

## GIS ZUR BERECHNUNG DES BODENWASSERHAUSHALTS

Andreas Schaumberger, Norbert Bartelme

**Zusammenfassung:** Für viele agrarmeteorologische und hydrologische Modelle ist der Bodenwasserhaushalt ein unverzichtbarer Bestandteil. Darüber hinaus fordern operationelle Anwendungen in den meisten Fällen einen räumlichen Bezug – Analysen und Bilanzierungen im System Bodenwasserhaushalt wollen einem definierten Untersuchungsgebiet zugeordnet werden. In diesem Beitrag wird eine weltweit verwendete Standardmethode der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) genutzt, um daraus eine räumliche Berechnung des Bodenwasserhaushalts zu entwickeln. Das dafür implementierte Raster-GIS benötigt neben einem Digitalen Geländemodell (DGM) und einer Bodenkarte meteorologische Messdaten zur Aufbereitung von Rasteroberflächen für Niederschlag und Evapotranspiration. Die darauf aufbauenden Berechnungen von Verdunstung, Bodenwasserabsenkung, Tiefenversickerung und Wasserstress erfolgen auf Tagesbasis und erstrecken sich auf ein Untersuchungsgebiet der Größe Österreichs mit Berücksichtigung der komplexen topographischen Strukturen des Landes.

**Schlagworte:** Evapotranspiration, Wasserstress, Interpolation, Raster-GIS, Raster-Algebra

## GIS FOR COMPUTING SOIL WATER BALANCE

**Abstract:** Many applications based on agro-meteorological and hydrological models need information about soil water balance to consider the important ecological processes in soil. Most of these models also require a spatial reference, particularly if they are used in an operational way. Thus, analyses and water balance results can be assigned to user-defined study areas. Our work is based on a well-known standard method introduced and recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The numerical model parameters of the given site-based formulas are substituted with continuous raster surfaces of each parameter which are all integrated in a GIS to process result maps of soil water balance. The implemented map algebra algorithms use a Digital Elevation Model (DEM), a soil map and interpolated weather data maps (reference evapotranspiration and precipitation) as input. The combination of these data results in daily maps of soil water depletion, deep percolation, water stress and actual evapotranspiration. The developed GIS application demonstrates an operational use of the spatio-temporal soil water balance model in daily time steps for the entire area of Austria, considering its complex terrain.

**Keywords:** Evapotranspiration, interpolation, water stress, Raster GIS, map algebra

### Autoren

Mag. Dr. Andreas Schaumberger, M. Sc.  
Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein  
Altirdning 11  
A-8952 Irdning  
E: andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

Prof. Dr. Norbert Bartelme  
Technische Universität Graz  
Institut für Geoinformation  
Steyrergasse 30  
A-8010 Graz  
E: norbert.bartelme@tugraz.at

## 1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Ein ausgeglichener Wasserhaushalt ist die Voraussetzung für den optimalen Ablauf biophysikalischer und biochemischer Prozesse im Pflanzenbestand landwirtschaftlicher Kulturen (Larcher 1994, S. 181 ff.). Gerät das System aus dem Gleichgewicht, beispielsweise durch anhaltende Trockenheit, hat dies unmittelbare Konsequenzen auf landwirtschaftliche Erträge und die daran geknüpften wirtschaftlichen Sektoren. Mit den klimatischen Veränderungen können nach IPCC (2007) Hitze- und Dürrewellen auch in den gemäßigten Breiten vermehrt auftreten und die landwirtschaftliche Produktion negativ beeinflussen. Im Gegensatz zu plötzlich auftretenden Wetterextremen wie Hagel oder Unwetter ist Trockenheit ein fortschreitender Prozess, der sich über eine längere Periode erstreckt und dessen Effekte vergleichsweise schwer zu beobachten sind (Wilhite 1996). Eine Möglichkeit der objektiven Bewertung derartiger Entwicklungen besteht in einer Untersuchung des Bodenwasserhaushalts und seiner zeitlichen Veränderung. Sie liefert Informationen über die Intensität der Austrocknung und des daraus resultierenden Wasserstress verschiedener Kulturen.

Neben der Intensität und dem Zeitpunkt bzw. der Dauer des Auftretens von Trockenheit interessiert vor allem die räumliche Ausdehnung derartiger Ereignisse. Verursacht durch Perioden mit geringen Niederschlägen bei gleichzeitig hohen Verdunstungsraten ist Trockenheit ein Phänomen, das große Gebiete betreffen kann und die Landwirtschaft ganzer Länder empfindlich beeinflusst. So kam es beispielsweise im Jahr 2003 in fast ganz Europa zu massiven Schäden in der Landwirtschaft. Im Sommer 2012 führte die extreme Dürre in Nordamerika zu Rekordpreisen für Getreide am Weltmarkt. Mit diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem die Entwicklung der Wasserverfügbarkeit für große Untersuchungsgebiete in zeitlicher und räumlicher Dimension beschrieben werden kann. Trockenperioden können mit derartigen Anwendungen zwar nicht verhindert werden, solche Ansätze unterstützen jedoch eine genaue Beobachtung, die das Wissen um Zusammenhänge fördert und damit am Beginn der Entwicklung von Anpassungsstrategien steht (WMO 2006).

## 2 MATERIAL UND METHODEN

### 2.1 RÄUMLICHE BASISDATEN ALS MODELLGRUNDLAGE

Im Gegensatz zu standortbasierten Modellen, die Prozesse oft dynamisch und mit einer Vielzahl an Parametern abbilden, ist eine GIS-Anwendung auf Informationen beschränkt, die als Geodaten vorliegen. In diesem Beitrag sind es Daten im Rasterformat, die im Rahmen eines Raster-GIS (Bartelme 2000, S. 116) miteinander kombiniert und analysiert werden. Mithilfe von Raster-Algebra-Algorithmen (Longley et al., S. 376; Bill 2010, S. 540 ff.) werden die einzelnen Komponenten eines Bodenwasserbilanzmodells Zelle für Zelle miteinander kombiniert und Ergebnisse in Form kontinuierlicher Rasteroberflächen erzeugt. Sämtliche Variablen in allen hier vorgestellten Gleichungen beziehen sich auf Raster beliebiger Untersuchungsgebiete; das Modell wird beispielhaft auf die gesamte Fläche Österreichs in 250 Metern Auflösung angewendet. Um den enormen Rechenaufwand bei einer operationellen Anwendung auf Tagesbasis zu bewältigen, ist eine effektive Implementierung notwendig, die weit über die Möglichkeiten einer Standard-GIS-Oberfläche hinausgeht. Das entwickelte Raster-GIS wurde mit C# unter Einbindung der Esri ArcObjects-Klassenbibliothek programmiert.

