

Abschlussbericht

ClimSoil-GIS

Projekt Nr. 100841

Räumliche Modellierung von Bodentemperaturen für Österreich

Spatial Modelling of
Soil Temperatures for Austria

Projektleitung:

Dr. Andreas Schaumberger, LFZ Raumberg-Gumpenstein

Projektpartner:

Universität für Bodenkultur

Bundesamt für Wasserwirtschaft

Bio Forschung Austria

Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH

Impressum

Herausgeber

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

Direktor

Prof. Mag. Dr. Albert SONNLEITNER

Leiter für Forschung und Innovation

Mag. Dr. Anton HAUSLEITNER

Für den Inhalt verantwortlich

die Autoren

Druck, Verlag und © 2013

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

Dieses Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanziert und ist Teil des vom Klima- und Energiefonds geförderten Forschungsprojektes ClimSoil (K09AC0K00018).

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	IV
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Material und Methoden	2
2.1 Verfügbare Geobasisdaten.....	2
2.2 Aufbereitung von Basisdaten für das Bodentemperaturmodell	3
2.2.1 Allgemeines	3
2.2.2 Räumliches Modell der Globalstrahlung	4
2.2.3 Räumliches Modell der Lufttemperatur	5
2.2.4 Räumliches Modell der Vegetationsperiode	5
2.2.5 Räumliches Modell der Referenz-Evapotranspiration.....	6
2.2.6 Räumliches Modell der Entwicklung oberirdischer Biomasse.....	6
2.2.7 Räumliches Modell des Niederschlags	8
2.2.8 Räumliches Modell der Schneebedeckung.....	9
2.2.9 Räumliches Modell des Bodenwasserhaushalts.....	9
2.3 GIS-Implementierung des Bodentemperaturmodells	10
2.3.1 Aufbereitung der standortbasierten Algorithmen im GIS	10
2.3.2 Struktur und Funktionalität der implementierten GIS-Software.....	11
3 Ergebnisse und Diskussion.....	13
3.1 Geodaten als Parameter des GIS-Bodentemperaturmodells.....	13
3.2 Evaluierung der modellierten Bodentemperaturen.....	19
3.3 Räumliche Anwendung des Bodentemperaturmodells	23
3.4 Applikationen des GIS-Bodentemperaturmodells.....	24
3.4.1 Bodentemperatursummen für phänologische Phasen.....	24
3.4.2 GIS-Bodentemperaturen für einfache lineare Modelle	26
4 Schlussfolgerungen.....	27
5 Literaturverzeichnis	29

Zusammenfassung

Anbaueignung, Entwicklung und letztendlich der Ertrag vieler landwirtschaftlicher Kulturen hängen eng mit dem Standortfaktor Bodentemperatur zusammen. Eine entsprechende Modellierung der Temperaturen in unterschiedlichen Bodentiefen bildet die Grundlage für eine Analyse des kulturartspezifischen Leistungspotenzials, der Anfälligkeit für Krankheiten und Schädlingen und deren Ausbreitungspotenzial. Für regionale Untersuchungen ist es notwendig, der räumlichen und zeitlichen Dimension von Bodentemperaturen Rechnung zu tragen. Als adäquates Werkzeug ist hier ein Geografisches Informationssystem (GIS) zu sehen, welches die zeitliche, aber vor allem die räumliche Komponente der auf die Bodentemperatur einwirkenden Faktoren von Atmosphäre, Pflanze und Boden in den Mittelpunkt einer systematischen Auseinandersetzung stellt.

Die Grundlage für die vorliegende Implementierung einer GIS-Datenbank mit Bodentemperaturen für Österreich in einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung sind Informationen über die Witterung (Temperatur, Globalstrahlung, Niederschlag, Wind, Luftfeuchte, Schneebedeckung), den Boden (Feldkapazität, Sandanteil) und die von Bewirtschaftungseffekten beeinflusste Entwicklung ausgewählter Kulturen (Grünland und Mais). Die räumliche Auflösung beträgt in der vorliegenden Entwicklung 250 Meter, die zeitliche bezieht sich auf einer täglichen Kombination der Wetterdaten mit Bodeninformationen zur Berechnung der Bodenfeuchte sowie der Entwicklung der oberirdischen Biomasse. Ausgangsbasis für die GIS-Anwendung ist ein standortbasiertes Bodentemperaturmodell, bei dem statt numerischer Einzelwerte kontinuierliche Rasteroberflächen des gesamten Untersuchungsgebietes (Österreich) auf Tagesbasis verwendet werden. Der Verwendung im Bodentemperaturmodell selbst geht demzufolge die Aufbereitung der Modellparameter zu Rasteroberflächen voraus. Benötigt werden dafür die täglichen Oberflächen von Tagesminimum-, Tagesmaximum- und Tagesmitteltemperatur der Luft, Globalstrahlung, Niederschlag, der nach Penman-Monteith berechneten und interpolierten Referenz-Evapotranspiration, der modellierten Schneebedeckung sowie statische Informationen zu Nutzbarer Feldkapazität, Sandanteil im Boden und kulturspezifischer Albedo.

Die einzelnen Parameter werden als Rasterdaten in Raster-Algebra-Operationen gemäß den Vorgaben des Bodentemperaturmodells, entwickelt von der Universität für Bodenkultur), miteinander kombiniert und resultieren in täglichen Ergebnisoberflächen für 19 verschiedene Bodenschichten und für die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche Österreich, angepasst an die Kulturarten Grünland und Mais. Pro Kulturart entstehen im Untersuchungszeitraum 2009 bis 2011 somit knapp 21.000 Bodentemperaturkarten für ganz Österreich. Eine Validierung der Ergebnisse mit Bodentemperaturbeobachtungen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe ergab einen starken Zusammenhang mit R^2 von 0,92 bis 0,98. Systematische Überschätzungen des Modells ergeben sich im Frühjahr, Unterschätzungen im Herbst. Die Höhe der Abweichungen wird wesentlich davon beeinflusst, wie abrupt Temperaturänderungen verlaufen. Große Schwankungen werden vom Modell etwas träger nachvollzogen, woraus sich die größeren Unterschiede ergeben.

Für die Aufbereitung der einzelnen Modellparameter als Geodaten ist zusätzlich zur eigentlichen Berechnung der Bodentemperaturen ein erheblicher Rechenaufwand notwendig. Die Anwendung mit Klimamodellen, bei denen üblicherweise Klimanormalperioden von mindestens 30 Jahren berücksichtigt werden, ist mit den in diesem Projekt gemachten Erfahrungen, wo lediglich drei Jahre berechnet wurden, praktisch kaum durchführbar.

1 Einleitung und Problemstellung

Die Bodentemperatur hat für viele ökologische Prozesse eine große Bedeutung. Eine Modellierung des Bodenwärmehaushalts ist allerdings kompliziert, da er von zahlreichen Faktoren abhängt. Meist befinden sich diese in Wechselbeziehung zueinander. Das Temperaturregime und der Wassergehalt des Bodens in Abhängigkeit seiner Art und Eigenschaften interagieren miteinander und beeinflussen die Wärmeströme im Boden. Die Wechselwirkung zwischen Klima und Boden sowie Faktoren wie Wärmekapazität und -leitung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Anbaueignung landwirtschaftlicher Kulturen, deren Entwicklung und Ertragsleistung (vgl. DeLucia *et al.*, 1992, Keller *et al.*, 1997).

Die Strahlungsenergie der Sonne bestimmt im Wesentlichen die Erwärmung des Bodens. Sowohl die jährlichen als auch die täglichen Schwankungen der Luft- und Bodentemperaturen hängen zum einem großen Teil von der Strahlungsbilanz, dem Nettobetrag von kurzwelliger Sonnenstrahlung und langwelliger terrestrischer Strahlung, ab (Häckel, 2005, 246f). Die Globalstrahlung und die davon abhängige Oberflächentemperatur (vor allem im topografisch komplexen Gelände mit einem ausgeprägten Hangklima ist dieser Zusammenhang besonders stark) beeinflussen die Bodentemperaturen und bilden deshalb einen elementaren Anknüpfungspunkt für Schätzmodelle (Thunholm, 1990). Der sich daraus ergebende Zusammenhang wird dafür genutzt, um aus der wesentlich häufiger und leichter verfügbaren Beobachtung der Lufttemperatur und Globalstrahlung Rückschlüsse auf die Veränderungen der Bodentemperaturen zu ziehen.

In der Literatur findet sich eine Reihe von Modellen, die von weniger komplexen Strukturen und Datenanforderungen, wie beispielsweise ein Ansatz von Krumbiegel (1973), bis hin zu anspruchsvollen Berechnungsvarianten wie z. B. jene von Suckow (1985) reichen. Abhängig von der Modellkomplexität beziehen sich die diversen Modelle auf unterschiedliche Anwendungsbereiche, die sich hauptsächlich in der räumlichen Dimension und ihres Maßstabs voneinander unterscheiden. Anwendungen für große Untersuchungsgebiete zeigen grundsätzlich eher einfache Modellstrukturen (Zheng *et al.*, 1993), während GIS-Ansätze für kleinräumige Anwendungen schon deutlich höhere Anforderungen stellen (Pape und Loffler, 2004). Bei standortbasierten Modellen, die auf komplizierte physikalische Messgrößen basieren, ist die Komplexität meist am größten, aber aufgrund fehlender Geodaten nur schwer auf Untersuchungsgebiete zu übertragen.

Im komplizierten Gefüge unterschiedlichster Umwelteinflüsse ist es schwierig, eine Ausgewogenheit zwischen Komplexität und für GIS-Applikationen erforderliche Vereinfachungen für die Berechnung von Bodentemperaturen zu finden. Neben dem Einfluss von Bodenfeuchte und Verdunstung (vgl. Boulet *et al.*, 2007) ist auch die Oberflächenbeschaffenheit für den Wärmehaushalt maßgeblich (vgl. Paul *et al.*, 2004, Plauborg, 2002). Eine Abstimmung der Modellierung auf bestimmte landwirtschaftliche Kulturen ist deshalb sinnvoll und für spezifische Anwendungen der Bodentemperaturdaten auch erforderlich (vgl. Stone *et al.*, 1999).

Die im vorliegenden Projekt entwickelte Anwendung geht auf möglichst viele Aspekte der Modellierung ein: es werden verschiedene Kulturen einbezogen (Grünland und Mais), die Berechnung basiert auf mehreren Klima- und Bodenparametern und das Untersuchungsgebiet ist mit ganz Österreich in einem Maßstab berücksichtigt, welcher eine effiziente und effektive Programmierung der Algorithmen erfordert.

2 Material und Methoden

2.1 Verfügbare Geobasisdaten

Für die geostatistische Interpolation wichtiger Klimaparameter wie Temperatur, Globalstrahlung, Evapotranspiration oder Schneebedeckung spielt das Gelände eine wichtige Rolle. Die Einbeziehung eines Digitalen Höhenmodells (DHM) in einer Auflösung von 250 Metern steht am Beginn der Aufbereitung vieler Wetterdaten. Dieser Geobasisdatensatz ist auch ein wichtiges Instrument für eine Interpolationsmethodik, bei der die Topografie explizit einbezogen wird (*Residual Kriging*).

Neben dem DHM werden zwei weitere konstante Geofachdatenbestände verwendet, die Daten über den Boden selbst beinhalten und deshalb für die Modellierung der Bodentemperatur unabdingbar sind. Zunächst handelt es sich um Informationen zur Wasserspeicherkapazität des Bodens. Vom Projektpartner Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt wurde der für die vorliegende Modellierung benötigte Parameter aus der Digitalen Bodenkarte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald (BFW) abgeleitet (Murer, 2009, Murer *et al.*, 2004). Es handelt sich dabei um die Nutzbare Feldkapazität, welche mithilfe von Pedotransferfunktionen aus Bodenkennwerten (Korngrößenverteilung, Humus- und Kalkgehalt, pH-Wert) berechnet wird. Als Differenz von Feldkapazität und Welkepunkt beschreibt die Nutzbare Feldkapazität den Anteil am Bodenwasservolumen, welcher über die Wurzeln aufgenommen und den pflanzlichen Lebensprozessen zugeführt werden kann. In den hier implementierten Modellen wird die Nutzbare Feldkapazität für zwei Bodenschichten (0 bis 20 und 20 bis 40 cm) herangezogen. In *Abbildung 1* wird die Feldkapazität für alle Flächen im Untersuchungsgebiet in einer Auflösung von 250 Metern dargestellt. Zusammen mit dem Welkepunkt ist dieser Datenbestand die Basis für die Bestimmung der Nutzbaren Feldkapazität.

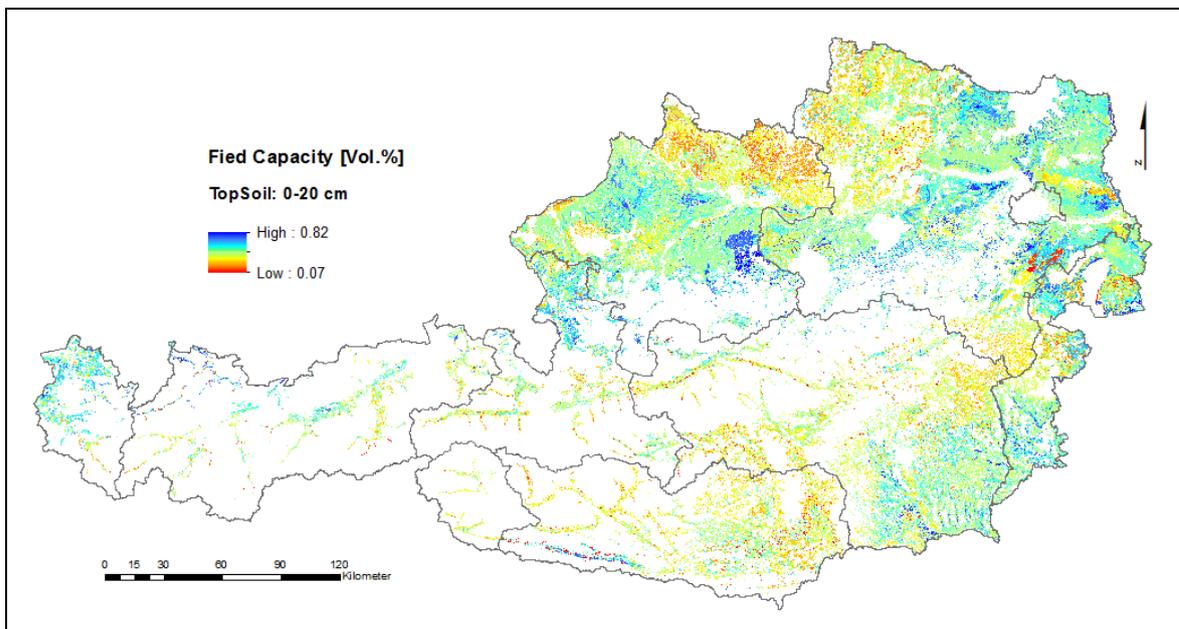


Abbildung 1: Geografische Darstellung der Feldkapazität für den Oberboden (0-20 cm) der mineralischen, landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs

Die Digitale Bodenkarte Österreichs enthält auch Informationen über die Zusammensetzung des Bodens. Die Anteile von Sand, Ton und Schluff stehen dabei zur Verfügung. Für die Berechnung der Bodentemperaturen wird der relative Anteil von Sand im Boden benötigt. *Abbildung 2* zeigt diese Geodaten am Beispiel des Oberbodens.

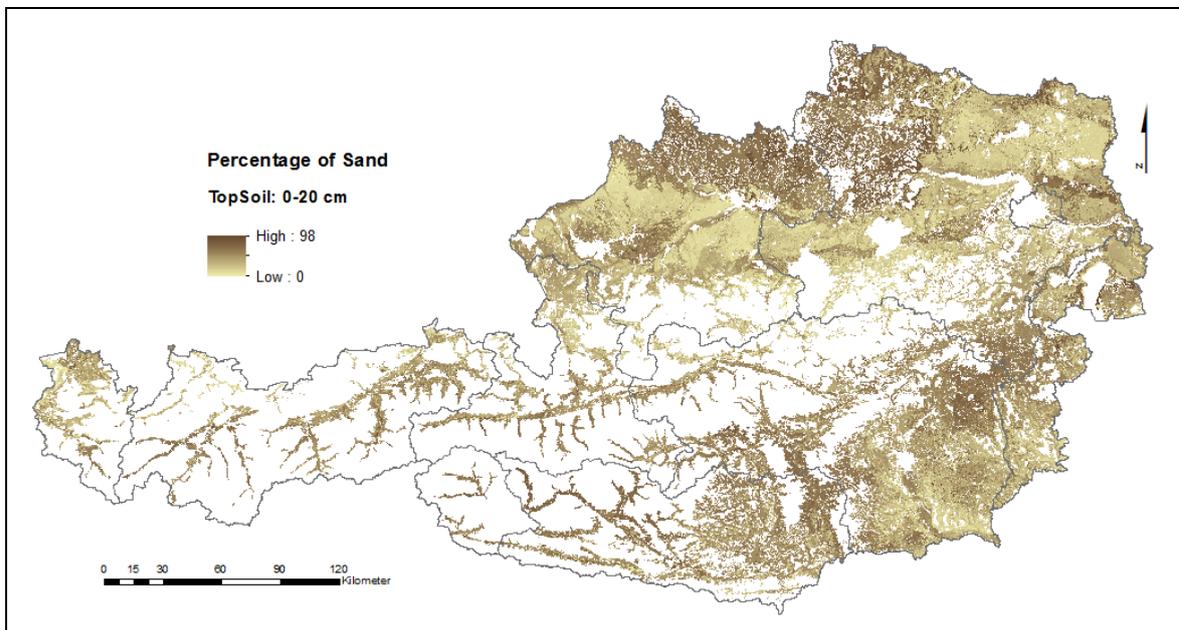


Abbildung 2: Geografische Darstellung des Sandanteils im Oberboden (0-20 cm) für die mineralischen, landwirtschaftliche genutzten Böden Österreichs

Neben konstanten Geodaten sind vor allem die dynamischen Informationen aus Wetter- und Klimabeobachtungen für die Berechnung der Bodentemperaturen maßgeblich. Die Herausforderung bei der Implementierung eines GIS-Modells besteht darin, die gesamten Eingabedaten als räumliche Informationen flächendeckend aufzubereiten. Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der räumlichen Repräsentation der einzelnen Parameter.

