem bereits ausführlich beschriebenen Parameter der potentiellen Evapotranspiration ist hier eine der wichtigsten Eingangsgrößen der Niederschlag.

3.3.3.1 Aufbereitung der Daten aus Niederschlagsmessungen

Auch der Niederschlag wird wie Temperatur, relative Luftfeuchte, Wind und Strahlung an den Stationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) gemessen und im Rahmen dieser Arbeit aus der ZAMG-Messdatentabelle entnommen und für das Jahr 2003 bearbeitet. Die Problematik bei der Ver-

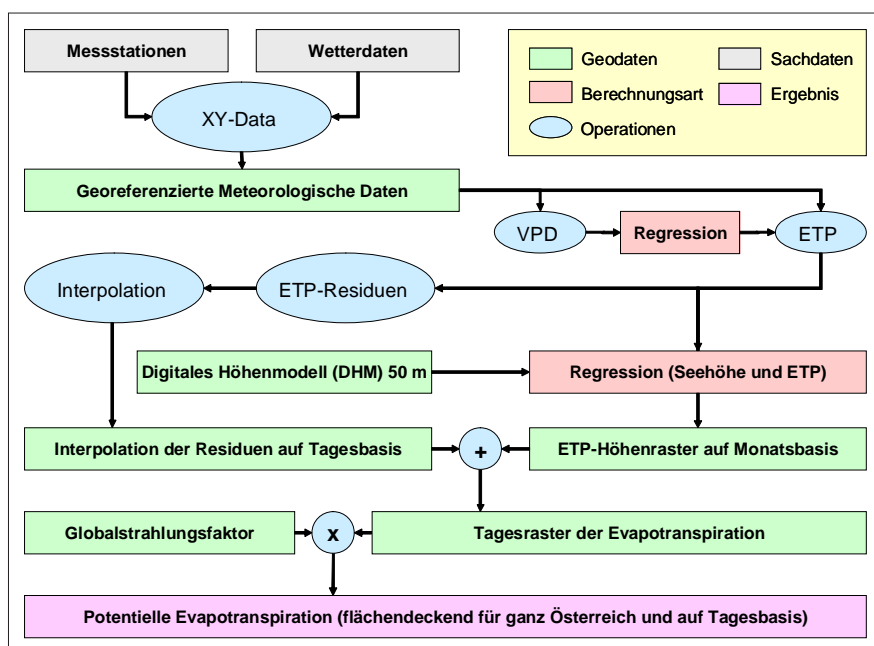


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration

wendung der Niederschlagsdaten besteht darin, dass sie nur mit mehr oder weniger großen Fehlern interpoliert werden können. Der Niederschlag weist eine Höhenabhängigkeit auf (positive Korrelation), die dadurch Berücksichtigung findet, dass ein möglichst dichtes Netz an Messstellen verwendet wird. Niederschlagsereignisse treten räumlich begrenzt auf und die vorhandenen Messungen an den Stationen werden mit der Interpolationsmethode Kriging auf eine flächendeckende Datenbasis erweitert.

Um extreme Fehler bei der Interpolation auszugleichen, wurden zu den ZAMG-Stationen noch zusätzlich 618 Messstellen der Hydrographischen Dienste der Länder Oberösterreich, Niederösterreich, Burgenland, Steiermark, Kärnten und Salzburg hinzugenommen. Damit ergibt sich ein für diese Bundesländer äußerst dichtes Netz an Messstellen (siehe Abbildung 16), welche bei der Interpolation zu einer erheblichen Qualitätsverbesserung führen.

Die Datenaufbereitung wurde in MS-Access vorgenommen, wobei alle Abfragen zur Kombination und Fehlerbereinigung so aufbereitet wurden, dass mit dem Wechsel des Berechnungsjahres für künftige Anwendungen kein wesentlicher Mehraufwand entsteht.

3.3.3.2 Messdatenverarbeitung im GIS

Die Stationen der ZAMG, wie auch jene der Hydrographischen Dienste, enthalten geographische Koordinaten, die mit der ArcGIS-Funktion „Add XY Data“ in

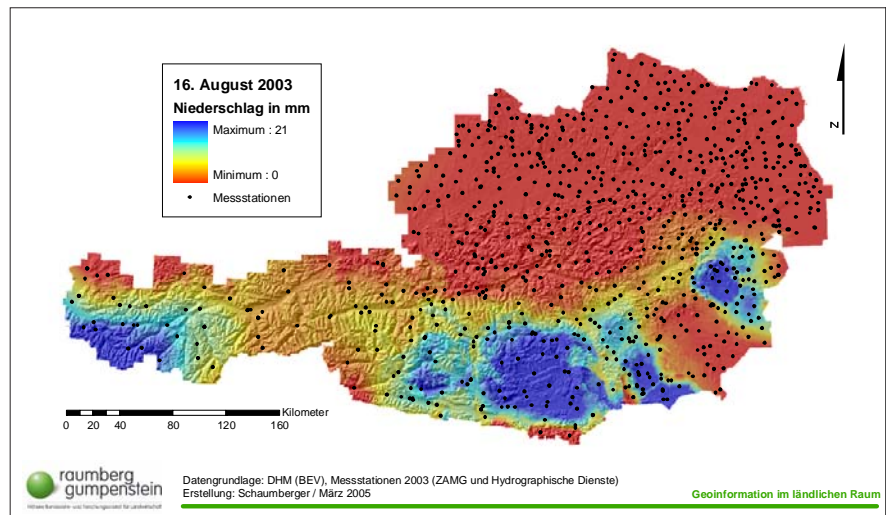


Abbildung 17: Beispiel einer Niederschlagsinterpolation am 16. August 2003

ein Punkte-Shape überführt werden. Voraussetzung dafür ist die Kombination beider Datenbestände, die neben den Stationsidentifikatoren auch die täglichen, fehlerbereinigten Niederschlagsmessungen enthalten. Die Interpolation wird mittels VBA-Programm automatisiert, da für jeden Tag eine eigene Rasterdatei zu erstellen ist.

Abbildung 17 zeigt die Höhe und Verteilung der Niederschlagsmesswerte an den Stationen, sowie deren Interpolation. Für die Berechnung der Bodenwasserbilanz spielt die *Interzeption* eine große Rolle. Der Niederschlag bringt das für die Verdunstung am Boden zur Verfügung stehende Wasser. Oft gelangt jedoch nicht der gesamte Niederschlag bis zum Boden, da erhebliche Wassermengen an den Blättern und Zweigen der

Pflanzen hängen bleiben und dort verdunsten. Dieser Vorgang wird Interzeption oder Interzeptionsverdunstung genannt (HÄCKEL, 1985, S. 66).

In diesem Projekt ist das Grünland Gegenstand der Betrachtung und daher wurde dafür ein Wertebereich zwischen 0.5 und 2 mm festgelegt, der von der gemessenen Niederschlagsmenge abgezogen wird (FORMAYER und EITZINGER, 2005). Der genaue Wert hängt davon ab, wie weit sich der Grünlandbestand entwickelt hat bzw. wie groß die Blattoberfläche, an der Wasser verdunstet, näherungsweise ist. Als Maß für die Bestandsituation eines bestimmten Tages dient der so genannte Pflanzenfaktor.

Mittels linearer Regression kann der Wert des Niederschlagsabzugs in Abhängigkeit des Pflanzenfaktors ermittelt werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Bestimmung des Pflanzenfaktors, der für die Berechnung einer variablen Interzeption benötigt wird, beschrieben.

3.3.3.3 Berechnung des Pflanzenfaktors

Um die Entwicklung des Pflanzenbestandes auf einer Grünlandfläche näherungsweise modellieren zu können, müssen Vegetationsbeginn und -ende sowie durchschnittliche Schnitttermine berechnet werden. Die Anpassung an die realen Bedingungen der Grünlandnutzung stellt sich äußerst schwierig dar, da viele Einflüsse eine große Rolle spielen. Neben der Pflanzenbestandszusammensetzung bestimmt die Art der Bewirtschaftung (Düngung, Nutzungsfrequenz, Beweidung

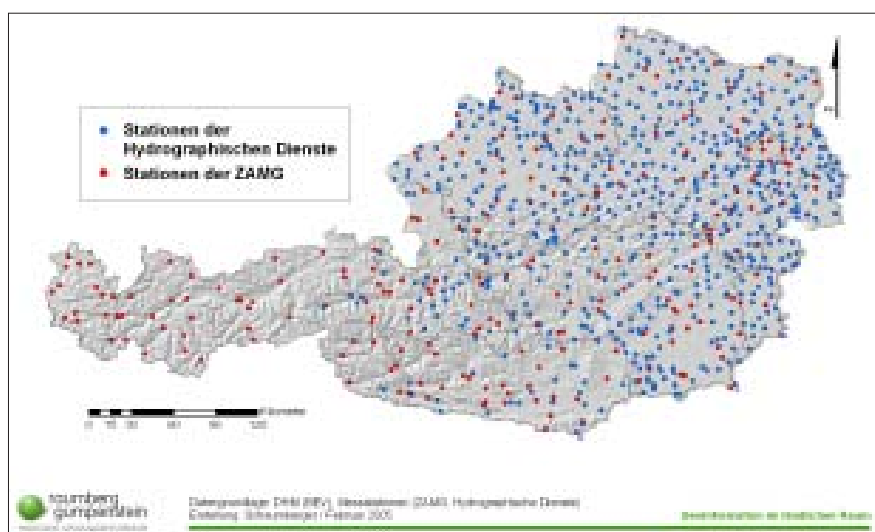


Abbildung 16: Verteilung der Messstationen der Hydrographischen Dienste und der ZAMG

usw.) den Ertrag ganz wesentlich. In dieser Arbeit wird lediglich versucht, durch meteorologische Parameter die Vegetationsperiode festzulegen und die Nutzungshäufigkeit und in weiterer Folge die Schnitttermine davon abzuleiten.

Der Vegetationsbeginn definiert sich durch eine Tagesminimumtemperatur ab 2 °C über einen durchgehenden Zeitraum von 5 Tagen. Dazu wurden auch einige Alternativen gerechnet, wie z.B. eine Tagesmitteltemperatur von 2 °C über 5 Tage oder eine Tagesmitteltemperatur von 5 °C über 5 Tage. Es ist festzustellen, dass mit der Variante „Tagesminimumtemperatur 2 °C“ eine gute Differenzierung der Höhe bei einer realistischen Verteilung über die Zeit erreicht wird. In vorliegender Arbeit wurde daher diese Variante verwendet.

Das Vegetationsende wird nach dem gleichen Schema mit umgekehrtem Temperaturkriterium, d.h. Tagesminimumtemperatur unter 2 °C über einen Zeitraum von 5 Tagen, festgesetzt.

Die Einführung eines Temperaturkriteriums für die Festsetzung von Beginn und Ende der Vegetationszeit impliziert die Bezugnahme auf ein bestimmtes Jahr. In diesem Fall wurde, wie auch bei allen anderen Berechnungen, das Jahr 2003 verwendet.

Die Berechnung der Raster basiert auf einer Addition von fünf aufeinander folgenden Temperaturrastern mit einer laufenden Verschiebung um den nächsten Tag. Als Zeitraum für die Rasteroperationen wurde zwischen 1. März und 31.

Mai gerechnet. In dieser Zeit beginnt in allen Grünlandgebieten Österreichs die Vegetationsperiode. Für das Vegetationsende wurde der Zeitraum von 1. Oktober bis 30. November gewählt. Auch hier findet in allen relevanten Gebieten das Ende der Vegetationsperiode laut den definierten Kriterien statt.

Die Temperatur raster für diese Berechnungen wurden für die oben genannten Monate täglich berechnet. Dabei wird nach der gleichen Methode wie bei der flächendeckenden Berechnung der Evapotranspiration vorgegangen.

Die Temperatur weist einen engen Zusammenhang mit der Seehöhe auf. Es wird daher eine Regression der Tagesminimumtemperatur über die Höhe gerechnet. Dazu werden die monatlichen Messwerte in Beziehung zur Seehöhe der jeweiligen Station gesetzt und als Mittelwert der Berechnungsprozedur übergeben. Die Grafiken in *Abbildung 18* zeigen in den kälteren Monaten (März und November) einen schlechteren Zusammenhang, der hauptsächlich durch Inversionswetterlagen zu begründen ist. Da jedoch bei der Ermittlung der Vegetationsperiode ein Zeitraum von 5 Tagen das Temperaturkriterium erfüllen muss, wirkt sich dieser schlechtere Zusammenhang auf die Ergebnisse nicht oder nur in absoluten Extremfällen aus.

Die Höhenwerte der DHM-Rasterzellen werden als unabhängige Variable in die Regressionsgleichung eingesetzt. Dadurch entstehen für jeden Monat flächendeckende Temperatur raster, die den

höhenabhängigen Anteil an der Temperatur abdecken. Durch die Berechnung der Residuen an den Stationen und deren Interpolation mittels Kriging werden die täglichen Werte in die Fläche gebracht und mit dem monatlichen Temperatur-Höhenraster addiert. Damit entstehen für jeden Tag des Berechnungszeitraums die flächendeckenden und höhenabhängigen Temperaturwerte.

Ein Vegetationsbeginn ist unter dem angeführten Kriterium nur dann möglich, wenn die betreffenden Flächen keine Schneebedeckung aufweisen. Die Ermittlung der Schneedecke ist ein äußerst komplexes Verfahren, das für diese Modellierung des Pflanzenfaktors nicht mit einbezogen wird, da mit dem verwendeten Kriterium (Minimumtemperatur von 2 °C über eine Dauer von fünf Tagen) in den Gebieten mit Grünlandnutzung das Problem des durch eine Schneedecke verzögerten Vegetationsbeginns nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Aus der berechneten Vegetationsperiode kann die Anzahl der Schnitte ermittelt werden. Dafür wird vom Vegetationsbeginn bis zum Schnitt beim Ähren- und Rispschieben, d.h. Schnittrife bei Dauerwiesen, eine auf langjährige Erfahrung beruhende Anzahl von Wachstumstagen addiert. Für die Folgeaufwüchse ist diese Wachstumszeit etwas länger, in beiden Fällen jedoch höhenabhängig. In *Tabelle 3* werden die Wachstumstage verschiedener Seehöhenklassen aufgelistet.

Die Bewirtschaftung im Sinne einer Schnittnutzung findet nicht bis zum Ende

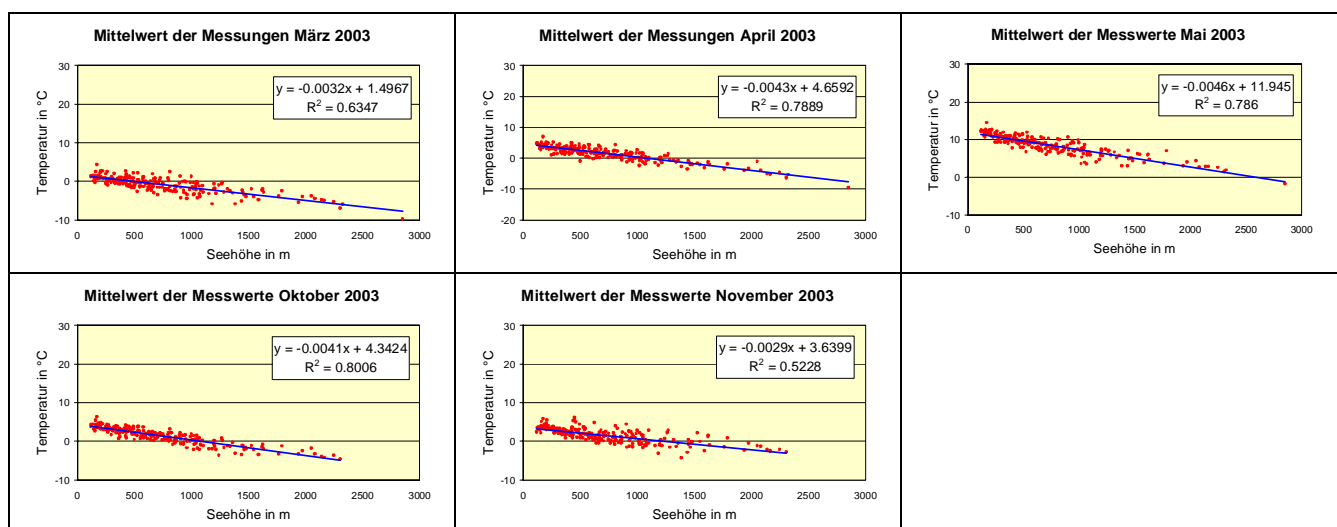


Abbildung 18: Korrelation von Minimumtemperatur (monatliches Mittel an den Stationen) und Seehöhe

Tabelle 3: Anzahl der Wachstumstage für den 1. Aufwuchs beim Ähren- und Rispschieben (Schnittreife bei Dau-erwiesen) und für die Folgeaufwüchse (BUCHGRABER, 2005a)

Seehöhe	1. Aufwuchs	Folgeaufwüchse
< 600 m	35	42
600 - 700 m	42	49
700 - 900 m	49	56
900 - 1100 m	56	63
> 1100 m	63	70

der Vegetationsperiode statt, da der Zuwachs in der späten Vegetationsphase abnimmt. In vielen Fällen wird nach dem letzten Schnitt die Grünlandfläche als Weide genutzt. Um begünstigte Lagen entsprechend zu berücksichtigen, wurde der Endtermin für Schnittnutzungen drei Wochen (21 Tage) vor Vegetationsende und damit variabel bestimmt.

Die Anzahl der möglichen Folgeaufwüchse ergibt sich dadurch, dass sie in der Periode zwischen erstem Schnitt und Ende der Schnittnutzung zur Gänze enthalten sind. Das Schema dieser Vorgehensweise ist in *Abbildung 19* grafisch dargestellt.

Wenn der letzte Folgeaufwuchs nicht mehr vollständig im Bewirtschaftungszeitraum Platz findet, wird für diese Fläche eine Weidenutzung bis gegen Ende der Vegetationsperiode angenommen. Die Anzahl der Schnitte definiert sich daher in erster Linie durch die Länge der Vegetationsdauer und den für eine bestimmte Höhenlage notwendigen Wachstumstagen. Damit wird in höheren Lagen bzw. in klimatisch benachteiligten Gebieten die Anzahl der Schnitte stark eingeschränkt und führt so zu einem Modell, das die realen Bedingungen gut wiedergibt. Allerdings muss bei der Interpretation dieses Modells berücksichtigt werden, dass sich die Be-

rechnung nur auf topographische und klimatische Parameter stützt und die Bewirtschaftungsweise (z.B. Düngung) nicht mit einbezogen wird.

Die Schnitttermine lassen sich durch entsprechende Rasteroperationen in einem ArcGIS VBA-Programm aus den Grenzen der Vegetationsperiode und den Wachstumstagen der einzelnen Aufwüchse ermitteln und werden in eigene Schnittraster abgespeichert. So wird in einem Raster der Termin für den 1. Schnitt dargestellt, im nächsten Raster jener für den 2. Schnitt (abzüglich jener Gebiete, in denen kein 2. Schnitt mehr möglich ist) usw.

Alle durchgeführten Operationen dienen letztlich der Ermittlung des Pflanzenfaktors. Bei Vegetationsbeginn bzw. nach einem Schnitt beginnt dieser Faktor mit 0.8 und nimmt linear bis zum voll entwickelten Bestand (Schnitt) bei einem Wert von 1,15 zu (FORMAYER und EITZINGER, 2005). Der Faktor ergibt sich durch den Term $0.35 / \text{Anzahl der Wachstumstage}$ und der Aufsummierung für alle Tage innerhalb eines Aufwuchses. Dabei entsteht für jeden Tag eine eigene Rasterdatei in einer Auflösung von 250 m, deren Zellen die unterschiedlichen Pflanzenfaktoren halten. Die Raster werden in einem VBA-Programm auf Grundlage der Vegetationsperiodengrenzen und Schnittklassen erstellt.

3.3.3.4 Berechnung der Wasserbilanz in unterschiedlichen Bodenschichten

Neben dem Niederschlag und der potentiellen Evapotranspiration sind die von MURER (2005) berechneten Bodenkennwerte der nutzbaren Feldkapazität als ein wichtiger Parameter zur Berechnung der Wasserbilanz verwendet worden.

Die nutzbare Feldkapazität wurde ausschließlich für mineralische Böden ermittelt. Außerdem bezieht sich die Ermittlung der Feldkapazität nicht auf Waldböden, keine Bewertung wurde für Moore sowie anmoorige Böden vorgenommen.