#### Niederschlag ( $P$ )

Der Niederschlag ist die Quelle des Wassereintrags in das System Bodenwasserhaushalt. Die Daten müssen als kontinuierliche Rasteroberflächen vorliegen, um als Grundlage für räumliche Analysen dienen zu können. Die Verarbeitung von stationsbasierten Niederschlagsmessungen zu Ras-

terinformationen basiert in der Regel auf geostatistischen Verfahren (Krige 1951) oder Nachbarschaftsanalysen (Thiessen 1911), in manchen Fällen kombiniert mit Radar und Fernerkundung (Haiden et al. 2011). Im vorliegenden Projekt wird gemäß der weitverbreiteten Vorgehensweise bei der Interpolation von Klimadaten *Ordinary Kriging* verwendet (Dobesch et al. 2007). Die komplexen räumlichen Muster von Niederschlagsereignissen, insbesondere jene von Konvektivniederschlägen, können weder mit einfachen noch aufwendigen Interpolationsmethoden korrekt abgebildet werden. Eine signifikante Verbesserung der Niederschlagsinterpolation wird nach Goovaerts (2000) jedoch dadurch erreicht, dass möglichst viele Messstationen als Stützstellen einbezogen werden. Können die etwa 260 Wetterstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) bei einer mittleren Nachbarschaftsdistanz von 10 km mit den etwa 950 Stationen des Hydrografischen Dienstes (HZB) erweitert werden, wird die mittlere Nachbarschaftsdistanz auf etwas unter 5 km herabgesetzt. Dies führt sowohl bei stratiformen als auch bei konvektiven Niederschlagsereignissen zu einer höheren Genauigkeit der täglich interpolierten Oberflächen. Als Beispiel einer Niederschlagsoberfläche wird das Interpolationsergebnis vom 5. April 2003 in Abbildung 1 dargestellt. Durch das relativ dichte Netz von Niederschlagsmessstellen erfolgt eine kleinräumige Differenzierung der Niederschlagsmenge.

#### Referenz-Evapotranspiration ( $ET_0$ )

Die Evapotranspiration (Evaporation und Transpiration) entzieht dem Boden in Ab-

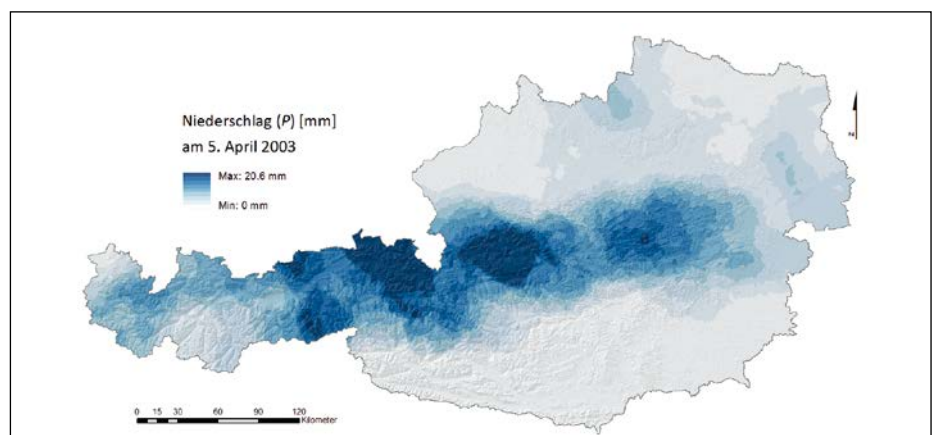


Abbildung 1: Geostatistische Interpolation des Niederschlags am Beispiel des 5. April 2003

hängigkeit von Wetter und Vegetationsbedeckung Wasser und ist damit ein zentraler Parameter des Bodenwasserhaushalts. Für eine tägliche Berechnung eignet sich ein physikalisch basierter Ansatz, wie er von Penman (1948) und Monteith (1965) entwickelt wurde. Als Penman-Monteith-Gleichung findet diese Methode vielfache Verwendung, unter anderem auch in den Berechnungsempfehlungen der FAO (Allen et al. 1998), welche die Grundlage der vorliegenden Implementierung bilden.

Sämtliche Rechenschritte der GIS-gestützten Bodenwasserbilanzierung bauen auf den kontinuierlichen Rasteroberflächen der Referenz-Evapotranspiration auf. Mit Temperatur, Globalstrahlung, Wind und relativer Luftfeuchte wird an den Wetterstationen die Referenz-Evapotranspiration nach Penman-Monteith berechnet. Es handelt sich dabei ausschließlich um einen klimatischen Parameter, da weder die Vegetationsbedeckung noch die Bodenfeuchte berücksichtigt wird. Außerdem beziehen sich die Werte auf eine Referenzfläche, die nach Allen et al. (1998) als hypothetische Oberfläche mit vollständiger Grasbedeckung und einer Wuchshöhe von 12 cm, einer Albedo von 0,23 und einem aerodynamischen Widerstandsbeiwert mit  $70 \text{ m s}^{-1}$  definiert ist.

Gemäß dem Ansatz „*calculate then interpolate (CI)*“ wird die an Wetterstationen gerechnete Referenz-Evapotranspiration mittels *Residual Kriging* unter Verwendung eines DGM höhenabhängig interpoliert (Goovaerts 1997, S. 185 ff.; Tveito 2007, S. 81). Der alternative Ansatz „*interpolate then calculate (IC)*“ würde eine räumliche Interpolation jedes einzelnen Wetterparameters (Temperatur, Globalstrahlung, Wind und Luftfeuchte) erfordern und erst dann in den einzelnen Rasterzellen eine Berechnung nach Penman-Monteith ermöglichen. Die Interpolationsergebnisse mit CI und IC sind nach Ashraf et al. (1997) und Mardikis et al. (2005) letztendlich vergleichbar, bieten also kaum einen Anreiz für die Bevorzugung einer der beiden Methoden. Die operative Anwendung, ein wichtiges Ziel dieses Beitrags, ist mit CI jedoch wesentlich einfacher umzusetzen und wird deshalb hier verwendet. In Schaumberger et al. (2008) findet sich eine ausführliche Beschreibung und Evaluierung der räumlichen Modellierung der Referenz-Evapotranspiration, ein Schlüssel-

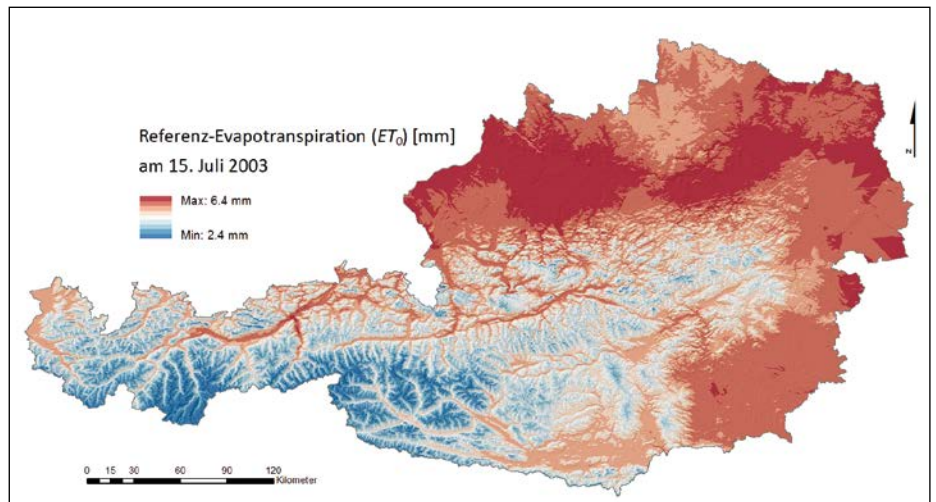


Abbildung 2: Räumliches Modell der Referenz-Evapotranspiration nach Penman-Monteith am Beispiel des 15. Juli 2003