2.2 Aufbereitung von Basisdaten für das Bodentemperaturmodell

2.2.1 Allgemeines

Um das Bodentemperaturmodell mit Klimaszenarien betreiben zu können, ist es wichtig, darauf zu achten, dass die dynamischen, in den meisten Fällen auf Tagesbasis verfügbaren Wetterbeobachtungen problemlos durch Daten aus Klimamodellen ersetzt werden können. So sollten beispielsweise sämtliche Rechenverfahren zur räumlichen Aufbereitung der Modellparameter sowie das Bodentemperaturmodell selbst keine Abhängigkeiten zu Fernerkundungsdaten aufweisen. In *Abbildung 3* werden sämtliche Daten mit ihren Verbindungen bzw. Datenflüssen dargestellt. Bis auf die Komponente „Albedo“, welche im Modell aus Vereinfachungsgründen statisch und als konstanter Wert gesetzt wurde, handelt es sich ausschließlich um kontinuierliche, auf Tagesbasis aufbereitete Oberflächen. Sie sind das Ergebnis unterschiedlicher, meist geostatistischer Verfahren, um aus standortbasierten Beobachtungen an Wetterstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und des Hydrografischen Zentralbüros (HZB) Rasteroberflächen zu erzeugen, die in ein zentrales GIS integriert werden und Eingabeparameter des GIS-Bodentemperaturmodells darstellen.

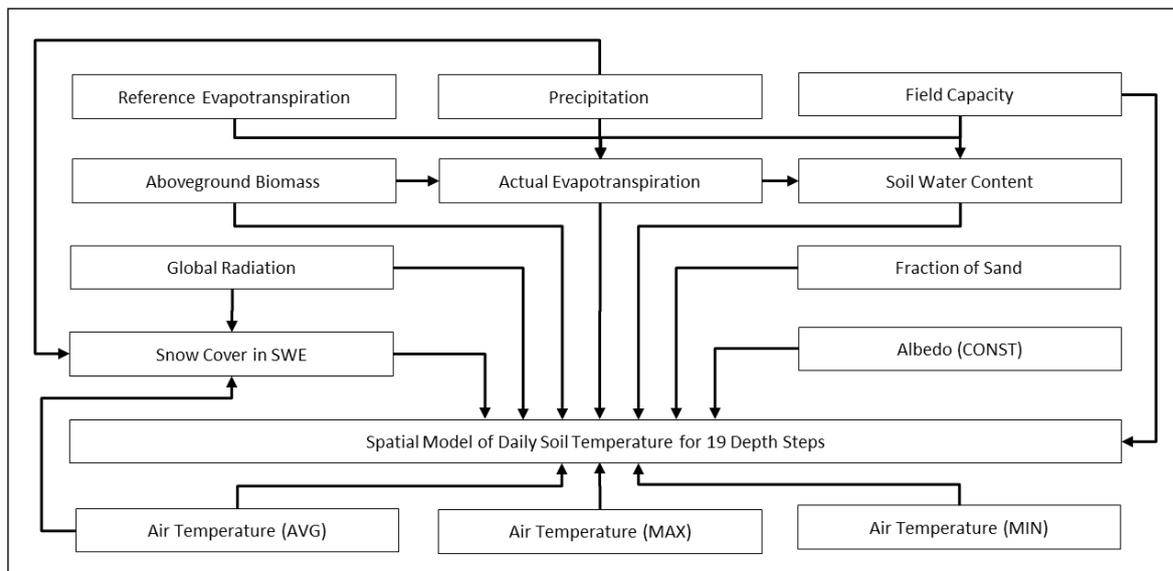


Abbildung 3: Basisdaten und Datenflüsse des GIS-Modells zur Berechnung der Bodentemperaturen

Für die Beschreibung der für die Bodentemperaturen relevanten Bodenfeuchte werden die Oberflächen der Referenz-Evapotranspiration, des Niederschlags, der Feldkapazität sowie der oberirdischen Biomasse miteinander kombiniert. Das Ergebnis sind aktuelle Evapotranspiration und Bodenwassergehalte, die direkt in das Bodentemperaturmodell eingehen.

Globalstrahlung, kulturartenabhängige konstante Albedo, Sandanteil, Schneebedeckung und verschiedene Lufttemperaturdaten sind weitere Parameter der GIS-Implementierung. Darüber hinaus gehen auch die Datenoberflächen der Feldkapazität und der oberirdischen Biomasse, welche bereits zur Berechnung der Bodenfeuchte genutzt werden, zusätzlich noch direkt in das GIS-Modell ein.

Die räumliche Aufbereitung eines jeden einzelnen Parameters bedarf sorgfältig implementierter Modelle, deren Methoden und Ergebnisse in Schaumberger (2011) detailliert beschrieben werden. Diese Veröffentlichung ist Teil des vorliegenden Abschlussberichtes. Die Beschreibungen und Diskussionen zu den einzelnen Modellkomponenten werden deshalb hier nicht wiederholt, es erfolgt lediglich ein kurzer Überblick der Thematik mit einer genauen Angabe der in Schaumberger (2011) Bezug nehmenden Kapitel. Eine detaillierter Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Literatur zur Darstellung des aktuellen Stands der Wissenschaft sowie einer Diskussion von verschiedenen Methoden findet sich ebenfalls in den genannten Kapiteln von Schaumberger (2011).

2.2.2 Räumliches Modell der Globalstrahlung

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.2.1 (Seite 31 bis 44), die Ergebnisse im Kapitel 3.1 (Seite 119 bis 129) beschrieben.

Mit einem Strahlungsmodell unter Einbeziehung des Digitalen Höhenmodells (DHM) können topografische Effekte wie Hangneigung und Exposition aus der geometrischen Beziehung zwischen Strahlungswinkel und bestrahlter Oberfläche abgeleitet werden. Ein daraus errechneter Faktor beschreibt zunächst die Variabilität der maximal möglichen Strahlung im Gelände. Allerdings verschiebt sich der Anteil von diffuser und direkter Strahlung mit variierendem Bewölkungsgrad. Die Unterschiede zwischen beiden Strahlungskomponenten sind bei wolkenlosen Bedingungen aufgrund des geringen diffusen

Anteils erheblich und gleichen sich mit zunehmender Bewölkung an. Mithilfe einer entsprechenden Kalibrierung auf Basis langjähriger Mittelwerte wurde ein allgemeiner Zusammenhang beschrieben, der in Verbindung mit der interpolierten aktuellen Strahlung eine entsprechende Anpassung des Strahlungsfaktors bewirkt. Wird dieser auf die geostatistisch interpolierte Oberfläche der beobachteten Strahlung aufgetragen, erfolgt eine Berücksichtigung des Geländes in Abhängigkeit des Anteiles von diffuser und direkter Strahlung (Schaumberger, 2011, 240).

2.2.3 Räumliches Modell der Lufttemperatur

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.2.2 (Seite 44 bis 60), die Ergebnisse im Kapitel 3.2 (Seite 130 bis 141) beschrieben.

Die Temperatur steht in enger Beziehung zur Globalstrahlung. Die Einbeziehung des Geländes bildet auch hier den Schwerpunkt der Bearbeitung. Die stark ausgeprägte Höhenabhängigkeit wird bei der Interpolation mittels *Residual Kriging* berücksichtigt. Der höhenabhängige Anteil der Temperatur wird dabei entsprechend dem Gradienten auf ein DHM aufgetragen, verbleibende Residuen geostatistisch interpoliert und anschließend mit dem höhenabhängigen Anteil kombiniert.

Um das Auftreten von Inversionen vor allem in den Wintermonaten berücksichtigen zu können, wird das Untersuchungsgebiet in zwei seehöhenabhängige Gebiete aufgetrennt. Die Interpolation mittels *Residual Kriging* wird für jedes Gebiet separat vorgenommen, die Unterschiede des Höhenzusammenhangs der Temperatur finden damit implizit Berücksichtigung. Bei der Zusammenführung der zwei Gebiete wird ein glättender Übergangsbereich geschaffen. Die Anpassung an komplexes Gelände wird mit dem oben beschriebenen Globalstrahlungsfaktor erreicht. Voraussetzung dafür ist die Untersuchung des Zusammenhangs von Temperaturtagesgang und Globalstrahlung, der aus langjährigen Beobachtungsdaten abgeleitet wird. Ein Zu- oder Abschlag auf die Oberfläche der Temperatur bewirkt eine den Strahlungsverhältnissen (Bewölkung, Geländeabschattung) entsprechende Korrektur (Schaumberger, 2011, 240f).

Zusätzlich zu den in Schaumberger (2011) dargestellten Interpolationen von Tagesmittel- und Tagesminimumtemperatur wird nach der gleichen Methode das Tagesmaximum berechnet, da im Bodentemperaturmodell sowohl Minimum- als auch Maximumtemperatur eingehen.

2.2.4 Räumliches Modell der Vegetationsperiode

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.3.1 (Seite 87 bis 94), die Ergebnisse im Kapitel 3.6 (Seite 165 bis 187) beschrieben.

Die Vegetationsperiode beschreibt den zeitlichen Rahmen, in dem die thermischen Voraussetzungen für die Entwicklung der Vegetation gegeben sind. Grundlage der Modellierung sind die Oberflächen der Temperatur, welche hinsichtlich des Erfüllens verschiedener thermischer Kriterien sowie dem Unter- bzw. Überschreiten von Temperaturschwellen untersucht wurden. Als klimatologische Vegetationsperiode geht dieses Modell nicht auf artenspezifische thermische Voraussetzungen ein, sondern beschreibt Beginn und Ende in Abstimmung auf die in der Literatur gebräuchlichen Abgrenzungskriterien. Die räumliche Repräsentation ermöglicht zudem eine Wahrnehmung der Veränderungen im Raum. Das

Modell der oberirdischen Biomasse (Abschnitt 2.2.6) benötigt den berechneten Vegetationsbeginn zur Festsetzung des Starttages der Biomassezunahme im Grünland.

Für die Festsetzung des Vegetationsbeginns von Maiskulturen wird der in Schaumberger (2011, 89ff) beschriebene kombinierte Ansatz MTD mit folgenden Settings verwendet: Das Zeitfenster beträgt 10 Tage, in dem die Tagesmitteltemperatur an fünf aufeinanderfolgenden Tagen mindestens 10 °C erreichen muss. Insgesamt darf der Mittelwert der Temperatur über die gesamte 10-tägige Periode nicht unter 12 °C fallen und außerdem an keinem Tag weniger als 3 °C betragen. Die Festsetzung dieser Werte erfolgt nach visueller Plausibilitätsprüfung der räumlichen Verteilung des maisspezifischen Vegetationsbeginns durch Ackerbauexperten am LFZ Raumberg-Gumpenstein sowie aus Literaturangaben (vgl. Zscheischler *et al.*, 1990)

2.2.5 Räumliches Modell der Referenz-Evapotranspiration

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.2.3 (Seite 61 bis 74), die Ergebnisse im Kapitel 3.3 (Seite 142 bis 152) beschrieben.

Die Referenz-Evapotranspiration ist eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Bodenwasserbilanz und die Grundlage für deren räumliche Implementierung. Sie stellt die unter gegebenen atmosphärischen Bedingungen erforderliche Verdunstungsmenge dar, bezieht sich auf eine exakt definierte Referenzgrasoberfläche und setzt eine unlimitierte Wasserverfügbarkeit voraus. Globalstrahlung, Temperatur, relative Luftfeuchte und Wind werden an den ZAMG-Messstationen nach der FAO-Penman-Monteith-Gleichung kombiniert und mittels *Residual Kriging* interpoliert.

2.2.6 Räumliches Modell der Entwicklung oberirdischer Biomasse

Im vorliegenden Projekt wird die Biomasseentwicklung von zwei Kulturarten exemplarisch mittels vereinfachter Modellansätze berechnet. Dabei wird der im FAO-Bodenwasserbilanzmodell erforderliche Parameter „Pflanzenfaktor“ (Crop Coefficient) herangezogen. Dieser Wert kann sowohl bei der Bilanzierung der Bodenfeuchte als auch bei der Entwicklung der oberirdischen Biomasse eingesetzt werden. Bei den Kulturen handelt es sich um Grünland und Mais; es sind dies jene Kulturen, welche auch für die praktische Anwendung von Bodentemperaturen von den Projektpartnern herangezogen werden.

Für die Beschreibung dieser Entwicklung sind die Eckpunkte der wichtigsten phänologischen Phasen zeitlich sowie räumlich festzuhalten. Im Grünland spielt die Aufwuchsdauer eine zentrale Rolle. Dazu braucht es Informationen über den Vegetationsbeginn (vgl. Abschnitt 2.2.4), die Anzahl der Schnitte sowie die Schnittzeitpunkte. In *Abbildung 4* wird der schematische Verlauf des Grünland-Pflanzenfaktors für ein Dreischnittsystem dargestellt. Nach dem letzten Schnitt erfolgt im Grünland meist eine Nachnutzung in Form von Weidehaltung, ein erhöhter und konstant verlaufender Pflanzenfaktor berücksichtigt dies. Für die Schätzung der Schnittzeitpunkte wird ein auf Beobachtungen beruhendes statistisches Verfahren genutzt, das in Schaumberger (2011, 100ff) ausführlich beschrieben wird.

Nach Angaben und Erfahrungen des Projektpartners Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur (BOKU), wird der Pflanzenfaktor durch Multiplikation mit dem Wert 5000 zur vereinfachten Beschreibung der oberirdischen Biomasse [kg] von Grünland genutzt. Für die Kulturart Mais wird ebenfalls der Verlauf des Pflanzenfaktors für die Festsetzung der oberirdischen Biomasse, hier erfolgt allerdings eine Multiplikation des Faktors

mit dem Wert 8000 (gemäß den Vorgaben des Instituts für Meteorologie der BOKU), verwendet. Aus Vereinfachungsgründen werden für die einzelnen phänologischen Phasen (in *Abbildung 5* werden sie als d_1 bis d_5 bezeichnet) konstante Perioden gesetzt. Als variabel sind lediglich der maisspezifische Vegetationsbeginn (vgl. Abschnitt 2.2.4) sowie die Länge der letzten Phase, die mit 15. November statisch begrenzt ist, definiert.

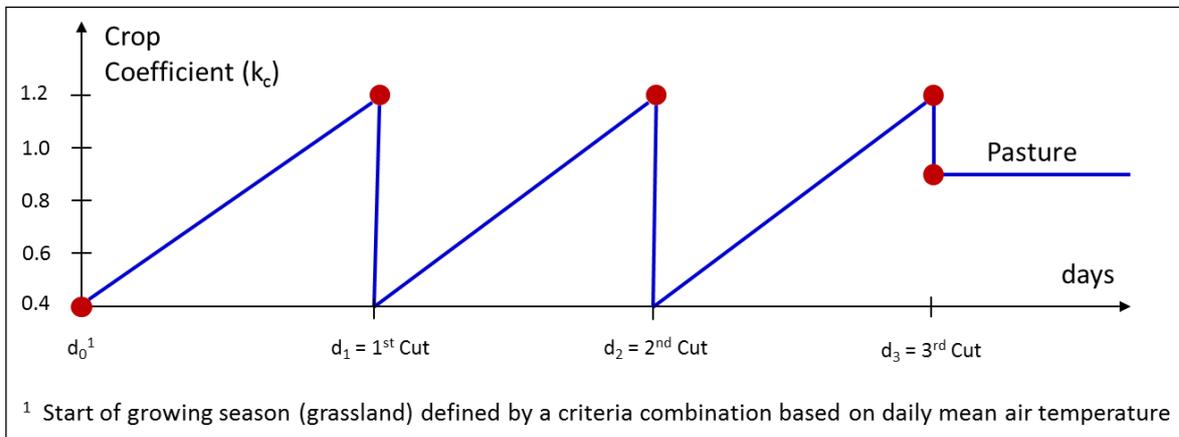


Abbildung 4: Schematischer Verlauf des Pflanzenfaktors für die Kulturart Grünland (Dreischneitsystem)

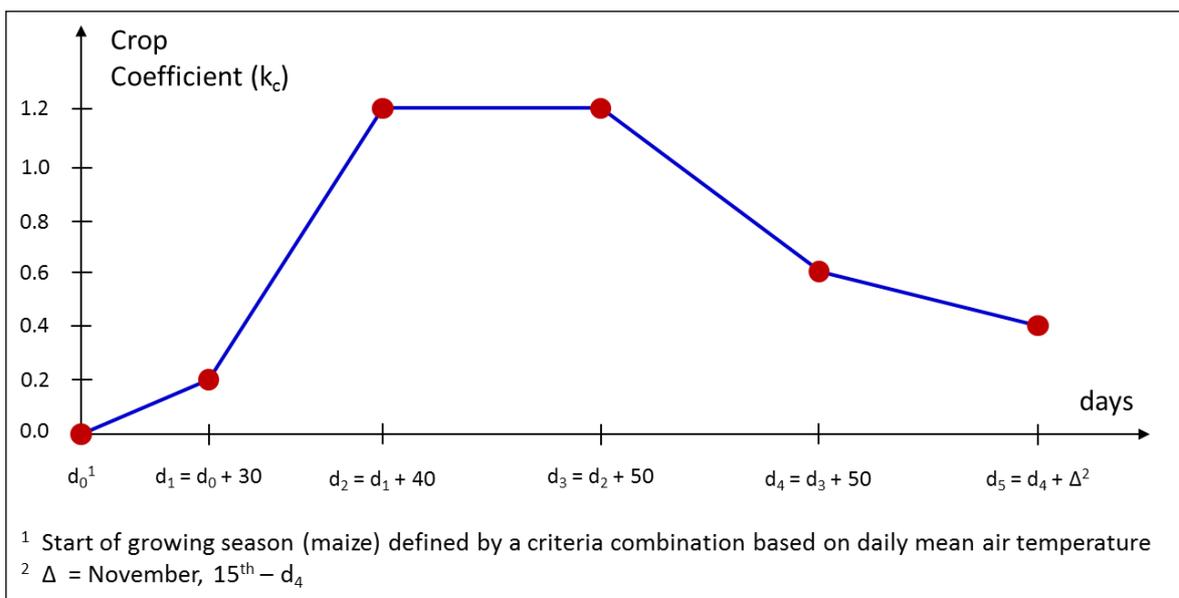


Abbildung 5: Schematischer Verlauf des Pflanzenfaktors für die Kulturart Mais

Die räumliche Implementierung der beiden variablen Phasenabschnitte stellen eine gewisse Herausforderung dar, da die Raster-Algebra-Algorithmen die Variabilität in jeder einzelnen Zelle berücksichtigen müssen. Dem sehr stark vereinfachten Modell wird eine gewisse Stabilität verliehen, indem der Vegetationsbeginn nicht Jahr für Jahr neu festgesetzt, sondern aus einem 20-jährigen Durchschnitt berechnet wird. Die Biomasseentwicklung der Kulturart Mais erfolgt demnach für alle drei Untersuchungsjahre mit den gleichen auf Tagesbasis berechneten Rasteroberflächen des Pflanzenfaktors.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf dieses Faktors zwischen den einzelnen Eckpunkten phänologischer Entwicklung. Die Faktorwerte sowie die Festsetzung der Dauer für die einzelnen Phasen (Initialisierungsphase d_1 , Entwicklungsphase d_2 , mittlere Phase d_3 , späte Phase d_4 , Endphase d_5) erfolgen in Anlehnung an Allen *et al.* (1998, 103ff).