Das Ergebnis der ersten Berechnungsstufe besteht in einem Wert für den Bodenwassergehalt der oberen Bodenschicht (0 bis 10 cm) in Vol.%. Dazu wird auch die Änderung der Bodenwasserbilanz des aktuellen Tages im Vergleich zum Vortag mitberücksichtigt. Es entstehen damit für jeden Tag des Berechnungszeitraums Raster in einer Auflösung von 50 m. In dieser Stufe wird auch die Evaporation der Bodenoberfläche (Ei) abgespeichert, die in weiterer Folge zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration benötigt wird.

In der nächsten Stufe wird die Wasserbilanz für 0 bis 20 cm gerechnet. Hier wird zusätzlich zur Evaporation der ersten Stufe auch die Transpiration berücksichtigt. Durch die Einbeziehung des Vortages in die Berechnung des aktuellen Tages kann die Entwicklung des Bodenwassergehalts über den Berechnungszeitraum verfolgt und das Auftreten von Wasserüberschuss bzw. -defizit ermittelt werden. Auftretendes Wasserdefizit wird dann als Indikator für Trockenheit gewertet.

Da in dieser Stufe die Transpiration eine Rolle spielt, muss hier der Pflanzenfaktor eingeführt werden, der den Entwicklungsstand des Grünlandbestandes widerspiegelt. Der Wert für die Transpiration (Et20) dieser Bodenschicht findet wieder Eingang in die Berechnung der aktuellen Verdunstung.

Mit der letzten Stufe der Wasserbilanzermittlung für 20 bis 40 cm Bodentiefe ist die Modellierung der Bodenwasserbilanz abgeschlossen. Das Resultat aus dieser Berechnung ist der Bodenwassergehalt in Vol.% und die Transpiration (Et40) der unteren Bodenschicht.

Die technische Umsetzung aller Arbeitsschritte wurde mittels VBA-Programmierung in ArcGIS realisiert. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um eine Reihe hintereinander geschalteter lokaler Map-Algebra-Operationen, die im Programm sehr effizient ausgeführt werden können. Besonders wichtig bei der Pro-

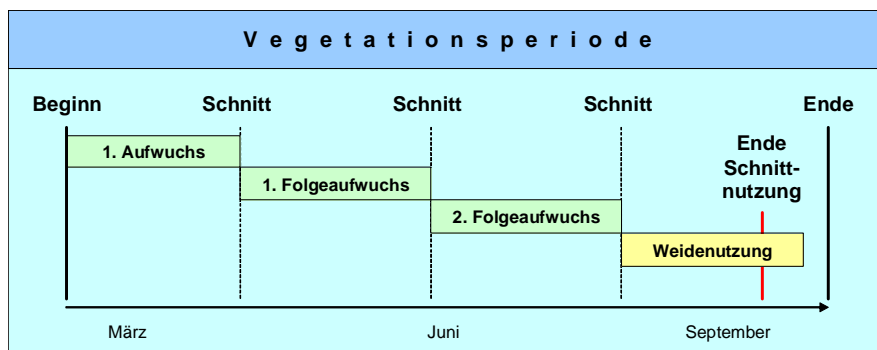


Abbildung 19: Schema eines Beispiels für Schnittnutzungen in der Vegetationsperiode

grammierung dieser Schritte ist die Kapselung der Berechnungsalgorithmen in Prozeduren und die Schaffung von exakt definierten Schnittstellen, um eine Wiederholbarkeit der Berechnung für andere Perioden möglichst einfach und benutzerfreundlich zu gestalten. In *Abbildung 20* wird am Beispiel der obersten Bodenschicht (0 bis 10 cm) der Ablauf der verschiedenen Berechnungen schematisch dargestellt.

3.3.4 Berechnung von Indikatoren für Trockenheit

Eine wichtige Größe zur Identifikation von Trockenheit stellt die aktuelle und die nettopotentielle Evapotranspiration (nPet) dar.

Die aktuelle Evapotranspiration ergibt sich aus der Summe von Evaporation der obersten Bodenschicht (0 bis 10 cm) und der Transpiration aus den Bodenschichten 0 bis 20 und 20 bis 40 cm. Das Ergebnis setzt sich aus den täglichen Berechnungen des Bodenwasserbilanzmodells zusammen. Somit entstehen für jeden Tag des Jahres Raster der aktuellen Evapotranspiration. Wird dieser Wert in Beziehung zur potentiellen Evapotranspiration gesetzt, kann daraus auf Trockenheit geschlossen werden.

Die Ergebnisse aus der Berechnung der aktuellen Evapotranspiration fließen indirekt als Parameter in die multiple Regressionsgleichung des Wachstums- und Ertragsmodells ein. Die Daten werden bis zu einem Auswertedatum akkumuliert, da sich die Auswirkung von Trockenheit auf den Pflanzenbestand immer auf einen Zeitraum bezieht und mit einer stichtagsbezogenen Berechnung nicht erkannt werden kann.

Die nettopotentielle Evapotranspiration wird aus der Differenz von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration gebildet, zeigt also den Unterschied zwischen der in den Boden gelangten Feuchtigkeit und der maximal stattfindenden Verdunstung an. Für den Niederschlagswert wird der effektive Niederschlag verwendet, d.h. vom gemessenen Niederschlag wird die Interzeption, die in diesem Modell variabel und vom Pflanzenfaktor abhängig modelliert wurde, abgezogen.

Auch dieser Wert kann nicht stichtagsbezogen als Trockenheit interpretiert

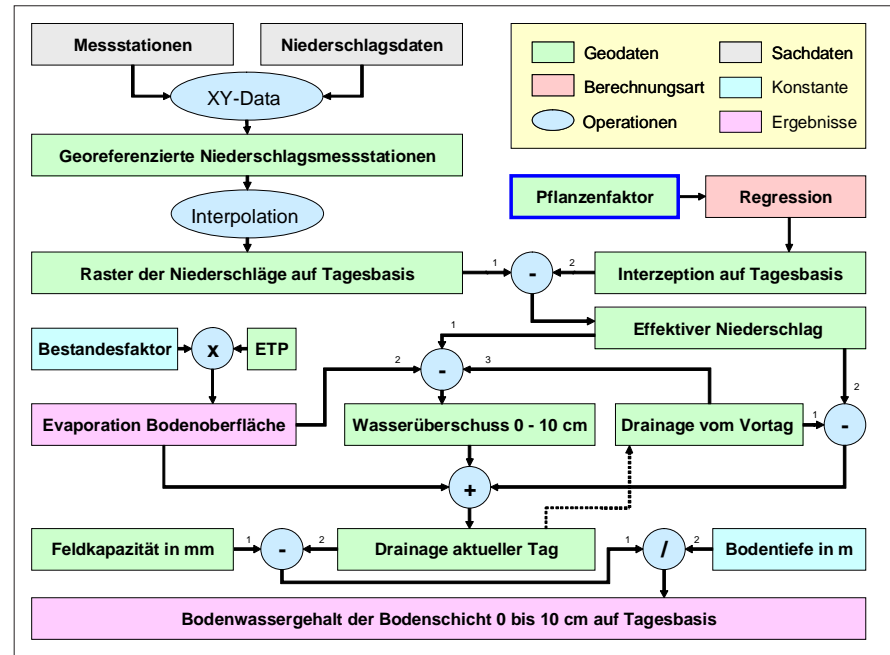


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Berechnung von Evaporation und Bodenwassergehalt für die Bodenschicht 0 bis 10 cm

werden. Es ist also die Bildung einer Zeitreihe notwendig. Um dies durchführen zu können, müssen bestimmte Punkte ausgewählt werden, denen die Ergebnisse der nPet-Berechnung eines jeden Tages zugeordnet sind. Es entsteht für einen bestimmten Punkt eine Kurve, die dann entsprechend analysiert werden kann. Wenn auf dieser Kurve ein lang anhaltender Abfall der nettopotentiellen Evapotranspiration feststellbar ist und sich die Werte in einem negativen Bereich befinden, kann von einer Trockenheit gesprochen werden, die sich auf den Pflanzenbestand schädlich auswirkt.

In der vorliegenden Arbeit wurde die nettopotentielle Verdunstung zwar für jeden Tag gerechnet, die Zeitreihenanalyse an ausgewählten Punkten jedoch nicht durchgeführt. Als Ergebnis dieser Indikatorberechnung wurde ein Raster erzeugt, der die minimale nettopotentielle Verdunstung einer jeden Rasterzelle über den Verlauf des Jahres 2003 hinweg beinhaltet. Aus dieser Berechnung werden jene Gebiete ersichtlich, in denen größere Trockenschäden aufgetreten sind.

Zur Feststellung von Trockenperioden können noch eine Reihe von Analysen über die in vorliegender Arbeit berechneten Ergebnisse durchgeführt werden. Grundsätzlich ist jedoch immer mit der Einbeziehung eines mehr oder weniger

langen Zeitraums zu operieren, um eine Aussage über die negativen Einflüsse von Trockenheit auf das Pflanzenwachstum machen zu können. Weitere interessante Ergebnisse gewinnt man aus dem Vergleich zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration. Auch die Relation von nutzbarer Feldkapazität und des aktuellen Bodenwassergehalts in den verschiedenen Bodenschichten als Hinweis für das Auftreten von Trockenstress stellt eine interessante Auswertungsvariante dar.

Die Berechnung der Bodenwasserbilanz sowie die Identifikation von Trockenperioden bezieht sich ganz konkret auf Grünlandflächen, die mit Hilfe des INVEKOS-Datenbestandes räumlich beschrieben werden können. Nachfolgender Abschnitt bezieht sich auf eine Modellrechnung zur Ermittlung der für die Untersuchungen in vorliegender Arbeit relevanten Flächen.

3.3.5 Georeferenzierung der Bewirtschaftung nach INVEKOS

Mit den Daten aus INVEKOS kann die Nutzung einzelner Flächen ermittelt werden. Dabei gibt es jedoch die Einschränkung, dass die kleinste Bewirtschaftungseinheit, der Schlag, nicht mit entsprechenden Geodaten verknüpft werden kann. Wenn es also um die Darstellung

von Bewirtschaftungsarten geht, ist man auf die Grundstücksgrenzen der Digitalen Katastralmappe (DKM) angewiesen. Ein Schlag entspricht jedoch nicht einem Grundstück der DKM. Zwischen Schlag und Grundstück befindet sich noch als weitere Ebene das Feldstück. Unter Feldstück versteht man eine eindeutig abgrenzbare Bewirtschaftungseinheit, die aus einem oder mehreren Schlägen bestehen kann. Das Feldstück hält sich jedoch auch nicht an Grundstücksgrenzen, sondern kann sich über mehrere Grundstücke ausbreiten.

In *Abbildung 21* wird dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Aus den INVEKOS-Daten kann der Anteil eines Feldstückes am Grundstück bestimmt werden. Es wird damit auf einem bestimmten Grundstück klar zwischen landwirtschaftlicher Nutzung lt. INVEKOS und anderer Nutzung unterschieden.

Wie dieser Grundstücksanteil am Feldstück jedoch genau genutzt wird, kann nicht nachvollzogen werden, da die Grenzen der Schläge nicht bekannt sind. Daher wird die prozentuelle Verteilung der Schläge auf einem Feldstück auch auf den Grundstücksanteil umgelegt. Die Ermittlung der Bewirtschaftung eines Grundstücksanteiles wird, wie in *Abbildung 21* unter Grundstücksnutzung dargestellt, durch Gewichtung der Feldstückfläche mit dem Prozentwert des Grundstücksanteiles am Feldstück, sowie innerhalb des Grundstücksanteiles durch Gewichtung aller auf dem Feldstück sich befindlichen Schlagnutzungen vorgenommen.

Am Beispiel in *Abbildung 21* würde dies bedeuten, dass alle drei Schläge in jedem Grundstücksanteil vertreten sind. Dies ist jedoch nicht korrekt, da der rechte Schlag

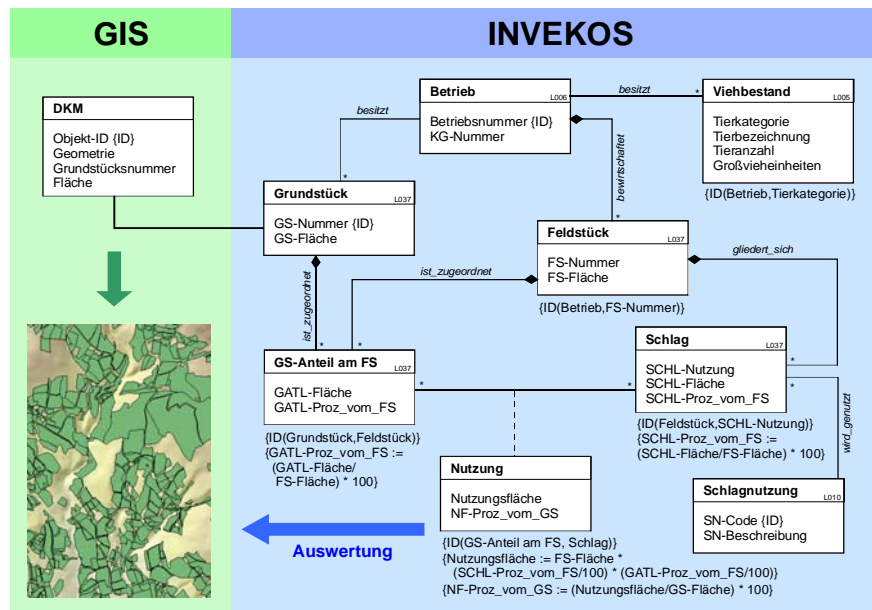


Abbildung 22: UML-Diagramm zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Daten im INVEKOS und deren Aufbereitung für eine Auswertung im GIS

im linken Grundstück gar nicht vorkommt, durch die aliquote Zuteilung jedoch dort mit einem Wert von $Feldstückfläche \times 30\% \times 25\%$ berücksichtigt wird. Die Aufteilung des gesamten Feldstückes in Schläge spiegelt sich also in jedem Grundstücksanteil wider. Für eine Klassifizierung des Grundstückes im GIS muss die mehrheitliche Nutzungsart herangezogen werden, bei Auswertungen ohne räumliche Analysen können die tatsächlichen Flächenausmaße verwendet werden.

Diese Problematik besteht nur noch so lange, bis Geodaten auf Schlagebene verfügbar sind. Mit der Einführung des „INVEKOS-GIS“ im Jahr 2005 werden von der Agrarmarkt Austria (AMA) neben den Sachdaten auch Geodaten mit den Schlaggrenzen über eine WebGIS-Lösung direkt bei den Landwirten erhoben.

Abbildung 22 zeigt in UML-Notation die beschriebenen Zusammenhänge, vor allem jene von Grundstück, Feldstück und Schlag. Der Viehbestand eines Betriebes kann in Zusammenhang mit der bewirtschafteten Gesamtfläche Auskunft über die Bewirtschaftungsintensität geben, die bei der Modellierung des Pflanzenwachstums ebenfalls miteinbezogen wird.

Bei der Verwendung dieser Daten im Wachstums- und Ertragsmodell wird die berechenbare Fläche auf jene der durch die Verknüpfung mit der DKM zur Verfügung stehenden Grundstücke reduziert.

In der Erstellung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells wurde darauf geachtet, flächendeckende bzw. flächenmäßig maximal mögliche (die Feldkapazität war beispielsweise nicht flächendeckend verfügbar) Berechnungen durchzuführen, um für zukünftige Erweiterungen der Geodaten für Landnutzung vorbereitet zu sein. Mit der Einführung des „INVEKOS-GIS“ wird ab 2005 eine Erhebung sowohl der Sachdaten als auch der Geodaten EU-weit durchgeführt. Die Schlagnutzungen sind damit in Zukunft geometrisch abgegrenzt verfügbar und in einem GIS verwendbar. Strahlung, potentielle Evapotranspiration, Niederschlag und Pflanzenfaktor sind für ganz Österreich flächendeckend verfügbar und können auch für andere Projekte und Fragestellungen genutzt werden.

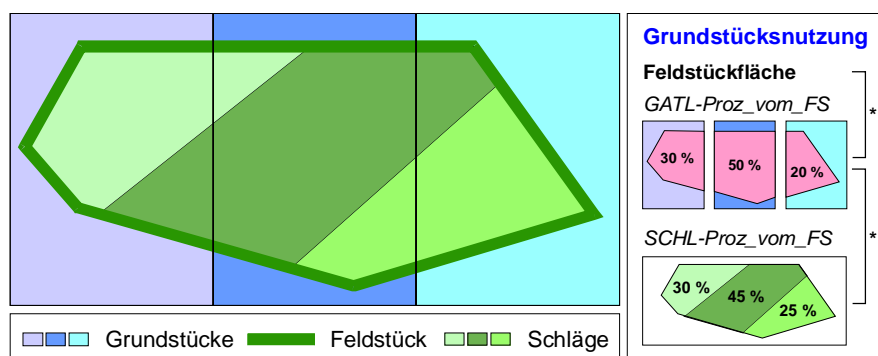


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Zusammenhangs von Grundstück, Feldstück und Schlag

Die angewandten Methoden beziehen sich im Wesentlichen auf den Zugriff und die Berechnung von Attributdaten in Shape-Dateien, auf zahlreiche Rasteroperationen, auf Anwendungen der räumlichen Statistik, auf Einbindung anderer Applikationen in ArcGIS-Prozessen und auf die Gestaltung von thematischen Karten unter Berücksichtigung kartographischer Grundsätze.

Sämtliche Zwischen- und Endergebnisse wurden mittels VBA-Programmierung in ArcGIS erstellt und gewährleisten eine einfache und leicht wiederholbare Bearbeitung der einzelnen Problemstellungen. Um eine möglichst effiziente Feineinstellung von Parametern für zukünftige Verbesserungen zu unterstützen, wurden klare und gut dokumentierte Schnittstellen geschaffen.

Für die Thematik der „Trockenschäden im Grünland“ werden die in dieser Arbeit zusammengestellten Daten im statistischen Wachstums- und Ertragsmodell der Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie, weiterverarbeitet und resultieren in einer Abschätzung des Ertrages und in weiterer Folge in einer Bestimmung der trockenheitsbedingten Ertragsminderung.

3.3.5 Wachstums- und Ertragsmodellierung

Die Erstellung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells ist die wichtigste Datengrundlage für die Modellierung von Wachstum und Ertrag. Als Kooperationspartner im Projekt „Trockenschäden im Grünland“ hat das Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur eine multiple Regressionsgleichung entwickelt, die als Ergebnis den Ertrag auf Grünlandflächen ausgibt.

Dabei geht man von der Annahme aus, dass das Wachstum grundsätzlich von Temperatur, Globalstrahlung und Wasserverfügbarkeit beeinflusst wird. Sobald ein Wasserdefizit eintritt und die Pflanze ihre biologischen Prozesse nur mehr eingeschränkt betreiben kann – es tritt Wasserstress auf – entstehen trockenheitsbedingte Ertragsrückgänge. Das Modell versucht anhand von meteorologischen Messwerten auf Tagesbasis, der Bodeneigenschaften und der Bewirtschaftungsintensität diese Mindererträge zu quantifizieren.

Die Berechnung erfolgt in verschiedenen Stufen und verwendet als Inputparameter die bisher erarbeiteten Ergebnisse.

3.3.5.1 Bestimmung von Wasserstress auf Tagesbasis

Der langfristige Wasserstress (W_L) wird durch das Verhältnis von aktueller (ETA) und potentieller Evapotranspiration (ETP) berechnet. Als Grenzwert für das Auftreten von langfristigem Wasserstress (t_{CL}) wird auf Grund empirischer Untersuchungen 2.0 angenommen. ETA und ETP werden vom Beginn der Vegetationsperiode akkumuliert.

$$W_L = t_{CL} \frac{ETA}{ETP} \quad (1)$$

Der kurzfristige Wasserstress (W_S) wird wie W_L berechnet. Als Grenzwert für das Auftreten von kurzfristigem Wasserstress (t_{CS}) wird wiederum 2.0 angesetzt. ETA und ETP sind ebenfalls akkumulierte Werte, jedoch werden hier nur die letzten sechs Tage vom aktuellen Tag der Berechnung verwendet.

$$W_S = t_{CS} \frac{ETA}{ETP} \quad (2)$$

Die Wasserverfügbarkeit eines beliebigen Tages hängt sowohl vom lang- als auch vom kurzfristigen Wasserstress ab. Der Wasserverfügbarkeitsfaktor (W_A) ist also eine Funktion von W_L und W_S . Die in der Gleichung (3) verwendeten empirischen Koeffizienten C und M bringen die relative Bedeutung des Wasserverfügbarkeitsfaktors für die aktuelle Wasserverfügbarkeit zum Ausdruck.

