



Institut für Meteorologie
Peter-Jordan Str. 82
A-1190 Wien

Endbericht

Forschungsprojekt Nr. 1282

(gefördert durch das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft)

„Bestimmung der Auswirkungen von Trockenperioden im Grünland mittels Wachstumsmodellen und klimatologische Analyse österreichischer Daten“

(“Estimating the effects of dry spells in grassland using plant growth models and
climatological analysis of Austrian data”)

**Helga Kromp-Kolb, Josef Eitzinger
Herbert Formayer, Mirek Trnka
Laube Wolfgang, Grzegorz Gruszczyński**

In Kooperation mit :

Eduard Klaghofer¹, Elmar Stenitzer¹, Erwin Murer¹, Leopold Gassner¹

(¹Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT), Petzenkirchen)

Karl Buchgraber², Andreas Schaumberger², Johannes Resch²

(²Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft (BAL), Gumpenstein)

September 2005

INHALT

1. EINLEITUNG	3
1.1. Projektziele	3
1.2. Aufgabenstellungen.....	3
1.2.1. Auswahl und Adaptierung von Wachstumsmodellen für Grünland	4
1.2.2. Entwicklung/Adaption grünlandspezifischer Trockenstressindizes	4
1.2.3. Klimatologische Analyse von Trockenheitsindizes	4
2. ZEITPLAN DES PROJEKTES.....	5
3. DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERGEBNISSE (BIS 12. QUARTAL, BIS JULI 2005)	5
3.1. Stationsbetreuung und Datenerhebungen	6
3.2. Verifizierung der Wasserbilanz und von Trockenstress unter Grünland	11
3.3. Modelle zur Ermittlung von Trockenschäden im Grünland.....	30
3.3.1. FAO-Wasserbilanzmethode und abgeleitete Indizes	30
3.3.2. SPI Index	37
3.3.3. Dynamische Ertragsmodelle	40
3.3.4. Empirisches Ertragsmodell GRAM – Methode und Ergebnisse	48
3.3.5. Übersicht über die Güte der verschiedenen getesteten Modelle	68
3.4. Übertragung der meteorologischen Parameter in die Fläche – GIS Implementierung.	69
3.4.1 Interpolation der Globalstrahlung	70
3.4.2 Interpolation der Referez Evapotranspiration (ET _o)	73
3.4.3 Interpolation des Niederschlages	76
3.4.4 Interpolation der Temperaturen	79
3.4.5 Limitierungen der Interpolationsverfahren und Ausblick	80
3.4.6 GIS-implementation des Trockenschadenmodelles	81
4. LIMITATIONEN UND AUSBLICK ZUR WEITERENTWICKLUNG DES SYSTEMS	86
5. ZUSAMMENFASSUNG	87
5. LITERATUR.....	88

1. Einleitung

1.1. Projektziele

Ziel dieses Projektes war es Teilaspekte des von der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein eingereichten Projektes "Entwicklung eines Modells für die konkrete Ermittlung von Trockenschäden in den einzelnen Grünlandregionen Österreichs" wissenschaftlich aufzuarbeiten. Konkret handelt es sich um die Punkte 1.1.1 „Wasserverbrauch und Ertragsmodelle“ und 1.1.2 „Klimadaten“ des obigen Antrages. Das Gesamtziel beider Projekte war die Bestimmung von Trockenschäden im Grünland sowie eine Verifizierung verschiedener Berechnungsmodelle und dient in weiterer Hinsicht als Basis für ein Versicherungsmodell für Trockenschäden im Grünland.

1.2. Aufgabenstellungen

Das Arbeitskonzept des Projektes ging davon aus, dass Trockenstress am besten durch Rechenmodelle erfasst werden kann, welche sowohl den Bodenwasserhaushalt als auch die klimatischen/meteorologischen Einflüsse auf das Pflanzenwachstum berücksichtigen. Derartige Modelle verschiedener Komplexität liegen vor, mussten aber für die jeweiligen Standorte angepasst werden. Diese prozessorientierten Ertragsmodelle benötigen relativ umfangreiche und repräsentative Eingabeparameter (Bodendaten, meteorologische Daten). Da diese Daten nicht für alle Grünlandstandorte verfügbar waren, wurde – um eine GIS implementation zu ermöglichen - ein vereinfachtes Modell mit möglichst geringen Ansprüchen an Modelleingabedaten (wie z.B. an Bodeninformationen) adaptiert und mit den komplexeren Modellen, die wegen der höheren Ansprüche nur an wenigen Stellen eingesetzt und validiert werden konnten, verglichen. Das vereinfachte Modell wurde durch den Modellvergleich getestet und überprüft. Dadurch können z.B. bei Anwendung an vielen verschiedenen Standorten die Unsicherheiten für eine weitere künftige Verbesserung des Systems abgeschätzt werden, wie z.B. die Bedeutung der Inhomogenität des Bodens für die Berechnung der Evapotranspiration im Grünland.

Für die flächendeckende Darstellung des Trockenstress gibt es das Problem, dass bodenphysikalische Daten in der gewünschten kleinräumigen Skala (Schlaggröße) – abgesehen von der vom IKT zur Verfügung gestellten nutzbaren Feldkapazität auf Gridbasis - digital noch nicht in entsprechender Qualität verfügbar sind. Daher wurde auch versucht, den Trockenstress auch aus rein meteorologischen Parametern abzuschätzen (meteorologische Trockenheitsindizes) und um festzustellen mit welcher Unsicherheit diese Methodik verbunden ist.

Im Rahmen des Projektes wurden folgende Punkte bearbeitet :

1.2.1. Auswahl und Adaptionierung von Wachstumsmodellen für Grünland

Es wurde eine Auswahl von geeigneten Wachstumsmodellen mit verschiedener Komplexität getroffen werden. Die für die Modelle benötigten Eingabeparameter (z.B. Pflanzen- und Bestandescharakteristika, Boden, Bearbeitungsart) wurden grossteils durch das Projekt der BAL-Gumpenstein abgedeckt, standen aber nicht für alle 4 Versuchsstandorte in gleichem Umfang zur Verfügung, was insbesondere langjährige Versuchsdaten betrifft. Die meteorologischen Parameter und der Bodenwassergehalt wurde während der Projektdauer von eigenen agrarmeteorologischen Stationen gemessen bzw. von nahegelegenen Stationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zu den Messparzellen interpoliert.

Die Adaption und Validierung der Modelle erfolgte somit mithilfe der Feldversuchsdaten der BAL-Gumpenstein und zusätzlich durch die gemessenen Witterungs- und Bodenparameter vor Ort. Die repräsentative Berechnung der aktuellen Evapotranspiration ist eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale eines Pflanzenwachstumsmodells und essentiell für das „Mutterprojekt“. Die Adaption der Modelle an den Versuchsstandorten erfolgte nach Möglichkeit im ersten Jahr, das zweite und dritte Jahr diente zur Validierung, die unter Einbeziehung von Daten künftiger Versuchsjahre noch verbessert werden sollte.

1.2.2. Entwicklung/Adaption grünlandspezifischer Trockenstressindizes

Pflanzenwachstumsmodelle konnten aufgrund der benötigten Standortparameter nur standortbezogen gerechnet werden. Die Interpolation dieser Ergebnisse ist aufgrund des signifikanten Einflusses der Bodeneigenschaften und -mächtigkeit wegen der Inhomogenität des Bodens nicht direkt möglich. Daher wurden anhand der detaillierten Ergebnisse der Pflanzenwachstumsmodelle an den ausgewählten Referenzstandorten, aber auch durch eine klimatologische Analyse der Korrelation von Trockenstress und Ertrag (länger Zeitreihen mit Ertragserhebungen liegen bei der BAL Gumpenstein auf) spezielle Trockenstressindizes bzw. statistische Modelle für die Grünlandwirtschaft abgeleitet, welche aus rein meteorologischen Daten bzw. leicht verfügbaren Informationen (wie Schnittanzahl, Düngung) berechnet werden können. Das beste getestete statistische Ertragsmodell wurde dann in Kombination mit einem vereinfachten Bodenwassergehalts- bzw. Verdunstungsmodell mittels GIS und digitalem Höhenmodell (DHM) in die Fläche interpoliert.

Die Ergebnisse aus diesen Arbeiten können bei weiterem sukzessiven Ausbau der Datenbasis (z.B. Digitalisierung hoch räumlich aufgelöster Boden- und Standortdaten) als gute Grundlage für einen flächenbezogenen Einsatz anspruchsvollerer Modelle (agrarmeteorologische Modelle und Trockenheitsindizes) in der Zukunft dienen.

1.2.3. Klimatologische Analyse von Trockenheitsindizes

Die abgeleiteten grünlandspezifischen Trockenstressindizes konnten für alle Stationen der ZAMG, welche über mehr als 30 Jahre Daten verfügen, berechnet

werden. Diese wurden klimatologisch untersucht und in die Fläche interpoliert. Dadurch bekommt man Karten, die das Trockenstressrisiko für Grünland in Österreich darstellen.

Diese Indizes können auch aus den aktuellen Wetterdaten berechnet und interpoliert werden und geben den aktuellen „meteorologischen Trockenstress“ wieder. Um den „realen Trockenstress“ zu bestimmen, musste man jedoch auch den Einfluß des Bodens berücksichtigen, der in Form verschiedener Bezugsperioden oder Parameter wiedergegeben wurde.

2. Zeitplan des Projektes

Quartal	Juli 2003				Juli 2004							
	1/1	1/2	1/3	1/4	2/1	2/2	2/3	2/4	3/1	3/2	3/3	3/4
Aufbereitung historischer Daten	■	■		■				■				
Modellauswahl	■	■	■									
Stationsaufbau ¹		■										
Stationsbetreuung ² und zusätzliche Datenerhebungen		■	■	■		■	■	■		■	■	■
Modell-Parametrisierung		■	■	■								
Verknüpfung histor. Klima- und Ertragsd.			■	■	■	■						
Analyse der Feldmessungen			■	■			■	■		■	■	
Best. v. Trockenstress Indizes				■	■	■	■					
Klimatologische Analyse der Indizes				■				■	■	■		
Modellvalidierung						■	■	■		■	■	
GIS Applikation							■	■			■	■
Berichte				■				■				■

¹: Die Bodenfeuchtemessstationen werden einmalig aufgebaut, die agrometeorologische Station je nach Bedarf versetzt.

²: Die Stationen müssen während der Vegetationsperiode mindestens einmal im Monat abgelesen und kontrolliert werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse (bis 12. Quartal, bis Juli 2005)

3.1. Stationsbetreuung und Datenerhebungen

Die im ersten Projektjahr installierten Meßstationen lt. 1. Zwischenbericht (Stationen in Gumpenstein (G1), Piber (G2), Kirchberg/Walde (G3) und Winkelhof/Salzburg (G4); siehe Abb.9) wurden in regelmässigen Zeitabständen zwecks Kontrolle und Datensammlung besucht. Die Datenablesungen im Feld erfolgen in Abständen von 1-2 Monaten. Die Daten wurden anschließend kontrolliert, weiterbearbeitet (Statistik) und für die Weiterverwendung (für die Modellparametrisierungen und -validierungen) aufbereitet.

In den folgenden Abbildungen 1-8 sind ausgewählte Parameter (Tageswerte von Temperatur, Niederschlag, Bodenwasserhalt) der Messungen der agrarmeteorologischen Stationen an den 4 Versuchsstandorten über die vergangenen 3 Jahre dargestellt. An den Stationen G1 und G4 wurde nur der Bodenwassergehalt gemessen und die Witterungsdaten der nahegelegenen ZAMG Stationen verwendet. An den Stationen G2 und G3 wurden alle Parameter mit den agrarmeteorologischen Stationen vor Ort gemessen da keine ZAMG Stationen nahe genug am Standort vorhanden sind.

Während der Wintermonate (bei Bodenfrost) sind keine Wassergehaltsmessungen möglich, diese Daten sind daher nicht dargestellt. An allen 4 Messstandorten ist deutlich das Trockenjahr 2003 erkennbar, allerdings in unterschiedlicher Ausprägung. Auch die Bodenart hat einen deutlichen Einfluß auf die gemessenen Bodenwassergehalte (vgl. z.B. Gumpenstein und Winkelhof). Zum Teil ist dies auch bedingt durch das verwendete Messsystem (CS616 FDR Sonden), welches bei hoher Bodendichte zu hohe Messwerte ausgibt (Offset). Allerdings ist dies für die Modellkalibrierung des verwendeten Bodenwasserbilanzmodelles nur bedingt ein Problem, da hier nur die relative Änderung des Bodenwassergehaltes als Kalibrierfaktor verwendet wurde.

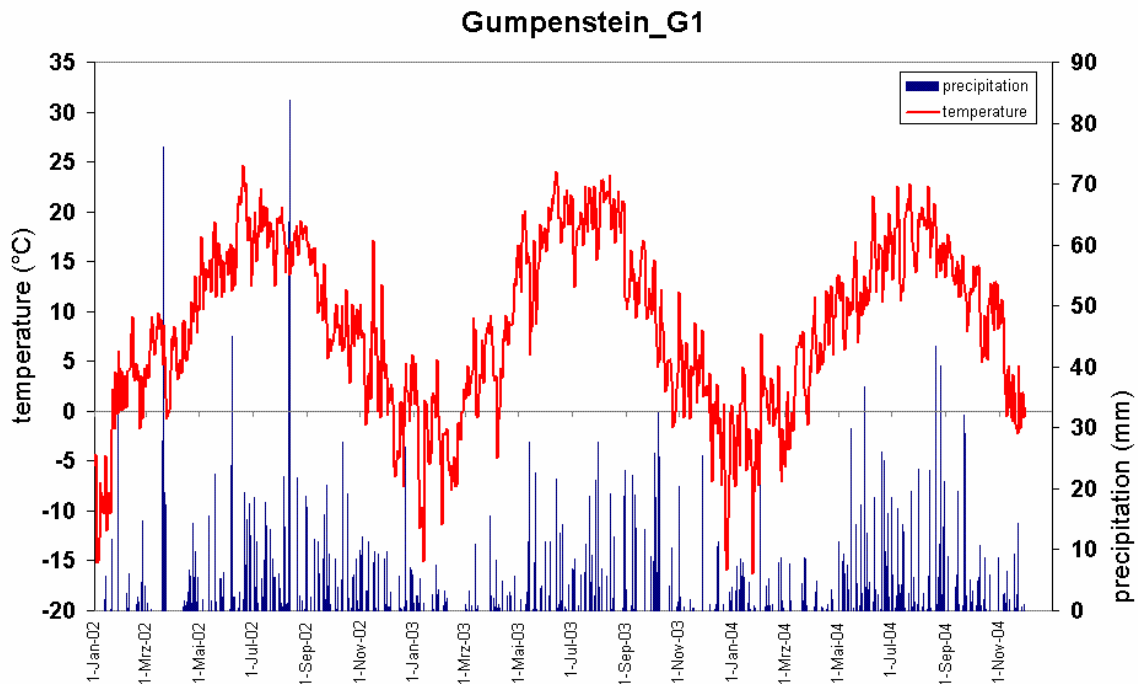


Abb. 1: Lufttemperatur und Niederschlag am Versuchstandort Gumpenstein

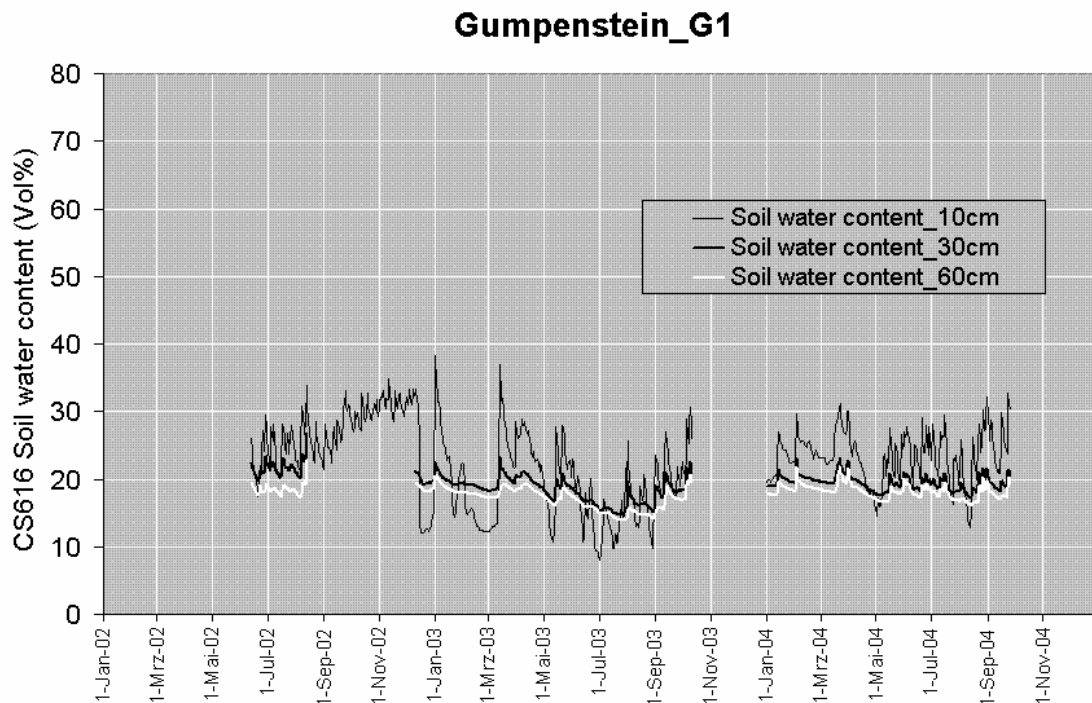


Abb. 2: Bodenwassergehalte am Versuchstandort Gumpenstein

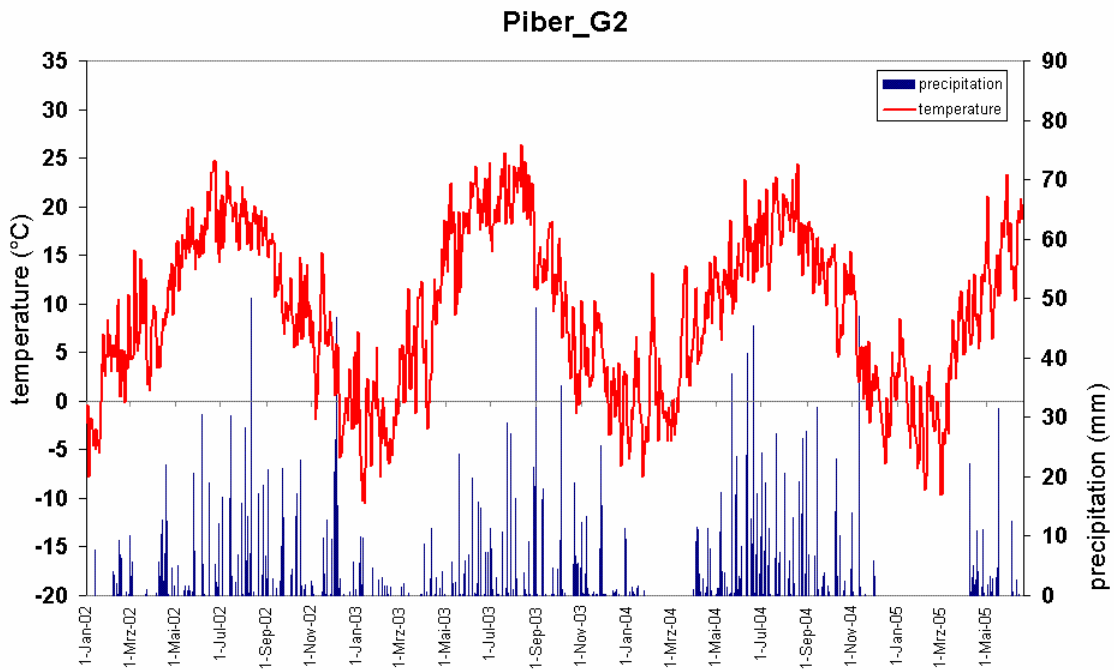


Abb. 3: Lufttemperatur und Niederschlag am Versuchstandort Piber

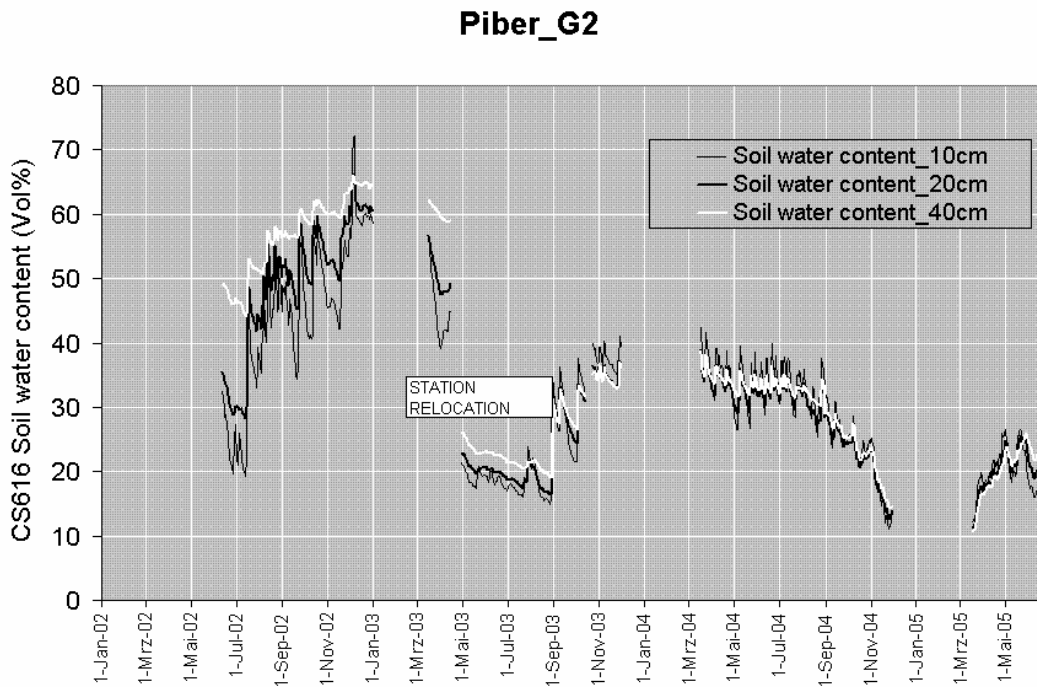


Abb. 4: Bodenwassergehalte am Versuchstandort Piber

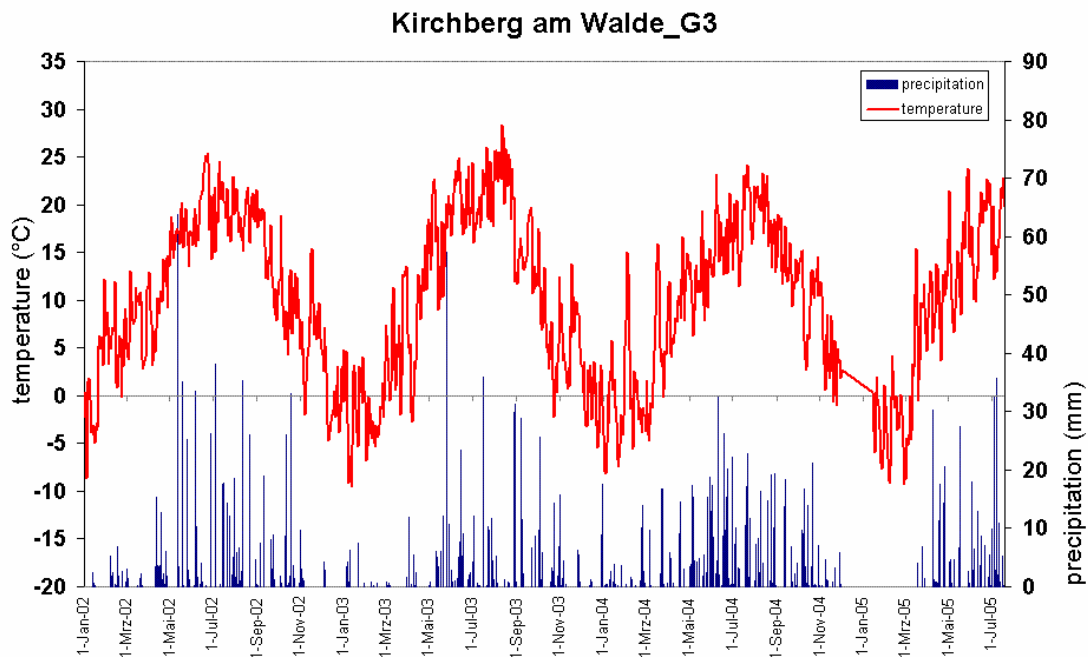


Abb. 5: Lufttemperatur und Niederschlag am Versuchstandort Kirchber/Walde

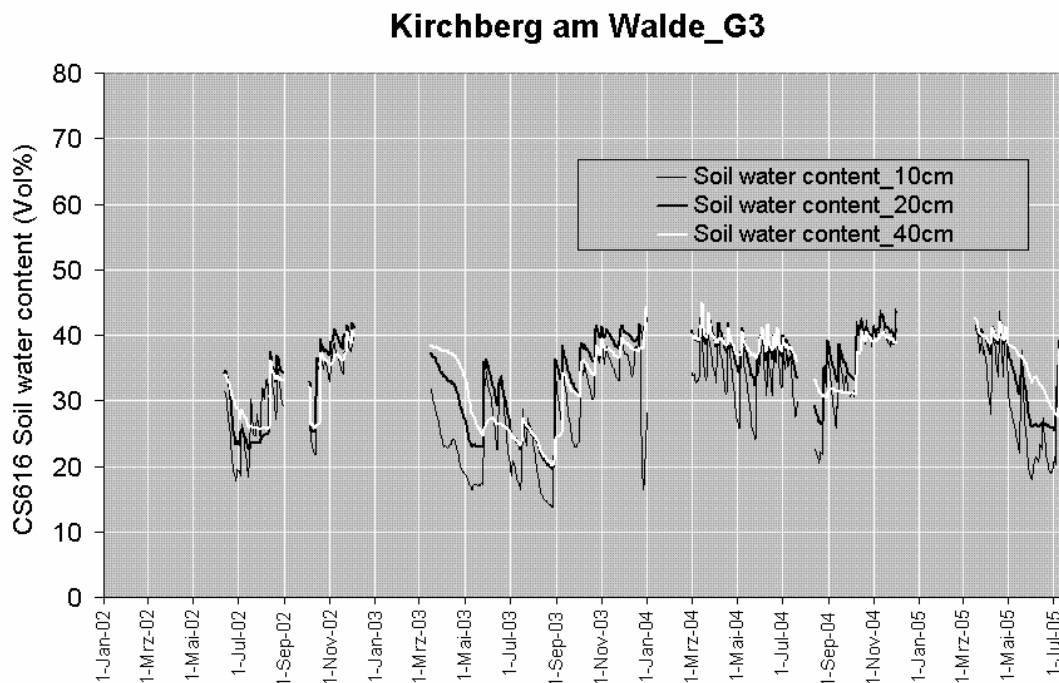


Abb. 6: Bodenwassergehalte am Versuchstandort Kirchberg

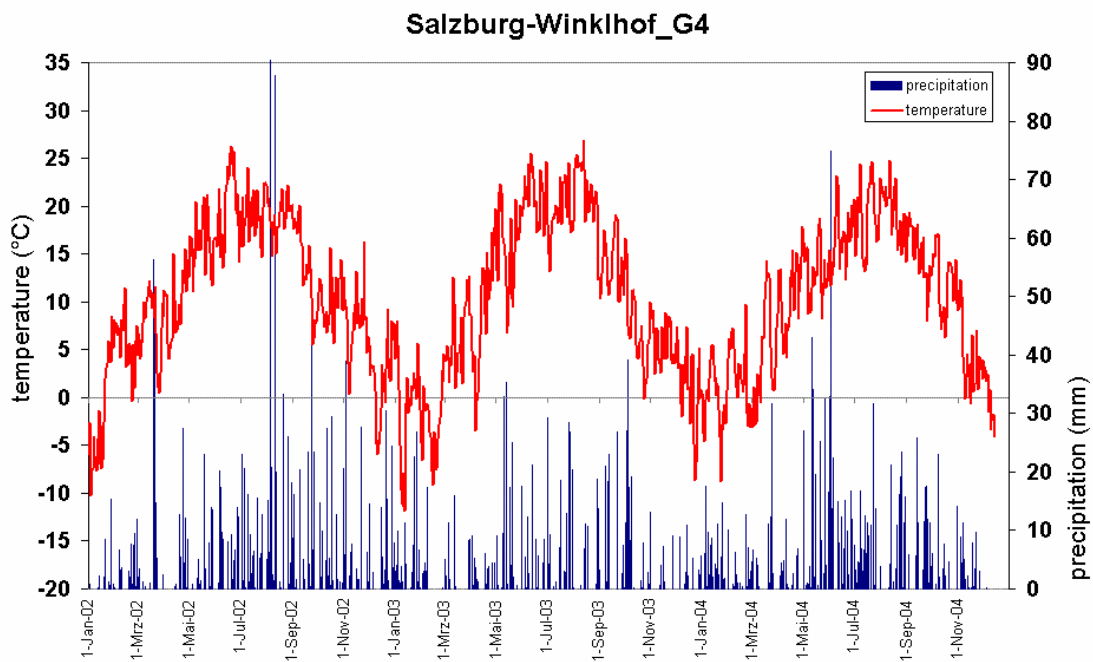


Abb. 7: Lufttemperatur und Niederschlag am Versuchstandort Winklhof

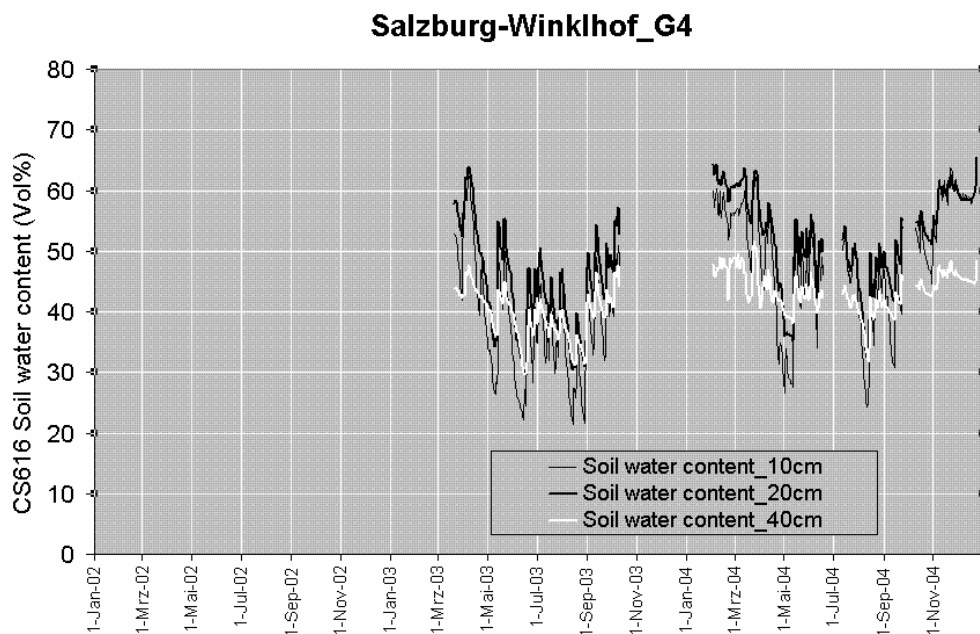


Abb. 8: Bodenwassergehalte am Versuchstandort Winklhof. Diese Station wurde im Jahr 2003 installiert.

3.2. Verifizierung der Wasserbilanz und von Trockenstress unter Grünland

Am Standort Kirchberg am Walde (Steiermark) wurden intensive Vergleichsmessungen zur Verifizierung der Wasserbilanz unter Grünland durchgeführt. Dies war deshalb wichtig um die von den Bodenwassergehaltsmessungen abhängigen Parametrisierungen der Wasserbilanz- und Wachstumsmodelle durchführen zu können bzw. Fehler der Modellparametrisierung möglichst reduzieren zu können. Dieser Versuchsstandort wurde auch deshalb gewählt weil er den niederschlagsärmsten Standort der 4 intensiv untersuchten Standorte, und daher einen durch Trockenheit gefährdeten Standort darstellt (siehe Ertragsstatistik, Abb.9). Unterstützende Untersuchungen und Messungen zur Bodenwasserbilanz wurden an diesem Standort vom **Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT), Petzenkirchen** (Dr. E. Stenitzer, L. Gassner) durchgeführt und ausgewertet, wie nachfolgend dargestellt.

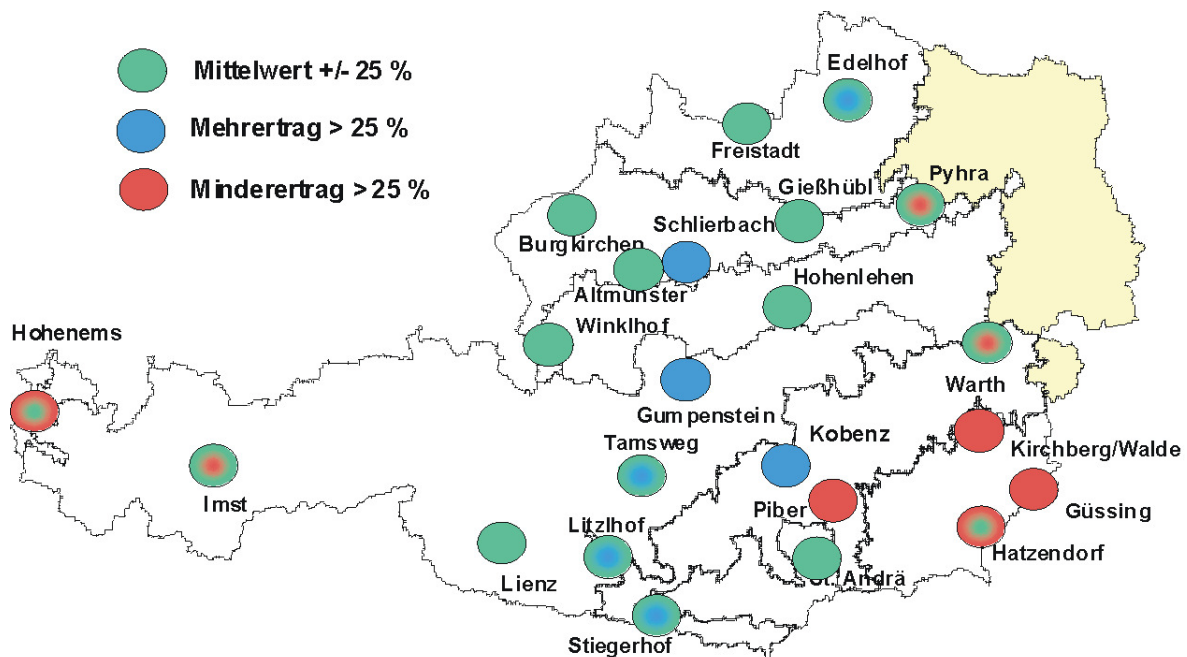


Abb. 9: Relativer Trockenmasseertrag an verschiedenen Versuchsstandorten im Jahr 2002 (nach Resch, 2003).

Die Messungen am Standort Kirchberg begannen im Jahr 2002 mit dem Aufbau einer agrarmeteorologischen Station (vgl. Zwischenbericht 1), im Frühjahr 2003 wurden schliesslich die zusätzlichen Messungen der Bodenwasserspannung und des Bodenwassergehaltes durch das IKT mithilfe einer weiteren Messtation begonnen.

Standortbeschreibung

Der Versuchsstandort Kirchberg (Abb. 9) liegt auf ca. 500m Seehöhe an einem leicht nach Süd-Ost abfallenden Hang und ist gegen Nord- und Westwinde relativ geschützt. Der langjährige Niederschlag (1961-1990) liegt bei 790 mm (HZB, 1994). Die zum Teil intensiven Konvektivniederschläge im Sommer können signifikanten Oberflächenabfluß verursachen. Die langjährige Mitteltemperatur liegt bei 8.4 °C, die mittlere Windgeschwindigkeit bei 1.2 m/s. Die Bodenart des Versuchsstandortes (ÖBK, 1977) ist Bodenform 29, eine "pseudovergleyte kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus feinem Tertiär Material".

Messergebnisse und Verifizierung

Die Bodenwassergehaltmessungen wurden unter der 2-Schnittvariante durchgeführt. Eine Übersicht über alle Schnitt- und Düngungsvarianten dieses Standortes zeigt Tab.1. Zu beachten ist, dass die Düngungsmengen mit zunehmender Schnitthäufigkeit stark zunehmen.

Tab. 1: Versuchsvarianten in Kirchberg am Walde

Jahr	Gülle-system								
	2-Schnittfl.			3-Schnittfl.			4-Schnittfl.		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2002	79	20	84	121	32	118	223	45	169
2003	63	20	66	96	30	106	187	42	151
2004	73	23	68	106	38	106	201	54	152

An der agrarmeteorologischen Station des IM wurden alle Witterungsparameter in 15-min Zeitauflösung gemessen. Zusätzlich erfolgten an dieser Station in den Tiefen 10, 20, 30, 40, 50 und 60 cm Messungen des Bodenwassergehaltes mit dem "Campbell CS-615 WCR water content reflectometer" (Abb.10).

Zusätzlich wurde vom IKT mithilfe einer eigenen Messstation die Bodenwasserspannung in 10, 20, 30, 60 and 80 cm Tiefe mit kalibrierten WATERWISE Gipsblöcken und WATERMARK Granular Matrix Sensoren durchgeführt (Abb.11), wobei der gesamte Druckbereich abgedeckt werden konnte. Kontrollmessungen mit dem TDR-messsystem TRASE wurden sporadisch in den selben Tiefen durchgeführt.