Im Gegensatz zu Grünlandflächen, ist der Maisackerboden zu Beginn der Entwicklung vollständig vegetationslos, der Pflanzenfaktor (K_c) beginnt bei der Phase d_0 mit 0. Da zur Berechnung des Bodenwasserhaushalts die Referenz-Evapotranspiration (ET_0) einer Kulturart mittels Faktormultiplikation ($ET_0 * K_c$) angepasst wird, reduziert sich die Evapotranspiration (in diesem Fall ist es lediglich die Evaporation) bei Faktorwerten von 0 (Zeitraum vor d_0) ebenfalls auf 0. Dies entspricht nicht der Realität, es muss daher eine Korrektur erfolgen. In *Abbildung 6* wird diese Korrektur am Beispiel des Jahres 2009 gezeigt. Neben dem Pflanzenfaktor ist hier auch der Bodenwassergehalt aufgetragen, um den hier vorgenommenen methodischen Ansatz zu illustrieren.

Als Annahme wird festgesetzt, dass bei einem Unterschreiten des Pflanzenfaktors von 0,2 die Korrektur wirksam wird, um den entsprechenden Verdunstungsanteil des offenen Bodens (Evaporation) auch bei einer nicht bzw. kaum vorhandenen Vegetationsbedeckung berücksichtigen zu können. Bei der Korrektur werden zwei Zustände unterschieden: feuchter Boden – der Bodenwassergehalt ist größer gleich 90 % der Feldkapazität und trockener Boden – der Bodenwassergehalt sinkt unter den Schwellenwert von 90 % der Feldkapazität. In Perioden, in denen der Boden ausreichend feucht ist, erfolgt eine uneingeschränkte Verdunstung – der Pflanzenfaktor geht mit dem Wert 1 in die Berechnung der kulturangepassten Evapotranspiration (vgl. Abschnitt 2.2.9) ein. Wird es trocken, fällt der Pflanzenfaktor auf 0,2 und entspricht damit den Pflanzenfaktoren bis zum Start der Entwicklungsphase. Korrekturen werden nur vor dem Start der Entwicklungsphase d_1 vorgenommen, ab diesem Zeitpunkt wird der originale Pflanzenfaktorwert verwendet.

Für die Berechnung der oberirdischen Mais-Biomasse (Pflanzenfaktor * 8000) wird natürlich keine Korrektur vorgenommen, da vor dem Start der Initialisierungsphase (d_0 = Vegetationsbeginn) keine Biomasse oberhalb des Bodens existiert.

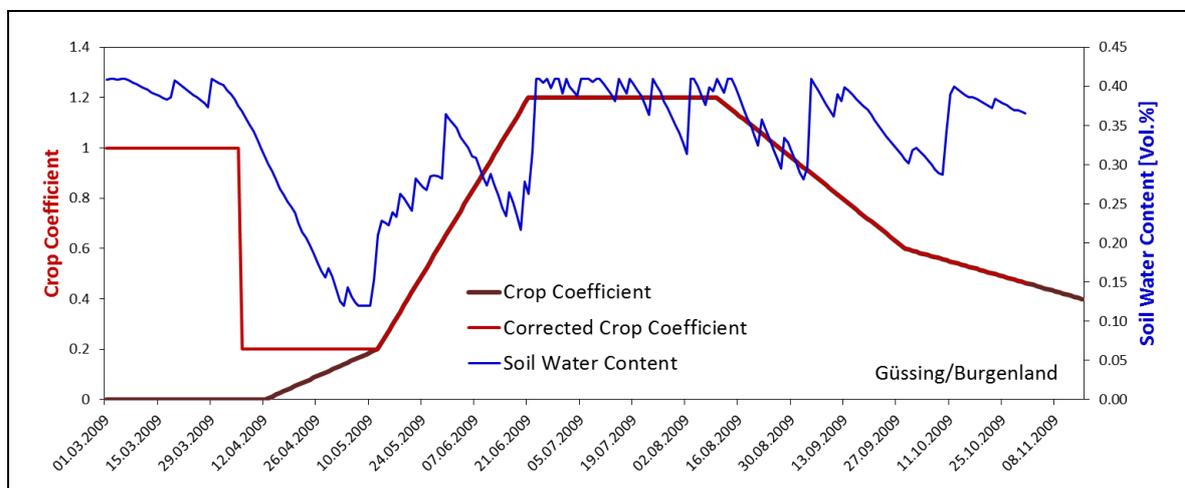


Abbildung 6: Korrektur des Mais-Pflanzenfaktors am Beginn der Vegetationsperiode

2.2.7 Räumliches Modell des Niederschlags

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.2.4 (Seite 75 bis 79), die Ergebnisse im Kapitel 3.4 (Seite 153 bis 156) beschrieben.

Der Niederschlag ist im Vergleich zur Temperatur kein kontinuierliches Phänomen und weist bei der Berechnung auf Tagesbasis kaum einen Höhenzusammenhang auf. Eine Interpolation ist deshalb äußerst schwierig und vor allem bei Konvektivniederschlägen fehlerbehaftet. Die Interpolation mittels *Ordinary Kriging* erfährt in dieser Arbeit dahin

gehend eine Aufwertung, dass neben den etwa 260 ZAMG-Messstationen noch zusätzlich etwa 1180 Stationen des Hydrografischen Zentralbüros (HZB) einbezogen werden. Die mittlere Nachbarschaftsdistanz verringert sich dadurch von 10 auf unter 5 km. Es entsteht ein dichtes Netz an Stützstellen, welches auch kleinräumige Niederschlagsereignisse besser erfassen kann.

2.2.8 Räumliches Modell der Schneebedeckung

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.2.5 (Seite 79 bis 86), die Ergebnisse im Kapitel 3.5 (Seite 157 bis 164) beschrieben.

Aus den entwickelten räumlichen Modellen von Globalstrahlung, Temperatur und Niederschlag wird ein einfaches Schneebedeckungsmodell abgeleitet. In den Bergregionen ist fallweise mit einer länger ins Frühjahr reichenden Schneebedeckung zu rechnen. Auf Basis von Schneewasseräquivalenten werden stark vereinfachte Prozesse der Schneeakkumulation und -schmelze simuliert und in täglichen Rasteroberflächen festgehalten.

2.2.9 Räumliches Modell des Bodenwasserhaushalts

Die Methodik wird in Schaumberger (2011) im Kapitel 2.4.1 (Seite 105 bis 111), die Ergebnisse im Kapitel 3.9 (Seite 209 bis 216) beschrieben.

Die Bodenwasserbilanz und eine damit mögliche Beurteilung der Wasserverfügbarkeit ist die Voraussetzung für eine Auswertung der Beziehung von Wetter und Bodenfeuchte. Ausgehend von den Oberflächen des Niederschlags und der Referenz-Evapotranspiration wird ein einfaches Modell der FAO implementiert. Zunächst erfolgt eine Anpassung der Referenz-Evapotranspiration an das Wirtschaftsgrünland und an die Kulturart Mais, indem ein Pflanzenfaktor die Änderung zur Referenzgrasoberfläche bewirkt. Auf Grundlage der Aufwuchsdauer im Grünland und statischer Entwicklungsperioden beim Mais wurde dafür ein räumliches Modell entwickelt, welches eine lineare Veränderung des Pflanzenbestandes zwischen den einzelnen phänologischen Phasen annimmt (vgl. Abschnitt 2.2.6).

Die Oberfläche der Nutzbaren Feldkapazität ergibt in Kombination mit angepasster Grünland- bzw. Mais-Evapotranspiration, Niederschlag, Tiefenversickerung und Bodenwasserabsenkung die aktuelle Evapotranspiration sowie den Bodenwassergehalt als Resultat der Bilanz. Während der Wintermonate (November bis Februar) wird die aktuelle Evapotranspiration auf einen konstanten Wert von 0.1 gesetzt. Dies hat zwei Gründe: a) die Evapotranspiration unter winterlichen Bedingungen mit teilweiser Schneebedeckung ist schwierig bzw. nur unter großem Aufwand zu berechnen; b) sie spielt bei Anwendungen mit Fokus auf die Vegetationsperiode eine vergleichsweise geringe Rolle.

Aufgrund der räumlichen Implementierung werden weitere Vereinfachungen angebracht. So basiert beispielsweise die Interzeptionsverdunstung auf einer einfachen linearen Beziehung zum Pflanzenfaktor. Der Kapillarhub aus dem Grundwasser sowie der Oberflächenabfluss können aufgrund fehlender Basisdaten bzw. Modelle nicht berücksichtigt werden.

Der Bodenwassergehalt geht neben der aktuellen Evapotranspiration ebenfalls direkt als Parameter in das Bodentemperaturmodell ein. Dieser tägliche Wert ergibt sich aus der Differenz von Feldkapazität und Bodenwasserabsenkung des jeweiligen Tages.

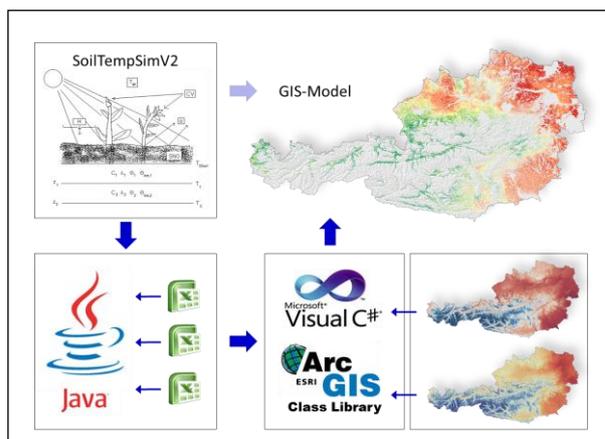
2.3 GIS-Implementierung des Bodentemperaturmodells

2.3.1 Aufbereitung der standortbasierten Algorithmen im GIS

Die methodische Grundlage zur Berechnung von Bodentemperaturen bildet ein standortbasiertes, numerisches Modell des Projektpartners BOKU. Eine detaillierte Beschreibung wird vom Projektpartner vorgenommen und deshalb im Rahmen des vorliegenden Projektteiles nicht diskutiert. Die Erweiterung des standortbasierten Modells zu einer GIS-Applikation bedingt die Aufbereitung sämtlicher Modellparameter als räumliche Datensätze, d. h. kontinuierliche Oberflächen im Rasterdatenformat für das gesamte Untersuchungsgebiet. Im vorangegangenen Kapitel 2.2 werden die einzelnen Parameter angeführt, für eine tiefer gehende Auseinandersetzung jedoch auf Schaumberger (2011) verwiesen.

Der hier bearbeitete Projektteil weist zwei Schwerpunkte auf: a) die Aufbereitung der Modellparameter im GIS sowie b) die Übertragung des standortbasierten Modells in ein GIS mit Hilfe von Algorithmen auf Basis von GIS-Programmbibliotheken.

Die Programmierung für die Aufbereitung der Modellparameter und die räumliche Berechnung der Bodentemperaturen basiert auf Algorithmen, welche in einem komplexen GIS-System integriert wurden. Das Bodentemperaturmodell selbst bedurfte einer umfassenden Neugestaltung des von der BOKU für das standortbasierte Modell entwickelten Programmcodes. In *Abbildung 7* wird das Konzept dieser Modellübertragung veranschaulicht.



Aus einem in Java implementierten mathematischen, standortbasierten Modell, welches auf Excel-Daten zugreift, wird eine GIS-Applikation.

Mit Hilfe der Klassenbibliothek ArcObjects von ESRI ArcGIS entsteht in der Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio und der Programmiersprache Visual C# ein Werkzeug, das auf Basis von Geodaten kontinuierliche Oberfläche der Bodentemperaturen für 19 verschiedene Bodentiefen generiert.

Abbildung 7: Grundlagen und Umgebung für die Entwicklung des GIS-Bodentemperaturmodells

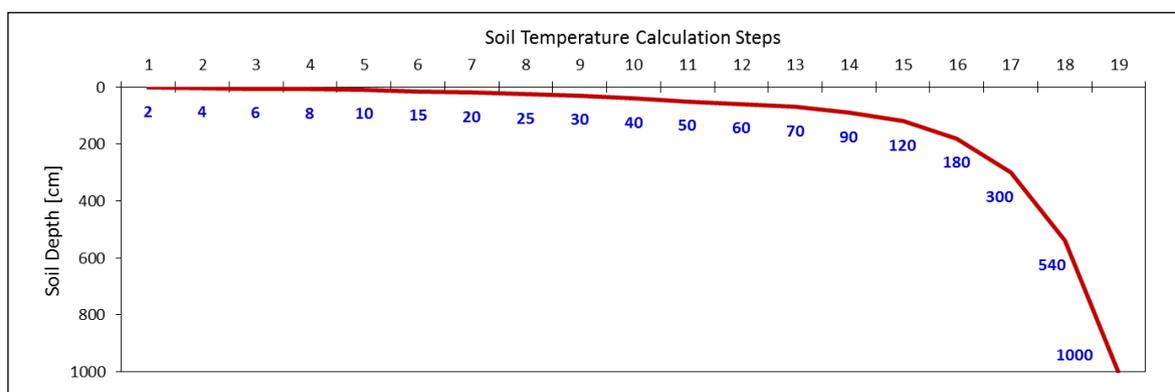


Abbildung 8: Berechnung der Bodentemperaturen für 19 verschiedene Bodentiefen

Die angesprochenen 19 Bodentiefen sind nicht linear verteilt, sondern folgen den in *Abbildung 8* dargestellten Berechnungsstufen. Im Zuge der täglichen Berechnung entsteht für jede dieser Bodentiefen eine Österreichkarte in 250-Meter-Auflösung mit der räumlichen Verteilung der Bodentemperaturen. Die Berücksichtigung einer Bodentiefe von 10 Metern ist deshalb notwendig, da die Bestimmung von Randbedingungen für einen korrekten Modelllauf unumgänglich sind. Aus der Größe des Untersuchungsgebietes (Österreich), dessen Auflösung (250 Meter) und der großen Zahl unterschiedlicher Bodentiefen ergibt sich ein System, das eine ressourcen- und zeitintensive Anwendung der einzelnen Berechnungs- und Datenmanagement-Algorithmen bedingt.

Aufgrund der enormen Datenmengen, die für jeden Rechendurchgang verarbeitet werden müssen, ergibt sich die zwingende Notwendigkeit einer effektiven und effizienten Gestaltung der Algorithmen, welche die vorhandenen Ressourcen möglichst schonend beanspruchen bzw. technische Limitierungen (Arbeitsspeicher, Prozessorgeschwindigkeit, Zugriffszeiten auf persistente Speichermedien, usw.) bewältigen müssen.

Im vorliegenden Projekt wurden die Bodentemperaturen für zwei verschiedene Kulturarten, Grünland und Mais, berechnet. Weiters werden zwei Bodenhorizonte, der Oberboden mit 0 – 20 cm und der Unterboden 20 – 40 cm, berücksichtigt. Als Vereinfachung werden die beiden Bodenschichten in ihrer gesamten Ausdehnung als Wurzelraum angenommen. Nach Baeumer (1978, 44f) befindet sich die Hauptmasse der Wurzeln verschiedener Kulturpflanzen oberhalb von 40 cm Tiefe, wobei der Boden unter einer Grasnarbe besonders intensiv nahe der Oberfläche durchwurzelt ist. Die Diversifikation für verschiedene Kulturarten und Bodenhorizonte vergrößert sowohl das zu manipulierende Datenvolumen als auch die Rechenlaufzeit.

Die Rasterdaten für Zwischenergebnisse werden in Arrays abgelegt und nach Möglichkeit im Arbeitsspeicher vorgehalten. Damit wird eine signifikante Beschleunigung der Rechenzeit erreicht, die in Anbetracht des enormen Datenumfanges notwendig ist. Eine persistente Speicherung erfahren lediglich die Endergebnisse sowie jene Zwischenergebnisse, welche Informationen enthalten, die für den Start des Programmes zu einem beliebigen Datum vorhanden sein müssen. Dazu gehört zum Beispiel der Bodenfeuchtwert des Vortages, ohne dem eine Fortschreibung der Temperaturkurve nicht möglich wäre.

2.3.2 Struktur und Funktionalität der implementierten GIS-Software

Die Funktionalität der im vorliegenden Projekt entwickelten GIS-Software ist durch das von der BOKU entwickelte standortbasierte Bodentemperaturmodell vorgegeben. Die GIS-Algorithmen nutzen statt numerischen Variablen Rasterdaten und müssen diese im Rahmen von Raster-Algebra-Operationen miteinander kombinieren.

Abbildung 9 zeigt das Klassendiagramm der Anwendung, wobei hier lediglich die Berechnung der Bodentemperaturen selbst angeführt sind. Die Programmlogik befindet sich in der zentralen Klasse „SoilTempModel“, Datenzugriff und Projektumgebung in zwei davon getrennten Klassen, nämlich in „DataAccess“ und „ProjectEnvironment“. Die räumliche Aufbereitung sämtlicher Wetterdaten wie sie in Schaumberger (2011) beschrieben ist, wird hier aufgrund der Komplexität und des großen Umfangs nicht dargestellt. In diesem Zusammenhang wird auf Schaumberger (2007) verwiesen; hier finden sich zusätzlich zu den methodischen Ausführungen in Schaumberger (2011) auch technische Beschreibungen zur Implementierung diverser Modellparameter. Im Klassendiagramm der *Abbildung 9* finden sich auch zwei Klassen, welche die Implementierung von Anwendungen enthalten, die für Projektpartner umgesetzt wurden. Dabei handelt es sich zum einen um ein Temperatur-

summenmodell für die Berechnung von phänologischen Phasen des Maiswurzelschäfers und zum anderen um die Implementierung einer linearen Regressionsgleichung mit den Rasteroberflächen von Bodentemperatur und Bodenwassergehalt als unabhängige Modellvariablen für die Berechnung des C/N-Verhältnisses.