Die Koeffizienten wurden unter Berücksichtigung der Ertragserhebungen an den Standorten der Grünlandexaktversuche bestimmt. Für C wird der Wert 0.55 und für M der Wert 3.0 angesetzt.

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

Technische Umsetzung

Wasserstress und Wasserverfügbarkeitsfaktor werden mittels Rasteroperationen auf Tagesbasis berechnet. Für die Akkumulation bei der Berechnung von W_L mit Vegetationsbeginn werden temporäre Summenraster mitgeführt und für die

täglichen Ergebnisse fortlaufend verwendet.

Bei der Berechnung von W_S fließen die Summen von ETA und ETP der zurückliegenden sechs Tage ebenfalls als Temperaturräster in das Ergebnis ein. Die Auflösung der Raster beträgt bei allen Arbeitsschritten 50 m.

3.3.5.2 Berechnung des Wachstumsfaktors

Der Wasserverfügbarkeitsfaktor (W_A) zeigt die Wasserbilanz eines bestimmten Tages. Die Beziehung zwischen Wasserdefizit und Bestandesentwicklung ist nicht linear und wird durch die nachfolgende Gleichung ausgedrückt.

Der Wachstumsfaktor (g_s) wird auf Tagesbasis und mit Berücksichtigung des aktuellen Wasserverfügbarkeitsfaktors (W_A) ermittelt. Die empirischen Modellkoeffizienten α , β und γ werden mit -2.9, -2.1 und 8.0 angesetzt.

$$g_s = e^{\alpha * e^{\beta * W_A} \gamma} \quad (4)$$

Technische Umsetzung

Die Gleichung (4) kann vollständig als Funktion in das Raster-Calculator-Script übernommen werden. Für die Eulersche Zahl e steht die Funktion EXP() zur Verfügung, für Potenzen wird POW() eingesetzt.

Die Variablen α , β , γ und W_A werden als Konstante bzw. als Rasterdatensatz in die Berechnung integriert. Die Ergebnisse stehen auf Tagesbasis in einer Auflösung von 50 m zur Verfügung.

3.3.5.3 Schnittspezifische effektive Temperatur und Globalstrahlung

Für jeden Schnitt wird die tägliche Mitteltemperatur (T_{AVG}) sowie die tägliche Globalstrahlung (R_G) aufsummiert. Mit der Berücksichtigung des Wachstumsfaktors (g_s) wird eine so genannte „effektive“ Akkumulation definiert.

$$T_e = \int_{t_0}^{t_n} T_{AVG} g_s dt \quad (5)$$

$$G_e = \int_{t_0}^{t_n} R_G g_s dt \quad (6)$$

Im Falle eines ausgeglichenen Bodenwasserhaushalts sind T_e und G_e nur von der Akkumulation der täglichen Mittel-

temperatur bzw. der Globalstrahlung abhängig. Beide Parameter fließen in die multiple Regression zur Bestimmung des Ertrages ein.

Technische Umsetzung

Zur Bestimmung der täglichen, flächendeckenden Temperatur wurde die gleiche Vorgehensweise wie bei der Interpolation der potentiellen Evapotranspiration gewählt. Zuerst werden für jeden Monat lineare Regressionen über mittlere Temperatur und Seehöhe erstellt. Die Korrelation ist vor allem in den Sommermonaten äußerst gut.

In *Abbildung 23* werden die monatlichen Ergebnisse der Regressionsrechnung für die Mittelwerte an den Stationen dargestellt.

An den Messstationen werden die Residuen zwischen gemessener und gerechneter Temperatur bestimmt, die anschließend mittels Kriging räumlich interpoliert werden. Damit entstehen die Residuenraster auf Tagesbasis zu denen noch die monatlichen Höhenraster addiert werden.

Auf diese Weise werden für jeden Tag des Jahres Temperaturnuster erstellt, welche für die Akkumulation der effektiven Temperatur in Gleichung (5) herangezogen werden können. Die Auflösung der Raster beträgt wie bei allen Interpolationen von meteorologischen Daten 250 m. Die Programmierung erfolgte in VBA mit dem modifizierten Code der Interpolation der Minimumstemperatur für die Berechnung der Vegetationsperiode. Die Akkumulation wird über die Wachstumstage des zu untersuchenden Schnittes vorgenommen und auch hier wird die Summe mit Hilfe eines temporären Rasterdatensatzes mitgeführt.

Als zweiter Wert für die Ertragsermittlung ist die effektive Globalstrahlung zu rechnen. Dazu müssen die gemessenen Globalstrahlungswerte an den Messstationen der ZAMG mittels geostatistischer Methoden interpoliert und so zu flächendeckenden Rasterdaten erweitert werden.

Damit in die Interpolation der Messwerte auch die topographische Ausprägung des Beobachtungsraumes einbezogen wird, müssen die Solar-Analyst-Ergebnisse mit den Messwerten auf geeignete Weise kombiniert werden. Die Global-

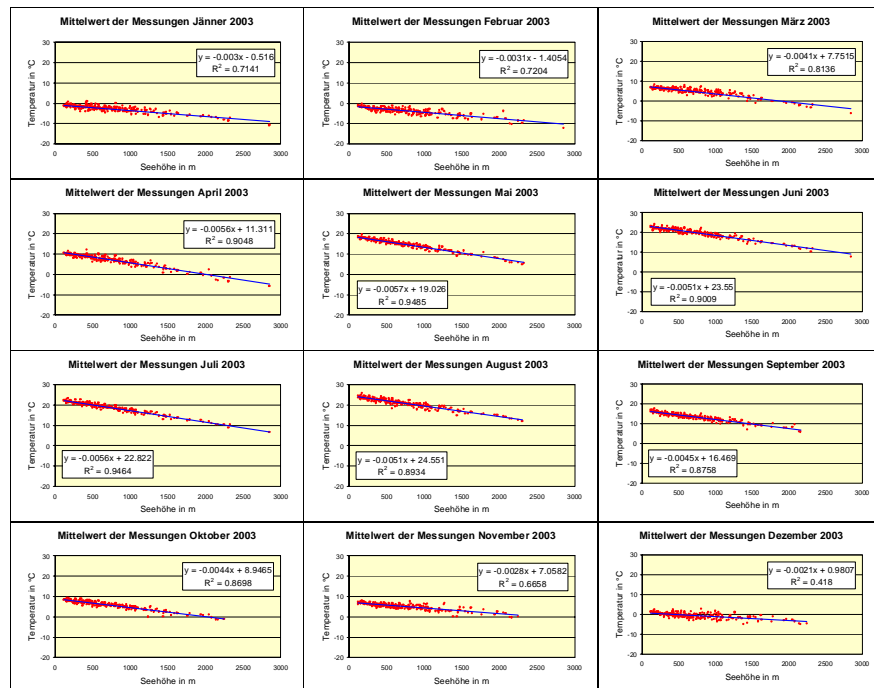


Abbildung 23: Korrelation von mittlerer Temperatur (monatliches Mittel an den Stationen) und Seehöhe

strahlung wird in den Solar-Analyst-Ergebnissen zwar in Abhängigkeit von Seehöhe, Hangneigung und Exposition erfasst, allerdings ohne Berücksichtigung der aktuellen Wetterbedingungen. Daher müssen gemessene und berechnete Werte miteinander in Relation gesetzt werden.

An den Stationen wird der errechnete Wert des Solar-Analyst-Rasters ermittelt und einem eigenen Attributfeld der Stationsdatentabelle beigelegt. Da alle Berechnungen auf Tagesbasis erfolgen, muss dieses Feld für jeden Tag aktualisiert werden. Anschließend wird der Quotient aus gemessener und berechneter Strahlung an den Stationen gebildet. Diese Werte werden mittels Kriging-Interpolation in die Fläche gerechnet. Durch die Multiplikation des interpolierten Rasters mit dem flächendeckenden Solar-Analyst-Raster erhält man letztlich ein um die aktuelle Wettersituation korrigiertes Globalstrahlungsergebnis auf Tagesbasis. Die Ausgangsdaten müssen einer meteorologisch fachgerechten Qualitätsüberprüfung unterzogen werden, damit eventuelle Ausreißerwerte zu keinen falschen Ergebnissen führen.

In einem VBA-Programm wird das „Abgreifen“ der Werte aus dem Solar-Analyst-Raster an den Stationspunkten sowie deren Zuweisung zur Attributta-

belle der Stationen realisiert und der Quotient mit den dort gespeicherten Messwerten gebildet. Die Interpolationsmethode „Kriging“ wird entsprechend parametrisiert und das Interpolationsergebnis mit dem Solar-Analyst-Raster des jeweiligen Tages multipliziert. Als Ergebnis entstehen für jeden Tag des Jahres die näherungsweise berichtigten Globalstrahlungswerte in einer Auflösung von 50 m.

Die Akkumulation von Temperatur und Globalstrahlung über die Wachstumsperiode des zu untersuchenden Schnittes wird in ähnlicher Weise wie die Berechnung des Pflanzenfaktors realisiert. Der Beginn und das Ende einer Aufwuchsphase werden ermittelt und nur auf jene Gebiete angewendet, in denen der entsprechende Schnitt auch entstehen kann.

Davon wird für jeden Tag der Wachstumsphase ein Binärraster erzeugt, der angibt, ob Wachstum stattfindet oder nicht und somit als Wachstumstag des zu untersuchenden Aufwuchses gilt.

Die Ergebnisse aus den Berechnungen von Temperatur und Globalstrahlung werden tageweise mit diesen Wachstumstagesidentifikationsrastern kombiniert, über die Dauer des Aufwuchses akkumuliert und ergeben somit effektive Temperatur und Globalstrahlung.

3.3.5.4 Bestimmung des Grünlandertrages

Der Ertrag auf den Grünlandflächen wird unter Einbeziehung sämtlicher Berechnungen in Form einer multiplen Regression (7) ermittelt. Die GIS-Implementierung in dieser Arbeit basiert auf einer vereinfachten Gleichung, welche noch keine Differenzierung von Berggebiet und Flachland beinhaltet. Die Methodik bleibt jedoch auch bei komplexeren Modellen nahezu gleich. Als unabhängige Variablen werden die effektive Temperatur (T_e), die effektive Globalstrahlung (G_e), die Anzahl der Wachstumstage eines bestimmten Aufwuchses, die Bewirtschaftung hinsichtlich Düngung (Stickstoffdüngung) und die aktuelle Zahl des Aufwuchses berücksichtigt. Die abhängige Variable beschreibt den Ertrag und stellt somit das Ergebnis des Modells dar.

Für die Kalibrierung wurden in diesem Modell noch nicht alle Daten aus den Grünlandexaktversuchen verwendet. In einem weiteren Schritt wird die GIS-Implementierung jedoch dem Modell mit mehreren untersuchten Standorten angepasst.

Die in diesem Abschnitt enthaltenen Erklärungen sind natürlich für das Verständnis des Modells völlig unzurei-

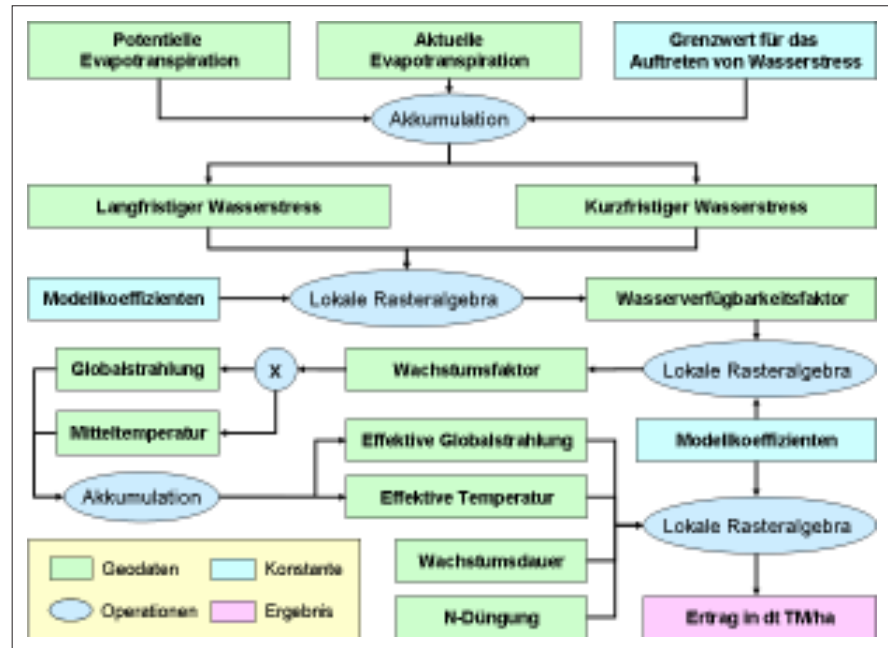


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Berechnung des Ertrages auf Grünlandflächen

chend. Der Zweck dieser Arbeit besteht in erster Linie darin, die Implementierung der Modellergebnisse im GIS zu realisieren. Eine Beschreibung der angewandten wissenschaftlichen Methoden der Wachstums- und Ertragsmodellierung würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit bei weitem sprengen. Die Gleichungen sind angegeben, damit der Zusammenhang zwischen Modell und

den in ArcGIS programmierten Funktionen hergestellt werden kann. Die Umsetzung in VBA wurde mit einer Reihe von lokalen Map-Algebra-Operationen vorgenommen. Wie in früheren Arbeitsschritten war auch hier die Akkumulation über mehrere Tage die wichtigste Aufgabe. Die große Herausforderung der Berechnung des Ertrages bestand darin, die unterschiedlichen zeitabhängigen Ergebnisse in einem Raster zu vereinen, sodass eine Karte entsteht, die für einen bestimmten Schnitt Auskunft über die räumlich verteilte Ertragssituation in Österreich gibt.

Eine schematische Übersicht der notwendigen Rechenschritte zeigt *Abbildung 24*.

Für ein intensives Studium des Wachstums- und Ertragsmodells sei auf die Publikation von TRNKA et al. (2005) verwiesen. Hier wird jede in dieser Arbeit verwendete Formel ausführlich erklärt und auf die Zusammenhänge zwischen Ertrag und Trockenheit eingegangen.

Ertrag in dt TM/ha =

$$1.1542 - 0.0025 * N^2 - 0.0094 * D^2 + 0.4683 * cut^2 + 0.0065 * N * D - 0.0269 * N * T_e + 0.3043 * N * G_e - 0.0778 * D * cut + 0.2398 * T_e * cut + 0.0132 * D * T_e + 0.8454 * D - 4.3586 * cut + 0.1852 * N \quad (7)$$

TM Trockenmasse

N Stickstoffdüngung in kg/ha

D Wachstumstage für einen Schnitt (vorhergehender Schnitt oder Vegetationsbeginn bis zum Schnitt)

cut Anzahl des Schnittes

T_e Akkumulierte effektive Mitteltemperatur in °C vom vorhergehenden Schnitt oder Vegetationsbeginn bis zum Schnitt (Berücksichtigung mit dem Faktor 1/100)

G_e Akkumulierte effektive Globalstrahlung in GJ/m² vom vorhergehenden Schnitt oder Vegetationsbeginn bis zum Schnitt

4. Ergebnisse

Die Erstellung von Geodaten wurde ausschließlich mit Hilfe von Programmen in ArcGIS umgesetzt. Für jeden Teilbereich liegen diese Programme in einem eigenen ArcGIS-Projekt (MXD-Datei) vor. Die ArcGIS-Projekte sind voneinander unabhängig konzipiert und können für zukünftige Problemstellungen im jeweiligen Teilbereich getrennt eingesetzt werden. Diese Vorgangsweise führt zwar zu redundanten Codesequenzen, wurde aus Flexibilitätsgründen dennoch auf diese Weise realisiert. Die in weiterer Folge notwendige Verfeinerung der Modelle kann damit in Teilbereiche zerlegt werden und unabhängig vom Gesamtgebilde erfolgen.

Eine große Herausforderung war die Bewältigung riesiger Datenmengen. Ausgehend von einem Basisdatenbestand, der hinsichtlich der Quantität hauptsächlich aus den Ergebnistrastern der Solar-Analyst-Berechnung resultiert, wurden mehrere hundert Gigabyte Geodaten generiert. Der Grund für die explosionsartige Vermehrung dieser Daten liegt darin, dass viele Zwischenergebnisse flächendeckend und auf Tagesbasis in den weiteren Berechnungsmodulen benötigt werden. Die Auflösung der Raster beträgt dabei in den meisten Fällen 50 m, für die flächenhafte Darstellung meteorologischer Daten wurde eine Rasterweite von 250 m verwendet.

Die angewandte Methodik für die einzelnen Module wird im Kapitel „Material und Methoden“ ausführlich dargestellt. Als Ergebnisse dieser Analysen können nur ausgewählte Beispiele aus den vielen auf Tagesbasis vorliegenden Rasterdaten vorgestellt werden.

4.1 Globalstrahlungsberechnung

Die Globalstrahlung wird mit der Arc-View-Extension Solar Analyst 1.0 berechnet. Als Beispiel werden in *Abbildung 25* und *Abbildung 26* zwei Raster dargestellt, die sich im Wesentlichen durch den Wertebereich unterscheiden. Im Sommer treten in höheren Lagen besonders hohe Werte auf, im Spätherbst treten die südlich exponierten Flächen deutlicher hervor. Um den Unterschied zwischen dem Juni- und November-Ergebnis anschaulicher darzustellen, wurde in *Abbildung 27* der Ausschnitt

„Enns- und Paltental in der Obersteiermark“ vergrößert. Im Juni-Raster ist hier deutlich die Zunahme der Globalstrahlung in den höheren Lagen zu erkennen. Eine scharfe Trennung zwischen nord- und südexponierten Flächen ist im Gegensatz zum November-Raster nicht so extrem ausgeprägt. Die ebenen Talflächen weisen im Juni ein hohes Wertenniveau auf.

Die täglichen Raster werden mit dem dazugehörigen Tageswert aus der Berechnung für Großenzersdorf normiert. Am 11. Juni 2003 beträgt dieser Wert 30.43 MJ/m^2 , am 13. November 2003 7.07 MJ/m^2 . Aus der Normierung mit diesen Werten ergeben sich Globalstrahlungsfaktorraster in den Wertebereichen 0.54 bis 1.279 für den 11. Juni 2003 und 0.20 bis 2.705 für den 13. November 2003. Der Faktor drückt die Abhängigkeit der

Globalstrahlung von der Topographie aus. Auch an Hand dieser Werte ist erkennbar, dass die deutlichen Unterschiede zwischen Nord- und Südexposition im November aus dem stärkeren Einfluss der Topographie auf die Strahlungswerte abzuleiten sind.

In der Betrachtung der Ergebnisse sei darauf hingewiesen, dass es sich hier um ein Rechenmodell handelt und der Einfluss von meteorologischen Parametern unberücksichtigt bleibt. Bei den Ergebnissen muss man davon ausgehen, dass für die Berechnung immer ein wolkenloser Himmel vorausgesetzt wurde, was natürlich keineswegs der Fall ist. Es ist daher notwendig, die gemessene Globalstrahlung an den ZAMG-Messstationen mit diesen Modellergebnissen zu kombinieren, um damit eine der Realität besser angenäherte Lösung zu erreichen.