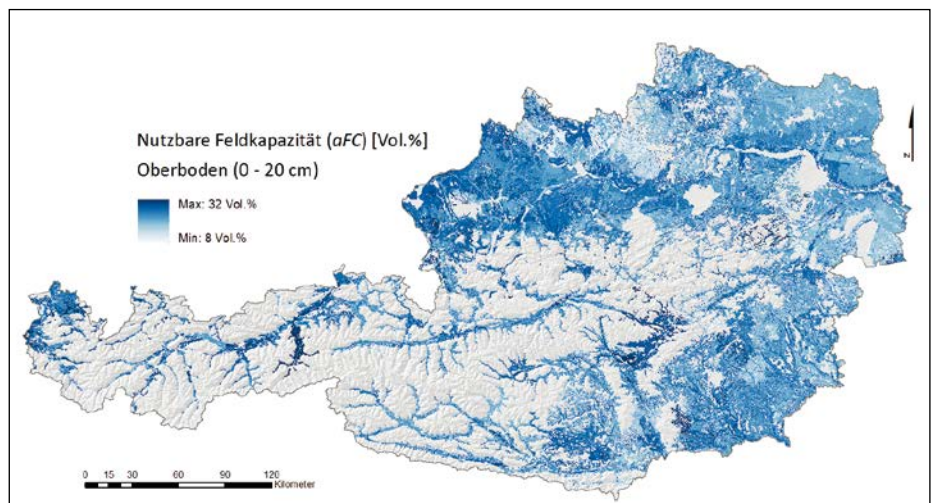


Abbildung 3: Karte der Nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens (0–20 cm) in Vol.-% (Datenquelle: Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen)

parameter der Bodenwasserbilanz. Abbildung 2 zeigt als Beispiel die Oberfläche der Referenz-Evapotranspiration für einen zufällig ausgewählten Tag des extrem trockenen Jahres 2003.

### Nutzbare Feldkapazität (aFC)

Neben meteorologischen Parametern wird der Bodenwasserhaushalt unter anderem von der Wasserspeicherefähigkeit des Bodens bestimmt. Murer et al. (2004) haben mithilfe von Pedotransferfunktionen aus Bodenkennwerten (Korngrößenverteilung, Humus- und Kalkgehalt, pH-Wert) der Digitalen Bodenkarte von Österreich einen Datensatz erstellt, der für die meisten landwirtschaftlich genutzten Flächen Informationen zur Feldkapazität (FC) liefert. Sie beschreibt jene Wassermenge,

die der Boden entgegen der Schwerkraft zu halten vermag. Das Bodenwasser ist für Pflanzen nur bis zum permanenten Welkepunkt verfügbar, ab dem die Wurzeln das in den Feinporen mit bis zu 15 bar festgehaltene Bodenwasser nicht mehr aufnehmen können. Die Differenz von Feldkapazität und Welkepunkt wird als Nutzbare Feldkapazität bezeichnet und spielt vor allem für agrarmeteorologische Anwendungen eine wichtige Rolle. Als Geodatenbestand ist die Nutzbare Feldkapazität eine unverzichtbare Voraussetzung für ein GIS zur Analyse des Bodenwasserhaushalts. Abbildung 3 zeigt die kartographische Darstellung dieses Parameters am Beispiel des Oberbodens für die mineralischen, landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs.

## 2.2 EINFACHES MODELL DER BODENWASSERBILANZ

Eine räumliche Modellierung des Bodenwasserhaushalts macht es notwendig, die Modellkomplexität stark zu reduzieren und notwendige Algorithmen auf die vorhandenen Geodaten abzustimmen. Dieser Beitrag beschränkt sich daher auf die Umsetzung einer einfachen Methode nach den FAO-Empfehlungen von Allen et al. (1998). Dieser Ansatz berücksichtigt wichtige Komponenten des Bodenwasserhaushalts und eignet sich zudem für die räumliche Umsetzung in einem operationellen GIS.

### Kulturangepasste Evapotranspiration ( $ET_c$ )

Während die Referenz-Evapotranspiration ( $ET_0$ ) auf eine nach Allen et al. (1998, S. 15) exakt definierte Referenzoberfläche abgestimmt ist, sollte bei einer räumlichen Modellierung des Bodenwassergehalts die Landbedeckung bzw. die angebaute landwirtschaftliche Kulturart auf den untersuchten Flächen Berücksichtigung finden. Allen et al. (1998, S. 89 ff.) schlagen dafür die Verwendung eines Pflanzenfaktors ( $K_c$ ) vor, der die Referenz-Evapotranspiration  $ET_0$  gemäß der betrachteten Kulturart modifiziert:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (1)$$

Die kulturangepasste Evapotranspiration  $ET_c$  repräsentiert jene Verdunstungsmenge, die aufgrund der gegebenen Kulturart an einem beliebigen Tag in der Vegetationsperiode zu den herrschenden Wetterbedingungen stattfindet bzw. stattfinden müsste. Wie bei der Referenz-Evapotranspiration wird nämlich auch hier eine vollständige Wassersättigung des Bodens und damit eine ungehinderte Evapotranspiration, unabhängig von der tatsächlichen Bodenfeuchte, angenommen. Im Laufe der Vegetationsperiode verändert sich die Biomasse der betrachteten Kulturen; mit einer Zunahme der Blattoberfläche steigt beispielsweise auch das Transpirationspotenzial. Der Pflanzenfaktor  $K_c$  muss sich entsprechend der Entwicklung einer Kulturart verändern, um die Abweichung des aktuellen, kulturspezifischen Pflanzenbestands gegenüber der Referenzoberfläche (Gras mit 12 cm Höhe) zu jedem Zeitpunkt beschreiben zu können. Allen et al. (1998) stellen dafür  $K_c$ -Tabellen mit den wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen und ihren Wachstumsphasen zur Verfügung.