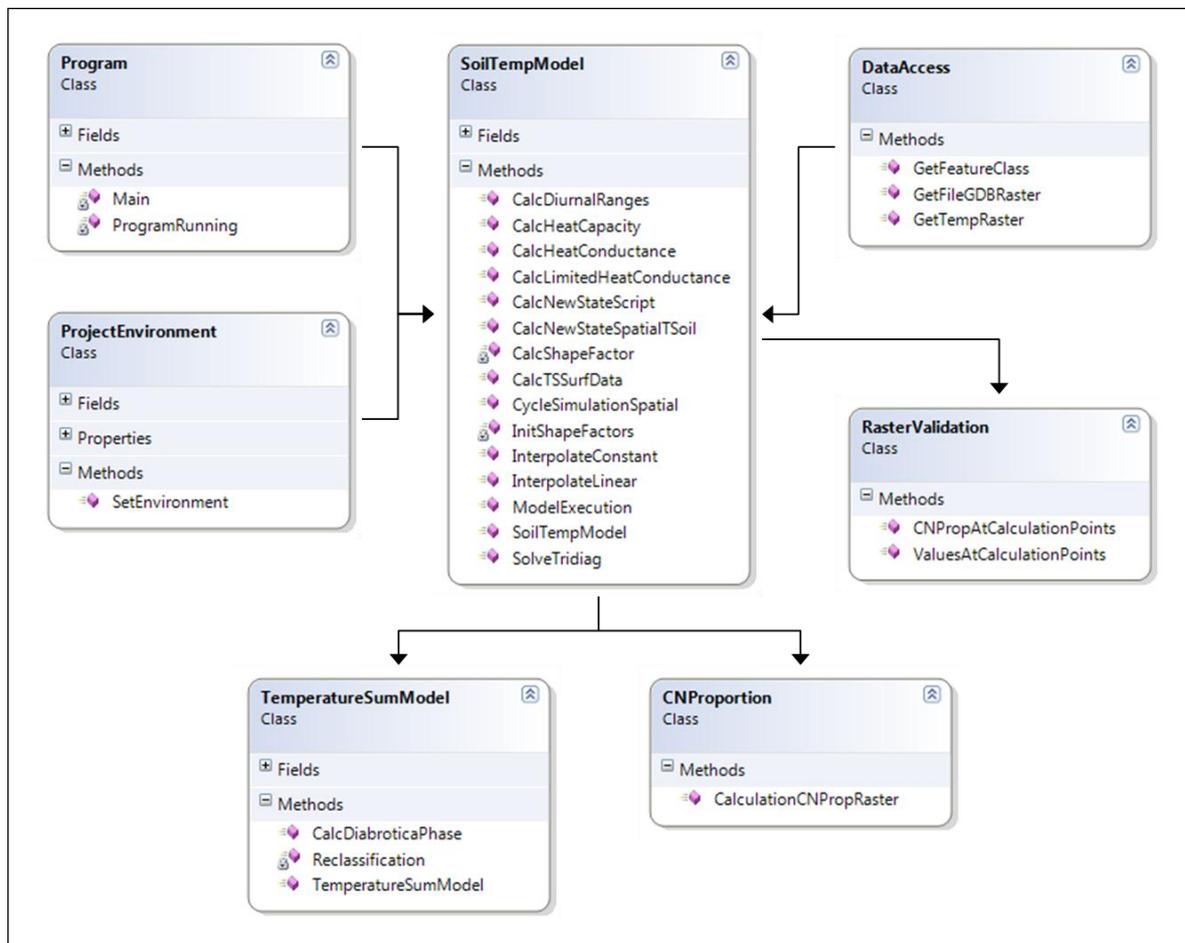


Abbildung 9: Klassendiagramm des GIS-Bodentemperaturmodells

Für die Berechnung von Bodentemperaturen in 19 verschiedenen Bodenhorizonten (vgl. *Abbildung 8*) für die landwirtschaftliche Nutzfläche Österreichs benötigen die in *Abbildung 9* angeführten Methoden eine Rechenzeit von durchschnittlich 60 Minuten. Bei einem Untersuchungszeitraum von drei Jahren (2009 bis 2011) bedeutet dies eine Laufzeit von über 1.100 Stunden, das sind etwas mehr als 45 Tagen ununterbrochene Rechenzeit. Da eine derart lange Laufzeit auf einem gewöhnlichen Bürocomputer- und Netzwerksystem nicht ohne unvorhersehbare Unterbrechungen betrieben werden kann, müssen hier noch zusätzliche Verzögerungen durch Systemneustarts berücksichtigt werden. Gemäß den gemachten Erfahrungen im Projekt bedarf es damit einer Bruttorechenzeit von ca. 50 bis 60 Tagen, die nicht nur technische Ressourcen, sondern auch Humanressourcen durch die notwendige Überwachung bindet.

Dieser zeitliche Aufwand berücksichtigt noch in keiner Weise die Aufbereitung der einzelnen Modellparameter (Wetterdaten) als kontinuierliche Oberflächen. Dazu müssen pro Untersuchungsjahr noch zusätzlich etwa 200 Stunden veranschlagt werden. Außerdem bezieht sich die Rechenzeit auf nur eine Kulturart. Im vorliegenden Projekt werden die Bodentemperaturen für Grünland und Mais ermittelt, d. h. die Rechenzeit für das Bodentemperaturmodell verdoppelt sich und beträgt mehr als 100 24-Stunden-Tage.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Geodaten als Parameter des GIS-Bodentemperaturmodells

Neben den Oberflächen der Bodentemperatur selbst sind die räumlichen Modelle der einzelnen Modellparameter ebenfalls als Projektergebnisse zu werten. In den folgenden Abschnitten werden Beispiele der gerechneten Oberflächen gezeigt, die in Schaumberger (2011) detailliert beschrieben und diskutiert werden. Die genannte Veröffentlichung ist somit ein wichtiger Bestandteil des hier vorliegenden Berichtes. Die hier dargestellte Aufbereitung der Modellparameter für die Berechnung der Bodentemperaturen hat somit lediglich einen zusammenfassenden Charakter.

Die Daten sind in ArcGIS FileGeodatabases abgelegt und werden von den Algorithmen des Bodentemperaturmodells gelesen und in Raster-Algebra verarbeitet. Die daraus gewonnenen Ergebnisse werden wiederum als Raster in FileGeodatabases gespeichert.

Globalstrahlung

Die Globalstrahlung mit der Möglichkeit einer expliziten Berücksichtigung der Topografie ist für viele weitere Interpolationen wie Temperatur, Evapotranspiration, Schneebedeckung und Bodenwassergehalt eine wichtige Grundlage (Schaumberger, 2011). Zur Evaluierung dieses Geodatenbestandes wurde eine *Leave-One-Out-(LOO)-Kreuzvalidierung* an ausgewählten Oberflächen der Globalstrahlung für verschiedene Monate an 226 Messstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt. Sie ergab ein Bestimmtheitsmaß von 0,95 und einen *RMSE (Root Mean Square Error)* von $1,67 \text{ MJ m}^{-2}$. In *Abbildung 10* wird die Globalstrahlung am 20. Juli 2009 als Beispiel der täglich berechneten Oberflächen im Untersuchungszeitraum 2009 bis 2011 gezeigt.

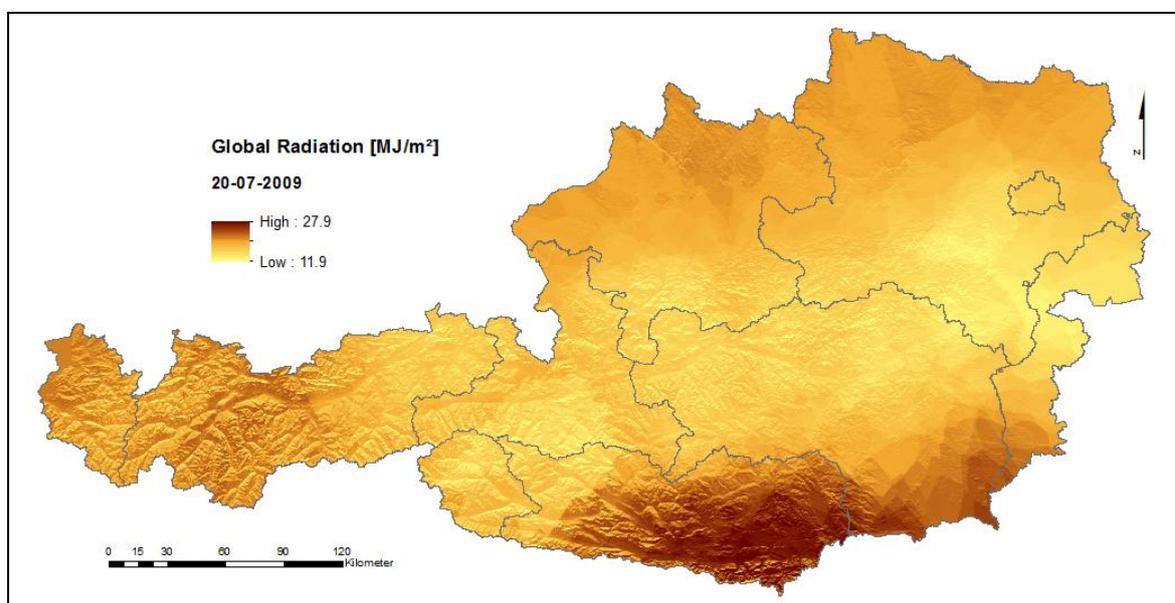


Abbildung 10: Oberfläche der Globalstrahlung am 20. Juli 2009

Temperatur

Die *LOO-Kreuzvalidierung* für ausgewählte Oberflächen an den ZAMG-Messstationen ergab bei der Tagesmitteltemperatur ein Bestimmtheitsmaß von 0,98 und einen *RMSE* von

1,25 °C, bei den Tagesminimumtemperaturen ein Bestimmtheitsmaß von 0,95 mit dem *RMSE* von 1,72 °C. Für das Tagesmaximum wurde keine Kreuzvalidierung durchgeführt, da die Interpolationsqualität mit den analysierten Temperaturarten vergleichbar ist. Für die Berücksichtigung der Topografie (Hanglagenklima) wird die Beziehung zwischen Strahlung und Temperatur einbezogen wie sie in Schaumberger (2011) beschrieben wird. *Abbildung 11* zeigt ein Beispiel der Temperaturoberfläche für den 20. Juli 2009.

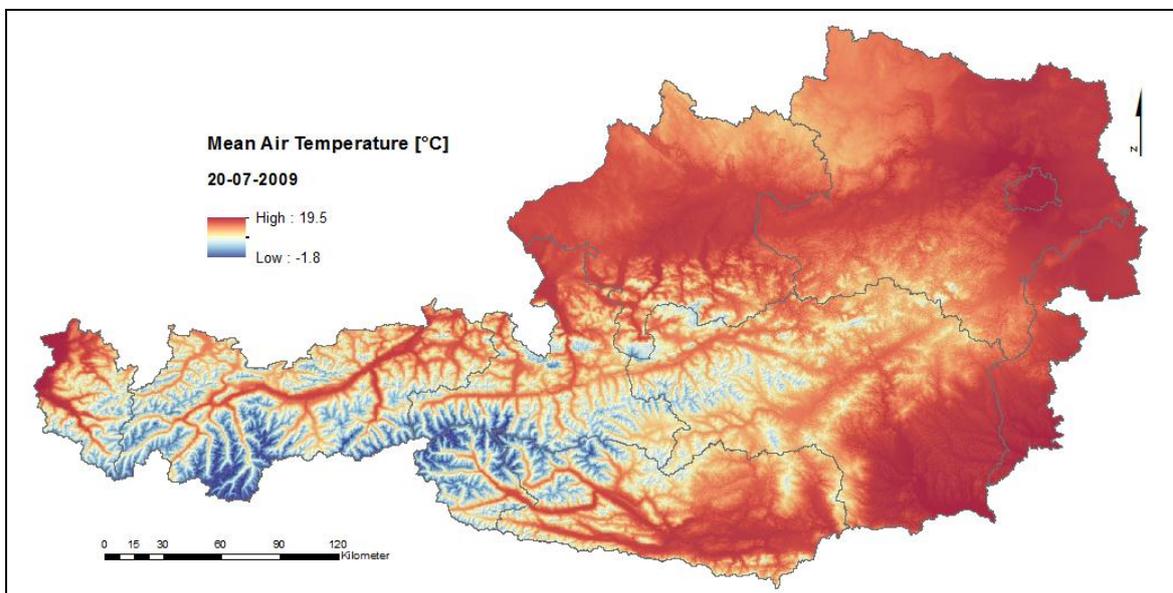


Abbildung 11: Oberfläche der Tagesmitteltemperatur am 20. Juli 2009

Referenz-Evapotranspiration

Dieser Parameter ist die Grundlage für die räumliche Implementierung von aktueller Evapotranspiration und dem damit in Zusammenhang stehenden Bodenwassergehalt. Wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben, basiert dieser Parameter auf Temperatur, Strahlung, Wind und Luftfeuchte und wird an Wetterstationen nach Penman-Monteith berechnet und höhenabhängig interpoliert. Das Ergebnis ist als Beispiel in *Abbildung 12* zu sehen.

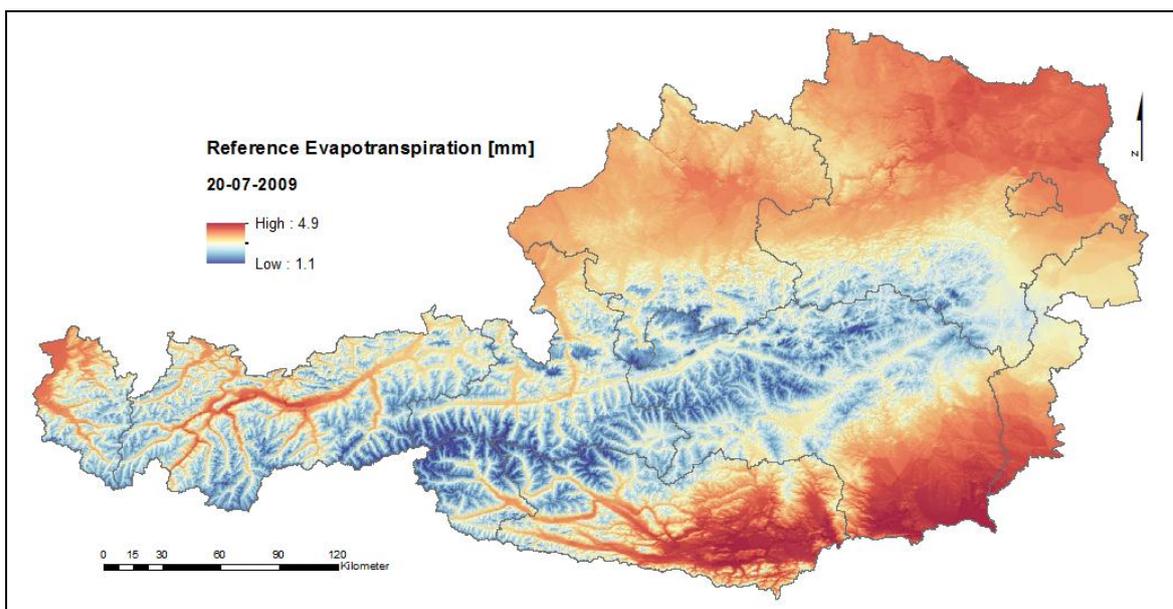


Abbildung 12: Oberfläche der Referenz-Evapotranspiration am 20. Juli 2009

Eine auf ausgewählte Oberflächen angewandte *LOO*-Kreuzvalidierung an den ZAMG-Messstationen zeigt ein Bestimmtheitsmaß von 0,91 und einen *RMSE* von 0,40 mm. Als rein meteorologisch definierter Parameter eignet sich die Referenz-Evapotranspiration sehr gut, klimatische Bedingungen eines Standortes zu beschreiben. Die Anpassung an landwirtschaftliche Kulturen erfolgt mit dem Pflanzenfaktor.

Pflanzenfaktor (Crop Coefficient)

Der Pflanzenfaktor wird im Rahmen dieser Arbeit auf zweifache Weise verwendet. Wie in Kapitel 2.2.6 dargestellt, benötigt man die Information über den Entwicklungsstand der Kultur zur Berechnung der oberirdischen Biomasse und für die Anpassung der Evapotranspiration. Die Verdunstungsrate ist neben den atmosphärischen Bedingungen sehr stark von der Pflanzenoberfläche abhängig. Deshalb ist die Kulturart für die Bestimmung der Transpiration von großer Bedeutung. In einer abstrakten Modellwelt kann dies entweder durch eine direkte Berücksichtigung der Oberfläche mittels *Leaf Area Index (LAI)* oder auch durch die Verwendung eines Anpassungsfaktors für die Referenz-Evapotranspiration nach Allen *et al.* (1998) geschehen. Gassmann *et al.* (2010) haben beide Ansätze in ihrer Arbeit verglichen und kamen zum Ergebnis, dass sich für die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration die als *LAI*-Methode bezeichnete Variante geringfügig besser als die *K_c*-Methode mit dem Anpassungsfaktor (*Crop Coefficient*) eignet. In Hinblick auf eine räumliche Implementierung ist die *K_c*-Methode jedoch wesentlich einfacher umzusetzen und vor allem mit den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Basisdaten der Referenz-Evapotranspiration (vgl. Abschnitt 2.2.5) kompatibel (Schaumberger, 2011).

Die oberirdische Biomasse wird stark vereinfacht über einen konstanten Multiplikator (bei Grünland ist dies der Wert 5000, bei Mais 8000) und dem Pflanzenfaktor *K_c* als Multiplikand berechnet. Die Ergebnisse für Grünland und Mais sind in der *Abbildung 13* und der *Abbildung 14* als Beispiele für den 20. Juli 2009 bzw. 1. Juni 2009 dargestellt. Der Grünland-Pflanzenfaktor bewegt sich im Wertebereich zwischen 0,4 und 1,2, jener für Mais zwischen 0 und 1,2, wobei zum 1. Juni nur ein Maximum von 0,7 erreicht wird.