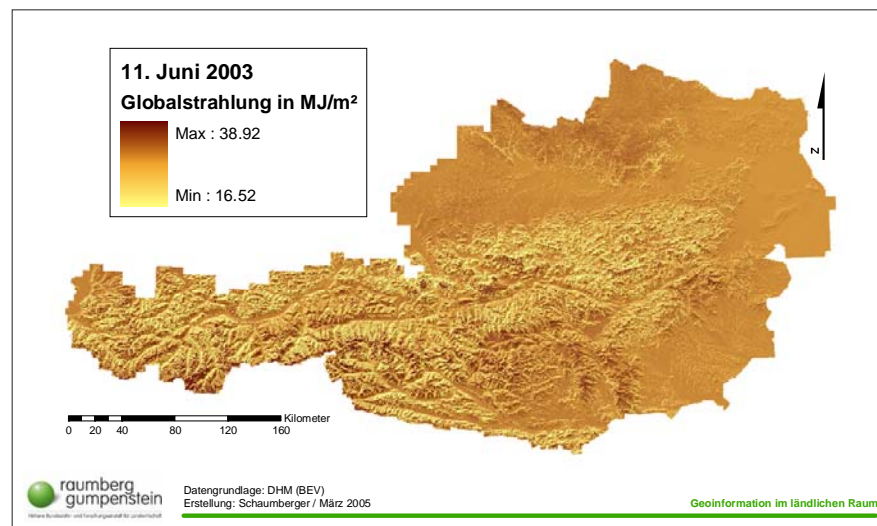


Abbildung 25: Globalstrahlungssumme am 11. Juni 2003 in MJ/m^2

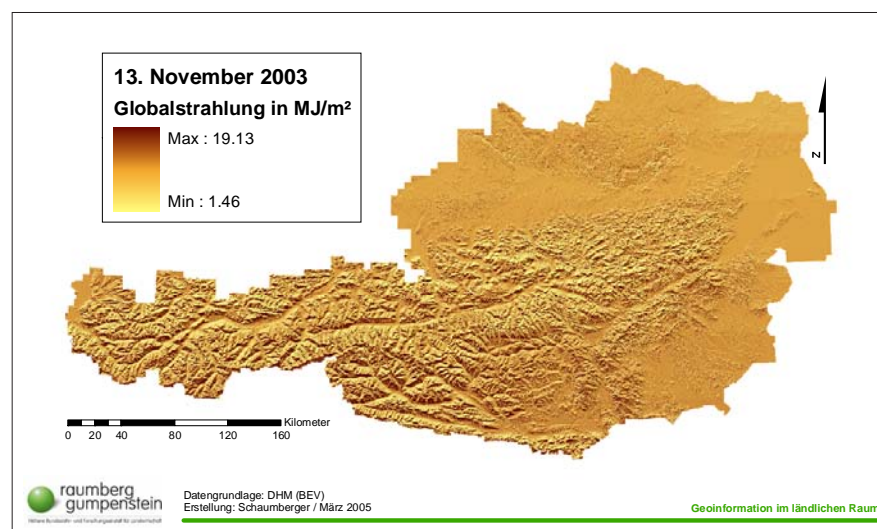


Abbildung 26: Globalstrahlungssumme am 13. November 2003 in MJ/m^2

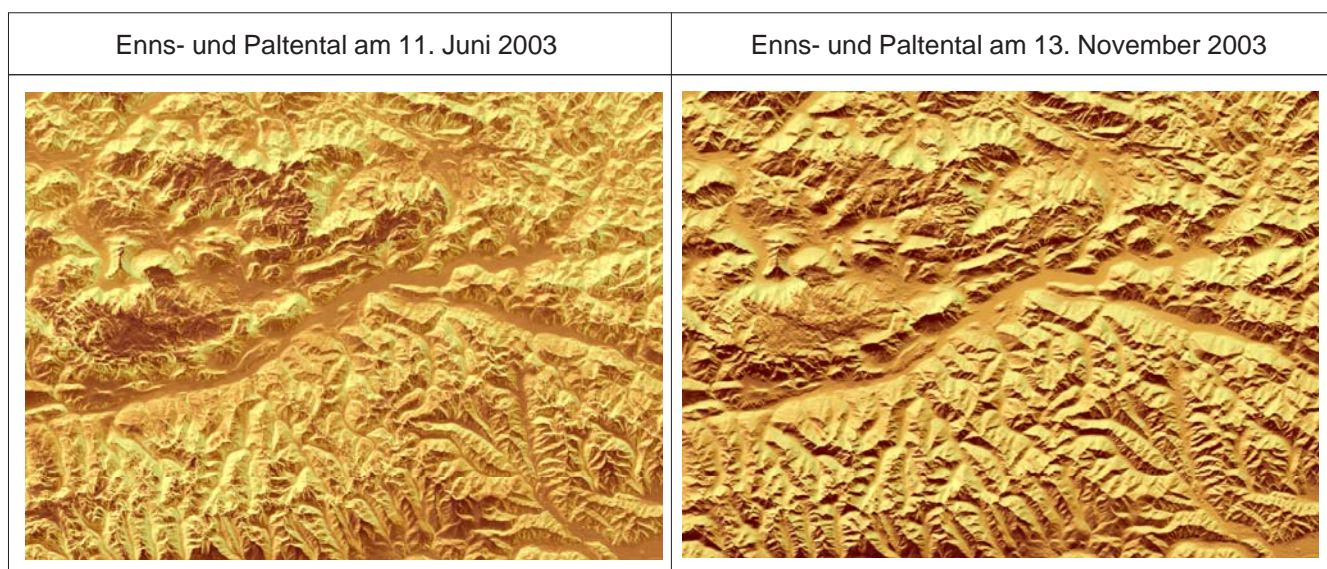


Abbildung 27: Vergleich der Strahlungssummenverteilung im Detailausschnitt

4.2. Potentielle Evapotranspiration über Gras

Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration besteht aus einer Kombination zahlreicher Operationen unter Einbindung der meteorologischen Messdaten, des DHM und des im vorhergehenden Schritt ermittelten Globalstrahlungsfaktors. Die Messdaten der ZAMG werden den georeferenzierten Stationen zugeordnet und bilden den Ausgangspunkt für die flächendeckende Berechnung meteorologischer Parameter. An den Stationen werden Evapotranspiration (ETP) und Sättigungsdefizit (VPD) berechnet. Für alle Stationen, an denen die ETP nicht ermittelt werden kann, wird mittels polynomischer Regressionsrechnung 2. Grades aus dem VPD auf die ETP geschlossen. Weiters wird eine lineare Regressionsgleichung für die Korrelation von Seehöhe und ETP über alle Werte eines Monats bestimmt. Diese Gleichung wird auf das DHM, dessen Z-Werte als unabhängige Variable eingesetzt werden, angebracht. Es entstehen ETP-Höhenraster auf Monatsbasis, die den höhenabhängigen Anteil der ETP enthalten.

An den Messstationen werden die Residuen zwischen Messwerten und den aus der Regression ermittelten Werten berechnet und anschließend auf Tagesbasis in die Fläche interpoliert.

Die täglichen Interpolationsraster werden zum ETP-Höhenraster des jeweiligen Monats addiert und dieses Ergebnis mit dem Globalstrahlungsfaktor multi-

pliziert. Daraus entstehen flächendeckende Raster der potentiellen Evapotranspiration auf Tagesbasis in einer Auflösung von 50 m.

In *Abbildung 28* wird die potentielle Evapotranspiration am Beispiel des 11. Juni 2003 dargestellt. An diesem Tag herrschte im Hochalpenraum eine Wetterlage, welche sich auf die Evapotranspiration negativ auswirkte (Ursache können z.B. niedrigere Temperaturen oder Wolkenbedeckung sein), im Osten hingegen erreichen die Werte ein für den Sommer charakteristisches Maximum um die 7 mm, was auf einen schönen, wolkenlosen Sommertag schließen lässt. In den Alpentälern sind die Werte im mittleren Bereich zu finden. Der Zusammenhang

zwischen Seehöhe und Evapotranspiration ist im Sommer sehr gut ausgeprägt und kann aus der Beispielabbildung gut abgelesen werden.

Die Raster der potentiellen Evapotranspiration stellen Zwischenergebnisse dar und werden in der weiteren Berechnung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells als Inputparameter verwendet. Betrachtet man mehrere Tagesraster der potentiellen Evapotranspiration hintereinander, kann der Verlauf der aufgetretenen Wetterverhältnisse nachvollzogen werden. *Abbildung 29* zeigt 10 Tage im Frühjahr 2003 (23. April bis 2. Mai). Die Variabilität in der Verteilung und im Wertebereich macht die Notwendigkeit einer Berechnung auf Tagesbasis deutlich.

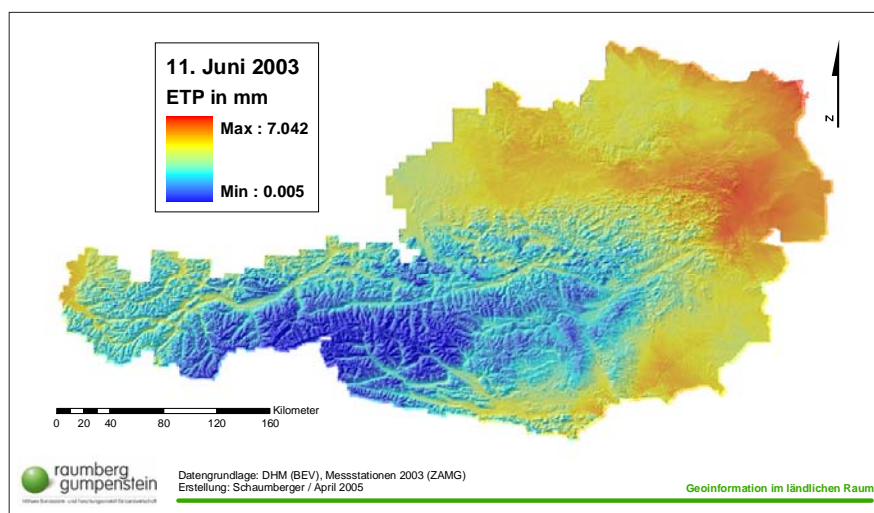


Abbildung 28: Potentielle Evapotranspiration am 11. Juni 2003 in mm

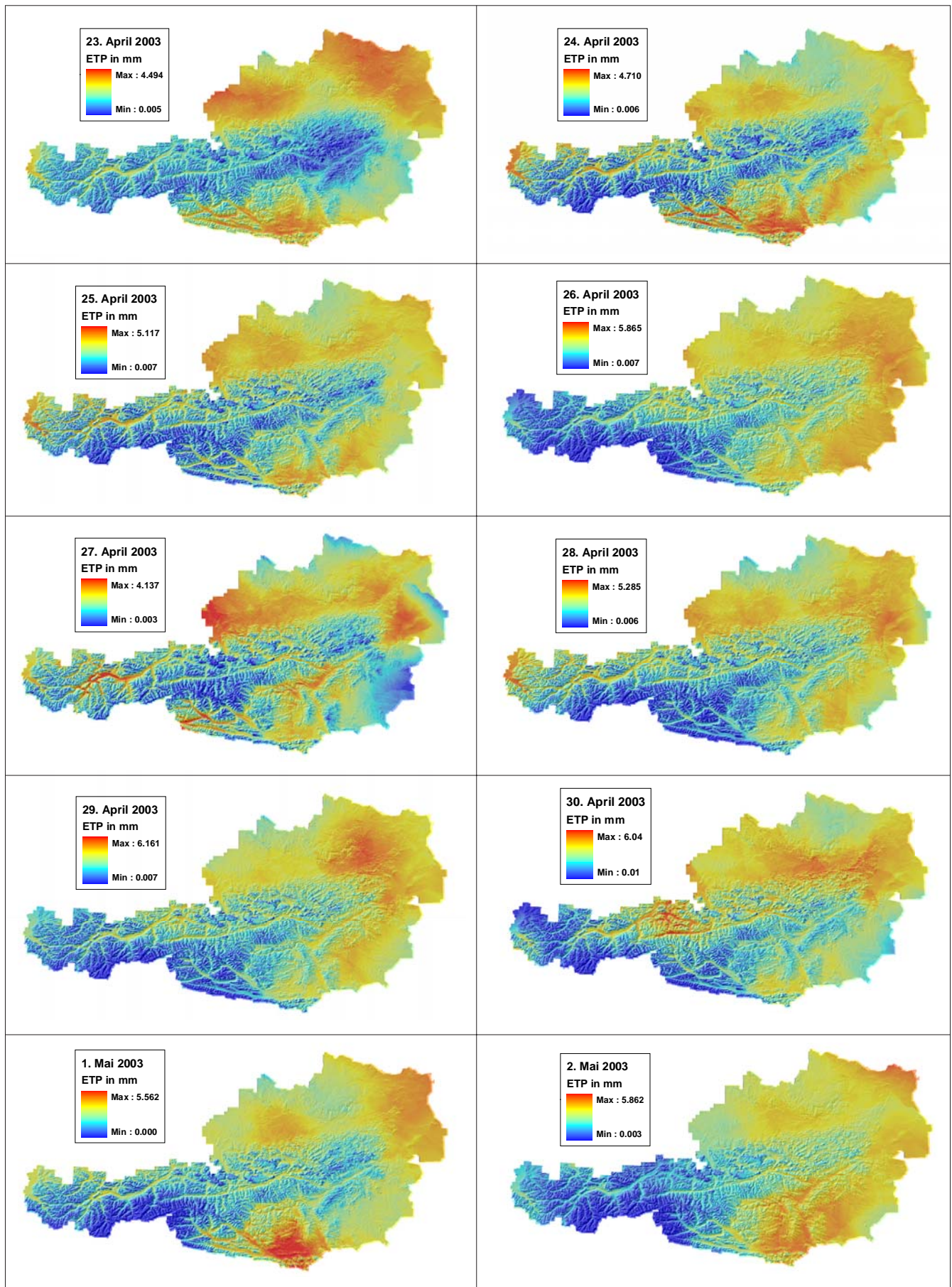


Abbildung 29: Potentielle Evapotranspiration im Verlauf von 10 Tagen (23. April bis 2. Mai 2003) in mm

4.3. FAO-Bodenwasserbilanzmodell

Bei der Bilanzierung des für Pflanzen verfügbaren Wassers im Boden stehen sich Niederschlag auf der einen Seite und Evapotranspiration auf der anderen Seite gegenüber.

Abbildung 30 zeigt das Schema des Zusammenwirkens der für die Bodenwasserbilanzierung maßgeblichen Parameter. Im FAO-Bodenwasserbilanzmodell werden drei Bodenschichten bis in eine Tiefe von 40 cm berücksichtigt.

4.3.1. Evaporation und Bodenwassergehalt der Bodenschicht 0 bis 10 cm

In der Abbildung 31 wird der Bodenwassergehalt in 0 bis 10 cm am 30. April 2003 dargestellt. Ein weiteres Ergebnis dieses Berechnungsschrittes stellt die Evaporation an der Bodenoberfläche dar. Abbildung 32 zeigt das Ergebnis der Evaporation am 30. April 2003.

Für die Berechnung des Bodenwassergehalts ist der Niederschlag eine der wichtigsten Eingangsparameter.

Das Jahr 2003 war nicht nur durch einen außergewöhnlich heißen und trockenen Sommer geprägt, auch im Frühjahr kam es bereits in vielen Teilen Österreichs zu extremer Trockenheit. Im Nordosten lagen die monatlichen Niederschlagssummen im April meist unter 20 mm. In Abbildung 31 kommt dieser Umstand durch die niedrigen Bodenwassergehalte am 30. April deutlich zum Ausdruck.

4.3.2. Niederschlag im Jahr 2003

Die Wasserzufuhr für das Pflanzenwachstum wird durch die Niederschlagsmenge geregelt. Eine Interpolation von Niederschlagsmessdaten ist eine schwierige und fehlerbehaftete Operation, die jedoch durch ein möglichst dichtes Netz an Messstellen verbessert werden kann. Mit über 800 Stationen, die im Rahmen dieser Arbeit in die Berechnung einbezogen wurden, ist eine gute Basis für eine annähernd korrekte Interpolation gegeben. Der Niederschlag weist bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums, wie z.B. eines ganzen Jahres, eine Höhenabhängigkeit auf, die auch bei diesen Berechnungen festgestellt werden konnte. Der Zusammenhang zwischen Seehöhe und Niederschlag wird durch

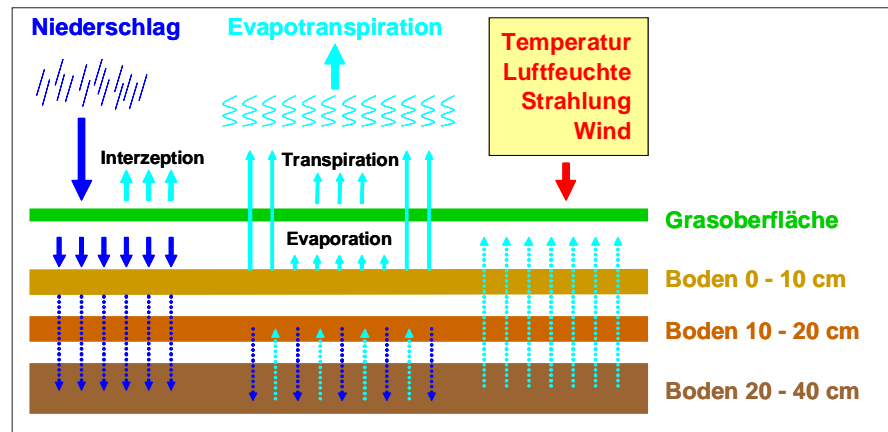


Abbildung 30: Schema der Bilanzierung von Niederschlag und Evapotranspiration unter Berücksichtigung der Wasserspeicherefähigkeit des Bodens

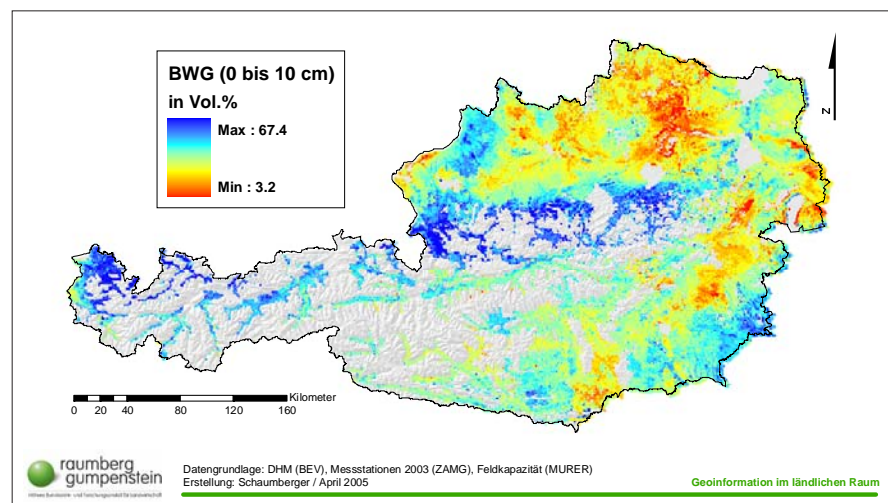


Abbildung 31: Bodenswassergehalt der Bodenschicht 0 bis 10 cm am 30. April 2003 in Vol.%

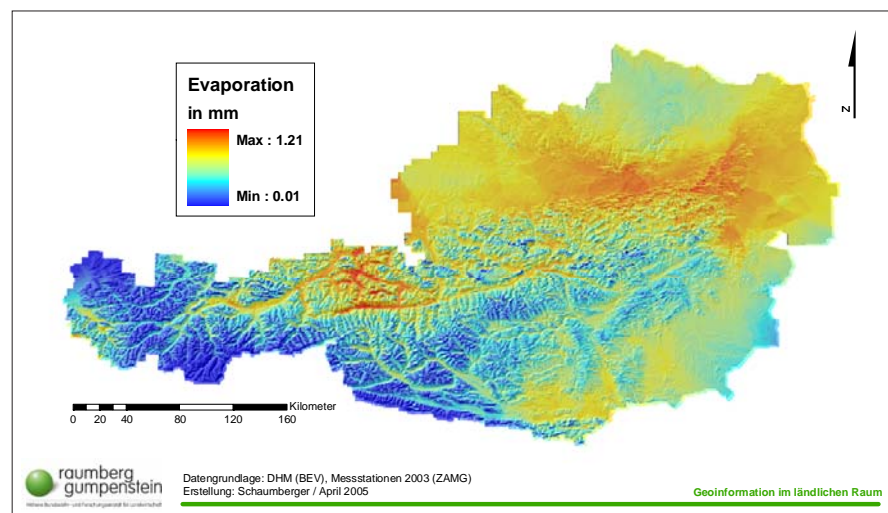


Abbildung 32: Evaporation an der Bodenoberfläche am 30. April 2003 in mm

das dichte Messstellennetz gewährleistet. In Abbildung 33 wird die Summe des Niederschlags im Jahr 2003 dargestellt. Dabei wurden die täglichen Niederschlagsraster aufsummiert. Im Osten Ö-

sterreichs ist ein deutlicher Niederschlagsmangel erkennbar, der erhebliche Trockenschäden in den landwirtschaftlichen Kulturen verursacht hat. Zur Identifikation von Trockenheit kann dieses Ergeb-

nis in erster Annäherung zwar verwendet werden, eine genauere Aussage liefert jedoch die nettopotentielle Evapotranspiration – das Ergebnis dazu wird im Abschnitt 4.4. vorgestellt.