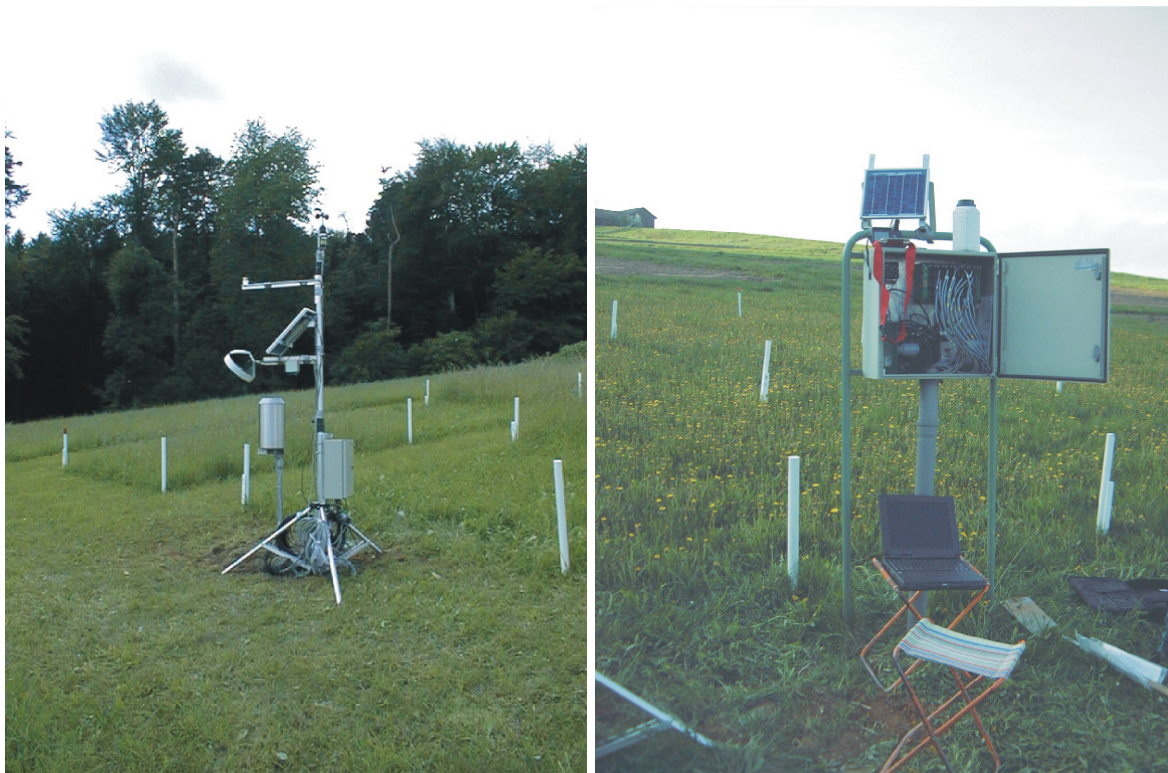


Abb. 10: Agrarmeteorologische Messtation am Versuchstandort Kirchberg inkl. Bodenwassergehaltsmessungen (links) und Messtation des IKT zur Messung der Bodenwasserspannung (inkl. Datenlogger und Multiplexer) (rechts).

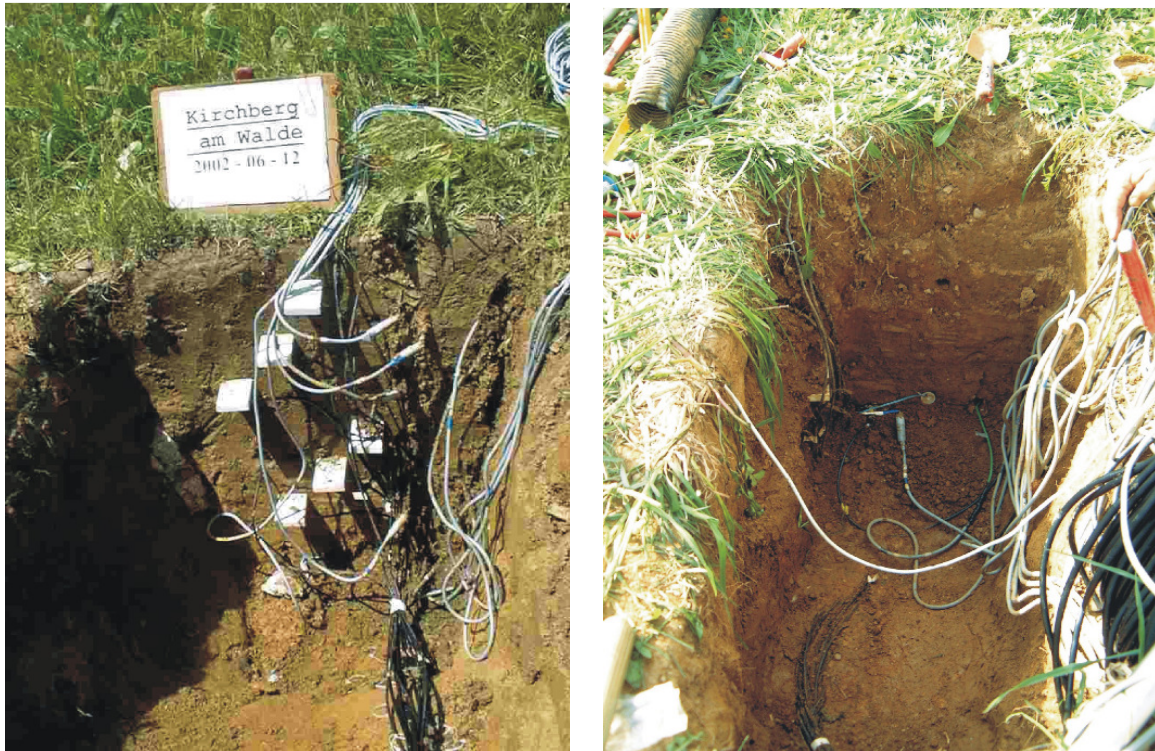


Abb. 11: Bodenprofil des Messtandortes Kirchberg; Bodenwassergehaltsmessung und Sensoreinbau (links), und Bodenwasserspannungsmessung und Sensoreinbau (rechts).

Beim Sensoreinbau wurden gestörte als auch ungestörte Bodenproben zur Untersuchung der bodenphysikalischen Eigenschaften entnommen. Die Messergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Abb.12-14 zeigen jeweils die Korngrößenverteilung die pF-Kurve, sowie die kapillare Leitfähigkeiten.

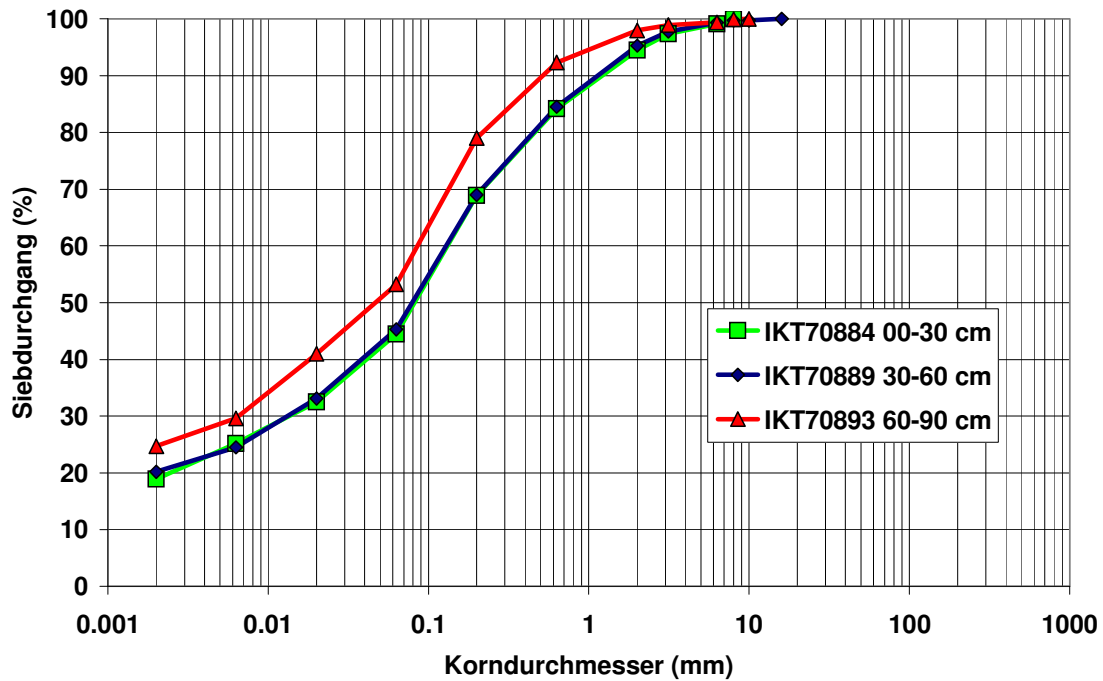


Abb. 12: Korngrößenverteilung am Versuchsstandort Kirchberg/Walde

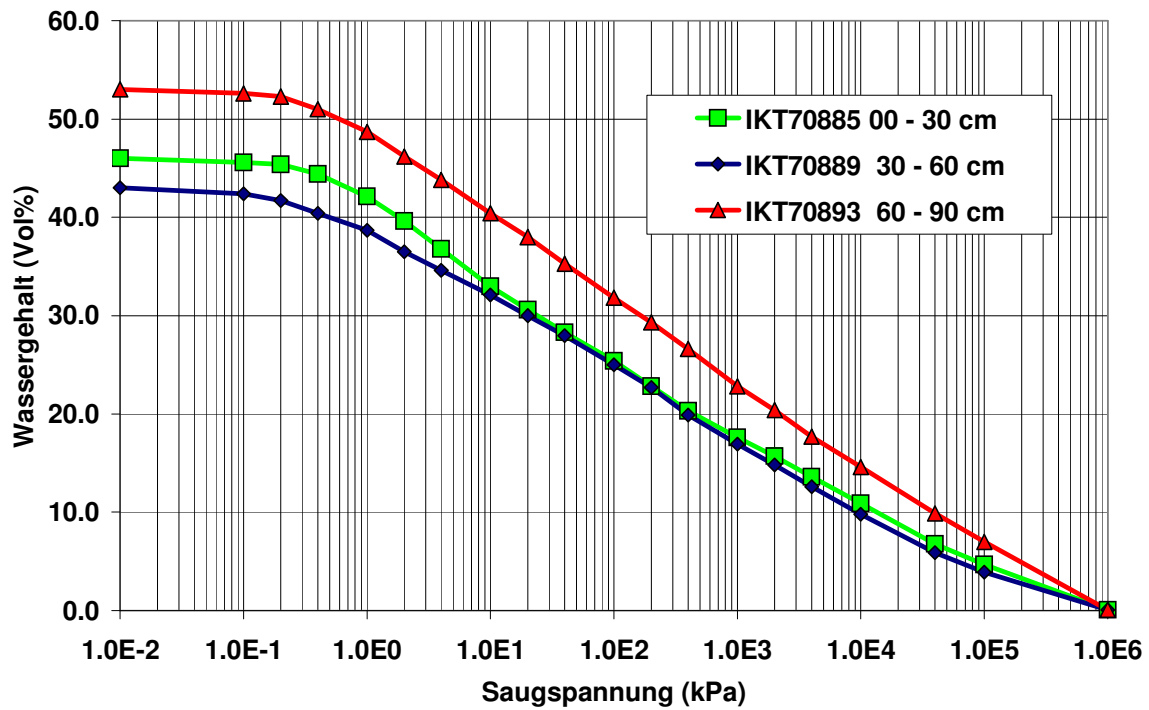


Abb. 13: pF-Kurve am Versuchsstandort Kirchberg/Walde

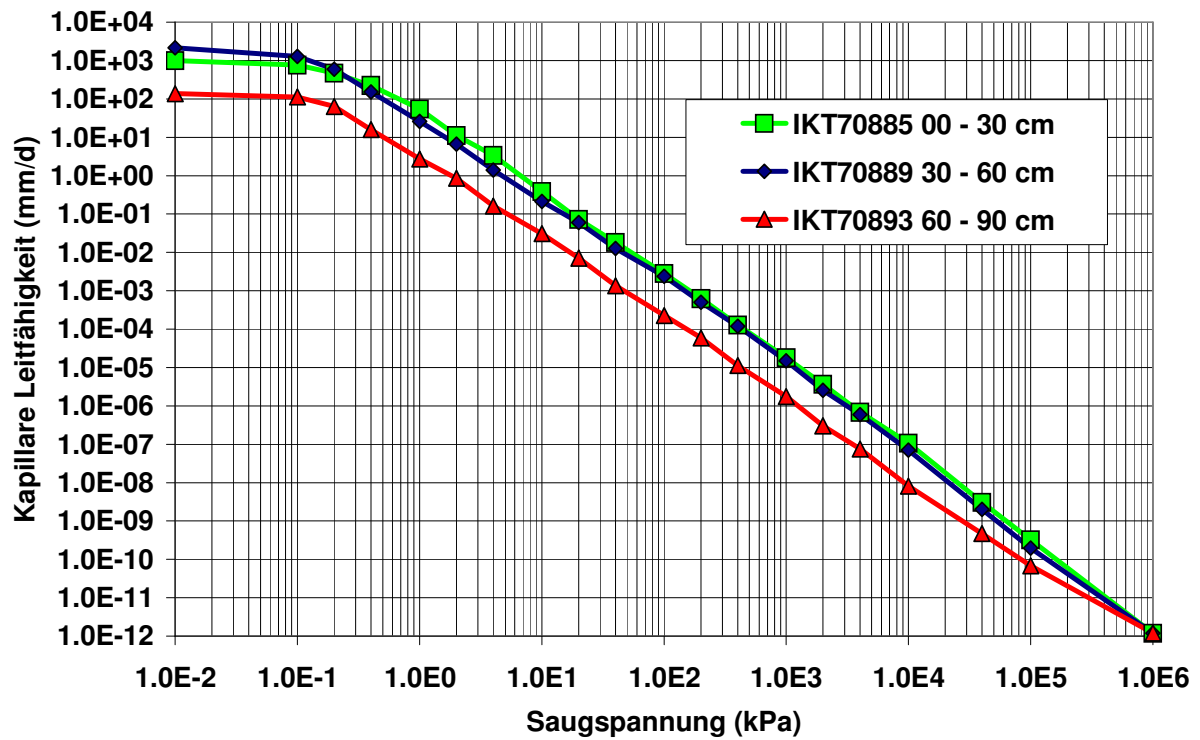


Abb. 14: Kurve der kapillaren Leitfähigkeit am Versuchsstandort Kirchberg/Walde

Auswertungen und Verifizierungen der Wasserbilanz

Messungen der Wasserspannung

Im sehr trockenen Jahr 2003 wurde der Welkepunkt (bei 15000hPa) im durchwurzelten Bereich (bis 60cm) im Laufe der Vegetationsperiode mehrere Male überschritten (Abb. 15), was sich auch im fast totalen Ertragsausfall widerspiegelte. Sogar in der Tiefe von 80cm erreichte die Saugspannung 6000 hPa, was auf einen kapillaren Aufstieg in die durchwurzelte Zone schließen lässt. Die aktive durchwurzelte Zone von ca. 60 cm konnte aus den Tagesschwankungen der Wasserspannung in den verschiedenen Bodentiefen ermittelt werden, welche nur bis in eine Tiefe von ca. 60 cm erkennbar ist (Abb. 16).

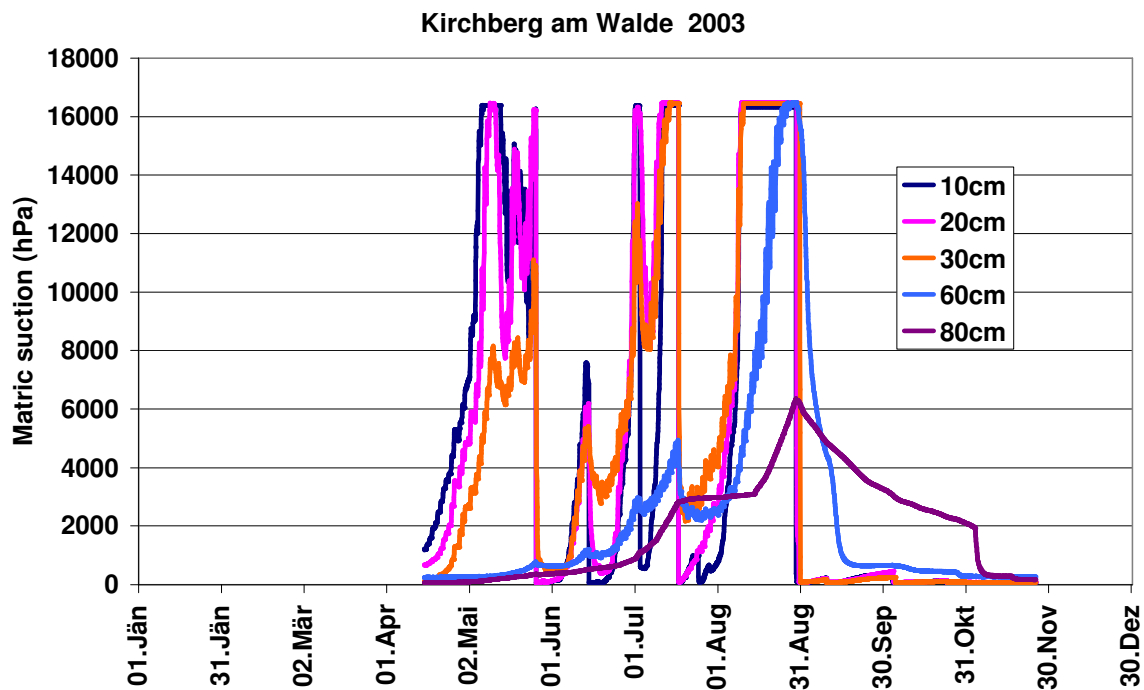


Abb. 15: Verlauf der Wasserspannung am Versuchsstandort Kirchberg im Laufe der Vegetationsperiode am Versuchsstandort in Kirchberg

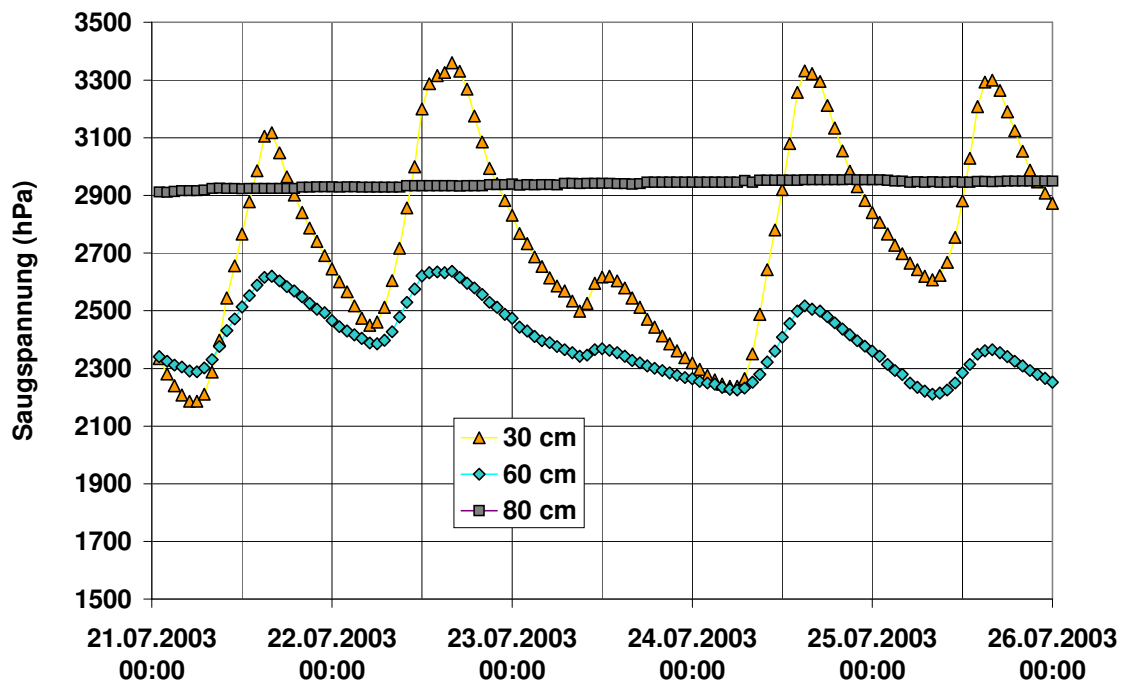


Abb. 16: Tagesverlauf der Wasserspannung in verschiedenen Bodentiefen am Versuchsstandort Kirchberg im Laufe einer Trockenperiode

Im relativ niederschlagsreichen Jahr 2004 trat fast kein Wasserstress am Versuchsstandort Kirchber auf. Die Wasserspannung erreichte nur an einigen Tagen im August in den oberen Bodenschichten den Wert von ca. 9000 hPa (Abb. 17). Im Jahr 2005 trat wieder mehr Trockenstress auf, vor allem im Zeitraum Mai-Juli was an der Wasserspannung in Abb.18 erkennbar ist.

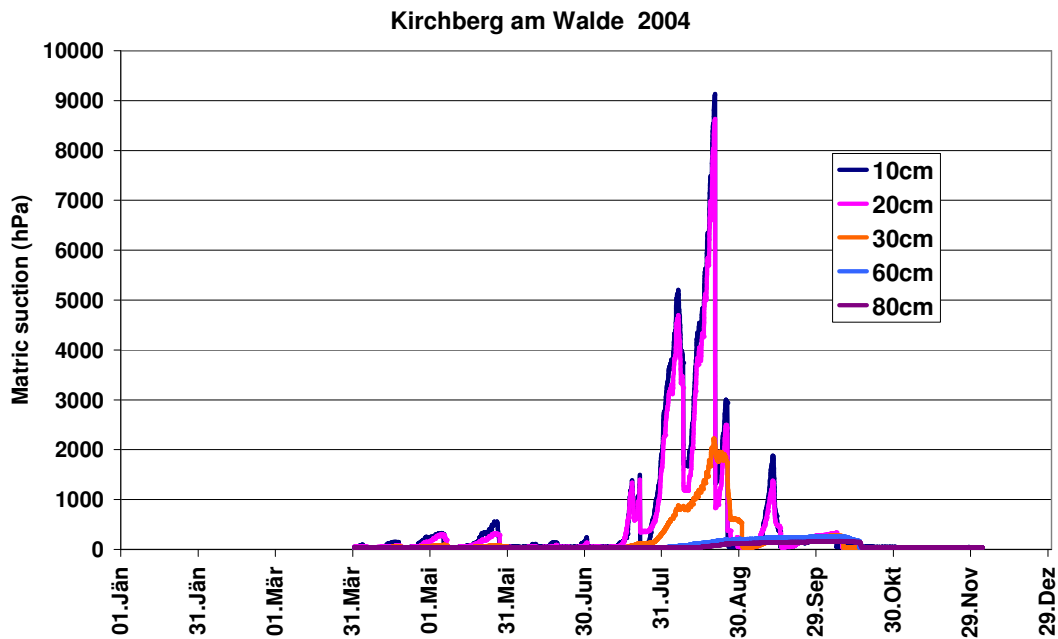


Abb. 17: Verlauf der Wasserspannung am Versuchsstandort Kirchberg im Laufe der Vegetationsperiode

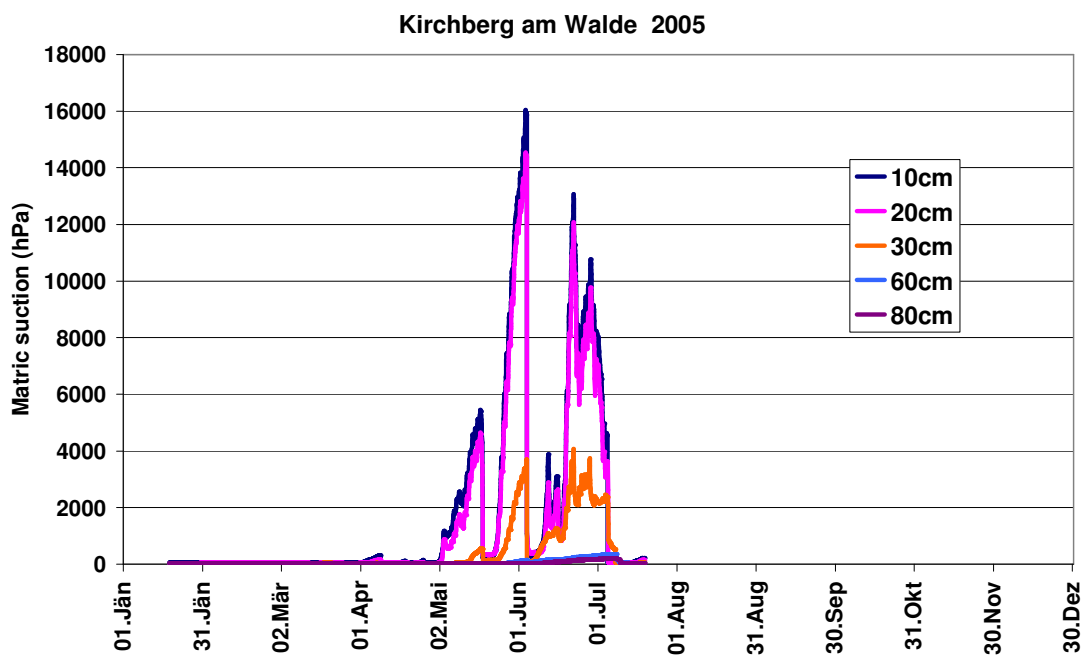


Abb. 18: Verlauf der Wasserspannung am Versuchsstandort Kirchberg im Laufe der Vegetationsperiode

Messungen des Wassergehaltes

Mit Hilfe der TDR-Messungen wurde der Zusammenhang zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurve) ermittelt bzw. die Labormessungen im Feld verifiziert (Abb. X-X). Trotz der beschränkten Datenmenge zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der methodisch unterschiedlichen Labor- und Feldbestimmung der pF-Kurve .

Tab.2. zeigt die Messergebnisse der TDR-Wassergehalte in 2004 und 2005.

Tab. 2: TDR-messungen (Vol%)

Date	TDR_10cm	TDR_20cm [TDR_30cm	TDR_60cm	TDR_80cm
03-Jun-04	33.4	33.3	32.6	41.8	45.0
21-Jun-04	34.1	34.3	33.0	43.1	45.1
24-Aug-04	20.7	23.7	25.9	38.7	36.5
23-Mär-05	frozen	34.4	33.6	43.8	46.5
10-Mai-05	26.9	30.7	32.0	43.5	39.3
12-Jul-05	34.6	34.6	33.0	39.6	43.0

Kirchberg/W. 10 cm: Field- pF_curve

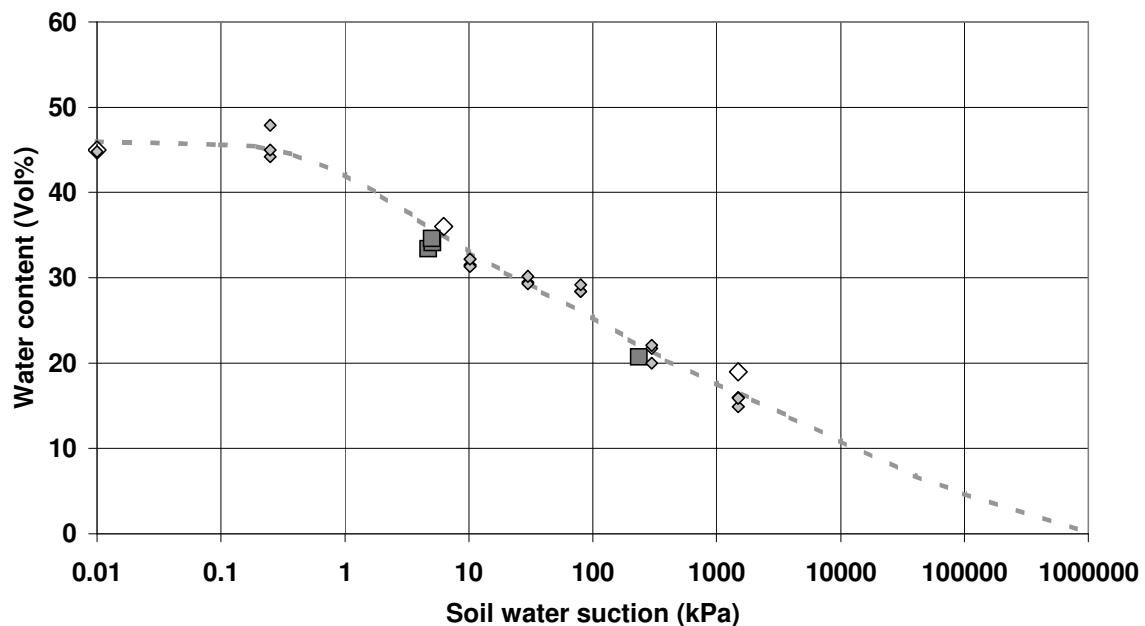


Abb. 19: Labor-pF Werte (Diamonds) und Feldmessungen (Quadrate) der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung in 10 cm Bodentiefe

Kirchberg/W. 20 cm: Field- pF_curve

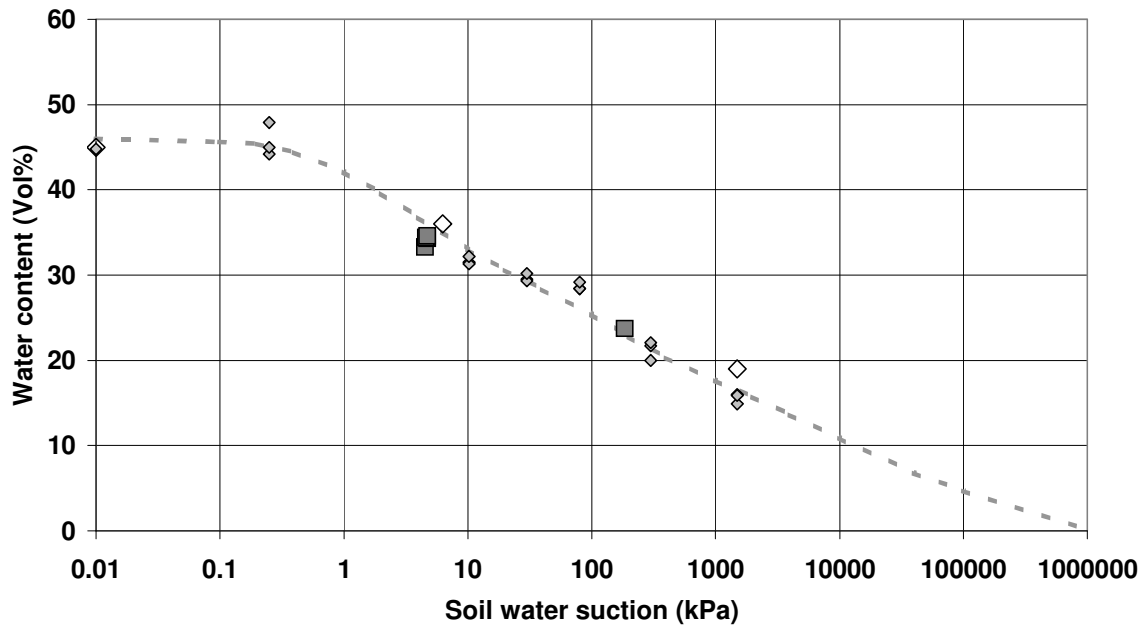


Abb. 20: Labor-pF Werte (Diamonds) und Feldmessungen (Quadrate) der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung in 20 cm Bodentiefe

Kirchberg/W. 30 cm: Field- pF_curve

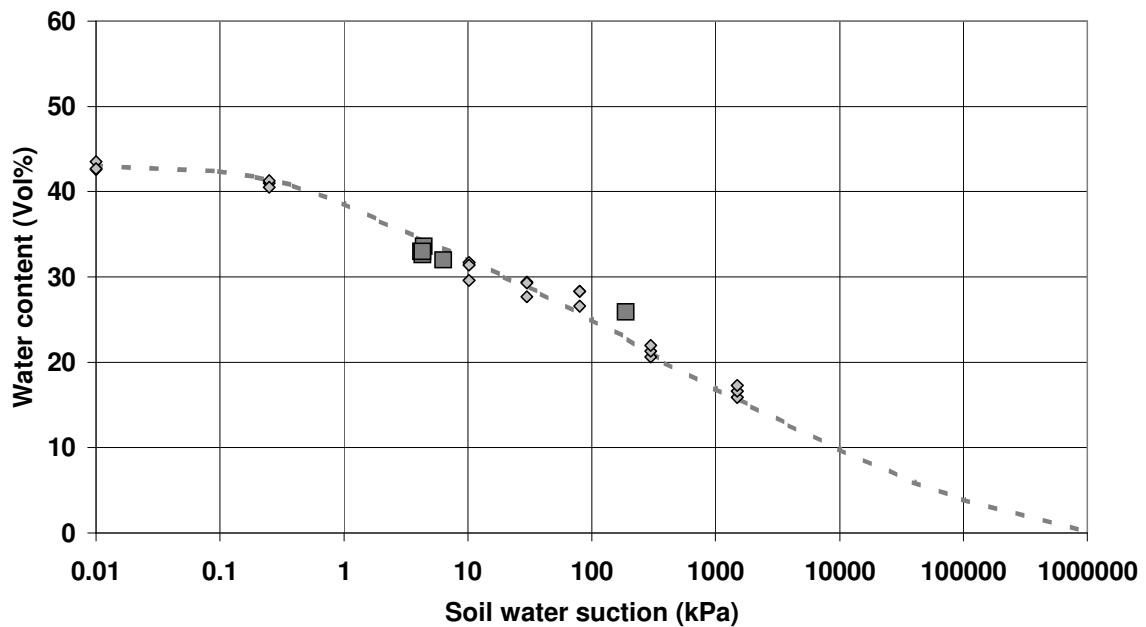


Abb. 21: Labor-pF Werte (Diamonds) und Feldmessungen (Quadrate) der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung in 30 cm Bodentiefe

Kirchberg/W. 60 cm: Field- pF_curve

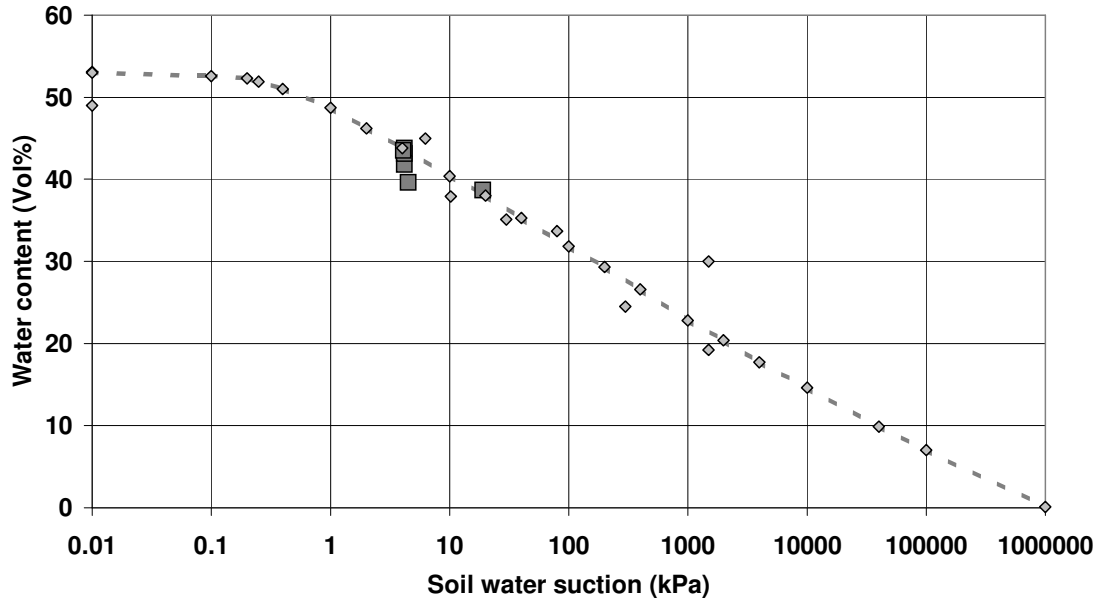


Abb. 22: Labor-pF Werte (Diamonds) und Feldmessungen (Quadrate) der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung in 60 cm Bodentiefe

Kirchberg/W. 80 cm: Field- pF_curve

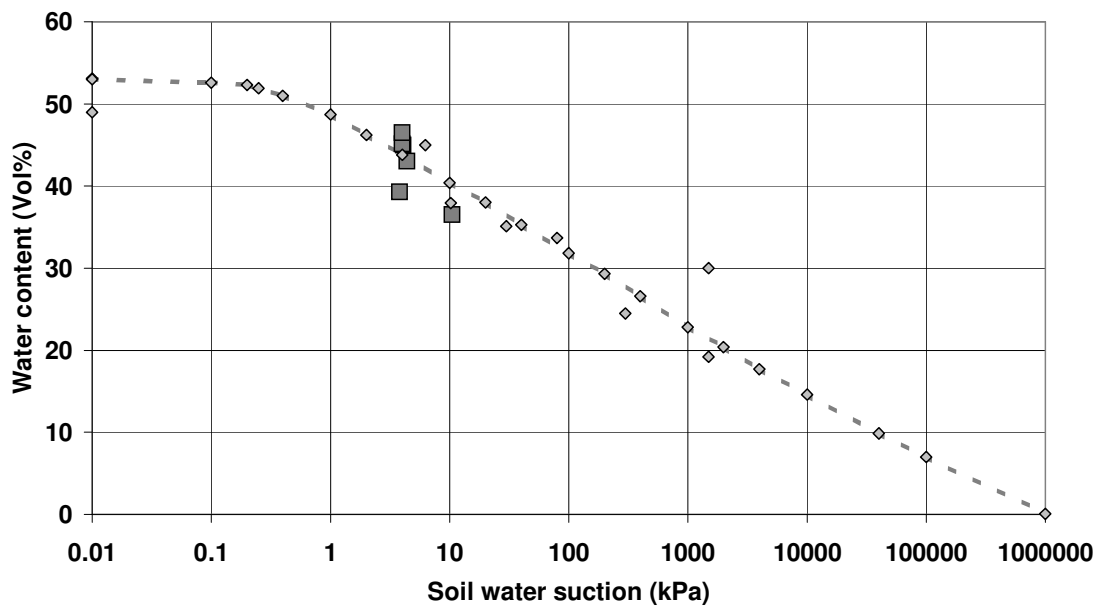


Abb. 23: Labor-pF Werte (Diamonds) und Feldmessungen (Quadrate) der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung in 80 cm Bodentiefe.

Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration aus den Messungen

Die aktuelle Evapotranspiration (Eta) kann mithilfe eines Korrekturfaktors aus der potentiellen Evapotranspiration Etp berechnet werden, der die Reduktion der Wasserentnahme der Wurzeln aus den verschiedenen Bodenschichten bei Trockenstress berücksichtigt. Dafür wurden verschiedene theoretische und empirische Beziehungen entwickelt. Die einfachste und daher häufig verwendete (insbes. in Ertragsmodellen) ist eine lineare Zunahme dieses Reduktionsfaktors wenn der Bodenwassergehalt ca. 50% der verfügbaren Feldkapazität unterschreitet. Natürlich gibt es auch komplexere Modelle die auch verschiedene Sensitivitäten berücksichtigen.

Aufgrund der Messdaten wurde einem anderen Konzept Rechnung getragen, die sog. "Rel. Bodenwasserspannung" innerhalb der durchwurzelten Bodentiefe. Der Stressfaktor Ks wird hier folgendermassen definiert :

$$Ks(i) = (1 - (psi(i) - 400)/(15000 - 400)) \quad (1)$$

wobei

Ks(i)	= Stressfaktor in der Schicht i
psi(i)	= Bodenwasserspannung der Schicht i
15000	= Bodenwasserspannung des Welkepunktes (hPa)
400	= maximale Spannung für unlimitierten Fluss

Diese mit der og. Methode entwickelte Ks Funktion ist in Abb.24 zu sehen. In der selben Art kann diese Funktion mithilfe des Wassergehaltes in Form des relativ verfügbaren Wassers dargestellt werden (Abb.25). Somit kann aus dem bekannten Bodenwassergehalt bzw. der Bodenwasserspannung jeweils Eta mithilfe der jeweiligen Ks Funktion aus ETc berechnet werden. Die potentielle Pflanzenverdunstung (ETc) wird mithilfe der FAO Gras-Referenz Gleichung nach Penman-Monteith (Allen et al., 1989) unter Berücksichtigung des Pflanzenkoeffizienten Kc berechnet (siehe Kapitel FAO modell). Abb. 26-27 zeigen die Ergebnisse für 2003 und 2004. Die Berechnung der ETa ist darauf folgend unter Berücksichtigung einer Wurzelverteilungsfunktion exemplarisch dargestellt.

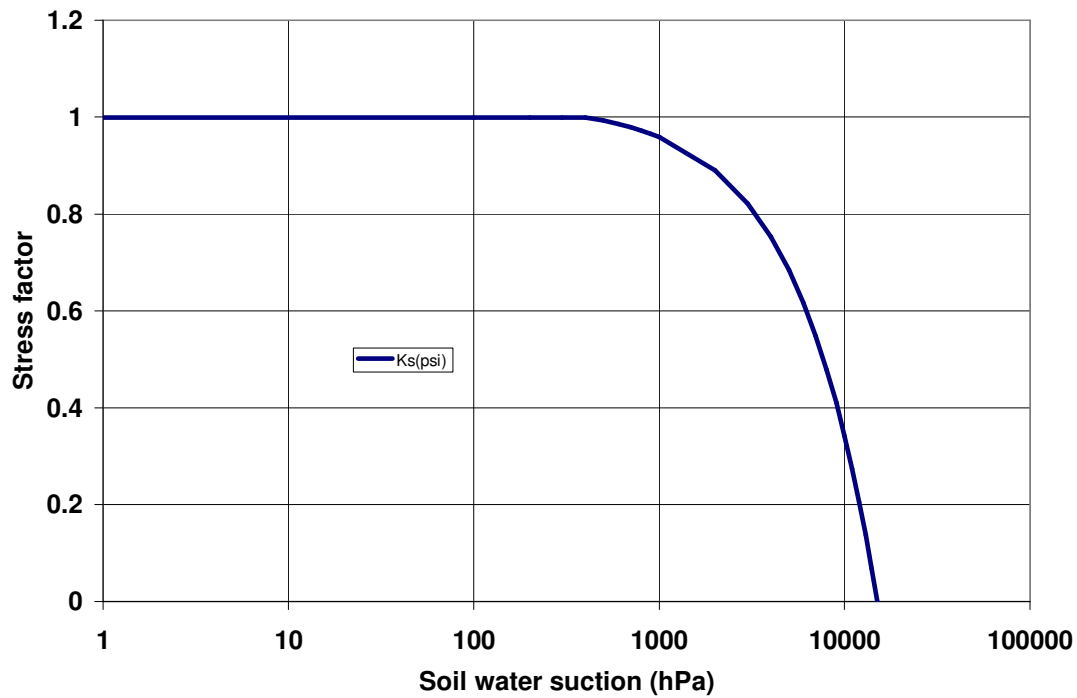


Abb. 24: Stressfaktor K_s als Funktion der Bodenwasserspannung

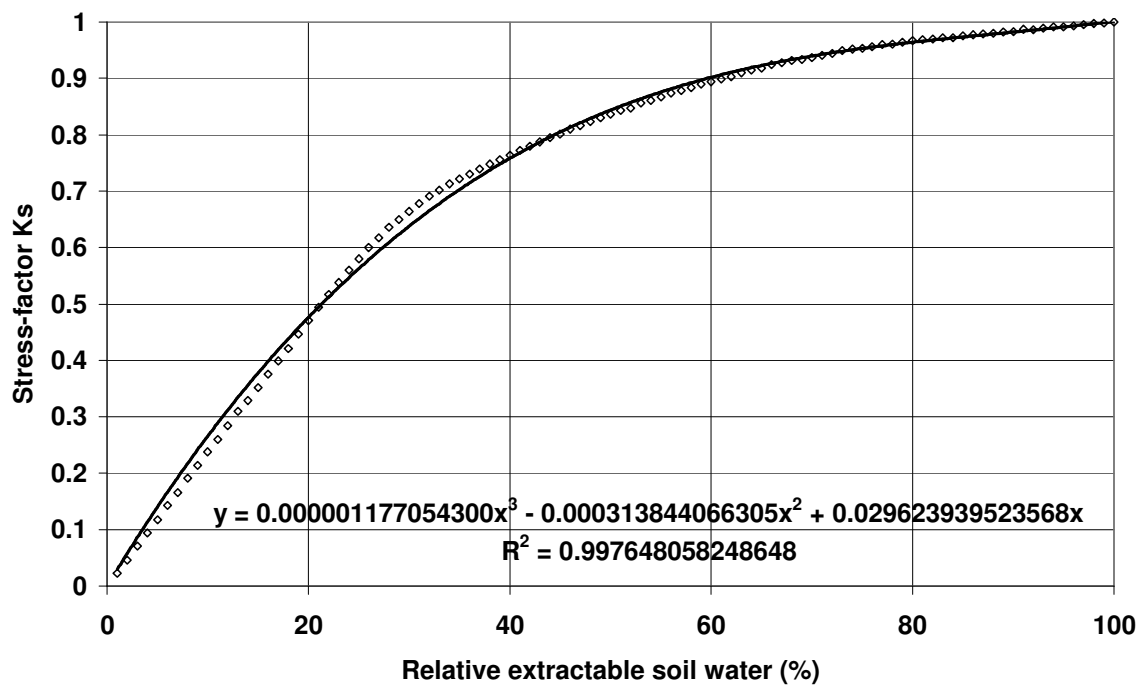


Abb. 25: Stressfaktor K_s als Funktion des verfügbaren Bodenwassers

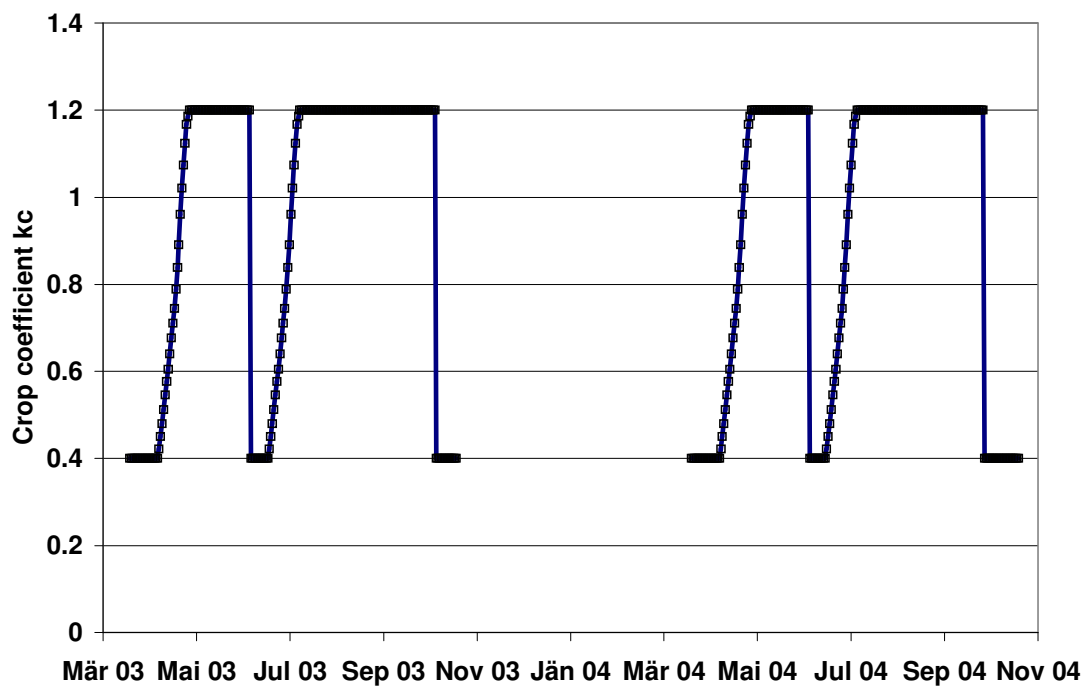


Abb. 26: Pflanzenkoeffizient Kc der 2-Schnittvariante in 2003 und 2004

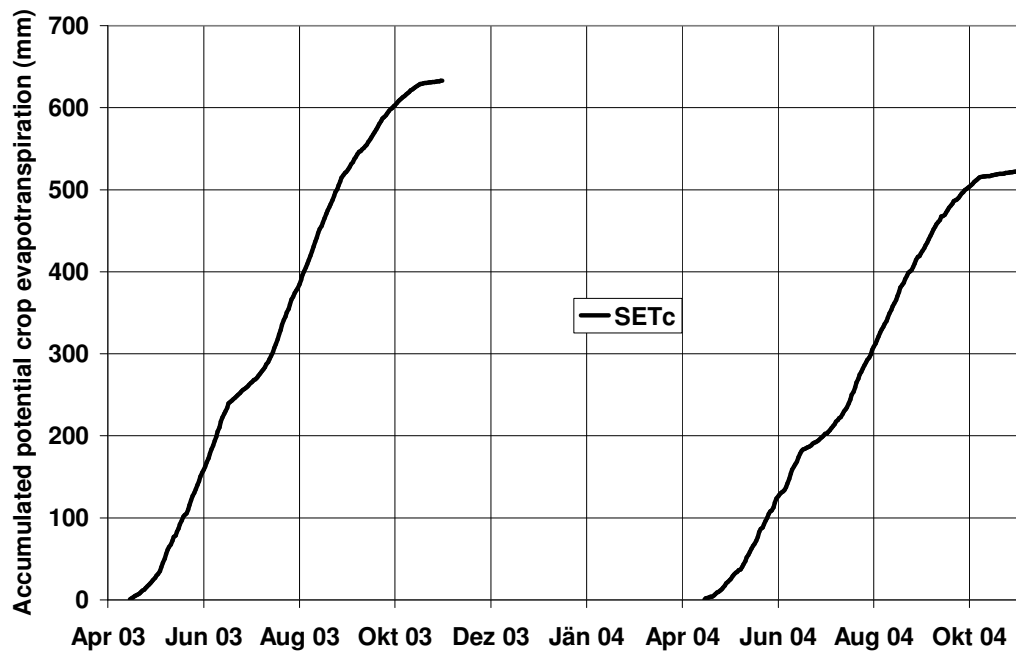


Abb. 27: Akkumulierte ETc der 2-Schnittvariante in 2003 und 2004

Bestimmung von Eta aus der Bodenwasserspannungsbeziehung zu Ks

Nach Gleichung (1) wurde aus der Bodenwasserspannung der Ks Stressfaktor berechnet und nach einer exponentiellen Wurzeldichtevertellung über die Bodentiefe gewichtet : die oberste Bodenschicht (10cm) mit Faktor 6, 20cm mit Faktor 2 und 30-60cm mit Faktor 1. Der daraus resultierende Ks-Faktor ist in Abb. 28 in Abhängigkeit der Bodenwasserspannung dargestellt.

Dieselbe Darstellung für das Jahr 2004 mit wesentlich weniger Trockenstress zeigt Abb. 29. Die dadurch wesentlich geringere aktuelle Verdunstung im Jahr 2003 sind hier auch wesentlich geringere Erträge zu erwarten. Die im Vergleich akkumulierten Trockenmasseerträge und Ks-Werte in 2003 und 2004 sind in Abb. 30 dargestellt.

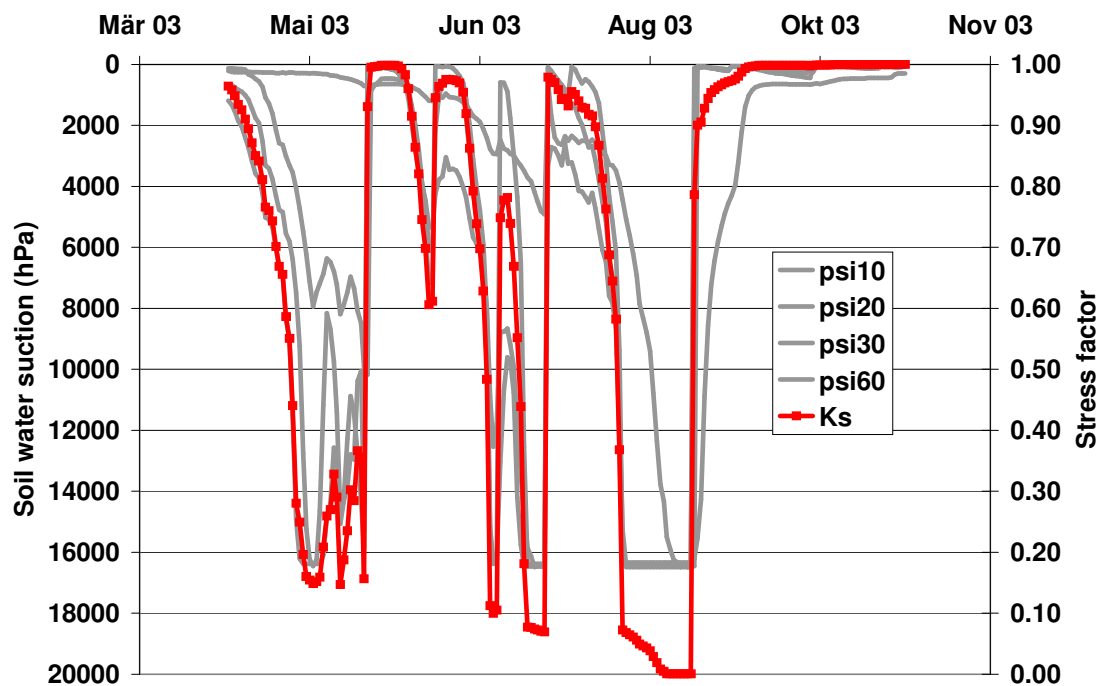


Abb. 28: Ks-Faktor und Bodenwasserspannungen in 2003

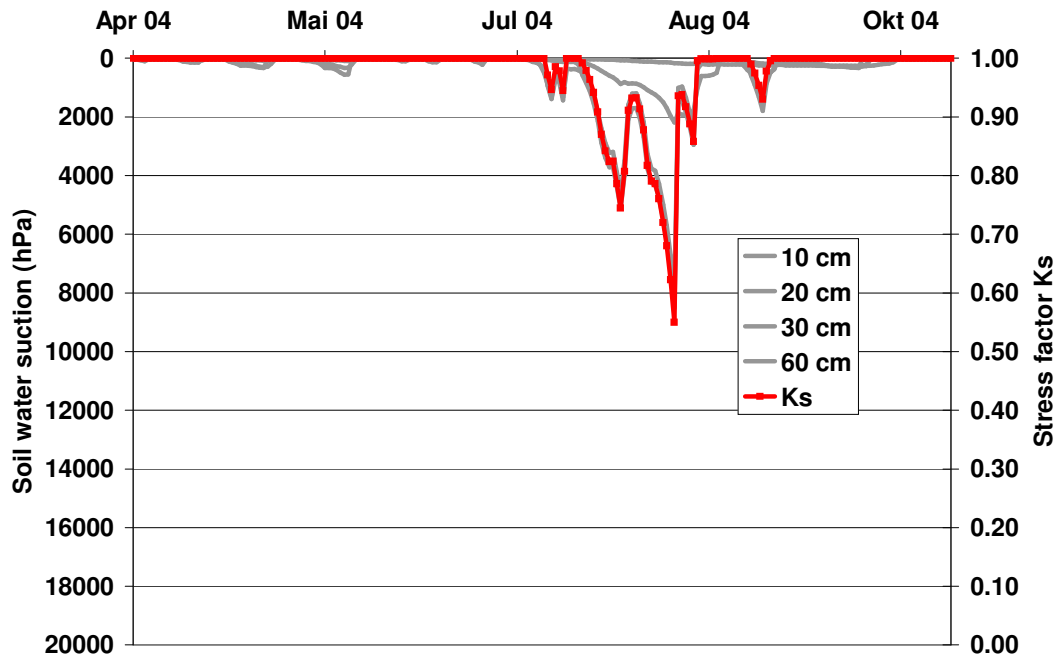


Abb. 29: Ks-Faktor und Bodenwasserspannungen in 2004

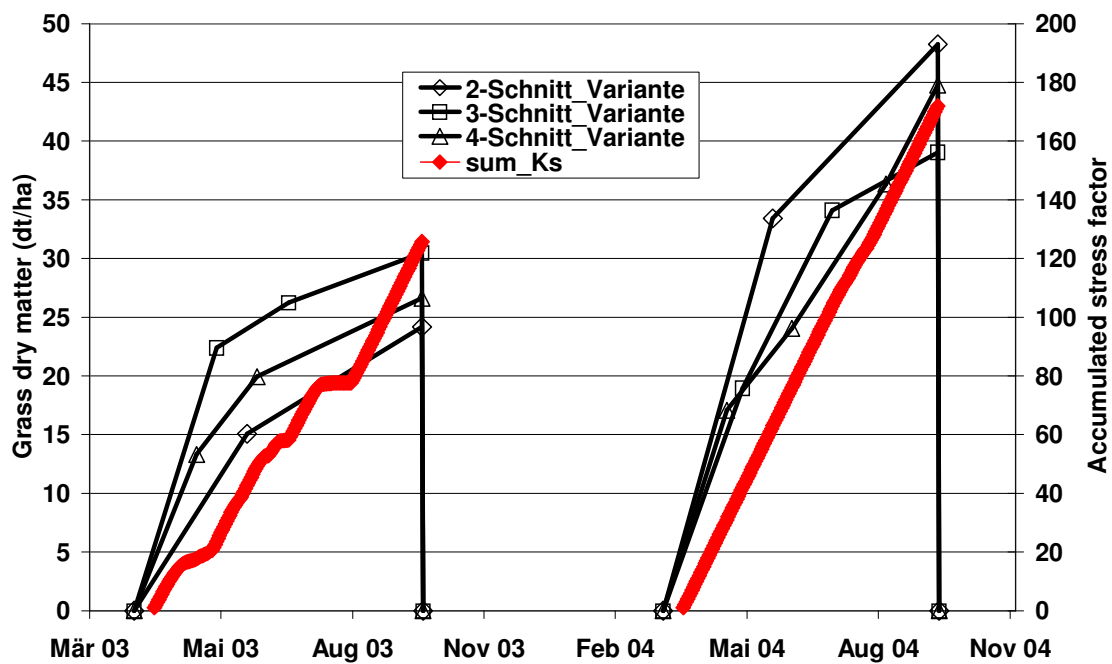


Abb. 30: Akkumulierte Trockenmasseerträge und Ks-Faktor (abgeleitet aus der Bodenwasserspannung) in 2003 und 2004

Bestimmung von Eta aus der Bodenwassergehaltsbeziehung zu Ks

Der Bodenwassergehalt wurde kontinuierlich mit dem "Campbell Scientific Inc. CS-616 water content reflectometer (WCR)" über die gesamte Versuchsdauer gemessen.

Dieser Sensor (www.campbellsci.com/documents/manuals/cs616.pdf) benötigt eine Temperaturkorrektur, welche durchgeführt wurde.

Da zu bestimmten Zeitpunkten im Herbst und Frühjahr zu hohe Bodenwassergehaltswerte angezeigt wurden, wurde zusätzlich eine empirische Korrektur mit Hilfe der punktuellen Messdaten aus dem TRASE-TDR durchgeführt. Die sich ergebende Kurve des Bodenwassergehaltes und die TRASE-TDR Werte über den Messzeitraum und das gesamte Bodenprofil ist in Abb.31 dargestellt. Aus dem Zeitverlauf der Bodenwassergehaltswerte kann auch der Wassergehalt bei Feldkapazität und Welkepunkt mit je 230mm und 100mm abgeleitet werden.

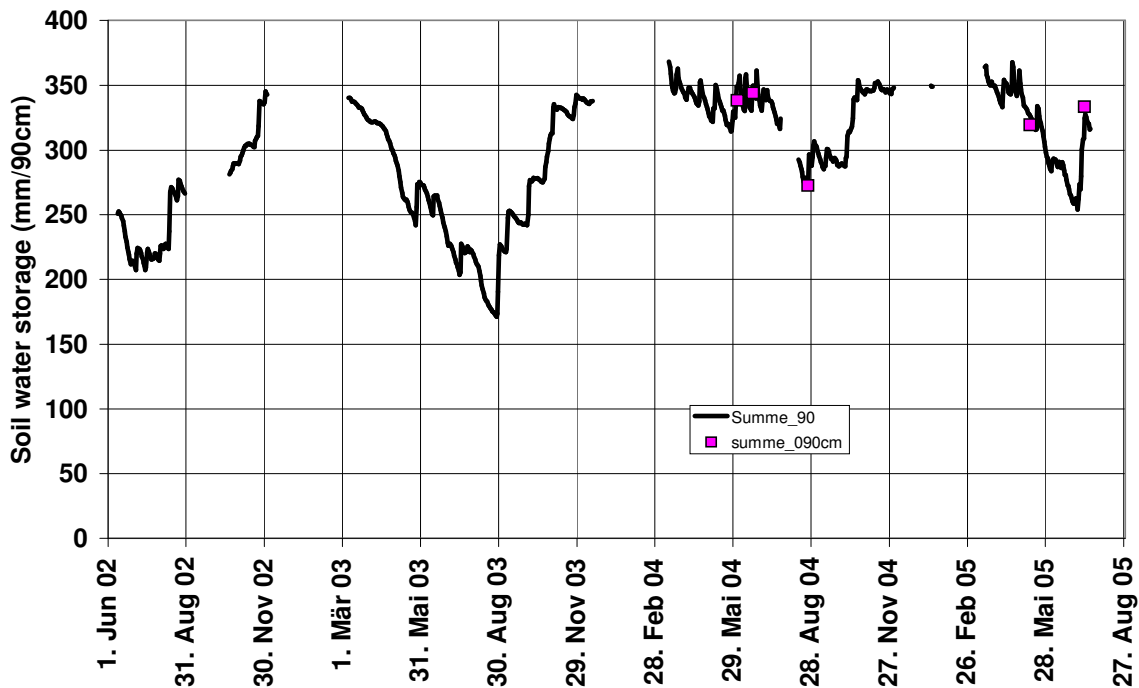


Abb. 31: Verlauf des Bodenwassergehaltes 0-90 cm in Kirchberg über die gesamte Messperiode (korrigierte WCR Daten), Punkte : TRASE TDR Messung

Die akkumulierten Ks Faktoren im Vergleich zum Trockenmasseertrag ist in Abb. 32 für die Jahre 2003 und 2004 dargestellt. Die Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration aus dem Bodenwassergehaltsverlauf mithilfe des oben beschriebenen Ks Faktors für das Jahr 2003 und 2004 ist in Tab.3 wiedergegeben.

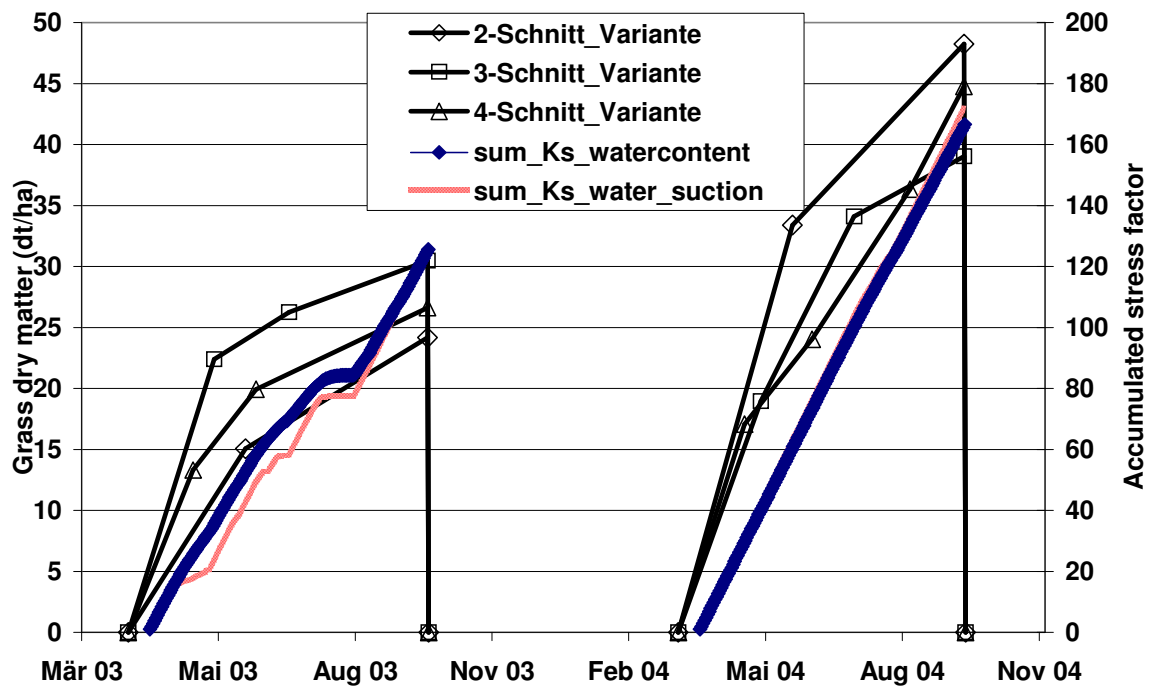


Abb. 32: Akkumulierte Trockenmasseerträge und Ks-Faktor (abgeleitet aus dem Bodenwassergehalt) in 2003 und 2004 . Im Vergleich dazu (in rot) die Ergebnisse mithilfe der Bodenwasserspannung.

Die Wasserbilanz an diesem Standort mit Hangneigung (wie es sehr häufig im österreichischen Grünland vorkommt) kann aufgrund des unbekannt (nicht gemessenen) Oberflächenabflusses nur abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung der bekannten, gemessenen und berechneten Wasserbilanzgrößen aus dem Bodenprofil (inkl. Drainage) und des Niederschlages ergibt sich ein nicht unwesentlicher Oberflächenabfluss als Restglied, wie in Tab. 3 dargestellt. Dieser beträgt hier in der Vegetationsperiode ca. 30 % des Niederschlages.

Dies liefert einen wichtigen Hinweis auf die Modellparametrisierung der verwendeten Modelle, insbes. des im GIS verwendeten FAO- wasserbilanzmodells hinsichtlich des Oberflächenabflusses. Aufgrund der weiterhin verbeibenden Unsicherheit sind für eine genauere Parametrisierung in der GIS Umgebung zu diesem Problem noch weiterführende Untersuchungen und Analysen notwendig.

Tab. 3: Wasserbilanz während der Vegetationsperioden (April – Oktober) 2003 und 2004 (in mm)

Vegetation period	N	ETc	ETa	DR	Delta	Abfluss (Restg.)
2003	530	630	380	- 10	10	150
2004	780	530	510	10	0	260

N	= Niederschlag
ETc	= Potentielle Pflanzenverdunstung
ETa	= Aktuelle Pflanzenverdunstung
DR	= Drainage
Delta	= Änderung des Bodenwasserspeichers

3.3. Modelle zur Ermittlung von Trockenschäden im Grünland

Während des Projektes wurden verschiedene Modellansätze getestet welche verwendet werden könnten um Trockenschäden im österreichischen Grünland mit verschiedenen kennzahlen zu beschreiben. Die berücksichtigten Modelle umfassen einfache Indizes, einfache Modellansätze und komplexere Wachstums- und Ertragsmodelle.

3.3.1. FAO-Wasserbilanzmethode und abgeleitete Indizes

Die FAO Methode ist ein in der Berechnungsplanung häufig verwendetes und vereinfachtes Bodenwasserbilanzmodell zur Berechnung der Wasserbilanzparameter von Kulturpflanzenbeständen.

Diese Methode ist ausführlich in Allen et al. (1998) beschrieben und auch im Internet unter <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm> abrufbar bzw. dokumentiert.

Es basiert auf einer von der FAO empfohlenen Referenzverdunstungsformel für Grasoberflächen (empirisch vereinfachte Penman-Monteith Gleichung) und erlaubt eine tägliche Berechnung der aktuellen Verdunstung und des Bodenwassergehaltes bei Vorgabe des Entwicklungsstadiums des Pflanzenbestandes (kein Wachstumsmodell inkludiert) und unter Nutzung täglicher Witterungsparameter. Dieses Modell eignet sich gut (zufriedenstellende Validierung an den Messdaten) um langjährige Bodenwassergehalte der Versuchstandorte aus den meteorologischen Witterungsdaten zu berechnen (siehe Tab.4) und wurde daher in unserem Projekt aufgrund der limitiert verfügbaren räumlichen Daten als das am besten geeignete Modell zur GIS-Implementierung verwendet. Das Modell wurde für praktische Anwendungen für mehrere Bodenschichten adaptiert (Eitzinger et al., 2004) und für das österreichische Grünland im Rahmen dieses Projektes parametrisiert.

Im Folgenden ist die adaptierte FAO-Methode, wie sie auch bei der GIS-Implementierung für Grünland verwendet wurde, dargestellt :

Stufe 1:

Berechnung der Referenzverdunstung einer definierten kurzen Grasoberfläche ohne Wasserstress :

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

wobei :

- ET_o = **Grasreferenzverdunstung** [mm d⁻¹]
- R_n = Strahlungsbilanz an der Oberfläche [MJ m⁻² d⁻¹]
- G = Bodenwärmestrom [MJ m⁻² d⁻¹]
- T = Lufttemperatur in 2m [°C]
- u₂ = Windgeschwindigkeit in 2m [m s⁻¹]
- e_s = Sättigungsdampfdruck [kPa]
- e_a = aktueller Dampfdruck [kPa]
- e_s-e_a = Sättigungsdefizit [kPa]
- Δ = Neigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa °C⁻¹]
- γ = psychometrische Konstante [kPa °C⁻¹]

Stufe 2:

Berechnung der täglichen Wasserbilanz der obersten Bodenschicht (ohne Transpirationsanteil, nur Bodenevaporation)

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - [P_i - RO_i] + E_i + DP_i \quad (1)$$

wobei :

- D_{e,i-1} = kumulative Wasserbilanz der Bodenschicht des Vortages
- D_{e,i} = kumulative Wasserbilanz der Bodenschicht des aktuellen Tages
- P_i = Niederschlag
- RO_i = Oberflächenabfluss
- E_i = Bodenevaporation
- DP_{e,i} = Drainage

und

$$0 \leq D_{e,i} \leq TEW \quad (2)$$

$$\text{TEW} = 1000 [\text{FC} - 0.5 \text{ WP}] Z_e \quad (3)$$

$$E_i = K_e E_{t_0} \quad (4)$$

wobei :

TEW = Gesamtes Verdunstungspotential der Bodenschicht

REW = Wassergehalt im Bereich ohne Verdunstungsreduktion ($K_r=1$)

FC = Feldkapazität

WP = Welkepunkt

Z_e = Bodenschichtdicke [10cm]

E_{t_0} = Grasreferenzverdunstung

K_e = Koeffizient der Bodenevaporation (approximativ 0.2)

Stufe 3 : Berechnung der täglichen Wasserbilanz weiterer durunterliegender durchwurzelter Bodenschichten (nur Transpiration, ohne Evaporation)

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - DP_{e,i} - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (5)$$

wobei :

$D_{r,i-1}$ = kumulative Wasserbilanz der Bodenschicht des Vortages

$D_{r,i}$ = kumulative Wasserbilanz der Bodenschicht des aktuellen Tages

CR_i = Kapillarer Aufstieg

$ET_{c,i}$ = aktuelle Pflanzenverdunstung (Transpiration)

$DP_{e,i}$ = Drainage von der oberen Bodenschicht (Eq. 1)

DP_i = Drainage nach unten

und :

$$0 \leq D_{e,i} \leq \text{TAW} \quad (6)$$

$$\text{TAW} = 1000 [\text{FC} - 0.5 \text{ WP}] Z_r \quad (7)$$

$$\text{RAW} = p \text{ TAW} \quad (8)$$

$$ET_c = K_s K_{cb} E_{t_0} \quad (9)$$

$$K_s = [\text{TAW} - D_{r,i}] / [\text{TAW} - \text{RAW}] \quad (10)$$

wobei :

TAW = Gesamtverfügbares Wasser der Bodenschicht

FC = Feldkapazität der Bodenschicht

WP = Welkepunkt der Bodenschicht

Z_r = Bodenschichtdicke (20cm)

RAW = Bodenwassergehaltsbereich ohne Verdunstungseinschränkung

p = Anteil an TAW bis Wasserstrss auftritt

K_s = Wasserstressfaktor, reduziert die Verdunstung

Eine Veranschaulichung des Grundkonzeptes des FAO Wasserbilanzmodells zur Berechnung der aktuellen Verdunstung ist in Abb. 33-34 nochmals verdeutlicht.

FIGURE 4. Reference (ET_0), crop evapotranspiration under standard (ET_c) and non-standard conditions ($ET_{c\ adj}$)

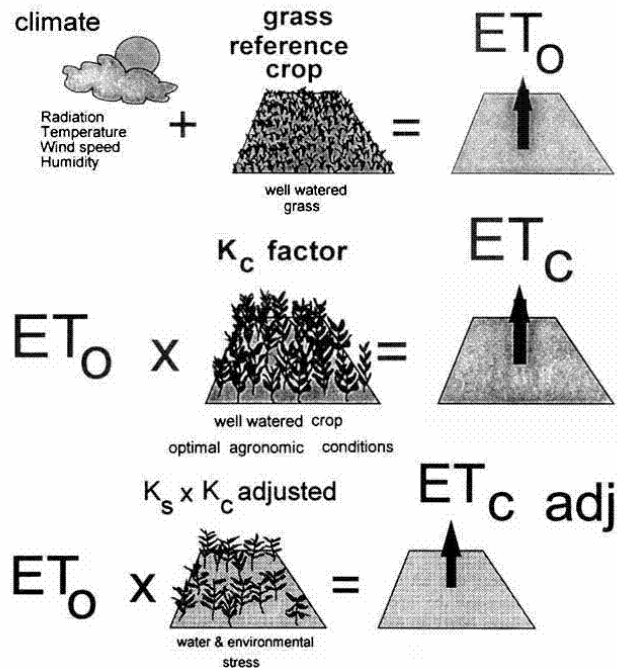


Abb. 33: Berechnungsschritte zur Ermittlung der aktuellen Verdunstung nach dem FAO Modell

FIGURE 42. Water stress coefficient, K_s

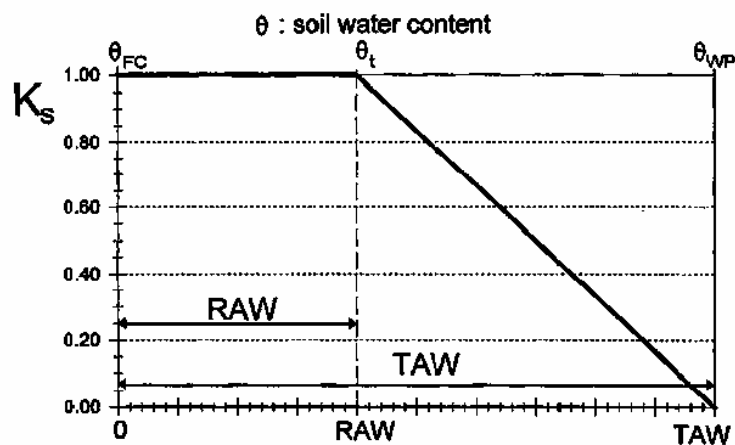


Abb. 34: Berechnung des K_s - Wasserstressfaktors nach dem FAO Modell

Zur Verifizierung des FAO Modellansatzes wurden die berechneten Bodenwassergehalte mit den gemessenen Werten an den Messstationen verglichen, wobei das Modell im Vergleich zu den anderen Modellen sehr gute und befriedigende Ergebnisse zeigt (vgl. Tab.4, Abb.35).