Eine räumliche Implementierung des Bodenwasserhaushalts erfordert nicht nur die Information über die geographische Verteilung der Kulturarten im Untersuchungsgebiet, sondern auch die Verfügbarkeit einer täglichen Rasteroberfläche der darauf abgestimmten und sich ständig verändernden Pflanzenfaktoren. Die zeitlichen Eckpunkte der Bewirtschaftung wie Vegetationsbeginn, vegetative und generative Wachstumsperioden, Erntezeitpunkte und Vegetationsende müssen dafür mithilfe geeigneter Schätzmethode einer räumlichen Modellierung zugeführt werden. Der Pflanzenfaktor  $K_c$  bildet die Eckpunkte der zeitlichen Entwicklung einer Kulturart ab. In Abbildung 6 wird als Beispiel die Zeitreihe des Pflanzenfaktors für ein dreimal genutztes Wirtschaftsgrünland dargestellt und mit der Referenz-Evapotranspiration sowie der daraus entwickelten kulturangepassten Evapotranspiration grafisch in Beziehung gesetzt. Aufgrund der Komplexität der angesprochenen Modelle, die im Wesentlichen auf einer Beziehung zwischen Lufttemperatur(summen) und Bewirtschaftungsmaßnahmen gründen, muss auf eine detaillierte Beschreibung im Rahmen dieses Beitrags verzichtet und auf Schaumberger (2011) verwiesen werden, wo die Thematik am Beispiel des Wirtschaftsgrünlands ausführlich demonstriert wird.

### Gesamt verfügbares Bodenwasser ( $TAW$ )

Die durchwurzelte Bodenschicht kann nur bis zu einer bestimmten Obergrenze Wasser aufnehmen und den Pflanzen zur Verfügung stellen. Die Nutzbare Feldkapazität  $aFC$  [ $m^3 m^{-3}$ ] spielt dabei eine zentrale Rolle und bezieht sich gemäß der Gleichung

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

auf die Wurzelzone  $Z_r$  [m].  $TAW$  ist im hier vorgestellten Projekt das gesamte verfügbare Bodenwasser [mm] bis in eine Bodentiefe von 40 cm, in der sich nach Baeumer (1978, S. 44 f.) die Hauptmasse der Wurzeln verschiedener Kulturpflanzen befindet.

### Leicht verfügbares Bodenwasser ( $RAW$ )

Ist genug Bodenfeuchte vorhanden, entzieht die Pflanze dem Boden das benötigte Wasser ohne Probleme. Ab einer gewissen Schwelle, die durch den Wert  $RAW$  determiniert ist, kann die Pflanze das Bodenwasser nicht schnell genug aufneh-

men – es kommt zu Wasserstress. Diese Situation verstärkt sich bei anhaltender Trockenheit und einer damit verbundenen Zunahme der Bodenwasserabsenkung bis hin zum Welkepunkt.  $RAW$  [mm] ergibt sich gemäß dem Faktor  $p$  [0-1] als Fraktion von  $TAW$  [mm] und wird wie folgt berechnet:

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

$$p = p_T + 0.04 (5 - ET_c) \quad (4)$$

$p_T$  ist nach Allen et al. (1998, S. 163) ein auf Grünland abgestimmter Wert für  $ET_c \approx 5 \text{ mm Tag}^{-1}$  und geht als Konstante mit 0,6 in die Gleichung (4) ein. Die numerische Annäherung durch eine Anpassung von  $p$  unter Einbeziehung von  $ET_c$  wird auf den Wertebereich  $0,1 \leq p \leq 0,8$  eingeschränkt (Allen et al. 1998, S. 162).

### Wasserstresskoeffizient ( $K_s$ )

Der Wasserstresskoeffizient wirkt sich direkt auf die kulturangepasste Evapotranspiration aus und reduziert diese bei eingeschränkter Wasserverfügbarkeit; daraus ergibt sich nach Gleichung (8) die aktuelle Evapotranspiration. Durch die Berücksichtigung der Bodenwasserabsenkung  $D_r$  des Vortags kommt es zu einer kumulativen Fortschreibung der Bodenwasserverhältnisse. Damit ist die kontinuierliche Beschreibung des Auftretens von Wasserstress über die gesamte Vegetationsperiode möglich. Die Gleichung lautet:

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

Der Wasserstresskoeffizient  $K_s$  [0-1] wird aus dem Verhältnis von aktuellem Bodenwassergehalt ( $TAW - D_{r,i-1}$ ) und jenem Wertebereich gebildet, in dem Wasserstress auftritt ( $TAW - RAW$ ). Die Bodenwasserabsenkung  $D_r$  [mm] bezieht sich dabei auf den Vortag ( $i-1$ ). Der Wasserstresskoeffizient  $K_s$  des aktuellen Tags  $i$  bildet somit die bisherige Entwicklung im Untersuchungszeitraum ab. Die Initialisierung am Beginn der Vegetationsperiode wird mit 0 angenommen; dies entspricht einem ausreichend mit Wasser gesättigten Boden, wie er in der Regel im Frühjahr nach ausreichenden Winterniederschlägen gegeben ist.

Die durch einen abnehmenden Wert von  $K_s$  zum Ausdruck gebrachte Verknappung des Bodenwassers ist relativ zur Feldkapazität zu betrachten. Im Zustand der vollständigen Wassersättigung beträgt

die Bodenwasserabsenkung  $D_r$  0 und erhöht sich mit zunehmender Austrocknung bis zu RAW ohne Auswirkung auf  $K_s$ . Trockenstress tritt erst dann auf, wenn RAW überschritten wird. Ab diesem Zeitpunkt nimmt  $K_s$  beginnend beim Wert 1, ab und erreicht 0, wenn  $D_r$  bei TAW angelangt ist (Allen et al. 1998, S. 167) (vgl. Abbildung 5). Damit kommt es bei Anwendung eines  $K_s < 1$  in der Gleichung (8) zu einer Reduzierung der kulturangepassten Evapotranspiration  $ET_c$ .

### Bodenwasserabsenkung ( $D_r$ )

Mit der Bodenwasserabsenkung wird der Wassereintrag und -austrag eines Tages  $i$  bilanziert und gemäß der folgenden Gleichung beschrieben:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - I_i) + ET_{c,i} + DP_i \quad (6)$$

$D_r$  ist die Bodenwasserabsenkung [mm] am Tag  $i$  bzw. am Vortag ( $i-1$ ). Der Wassereintrag sei als Niederschlag  $P$  [mm] am Tag  $i$  definiert. Bilanziert wird gegen die kulturangepasste Evapotranspiration  $ET_c$  [mm] und die Tiefenversickerung  $DP$  [mm]. Der Wertebereich von  $D_r$  geht von 0 bei vollständiger Sättigung bis zum Maximum von TAW.

Der Niederschlag  $P$  wird abzüglich der Interzeption  $I$  [mm] in Gleichung (6) verwendet. Dazu wird eine stark vereinfachte Annahme getroffen, nämlich dass sich die Interzeption in einer linearen Beziehung zur Entwicklung der Biomasse (beschrieben durch den Pflanzenfaktor  $K_c$  am Tag  $i$ ) befindet. Im vorliegenden Projekt wurde mit Grünland gearbeitet und der Wertebereich der Interzeption mit 0,5 mm am Beginn des Aufwuchses und 2,0 mm zum Zeitpunkt der Ernte bzw. der vollständigen Entwicklung des Pflanzenbestands festgelegt.