4.3.3. Vegetationsperiode, Schnittmodell und Pflanzenfaktor

Der Pflanzenfaktor spielt für die Quantifizierung der Interzeption und Transpiration eine bedeutende Rolle. Es wird damit der Entwicklungsstand des Grasbewuchses zum Ausdruck gebracht und nimmt Werte zwischen 0.8 und 1.15 an. Die Bestandesentwicklung wird in erster Linie durch Beginn und Ende der Vegetationsperiode sowie durch die Schnitte bestimmt. Vom Vegetationsbeginn bis zum ersten Schnitt nimmt dieser Faktor linear zu, fällt mit erfolgtem Schnitt auf 0.8 zurück und wächst dann wiederum linear bis zum nächsten Schnitt an.

Für die Bestimmung der Vegetationsperiode wird die Minimumstemperatur von 2 °C über eine Dauer von fünf Tagen als Kriterium für Beginn und Ende angesetzt. Ab 1. März werden fünf hintereinander folgende Temperaturraster auf die Erfüllung des Temperaturkriteriums von über 2 °C überprüft und dieser Block von fünf Rastern jeweils um einen Tag bis Ende Mai weiter geschoben (siehe *Abbildung 34*). Für das Ende der Vegetationsperiode wird das Kriterium umgekehrt und vom 1. Oktober bis Ende November die gleiche Vorgehensweise auf die Temperaturraster der betreffenden Tage angewendet (siehe *Abbildung 35*). Die Dauer der Vegetationsperiode ergibt sich aus der Differenz von Ende und Beginn (siehe *Abbildung 36*). Gespeichert wird in den Rasterzellen mit einer Auflösung von 250 m jeweils der Tag des Jahres. Die Ermittlung der Vegetationsperiode ist die Grundlage für die Entwicklung eines Schnittmodells und in weiterer Folge des Pflanzenfaktors.

Die Anzahl der Schnitte ergibt sich aus der Dauer der Vegetationsperiode. Weiters bestimmt die höhenabhängige Zunahme der Wachstumstage zwischen den Schnitten (siehe *Abbildung 19*) die Schnittfrequenz, wie sie in *Abbildung 37* gezeigt wird. Zu berücksichtigen ist dabei die Tatsache, dass es sich ausschließlich um ein temperaturgestütztes Modell handelt und auf andere Einflüsse, wie z.B. die Düngung, nicht eingegangen wird.

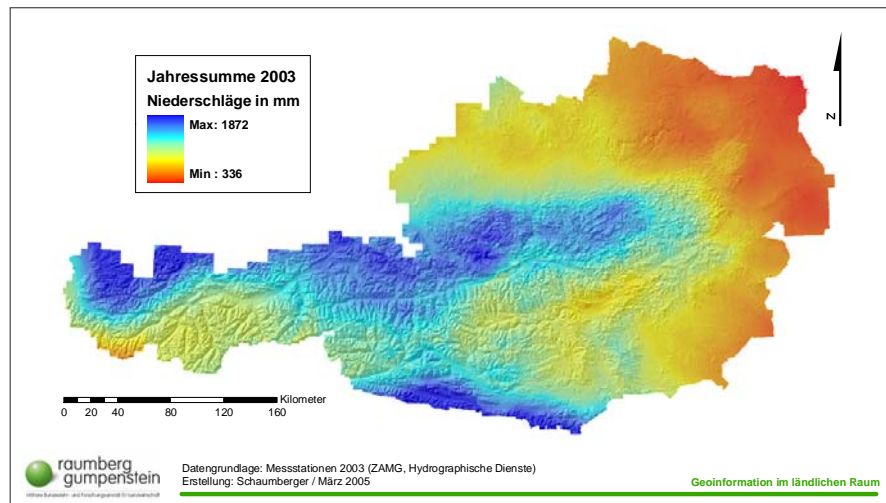


Abbildung 33: Jahresniederschlagssumme 2003 in mm

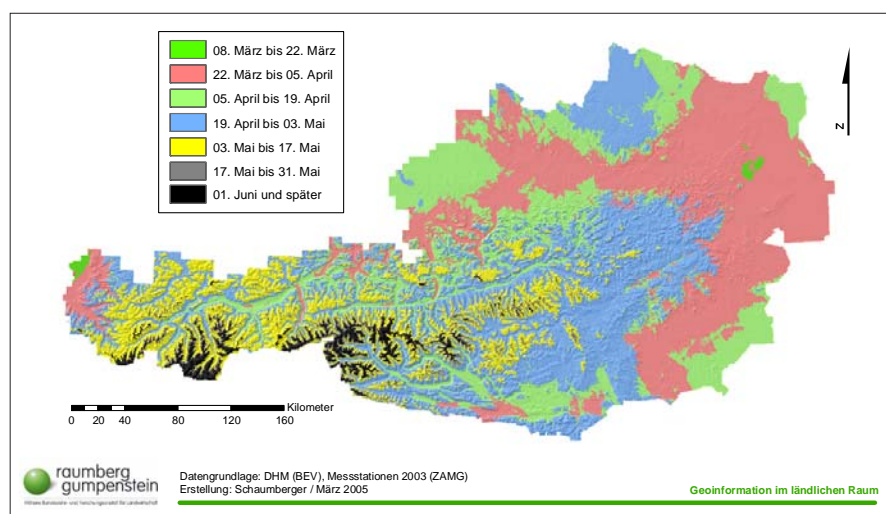


Abbildung 34: Vegetationsbeginn im Jahr 2003 (Tagesminimumtemperatur über 2 °C über fünf Tage)

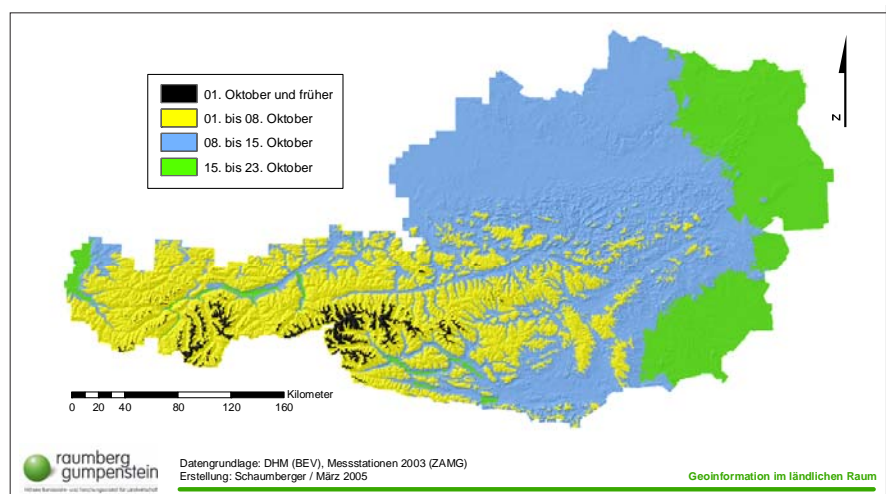


Abbildung 35: Vegetationsende im Jahr 2003 (Tagesminimumtemperatur unter 2 °C über fünf Tage)

Nachdem die Begrenzungen für die lineare Funktion des Pflanzenfaktors mit dem Vegetationsbeginn und -ende sowie

den daraus abgeleiteten Schnittterminen entwickelt wurden, kann der Pflanzenfaktor auf Tagesbasis berechnet werden.

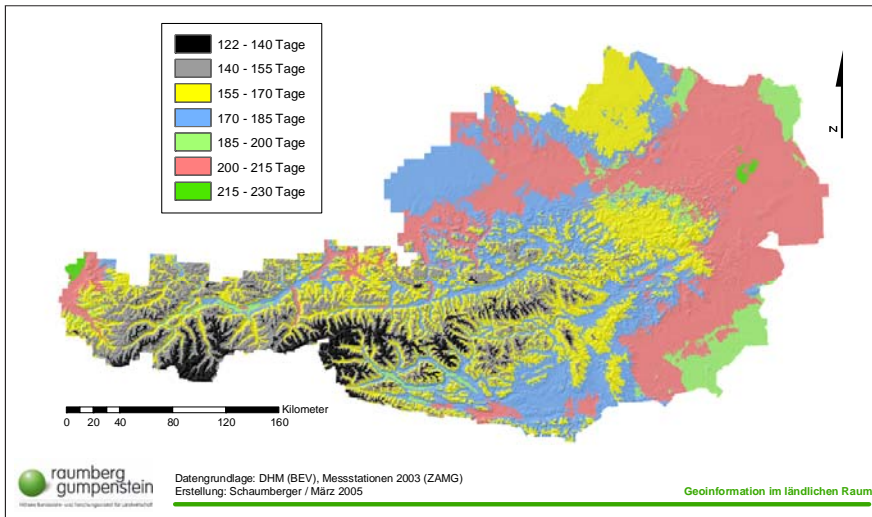


Abbildung 36: Vegetationsdauer im Jahr 2003

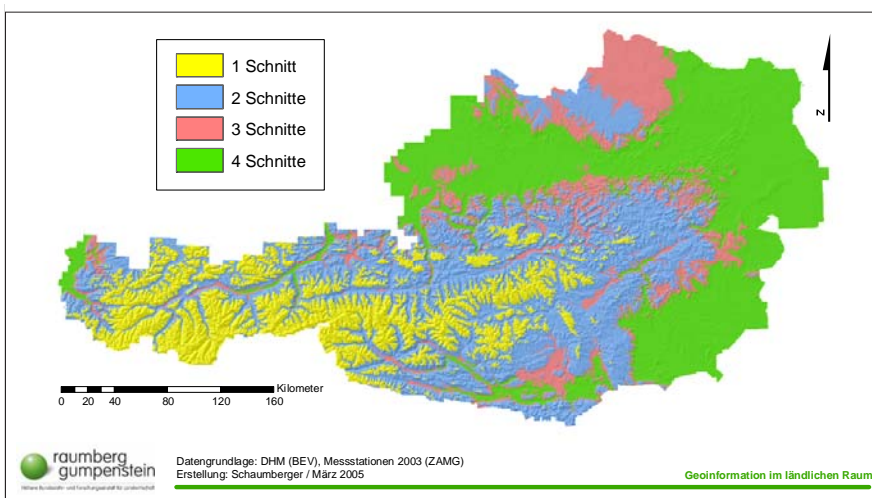


Abbildung 37: Modell der Schnittfrequenz für die Vegetationsperiode 2003

Für jeden Tag innerhalb der Vegetationsperiode entsteht ein Raster, der alle unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Pflanzenbestandes auf sich vereinigt. Die Höhe des täglichen Faktorwertes hängt von der Anzahl der Wachstumstage zwischen den Schnitten bzw. zwischen dem letzten Schnitt und dem Vegetationsende ab.

In *Abbildung 38* wird am Beispiel des 11. Juni 2003 die Verteilung des Pflanzenfaktors dargestellt. Befindet sich der Pflanzenbestand noch am Beginn seiner Entwicklung, ist dieser Wert nahe dem Minimum von 0.8. Bei Pflanzenbeständen, die kurz vor der Ernte stehen, geht der Faktor gegen 1.15. Da die Bestandesentwicklung auf unterschiedlichen Höhenstufen stark differiert, entsteht ein Raster, der viele verschiedene Zustände zeigt. Wenn im Osten Österreichs bereits der Folgeaufwuchs zu wachsen beginnt,

befindet sich die Entwicklung auf Flächen im Zentralalpengebiet noch im ersten Aufwuchs. Die Bestandesentwicklung kann nicht an Hand nur einer Dar-

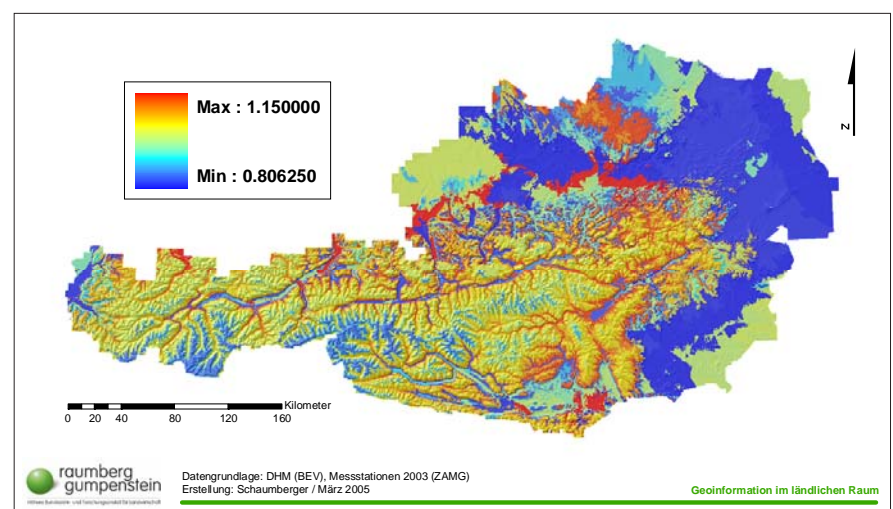


Abbildung 38: Pflanzenfaktor am Beispiel des 11. Juni 2003

stellung nachvollzogen werden, deshalb soll in *Abbildung 39* durch die Hineinanderreihung von Pflanzenfaktorrastern im Abstand von jeweils 10 Tagen diese Entwicklung gezeigt werden. Die Reihe beginnt am 82. Tag des Jahres, das ist der 23. März 2003, und endet nach 90 Tagen am 21. Juni 2003.

4.3.4. Transpiration und Bodenwassergehalt der Bodenschicht 0 bis 20 cm

Die Berechnungen für die Bodenschicht 0 bis 20 cm beziehen die von MURER (2005) ermittelten Werte der nutzbaren Feldkapazität für diese Bodenschicht ein. Mit dem Faktor der Bodentiefe, in diesem Fall beträgt diese Konstante 0.2, ergibt sich damit der Bodenwasserspeicher (TAW). Aus diesem wird jener Bodenwassergehalt ermittelt, ab dem der Wassergehalt die Transpirationsrate begrenzt (RAW). Unter Berücksichtigung der Änderung der Bodenwasserbilanz (Drainage vom Vortag) werden beide Größen in Relation gesetzt und ergeben den Wasserstressfaktor, der zusammen mit dem Pflanzenfaktor, der potentiellen Evapotranspiration und dem konstanten Proportionalitätsfaktor die Transpiration aus der Bodenschicht 0 bis 20 cm ergibt. Zusammen mit dem im Abschnitt 4.3.1. ermittelten Wert der Evaporation der Bodenoberfläche kann damit die aktuelle Evapotranspiration für die Bodenschicht 0 bis 20 cm errechnet werden.

Neben der Transpiration dieser Bodenschicht wird auch der Bodenwassergehalt ermittelt, welcher sich aus der Differenz von Feldkapazität und der Drai-

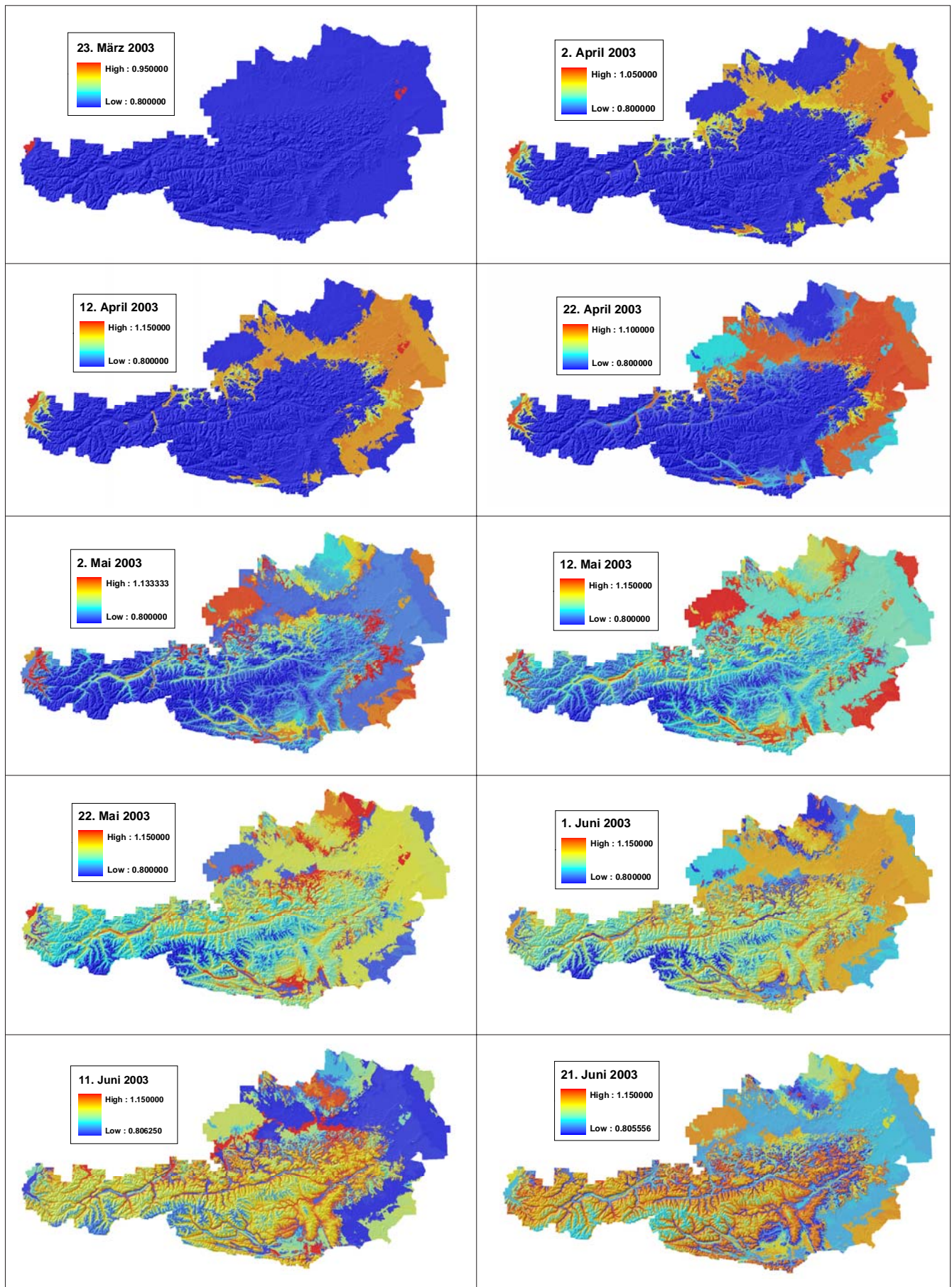


Abbildung 39: Entwicklung des Pflanzenfaktors in 10-Tages-Schritten vom 23. März bis 21. Juni 2003

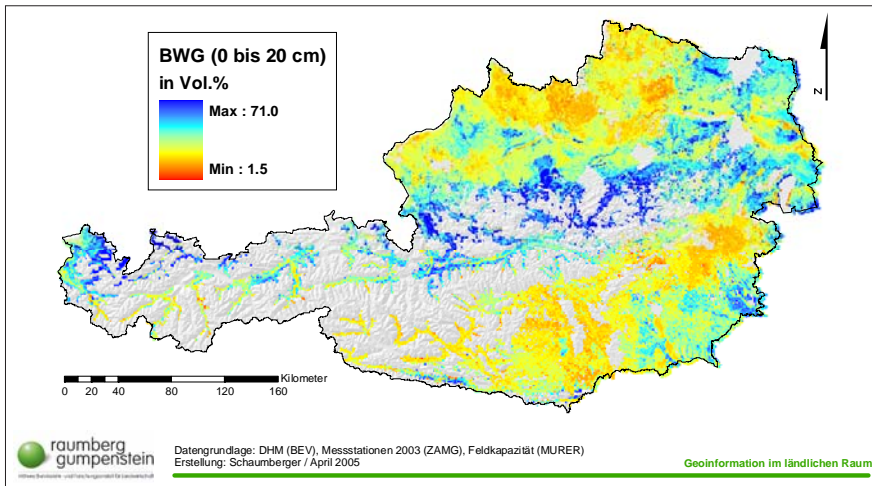


Abbildung 40: Bodenwassergehalt der Bodenschicht 0 bis 20 cm am 30. April 2003 in Vol.%

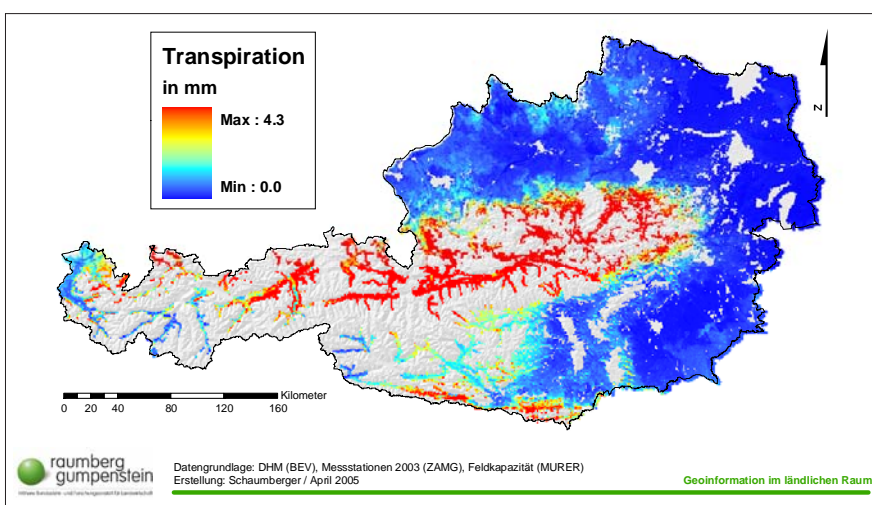


Abbildung 41: Transpiration der Bodenschicht 0 bis 20 cm am 30. April 2003 in mm

nage des aktuell zu berechnenden Tages ergibt. Die Drainage als ein Wert für die Änderung der Bodenwasserbilanz basiert auf der Berechnung des Wasserüberschusses, der Transpiration sowie der Drainage vom Vortag. Dabei wird auch der Wasserüberschuss der Bodenschicht 0 bis 10 cm (siehe Abbildung 31) einbezogen. Weist der Wasserüberschuss einen positiven Wert auf, bedeutet dies, dass die Wasseraufnahmekapazität der Bodenschicht erschöpft ist und deshalb als Drainage betrachtet wird.