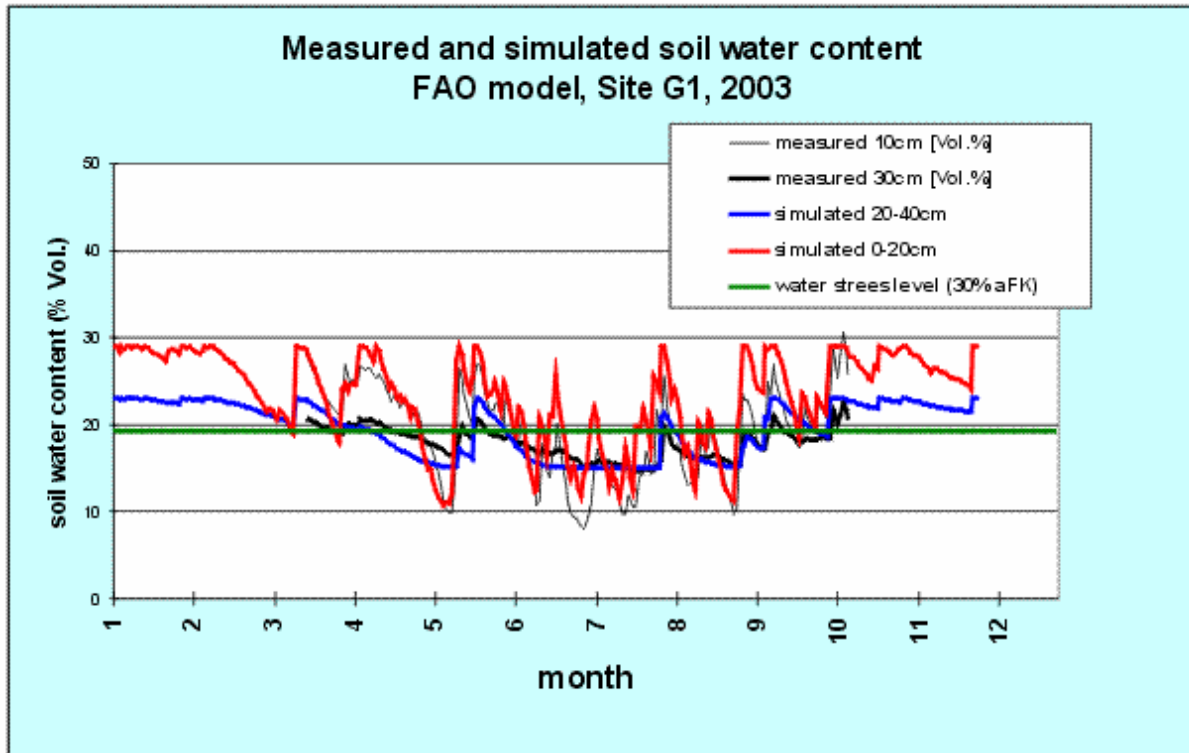


Abb. 35: Vergleich der aus dem FAO Modell berechneten mit den gemessenen Bodenwassergehalten in Gumpenstein

Aus dem FAO Modell abgeleitete Indizes und Kennwerte

In Abb.36 und 37 sind am Beispiel der Untersuchungsstandorte Gumpenstein und Piber aus dem FAO-Bodenwasserbilanzmodell abgeleitete Trockenheitsindikatoren für die vergangenen Jahre dargestellt. Der Standort Piber weist anhand der Indikatoren deutlich ausgeprägtere Trockenereignisse (erklärt auch das niedrigere Ertragsniveau) auf. Am Verlauf der Ertragslinie zeigt sich das extreme – an den Indikatoren definierte - Trockenjahre meist einen sichtbaren negativen Einfluß auf den Ertrag haben, allerdings mit Ausnahmen und nicht quantitativ ableitbar (sehr schlechte Korrelationen). So zeigen einzelne Jahre mit Trockenheit nur geringe Ertragseinbußen und Jahre ohne Trockenheit können ebenfalls deutliche Ertragsdepressionen - aufgrund offensichtlich anderer Ursachen als Trockenheit - zeigen.

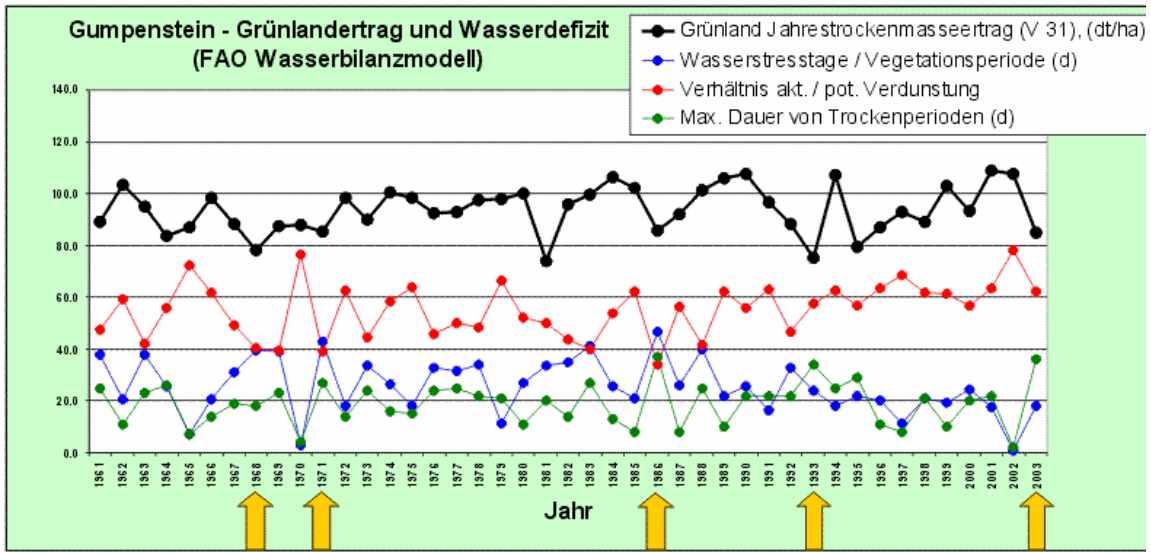


Abb. 36: Aus dem FAO Modell berechnete Trockenstressindikatoren für den Standort Gumpenstein. Gelbe Pfeile markieren Jahre mit ausgeprägten Trockenheiten und erkennbaren Ertragseinbußen

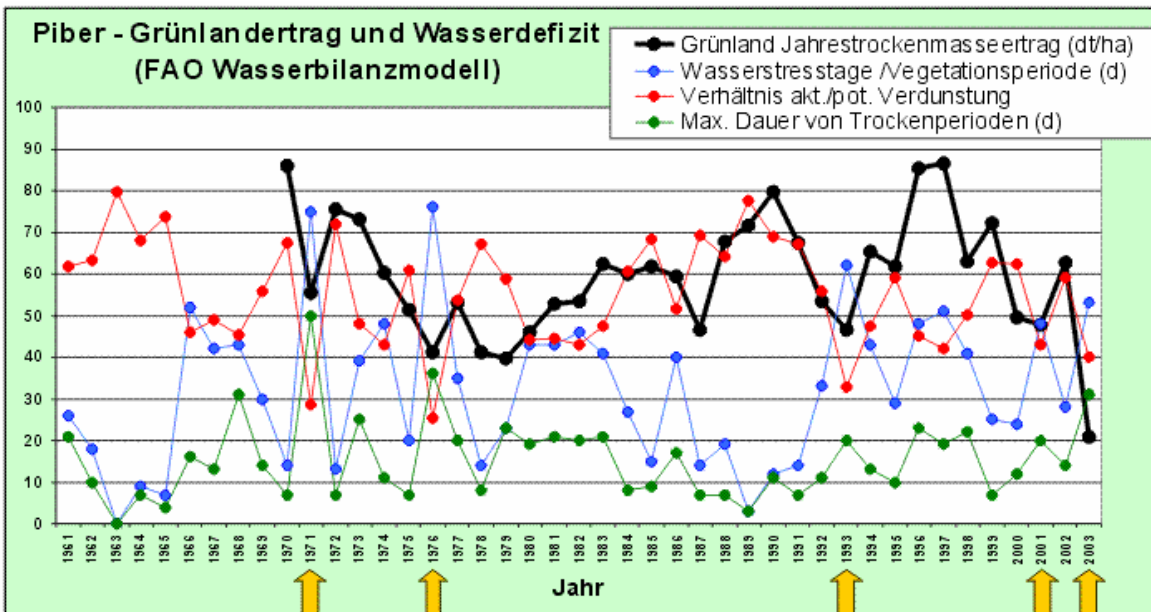


Abb. 37: Aus dem FAO Modell berechnete Trockenstressindikatoren für den Standort Piber. Gelbe Pfeile markieren Jahre mit ausgeprägten Trockenheiten und erkennbaren Ertragseinbußen

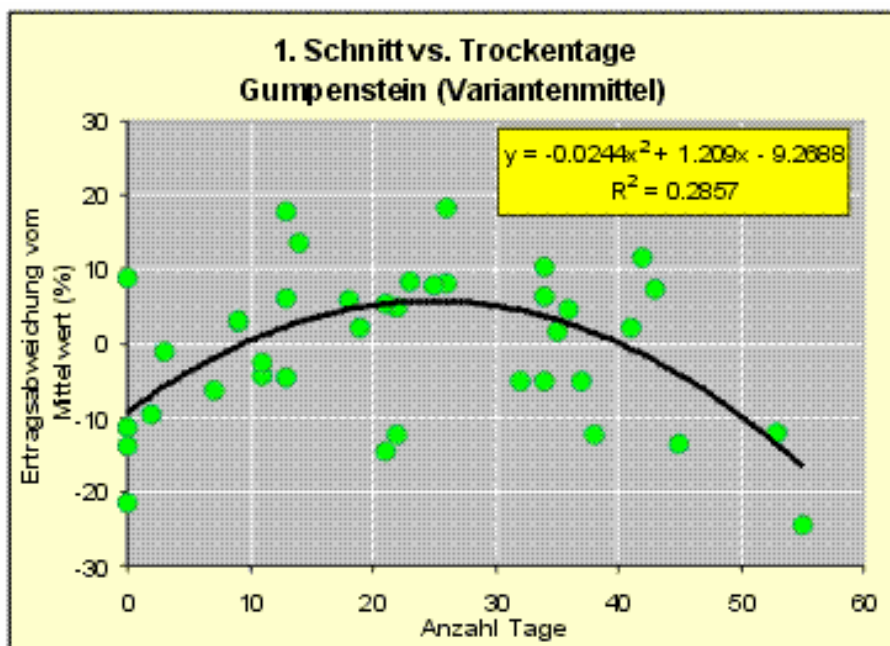


Abb. 38: Zusammenhang zwischen Trockentagen (Auftreten von Wasserstress im Wurzelraum nach SWAP) und Grünlandtrockenmasseertrag in Gumpenstein (1. Schnitt)

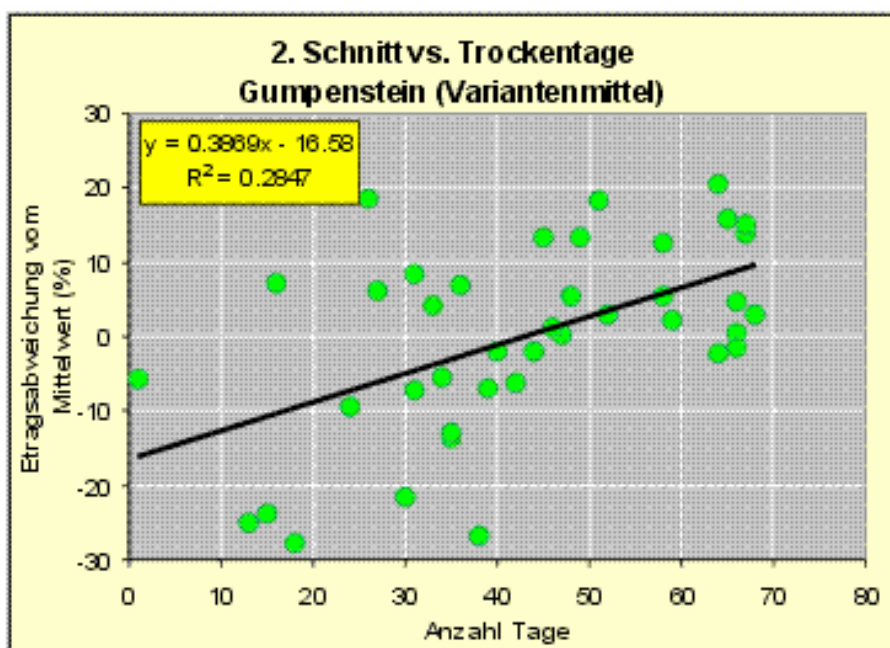


Abb. 39: Zusammenhang zwischen Trockentagen (Auftreten von Wasserstress im Wurzelraum nach SWAP) und Grünlandtrockenmasseertrag in Gumpenstein (2. Schnitt)

In den Abb. 38 und 39 ist anhand der Daten von Gumpenstein der Zusammenhang von Grünlandertrag und einem Wasserstressindikator (nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum) zu sehen. Es zeigt sich hierbei dass auch die Schnittfolge eine Rolle spielt, wobei in diesem Fall der erste Schnitt gegenüber Wasserstress empfindlicher scheint (allerdings bei schlechter Korrelation). Dies könnte in der interannualen Populationsdynamik begründet sein (andere Artenzusammensetzung des Grünlandes im ersten Schnitt) und damit sich ändernder Wasserstressempfindlichkeit. Für eine nähere Analyse liegen aber derzeit noch nicht genügend Daten vor.

3.3.2. SPI Index

An der Station Gumpenstein wurde versucht den SPI (Standard Precipitation Index; McKee et al., 1993) Trockenheitsindex und den Zusammenhang zu einer Ertragsdepression zu untersuchen, wobei sich sowohl für den 1. als auch den 2. Schnitt eine im Vergleich zu den anderen Indizes relativ gute Korrelation am Standort Gumpenstein ergab (Abb. 40-43; Tab.5). Dieser Zusammenhang dürfte an trockeneren Standorten noch ausgeprägter sein (noch nicht ausgewertet, da zu wenig Ertragsdaten vorhanden). Aus den bisherigen Ergebnissen ist dies der beste Indikator, allerdings für eine quantitative Bestimmung für Ertragseinbußen aufgrund von Trockenheit mit begrenzter Genauigkeit.

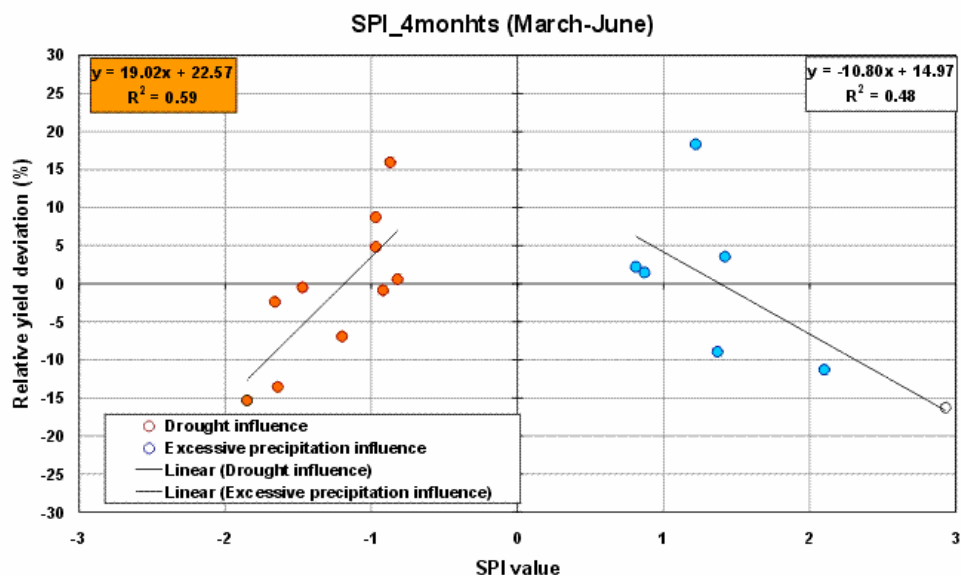


Abb. 40: Bestimmung des SPI indexes für März-Juni und die Korrelation zum ersten Grünlandschnittertrag in Gumpenstein

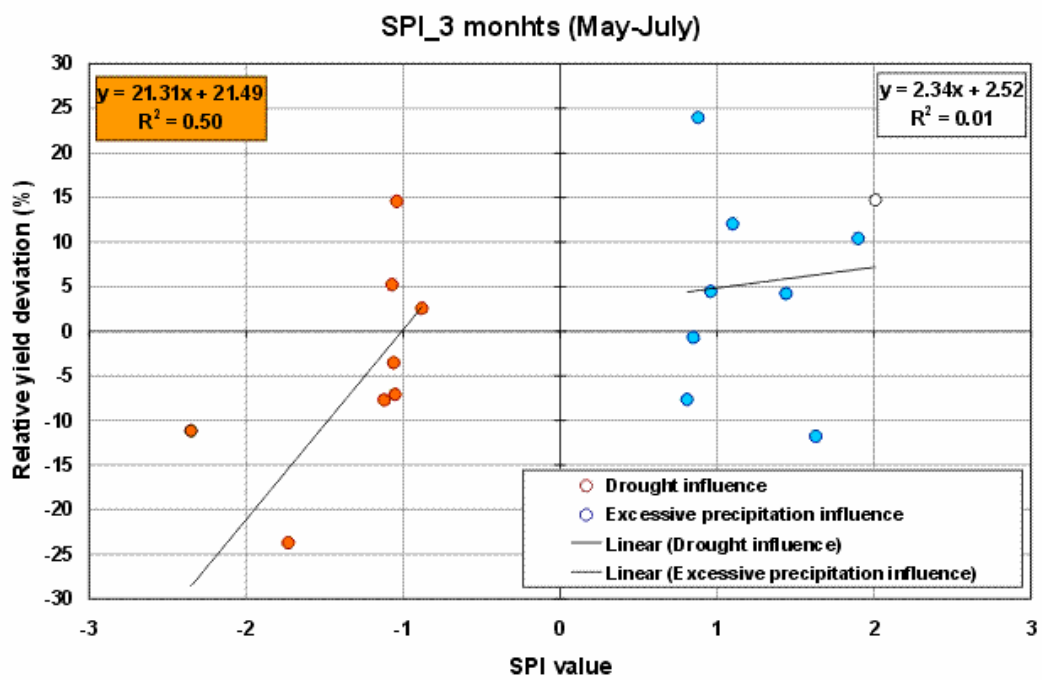


Abb. 41: Bestimmung des SPI indexes für Mai-Juli und die Korrelation zum zweiten Grünlandschnittertrag in Gumpenstein.

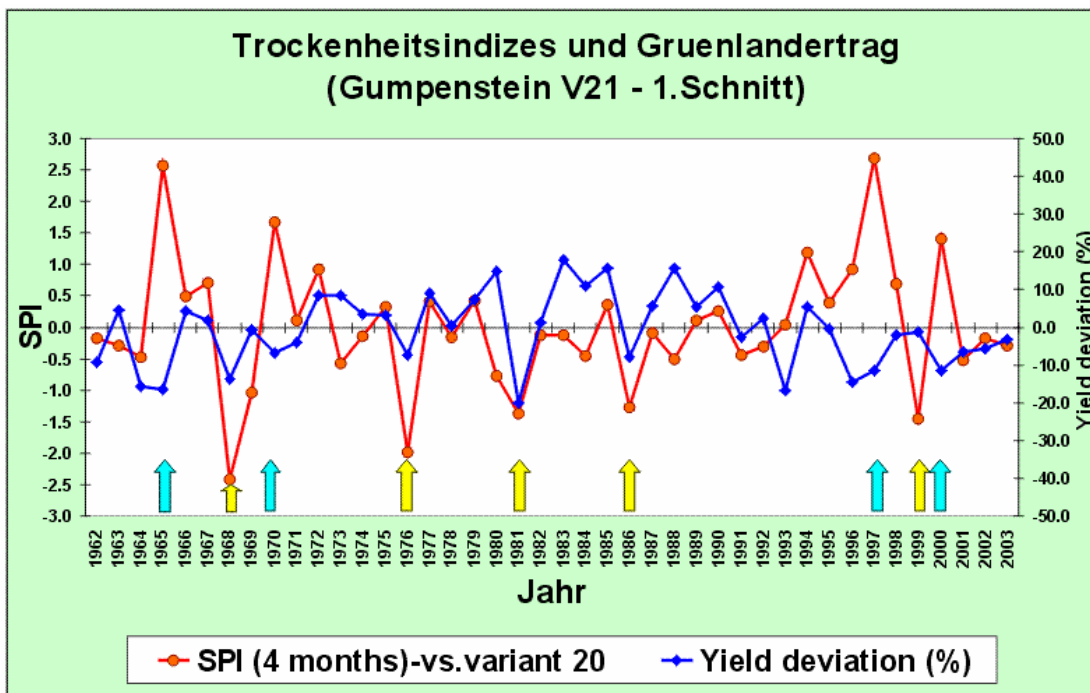


Abb. 42: Zusammenhang des SPI-indexes zum Grünlandertrag, als Zeitreihe dargestellt

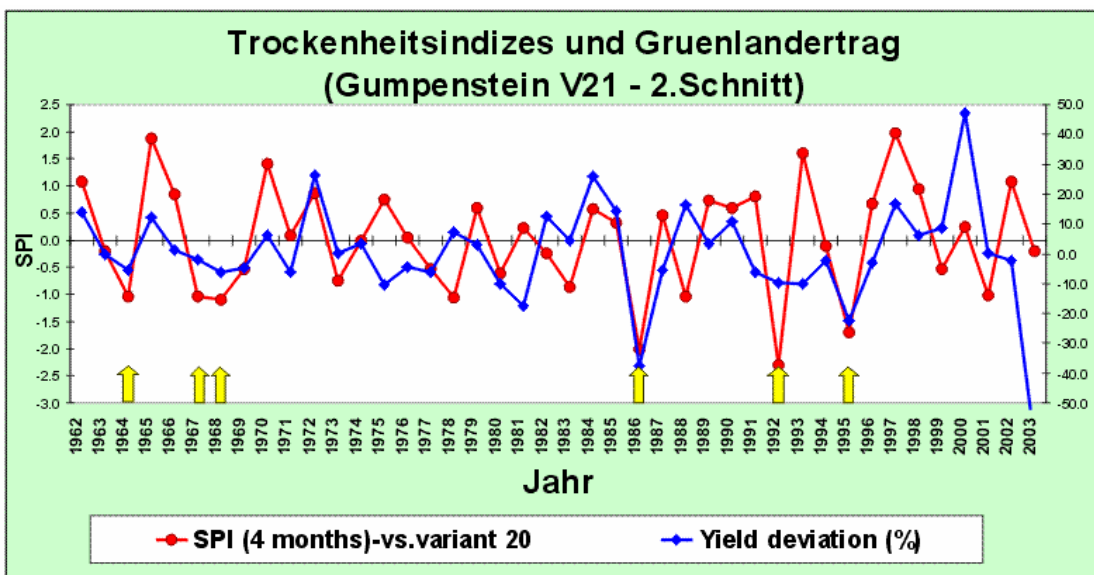


Abb. 43: Zusammenhang des SPI-indexes zum Grünlandertrag, als Zeitreihe dargestellt.

3.3.3. Dynamische Ertragsmodelle

Zur Überprüfung der Eignung von prozessorientierten Modellen zur Simulation von Trockenheitseinflüssen auf das Grünland wurden verschiedene dynamische Ertragsmodelle ausgewählt die einen verschiedenen Grad an Komplexität aufweisen, verschiedene Anforderungen an die Eingabedaten haben und Ergebnisse in unterschiedlicher Qualität liefern. Diese Modelle wurden am PC installiert, deren Funktionsweise studiert und Eingabedaten aus den 4 Versuchsstandorten des Projektes für die jeweiligen Modelle wurden aufbereitet. Die bisher bearbeiteten Modelle und ihre Beurteilung sind nachfolgend kurz dargestellt (Detailergebnisse siehe weiter unten) :

1. MACROS (Penning de Vries, 1989) : Dies ist ein dynamisches Wachstumsmodell für einjährige Kulturpflanzen, das sowohl den Bodenwasserhaushalt als auch das Pflanzenwachstum eines Pflanzenbestandes in täglichen Zeitschritten simuliert. Dieses Modell wurde bereits für Kulturpflanzen in Österreich validiert und verwendet. Es ist sehr gut dokumentiert, transparent und weist eine hohe Flexibilität hinsichtlich möglicher Adaptionen auf.

Eignung für Grünlandertragssimulation: Dieses Modell wurde zur Simulation von Grünlandschnitterträgen adaptiert bzw. verbessert (GGLawn), sowie eine anwenderfreundliche Umgebung auf Windowsebene in C++ programmiert. Die Verbesserung betrifft vor allem eine Vereinfachung der Prozedur der Eingabe von Modelldaten (jetzt durch Excel Dateien möglich) und die Berücksichtigung der Schnittermine und der Artenzusammensetzung. Für dieses Modell wurde eine Parametrisierung an den Versuchsstandorten vorgenommen. Die Modellvalidierung zeigt bisher für die Ertragsmodellierung teilweise gute Ergebnisse, erfordert aber noch weitere Messdaten, insbesondere hinsichtlich der Artenzusammensetzung für eine verbesserte Kalibrierung. Dieses Modell ist vielversprechend und wird für die praktische Anwendung im Grünland derzeit weiter verbessert.

2. SWAP (Kroes et al., 1999) ist ein auf dem MACROS Modell basierendes Wachstumsmodell mit Schwerpunkt auf dem Bodenwasserhaushalt. Es hat ein komplexes Bodenwasserhaushaltsmodell, das allerdings auch detaillierte Eingabedaten verlangt und für einen weiten Bereich an Bodenbedingungen einsetzbar ist. Insbesondere wird auch auf das Wurzelwachstum mit seinen Besonderheiten Rücksicht genommen.

Eignung für Grünlandertragssimulation: Die Modellvalidierung zeigte hinsichtlich der Bodenwassergehaltssimulation sehr gute, für die Ertragsmodellierung des Grünlandes jedoch unbrauchbare Ergebnisse. Dieses Modell eignet sich für detaillierte Bodenwassergehaltssimulationen, wenn umfangreiche Eingabedaten vorhanden sind. Es wurde im Rahmen des Projektes daher nicht mehr weiter bearbeitet.

3. SIMWASER (Stenitzer, 1987) ist ein komplexes Bodenwasserhaushaltsmodell mit vereinfachter Wachstumssimulation. Dieses Modell wurde an verschiedenen Standorten in Österreich getestet und es liegen entsprechende Erfahrungswerte am IKT vor.

Eignung für Grünlandertragssimulation: Dieses Modell weist eine ähnliche Konzeption auf wie SWAP, und das Modell weist gute Ergebnisse bei der Bodenwassergehaltssimulation auf. Es liegen noch keine weiteren Ergebnisse vor, das Modell wird weiterhin am IKT (Dr. Stenitzer) bearbeitet bzw. für Grünland adaptiert.

5. EPIC (Williams, 1984) EPIC ist ein field-scale Modell, das in Tagesschritten arbeitet und ursprünglich für Bodenerosionsmodellierung entwickelt, aber später auch für andere Anwendungen verbessert wurde. Die wichtigsten Modellteile in EPIC sind: Wettersimulation, Bodenwasserhaushalt, Erosion und Sedimentation, Nährstoff- (N&P) und Kohlenstoffkreisläufe, Pflanzenwachstum und -konkurrenz, Bodentemperatur, Bodenbearbeitung, Deckungsbeitragskalkulationen, sowie Pflanzenmanagement. Das Pflanzenwachstum wird im Vergleich zu anderen Ertragsmodellen sehr vereinfacht simuliert. Mit EPIC sind auch Langzeitanalysen von mehreren hundert Jahren möglich.

Eignung für Grünlandertragssimulation: EPIC zeigte ebenfalls gute Ergebnisse beim Bodenwassergehalt und - wegen eines sehr vereinfachtem Wachstumsmoduls - schlechte Ergebnisse bei der Ertragssimulation. Es wird daher wegen einer benötigten sehr aufwendigen Parametrisierung ebenfalls nicht mehr weiter bearbeitet.

6. STICS (Brisson et al., 2003) ist ein neues, speziell auch für Grünland in Frankreich (INRA) entwickeltes Modell, welches auch die Dynamik der Artenzusammensetzung im Grünland berücksichtigt und alle wichtigen Vorgänge wie Bodenwasserhaushalt, Photosynthese, Biomassebildung, Managementeinflüsse im Detail berücksichtigt. Es dürfte das derzeit komplexeste und am besten angepasste Modell für Grünland sein, das zur Verfügung steht. Dieses Modell wurde erst im Nachhinein in unserem Projekt aufgenommen, da es vorher nicht zur Verfügung stand.

Eignung für Grünlandertragssimulation: Dieses Modell wurde bereits getestet, wird aber noch weitere Jahre an Modellkalibrierung und -validierung benötigen, da es umfangreiche Eingabedaten benötigt, die in Österreich erst zum Teil vorliegen. Es ist daher geplant, über das Projektende hinaus an der Modellkalibrierung und -validierung zu arbeiten.

3.3.3.1. GGLawn Modell – Adaption und Ergebnisse

Das Modell MACROS wurde für die Simulation von Grünlandschnitterträgen adaptiert (GGLawn) und in eine anwenderfreundliche Windowsoberfläche programmiert. Das Programm weist derzeit folgende technische Spezifitäten auf :

Microsoft Windows environment on PC's;
User friendly, graphic interface;
Input/output data can be imported/exported directly from/to Microsoft Excel sheet (..*.xls), as well as from/to ASCII (..* .txt) files;
Automatic correction of errors in weather input data;
Long-term simulations possible - no limit;

Die Struktur der simulierten Prozesse ist in Abb. 44 dargestellt, wobei die Simulation von Schnitterträgen zum MACROS Modell hinzugefügt wurde. Eine weitere Verbesserung bezüglich der Berücksichtigung der Grünlandartenzusammensetzung ist derzeit im Rahmen einer Dissertation in Arbeit. Der technische Simulationsablauf ist in Abb. 45 zu sehen. Hierbei wurde vor allem die Eingabeprozedur von Eingabedaten bezüglich der Nutzung von Excel Dateien und eine automatische Datenüberprüfung eingebaut. Beispiele der Darstellung des Modells auf der Bildschirmoberfläche sind in Abb. 46-48 zu sehen.

Das Modell MACROS zeigt nach ersten Adaptionen an die besonderen Verhältnisse im Grünland gute Ergebnisse der Simulation des Bodenwassergehaltes (siehe Tab.4) und nur zum Teil (je nach Schnitt) bei der Biomasse (Abb. 49-52, Tab.4). Die Abweichungen beim simulierten Trockenmasseschnittertrag liegen bei den Jahresschnitterträgen im Falle des kalibrierten Standortes Gumpenstein meist unter $\pm 20\%$ (Abb.49). Bei der Validierung an anderen Standorten und schnittbezogen zeigten sich jedoch grössere Abweichungen (Abb. 51-52). Es zeigt sich z.B. eine je nach Schnitt unterschiedliche Güte des Modells, was auf die zuwenig berücksichtigte schnittabhängige Grünlandzusammensetzung zurückzuführen sein dürfte. Es ist daher die Parametrisierung hinsichtlich der Zusammensetzung der Grasnarbe noch zu verbessern. Vor allem werden dazu noch Versuchsdaten aus den Grünlandversuchsstandorten aus weiteren Versuchsjahren benötigt.

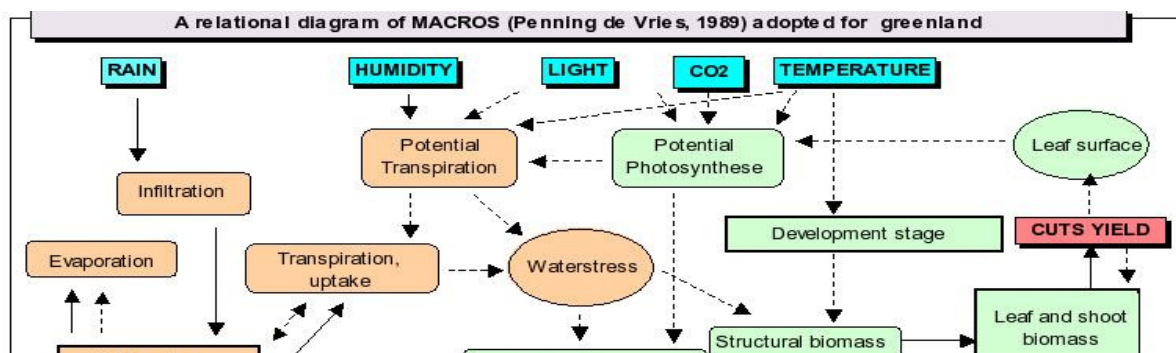


Abb. 44: Flussdiagramm der simulierten Prozesse in GGLawn.

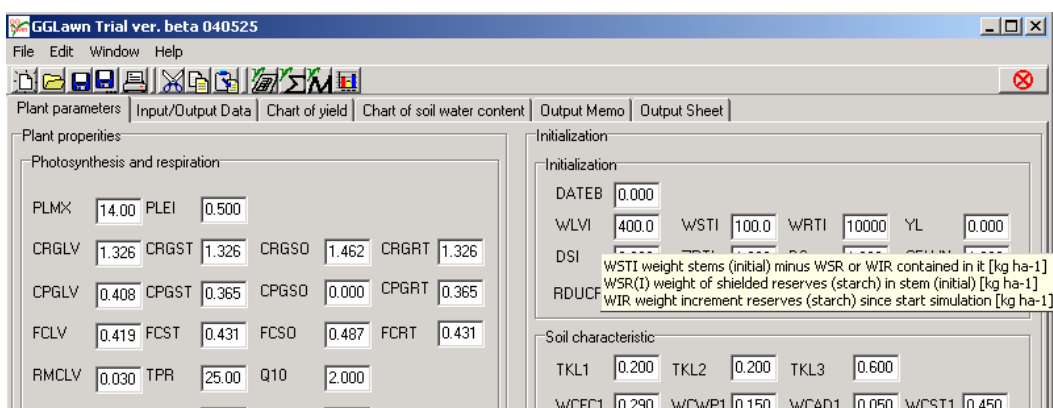
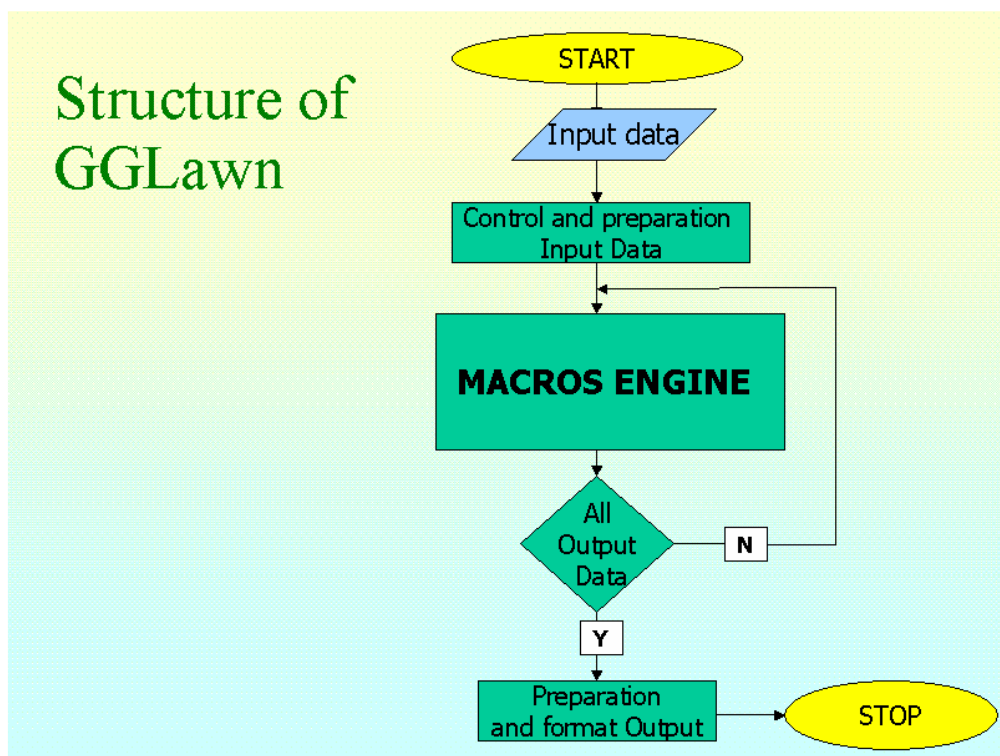


Abb. 46: Eingabedatenfeld bei der Simulation mit GGLawn

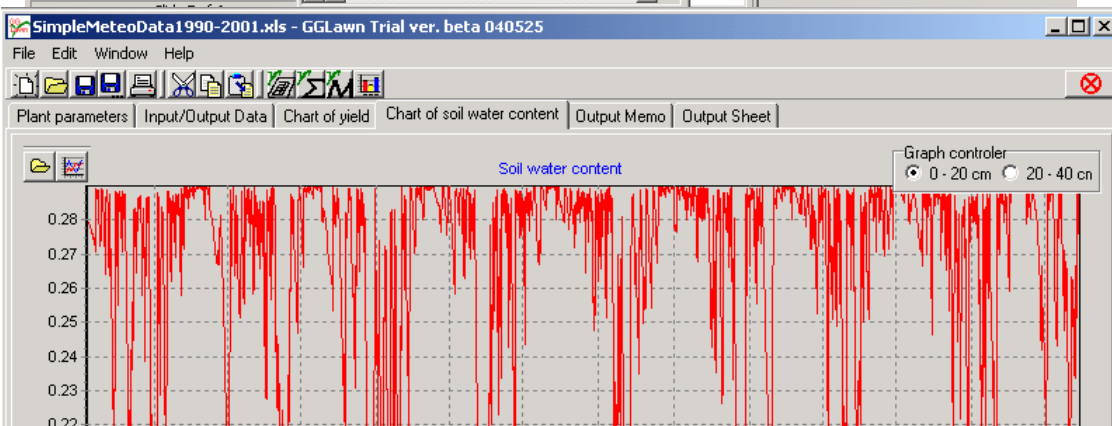
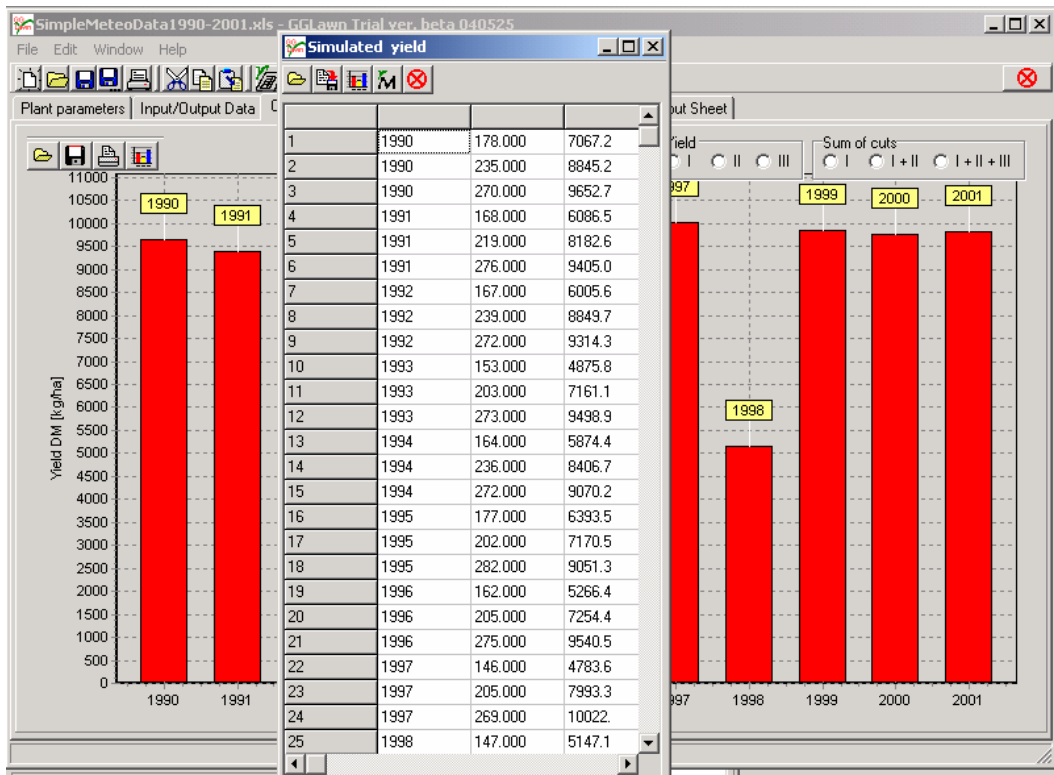