### Tiefenversickerung ( $DP$ )

Wenn eine Bodenschicht vollständig gesättigt ist, versickert das überschüssige Wasser in tiefere Zonen bzw. fließt an der Oberfläche ab. Die Tiefenversickerung  $DP$  [mm] am Tag  $i$  wird wie folgt berechnet:

$$DP_i = (P_i - I_i) - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \quad (7)$$

Sie weist nur dann Werte  $> 0$  auf, wenn der Zustand einer vollständigen Wassersättigung des Bodens vorliegt. Solange diese nicht erreicht und damit auch  $D_r > 0$  ist, findet keine Tiefenversickerung statt.

### Aktuelle Evapotranspiration ( $ET_{c,adj}$ ) und Bodenwassergehalt (SWC)

Sowohl die kulturangepasste als auch die Referenz-Evapotranspiration bilden die Verdunstungsmenge unter standardisierten Bedingungen ab. Es wird der Zustand eines vollständig gesättigten Bodens angenommen. In der Realität ist jedoch das Bodenwasser in Abhängigkeit der Witterung ein limitierender Faktor, der bei der Berechnung der aktuellen Evapotranspiration berücksichtigt werden muss und die  $ET_c$  entsprechend dem Niveau der aktuellen Wasserverfügbarkeit verändert. Nach Allen et al. (1998, 161) wird daher der in Gleichung (5) errechnete Wasserstresskoeffizient  $K_s$  als Faktor angebracht:

$$ET_{c,adj} = K_s ET_c \quad (8)$$

$ET_{c,adj}$  ist die aktuelle Evapotranspiration [mm] eines bestimmten Tages, die aus der Gewichtung der Referenz-Evapotranspiration  $ET_0$  mit dem Pflanzenfaktor  $K_c$  in Gleichung (1) und dem Wasserstresskoeffizienten  $K_s$  hervorgeht.

Zur Berechnung des Bodenwassergehalts SWC [mm] am Tag  $i$  wird die Feldkapazität  $FC$  [mm] um den aktuellen Stand der Bodenwasserabsenkung  $D_r$  vermindert:

$$SWC_i = FC - D_{r,i} \quad (9)$$

Wird nur der für Pflanzen verfügbare Bodenwassergehalt bestimmt, kann die untere Grenze von SWC mit dem Welkepunkt ( $FC - aFC$ ) begrenzt werden.

## 3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Verarbeitung der Gleichungen (1) bis (9) in Raster-Algebra-Algorithmen führt zu täglichen Ergebnissen in Form von Rasteroberflächen. Neben den Geodaten selbst stellt auch die entwickelte Software für deren Berechnung ein wichtiges Ergebnis dieses Beitrags dar. Die große Anzahl an Operationen, in der viele Parameter auf Tagesbasis für die gesamte Fläche Österreichs gerechnet werden müssen, erfordert effiziente Programmstrukturen und Algorithmen. Als Beispiel wird in Abbildung 4 der Programmcode einer Methode gezeigt, die mithilfe von Raster-Algebra die Berechnung des Wasserstresskoeffizienten gemäß der Gleichung (5) ausführt. Alle Variablen bezeichnen kontinuierliche Rasteroberflächen der einzelnen Modellparameter für das gesamte Untersuchungsgebiet.

**Erläuterungen zum Raster-Algebra-Skript in Abbildung 4:** Die Variable [Ks0] bezeichnet das Ergebnis der Gleichung zur Berechnung des Wasserstresskoeffizienten. Da bei der Verwendung von [dr] der Wertebereich des Wasserstresskoeffizienten, der zwischen 0 und 1 festgesetzt ist, über- bzw. unterschritten werden kann, muss nachträglich eine Korrektur erfolgen. In [Ks1] und [Ks2] werden mithilfe von Binärrastern jene Bereiche isoliert, die außerhalb des Wertebereichs liegen. Gleichzeitig werden alle Zellen mit Werten  $> 1$  auf 1 und mit Werten  $< 0$  auf 0 gesetzt. Für das Resultat in [out] werden jene Zellen ermittelt, die gemäß den Modellvorgaben den Wert von RAW überschreiten bzw. auf 1 gesetzt, wenn RAW nicht erreicht wird. Nur dort, wo RAW überschritten wird, erfolgt eine Anpassung des Wasserstresskoeffizienten mit Werten  $< 1$  (siehe Abbildung 5).

Ausschlaggebend für die Qualität der einbezogenen Rasterdaten sind zum einen die dafür verwendeten Basisraster und zum anderen die durch die Modellvereinfachungen bedingten Ungenauigkeiten in der Bodenwasserbilanzierung. Die wichtigste Grundlage für die räumliche Modellierung bildet der Geodatenbestand der Referenz-Evapotranspiration. Eine Kreuzvalidierung des mittels *Ordinary Kriging* interpolierten Parameters an ausgewählten Tagen zeigt einen RMSE (*Root Mean Square Error*) von 0,4 mm mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,91 (Schaumberger 2011, S. 145 f.). Den zweiten wichtigen Geodatenbestand bilden die Niederschläge, die jedoch kein kontinuierliches Feld im Raum beschreiben und deshalb nur schwer und bestenfalls mit genauen Radardaten zu validieren sind (diese standen im vorliegenden Projekt nicht zur Verfügung). Die Digitale Bodenkarte im Maßstab 1:25.000 sowie die Berechnung der Nutzbaren Feldkapazität mittels Pedotransferfunktionen stellen Näherungen der Wirklichkeit dar und führen zwangsläufig zu Ungenauigkeiten.