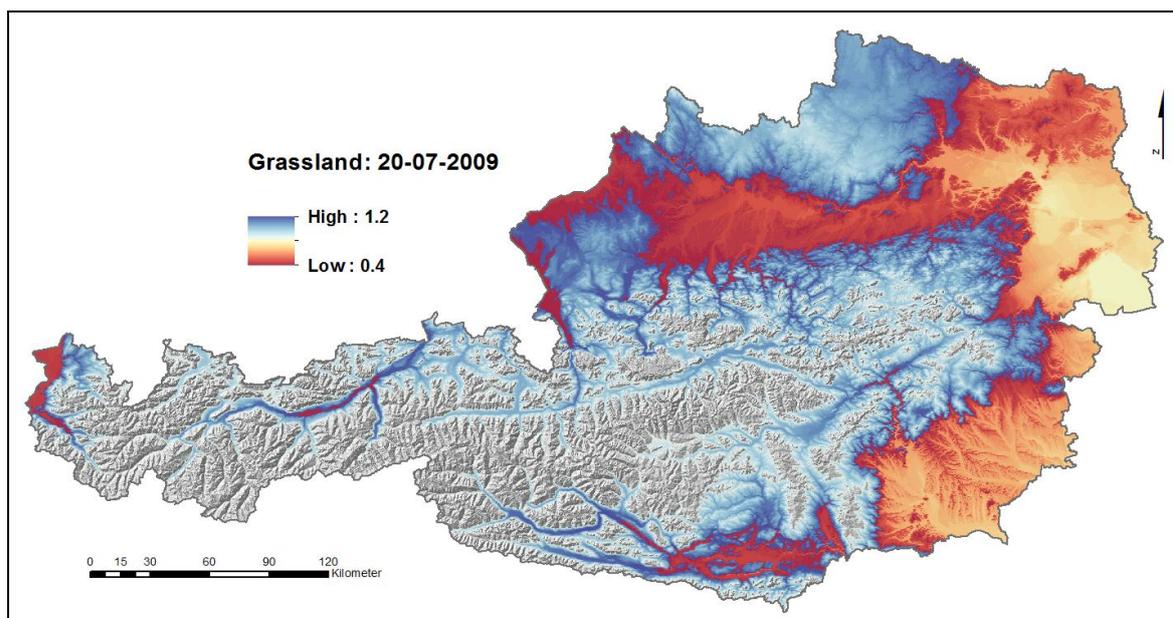


Abbildung 13: Oberfläche des Pflanzenfaktors für Grünland am 20. Juli 2009

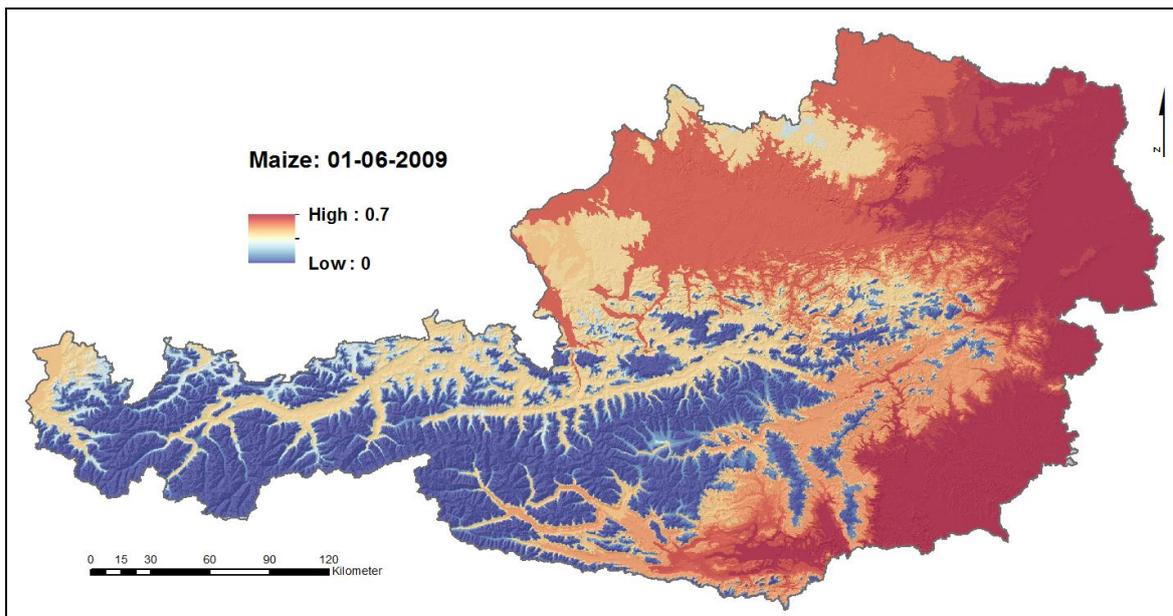


Abbildung 14: Oberfläche des Pflanzenfaktors für Mais am 1. Juni 2009

Niederschlag

Die Niederschlagsinterpolation beruht wie die anderen Oberflächen auf Messdaten an Wetterstationen, die geostatistisch interpoliert werden (vgl. Abschnitt 2.2.7). Das Beispiel in *Abbildung 15* zeigt wenige und konzentrierte Niederschläge, vermutlich Gewitter.

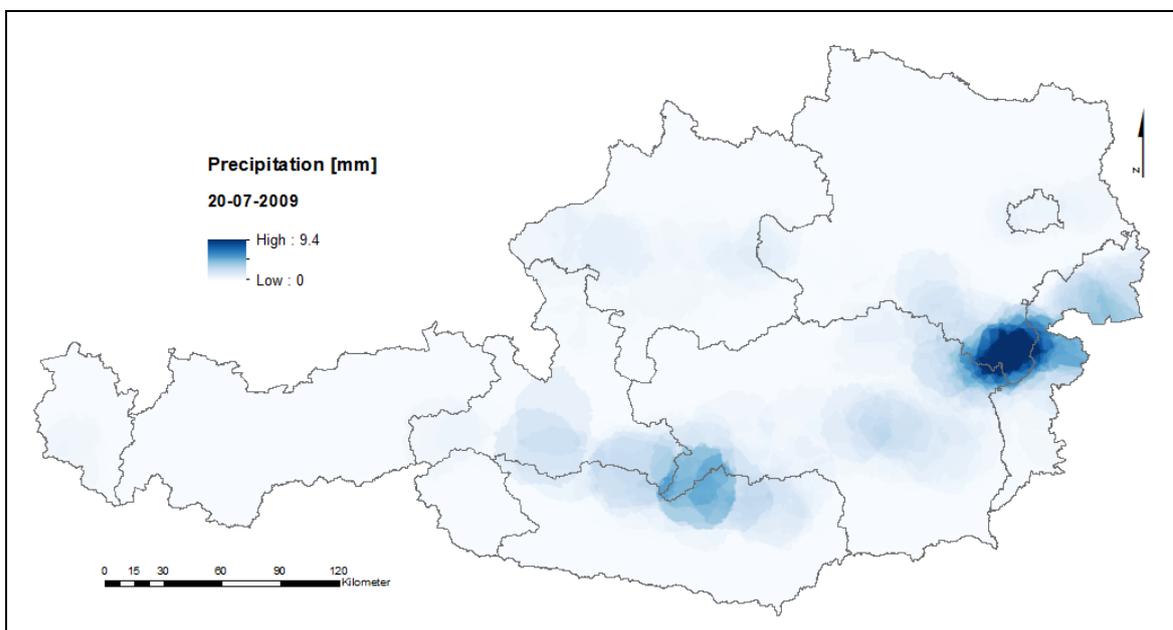


Abbildung 15: Oberfläche des Niederschlags am 20. Juli 2009

Schneebedeckung

Die Entwicklung von Bodentemperaturen hängt in den Wintermonaten besonders von der Existenz einer Schneedecke ab. Ist eine solche bei kalten Lufttemperaturen vorhanden, wirkt sie schützend und verhindert ein zu starkes Gefrieren des Bodens. Fehlt sie, fallen die Bodentemperaturen auch in unteren Schichten auf ein tieferes Niveau. Da die räumliche

Modellierung der Schneedecke auf sehr starken Vereinfachungen beruht, sind die modellierten Bodentemperaturschwankungen im Winter unter dem Aspekt zu betrachten, dass die Realität nicht immer vollständig abgebildet wird. Evaluierungen in Schaumberger (2011) zeigen, dass mit etwa 90 % Übereinstimmung an den Messstationen ein relativ starker Zusammenhang zwischen Simulation und Realität besteht. Vor allem die Akkumulation wird gut abgebildet. Schwächen zeigt das Modell bei der Nachbildung des Abschmelzprozesses, der wesentlich beschleunigter erfolgt, als dies in der Realität der Fall ist. Der Grund dafür liegt hauptsächlich darin, dass die in einer alten Schneedecke stattgefundenen physikalischen Prozesse von Verdichtung, Schmelze und Wiedergefrierung mit einfachen Modellen nicht abgebildet werden können. *Abbildung 16* zeigt die Schneebedeckung in Schneewasseräquivalent (SWE) am 1. Jänner 2009. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik, der Ergebnisse und ihrer Evaluierung findet sich in Schaumberger (2011) bzw. in Schaumberger *et al.* (2008).

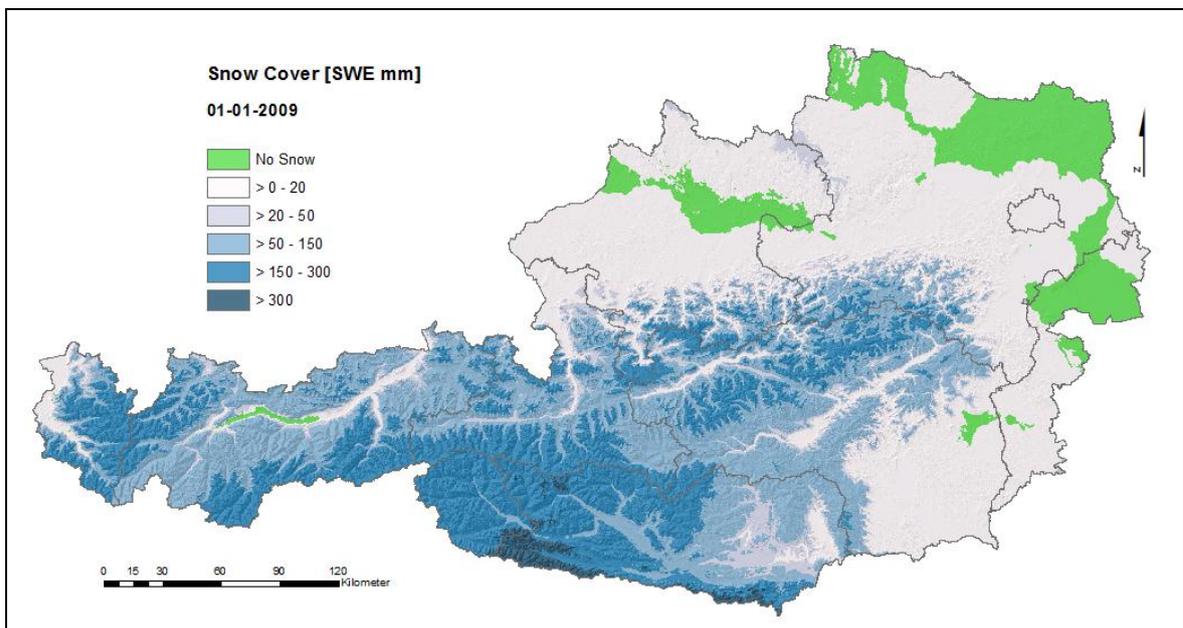


Abbildung 16: Oberfläche der Schneebedeckung am 1. Jänner 2009

Aktuelle Evapotranspiration

Im Gegensatz zur Referenz-Evapotranspiration, welche durch den Pflanzenfaktor noch auf eine bestimmte Kulturart (im vorliegenden Projekt sind es Grünland und Mais) angepasst wird, berücksichtigt die Rechenprozedur der aktuellen Evapotranspiration die zum Berechnungszeitpunkt vorhandene tatsächliche Bodenfeuchte (vgl. Abschnitt 2.2.9). Für die Anpassung der Evapotranspiration an die reale Wasserverfügbarkeit wird das Bodenwasserbilanzmodell nach Allen *et al.* (1998) implementiert. Aufgrund der räumlichen Umsetzung müssen allerdings gewisse Einschränkungen vorgenommen werden. So wird beispielsweise der Oberflächenabfluss nicht berücksichtigt. Der Kapillarhub aus dem Grundwasser muss mangels entsprechender räumlicher Modelle ebenfalls vernachlässigt werden.

In *Abbildung 17* wird die aktuelle Evapotranspiration am Beispiel des 20. Juli 2009 dargestellt. Als Nutzung wird hier für die gesamte Fläche ein Wirtschaftsgrünland mit drei Schnitten angenommen. Aufgrund der Einschränkung der Digitalen Bodenkarte und der davon abgeleiteten Nutzbaren Feldkapazität auf die landwirtschaftliche Nutzfläche mineralischer Böden handelt es sich bei diesem Ergebnis nicht um eine durchgängig mit Werten

besetzte Oberfläche. Niedrige Verdunstungsraten im Alpenvorland, Osten und Südosten weisen auf trockene, sommerliche Verhältnisse hin. Das Wald- und Mühlviertel, das Salzkammergut sowie Teile von Innviertel und Flachgau weisen hohen Verdunstungswerte auf. Bei der Darstellung der aktuellen Evapotranspiration handelt es sich um eine Momentaufnahme zu einem bestimmten Tag, an dem sich die Bodenwasserverhältnisse gemäß den Verdunstungsraten ändern. Ist ein Boden bereits trocken, ergibt sich daraus eine geringere Verdunstungsmenge, ist die Verdunstung hoch und erfolgen keine bzw. nicht ausreichend Niederschläge, trocknet der Boden weiter aus.

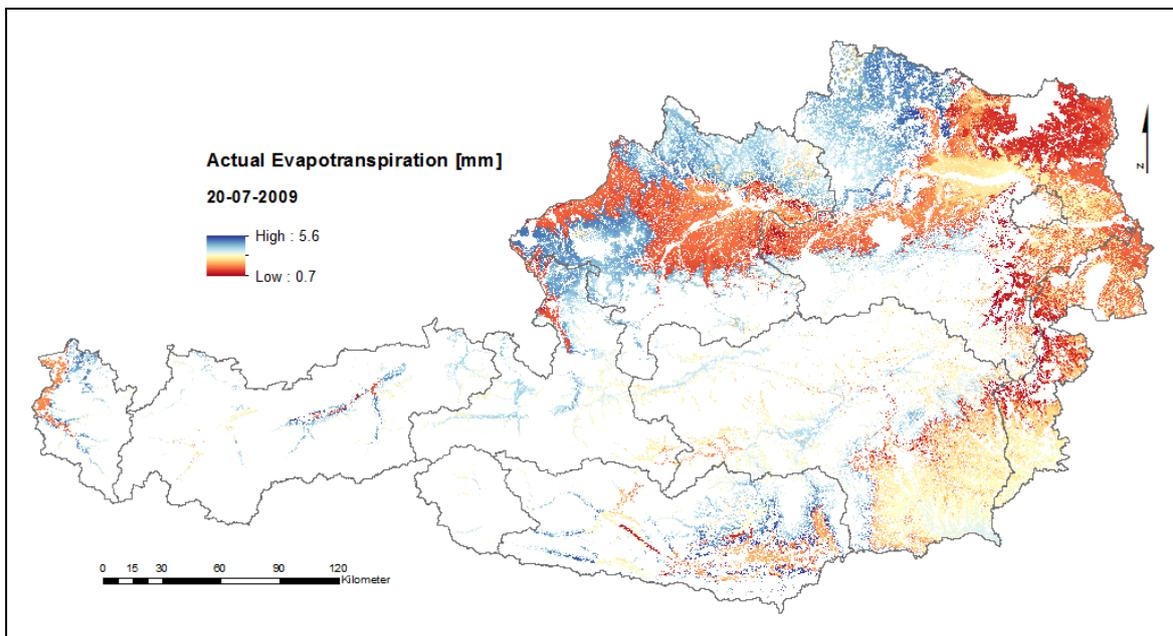


Abbildung 17: Oberfläche der aktuellen Evapotranspiration am 20. Juli 2009

Bodenwassergehalt

Wenn dem Boden durch Verdunstung Wasser entzogen wird, nimmt die Bodenwasserabsenkung zu. Dieser Wert wird Tag für Tag auf Basis der Bilanzierung von Wassereintrag (Niederschläge) und Wasseraustrag (Versickerung und Verdunstung) neu berechnet. Für den 20. Juli 2009 wird in *Abbildung 18* ein Beispiel dafür gezeigt. Beispielsweise nimmt aufgrund der hohen Verdunstungsraten im Wald- und Mühlviertel (vgl. *Abbildung 17*) der Bodenwassergehalt in diesen Gebieten deutlich ab. Mit dem Bodenwassergehalt eines bestimmten Tages wird die Witterung und ihr Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt der gesamten Periode davor einbezogen. Ausreichende Niederschläge führen zu einer Abnahme der Bodenwasserabsenkung und damit wieder zu höheren Bodenwassergehalten, die sich auf die Entwicklung der Bodentemperaturen entsprechend auswirken.

Neben der Verdunstungsrate spielt hier vor allem die Art und Qualität des Bodens, insbesondere die Feldkapazität, eine wichtige Rolle. Bis zu einem gewissen Grad kann der Wasserverbrauch auch durch Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst werden. Die für die Transpiration benötigte Wassermenge hängt unter anderem vom Ernährungszustand der Pflanzen ab. Bei optimalen Nährstoffverhältnissen wird das verfügbare Wasser effizienter für die Ertragsbildung genutzt. Ist dies nicht der Fall, wird je Einheit produzierter Trockenmasse vergleichsweise mehr Transpirationswasser benötigt (Baeumer, 1978, 31).