Abb. 48: Graphische Darstellung des simulierten Bodenwassergehaltes mit GGLawn

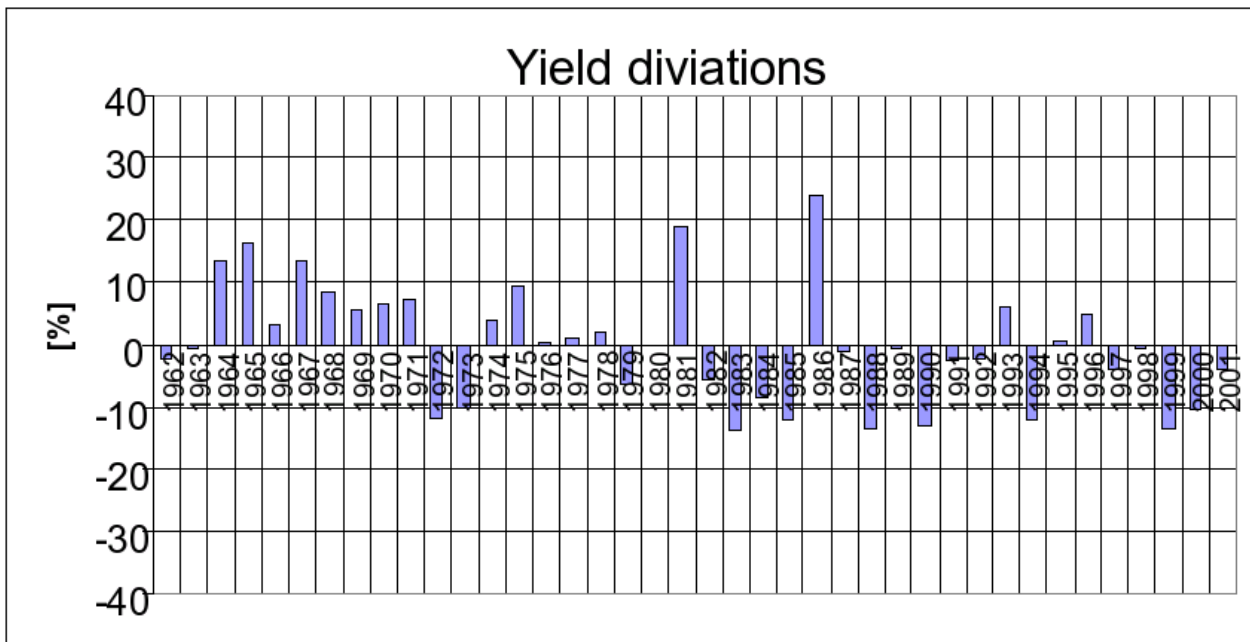


Abb. 49: Simulierte Ertragsabweichungen zum gemessenen Trockenmassejahresertrag in Gumpenstein mit GGLawn (1962-2001)

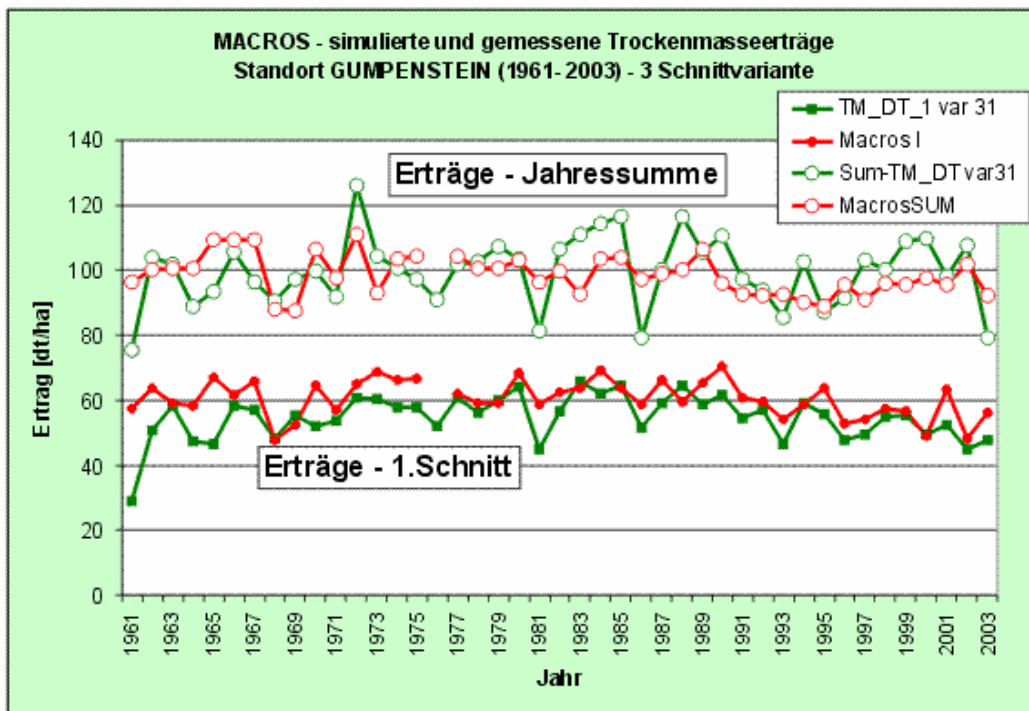


Abb. 50: Vergleich der mit dem MACROS Modell simulierten Schnitterträge mit gemessenen Daten am Beispiel von Gumpenstein, 1961-2003.

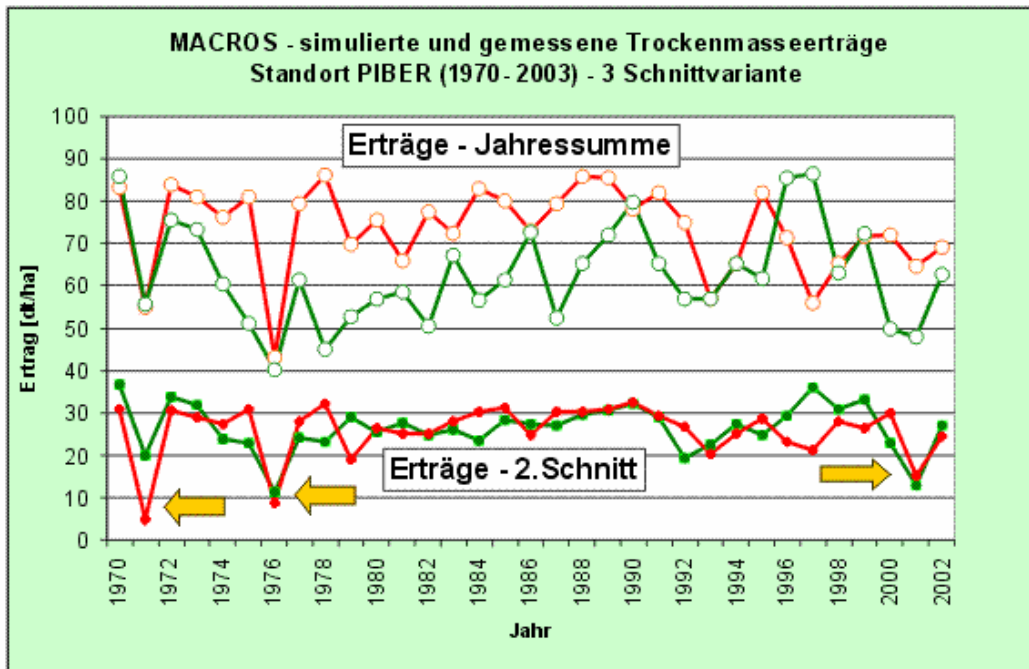


Abb. 51: Vergleich der mit dem MACROS Modell simulierten Schnitterträge mit gemessenen Daten am Beispiel von Piber, 1961-2003.

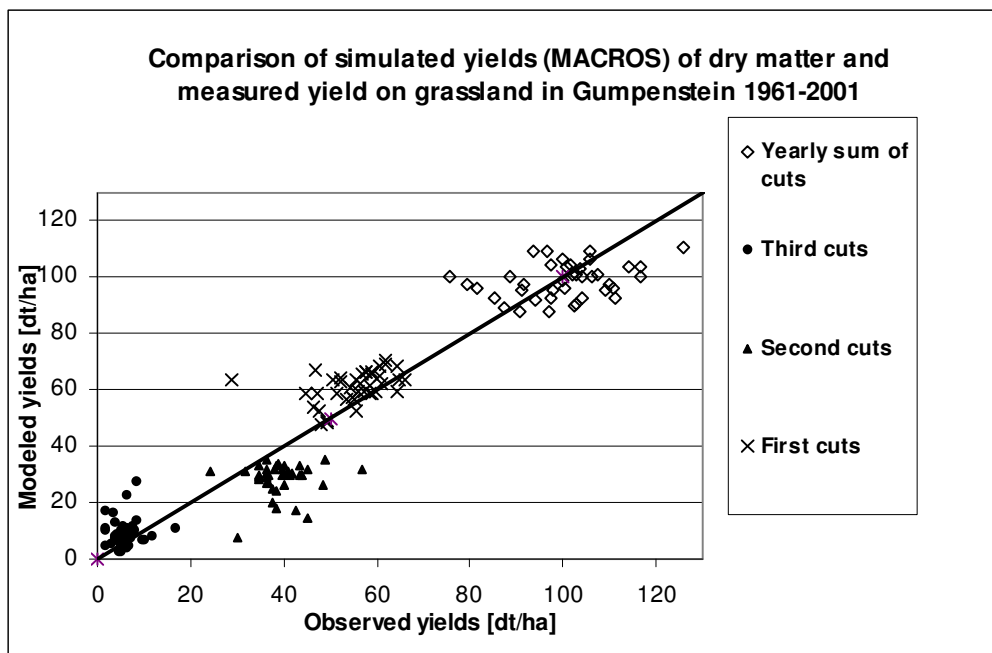


Abb. 52: Vergleich der mit dem MACROS Modell simulierten Schnitterträge mit gemessenen Daten am Beispiel von Gumpenstein, 1961-2001.

3.3.4. Empirisches Ertragsmodell GRAM – Methode und Ergebnisse

Da für die GIS implementation zur Bestimmung von Ertragsdepressionen aufgrund von Trockenheit ein möglichst einfacher Ansatz optimal geeignet ist, wurde ein empirisch-statistischer Ansatz (nach Han et al., 2003) gewählt. Dieses empirisch-statistische Ertragsmodell wurde für das österreichische Grünland adaptiert nachdem es vielversprechende Ergebnisse zeigte, wobei es auf das oben gezeigte FAO-Bodenwasserbilanzmodell aufsetzt. Somit steht zu Projektende 2005 schon ein erstes quantitatives und GIS-fähiges Modell zur Verfügung, das allerdings in den folgenden Jahren in seiner Parametrisierung weiter verbessert werden kann und sollte.

GRAM beruht auf einer multiplen Regression, wobei bestimmte unabhängige Parameter in vorhergehenden Schritten aufbereitet werden. Dabei handelt es sich vorwiegend um räumlich interpolierte meteorologische Parameter, die aus den Klimadaten berechnet werden bzw. um die aktuelle/potentielle Evapotranspiration die ein Output aus dem - schon erfolgreich getesteten - vereinfachten FAO Bodenwasserbilanzmodell ist.

Aufgrund der vorhandenen Ertragsdaten konnte das Modell an zuerst an 2 ausgewählten Versuchsstandorten (Piber und Gumpenstein, anhand mehrjähriger Ertragsdaten) und später an 16 Grünlandversuchsstandorten (anhand der Ertragsdaten 2002-2004) zufriedenstellend kalibriert und verifiziert werden. Es sollte in den nachfolgenden Jahren jedoch noch an anderen Standorten und für mehrere Jahre überprüft und getestet werden um die Ergebnisse weiter zu verbessern.

Das Modell GRAM und seine Standortvarianten werden im Folgenden näher beschrieben :

Beste multiple Regressionen an den geprüften Standorten Piber und Gumpenstein, schnittabhängig:

Alle Daten von G1 (Gumpenstein) und G2 (Piber) (ohne 1.Schnitt) , siehe Abb.17

Alle N-gedüngten Varianten :

$$\text{TME} = 1.1542 - 0.0025 \cdot N^2 - 0.0094 \cdot D^2 + 0.4683 \cdot Cn^2 + 0.0065 \cdot N \cdot D - 0.0296 \cdot N \cdot Te + 0.3043 \cdot N \cdot Ge - 0.0778 \cdot D \cdot Cn + 0.2398 \cdot Te \cdot Cn + 0.0132 \cdot D \cdot Te + 0.8454 \cdot D - 4.3586 \cdot Cn + 0.1852 \cdot N$$

Alle Daten von G1 (Gumpenstein) und G2 (Piber) (nur 1.Schnitt) – siehe Abb. 18

Alle N-gedüngten Varianten

$$\text{TME} = -76.2681 - 0.0053 \cdot \text{Te}^2 + 31.5262 \cdot \text{Ge}^2 - 0.0059 \cdot \text{D} \cdot \text{Sd} - 0.0067 \cdot \text{D} \cdot \text{Te} + 0.0093 \cdot \text{Te} \cdot \text{Sd} - 0.5872 \cdot \text{Ge} \cdot \text{Sd} - 54.5156 \cdot \text{Ge} + 0.589 \cdot \text{Sd} + 1.0502 \cdot \text{Te} + 1.3923 \cdot \text{D} + 0.2224 \cdot \text{N}$$

G1 (Gumpenstein) und G2 (Piber) (mit 1.Schnitt) – Abb. 19

Nur gedüngte 3-Schnittvarianten

$$\text{TME} = 57.0329 + 0.0066 \cdot \text{D}^2 - 4.3778 \cdot \text{Cn}^2 + 0.1939 \cdot \text{Te} \cdot \text{Cn} + 15.2279 \cdot \text{Cn} \cdot \text{Ge} - 27.9451 \cdot \text{Ge} - 0.8245 \cdot \text{D} + 0.3264 \cdot \text{N}$$

Legende	
TME	Trockenmasseschnittertrag in dt/ha (abhängige Variable)
N	Stickstoffgabe zum jeweiligen Schnitt in kg/ha
D	Dauer der Wachstumsperiode bis zum Schnitt in d
Te	Summe der effektiven Temperatur der Wachstumsperiode D in °C
Ge	Summe der effektiven Strahlung der Wachstumsperiode D in GJ/m ²
Cn	Reihenfolge des Schnittes (1, 2,etc)
Sd	Anzahl Tage mit Schneedecke in der Wachstumsperiode (1. Schnitt)

Berechnung der unabhängigen Parameter Te und Ge :

a) Bestimmung des Wassertresses an einem bestimmten Tag

W_L : Langfristiger Wasserstressfaktor ab 1. Mai

$$W_L = 2 \cdot [\text{ETa (Summe seit 1. Mai)} / \text{ETp (Summe seit 1. Mai)}]$$

ETa (tägliche aktuelle Evapotranspiration) und ETp (tägliche potentielle Transpiration) stehen als Output aus dem FAO-Bodenwasserbilanzmodell zur Verfügung.

W_S : Kurzfristiger Wasserstressfaktor des bestimmten Tages und der vorhergehenden 6 Tage

$$W_S = 2 \cdot [\text{ETa (Summe 7 Tage)} / \text{ETp (Summe 7 Tage)}]$$

W_A: Gesamtwasserstress

$$W_A = ((W_L * C)^M + ((1 - C) * W_S)^M)^{1/M}$$

C, M : Empirische Gewichtungsfaktoren für kurz- und langfristigen Wasserstress

b) Wasserstressreduktionsfaktor g_s

$$g_s = e^{\alpha * e^{\beta * W_A^\gamma}}$$

α,β,γ sind empirische Koeffizienten

c) Summe der effektiven Temperatur (Te) und Strahlung (Ge) einer Wuchsperiode

$$Te \cong \sum_{i=1}^n T * g_s$$

und

$$Ge \cong \sum_{i=1}^n R * g_s$$

wobei

n = Anzahl der Tage/Wuchsperiode

T= tägliches Mittel Lufttemperatur über 0 Grad C (°C)

R= tägliche Globalstrahlungssumme (GJ/m²)

3.3.4.1. GRAM Ergebnisse – Versuchsstandorte Gumpenstein und Piber

Die Ergebnisse des empirisch-statistischen Modells GRAM zeigen für die meisten Fälle (schnittbezogen) durchwegs gute Ergebnisse der Ertragsbestimmung mit Korrelationen von $R^2 > 0.64$. Die Modellkalibrierung ist allerdings noch nicht abgeschlossen, wobei weitere Verbesserungen zu erwarten sind. In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 53-59) sind die Ergebnisse der Validierung für verschiedene Fälle für die Standorte Piber und Gumpenstein zusammengefasst (1. Schnitt, ab 2. Schnitt, alle Schnitte, alle Jahre, nur Trockenjahre, etc.) dargestellt. Die beste Korrelation zeigt unter Berücksichtigung aller Versuchsjahre vorerst die 3-Schnittvariante ($R^2=0.75$). Die Modellkalibrierung hinsichtlich der Festlegung der empirischen Parameter ist aber noch nicht abgeschlossen und es lassen sich dadurch weitere Verbesserungen erwarten. Die Validierungsergebnisse für jeden Standort separat zeigen noch bessere Ergebnisse (nicht dargestellt), aber im Sinne einer auf andere Standorte übertragbaren Methode wurden hier 2 Standorte für die Validierung zusammengefasst.

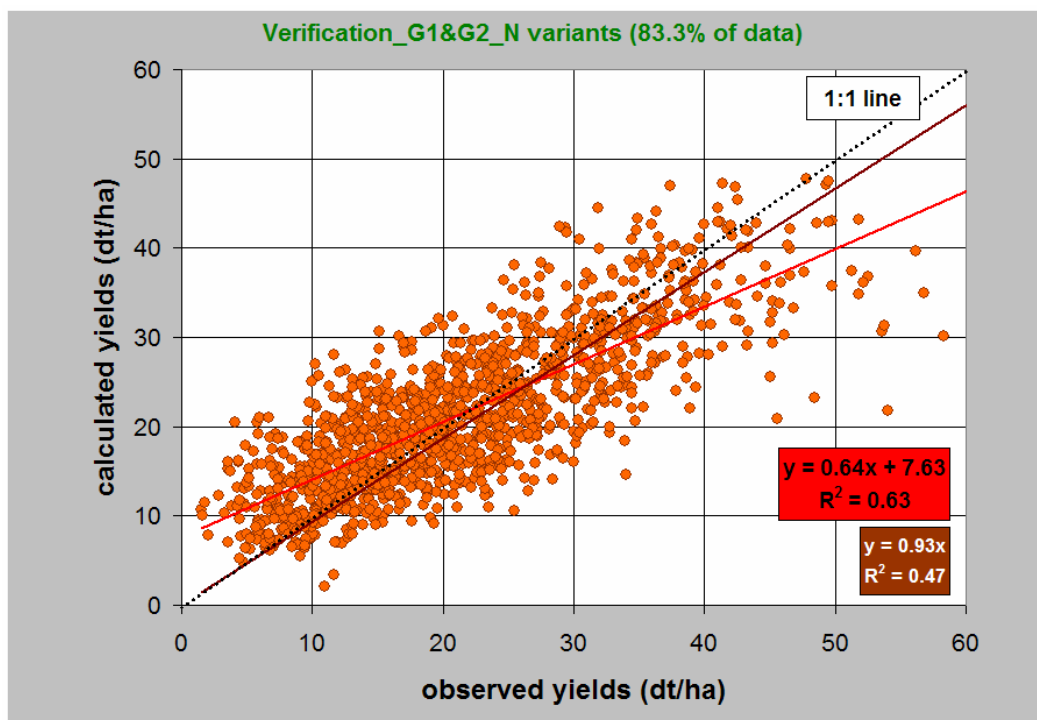


Abb. 53: Korrelation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. OHNE 1. Schnitt, OHNE Berücksichtigung des Schnittes.

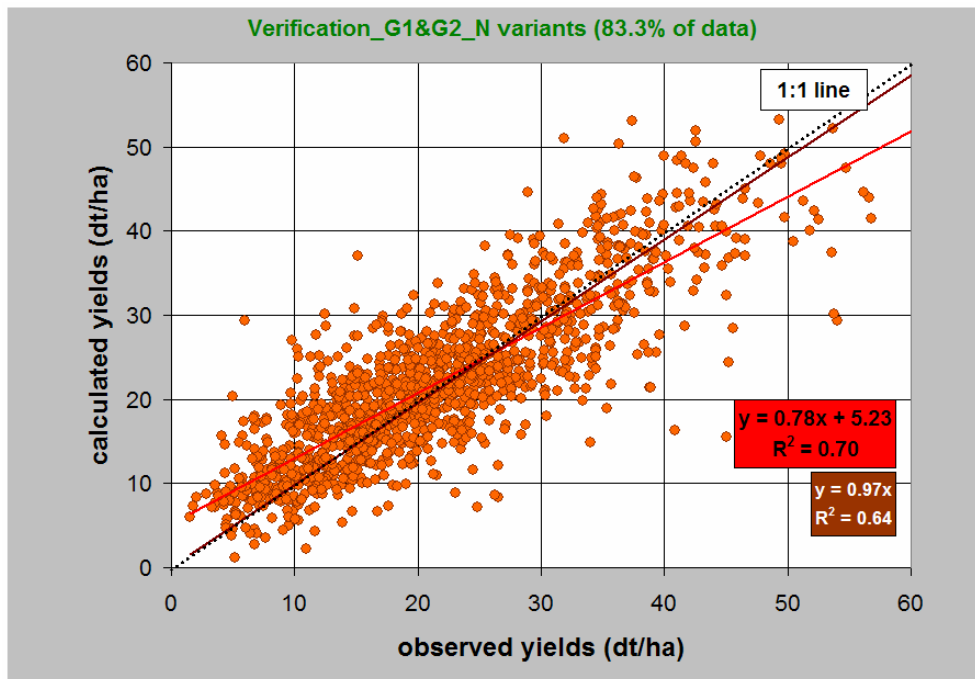


Abb. 54: Korellation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. OHNE 1. Schnitt, MIT Berücksichtigung des Schnittes

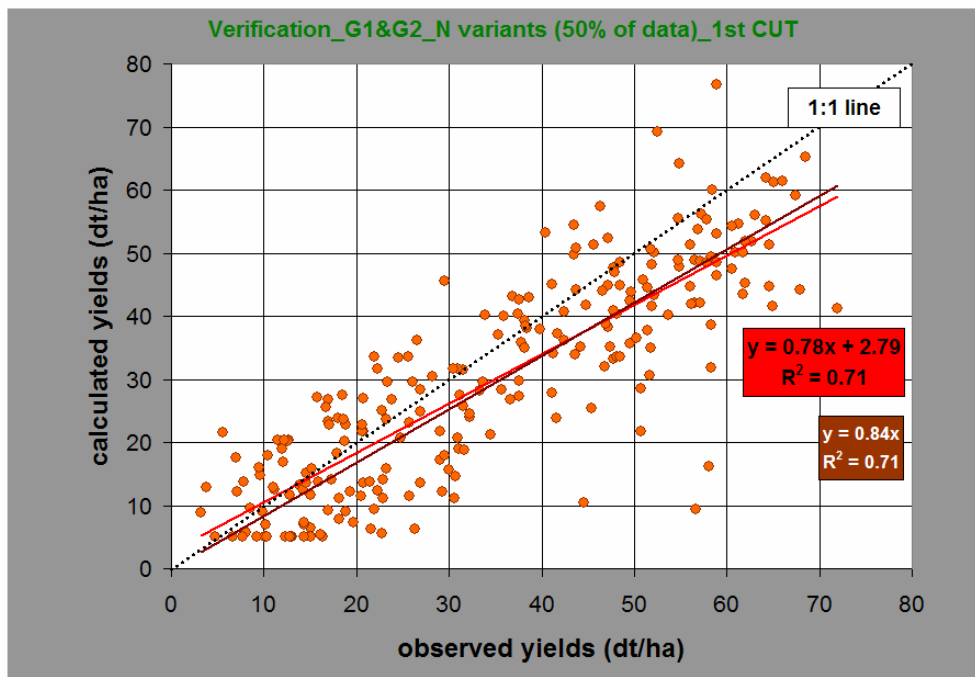


Abb. 55: Korellation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. NUR 1. Schnitt, MIT Berücksichtigung des Schnittes

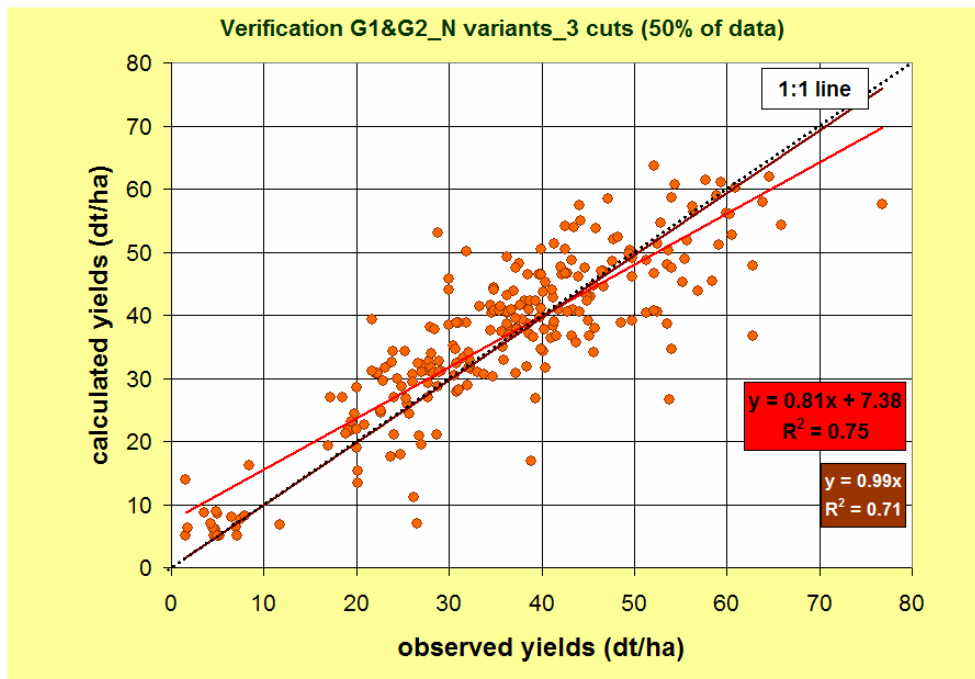


Abb. 56: Korellation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. NUR 3-Schnitt Varianten, MIT Berücksichtigung des Schnittes

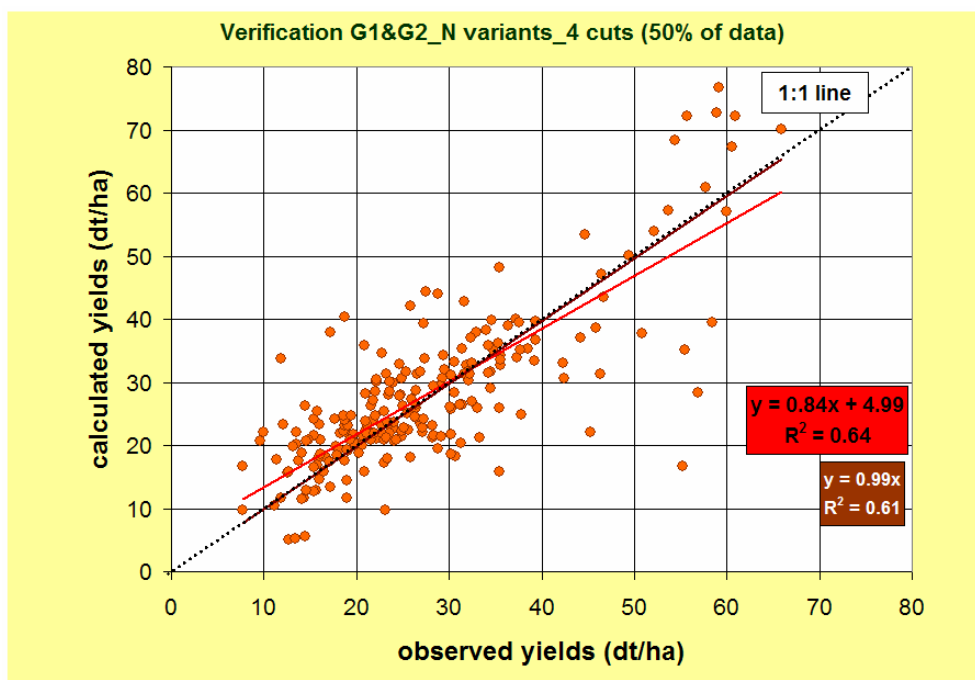


Abb. 57: Korellation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. NUR 4-Schnitt Varianten, MIT Berücksichtigung der Schnittes

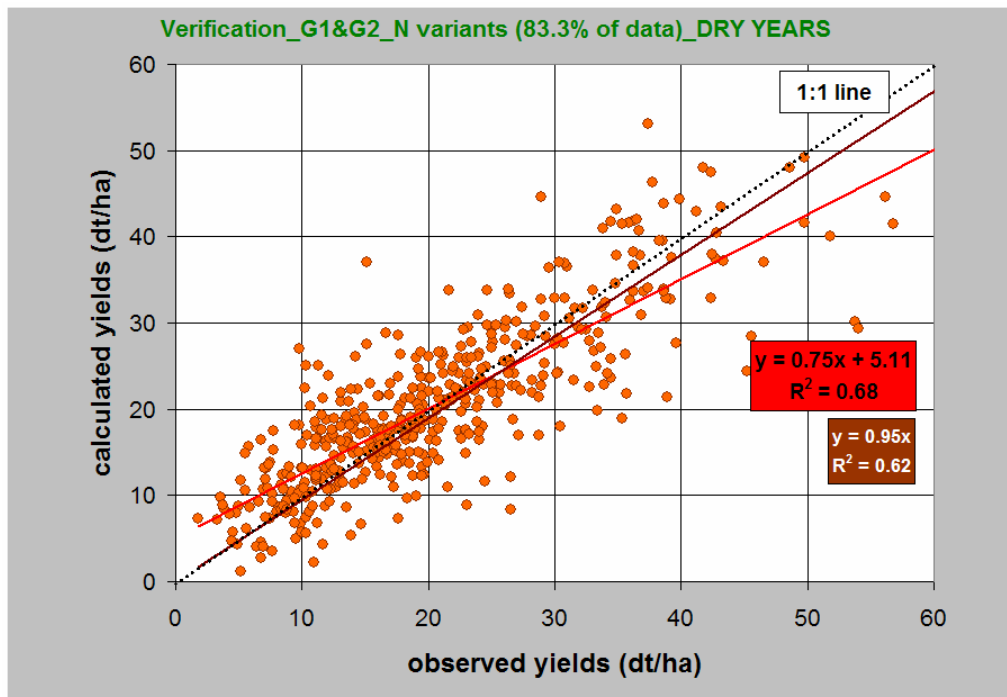


Abb. 58: Korellation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. Wie Abb. 47, NUR trockene Jahre, OHNE 1. Schnitt

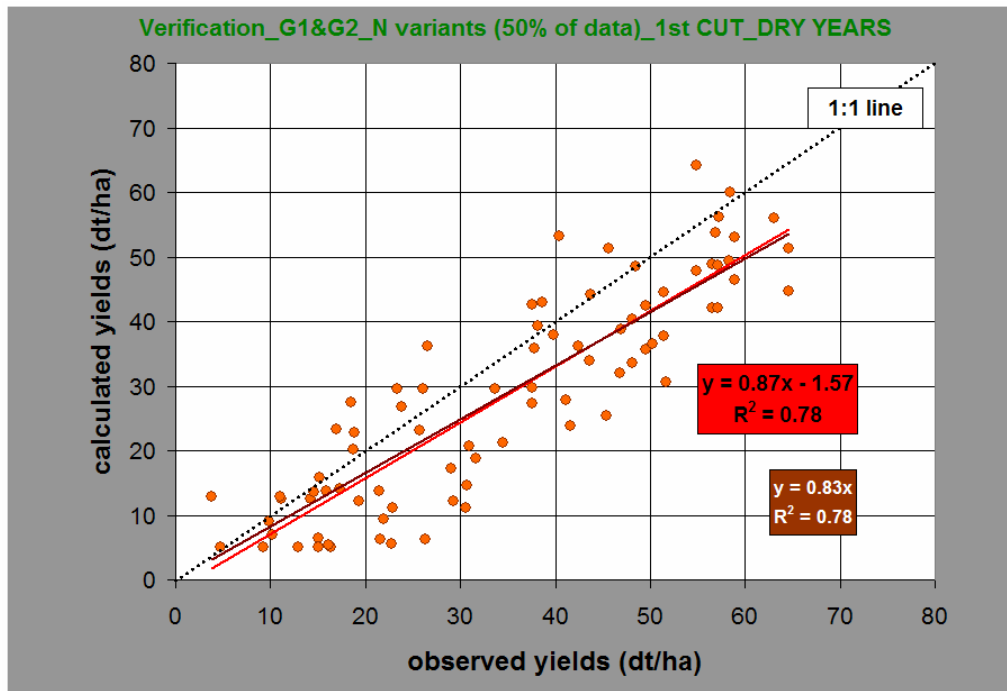


Abb. 59: Korellation der Methode nach T&E mit den gemessenen Schnitterträgen der beiden Standorte Piber und Gumpenstein. Wie Abb. 47, NUR trockene Jahre, NUR 1. Schnitt.

3.3.4.2.GRAM Ergebnisse – 16 Versuchsstandorte

GRAM wurde in einem nächsten Schritt anhand der Versuchsergebnisse aus 16 verschiedenen Standorten der Jahre 2002-2004 in Österreich kalibriert, wobei versucht wurde die besten räumlich zuordenbaren Gleichungen für die GISimplementation zu finden.

Aufgrunde der bisher vorliegenden Versuchsdaten an den Versuchsstandorten konnten 3 bzw. 2 multiple Regressionsgleichungen jeweils für eine bestimmte Region in Österreich mit einer akzeptablen Genauigkeit abgeleitet werden. Es muss darauf hingewiesen werden, dass sich bei vorliegen von Daten aus weiteren Versuchsjahren und Standorten die Güte der Gleichungen weiter verbessert werden kann und sollte.

Die Datenbasis (Schnitterträge und Management) bei der Erstellung der Regressionsgleichung umfasst die 3 Versuchsjahre 2002-2004 an 16 Versuchsstellen. 80% der Ertragsdaten wurden für die Modellkalibrierung zufällig ausgewählt, der Rest wurde für die Validierung verwendet.

Gleichungen für 3 unterschiedliche Regionen :

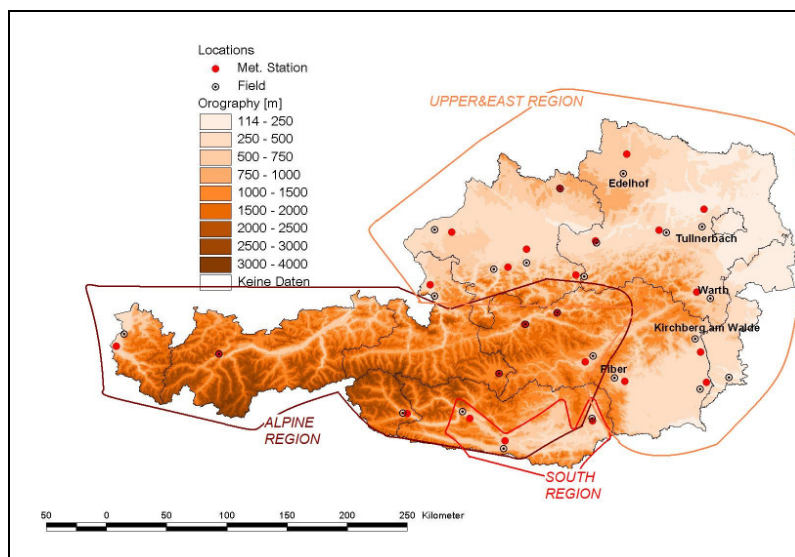


Abb. 60: Abgrenzung der Regionen der besten Regressionsgleichungen (3 Regionen)

Die folgenden Darstellungen in Abb.61 und Abb. 62 zeigen die Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse in den verschiedenen Regionen, unter Angabe der statistischen Güteparameter MEI (Wilmot's model efficiency index) und U (Theil's index).