Das natürliche System des Bodenwasserhaushalts bestimmen unzählige Faktoren, die jedoch im vorliegenden Modell auf wenige reduziert werden. Komplizierte Effekte mit hohen Anforderungen an zugrundeliegende Basisdaten, wie zum Beispiel komplizierte Wasserbewegungen in der Bodenmatrix, Kapillarhub oder Oberflä-

```

/// <summary>
/// The effects of soil water stress on crop ET are described by reducing the value for the
/// crop coefficient. This is accomplished by multiplying the crop coefficient by the water
/// stress coefficient. Water content in the root zone can be expressed by root zone depletion,
/// Dr, i.e., water shortage relative to field capacity. At field capacity, the root zone
/// depletion is zero (Dr = 0). When soil water is extracted by evapotranspiration, the
/// depletion increases and stress will be induced when Dr becomes equal to RAW. After the
/// root zone depletion exceeds RAW, the root zone depletion is high enough to limit evapo-
/// transpiration to less than potential values and the crop evapotranspiration begins to
/// decrease in proportion to the amount of water remaining in the root zone.
/// (Allen et al., 1998)
/// </summary>
/// <param name="taw">Total Available Water [mm]</param>
/// <param name="raw">Readily Available Water [mm]</param>
/// <param name="drDayBefore">Root Zone Depletion of Day before [mm]</param>
/// <returns>Water Stress Coefficient [0 - 1]</returns>

private static IRaster Ks(IRaster taw, IRaster raw, IRaster drDayBefore)
{
    IRaster pRaster;
    IRasterModel pRasModel;
    IRasterAnalysisEnvironment pAnalysisEnv;

    try
    {
        pRasModel = new RasterModelClass();
        pAnalysisEnv = pRasModel as IRasterAnalysisEnvironment;

        pRasModel.BindRaster(taw, "taw");
        pRasModel.BindRaster(raw, "raw");
        pRasModel.BindRaster(drDayBefore, "dr");

        pRasModel.Script = "[ks0] = ([taw] - [dr]) / ([taw] - [raw])" + "\n" +
            "[ks1] = (([ks0] >= 0) * [ks0]) + (([ks0] < 0) * 0)" + "\n" +
            "[ks2] = (([ks1] <= 1) * [ks1]) + (([ks1] > 1) * 1)" + "\n" +
            "[out] = (([dr] >= [raw]) * [ks2]) + (([dr] < [raw]) * 1)";

        pRasModel.Execute();
        pRaster = pRasModel.get_BoundRaster("out");

        pRasModel.UnbindSymbol("taw");
        pRasModel.UnbindSymbol("raw");
        pRasModel.UnbindSymbol("dr");

        pRasModel.UnbindSymbol("ks0");
        pRasModel.UnbindSymbol("ks1");
        pRasModel.UnbindSymbol("ks2");
        pRasModel.UnbindSymbol("out");

        pRasModel = null;
        pAnalysisEnv = null;

        return pRaster;
    }
    catch (Exception e)
    {
        //Exception handling
        return null;
    }
    finally
    {
        pRaster = null;
    }
}

```

Abbildung 4: In C# implementierte Methode zur Berechnung des Wasserstresskoeffizienten (Ks) mittels Raster-Algebra unter Verwendung von ArcObjects-Klassen gemäß der Definition in Gleichung (5)

chenabfluss, können nur über aufwendige Submodelle implementiert werden und waren nicht Gegenstand dieses Beitrags. Das Potenzial für künftige Erweiterungen mit einer transdisziplinären Geodatennutzung ist demnach groß. Der aktuelle Stand der Entwicklung wird anhand zweier Beispiele gezeigt, welche die Ergebnisse der räumlichen Modellierung des Bodenwasserhaushalts nach FAO-Vorgaben in ihrer zeitlichen und räumlichen Dimension illustrieren.

In Abbildung 5 wird die zeitliche Entwicklung verschiedener Parameter des Bodenwasserhaushalts am Beispiel der aus den täglichen Rasteroberflächen extrahierten Werte einer einzigen Rasterzelle (sie entspricht dem Standort Kirchberg/Walde) dargestellt. Im extrem trockenen Jahr 2003 ist eine signifikante Absenkung des Bodenwassers über die gesamte Vegetationsperiode zu beobachten. Wenige Niederschlagsereignisse im Sommer füllen den ausgetrockneten Boden zwar immer wieder etwas auf, zu einer vollständigen Sättigung kommt es jedoch erst zu Beginn des Septembers. Der Verlauf des Wasserstresskoeffizienten im unteren Bereich der Grafik korrespondiert mit dem Verhalten der Bodenwasserabsenkungskurve im Wertebereich zwischen RAW und TAW. In diesen Perioden kommt es zu Wasserstress und den entsprechenden Reaktionen der darunter leidenden Pflanzen. Das dargestellte Beispiel ist auf die Kulturart Wirtschaftsrind abgestimmt. Da sich auf diesem Standort bereits Anfang Mai Wasserstress abzeichnet, betrifft dies besonders die erste und ertragreichste Ernte. Die auch weiterhin immer wieder auftretende Wasserknappheit in den Wachstumsphasen der Folgeaufwüchse führte im Jahr 2003 auf vielen Grünlandflächen Österreichs zu katastrophalen Schäden mit massiven Ernteaussfällen.

In Ergänzung zu Abbildung 5 wird in Abbildung 6 der Verlauf der Evapotranspiration am selben Standort und im gleichen Jahr gezeigt. Die Referenz-Evapotranspiration ( $ET_0$ ) wird dabei mithilfe des Pflanzenfaktors ( $K_p$ ), der auf ein dreimal genutztes Grünland abgestimmt ist, modifiziert und ergibt damit die kulturangepasste Evapotranspiration ( $ET_c$ ). Wird diese mit dem Wasserstresskoeffizienten multiplikativ kombiniert, ergibt sich der Verlauf der aktuellen Evapotranspiration ( $ET_{c,adj}$ ). In jenen Perioden, in denen die aktuelle Evapotranspi-

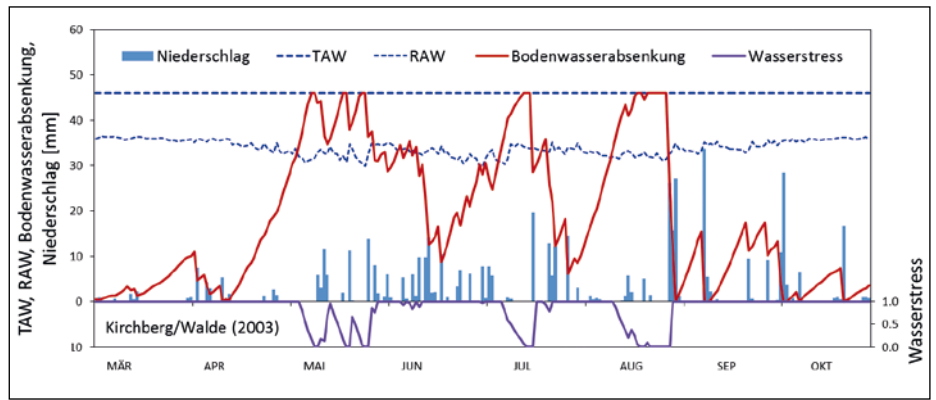


Abbildung 5: Zeitreihe ausgewählter Parameter der Bodenwasserbilanz am Standort Kirchberg am Walde (Bundesland Steiermark) in der Vegetationsperiode 2003