Die Operationen werden programmtechnisch in einer Schleife über alle Tage der Vegetationsperiode ausgeführt, wobei stets das Ergebnis der Drainageberechnung des Vortages und des Wasserüberschusses aus der Bodenschicht 0 bis 10 cm mitgeführt werden.

Als Beispiel für das Ergebnis der Bodenwassergehaltsberechnung der Boden-

schicht 0 bis 20 cm wird der 30. April 2003 in Abbildung 40 dargestellt. Der Norden und Süden Österreichs weist bereits deutlich trockene Böden auf. Diese Darstellung ist in Zusammenhang mit dem Bodenwassergehalt der Bodenschicht 0 bis 10 cm (Abbildung 31) zu sehen und zeigt die Fortsetzung in der bis 10 cm tieferen Bodenschicht.

Die Alpennordseite profitiert von den Nordstauwetterlagen und weist deshalb eine ausreichende Bodenfeuchtigkeit auf. Die Ergebnisse beziehen sich auf jene Flächen, für welche die Werte der Feldkapazität zur Verfügung standen.

Die Transpiration der Bodenschicht 0 bis 20 cm für den 30. April 2003 wird in Abbildung 41 gezeigt. Hier ist die Korrelation mit dem Bodenwassergehalt dieser Bodenschicht zu beobachten. Die Flächen in den Alpen weisen aufgrund der höheren Bodenwassergehalte eine stär-

kere Transpiration auf, als jene Gebiete, in denen die Bodenfeuchtigkeit bereits abgenommen hat.

4.3.5. Transpiration und Bodenwassergehalt der Bodenschicht 20 bis 40 cm

Als eine Fortsetzung der bisherigen Berechnungen wird die Betrachtung der Bodenwasserbilanz bis in eine Bodentiefe von 40 cm ausgedehnt. Die Berechnungsschritte sind analog zu den Operationen der darüber liegenden Bodenschicht aufgebaut und unterscheiden sich kaum. Lediglich die nutzbare Feldkapazität, wie auch die Feldkapazität, als Inputparameter dieser Bodenschicht beziehen sich auf die Berechnungen für den Horizont von 20 bis 40 cm.

Die Berechnung der Drainage setzt auf die Wasserüberschussrechnung der Bodenschicht 20 bis 40 cm auf und berücksichtigt die Transpirationswerte dieser Bodenschicht. Auch hier werden in einer Schleife die Zwischenergebnisse des Vortages mitgeführt, sodass die Ermittlung von Werten ermöglicht wird, die sich aus der Entwicklung der Bodenwasserbilanz über den Untersuchungszeitraum hinweg ergeben. In Abbildung 42 wird das Ergebnis der Bodenwassergehaltsrechnung wiederum beispielhaft für den 30. April 2003 dargestellt.

Auch in dieser Bodenschicht treten die trockenen Böden im Norden und Süden Österreichs deutlich hervor. Die Alpen-nordseite verfügt noch über eine höhere Bodenfeuchtigkeit, die auch eine Transpiration, wie sie für diesen Tag in Abbildung 43 dargestellt ist, begünstigt.

Mit der Darstellung der untersten Bodenschicht, die für die Bewertung der Auswirkungen von Trockenheit in einem Grasbestand relevant ist, wurde für den 30. April 2003 ein Querschnitt von der Bodenoberfläche bis zu einer Tiefe von 40 cm gezeigt. Dieser Tag steht als Beispiel für sämtliche Tage, die in der vorliegenden Arbeit vom 1. März bis 31. Oktober in einer Auflösung von 50 m gerechnet wurden.

Die riesige Datenmenge mit weit über einem Terrabyte Speicherverbrauch und einer langen Rechenzeit erreichte deutlich die Grenzen des eingesetzten Systems und erforderte einen erheblichen Mehraufwand für das Datenmanagement.

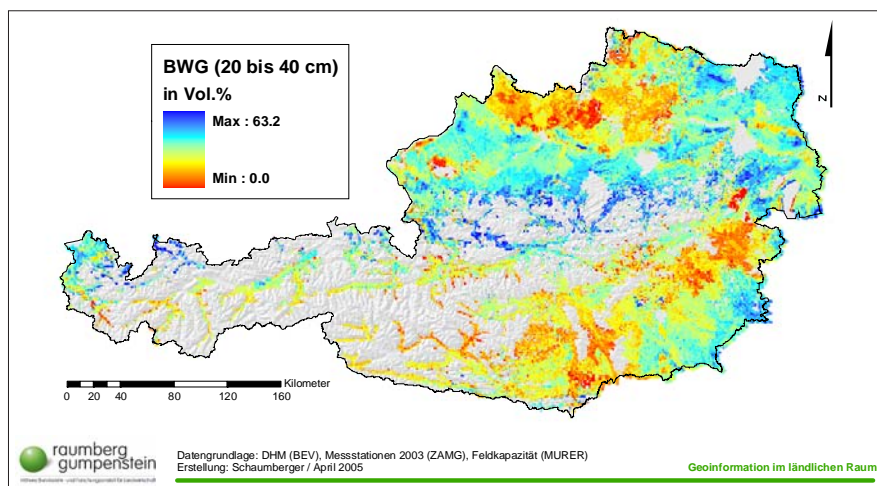


Abbildung 42: Bodenwassergehalt der Bodenschicht 20 bis 40 cm am 30. April 2003 in Vol.%

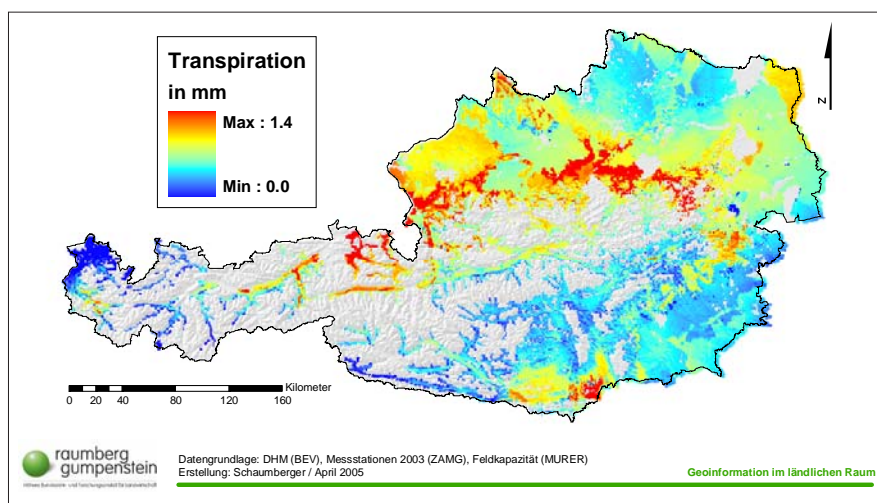


Abbildung 43: Transpiration der Bodenschicht 20 bis 40 cm am 30. April 2003 in mm

4.4. Aktuelle und nettopotentielle Evapotranspiration

Für die Identifikation von Trockenheit muss sich die Betrachtung auf eine Zeitreihe beziehen, da sich Wasserdefizit über mehrere Tage akkumuliert. Je intensiver dieses Defizit ausgeprägt ist, desto höher und wahrscheinlicher ist das Auftreten von trockenheitsbedingten Schäden im Pflanzenbestand. Die aktuelle Evapotranspiration berücksichtigt im Gegensatz zur potentiellen Evapotranspiration die tatsächlichen Wasserverhältnisse im Boden und zeigt die Situation für einen bestimmten Tag. In die Berechnung auf Tagesbasis wird der Wasserstressfaktor aller Bodenschichten einbezogen und mit dem Pflanzenfaktor, der potentiellen Evapotranspiration und dem Bestandsfaktor gewichtet.

In der Abbildung 44 wird die Situation am 30. April 2003 beispielhaft darge-

stellt. Die aktuelle Evapotranspiration stellt die Summe aus Evaporation der Bodenoberfläche und Transpiration der Bodenschichten 0 bis 20 und 20 bis 40

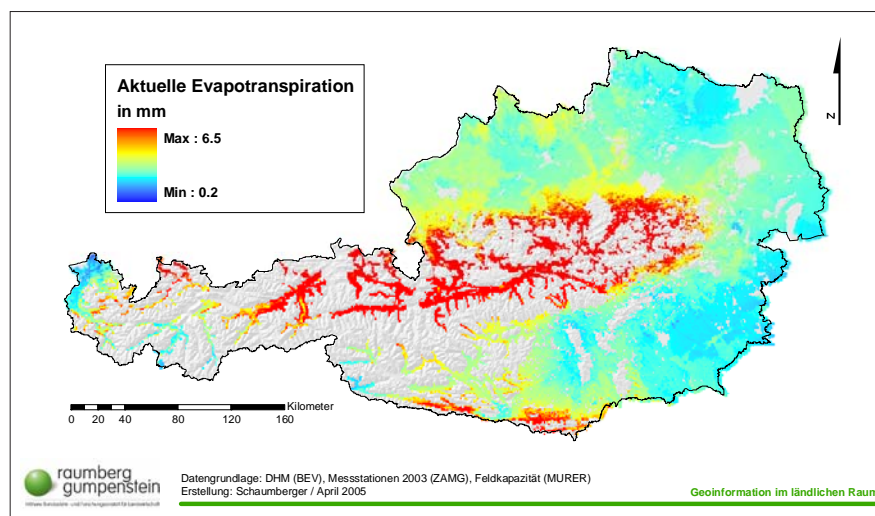


Abbildung 44: Aktuelle Evapotranspiration als Summe aus Evaporation und Transpiration der verschiedenen Bodenschichten am 30. April 2003 in mm

cm dar. Die aktuelle Evapotranspiration ist in jenen Gebieten am höchsten, wo eine entsprechende Bodenfeuchtigkeit diesen Vorgang unterstützt. Die bereits im Frühjahr 2003 auftretenden extrem trockenen Bedingungen im Norden, Osten und Süden Österreichs lassen bereits in der ersten Phase der Vegetationsperiode auf trockenbedingte Schäden schließen. Diese Entwicklung setzte sich über den Sommer 2003 fort und führte zu den bekannten katastrophalen Ertragseinbußen bzw. -ausfällen in allen landwirtschaftlichen Kulturen der betroffenen Gebiete.

Die nettopotentielle Evapotranspiration, auch als klimatische Wasserbilanz bezeichnet, stellt die Differenz von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration dar und ist als Indikator für Trockenheit besser geeignet als die ausschließliche Betrachtung der Niederschlagsmenge (siehe Abbildung 33). Beispielsweise bedeuten 60 mm Regen im November, wenn nur 20 mm verdunsten können, Wasserüberschuss, die gleiche Regenmenge im Juli, wenn die potentielle Verdunstung 120 mm beträgt, aber Trockenheit (VAN EIMERN und HÄCKEL, 1984, S. 46).

In Abbildung 45 wird das Jahresminimum der nettopotentiellen Verdunstung dargestellt. Die Berechnung basiert auf einer Auswertung sämtlicher Ergebnissraster auf Tagesbasis zwischen 1. März und 31. Oktober, wobei die Erfassung des Minimums ab 1. Mai vorgenommen wurde. Die Abbildung zeigt die im Jahr 2003 besonders von Trockenheit betroffenen Gebiete.

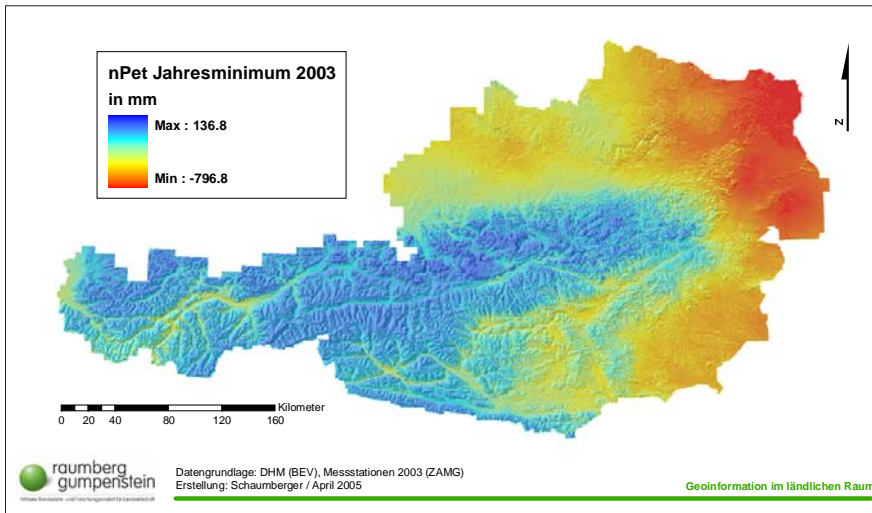


Abbildung 45: Jahresminimum der nettopotentiellen Verdunstung im Jahr 2003 in mm

Die Berechnung des Jahresminimums der nettopotentiellen Verdunstung vermittelt einen guten Eindruck über die räumliche Verteilung der trockengefährdeten Gebiete. Das Jahr 2003 kann zwar als ein Extremjahr nicht repräsentativ für die klimatischen Verhältnisse in Österreich gelten, es zeigt jedoch die möglichen Auswirkungen einer tendenziell zunehmenden Klimaveränderung auf die betroffenen Gebiete.

In den vergangenen Jahren wurden häufiger trockene Sommer registriert, die Anlass dazu geben, sich in den trockengefährdeten Gebieten auf diese neue Situation einzustellen. Die Maßnahmen in der Landwirtschaft können sich dabei auf die Installation von Bewässerungs- und Beregnungsanlagen beziehen, aber auch auf die Züchtung trockenresistenterer Kulturarten. Das Betätigungsfeld im Bereich der landwirtschaftlichen Forschung wird in Zukunft darauf abzielen müssen, um den Landwirten der betroffenen Gebiete Handlungsalternativen bieten zu können.

4.5. Georeferenzierung der INVEKOS-Daten

Mit der Georeferenzierung von Flächen mit Grünlandbewirtschaftung werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen werden jene Gebiete räumlich abgegrenzt, für welche die Wachstums- und Ertragsmodellrechnung relevant ist, zum anderen muss sich die Ermittlung der Düngermenge auf diese Flächen beziehen. Die Bewirtschaftungsintensität wird als Indikator für den mengenmäßigen Einsatz

von Dünger betrachtet, der als Parameter in die multiple Regressionsgleichung des Wachstums- und Ertragsmodells einfließt.

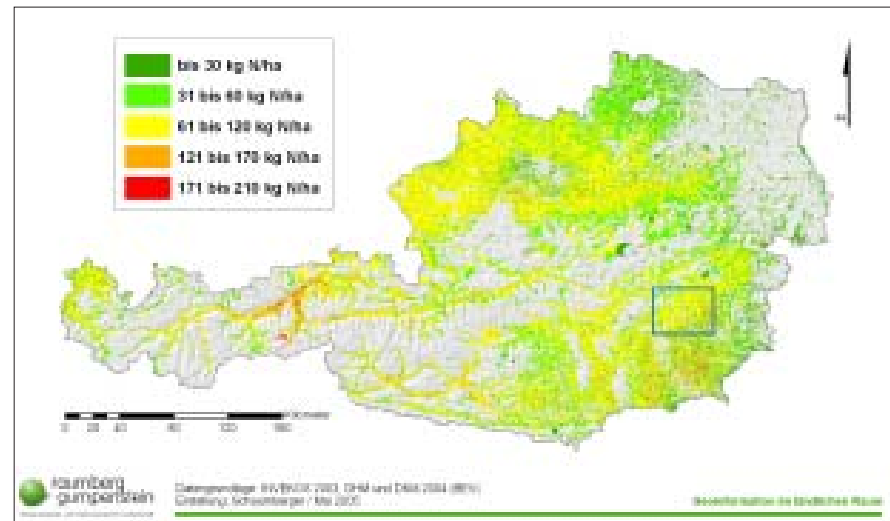


Abbildung 46: Stickstoffdüngermengen im österreichischen Grünland in kg N/ha

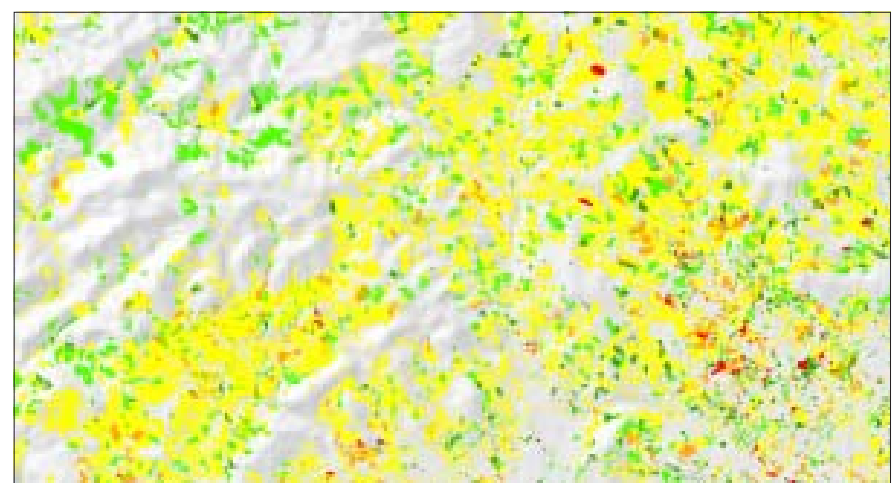


Abbildung 47: Detaildarstellung der Stickstoffdüngermengenverteilung im Raum Weiz (Steiermark)

Die tatsächliche Nährstoffversorgung der Flächen wird näherungsweise bestimmt, da eine für Grünland flächendeckende Berechnung nur modellhaft dargestellt werden kann. Dazu wurde der Tierbesatz pro ha in Großvieheinheiten (GVE) bestimmt. Aus dem INVEKOS-Datenbestand kann zu jedem landwirtschaftlichen Betrieb dessen Gesamt-GVE ermittelt werden.