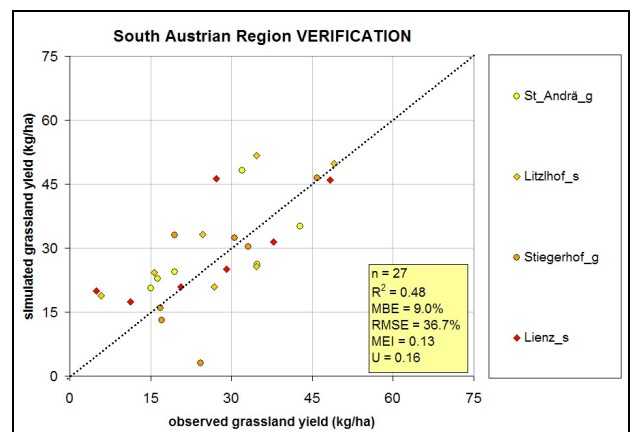
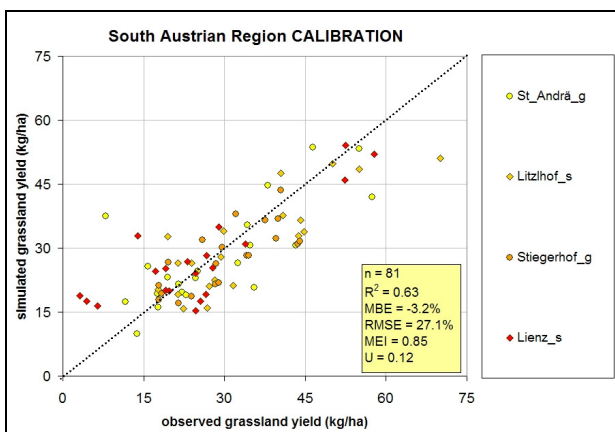
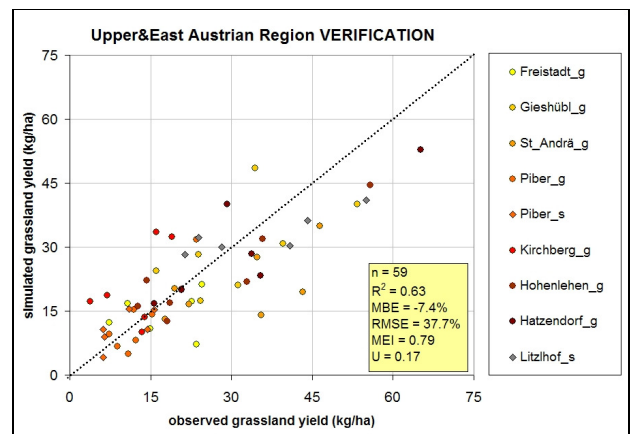
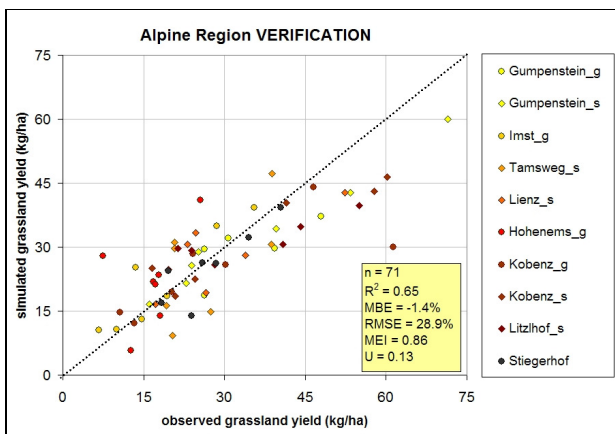
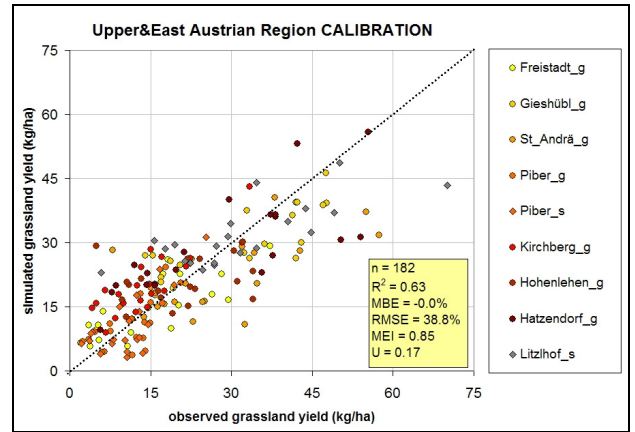
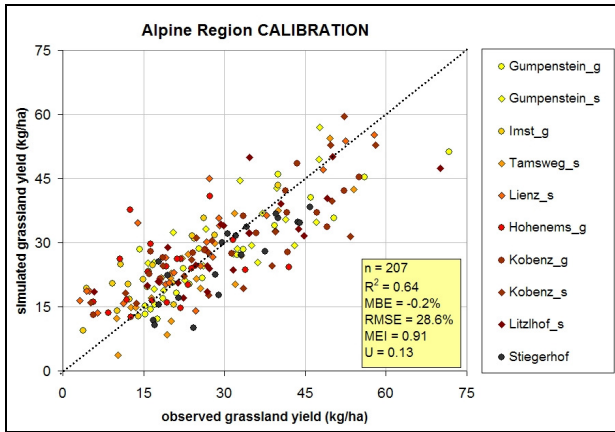


Abb. 61: Ergebnisse der 3-Regionen Lösung

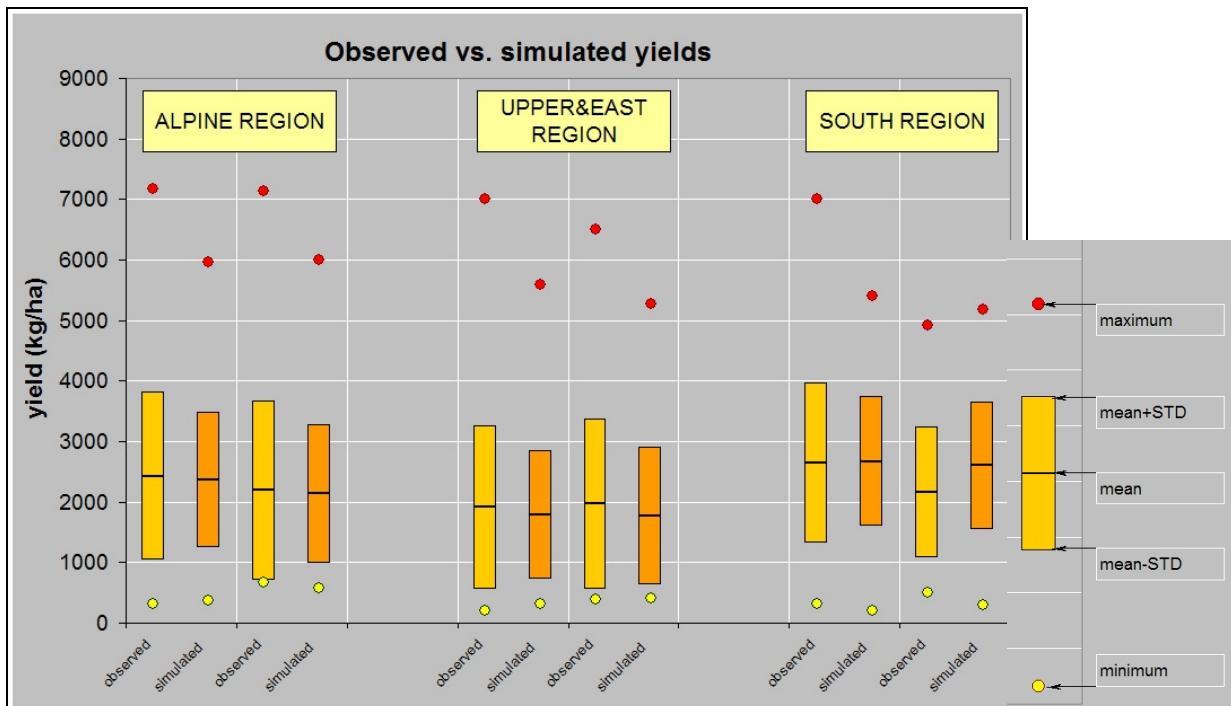


Abb. 62: Vergleich der Validierungsergebnisse von GRAM in den 3 abgegrenzten Regionen zur Simulation des Grünlandertrages.

Gleichungen für 2 unterschiedliche Regionen :

Schliesslich wurde noch die 2-Regionen Lösung (Abb.63) getestet, wobei hier grundsätzlich die alpine Region und die Flachlandregion unterschieden wird. Es zeigte sich das diese Lösung ungefähr dieselbe Güte aufweise als die 3-Regionen Lösung, jedoch signifikant besser ist als nur eine Gleichung für ganz Österreich zu verwenden. Es wird daher vorgeschlagen vorest diese Lösung in das GIS zu implementieren.

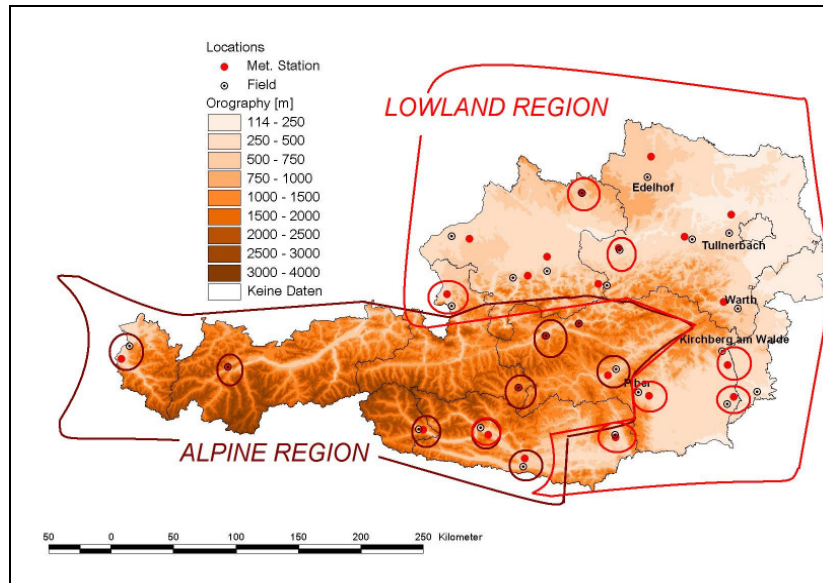


Abb. 63: Abgrenzung der Regionen der besten Regressionsgleichungen (3 Regionen)

Die besten gefundenen multiplen Regressionsgleichungen für die 2 abgegrenzten Regionen lauten folgendermassen:

Gleichung für die ALPINE Region:

$$\begin{aligned} \text{Dry matter yield (dt/ha)} = & 146.2872 - 0.616 * \text{SOIL RETENTION} * D - 4.9257 * \text{SOIL} \\ & \text{RETENTION} * \text{FERTILISATION TYPE} + 2.9415 * \text{SOIL RETENTION} * TE + 5.6876 * \text{CUT NUMBER} * D - \\ & 0.843 * \text{CUT NUMBER} * \text{NITROGEN DOSE} - 45.4805 * \text{CUT NUMBER} * TE + 38.2783 * \text{NUMBER OF} \\ & \text{CUTS} * TE - 15.029 * \text{NUMBER OF CUTS} * GE - 0.772 * D * \text{ALTITUDE} + 4.8533 * D * TE + 13.2197 * D * GE + \\ & 0.2698 * \text{NITROGEN DOSE} * \text{ALTITUDE} + 7.9771 * \text{ALTITUDE} * GE + 8.6509 * \text{SOIL RETENTION} + \\ & 5.1858 * \text{NUMBER OF CUTS}^2 - 50.8345 * \text{NUMBER OF CUTS} - 1.2963 * D^2 + 7.5967 * \text{FERTILISATION} \\ & \text{TYPE}^2 - 0.6607 * \text{ALTITUDE}^2 - 86.6072 * TE - 46.5197 * GE^2 \end{aligned}$$

Gleichung für die FLACHLAND Region:

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

Tab. 4: Parameter und Einheiten der GRAM Regressionsgleichung

Name	Scaling factor	Description	Units
soil retention		the water holding capacity of the first 40 cm of the soil layer	cm
D	10	duration of the cut	days
cut number		order of the cut in the sequence	
number of cuts		number of the cuts per season	
fertilization type		fertilisation type (stalmist or gülle system)	
nitrogen dose	10	mineral Nitrogen dose (estimated amount based on the laboratory results – <i>use algorithm supplied</i>)	kg/ha
altitude	100	altitude of the site	m
TE	100	effective temperature	°C
GE		effective global radiation	GJ.m ²

Die nächsten Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der 2-Regionen Lösung.

Abb.64-65 zeigt die Ergebnisse der abgegrenzten **alpinen Region** für 8 unterschiedliche Standorte.

Die Abkürzung **-g** steht für die Düngsvariante Gülle, **-s** für Stallmist.

Angegebene statistische Parameter:

R₀² ist die Korrelation zur 1:1 Line, **MBE** ist der “mean bias error” und **RMSE** ist “root mean square bias error” der GRAM Ergebnisse vs. der Messwerte. Zusätzlich wird **MEI** (Modelling efficiency index according to Wilmot) und **U** (Theil Index) angegeben. MEI erreicht Werte zwischen 0 und 1 (1= absolute Übereinstimmung). Bei U ist dies umgekehrt.

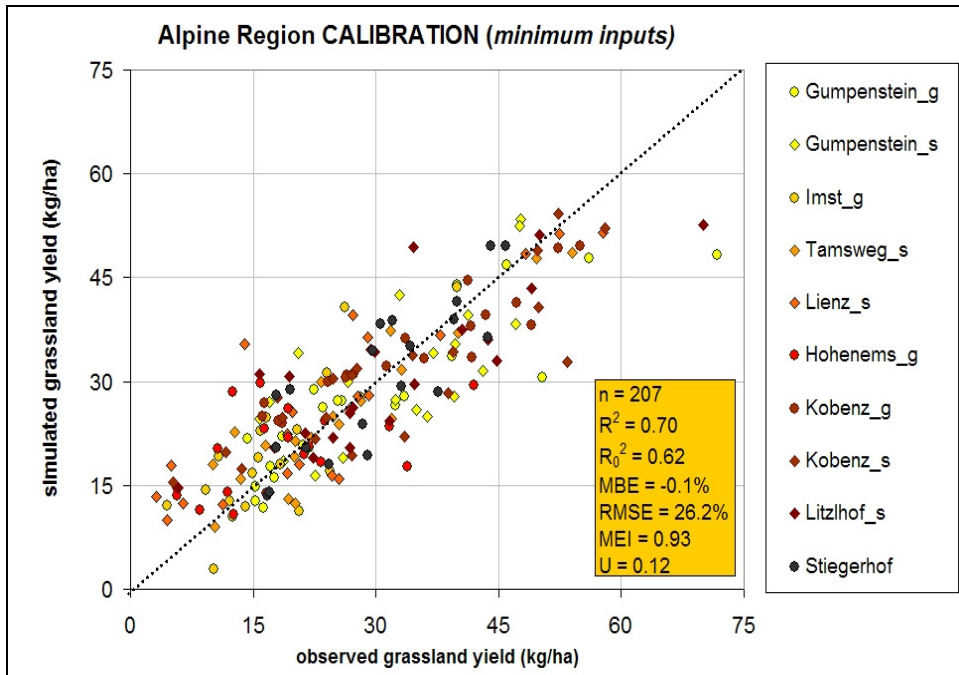


Abb. 64: Ergebnisse der Modellkalibration der alpinen Region

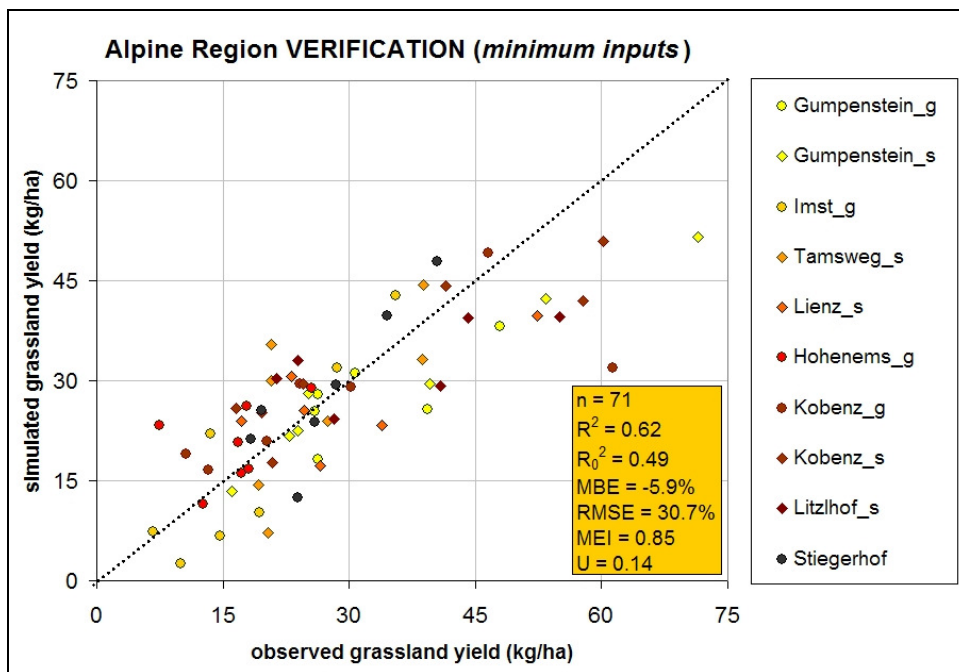


Abb. 65: Ergebnisse der Modellvalidierung der alpinen Region

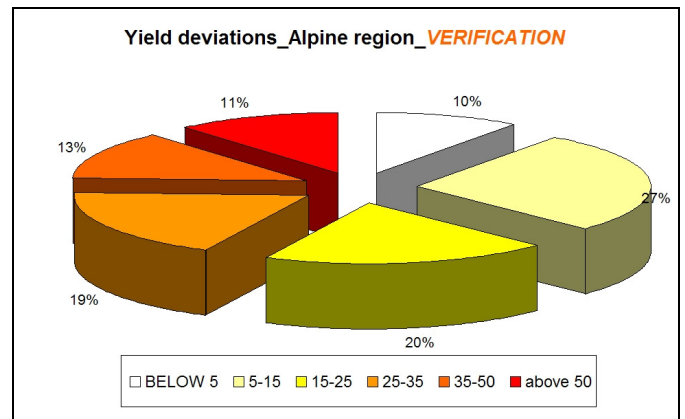
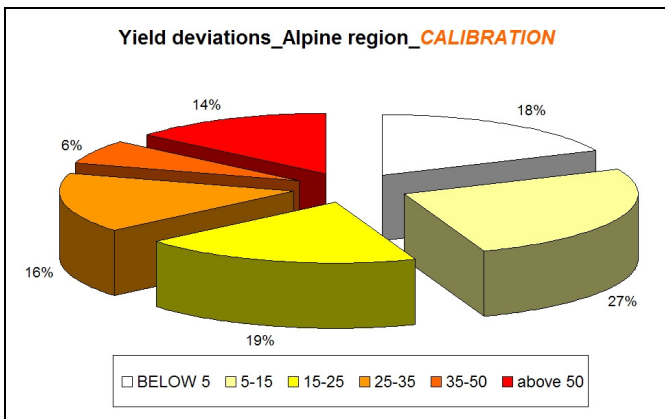
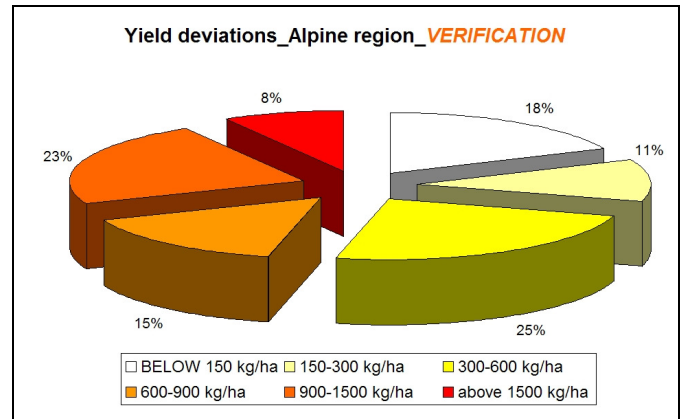
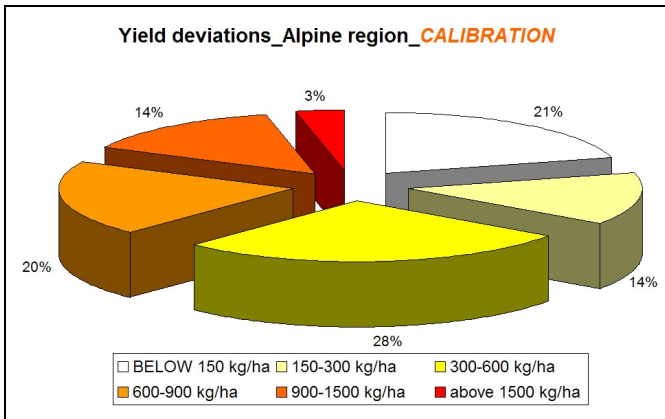


Abb. 66: Abweichungen der GRAM Ergebnisse der 2-Regionen Lösung, nach Abweichungsklassen unterteilt, alpine Region (links : Kalibrierung, rechts: Validierung)

Abb.66 zeigt die Abweichungen der GRAM Ergebnisse zu den Messwerten aus den Kalibrierungs und Validierungsdaten der alpinen Region. Die Abweichungen werden absolut (oben) und relativ (unten) angegeben. Diese Abbildung zeigt dass bei der derzeitigen Version von GRAM und der (begrenzten) zur Verfügung stehenden Datenbasis der Hauptanteil der Ergebnisse unterhalb einer Abweichung von $\pm 35\%$ und ± 900 kg/ha liegt. Abb.67 schliesslich zeigt die statistische Güte der Modellergebnisse für die jeweiligen verschiedenen Stationen.

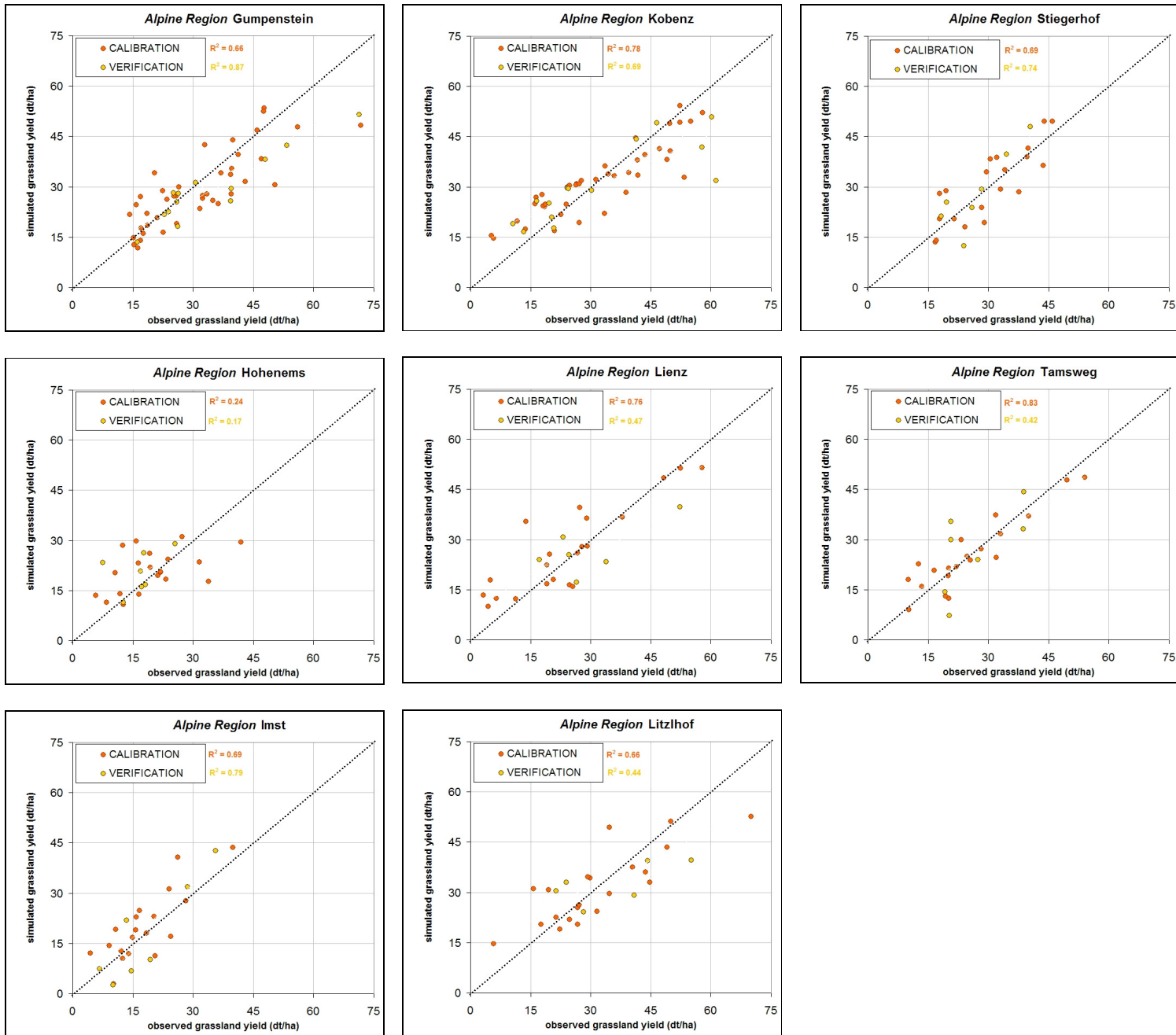


Abb. 67: Güte des GRAM Modells zur Bestimmung des Trockenmasseertrages an den einzelnen Stationen der alpinen Region (Kalibrierung und Validierung). Die diagonale Linie stellt die 1:1 Linie dar. R^2 , der Korellationskoeffizient, ist der Grad an Variabilität welche durch GRAM erklärt werden kann.

Abb.68 und 69 zeigt die Ergebnisse der abgegrenzten **Flachland Region** für 8 unterschiedliche Standorte. Die Abkürzung **-g** steht für die Düngervariante Gülle, **-s** für Stallmist.

Angegebene statistische Parameter:

R₀² ist die Korrelation zur 1:1 Line, **MBE** ist der “mean bias error” und **RMSE** ist “root mean square bias error” der GRAM Ergebnisse vs. der Messwerte. Zusätzlich wird **MEI** (Modelling efficiency index according to Wilmot) und **U** (Theil Index) angegeben. MEI erreicht Werte zwischen 0 und 1 (1= absolute Übereinstimmung). Bei U ist dies umgekehrt.

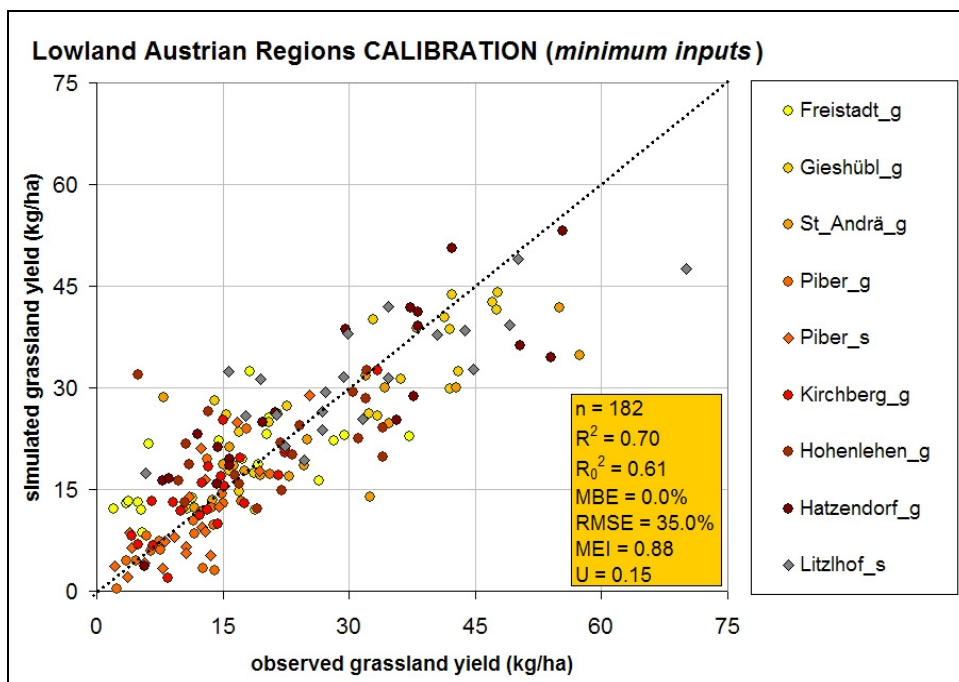


Abb. 68: Ergebnisse der Modellkalibration der Flachland Region

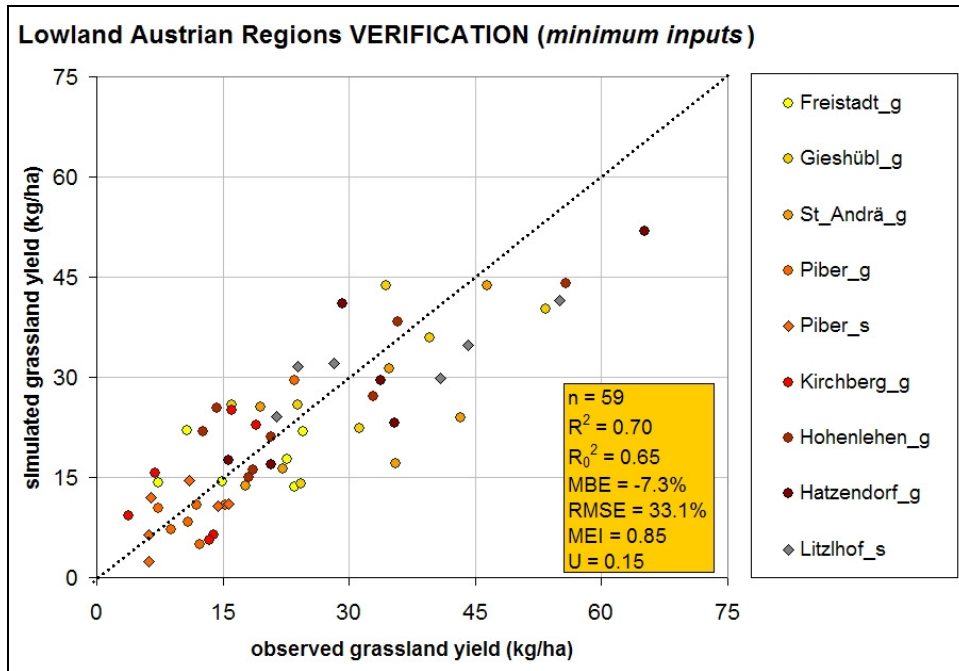


Abb. 69: Ergebnisse der Modellvalidierung der Flachland Region

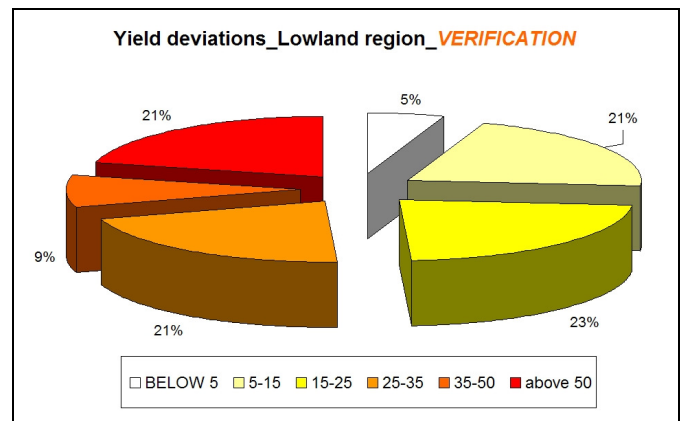
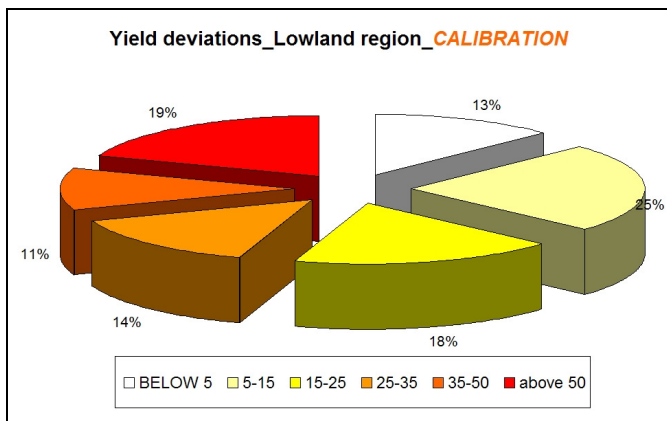
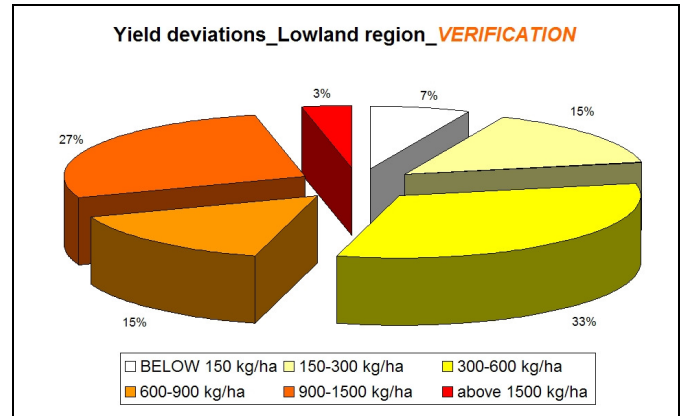
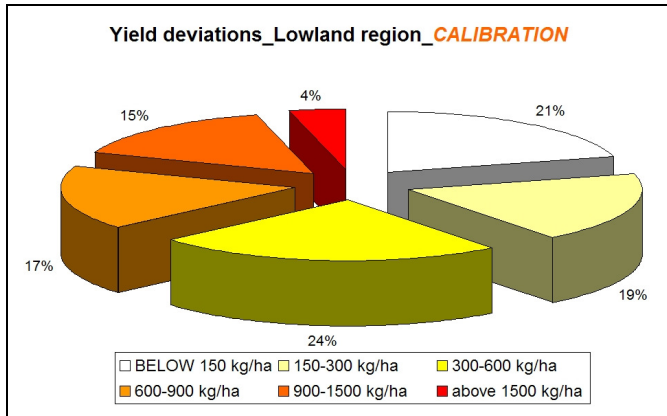


Abb. 70: Abweichungen der GRAM Ergebnisse der 2-Regionen Lösung, nach Abweichungsklassen unterteilt, Flachlandregion (links : Kalibrierung, rechts: Validierung)

Abb.70 zeigt die Abweichungen der GRAM Ergebnisse zu den Messwerten aus den Kalibrierungs und Validierungsdaten der alpinen Region. Die Abweichungen werden absolut (oben) und relativ (unten) angegeben. Diese Abbildung zeigt dass bei der derzeitigen Version von GRAM und der (begrenzten) zur Verfügung stehenden Datenbasis der Hauptanteil der Ergebnisse unterhalb einer Abweichung von $\pm 35\%$ und ± 900 kg/ha liegt. Abb.71 schliesslich zeigt die statistische Güte der Modellergebnisse für die jeweiligen verschiedenen Stationen. Abb. 65 zeigt die Güte des GRAM Modells zur Bestimmung des Trockenmasseertrages an den einzelnen Stationen der alpinen Region (Kalibrierung und Validierung). Die diagonale Linie stellt die 1:1 Linie dar. R^2 , der Korellationskoeffizient, ist der Grad an Variabilität welche durch GRAM erklärt werden kann.

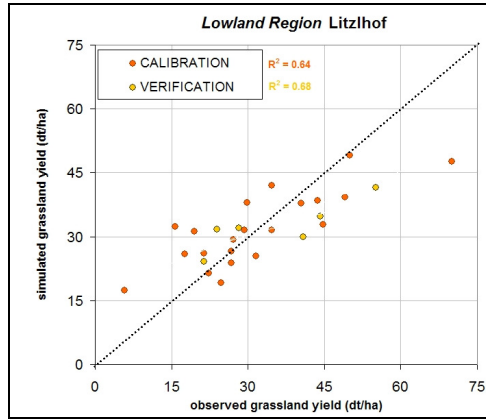
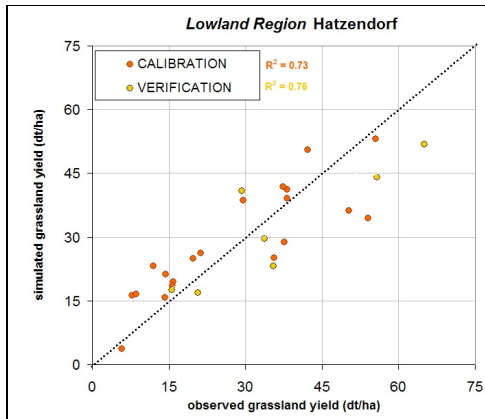
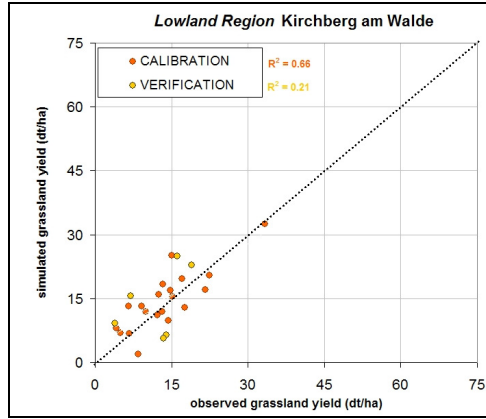
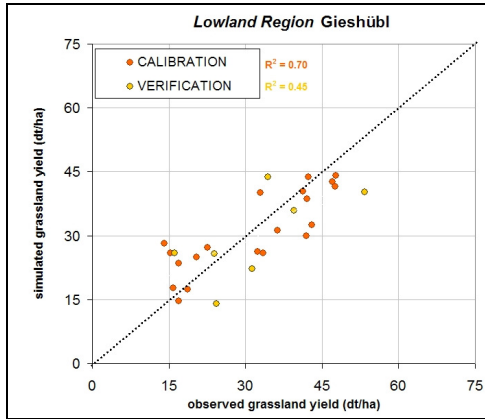
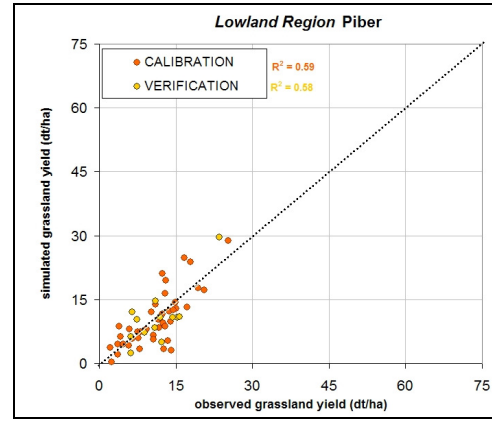
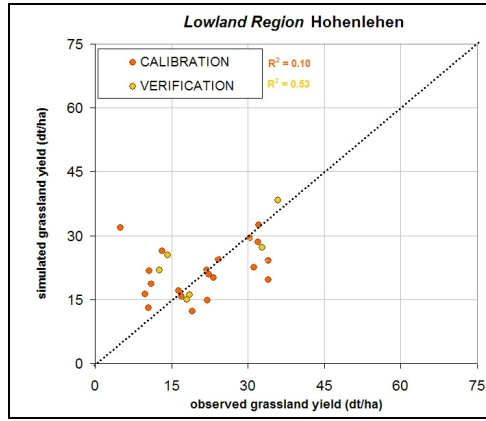
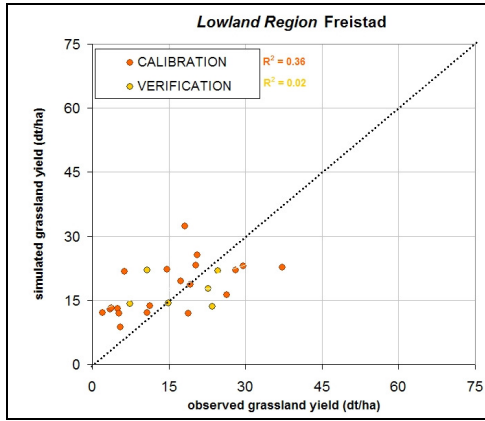


Abb. 71: Güte von GRAM in den Flachlandstationen

In der Abbildung 72 wird die Güte der GRAM Gleichung für jeweils die Kalibrierung und die Validierung der beiden Regionen (alpine Region und Flachland) verglichen und dargestellt. Es werden der Mittelwert und die Standardabweichungen jeweils der simulierten und gemessenen Trockenmasseerträge angegeben.