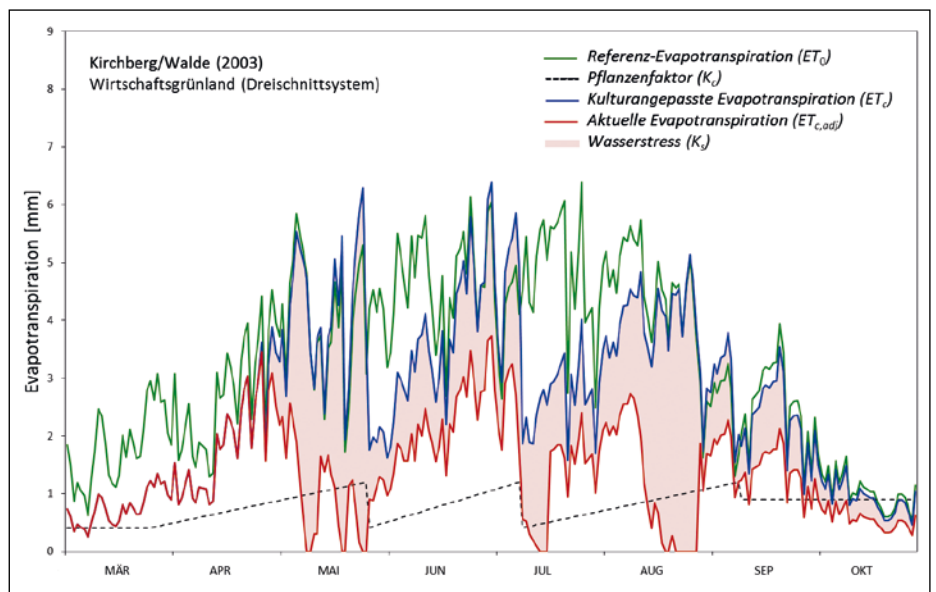


Abbildung 6: Zeitreihe von Evapotranspiration, Pflanzenfaktor und Wasserstress am Standort Kirchberg am Walde (Bundesland Steiermark) in der Vegetationsperiode 2003

ration negativ von der kulturangepassten Evapotranspiration abweicht, herrschen Bedingungen, bei denen die Pflanzen unter Wasserstress leiden. Die Intensität der Trockenheit ergibt sich aus der Höhe der Differenz, die mit zunehmender Dauer auch zu Schäden an den Kulturen, zumindest aber zu signifikanten Ertragsverlusten führt.

Die geographische Darstellung der Bodenwasserabsenkung in Abbildung 7 ermöglicht die räumliche Erfassung der Situation zum gewählten Zeitpunkt. Während in den Abbildungen 5 und 6 die zeitliche Dimension im Vordergrund steht, können in Abbildung 7 jene Gebiete identifiziert werden, die eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit aufweisen und damit von Trockenheit in unterschiedlicher Intensität betroffen sind. Die Abbildung zeigt auch, dass im Hochsommer 2003 das Berge-

biet deutlich weniger stark betroffen war als das Flachland.

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Berechnungsempfehlungen der FAO für Evapotranspiration und Bodenwasserbilanzierung nach Allen et al. (1998) sind auf Anwendungen für einzelne Standorte ausgerichtet. Sie werden unter anderem für die Optimierung von Bewässerungssystemen eingesetzt. Das FAO-Modell ist sehr stark auf Wetterdaten abgestimmt und stellt damit einen relativ einfachen, auch für die praktische Umsetzung geeigneten Ansatz dar. Der Einfluss der Biomasseentwicklung auf die Evapotranspiration wird im Modell über Pflanzenfaktoren abgebildet. Diese können einem umfangreichen Tabellenwerk entnommen werden. Die genannten Vereinfachungen sind gleichzeitig Voraussetzung

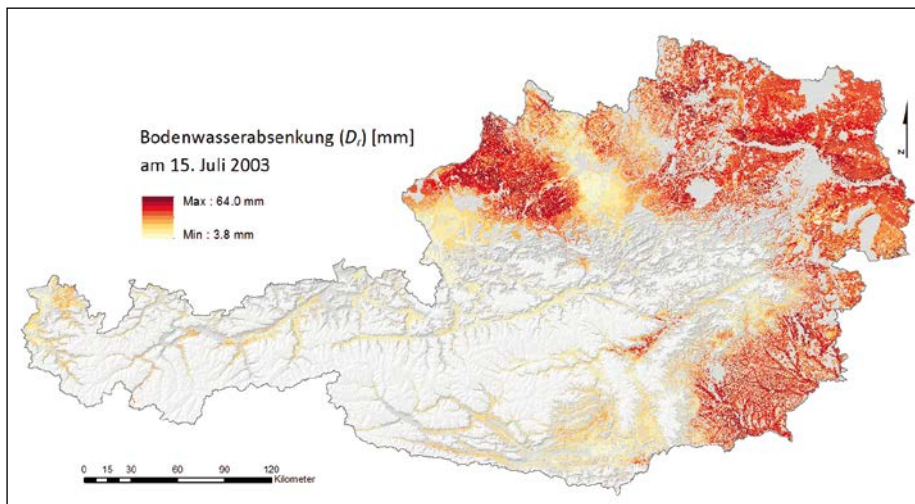


Abbildung 7: Modellierter Bodenwasserabsenkung im Oberboden am 15. Juli 2003 für die landwirtschaftlich genutzten Flächen Österreichs

und Chance für eine räumliche Implementierung in einem GIS mit nur begrenzter Verfügbarkeit von kontinuierlichen Geodaten.

Im Gegensatz zu diversen Trockengefährdungsindizes wie der *Standardized Precipitation Index* (SPI), der *Aridity Index* (AI) oder der *Palmer Drought Severity Index* (PDSI), die Dürre oder Trockenheit als meteorologisches Phänomen interpretieren, bietet der hier vorgestellte Ansatz die Möglichkeit, gezielt auf landwirtschaftliche Kulturen einzugehen und Dürre nicht nur im klimatischen Kontext, sondern darüber hinaus als Ursache für eine Verminderung der landwirtschaftlichen Produktion zu analysieren.

Da der Schwerpunkt des Modells auf Wetterinformation beruht, kann diese problemlos gegen Daten aus Klimaszenarien ausgetauscht und somit Veränderungen des Bodenwasserhaushalts für zukünftige Perioden simuliert werden. In der Applikationsmöglichkeit für Klimamodelle liegt auch ein wesentlicher Vorteil des hier entwickelten Ansatzes gegenüber Fernerkundungsmethoden, wie sie beispielsweise Gonzalez-Dugo et al. (2009) einsetzen.

Die Modellergebnisse sind sehr stark von den Fehlern in den verwendeten Geodaten abhängig. Eine Verbesserung der Interpolationsmethoden für Wetterdaten wirkt sich unmittelbar auf die räumliche

Genauigkeit aus und bietet damit einen breiten Handlungsspielraum für Verbesserungen. Künftige Revisionen der Digitalen Bodenkarte tragen ebenfalls dazu bei, sich den realen Bedingungen mehr und mehr anzunähern. Um die Abstimmung auf landwirtschaftliche Kulturen zu verfeinern, ist es vor allem notwendig, den Zusammenhang zwischen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung, Pflege, Ernte usw.) und der Biomasseentwicklung intensiver zu erforschen und in räumliche Modelle zu übertragen.

Agrarmeteorologen und Hydrologen können diese Anwendung dafür nutzen, die bislang kaum zur Verfügung stehenden räumlichen Informationen der Bodenwasserbilanz mit anderen räumlichen Daten (z. B. Erträge landwirtschaftlicher Kulturen, Analyse von Wassereinzugsgebieten usw.) zu verknüpfen und so einen durchgängigen räumlichen Bezug für diverse Analysen in ihren Arbeiten herzustellen. Aufgrund der Modellkonzeption kann die Anwendung auch auf Klimaszenarien ausgedehnt werden und bietet damit eine Grundlage zur Erforschung von regionalen Klimafolgen, vorwiegend für die Landwirtschaft.