Auch die gesamte Betriebsfläche lässt sich über die Zuordnung sämtlicher Feldstücke zu den Betriebsnummern berechnen. Das Verhältnis von Gesamt-GVE zu Betriebsfläche liefert den gewünschten Wert. Für das Ertragsmodell wird die in den Boden eingebrachte Stickstoffmenge benötigt. Über die GVE/ha wird diese Menge mit einer groben Richtlinie von 60 kg Stickstoff (N) pro GVE berechnet, wobei als Obergrenze 210 kg N/ha bzw. 3,5 GVE/ha festge-

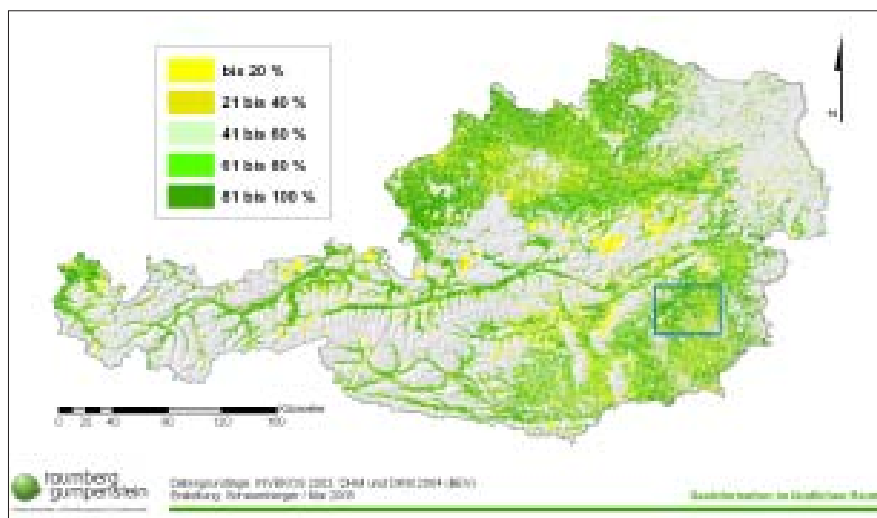


Abbildung 48: Prozentueller Anteil des Grünlandes an den Grundstücken mit Grünlandnutzung



Abbildung 49: Detaildarstellung des Grünlandanteiles an den Grundstücken im Raum Weiz (Steiermark)

setzt wurden (BUCHGRABER, 2005b). Diese Obergrenze bezieht sich auf die nach Wasserrechtsgesetz (WRG) zulässige Besatzdichte. Eine Unterscheidung zwischen Wirtschaftsdünger und mineralischem Dünger wurde nicht vorgenommen.

Im Abschnitt 3.3.5 wurde die Problematik der Zuordnung von Nutzungseinheiten auf Grundstücke der DKM ausführlich erklärt und an Hand eines Datenmodells dargestellt. Die dabei angewandte Methode kann die tatsächliche Flächenverteilung nicht fehlerfrei abbilden, stellt jedoch eine bestmögliche Annäherung dar. Alle Grundstücke, die einen Anteil an Grünland aufweisen, wurden aus der Datenkombination von Schlag, Feldstück und Grundstücksanteil am Feldstück identifiziert und mit den Grundstücken der DKM über die Grundstücksnummer verbunden.

Durch den „JOIN“ von 1.879.031 Grünlandgrundstücken nach INVEKOS mit 6.788.188 Grundstücken der DKM konnten 44.864 Grundstücke keinen Geodaten zugeordnet werden. Damit ergibt sich eine Anzahl von 1.834.167 Grundstücken, die Grünlandanteile aufweisen und für die Wachstums- und Ertragsmodellrechnung herangezogen werden können.

In *Abbildung 46* wird die Verteilung der Düngermengen veranschaulicht. Der Wertebereich ergibt sich aus dem Tierbesatz in GVE/ha und zeigt für den Großteil der Flächen eine Bewirtschaftung mit 1 bis 2 GVE/ha. Um die Wertausprägungen auf einzelne Grundstücke beziehen zu können, wird in *Abbildung 47* eine Detaildarstellung aus dem in *Abbildung 46* markierten Bereich gezeigt. Da sich Nutzungsgrenzen und Grund-

stücksgrenzen nicht decken, wurde für jedes Grundstück, das laut INVEKOS eine Grünlandnutzung aufweist, der Anteil des Grünlandes am jeweiligen Grundstück ermittelt. *Abbildung 48* zeigt das Ergebnis dieser Berechnung.

Die Detaildarstellung in *Abbildung 49* zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus *Abbildung 48*, in dem die prozentuellen Anteile des Grünlandes am jeweiligen Grundstück ersichtlich sind.

4.6. Wachstums- und Ertragsmodell

Das Modell zur Bestimmung des Wachstums von Grünlandpflanzen unter Berücksichtigung des Auftretens von Trockenheit und die daraus abgeleitete Ertragsbestimmung für die verschiedenen Nutzungszeitpunkte stellt das Endergebnis dieser Arbeit, wie auch das des Projektes „Trockenschäden im Grünland“ dar. Alle bisher vorgenommenen Tätigkeiten und die daraus ermittelten Ergebnisse werden in der Gleichung berücksichtigt, die den Ertrag in dt TM/ha für eine flächendeckende Berechnung der Grünlandbewirtschaftung in einer Auflösung von 50 m als Ergebnis liefert.

Aus potentieller und aktueller Evapotranspiration wird durch Akkumulation der Tageswerte ab Vegetationsbeginn der langfristige und kurzfristige Wasserstress berechnet. Beide Ergebnistraster werden zusammen mit empirischen Modellkoeffizienten als Input zur Ermittlung des Wasserverfügbarkeitsfaktors benötigt. Der Wachstumsfaktor bildet die Grundlage für die effektive Temperatur und Globalstrahlung.

Viele Zwischenergebnisse werden durch Akkumulation über mehrere Tage gebildet. Dies ist für die Berücksichtigung der negativen Auswirkung von Trockenheit im Wachstumsverlauf wichtig. Dabei spielen die tägliche Mitteltemperatur und Globalstrahlungssumme eine herausragende Rolle, da diese, mit dem Wachstumsfaktor gewichtet, für die Berechnung der effektiven Temperatur- und Strahlungsbedingungen herangezogen werden. Zu diesem Zweck müssen die Ergebnistraster auf Tagesbasis für die Dauer des zu untersuchenden Aufwuchses addiert werden. Unter Berücksichtigung dieser Wachstumsdauer zwischen den Nutzungssterminen, der Stickstoff-

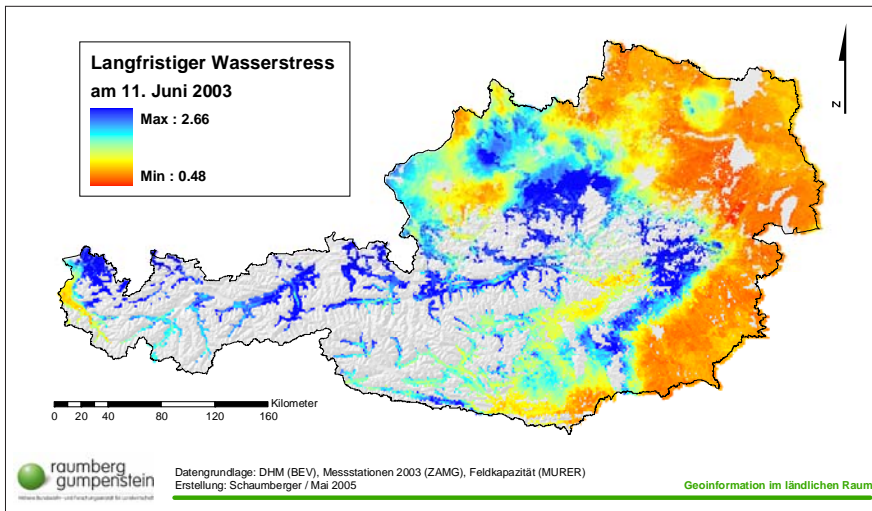


Abbildung 50: Langfristiger Wasserstress am Beispiel des 11. Juni 2003

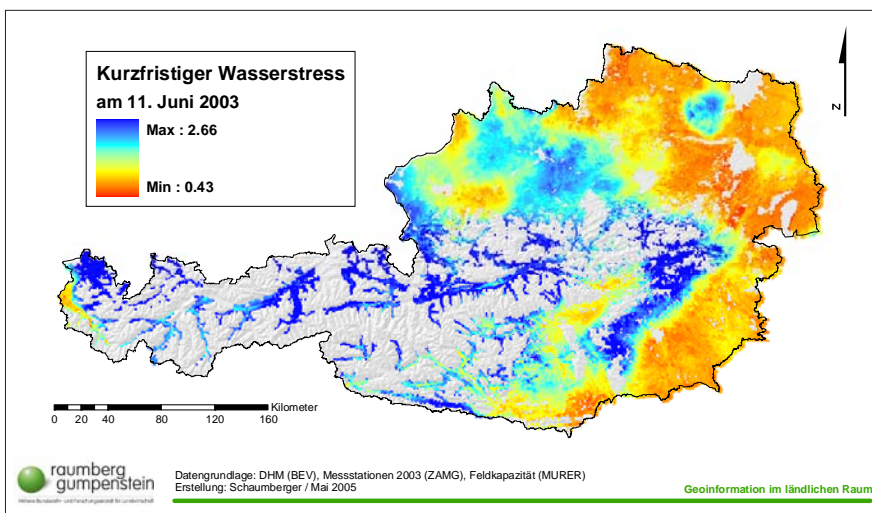


Abbildung 51: Kurzfristiger Wasserstress am Beispiel des 11. Juni 2003

düngermenge pro ha und der im Wachstums- und Ertragsmodell ermittelten empirischen Koeffizienten wird daraus schließlich der Ertrag in dt TM/ha mittels lokaler Rasteroperationen errechnet. Die Implementierung des Modells erfordert durch die tägliche Akkumulation von Rastern in der Auflösung von 50 m intensive Rechenzeit und hohen Speicherbedarf. Die Zwischenergebnisse aus den einzelnen Berechnungen werden in der Folge beispielhaft vom 11. Juni 2003 gezeigt, da zu diesem Zeitpunkt eine sehr heterogene Situation veranschaulicht werden kann.

In *Abbildung 50* wird das Ergebnis der Berechnung des langfristigen Wasserstress gezeigt. Damit wird das Verhältnis von aktueller und potentieller Evapotranspiration vom Beginn der Vegetationszeit bis zum 11. Juni 2003 ausgedrückt. Der Wasser- bzw. Trockenstress

beschreibt jene Situation, in der den Grünlandpflanzen nicht genügend Wasser für ihren Transpirationsvorgang zur Verfügung steht. Der kurzfristige Was-

serstress, in *Abbildung 51* am 11. Juni 2003 gerechnet, berücksichtigt eventuelle Stressbedingungen, die sich aus der Einbeziehung der Verhältnisse der letzten sechs Tage für die Grünlandpflanzen ergeben.

Aus lang- und kurzfristigem Wasserstress und der Einbeziehung empirischer Modellkoeffizienten wird der Wasserverfügbarkeitsfaktor berechnet (siehe *Abbildung 52*).

Der Wachstumsfaktor eines bestimmten Tages in der Vegetationsperiode wird aus dem Wasserverfügbarkeitsfaktor dieses Tages bestimmt. *Abbildung 53* repräsentiert die räumliche Verteilung der Wachstumsbedingungen am Beispiel einer Zeitreihe. Mit dem Wertebereich des Wachstumsfaktors von 0 bis 1 wird der Verlauf von ungünstigen bis hin zu optimalen Bedingungen für den Pflanzenwuchs dargestellt. Die durchgeführte Analyse bezieht sich dabei lediglich auf den Wasserhaushalt im Boden.

Deutlich sind die schlechten Bedingungen im Nordosten, Osten und Südosten erkennbar. Die Auswirkungen des trockenen und heißen Frühjahrs sind deutlich sichtbar und bilden eine denkbar schlechte Voraussetzung für den darauf folgenden Sommer, der besonders in diesen Gebieten zu katastrophalen Ertragsseinbußen bzw. -ausfällen geführt hat. Die Verteilung des Wachstumsfaktors steht in engem Zusammenhang mit vielen in dieser Arbeit bereits gezeigten Darstellungen von potentieller Evapotranspiration, Niederschlagsverteilung, netto-potentieller Verdunstung und Bodenwas-

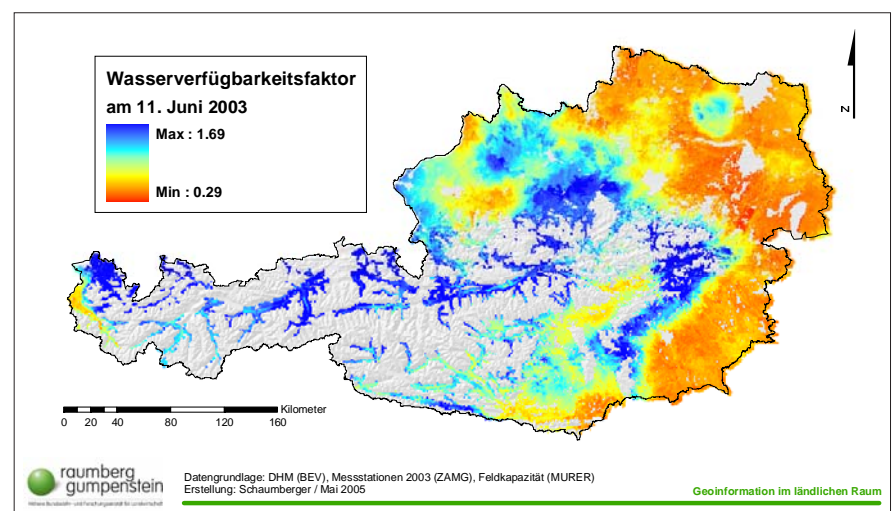


Abbildung 52: Wasserverfügbarkeitsfaktor am Beispiel des 11. Juni 2003

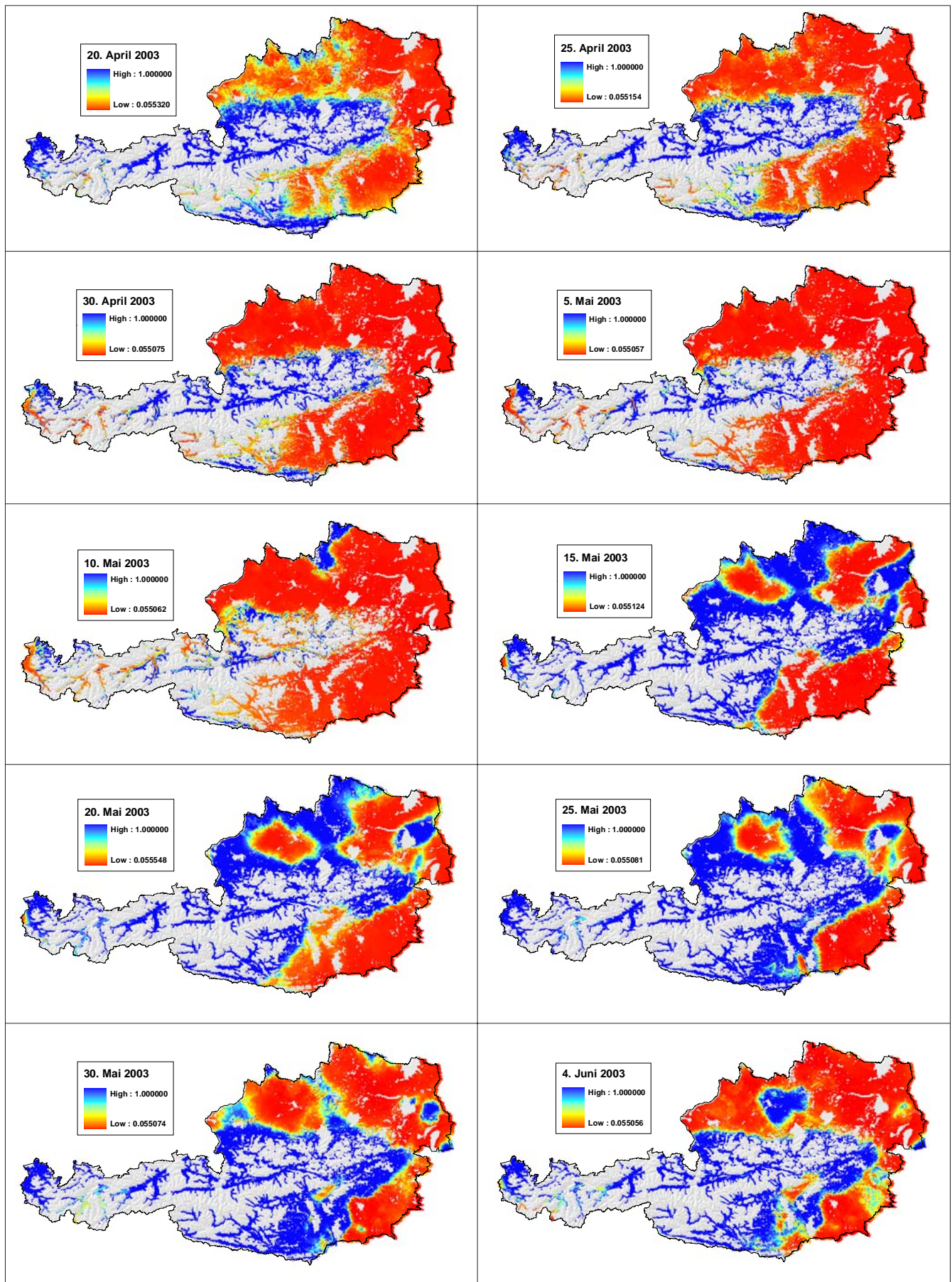


Abbildung 53: Entwicklung des Wachstumsfaktors in 5-Tages-Schritten vom 20. April bis 4. Juni 2003

sergehaltsverteilungen. Die trockengefährdeten Gebiete können in den verschiedensten Auswertungen immer wieder eindeutig identifiziert werden.

Der Wachstumsfaktor spiegelt den Verlauf von trockenen und feuchten Wetterlagen sehr gut wider und kann an Hand der Darstellungen in *Abbildung 53* anschaulich nachvollzogen werden.

Die effektive Temperatur und Globalstrahlung besteht aus der Summe der täglichen Temperaturmittelwerte bzw. Globalstrahlungssummen über die Dauer eines Aufwuchses, die jeweils mit dem Wachstumsfaktor gewichtet werden. *Abbildung 54* und *Abbildung 55* zeigen die Ergebnisse der Berechnungen am Beispiel der Akkumulation für den ersten Aufwuchs.

Die Ermittlung des Ertrages baut auf die bisher dargestellten Ergebnisse auf und wird für die in dieser Arbeit modellierte räumliche Verteilung der Schnittfrequenz (siehe *Abbildung 37*) für den ersten bis vierten Schnitt berechnet. Die Wachstumsdauer zwischen den einzelnen Nutzungen wird analog den Bearbeitungsschritten für die Berechnung des Pflanzenfaktors bestimmt und beeinflusst damit die Wertebereiche für effektive Temperatur und Globalstrahlung. Neben den Rastern der effektiven Temperatur und Globalstrahlung wird für die Berechnung des Ertrages auch die Düngungsintensität einbezogen.

Dazu wird das in *Abbildung 46* dargestellte Ergebnis der Düngerverteilungsrechnung auf Grundlage des INVEKOS-Datenbestandes vom Vektor- in ein Rastermodell konvertiert und mit den anderen Rastern bzw. Koeffizienten in die multiple Regressionsgleichung des Ertragsmodells eingebaut.

In *Abbildung 56* wird die Verteilung der Ernteerträge auf Grünlandflächen für den 1. Aufwuchs im Jahr 2003 gezeigt. In den Trockengebieten sind bereits deutliche Ertragseinbußen feststellbar. Auch das Alpenvorland, welches zu den produktivsten Grünlandgebieten zählt, weist in diesem Jahr nur mäßige Erträge auf. Gute Erträge wurden in den Tälern des Alpenhauptkammes erzielt.