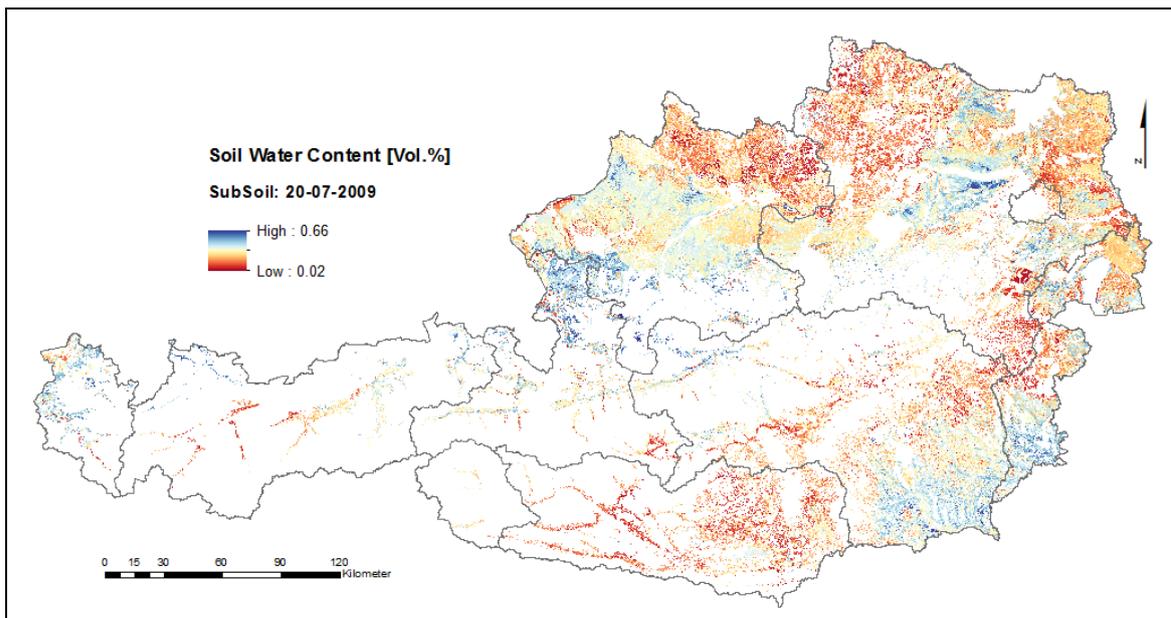


Abbildung 18: Oberfläche des Bodenwassergehalts am 20. Juli 2009

3.2 Evaluierung der modellierten Bodentemperaturen

Die Anzahl der täglichen Ergebnisoberflächen für den dreijährigen Untersuchungszeitraum und für 19 Bodenschichten beläuft sich auf knapp 21.000. Diese enorme Menge an österreichweiten Karten der Bodentemperatur muss einer systematischen Analyse zugeführt werden. Der zeitliche Verlauf der modellierten Temperaturdaten wird deshalb über eine Aneinanderreihung von Einzelwerten für bestimmte Standorte dargestellt. Zu diesem Zweck werden am Standort der Wetterstation Gumpenstein die Werte der annähernd 21.000 Karten ausgelesen, abgespeichert und wie die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dargestellt. Es handelt sich also bei dieser Evaluierung um Daten aus einer von über 3 Millionen Rasterzellen ausgewählte Zelle. Dabei wird der Zellinhalt Tag für Tag und Bodenschicht für Bodenschicht mit Hilfe der Raster-GIS-Methode „Extract“ ausgelesen.

Am Standort Gumpenstein werden neben atmosphärischen Wetterdaten auch Bodentemperaturen gemessen. Für die Schichten 10, 20 und 50 cm können diese Beobachtungen den modellierten Bodentemperaturen gegenübergestellt und damit das Modell einer Evaluierung zugeführt werden. Zu beachten ist, dass die gemessenen Bodentemperaturen bei einem wetterstationstypischen Oberflächenbewuchs (Rasen) grundsätzlich etwas von den modellierten abweichen, die ein dreischnittiges Wirtschaftsgrünland voraussetzen. Diese Abweichungen werden vor allem im letzten Drittel der Vegetationsperiode deutlich.

Im XY-Diagramm der *Abbildung 19* werden beobachtete gegen modellierte Bodentemperaturen der drei Bodenschichten aufgetragen. Die Steigungen aller drei Regressionsgeraden liegen der 1:1-Geraden sehr nahe; systematische Verzerrungen über die unterschiedlichen Temperaturniveaus können weitgehend ausgeschlossen werden. Lediglich im Bereich nahe 0 °C und darunter gibt es aufgrund der Schwierigkeiten bei der exakten Berücksichtigung der Schneedecke Probleme (vgl. Abschnitt 2.2.8). Im Gegensatz zu den beiden folgenden Jahren 2010 und 2011 ist im Jahr 2009 eine besondere Abweichung der Modelldaten in der unteren Hälfte des Wertenniveaus zu beobachten. Der Grund dafür liegt in den vom Modell überschätzten Temperaturen im Frühjahr und einer Unterschätzung gegen Ende der Vegetationsperiode (vgl. *Abbildung 20*). Die Überschätzung im Frühjahr resultiert aus einer plötzlichen Temperaturzunahme, die zwar auch in den Beobachtungen zu sehen ist, dort

allerdings etwas probater ausfällt. Im Hochsommer gibt es nur geringe Abweichungen, dies zeigen die hohen Temperaturwerte in *Abbildung 19* deutlich.

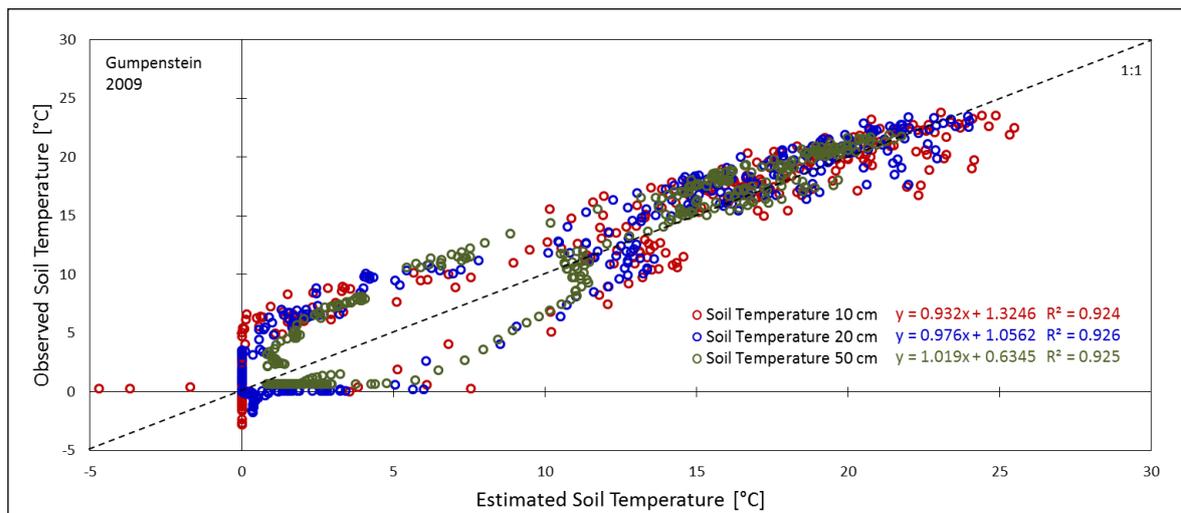


Abbildung 19: Vergleich von modellierten und beobachteten Bodentemperaturen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe im Jahr 2009

Wie der Verlauf in *Abbildung 20* zeigt, wird im Herbst ein abrupter Abfall der Temperaturen durch das Modell etwas zu intensiv interpretiert, was in der Folge zu einer Unterschätzung führt. Das Jahr 2009 steht am Beginn der Untersuchungsreihe, die Werte Anfang Jänner pendeln sich deshalb erst nach einigen Tagen auf das korrekte Niveau ein. Die Schwankungen im Winter, insbesondere jene der obersten Bodenschicht, reflektieren die Unsicherheiten bei der Schneedeckenmodellierung. Es kommt deshalb zu deutlicheren Abweichungen, deren Bedeutung jedoch als nicht sehr hoch eingeschätzt werden darf, da im Fokus der Bodentemperaturmodellierung ganz klar die Vegetationsperiode steht.

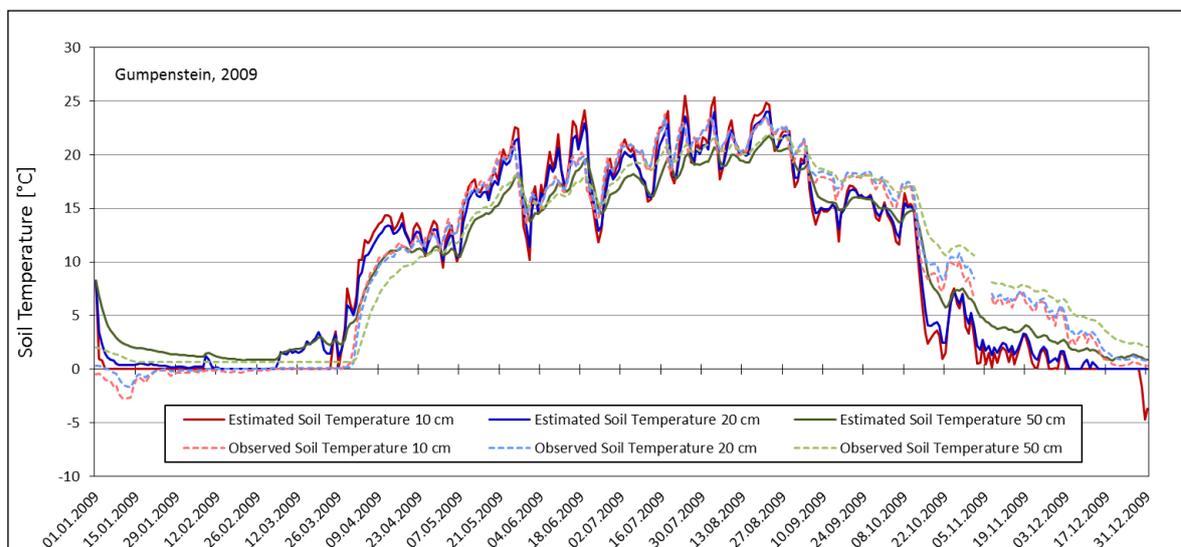


Abbildung 20: Verlauf von modellierten und beobachteten Bodentemperaturen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe im Jahr 2009

Die nächsten beiden Abbildungen beziehen sich auf das Jahr 2010. Im Gegensatz zu 2009 fallen Temperaturzunahme im Frühjahr und Abnahme im Herbst deutlich moderater aus. Damit ergibt sich eine bessere Übereinstimmung über den gesamten Wertebereich (vgl.

Abbildung 21). Der Winter mit Schneebedeckung zeigt allerdings auch hier Abweichungen, vor allem in der obersten Bodenschicht. Wie bereits in Abbildung 20 festzustellen ist, kommt es auch im Jahr 2010 zu einer anhaltenden Unterschätzung im Herbst, das vermutlich auf die unterschiedliche Vegetationsbedeckung und deren Abweichungen in der Biomasse zurückzuführen ist.

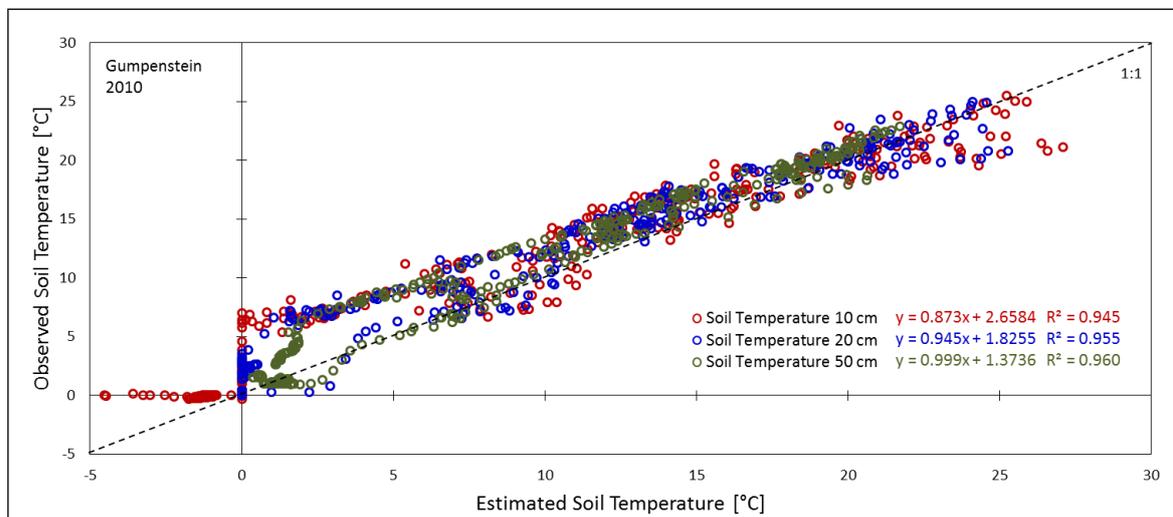


Abbildung 21: Vergleich von modellierten und beobachteten Bodentemperaturen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe im Jahr 2010

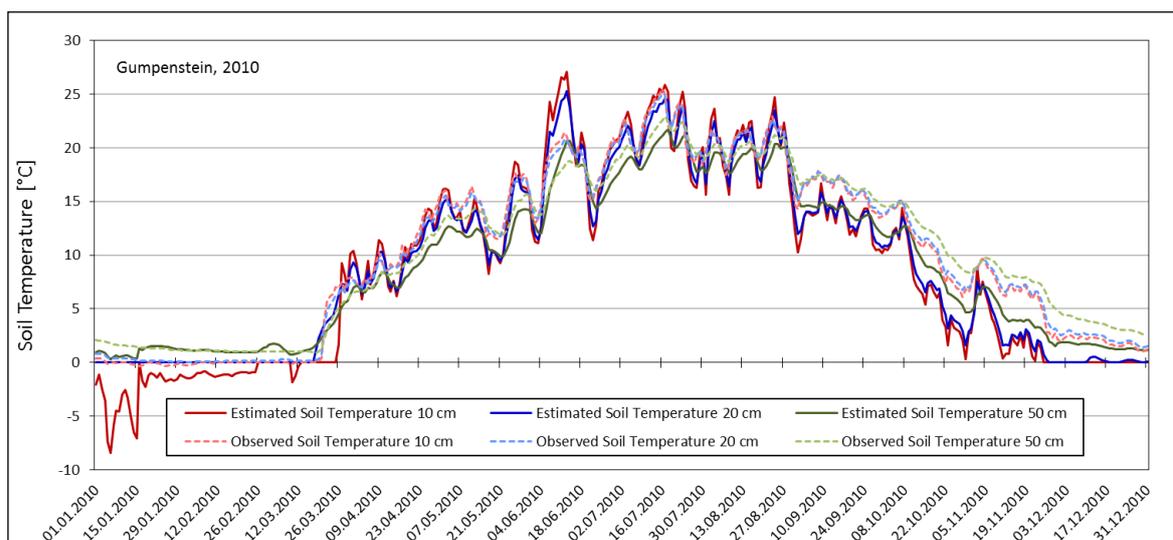


Abbildung 22: Verlauf von modellierten und beobachteten Bodentemperaturen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe im Jahr 2010

Die Ergebnisse des Jahres 2011 sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt. Wie bereits im Jahr 2010 ist der Jahrgang durch moderate Zu- und Abnahmen gekennzeichnet und weist deshalb einen starken Zusammenhang auf.

Die oberste Bodenschicht mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,95 ist aufgrund der winterlichen Abweichungen etwas schwächer als der Zusammenhang von Modell und Beobachtung in den unteren Schichten. Der gesamte Wertebereich wird vom Modell ohne gravierende systematische Verzerrungen abgebildet, lediglich im Herbst wird auch hier wieder eine Unterschätzung durch das Modell ersichtlich.

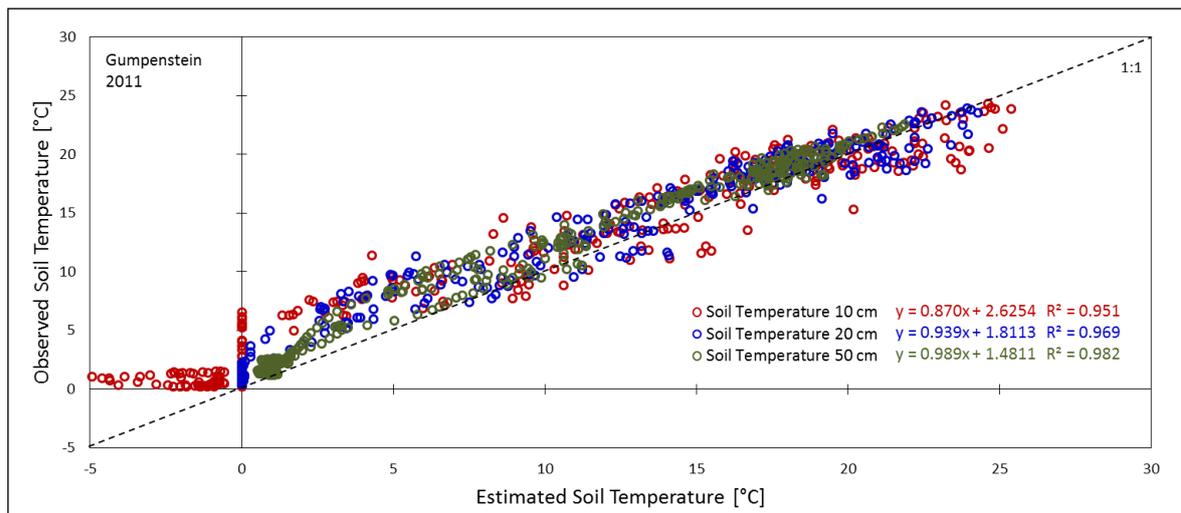


Abbildung 23: Vergleich von modellierten und beobachteten Bodentemperaturen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe im Jahr 2011

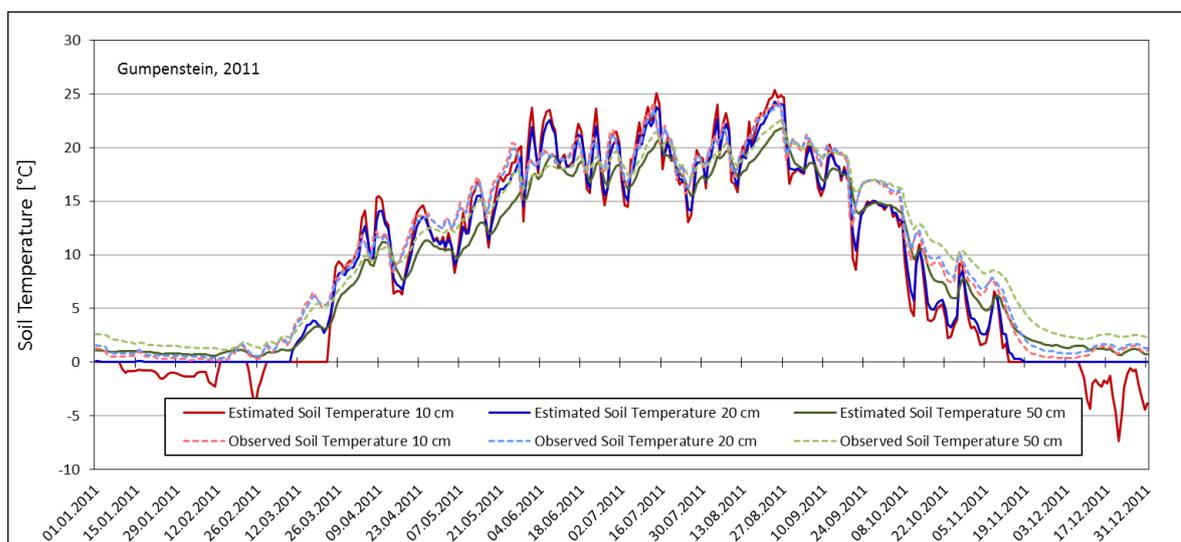


Abbildung 24: Verlauf von modellierten und beobachteten Bodentemperaturen am Standort Gumpenstein für 10, 20 und 50 cm Bodentiefe im Jahr 2011

Vergleicht man alle drei Untersuchungsjahre miteinander, ist festzustellen, dass abrupte Änderungen der Temperatur mit vermehrten Ungenauigkeiten der Schätzung einhergehen. Der Vergleich von Modell und Beobachtung zeigt einen sehr starken Zusammenhang über alle Untersuchungsjahre, allerdings oszilliert der modellierte Temperaturverlauf etwas stärker, als dies in der Realität beobachtet werden kann. Abgesehen von einer systematischen Unterschätzung im Herbst wird die Charakteristik des Temperaturverlaufs vom Modell jedoch gut nachgebildet.