## DANKSAGUNG

Wir danken der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für die Bereitstellung der Wetterdaten und dem Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, für die Aufbereitung der Nutzbaren Feldkapazität.

## Literatur

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers, 56. FAO, Rom, 326 S.

Ashraf, M.; Loftis, J. C.; Hubbard, K. G. (1997): Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, 84 (34), S. 255-271.

Baeumer, K. (1978): Allgemeiner Pflanzenbau. 2. Auflage. Ulmer Verlag, Stuttgart, 264 S.

Bartelme, N. (2000): Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen. 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 419 S.

Bill, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. 5. Auflage. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 804 S.

Dobesch, H.; Dumolard, P.; Dyras, I. (Eds.) (2007): Spatial Interpolation for Climate Data: The Use of GIS in Climatology and Meteorology. Geographic Information Systems Series. ISTE Ltd., London, 320 S.

Gonzalez-Dugo, M. P.; Neale, C. M. U.; Mateos, L.; Kustas, W. P.; Prueger, J. H.; Anderson, M. C.; Li, F. (2009): A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (11), S. 1843-1853.

Goovaerts, P. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series, Oxford University Press, New York/Oxford, 483 S.

Goovaerts, P. (2000): Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. In: *Journal of Hydrology*, 228 (1-2), S. 113-129.

Haiden, T.; Kann, A.; Wittmann, C.; Pistotnik, G.; Bica, B.; Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. In: *Weather and Forecasting*, 26 (2), S. 166-183.



- IPCC (2007): Klimaänderung 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Sachstandsbericht des IPCC (AR4), IPCC, Bern/Wien/Berlin, 89 S.
- .....
- Krige, D. (1951): A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. In: Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52 (6), S. 119-139.
- .....
- Larcher, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. 5. Auflage. Ulmer Verlag, Stuttgart, 394 S.
- .....
- Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W. (2005): Geographic Information Systems and Science. 2nd Edition. John Wiley & Sons, UK. 517 S.
- .....
- Mardikis, M. G.; Kalivas, D. P.; Kollias, V. J. (2005): Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration – An Application in Greece. In: Water Resources Management, 19 (3), S. 251-278.
- .....
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and environment. In: The state and movement of water in living organisms, 19, Symposium of the Society for Experimental Biology, Academic Press, S. 205-234.
- .....
- Murer, E.; Wagenhofer, J.; Aigner, F.; Pfeffer, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In: Bundesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Schriftenreihe BAW, 20. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, S. 72-78.
- .....
- Penman, H. L. (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. In: Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 193 (1032), S. 120-145.
- .....
- Schaumberger, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.
- .....
- Schaumberger, A.; Eitzinger, J.; Formayer, H. (2008): Räumliche Modellierung der potenziellen Evapotranspiration. In: Strobl, J. et al. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2008. Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 626-635.
- .....
- Thiessen, A. H. (1911): Precipitation Averages for Large Areas. In: Monthly Weather Review, 39 (7), S. 1082-1089.
- .....
- Tveito, O. E. (2007): The Developments in Spatialization of Meteorological and Climatological Elements. In: Dobesch, H. et al. (Eds.): Spatial Interpolation for Climate Data: The Use of GIS in Climatology and Meteorology. ISTE Ltd., London, S. 73-86.
- .....
- Wilhite, D. A. (1996): A methodology for drought preparedness. In: Natural Hazards, 13 (3), S. 229-252.
- .....
- WMO (2006): Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. WMO-No. 1006, Weather and climate information for sustainable agricultural development, World Meteorological Organization, 26 S.
- .....

## IMPRESSUM // PUBLICATION INFORMATION

gis.SCIENCE – Die Zeitschrift für Geoinformatik ISSN 1869-9391 // Redaktion: Gerold Olbrich, olbrich@vde-verlag.de, Tel.: +49(0)69-840006-1121 // Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill, ralf.bill@uni-rostock.de, Tel +49(0)381-498-3200 // Editorial Board: Prof. Dr. Lars Bernard, TU Dresden; Dr. Andreas Donaubauer, TU München; Prof. Dr. Max Egenhofer, University of Maine Orono; Prof. Dr. Manfred Ehlers, Universität Osnabrück; Prof. Dr. Klaus Greve, Universität Bonn; Dr. Stefan Lang, Universität Salzburg; Prof. Dr. Stephan Nebiker, Fachhochschule Nordwestschweiz, Prof. Dr. Matthäus Schilcher, TU München, Prof. Dr. Josef Strobl, Universität Salzburg // Anzeigen: Katja Hanel, VDE VERLAG GMBH, Telefon +49(0)69/840006-1341, hanel@vde-verlag.de // Abonnement-Service und Adressänderung: Kerstin Grzechnik, +49(0)69/840006-1380, Fax: -1398 // gis.Science erscheint im: Wichmann Verlag im VDE VERLAG GMBH, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin, Tel. +49(0)30/34 80 01-0, Fax +49(0)30/34 80 01-9088, www.wichmann-verlag.de // Geschäftsführung: Dr.-Ing. Stefan Schlegel, Margret Schneider // Verlagsleiter Zeitschriften: Ronald Heinze // Druck: H. Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin // Erscheinungsweise: 12 x jährlich, davon 4 Ausgaben gis.SCIENCE, 8 Ausgaben gis.BUSINESS // Jahresabonnement (12 Hefte): Inland 157,25 EUR inkl. Versandkosten, europäisches Ausland 166 EUR, sonstiges Ausland 178 EUR inkl. Versandkosten, Studenten/Auszubildende 89,00 EUR inkl. Versandkosten, Mitglieder des Deutschen Dachverbandes für Geoinformation e.V. (DDGI) erhalten das Abo im Rahmen ihrer Mitgliedschaft // Bezugszeitraum: Ein Abonnement gilt für mindestens ein Jahr und verlängert sich jeweils um das folgende Kalenderjahr, wenn es nicht bis zum 15. November eines Jahres gekündigt wurde. Bei Nichterscheinen aus technischen Gründen oder höherer Gewalt entsteht kein Anspruch auf Ersatz. // Alle in gis.SCIENCE erscheinenden Beiträge, Abbildungen und Fotos sind urheberrechtlich geschützt. Reproduktion, gleich welcher Art, können nur nach schriftlicher Genehmigung des Verlags erfolgen. // © 2013 VDE VERLAG, Berlin • Offenbach.

*Titelbild // Cover image: Simulation des Schattens visualisiert in Google SketchUp. © 2012 Christoph Kastl. Quelle (Orthophoto und Digitales Oberflächenmodell): Amt der Oö. Landesregierung, Abteilung Geoinformation und Liegenschaft.*