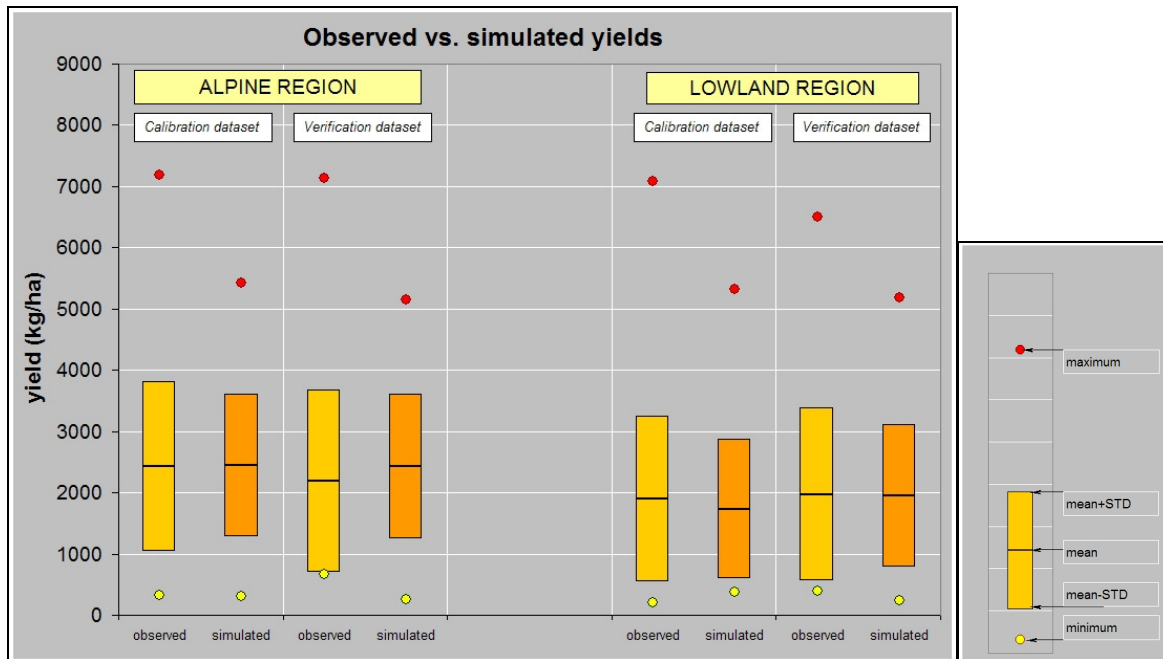


Abb. 72: Vergleich der simulierten und gemessenen Trockenmasseerträge der 2-Regionen GRAM Gleichungen.

3.3.5. Übersicht über die Güte der verschiedenen getesteten Modelle

In der folgenden R² Tabelle sind anhand der Schlüsselparameter Bodenwassergehalt und Grünlandtrockenmasseertrag die verschiedenen Modelle im Vergleich angeführt. In dieser Tabelle sind nur die GRAM Gleichungen der Standorte Piber und Gumpenstein abgeben das dieser Vergleich Standortbezogen ist.

Tab.5. Korrelationen modellierter Schlüsselparameter / Indikatoren mit Messdaten

R ² Tabelle		Modelle							
Standort/Param.		FAO	MACROS	SWAP	EPIC	SPI –Ind.	Trockentage (SWAP)	GRAM all years	GRAM dry years
G1	TM (1)	-	0.27	< 0.1	<0.1	0.59 ⁵	0.28 ⁶	0.71 ⁷	0.78 ⁷
G1	TM (>2)	-	<0.1	< 0.1	0.16	0.50 ⁵	0.28 ⁶	0.70 ⁷	0.68 ⁷
G1	BWG	0.72 ¹	-	0.30 ³	0.72 ⁴	-	-	-	-
G2	BWG	0.68 ¹	0.59 ²	0.85 ³	0.25 ⁴	-	-	-	-
G3	BWG	0.51 ¹	-	0.52 ³	0.34 ⁴	-	-	-	-

¹... berücksichtigte Zeitperiode : Mai-Oktober 2003; Korrelation der Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes 10cm gemessen / 0-20cm modelliert.

²... berücksichtigte Zeitperiode : Juli 2001- Juni 2003; Korrelation der Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes 10cm gemessen / 0-20cm modelliert.

³... berücksichtigte Zeitperiode : Juni 2002-November 2003; Korrelation der Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes 10cm gemessen / 5-15cm modelliert.

⁴... berücksichtigte Zeitperiode : 2001-2002; Korrelation der Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes 10cm gemessen / 0-20cm modelliert.

⁵... berücksichtigte Zeitperiode : 1961-2003

⁶... berücksichtigte Zeitperiode : 1961-2003

⁷... berücksichtigte Zeitperiode : 1961-2003; Standorte G1 und G2 zusammengenommen

G1=Gumpenstein, G2=Piber, G3=Kirchberg/Walde

TM=Grünlandtrockenmasseertrag, in Klammer : Schnittnummerbezug,

BWG=Bodenwassergehalt

3.4. Übertragung der meteorologischen Parameter in die Fläche – GIS Implementierung.

Die Arbeiten zur Interpolation der meteorologischen Daten für die Berechnung der Trockenstressindikatoren erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der BAL-Gumpenstein (Herrn Andreas Schaumberger). Hierbei war die BOKU-Met für die Entwicklung der Interpolationsverfahren zuständig und die BAL-Gumpenstein für die Umsetzung in ein operationell anwendbares System.

Das Problem bei der Interpolation der meteorologischen Daten besteht darin, dass das Endergebnis in möglichst feiner Auflösung (wenn möglich für einzelne Parzellen) vorliegen soll, die meteorologischen Daten jedoch nur mit einer räumlichen Auflösung von ~ 20 km vorliegen (siehe auch **Abb. 73**). Als Lösungsansatz für dieses Problem wurde in diesem Projekt ein – 2 Skalen Verfahren angewandt und für jedes meteorologische Element eine optimiertes Interpolationsverfahren ausgearbeitet.

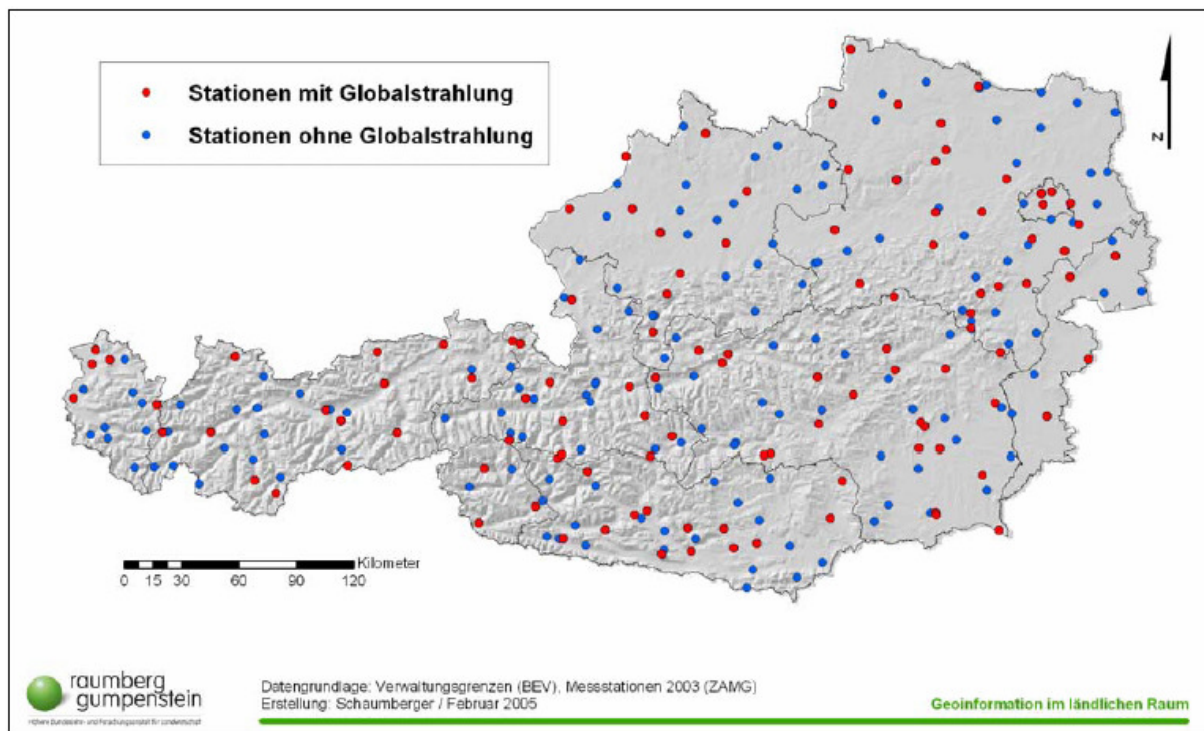


Abb. 73: Räumliche Verteilung der meteorologischen Stationen der ZAMG für das Jahr 2003.

Die meteorologischen Daten wurden der Stationsdichte adäquat mit 1 km Auflösung interpoliert. Um die feinskaligen Einflussfaktoren zu berücksichtigen, wurden die Einstrahlungsbedingungen (Abschattung, Hangneigung, Hangausrichtung und Seehöhe) mit Hilfe eines feinaufgelösten Digitalen Höhenmodell (DHM) und eines Solarmodells berechnet. Zusätzlich kann mit dem DHM der effektive Niederschlag (Niederschlag minus Oberflächenabfluss) als Funktion der Hangneigung feinskalig parametrisiert werden. Der BAL-Gumpenstein wurde hierfür vom Lebensministerium ein DHM mit 10 m Auflösung für ganz Österreich zur Verfügung gestellt.

Konkret wurden in diesen Projekt für folgende meteorologische Kenngrößen Interpolationsverfahren auf Tagesbasis entwickelt:

- Globalstrahlung [MJ/m²]
- Potenzielle Evapotranspiration [mm]
- Niederschlag [mm]
- Tagesmittel der Lufttemperatur [°C]
- Tagesminimum der Lufttemperatur [°C]

3.4.1 Interpolation der Globalstrahlung

Die kurzwellige Sonneneinstrahlung (meteorologisch Globalstrahlung) spielt in zweierlei Hinsicht eine wesentliche Rolle bei der Ertragsbildung im Grünland. Erstens stellt die Globalstrahlung die Energie für die Photosynthese und damit das Wachstum zur Verfügung und zweitens ist die Globalstrahlung auch ein Hauptfaktor für die potenzielle Evapotranspiration [PET] und damit für den Wasserentzug aus dem Boden.

Für die Verfügbarkeit an Globalstrahlung an einen bestimmten Ort zu einen bestimmten Zeitpunkt ist einerseits das von Tag zu Tag variable Wetter (Bewölkung) und der Jahrgang der Sonne verantwortlich, andererseits auch die zeitlich konstanten topologischen Eigenschaften des Ortes wie Seehöhe, Ausrichtung, Neigung und Horizontabschattung. Der Effekt der Bewölkung kann nur durch die täglichen Beobachtungen bestimmt werden, und ist daher von der Stationsdichte abhängig (in Österreich rund 100 ZAMG-Stationen mit Globalstrahlungsmessung). Der Einfluss der Topologie kann mit Hilfe eines hochaufgelösten digitalen Höhenmodells (DHM) und einem Strahlungsmodell sehr genau bestimmt werden.

3.4.1.1 Berechnung der potenziellen Strahlung – Strahlungsmodell

Zur Berechnung der Sonneneinstrahlung wurde sowohl an der BOKU-Met und der BAL-Gumpenstein das Softwarepaket „Solar Analyst V 1.0“ installiert. Hierbei handelt es sich um ein Program für das GIS „ArcView“ und es berechnet die Sonnenstrahlung für jeden einzelnen Gitterpunkt eines DHM unter Berücksichtigung der Ausrichtung, Neigung und Abschattung des Gitterpunktes. Eine ausführliche Beschreibung des Modells findet sich in Fu and Rich (1999, 2000). Im „Solar Analyst“ wird die direkte und die diffuse Sonneneinstrahlung getrennt berechnet, wobei bei der direkten Sonneneinstrahlung die Abschattung der Sonnenscheibe und bei der diffusen Sonneneinstrahlung die Horizonteinschränkung berücksichtigt wird. Zusätzlich wird in diesem Modell auch die Zunahme der Globalstrahlung mit der Seehöhe berücksichtigt.

Das Strahlungsmodell musste natürlich an die österreichischen Bedingungen angepasst werden. Hierzu können im „Solar Analyst“ die zwei Variablen „Diffuse Proportion“ und „Transmitivity“ modifiziert werden. Die Transmitivity beschreibt die Abschwächung der direkten Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre und die Diffuse

Proportion beschreibt den Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen. Da bei beiden Strahlungsvorgängen der Aerosol- und Wasserdampfgehalt eine wesentliche Rolle spielt, können die beiden Variablen nicht ganz unabhängig von einander verändert werden.

Für die Kalibrierung des Strahlungsmodells wurden an ausgewählten österreichischen Stationen die Maxima der täglichen Globalstrahlung je Monat berechnet, um die Einstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen zu bestimmen. Anschließend wurden die beiden Variablen im Strahlungsmodell monatsweise variiert, um möglichst genau die beobachteten Maxima zu reproduzieren. Durch diese monatliche Anpassung des Modells konnte die Differenz an nahezu allen Stationen und Monaten während der Vegetationsperiode unter $\pm 5\%$ gehalten werden (siehe **Abb. 74**). An einzelnen Talstationen im Hochgebirge kam es dennoch in einzelnen Monaten zu Abweichungen von bis zu 15 Prozent. Dies dürfte jedoch nicht an den verwendeten Variablen liegen, sondern an der unterschiedlichen Abschattung in der Realität und im digitalen Höhenmodell. Als Beispiel hierfür ist Rauris in der **Abb. 74** dargestellt.

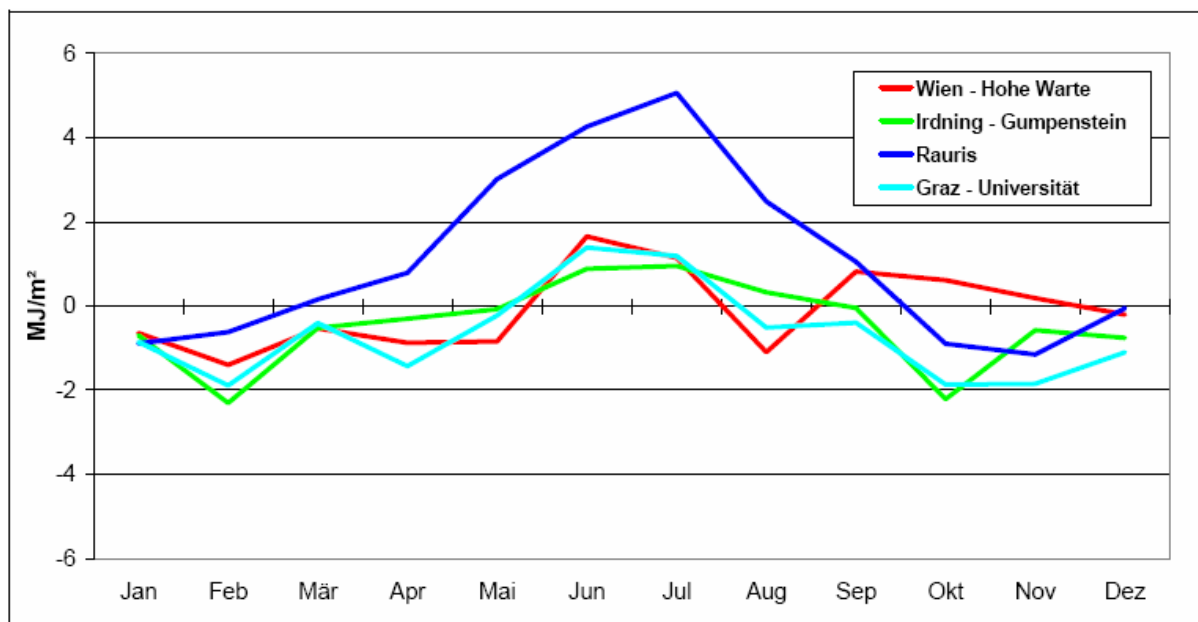


Abb. 74: Differenz der modellierten und gemessenen Monatsmaxima der globalen Strahlung an 4 österreichischen Standorten. Während der Vegetationsperiode beträgt der Unterschied meist weniger als 5 Prozent. Bei der Station Rauris ist die unterschiedliche Abschattung Realität /DHM für die größere Abweichung verantwortlich.

Dem Projekt stand zwar ein digitales Höhenmodell mit 10 m Auflösung zur Verfügung, dennoch wurde die Strahlungsberechnung mit einem auf 50 m geglätteten DHM durchgeführt, da bei der Verwendung des 10m DHM die Rechenzeit des Solarmodells um den Faktor 100 größer ist. Dieser Glättungseffekt hat jedoch hauptsächlich in engen, tiefen Alpentälern Auswirkungen. Dort kann der Effekt aber doch bis zu 5 % betragen (siehe **Abb. 75**). Grundsätzlich müsste das Strahlungsmodell für jeden Tag des Jahres berechnet werden, da sich die Sonnenbahn aufgrund des Jahresganges verändert. Aus rechentechnischen

Gründen überstieg dies unseren Möglichkeiten. Deshalb wurde für einen Tag jeden Monats das Strahlungsmodell gerechnet, und zwischen diesen Tagen die Strahlung für jeden Gitterpunkt interpoliert. Als Auswahl der Tage des Monats verwendeten wir den Ansatz von Klein (1977), der für jedes Monat, den Tag mit den mittleren Einstrahlungsbedingungen angibt. Trotz dieser Reduktionen der Rechenzeit überstieg der Bedarf an Rechenleistung und Speicherplatz die Ressourcen sowohl der BOKU-Met als auch von BAL-Gumpenstein. Die Strahlungsmodellberechnung konnte dankenswerterweise am Land- und forstwirtschaftlichen Rechenzentrum durchgeführt werden.

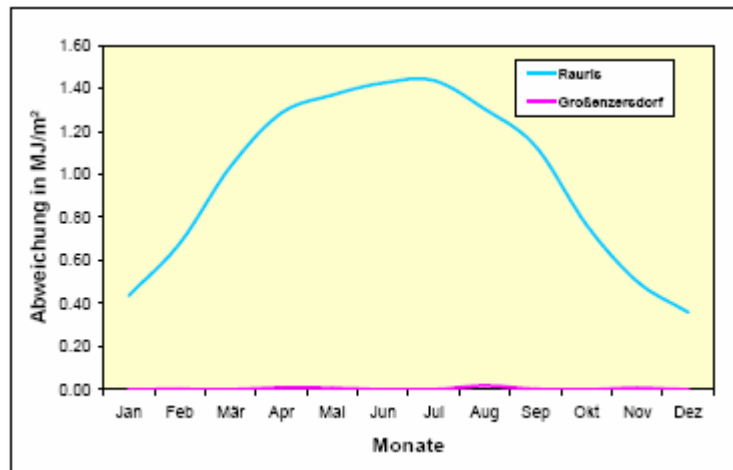


Abb. 75: Einfluss der Glättung des Digitalen Höhenmodells von 10 m auf 50 m auf das Strahlungsmodell. Im Flachland (Groß Enzersdorf) ist der Effekt vernachlässigbar, in engen Alpentälern (Rauris) kann er bis über 1 MJ/m² und Tag oder rund 5 % betragen.

Mithilfe des Strahlungsmodells konnte für jeden Tag des Jahres und für jeden Gitterpunkt mit einer Fläche von 0,25 ha die „Potenzielle Sonnenstrahlung“, also die Einstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen unter Berücksichtigung aller topologischer Einflussfaktoren durchgeführt werden.

3.4.1.2 Berechnung der aktuellen Strahlung

Durch die Berechnungen mit dem Strahlungsmodell stand hochaufgelöst die Information über die potenzielle Einstrahlung zur Verfügung. Dieser Wert wird im weiteren $PS_{(d,i,j)}$ bezeichnet, wobei d für Tag, i für Länge und j für Breite steht. Dadurch wird auch angezeigt, dass es sich hierbei um Felder von ganz Österreich handelt, die für jeden Tag vorliegen. Nun musste noch für jeden Tag der Einfluss der Bewölkung flächig interpoliert werden. Hierfür standen rund 100 Stationen der ZAMG mit Globalstrahlungsmessungen zur Verfügung. Um die Stationsdichte zu erhöhen, und Datenausfälle der Globalstrahlungsmessungen zu ersetzen, wurden auch die Beobachtungen der Sonnenscheindauer (~ 160 Stationen) mit verwendet. Hierzu wurde mittels linearer Regression die Globalstrahlung aus den Sonnenscheinstunden geschätzt.

Als erster Schritt, wurde für jeden Tag eine Normierung von $PS_{(d,i,j)}$ durchgeführt. Hierzu wurde $PS_{(d,i,j)}$ durch die potenzielle Einstrahlung im Flachland ($PS_{\text{flach}(d)}$) durchdividiert. Als $PS_{\text{flach}(d)}$ wurde die Strahlung rund um Gross-Enzersdorf verwendet, also ein Gebiet, wo das DHM absolut flach ist, keine Abschattung und Horizont einschränkung vorkommt und das auf rund 150 m Seehöhe liegt. Dieser Quotient ($QP_{(d,i,j)}$) liefert flächendeckend für jeden Gitterpunkt und Tag das Einstrahlungspotenzial im Vergleich zur Referenzflachlandstrahlung. Die Werte von $QP_{(d,i,j)}$ können sowohl größer als auch kleiner als eins sein, je nach Ausrichtung, Neigung, Abschattung und Seehöhe des Gitterpunktes, enthalten also alle topologischen Einflussfaktoren.

An den Stationen mit Globalstrahlungsdaten wurde als zweiter Schritt für jeden Tag der Quotient beobachtete Globalstrahlung/potenzielle Globalstrahlung ($Rakt_{(d,s)}$) berechnet. Er gibt an, wie viel der potenziell möglichen Strahlung am jeweiligen Tag an der Station gemessen wurde. $Rakt_{(d,s)}$ ist normalerweise immer kleiner oder gleich 1, nur an einzelnen Tagen und Stationen kann $Rakt_{(d,s)}$ auch etwas größer als 1 sein. Dies kann durch die Reflexion von Wolken, welche die direkte Einstrahlung der Sonne nicht stören, erklärt werden. Diese Wolkenreflexionen erhöhen die diffuse Strahlung, wodurch die Summe direkte und diffuse Sonnenstrahlung höher als unter wolkenlosen Bedingungen werden kann.

$Rakt_{(d,s)}$ besitzt keine weiteren räumlichen Abhängigkeiten, da er der Quotient des Strahlungspotenziales ist, und alle räumlichen Abhängigkeiten im Potenzial ($QP_{(d,i,j)}$) berücksichtigt werden. Daher kann $Rakt_{(d,s)}$ mit einem Standardinterpolationsverfahren interpoliert werden. Wir haben hierzu Universal Kriging verwendet. Dadurch liegt nun auch $Rakt_{(d,i,j)}$ als Feld vor. $Rakt_{(d,i,j)}$ beinhaltet somit nur den Einfluss der Bewölkung auf die Einstrahlung des jeweiligen Tages.

Als letzter Schritt erfolgt die Multiplikation der beiden Felder und der potenziellen Flachlandstrahlung :

$$Sakt_{(d,i,j)} = QP_{(d,i,j)} * Rakt_{(d,i,j)} * PS_{\text{flach}(d)}$$

$Sakt_{(d,i,j)}$ ist die aktuelle Strahlung für jeden Tag und Gitterpunkt für ganz Österreich, die alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt.

3.4.2 Interpolation der Referenz Evapotranspiration (ETo)

Die FAO Grasreferenzverdunstung nach Penman Monteith (Allen et al., 1998), ETo wurde zur Verwendung im FAO Bodenwasserbilanzmodell berechnet. Um die ETo flächendeckend zu berechnen könnte man entweder alle notwendigen meteorologischen Elemente einzeln in die Fläche interpolieren und danach an jedem Gitterpunkt die ETo berechnen, oder die ETo nur an den Stationen, wo alle meteorologischen Elemente vorhanden sind, berechnen und danach die ETo- Werte unter Berücksichtigung räumlicher Abhängigkeiten interpolieren. Wir haben aus zwei Gründen die letztere Variante für dieses Projekt gewählt. Erstens sollen die Ergebnisse ja mit sehr hoher räumlicher Auflösung (10 m) aufbereitet werden. Eine Berechnung an den Gitterpunkten würde daher sehr hohe Rechenleistungen und großen Speicherplatz für die einzelnen Felder verursachen. Noch wichtiger ist jedoch der zweite Grund: Für die Berechnung der ETo benötigt man die meteorologischen

Elemente Temperatur, relative Luftfeuchte, Strahlungsbilanz, und Wind. Durch die Interpolation, speziell bei dieser hohen räumlichen Auflösung, entstehen natürlich immer Fehlern und Unsicherheiten, die je nach Element unterschiedlich groß sind. Besonders groß ist hierbei die Unsicherheit durch den Wind. Eine Berechnung der ETo mit diesen „unsicheren“ Werten kann daher zu größeren Fehlern führen, als wenn man die ETo mit den „exakten“ Stationswerten berechnet und anschließend interpoliert.

3.4.2.1 Berechnung der ETo an den Stationen und Bestimmung der Seehöhenabhängigkeit

Die ETo wurde an allen Stationen der ZAMG, welche die benötigten Elemente messen mit der Penman-Monteith Formel nach FAO berechnet. Dies konnte an rund 160 Stationen durchgeführt werden. Um für die Interpolation mehr Stationswerte zur Verfügung zu haben, wurde ein Regressionsansatz (Formayer et al. 2003) angewandt, der es erlaubt, die Tagessumme der ETo aus dem Sättigungsdefizit der Terminablesungen um 7, 14 und 19 Uhr zu schätzen. In **Abb. 76** ist der funktionale Zusammenhang in den einzelnen Monaten dargestellt. Dadurch standen für die Interpolation rund 260 Stationswerte der ETo zur Verfügung.

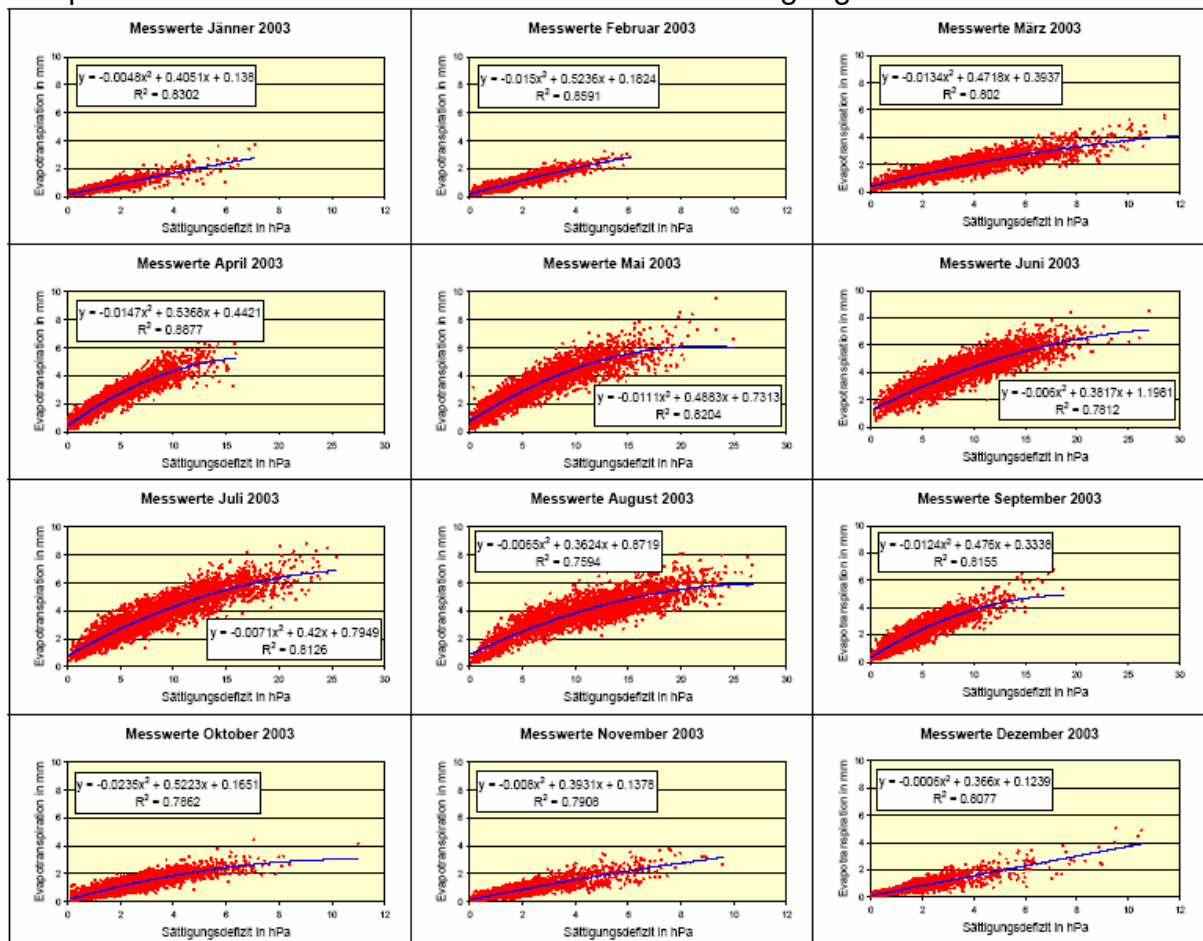


Abb. 76: Zusammenhang zwischen Tagessumme der Grasreferenzverdunstung nach FAO und dem Tagesmittel des Sättigungsdefizites berechnet aus den Terminwerten von 7, 14 und 19 Uhr in den einzelnen Monaten.

Bei der ETo kann eine deutliche Seehöhenabhängigkeit der Werte beobachtet werden. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die ETo sehr stark vom Sättigungsdefizit abhängt. Dieses wiederum nimmt bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit exponentiell mit der Temperatur zu. Durch diese Seehöhenabhängigkeit kann man Standardinterpolationsverfahren nicht direkt auf die ETo anwenden, wenn im Interpolationsgebiet Seehöhenunterschiede auftreten. Deshalb wurde anhand der Stationsdaten die mittlere Seehöhenabhängigkeit je Monat für die ETo bestimmt (siehe Abbildung 77). Der lineare Zusammenhang ist in den einzelnen Monaten unterschiedlich ausgeprägt. Besonders gering ist dieser Zusammenhang in den Wintermonaten, da auch die Temperaturabnahme mit der Seehöhe im Winter durch die Inversionsausbildung nicht über den ganzen Seehöhenbereich linear ist. Im Frühjahr hingegen kann bis zu 70 Prozent der Varianz in den Stationsdaten durch die Seehöhe erklärt werden. Während der Vegetationsperiode nimmt die ETo um durchschnittlich um 1 bis 2 Prozent je 100 m Seehöhe ab.

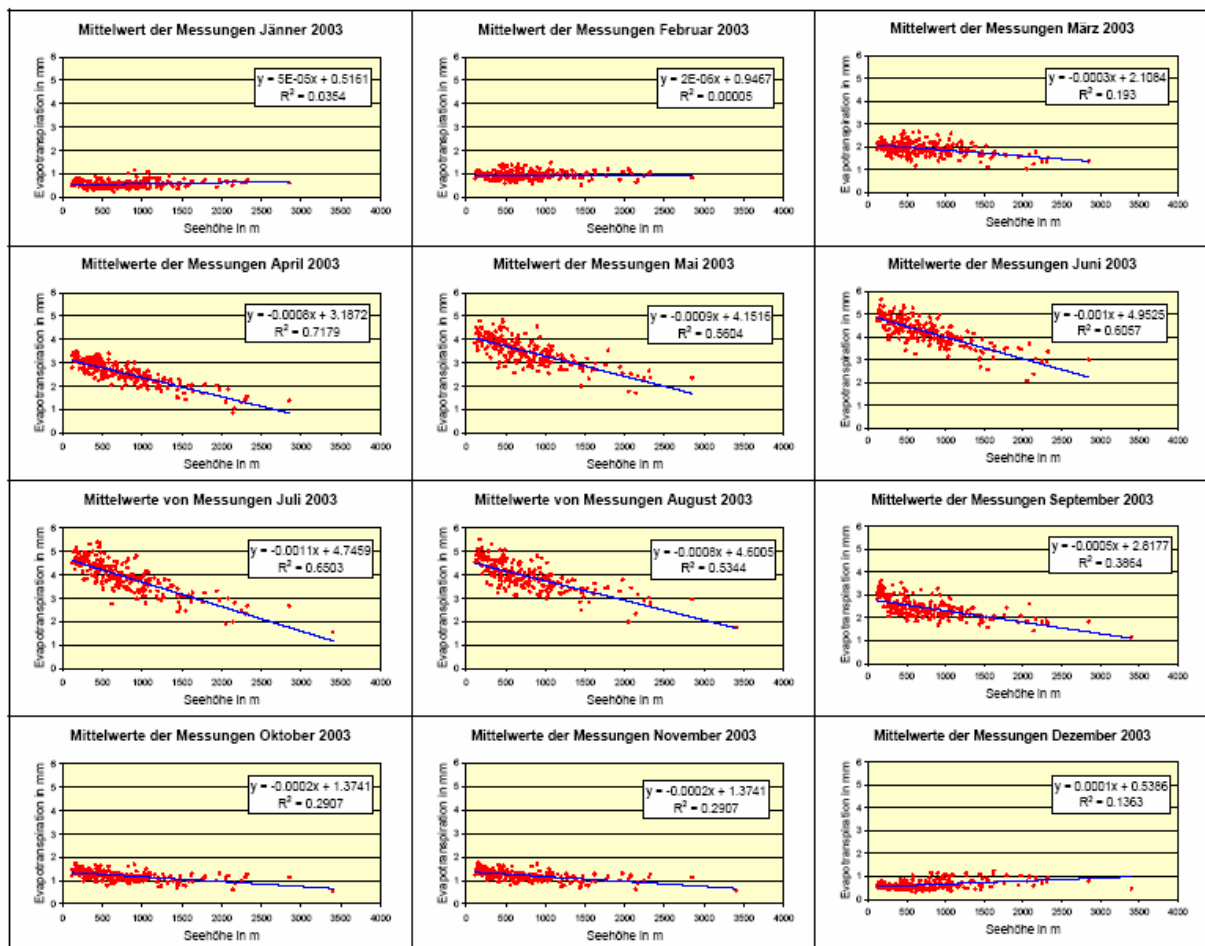


Abb. 77: Abhängigkeit der Tagessumme der potenziellen Evapotranspiration von der Seehöhe in den einzelnen Monaten.

3.4.2.2 Interpolation der ETo unter Berücksichtigung der Seehöhenabhängigkeit und der feinskaligen Einstrahlungsbedingungen

Für die Interpolation der ETo wurde als erster Schritt die Seehöhenabhängigkeit verwendet. Hierzu wurden die pro Monat berechneten Regressionsgleichungen auf das DHM angewandt. Dadurch erhält man für jeden Gitterpunkt und Monat die mittlere ETo. Anschließend wurde an den Stationen mit ETo Werten für jeden Tag die Differenz zwischen aktueller ETo aufgrund der Messungen und Monatsmittel aufgrund der Seehöhe der Station berechnet. Diese Residuen besitzen nun keine weiteren räumlichen Abhängigkeiten und können wieder mittels Kriging in die Fläche interpoliert werden. Das aktuelle ETo Feld für jeden Tag und jede Gitterzelle ergibt sich durch die Addition der Residuenfelder mit dem mittleren Seehöhenfeld.

Diese ETo – Felder besitzen jedoch nur jene skalige Information, die durch die Stationsdichte definiert wird, also etwa 20 km. Um auch feinskalige Information aus dem DHM für die Interpolation der ETo zu verwenden, wurde der Umstand genutzt, dass die Eto auch stark von der Globalstrahlung abhängt. Um dem großskaligen ETo-Feld die kleinskalige Differenzierung durch die Globalstrahlung mitzuteilen, wird das ETo- Feld mit $QP_{(d,i,j)}$, also der relativen potenziellen Globalstrahlung an jedem Gitterpunkt gewichtet. Dies führt zu einer linearen Modifikation der ETo aufgrund der potenziellen Einstrahlungsbedingungen, verursacht durch die topologischen Eigenschaften des jeweiligen Gitterpunktes. An abgeschatteten, oder nach Nord orientierten Gitterpunkten wird die ETo reduziert und an nach Süd orientierten Gitterpunkten erhöht.