Das Modell ist nicht in der Lage, die Temperaturen in den Wintermonaten, vor allem in den oberen Bodenschichten, mit ausreichender Genauigkeit zu schätzen. Der Zeitraum des Temperaturanstiegs im Frühjahr stimmt allerdings in allen Jahren sehr gut mit der Realität überein. Die modellierten Bodentemperaturen sind während der Vegetationsperiode und hier vor allem in der für den Anbau bzw. für das vegetative Entwicklungsstadium entscheidenden ersten Phase im Frühjahr für diverse agrarmeteorologische Fragestellungen in sehr hoher Qualität verfügbar.

3.3 Räumliche Anwendung des Bodentemperaturmodells

Während im vorangegangenen Abschnitt die zeitlichen Trends der modellierten Bodentemperaturen am Beispiel eines ausgewählten Standortes gezeigt und diskutiert wurden, sollen die nachfolgenden Abbildungen Beispiele von Ergebnissen in ihrer räumlichen Dimension zeigen. Ziel des Projektes ist die Errichtung einer GIS-Datenbank für Bodentemperaturen von landwirtschaftlichen Nutzflächen im Untersuchungsgebiet. Dieses Ziel wurde für ganz Österreich im Untersuchungszeitraum 2009 bis 2011 umgesetzt. Die beinahe 21.000 Ergebniskarten sind in ArcGIS FileGeodatabases verfügbar. Als Beispiel dafür werden die Karten der Bodentemperaturen für 2 cm (*Abbildung 25*), für 10 cm (*Abbildung 26*) und für 50 cm (*Abbildung 27*) Bodentiefe jeweils am 19. September 2009 dargestellt.

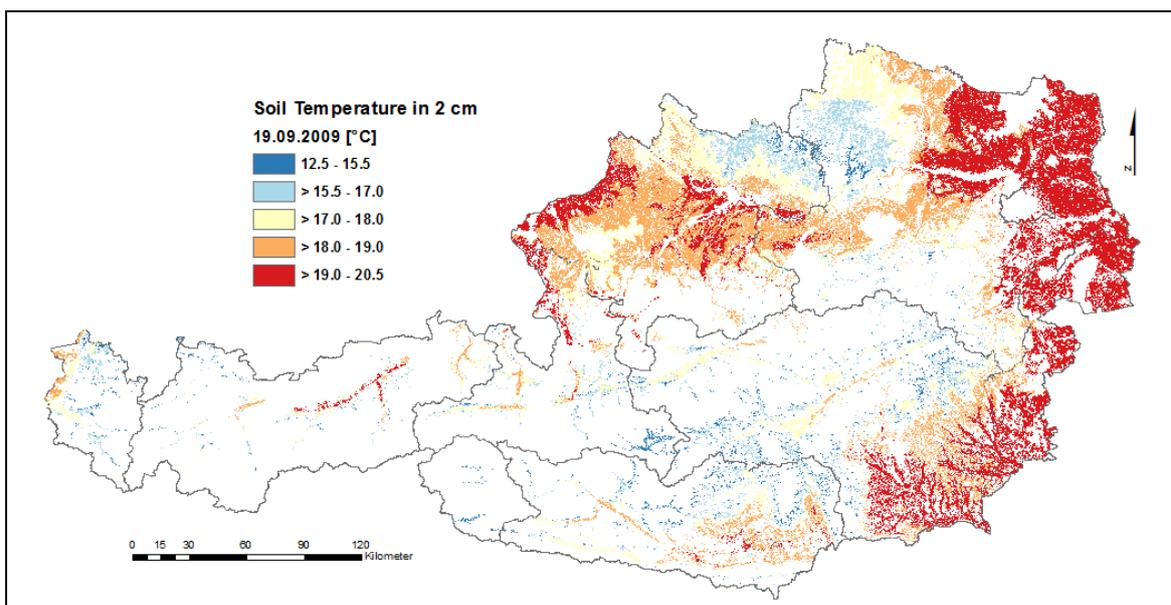


Abbildung 25: Oberfläche der Bodentemperaturen in 2 cm Bodentiefe am 19. September 2009

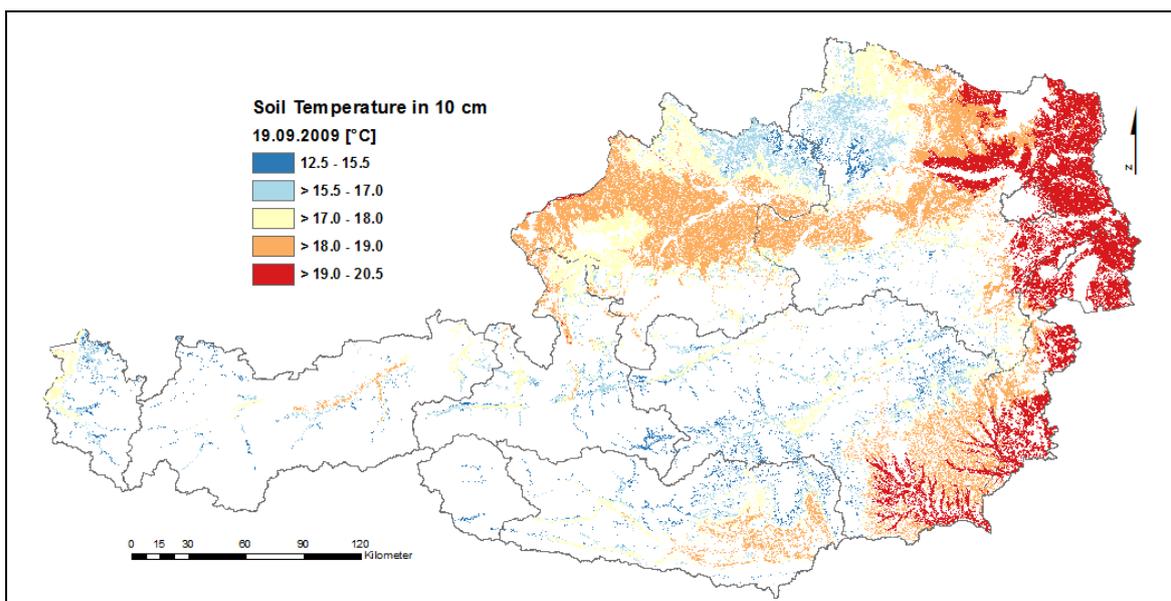


Abbildung 26: Oberfläche der Bodentemperaturen in 10 cm Bodentiefe am 19. September 2009

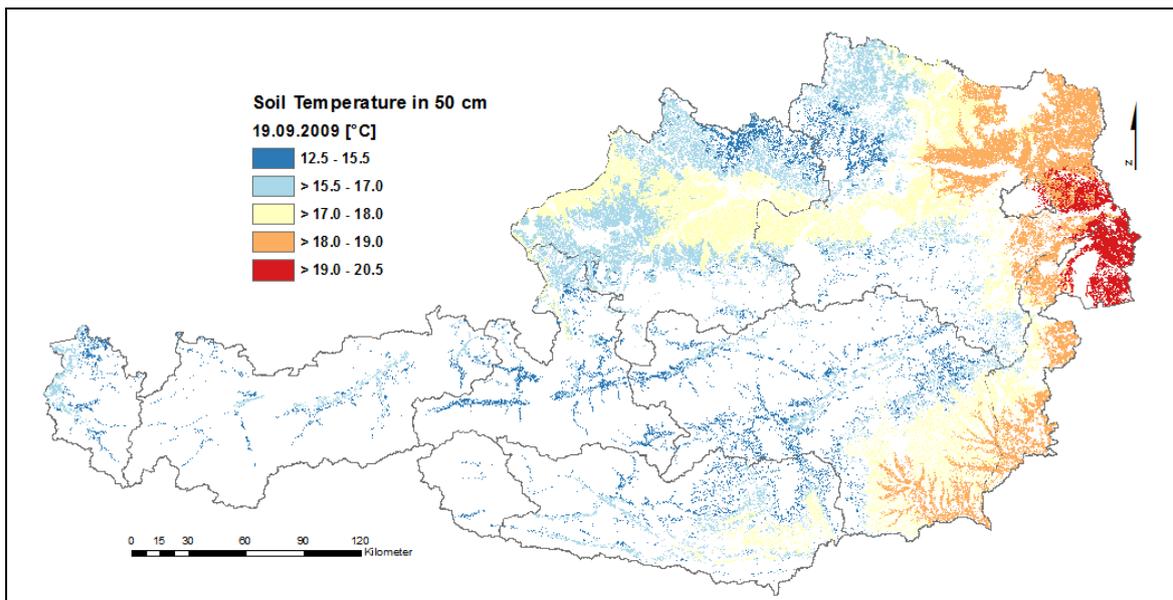


Abbildung 27: Oberfläche der Bodentemperaturen in 50 cm Bodentiefe am 19. September 2009

Während die oberste Bodenschicht auf kleine Änderungen der Lufttemperatur bzw. Einstrahlung sehr sensibel reagiert, werden die unteren Bodenschichten mit zunehmender Tiefe in ihrer Temperaturentwicklung stabiler. Atmosphärische Einflüsse wirken zeitversetzt und gedämpft auf diese Schichten. Aus diesem Grund ist die Temperaturvariabilität in der Darstellung von *Abbildung 25* deutlich höher als bei den anderen beiden Abbildungen.

Die entwickelten Algorithmen können auf Berechnungen für beliebige Zeiträume angewendet werden, Voraussetzung dafür ist allerdings die lückenlose Verfügbarkeit sämtlicher Modellparameter, wie sie in der Übersicht von *Abbildung 3* dargestellt sind. Die Aufbereitung dieser Daten ist mit einem sehr hohen Arbeitsaufwand verbunden und übertrifft den Aufwand zur eigentlichen Berechnung der Bodentemperaturen bei weitem.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes werden die als GIS-Datenbank angelegten Ergebnisse für die Applikationen der Projektpartner für den gewählten Zeitraum (2009 bis 2011) benötigt. Das entwickelte Bodentemperaturmodell wurde auf ganz Österreich als Untersuchungsgebiet angewendet. Die Ergebnisse können deshalb problemlos für die von den Projektpartnern unterschiedlich definierten applikationsspezifischen und kleineren Untersuchungsgebiete bzw. Versuchsstandorte bereitgestellt werden.

3.4 Applikationen des GIS-Bodentemperaturmodells

3.4.1 Bodentemperatursummen für phänologische Phasen

Die Phänologie befasst sich mit der Beschreibung von periodisch wiederkehrenden biologischen Phänomenen. Die Beobachtung von phänologischen Phasen hat in der Landwirtschaft lange Tradition und ist für die Abstimmung von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf klimatische Bedingungen von großer Bedeutung. In der Wissenschaft hat sich die Phänologie als effektives Instrument zur Beobachtung klimatischer Veränderungen erwiesen (Chmielewski, 2003). Die sich jährlich wiederholenden Phasen mit ihren schwankenden Eintrittsterminen zeigen die unmittelbare Auswirkung des Klimas auf die Biosphäre. Zeitreihen phänologischer Beobachtungen sind somit Indikatoren der Klimawirkung und mög-

licher klimabedingter Veränderungen der Entwicklungszyklen von Fauna und Flora (Chmielewski, 2007).

Die Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES) hat als Projektpartner den Zusammenhang zwischen Bodentemperaturen und phänologischen Phasen von *Diabrotica virgifera virgifera* untersucht. Als Parameter für den Larvenschlupf wurde der Starttag mit 1. März, eine Basistemperatur von 11,7 °C und eine Bodentemperatursumme beim Erreichen der Phase von 279 Gradtage für die Bodenschicht 6 cm festgelegt. Für den Adultschlupf gelten ebenfalls der 1. März als Starttag, die Basistemperatur mit 11,7 °C und ein Temperaturschwellenwert von 648 Gradtage. Ergebnisse für beide Phaseneintritte im Jahr 2009 sind in *Abbildung 28* und *Abbildung 29* dargestellt.

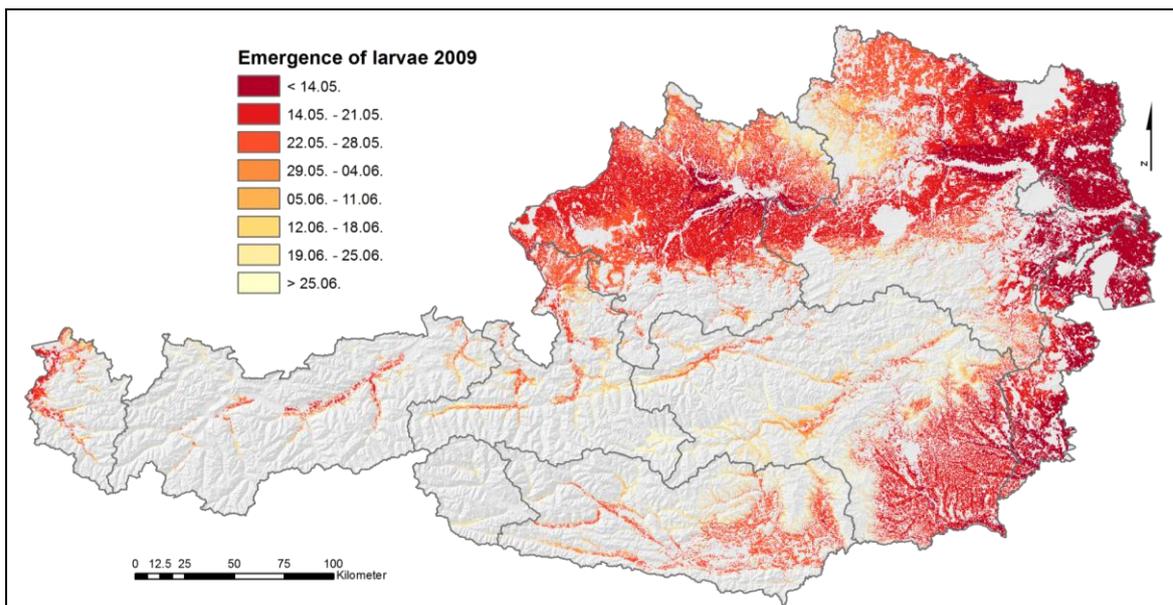


Abbildung 28: Bodentemperatursummenmodell zur Berechnung des Eintritts der phänologischen Phase „Larvenschlupf von *Diabrotica virgifera virgifera*“ im Jahr 2009

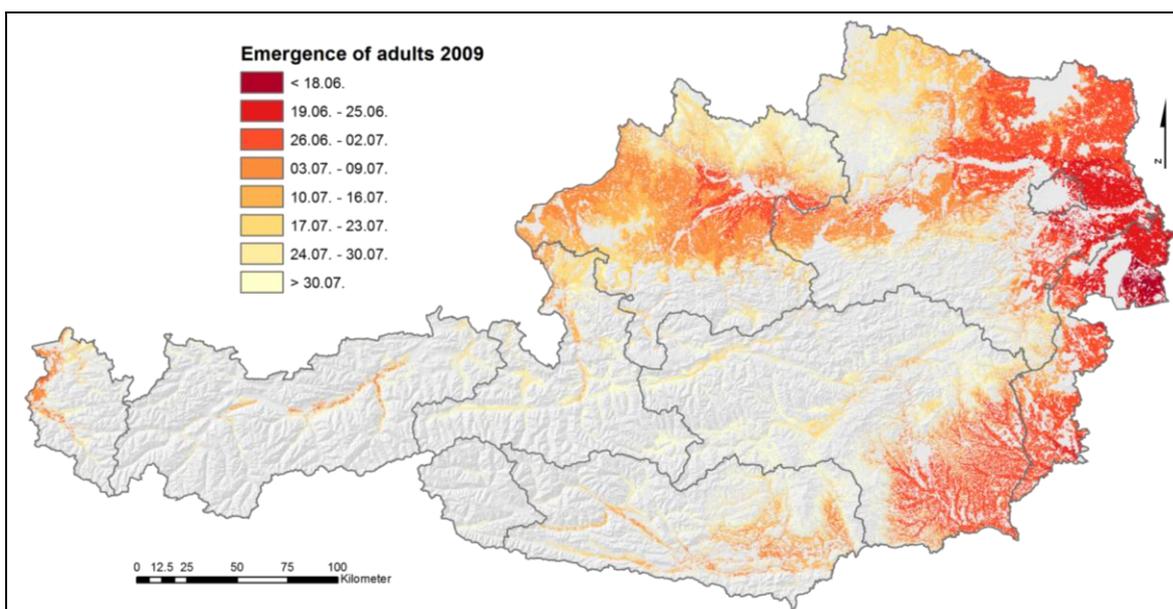


Abbildung 29: Bodentemperatursummenmodell zur Berechnung des Eintritts der phänologischen Phase „Adultschlupf von *Diabrotica virgifera virgifera*“ im Jahr 2009

Die täglichen Bodentemperaturkarten bilden die Basis. Sie werden ab dem Starttag (1. März) aufsummiert, wobei nur jene Werte relevant sind, welche 11,7 °C (Basistemperatur) überschreiten. Erreicht die Summe der täglich addierten Temperaturraster in einer Rasterzelle die Temperaturschwelle, das ist im vorliegenden Fall bei 279 bzw. bei 648 °C der Fall, terminiert der Algorithmus und hält jenen Tag des Jahres fest, bei dem der jeweilige Summenwert erreicht wurde. Dieser Tag ist der Zeitpunkt des Phaseintritts und wird in der betreffenden Zelle der Rasteroberfläche gespeichert. Die beiden Abbildungen zeigen das Ergebnis dieser Prozedur für das Jahr 2009. Wie gut die Schätzung des Phaseintritts dann letztendlich ist, hängt in erster Linie von der Genauigkeit der modellierten Bodentemperaturen aber auch von der Güte der Modellparameter ab, die als Starttag, Basistemperatur und Temperaturschwellenwert festgesetzt wurden. Im Bericht des Projektpartners AGES wird die Kalibrierung und Validierung dieser Parameter erläutert.