Als Ernteertrag wird der Ertrag am Feld bezeichnet. Im Gegensatz dazu steht der Nettoertrag, welcher aus der Differenz von Ernteertrag und Verlusten (At-

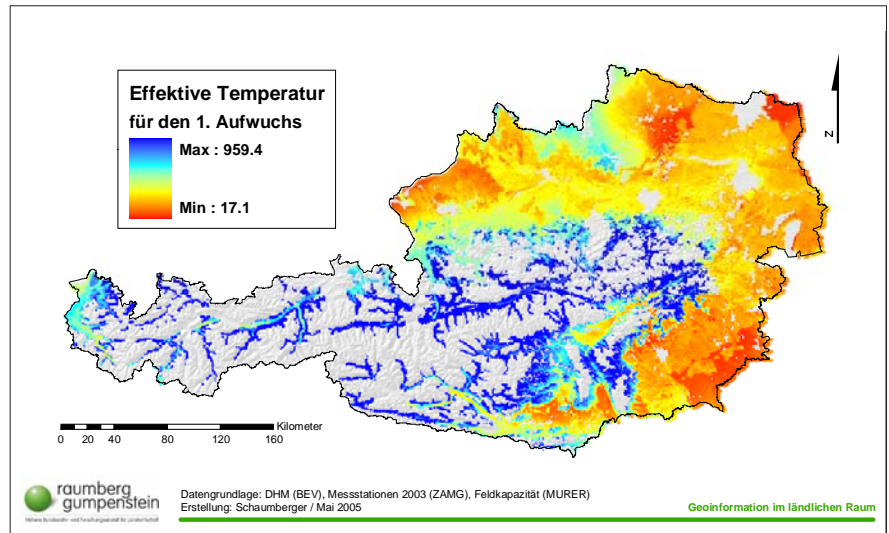


Abbildung 54: Effektive Temperatur für den ersten Aufwuchs des Jahres 2003

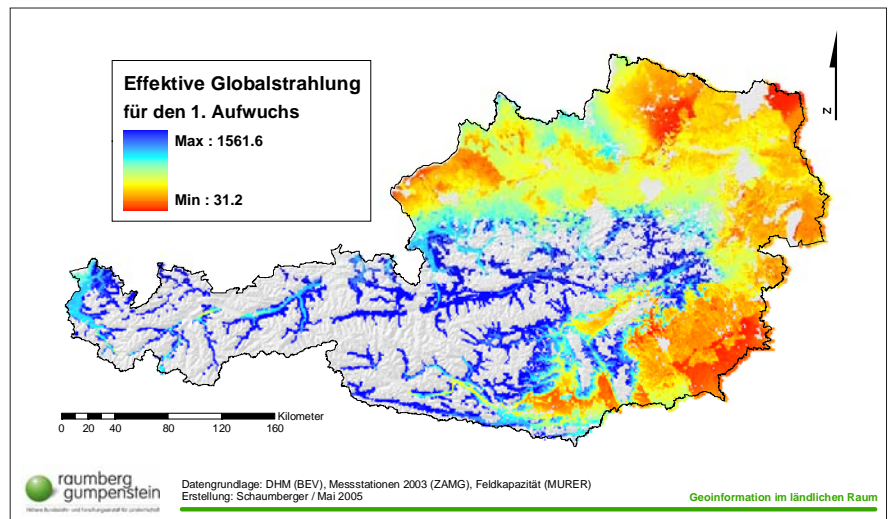


Abbildung 55: Effektive Globalstrahlung für den ersten Aufwuchs des Jahres 2003

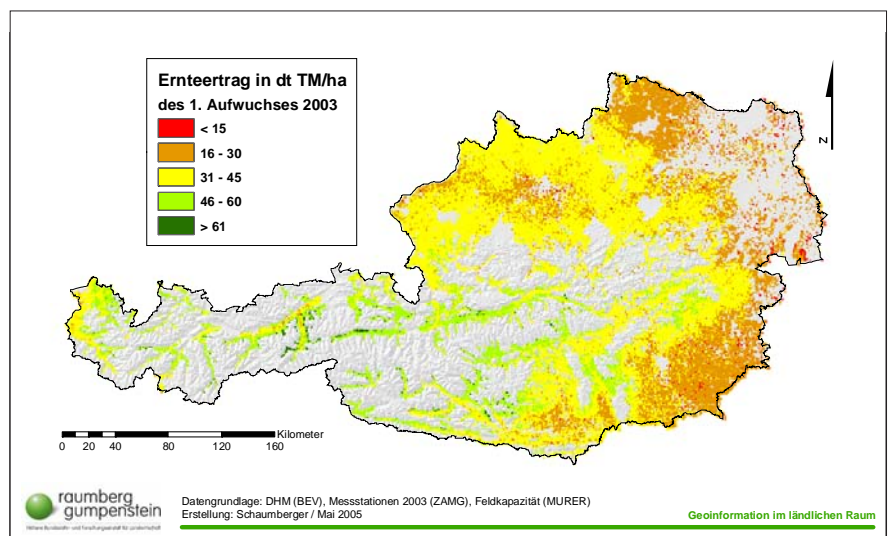


Abbildung 56: Ernteertrag des jeweils 1. Aufwuchses unterschiedlicher Nutzungsfrequenzen im Jahr 2003

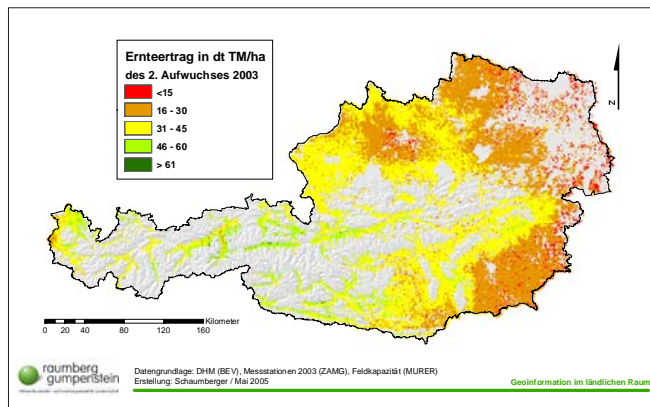


Abbildung 57: Ernteertrag des jeweils 2. Aufwuchses unterschiedlicher Nutzungsfrequenzen im Jahr 2003

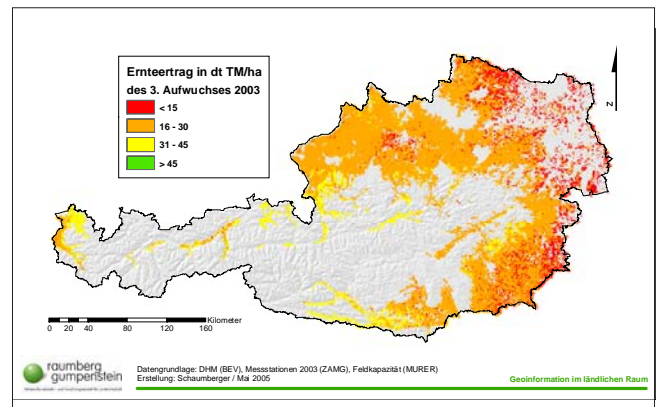


Abbildung 58: Ernteertrag des jeweils 3. Aufwuchses unterschiedlicher Nutzungsfrequenzen im Jahr 2003

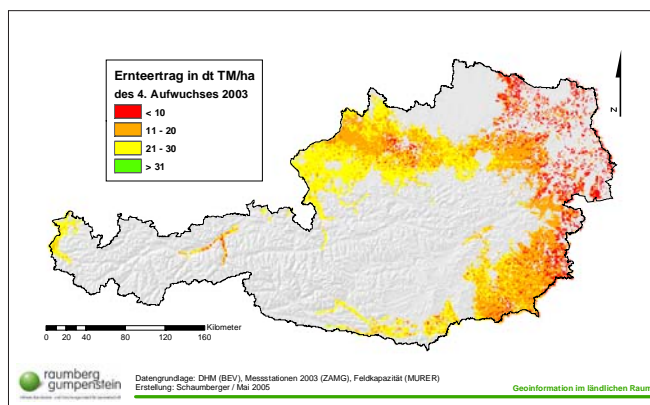


Abbildung 59: Ernteertrag des jeweils 4. Aufwuchses unterschiedlicher Nutzungsfrequenzen im Jahr 2003

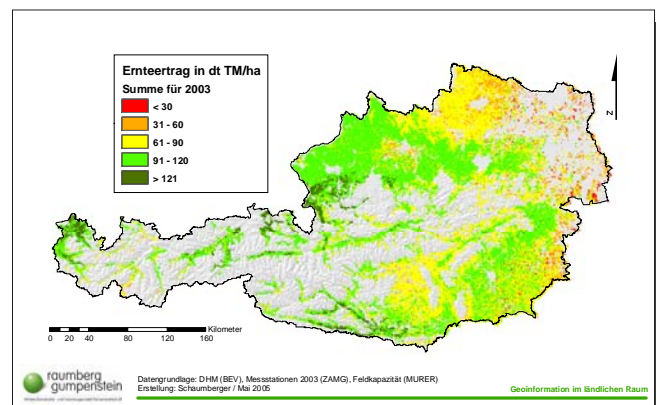


Abbildung 60: Gesamter Ernteertrag unterschiedlicher Nutzungsfrequenzen im Jahr 2003

mungsverluste, Bröckelverluste, Weideverluste, Lagerungsverluste und Krippenverluste) gebildet wird und jenen Ertrag darstellt, der vom Tier aufgenommen wird. *Abbildung 57* stellt den Ernteertrag des 2. Aufwuchses im Jahr 2003 dar. In den Trockengebieten ist der Ertragsrückgang im Vergleich zum 1. Aufwuchs noch intensiver und flächenmäßig umfangreicher ausgeprägt und geht teilweise bis zu einem totalen Ertragsausfall. Der 3. Aufwuchs in *Abbildung 58* zeigt eine Fortsetzung der extremen Entwicklung im Jahr 2003. Die Auswertung des 4. Aufwuchses umfasst nur jene Flächen, in denen noch ein vierter Schnitt möglich ist. Die Erträge in *Abbildung 59* sind trockenheitsbedingt im Minimumbereich. Die Jahresernteerträge von Ein-, Zwei-, Drei- und Vierschnittflächen werden in *Abbildung 60* dargestellt. Die Ergebnisse sind durch die Trockenheit dieses Jahres nicht mit Normaljahren vergleichbar und zeigen deshalb nur ein realistisches Bild der speziellen Situation des Jahres 2003.

5. Zusammenfassung

Der Ertrag im Grünland wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst und kann durch die Entwicklung verschiedener Modelle, die bestimmte natürliche Vorgänge vereinfacht abbilden, näherungsweise bestimmt werden. Die Voraussetzung für eine möglichst flächendeckende Analyse hinsichtlich des Ertrages auf Grünlandflächen ist die Integration der Modelle in einem Geographischen Informationssystem (GIS), da für die unterschiedlichen Modellparameter ein klarer Raumbezug besteht.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Implementierung der Bodenwasserbilanz- und Wachstumsmodelle im GIS, die sich auf die konkrete technische Umsetzung in Form einer modularen und aufbauenden Vorgehensweise bezieht. Als GIS-Software wurde ArcGIS 8.3 von ESRI mit diversen Erweiterungen eingesetzt und durch individuelle Programmierung in Visual Basic for Applications (VBA) unter Ein-

beziehung der Klassenbibliothek von ArcObjects erweitert.

Die Grundlage für die Simulation von Wachstum bildet die Bodenwasserbilanz. Dem Niederschlag wird die potentielle Verdunstung (Evapotranspiration) gegenübergestellt und mit Berücksichtigung der Feldkapazität des Bodens das Bodenwasserbilanzmodell nach einer Methode der FAO entwickelt.

Zunächst wurde die potentielle Evapotranspiration für Grasoberflächen auf Tagesbasis und für das gesamte Bundesgebiet ermittelt. Die wichtigsten Parameter dieses Modells sind die Globalstrahlung bzw. die tägliche Strahlungsbilanz, das Sättigungsdefizit aus Temperatur und relativer Luftfeuchte, sowie der Wind. Diese Stationsmessdaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik standen für das Jahr 2003 zur Verfügung und bildeten die Basis für alle meteorologischen Analysen in dieser Arbeit.

Die Globalstrahlung wurde mit Hilfe eines Modells in Abhängigkeit topographi-

scher Bedingungen erstellt und mit einem berechneten Wert für eine horizontale und unbeschattete Fläche normiert. Der daraus resultierende Globalstrahlungsfaktor als Repräsentation der topographiebedingten Änderungen korrigiert die an den Stationen berechnete potentielle Evapotranspiration und deren höhenabhängige Interpolation. Mittels Regressionsrechnung wurde die Höhenabhängigkeit der potentiellen Evapotranspiration ermittelt und die Ergebnisgleichung auf das Digitale Höhenmodell angewendet. Die an den Stationen ermittelten Residuen zwischen geschätzter und mit Hilfe der Messdaten berechneter Evapotranspiration wurden mittels Kriging interpoliert und anschließend mit dem höhenabhängigen Anteil der Evapotranspiration (modifiziertes DHM) kombiniert.

Das Ergebnis aus der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration wurde in die Bodenwasserbilanzierung einbezogen. Zusammen mit der Feldkapazität konnte damit der Bodenwassergehalt und die aktuelle Evapotranspiration der Bodenschichten 0 bis 10 cm, 0 bis 20 cm und 20 bis 40 cm ermittelt werden. Für die Berechnung der verschiedenen Horizonte wurden auch die Änderungen der Bodenwasserbilanz gegenüber dem Vortag und eventuelle Drainagen aus den darüber liegenden Bodenschichten mit berücksichtigt. Der Evapotranspiration steht die Niederschlagsmenge gegenüber, die unter Berücksichtigung der Interzeption (Verdunstung des Niederschlags an der Pflanzenoberfläche) in die Bilanzrechnung einfließt.

Die Identifikation von Trockenheit setzt eine Untersuchung über eine längere Periode voraus und kann nicht stichtagsbezogen vorgenommen werden. Deshalb ist die Akkumulation von Ergebnissen der Bodenwasserbilanzrechnung über einen definierten Zeitraum notwendig und Voraussetzung für die Nachbildung des Wachstums. Die nettopotentielle Verdunstung als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration stellt einen wichtigen Indikator für Trockenheit dar und wurde als flächendeckender Raster der Jahresminima gerechnet.

Der Pflanzenfaktor als ein weiterer Parameter für die Bodenwasserbilanzierung

drückt den Entwicklungsstand des Pflanzenbestandes aus und ist bei der Berechnung von Interzeption und Transpiration von Bedeutung. Er stellt einen linearen Biomassezuwachs vom Vegetationsbeginn bis zur Nutzung dar und wiederholt sich für alle Folgenutzungen. Voraussetzung dafür ist die Berechnung der Vegetationsperiode mit einem temperatur- und höhenabhängigen Beginn und Ende sowie der höhenabhängigen Dauer der Wachstumsphasen der einzelnen Nutzungen.

Die Wachstums- und Ertragsmodellierung baut auf die Ergebnisse der Bodenwasserbilanzierung auf und führt über die Ermittlung eines Wachstumsfaktors, der aus einer Berechnung der Wasserverfügbarkeit über Wasserstressfaktoren resultiert, in einer multiplen Regressionsgleichung zu einer Aussage über die Quantität des Grünlandertrages in dt Trockenmasse pro ha.

Dabei wird die Bewirtschaftungsintensität hinsichtlich der Düngung berücksichtigt. Aus den INVEKOS-Daten kann über die Betriebsfläche und den Viehbestand in Großvieheinheiten (GVE) der Tierbesatz eines Grünlandbetriebes in GVE/ha ermittelt werden und daraus auf die Stickstoffdüngermenge geschlossen werden, die als Parameter in die Ertragsgleichung einfließt. Sämtliche Berechnungen wurden auf Basis des Rasterdatenmodells mit Hilfe lokaler Rasteroperationen in ArcGIS VBA-Programmen durchgeführt. Die meisten Zwischen- und vor allem die Endergebnisse mussten in einer Auflösung von 50 m erstellt werden. Insgesamt entstanden durch diese flächendeckenden Operationen auf Tagesbasis Geodaten mit einem Speichervolumen von über 1,5 TByte, welche neben der intensiven Rechenzeit das eingesetzte Standard-PC-System an die Grenze der Belastbarkeit brachten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Versicherungsmodells für Trockenschäden im Grünland und leisten damit einen Beitrag zur Existenzsicherung von Grünland- und Viehbetrieben in den von Trockenheit gefährdeten Gebieten. Viele in dieser Arbeit entstandenen Geodaten können auch in weiteren Forschungsprojekten genutzt werden.

6. Literatur

- ALLEN, G.A., L.S PEREIRA, D. RAES and M. SMITH (1998): Crop Evapotranspiration – guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 78-86.
- BARTELME, N. (2005): Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen. 4. Auflage, Springer Verlag.
- BUCHGRABER, K. (2002): Projektantrag zum Forschungsprojekt „Entwicklung eines Modells für die konkrete Ermittlung von Trockenschäden in den einzelnen Grünlandregionen Österreichs“. Projektbeauftragung durch das Ministerbüro des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BUCHGRABER, K. (2003): Präsentation des gemeinsamen Forschungsprojektes für die Grünlandwirtschaft „Entwicklung eines Modells für die konkrete Ermittlung von Trockenschäden in den einzelnen Regionen Österreichs“. 1. Klimaseminar zum Generalthema „Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft“, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, 22. April 2003, 15-17.
- BUCHGRABER, K. (2005a): Persönliche Mitteilung am 24. März 2005.
- BUCHGRABER, K. (2005b): Persönliche Mitteilung am 11. Mai 2005.
- BUCHGRABER, K. und A. SCHAUMBERGER (2005): Die Grünlandwirtschaft im Berggebiet Österreichs. Abschlussbericht des UNESCO-Projektes Man and Biosphere (MaB-6/21) „Erfassung der Bewirtschaftungssysteme im Grünland“, in Druck.
- BUCHGRABER, K. und G. GINDL (2004): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung. 2. Auflage, Leopold Stocker Verlag Graz, 9-14.
- BUCHGRABER, K., R. RESCH und A. SCHAUMBERGER (2004): Auswirkungen von Trockenschäden für Grünland und Viehwirtschaft. Kurzfassungen der Vorträge anlässlich der 10. Wintertagung in Aigen/Ennstal, 12. und 13. Februar 2004.
- BURKE, R. (2003): Getting to know ArcObjects. Programming ArcGIS with VBA. ESRI, Redlands, USA.
- CHILD, C. (2004): Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. ArcUser July - September 2004.
- EITZINGER, J und M. TRNKA (2005): Ein Trockenschadenmodell für das österreichische Grünland. Bericht über das 2. Klimaseminar der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, in Druck.
- FLACKE, W. und B. KRAUS (2003): Koordinatensysteme in ArcGIS. Praxis der Transformationen und Projektionen. Points Verlag Norden, Halmstad.
- FORMAYER, H. (2003): Klimatologische Einflüsse auf Grünlandtrockenschäden in Österreich. 1. Klimaseminar zum Generalthema „Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft“, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, 22. April 2003, 31-33.
- FORMAYER, H. (2005): Persönliche Mitteilung am 09.03.2005.

- FORMAYER, H. und J. EITZINGER (2005): Persönliche Mitteilung am 13. April 2005.
- FORMAYER, H., S. EITZINGER, H. NEFZGER, S. SIMIC und H. KROMP-KOLB (2001): Auswirkungen einer Klimaveränderung in Österreich: Was aus bisherigen Untersuchungen ableitbar ist. Institut für Meteorologie und Physik, Universität für Bodenkultur, Wien.
- FU, P. and P.M. RICH (1999a): Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. Abruf am 18.08. 2004 unter <http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm#method>.
- FU, P. and P.M. RICH (1999b): The Solar Analyst 1.0 User Manual. Helios Environmental Modeling Institute, LLC.
- HÄCKEL, H. (1985): Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- ISAAKS, E.H. and R.M. SRIVASTAVA (1989): An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press.
- JOHNSTON, K., J.M. VERHEOF, K. KRIVORUCHKO and N. LUCAS (2001): Using ArcGIS Geo-statistical Analyst. ESRI, Redlands, USA.
- KLEIN, S.A. (1977): Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, Vol. 19, Pergamon Press 1977, 325-329.
- KROMP-KOLB, H., J. EITZINGER, H. FORMAYER, M. TRNKA, W. LAUBE, G. GRUSZCZYNSKI, E. STENITZER und L. GASSNER (2004): 2. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt „Bestimmung der Auswirkungen von Trockenperioden im Grünland mittels Wachstumsmodellen und klimatologische Analysen österreichischer Daten“, BOKU, Institut für Meteorologie und Physik, Wien.
- LIEBIG, W. und R.D. MUMMENTHEY (2002): ArcGIS-ArcView 8. Das Buch für den Anwender. Points Verlag Norden, Halmstad.
- LONGLEY P.A., M.F. GOODCHILD, D.J. MAGUIRE and D.W. RHIND (2005): *Geographic Information Systems and Science*. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- MONTEITH, J.L. and M. UNSWORTH (1990): *Principles of Environmental Physics*. Second Edition. Arnold, 193-195.
- MURER, E. (2005): Bericht über die Ermittlung der Feldkapazität und nutzbaren Feldkapazität der mineralischen Böden Österreichs für die Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-40 cm. Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen.
- MURER, E., J. WAGENHOFER, F. AIGNER und M. PFEFFER (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. Schriftenreihe BAW, Band 20, 72-78.
- TRNKA, M., J. EITZINGER, G. GRUSZCZYNSKI, K. BUCHGRABER, R. RESCH und A. SCHAUMBERGER (2005): Simple method for modelling permanent grassland yields in Austria. In Druck.
- VAN EIMERN, J. und H. HÄCKEL (1984): *Wetter- und Klimakunde*. 4. Auflage, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- ZEILER, M. (2001): *Exploring ArcObjects*. Vol. I – Application and Cartography, Vol. II – Geographic Data Management. ESRI, Redlands, USA.