3.4.2 GIS-Bodentemperaturen für einfache lineare Modelle

Die im vorliegenden Projekt erstellten Temperaturkarten können in verschiedene Anwendungsmodelle integriert werden. Modellparameter werden dabei nicht als einzelne numerische Variablen einbezogen, sondern als Rasterdaten. Um diese entsprechend verarbeiten zu können, müssen die Berechnungen mit Hilfe von Raster-Algebra-Operationen implementiert werden. Als Beispiel sei hier die Berechnung des C/N-Verhältnisses angeführt, welches auf einem einfachen linearen Regressionsmodell beruht. Die Universität für Bodenkultur hat dabei folgendes Modell kalibriert und validiert:

$$C/N\text{-Verhältnis} = 11.799 + (-0.005 * \text{Bodentemperatur}) + (0.114 * \text{Bodenfeuchte})$$

Dieses Modell weist ein R^2 von 0,302 und einen Standardfehler des Schätzers von 0,0675 auf. „Bodentemperatur“ und „Bodenfeuchte“ werden dabei Tag für Tag als unabhängige Variablen im Rasterdatenformat berücksichtigt. Es entstehen tägliche Oberflächen mit den Ergebnissen. Werden diese an einem Standort mit der GIS-Funktion „Extract“ (vgl. Abschnitt 3.2) ausgelesen und als Zeitreihe dargestellt, ergibt sich ein Bild wie es in *Abbildung 30* dargestellt ist; hier als Beispiel am Standort Gumpenstein im Jahr 2011.

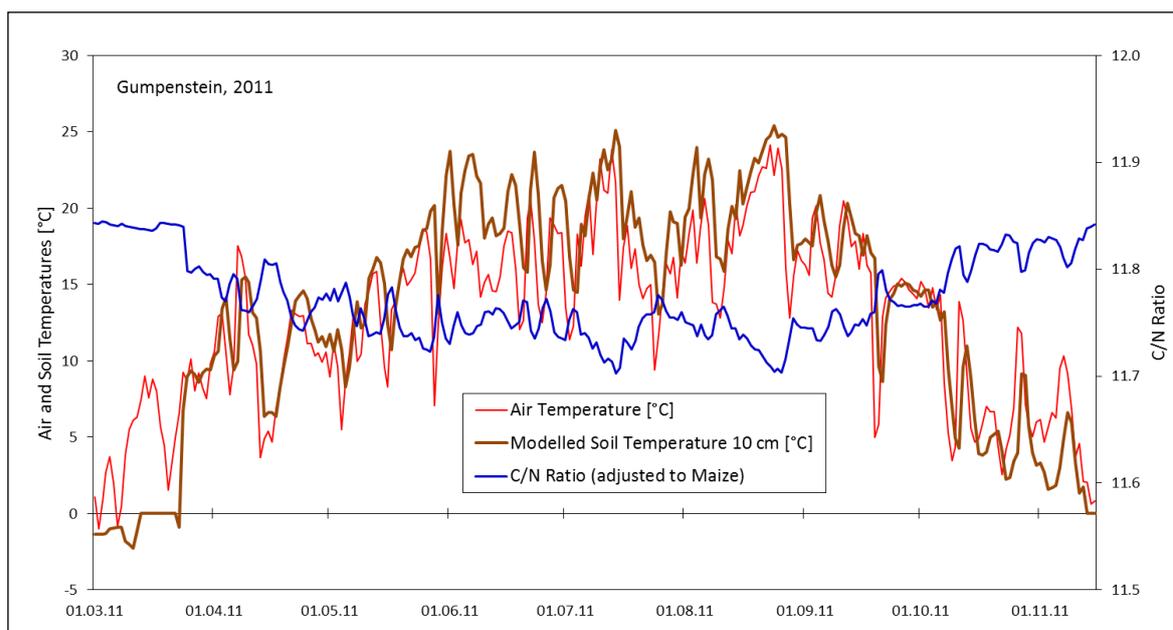


Abbildung 30: Aus Bodentemperaturen und Bodenfeuchte abgeleitetes Verhältnis von C/N für Mais sowie der Verlauf von Lufttemperatur und Bodentemperatur (10 cm) am Standort Gumpenstein im Jahr 2011

4 Schlussfolgerungen

Der in diesem Bericht beschriebene Teil eines Projektes mit mehreren Schwerpunkten bezieht sich auf die Entwicklung einer GIS-Applikation zur Bestimmung von Bodentemperaturen. Die hier gezogenen Schlussfolgerungen beziehen sich deshalb auch auf diesen eher technischen Schwerpunkt und nicht auf die Bodentemperaturmodellierung selbst, welche von der BOKU in einem eigenen Bericht thematisiert wird. Die Evaluierung des Modells war Schwerpunkt eines weiteren Projektpartners, des Bundesamtes für Wasserwirtschaft (IKT Petzenkirchen). Die entsprechenden Darstellungen finden sich im dortigen Berichtsteil. Die Anwendung der Ergebnisse für weitere, praxisorientierte Modelle war die Aufgabe der Projektpartner AGES und Bio Forschung Austria und werden in den von ihnen gestalteten Berichten erläutert.

Gegenstand der hier vorliegenden Ausführungen ist die Erstellung einer GIS-Datenbank für Bodentemperaturen in unterschiedlichen Bodenschichten. Im Laufe der Bearbeitung musste festgestellt werden, dass die Realisierung eines Geografischen Informationssystems zum Thema Bodentemperaturen mit einem extrem hohen Rechenaufwand verbunden ist. Das im Rahmen dieses Projektes von der BOKU entwickelte Modell ist auf eine Verwendung von Daten an einzelnen Standorten ausgerichtet. Input dafür sind Excel-Tabellen mit Zeitreihen von Wetter- und Bodendaten. Um daraus eine GIS-Applikation zu erstellen, müssen die numerischen Variablen mit Rasterdaten ersetzt werden, welche in Matrixform (Grid) die Oberfläche eines Untersuchungsgebietes als kontinuierliches Wertefeld beschreiben. Wird ganz Österreich als Untersuchungsgebiet angenommen, bedeutet dies, dass jeder Einzelwert durch eine Matrix mit über 3 Millionen Werten ersetzt wird.

Die Projektpartner haben ihre Untersuchungen auf Gebiete in Niederösterreich und der Steiermark durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet für die Berechnung der Bodentemperatur hätte damit auf diese kleinen Regionen eingeschränkt werden können. Auch wenn die Prozeduren für die Ermittlung der Bodentemperaturen selbst sehr aufwendig sind und bei Berechnungen für die ganze Fläche Österreichs etwa eine Stunde Rechenzeit pro Tag (bei drei Jahren sind das knapp 1100 Tage) benötigen, sind sie trotzdem weitaus weniger arbeitsintensiv als die Generierung der dafür notwendigen Input-Geodaten. Die Rasteroberflächen von Temperatur, Strahlung, Niederschlag, Verdunstung, Schneebedeckung, Bodenwasserbilanz, usw. müssen Tag für Tag aus Wetterstationsdaten mit Hilfe geostatistischer Methoden bzw. geeigneter Modelle berechnet werden. Aus methodischen Gründen ist es vorteilhaft bzw. notwendig, diese Daten für ganz Österreich aufzubereiten. Beispielsweise benötigt die Temperaturinterpolation stabile Höhengradienten, welche nur durch Einbeziehung möglichst vieler Daten generiert werden können (Schaumberger, 2011). Bei zu eng abgegrenzten Gebieten wären zwangsläufig nur wenige Wetterstationen vorhanden und damit auch nur wenige Daten für die räumliche Modellierung verfügbar. Daher ist es für die meisten Parameter unumgänglich, sie für ganz Österreich aufzubereiten. Es wäre nicht sinnvoll, die in weiterer Folge darauf aufbauende Berechnung der Bodentemperaturen nachträglich regional einzuschränken. Aus diesem Grund liegen die Ergebnisse in Form von Österreichskarten vor, die für sämtliche landwirtschaftlich genutzte Flächen Bodentemperaturen in 19 verschiedene Bodentiefen beinhalten.

Die räumliche Aufbereitung der Parameter für das Bodentemperaturmodell sowie das Temperaturmodell selbst benötigen enorme Ressourcen an Rechenleistung und Zeit. Die Berechnung von drei Untersuchungsjahren (2009 bis 2011) sowie eine Differenzierung in

zwei verschiedene Kulturarten (Grünland und Mais), dies entspricht einer Verdoppelung des gesamten Rechenaufwandes, stößt an die Grenzen der Leistungsfähigkeit von Standard-Computersystemen. Obwohl sämtliche Modelle darauf ausgelegt sind, sie mit Daten aus Klimamodellen und -szenarien betreiben zu können, würde eine derartige Anwendung den Rahmen der Berechenbarkeit bei weitem übertreffen.

Bei einer in der Klimatologie üblichen Vorgehensweise müssten sämtliche Komponenten des vorliegenden Bodentemperaturmodells auf Tagesbasis für mindestens 30 Jahre aufbereitet werden. Bei einer seriösen Szenarienbildung wäre es zusätzlich notwendig, verschiedene Klimamodelle und damit das Vielfache von 30 Jahren durchzurechnen, um damit eine Vergleichs- und Evaluierungsmöglichkeit einzelner Szenarien zu schaffen. Würden sämtliche Modellparameter (Temperatur, Strahlung, Evapotranspiration, Schneebedeckung, Albedo, oberirdische Biomasseentwicklung, Bodenwasserbilanz, Niederschlag) für einzelne 30-jährige Klimaperioden in hoher Auflösung als räumliche Komponenten zur Verfügung stehen, wäre eine Anwendung des Bodentemperaturmodells denkbar und auch relativ einfach umzusetzen. Problematisch ist allerdings die Generierung dieser Input-Geodaten. Die räumliche Auflösung von Klimamodelldaten, auch wenn sie einem dynamischen und/oder statistischen Downscaling unterzogen wurden, bewegt sich immer noch im Kilometerbereich. Der Informationsgehalt von räumlichen Inputdaten bei einer Anwendung des Bodentemperaturmodells für ein wenige Quadratkilometer großes Untersuchungsgebiet unterscheidet sich deshalb in keiner Weise von einem Klimamodell-Datenbestand, der sich lediglich auf einen einzigen Punkt bezieht. Aus diesem Grund ist die Anwendung der standortbasierten Variante des Bodentemperaturmodells, wie sie von der BOKU entwickelt wurde, bei der Berechnung von Klimaszenarien für kleine Untersuchungsgebiete sinnvoller, als der Einsatz der hier vorliegende GIS-Anwendung. Die geschätzte Rechendauer für mehrere Szenarien beträgt beim numerischen Standortmodell nur zwei bis drei Wochen.

Sollen große Untersuchungsgebiete (z. B. ganz Österreich) in hoher Auflösung berechnet werden, ist dies unter der Voraussetzung, dass sämtliche Modellparameter als Rasterdaten vorliegen (bei 30 Jahren und 10 Parametern sowie 3 verschiedenen Klimamodellen sind dies über 30.000 Raster), zwar möglich aber doch sehr rechenintensiv. Wie die Erfahrung gezeigt hat, fallen in den drei Untersuchungsjahren etwa 21.000 Ergebniskarten an, für die bei einer 250-Meter-Auflösung für ganz Österreich etwa 50 volle Tage Rechenzeit notwendig sind. Bei einer Anwendung für 3 Klimamodelle und einer Klimanormalperiode von 30 Jahren müssen bei der verfügbaren technischen Ausstattung und Konfiguration etwa 1500 volle 24-Stunden-Tage lang gerechnet und dabei über 600.000 Österreichkarten verarbeitet werden. Wie bereits erwähnt, gelten diese Zahlen nur dann, wenn bereits sämtliche Inputparameter als Rasterdaten verfügbar wären. Welcher Aufwand für die Aufbereitung dieser Daten im Vorfeld notwendig ist, kann nicht geschätzt werden.

Die Ausführungen zeigen, dass eine Anwendung des hier vorgestellten GIS-Bodentemperaturmodells für Klimaszenarien in sehr hoch aufgelösten und großen Untersuchungsgebieten nicht geeignet ist. Repräsentative Einzelstandorte, welche die klimatische Entwicklung der jeweiligen Region beschreiben, sind deshalb wesentlich effizienter und effektiver und besitzen im Wesentlichen den gleichen Informationsgehalt.

Da sämtliche Algorithmen darauf ausgelegt sind, Wetterdaten zu verarbeiten, gleichgültig ob diese aus historischen Beobachtungen oder Klimamodellen stammen, sind Analysen von Temperaturentwicklungen in der Vergangenheit und in der Zukunft möglich. Je besser die regionale Auflösung verfügbarer Klimamodelldaten ist, desto realistischer ist auch ein Einsatz der hier vorliegenden Modelle für Szenarien in kleinen, abgegrenzten Gebieten, bei denen eine praktische Berechenbarkeit mit überschaubaren Laufzeiten gewährleistet ist.

5 Literaturverzeichnis

Die im Rahmen der Geodatenaufbereitung durchgeführte Auseinandersetzung mit dem aktuellen Stand des Wissens wird in Schaumberger (2011) detailliert dargestellt. Es sei an dieser Stelle deshalb nochmals darauf verwiesen.

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. und Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers. Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- Baumeier, K. (1978): Allgemeiner Pflanzenbau, 2. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 264 S.
- Boulet, G.; Chehbouni, A.; Gentine, P.; Duchemin, B.; Ezzahar, J. und Hadria, R. (2007): Monitoring water stress using time series of observed to unstressed surface temperature difference. *Agricultural and Forest Meteorology* **146** (3-4), 159-172.
- Chmielewski, F.-M. (2007): Phänologie - ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre. *promet - meteorologische fortbildung: Phänologie* **33** (1/2), 28-35.
- Chmielewski, F.-M. (2003): Phenology and Agriculture. In Schwartz (eds.): Phenology: An Integrative Environmental Science, 2003, 12, *Kulwer Academic Publisher*, Boston/Dordrecht/London, 505-522.
- DeLucia, E.H.; Heckathorn, S.A. und Day, T.A. (1992): Effects of soil temperature on growth, biomass allocation and resource acquisition of *Andropogon gerardii* Vitman. *New Phytologist* **120** (4), 543-549.
- Gassmann, M.; Gardiol, J. und Serio, L. (2010): Performance evaluation of evapotranspiration estimations in a model of soil water balance. *Meteorological Applications*, n/a-n/a.
- Häckel, H. (2005): Meteorologie. Ulmer UTB, 5. Auflage, Eugen Ulmer KG, Regensburg, 446 S.
- Keller, E.R.; Hanus, H. und Heyland, K.-U. (1997): Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Handbuch des Pflanzenbaues, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 860 S.
- Krumbiegel, D. (1973): Vorhersage der Bodentemperatur für die agrarmeteorologische Beratung der Frühjahrsbestellung. *Zeitschrift für Meteorologie* **23** (7/8), 225-231.
- Murer, E. (2009): Überprüfung und Verbesserung der Pedotransferfunktion zur Ermittlung der Wasserspeicherfähigkeit im Boden, Abschlussbericht, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 54 S.
- Murer, E.; Wagenhofer, J.; Aigner, F. und Pfeffer, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In Bundesamt für Wasserwirtschaft (eds.): Schriftenreihe BAW, 20, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 72-78.
- Pape, R. und Löffler, J. (2004): Modelling spatio-temporal near-surface temperature variation in high mountain landscapes. *Ecological Modelling* **178** (3-4), 483-501.
- Paul, K.I.; Polglase, P.J.; Smethurst, P.J.; O'Connell, A.M.; Carlyle, C.J. und Khanna, P.K. (2004): Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agricultural and Forest Meteorology* **121** (3-4), 167-182.
- Plauborg, F. (2002): Simple model for 10 cm soil temperature in different soils with short grass. *European Journal of Agronomy* **17** (3), 173-179.
- Schaumberger, A. (2007): GIS zur Bestimmung von Grünlanderträgen: Implementierung eines Ertragmodells. Master Thesis, Paris-Lodron-Universität Salzburg, Zentrum für Geoinformatik Salzburg, Salzburg, 103 S.
- Schaumberger, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.

- Schaumberger, A.; Formayer, H.; Tiefenbach, P.; Grillenberger, J. und Strobl, J. (2008): Modellierung des raumzeitlichen Verlaufs der Schneebedeckung. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft* **150** (2008), 163-182.
- Stone, P.J.; Sorensen, I.B. und Jamieson, P.D. (1999): Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperate climate. *Field Crops Research* **63** (2), 169-178.
- Suckow, F. (1985): Ein Modell zur Beschreibung der Bodentemperatur. *Zeitschrift für Meteorologie* **35** (1), 66-70.
- Thunholm, B. (1990): A comparison of measured and simulated soil temperature using air temperature and soil surface energy balance as boundary conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **53** (1-2), 59-72.
- Zheng, D.; Hunt, E.R. und Running, S.W. (1993): A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. *Climate Research* **2**, 183-191.
- Zscheischler, J.; Estler, M.C.; Staudacher, W.; Groß, F.; Burgstaller, G.; Streyl, H. und Rechmann, T. (1990): Handbuch Mais: Umweltgerechter Anbau, wirtschaftliche Verwertung, 4., vollkommen überarbeitete Auflage, *Verlagsunion Agrar*, Frankfurt, München, Münster-Hiltrup, Wien, Wabern-Bern, 320 S.