3.4.3 Interpolation des Niederschlages

Der Niederschlag ist natürlich das wichtigste meteorologische Element für die Bestimmung der Wasserverfügbarkeit im Boden. Aber gerade die räumliche Niederschlagsverteilung auf Tagesbasis weist Eigenschaften aus, die eine flächige Interpolation ohne Informationsverlust nahezu unmöglich macht. Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Prozesse, die zur Niederschlagsbildung führen.

Die gleichmäßigen, mit Fronten verbundenen Niederschläge (in der Meteorologie „stratiforme Niederschläge“ genannt) werden in erster Linie durch die Alpen modifiziert. Hier bilden sich luvseitig die Stauniederschläge und leeseitig Niederschlagsminima. Aber selbst diese Differenzierung durch die Alpen kann nicht einfach mit einem DHM reproduziert werden, da diese Stau und Abschattungsprozesse sehr stark von der Anströmrichtung abhängig sind und daher jede Niederschlagsfront ein individuelles Muster entwickelt.

Noch komplexer wird es bei schauerartigen Niederschlägen und Gewittern (in der Meteorologie „konvektive Niederschläge“ genannt). Schauer- oder Gewitterzellen haben einen Durchmesser von einigen Kilometern, die ein äußerst kleinräumiges Niederschlagsmuster entwickeln. Besonders Gewitter können hohe Niederschlagsintensitäten erzeugen, wobei diese Niederschlagsintensität innerhalb der Gewitterzelle und über die Lebensdauer der Zelle (einige Stunden) auch noch stark schwankt. Da der konvektive Niederschlag in weiten Teilen Österreichs rund 30 bis 50 Prozent der Jahresniederschlagssumme produziert, darf diese kleinräumige Struktur nicht vernachlässigt werden. Besonders Wärmegewitter weisen aber auch typische Muster auf. Sie entstehen häufiger im Bergland über den Gipfeln und Kämmen und ziehen mit der Höhenströmung ins Flachland, wobei sie gerne

sogenannte Gewitterzugbahnen folgen. Diese Gewitterzugbahnen können bei ausreichender Stationsdichte bereits durch die Messungen aufgelöst werden.

Für die Niederschlagsinterpolation werden häufig Seehöhenabhängigkeiten verwendet. Nun stimmt es, dass die langjährigen durchschnittlichen Jahressummen eine deutliche Seehöhenabhängigkeit aufweisen, aber bereits bei einzelnen Monatssummen wird dieser Zusammenhang immer schwächer. Diese Seehöhenabhängigkeit kommt aber auch durch die Zunahme der Niederschlagshäufigkeit im Gebirge zustande und kann daher bei Tagesniederschlägen nicht verwendet werden. Auf Tagesbasis spielen bei stratiformen Niederschlägen Luv/Lee Effekte eine wesentlich größere Rolle und konvektive Niederschläge sind überhaupt stark stochastisch geprägt.

Für die Interpolation der Tagesniederschläge haben wir daher auf zusätzliche räumliche Abhängigkeiten verzichtet. Um dennoch eine möglichst kleinräumige Information über das Niederschlagsfeld zu bekommen, haben wir zusätzlich zu den Stationen der ZAMG auch 618 Niederschlagsstationen des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) verwendet. Dadurch hat sich die mittlere Stationsdistanz auf unter 10 km verringert (siehe Abb. 78). Leider standen uns für Vorarlberg und Tirol keine HZB Stationen zur Verfügung, wodurch die Ergebnisse in diesen beiden Bundesländern nicht so gut abgesichert sind wie im Rest von Österreich.

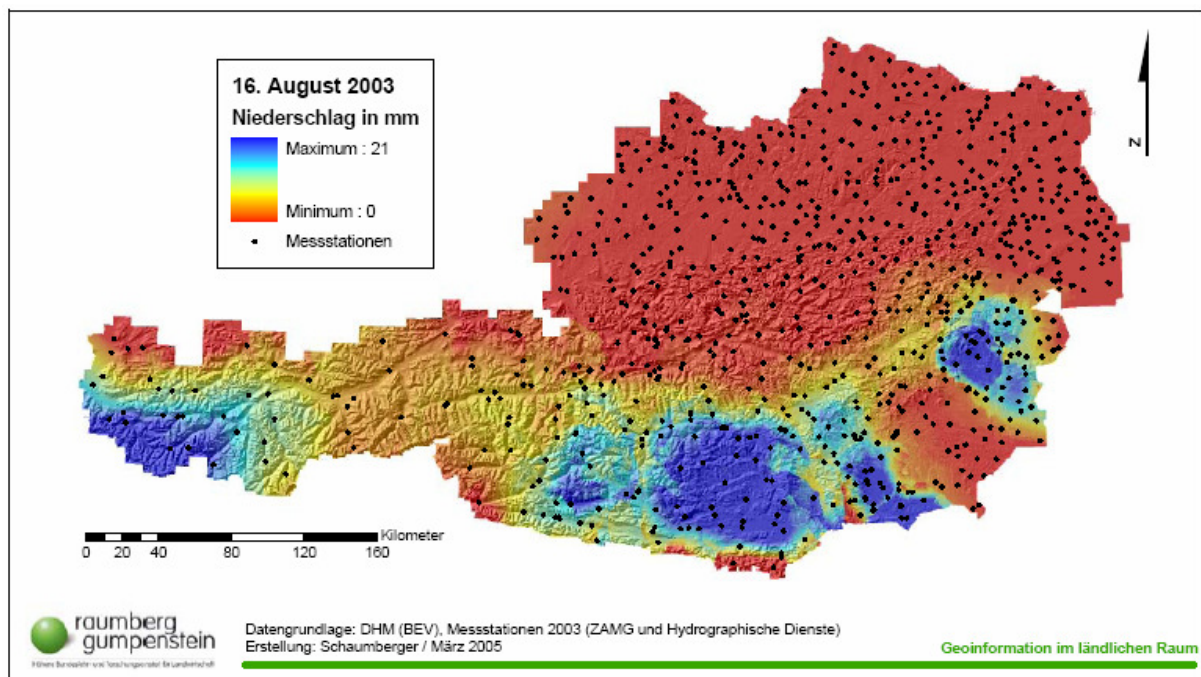


Abb. 78: Verteilung der Niederschlagsstationen der ZAMG und des Hydrographischen Zentralbüros. Leider standen uns für Vorarlberg und Tirol keine HZB Stationen zur Verfügung. Farblich ist der interpolierte Niederschlag des 16. Augusts 2003 dargestellt.

Um abzutesten, ob unsere interpolierten Niederschlagsfelder die mittleren statistischen Eigenschaften, also die Seehöhenabhängigkeit der Jahressumme reproduziert, haben wir für alle Gitterpunkte die Jahressummen gebildet und eine Höhenregression berechnet (siehe Abb.79). Die Gitterpunkte weisen eine durchaus vergleichbare Seehöhenabhängigkeit auf wie die Stationsdaten, obwohl für die

Interpolation keine Seehöhenabhängigkeit verwendet wurde. Dies zeigt, dass die verwendete Stationsdichte durchaus ausreicht, um realistische Feldverteilungen des Niederschlages zu reproduzieren.

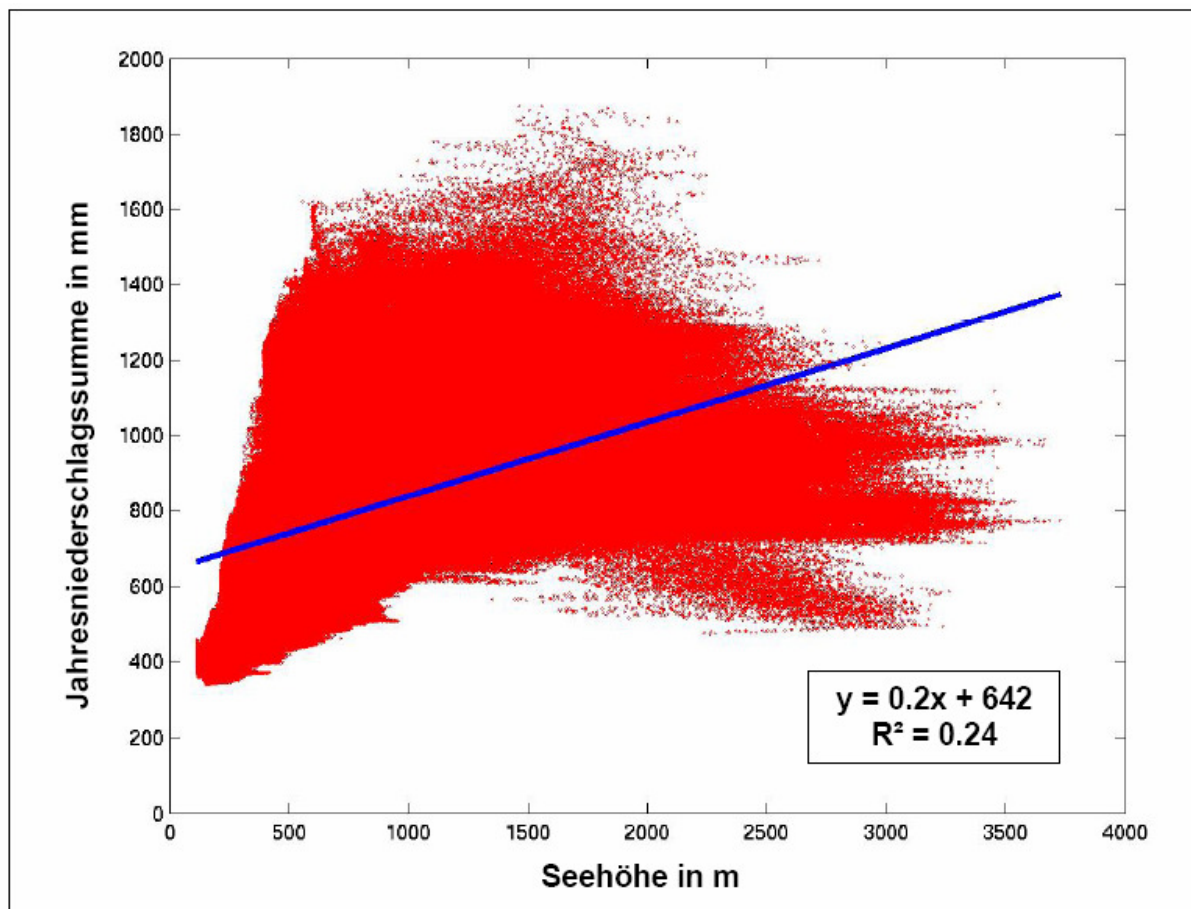


Abb.79: Höhenregression der Jahresniederschlagssumme aller Gitterpunkte. Das interpolierte Niederschlagsfeld weist eine durchaus vergleichbare Seehöhenabhängigkeit auf wie die Stationsdaten, obwohl für die Interpolation keine Seehöhenabhängigkeit verwendet wurde.

Da der Niederschlag jedoch eine derartige Wichtigkeit für das Trockenstressmonitoring besitzt, sollte für operationelle Modelle eine komplexere Niederschlagsinterpolation unter Einbeziehung von zusätzlichen Daten entwickelt werden. Hierfür kommen einerseits weitere meteorologische Kenngrößen wie Wind oder Druckverteilung in Frage, die Informationen über die Anströmrichtung beinhalten und wodurch die Lee/Luv Effekte mitberücksichtigt werden könnten. Andererseits bietet sich für die Niederschlagsinterpolation aber auch das Radarsignal der AUSTROCONTROL an. Das Radarsignal liefert alle 5 Minuten mit 1 km Auflösung einen Wert für die Niederschlagsintensität, zwar nur in sehr groben Intensitätsklassen, aber durch Korrelationen mit In-situ Niederschlagsmessungen kann daraus wichtige Information über die räumliche Verteilung des Niederschlages gewonnen werden.

Eine Einbeziehung derartig komplexer Interpolationsverfahren überstieg aber bei weitem den Rahmen dieses Projektes, und setzt auch die Nutzungsberechtigung der Radardaten voraus.

3.4.4 Interpolation der Temperaturen

Für die flächige Umsetzung des FAO-Bodenwasserbilanzmodells musste für jeden Gitterpunkt der Beginn der Vegetationsperiode und die Schnittzeitpunkte im Grünland bestimmt werden. Als Beginn der Vegetationsperiode wurde jener Termin verwendet, an dem das erste mal im Jahr an 5 aufeinander folgenden Tagen das Temperaturminimum über 2 °C liegt. Für die Bestimmung des Schnittzeitpunkte wiederum wurde die Tagesmitteltemperatur verwendet.

Sowohl die Tagesminimumtemperatur als auch das Tagesmittel weisen eine starke Seehöhenabhängigkeit auf. Diese sind in der Abb. 80 und

Abb. 81 dargestellt. Die Interpolation in die Fläche erfolgte analog wie bei der PET. Es wurde die mittlere Höhenabhängigkeit je Monat auf das DHM angewandt und anschließend für jeden Tag die Residuen an den Stationen berechnet und mittels Kriging interpoliert und anschließend die beiden Felder addiert. Da beide Temperaturwerte nur während der Vegetationsperiode benötigt werden, wurde auf eine komplexere Modellierung z.B. mit Mehrschichtmodellen verzichtet, da diese hauptsächlich für die Wintermonate mit ihren ausgeprägten Temperaturinversionen relevant sind.

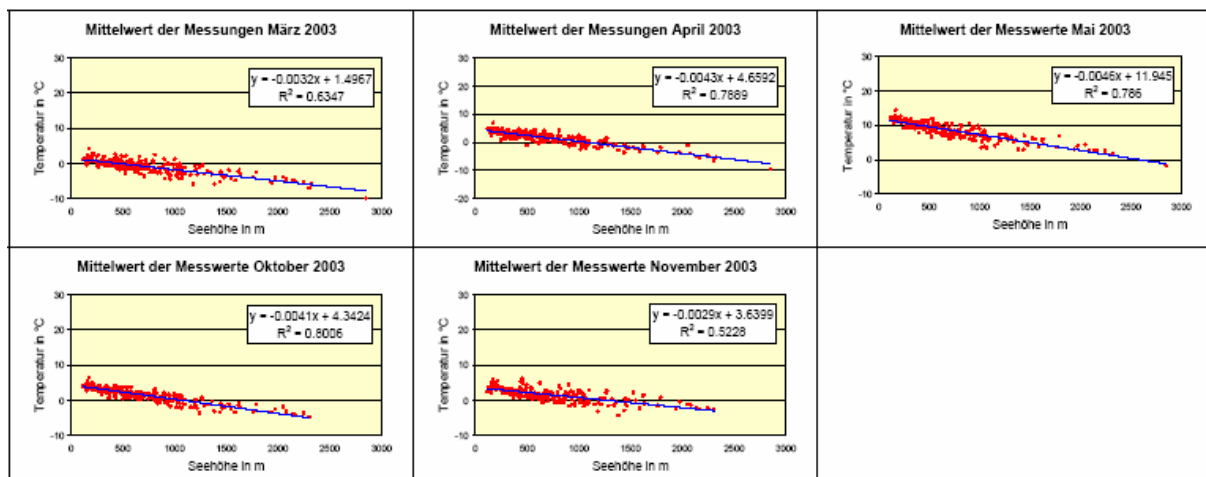


Abb. 80: Höhenregression der Tagesminimumtemperatur. Die Tagesminimumtemperatur wurde für die Definition des Vegetationsbeginnes und Endes verwendet.

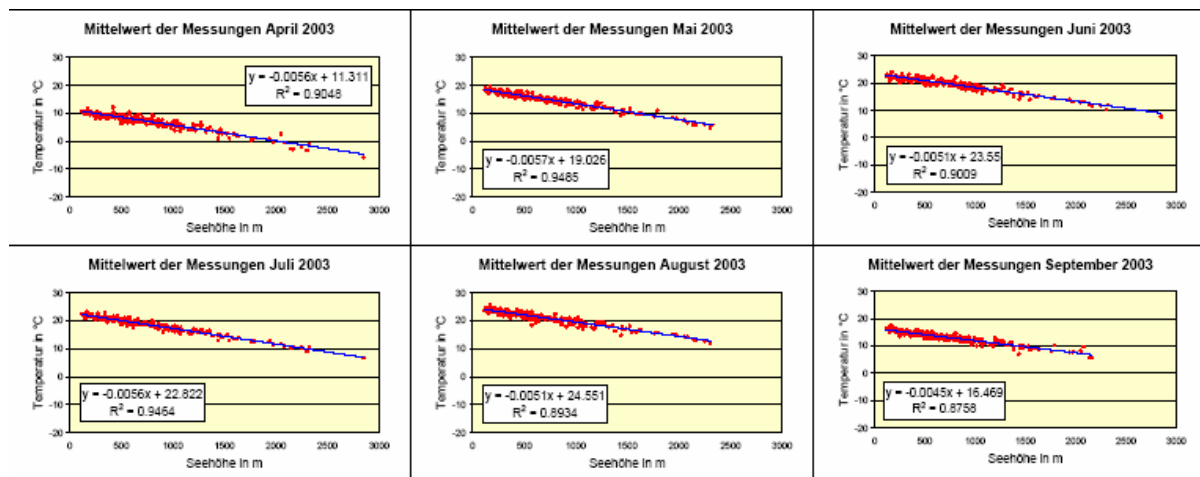


Abb. 81: Höhenregression der Tagesmitteltemperatur. Die Tagesmitteltemperatur wurde für die Definition der Schnitttermine verwendet.

3.4.5 Limitierungen der Interpolationsverfahren und Ausblick

Eine Einschränkung der Güte der meteorologischen Feldverteilungen stellt die ausschliessliche Verwendung von österreichischen Daten dar. Deshalb muss die Interpretation der Ergebnisse in Grenznähe vorsichtig und unter Berücksichtigung der Stationsverteilung erfolgen. Für ein operationelles Modell sollte versucht werden, zumindest die grenznahen Synopstationen der angrenzenden Länder mit ein zu beziehen.

Für ein operationelles Modell muss weiters eine automatisierte Qualitätskontrolle der meteorologischen Daten entwickelt werden. Für dieses Projekt wurden die Datenqualität manuell geprüft. Für die meisten meteorologischen Elemente gibt es bereits entwickelte Qualitätskontrollalgorithmen (Steinacker et. al, 1999). Problematisch ist auch hierbei wieder der Niederschlag auf Tagesbasis. Da der Niederschlag kleinräumig derart großen Schwankungen unterliegen kann, ist eine Qualitätskontrolle nur anhand der Niederschlagsdaten kaum möglich. Auch für diese Qualitätskontrolle könnte das Radarsignal als Zusatzinformation genutzt werden. Dies setzt aber noch umfangreichere Forschungsarbeiten voraus.

Die Problematik der Niederschlagsinterpolation wurde bereits weiter oben dargestellt. Eine Einbindung der österreichischen Radardaten ist durchaus sinnvoll. Es muss hierzu aber betont werden, dass das Radarsignal nicht flächendeckend für ganz Österreich zur Verfügung steht, da Abschattungseffekte auftreten. Bei der Entwicklung von Algorithmen für die Niederschlagsinterpolation und Qualitätsprüfung müssten diese Abschattungsgebiete berücksichtigt werden und für diese Alternativmethoden entwickelt werden.

3.4.6 GIS-implementation des Trockenschadensmodelles

Die Implementierung des Trockenschadensmodells für das österreichische Grünland in ein GIS erfolgte unter der oben beschriebenen Nutzung des adaptierten FAO Bosenwasserbilanzmodells und des darauf aufgesetzten empirischen Ertragsmodelles GRAM unter Nutzung der aus den Interpolationsverfahren verfügbaren bzw. räumlich verfügbarer Grid-Daten. Die räumliche verfügbare nutzbare felddkapazität auf Gridbasis wurde dankenswerterweise vom IKT Petzenkirchen (DI Murer) für das Projekt aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Programmierung in das GIS erfolgte durch Herrn Schaumberger von der BAL Gumpenstein. Das Konzept der Modellkombination ist in Abb.82 dargestellt.

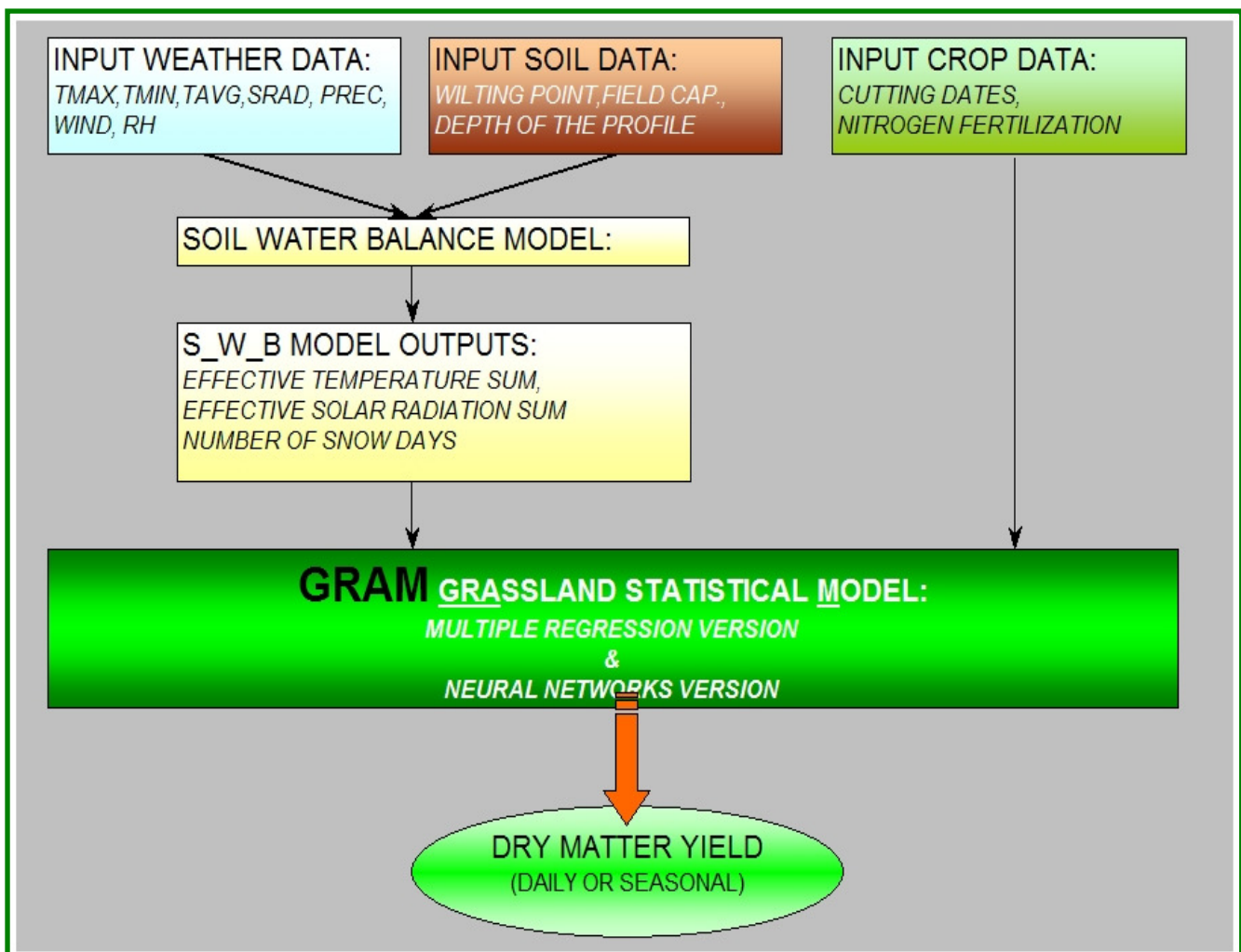


Abb. 82: Konzept des Trockenschadensmodelles für das österreichische Grünland

Ausgewählte Detailergebnisse und ausgegebene Parameter aus den GISdarstellungen (Schaumberger, BAL Gumpenstein) des Trockenschadensmodelles sind exemplarisch für ein Fallbeispiel des trockenen Jahres 2003 in den folgenden Abbildungen 83-89 dargestellt, wobei es sich hier um die erste Modellversion handelt.

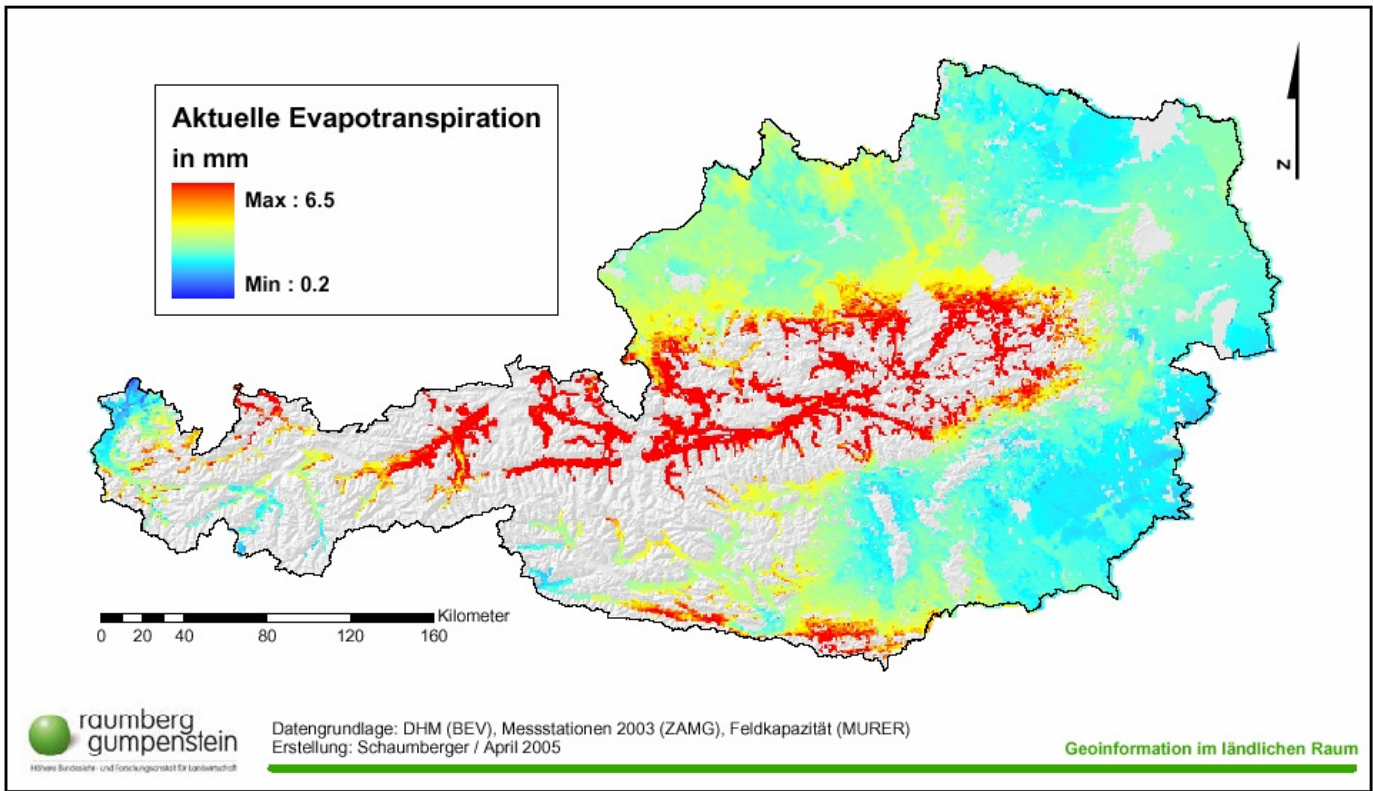


Abb. 83: Ausgegebene aktuelle Verdunstung über Grünland in Österreich am 30. April 2003.

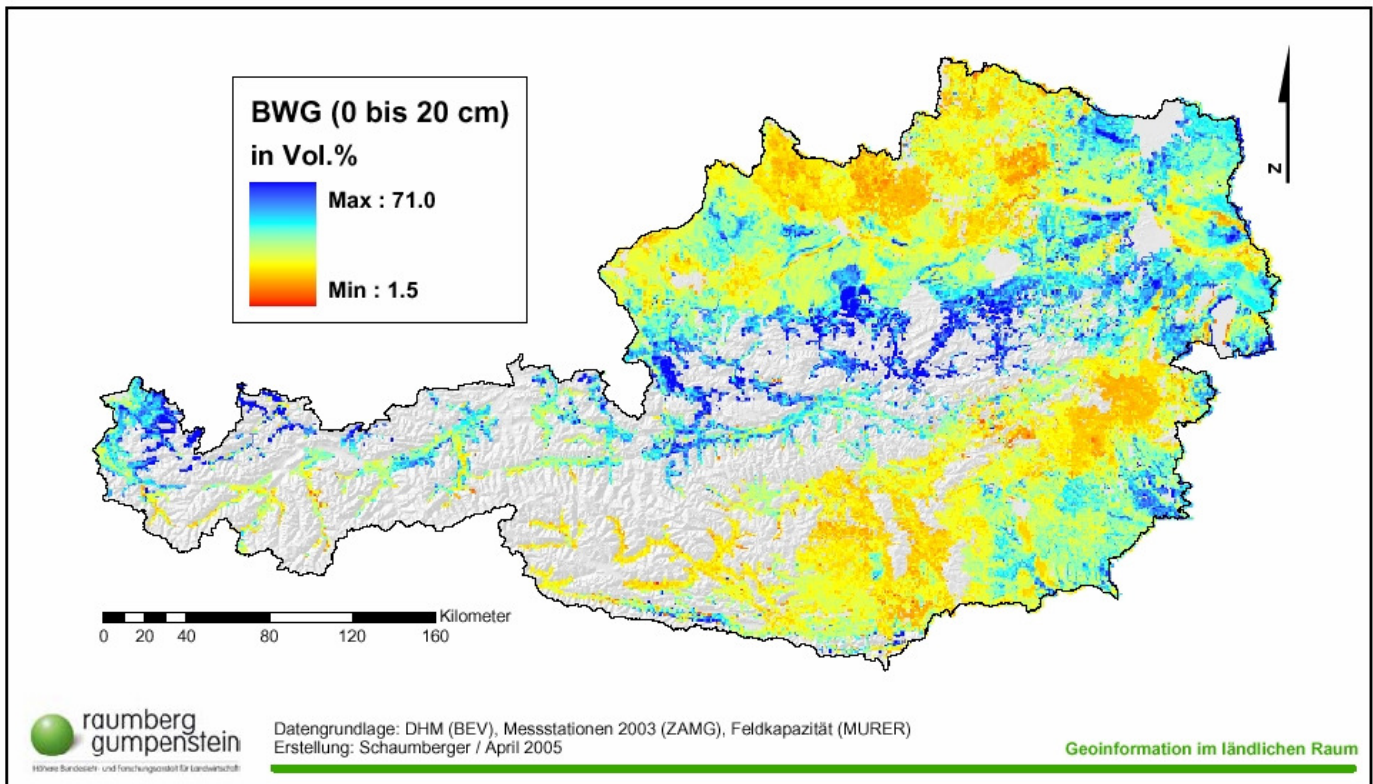


Abb. 84: Ausgegebener Bodenwassergehalt der oberen Bodenschicht im Grünland in Österreich am 30. April 2003.

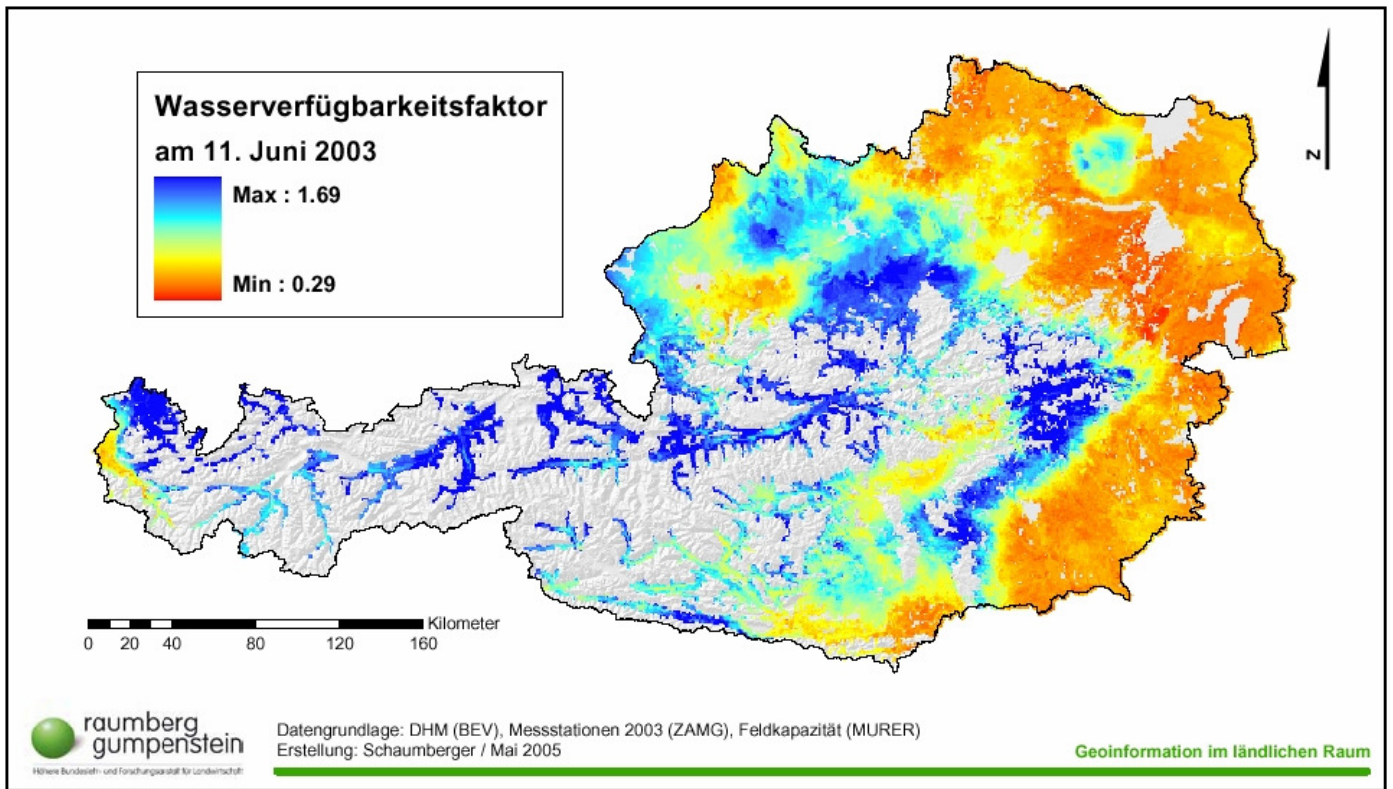


Abb. 85: Ausgegebenener relativer Wasserverfügbarkeitsfaktor aus GRAM im Grünland in Österreich am 11.Juni 2003.

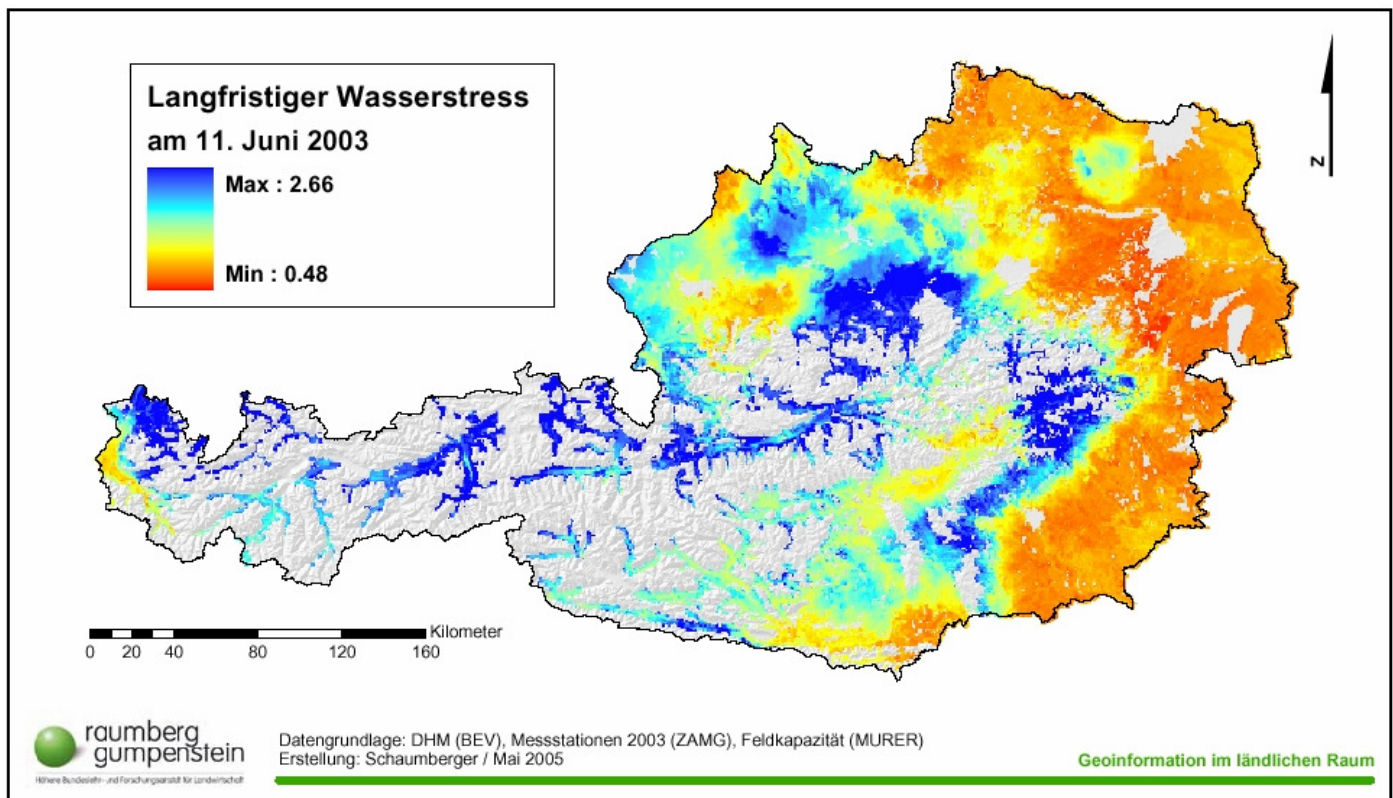


Abb. 86: Ausgegebenener relativer langfristiger Wasserstressfaktor aus GRAM im Grünland in Österreich am 11.Juni 2003.

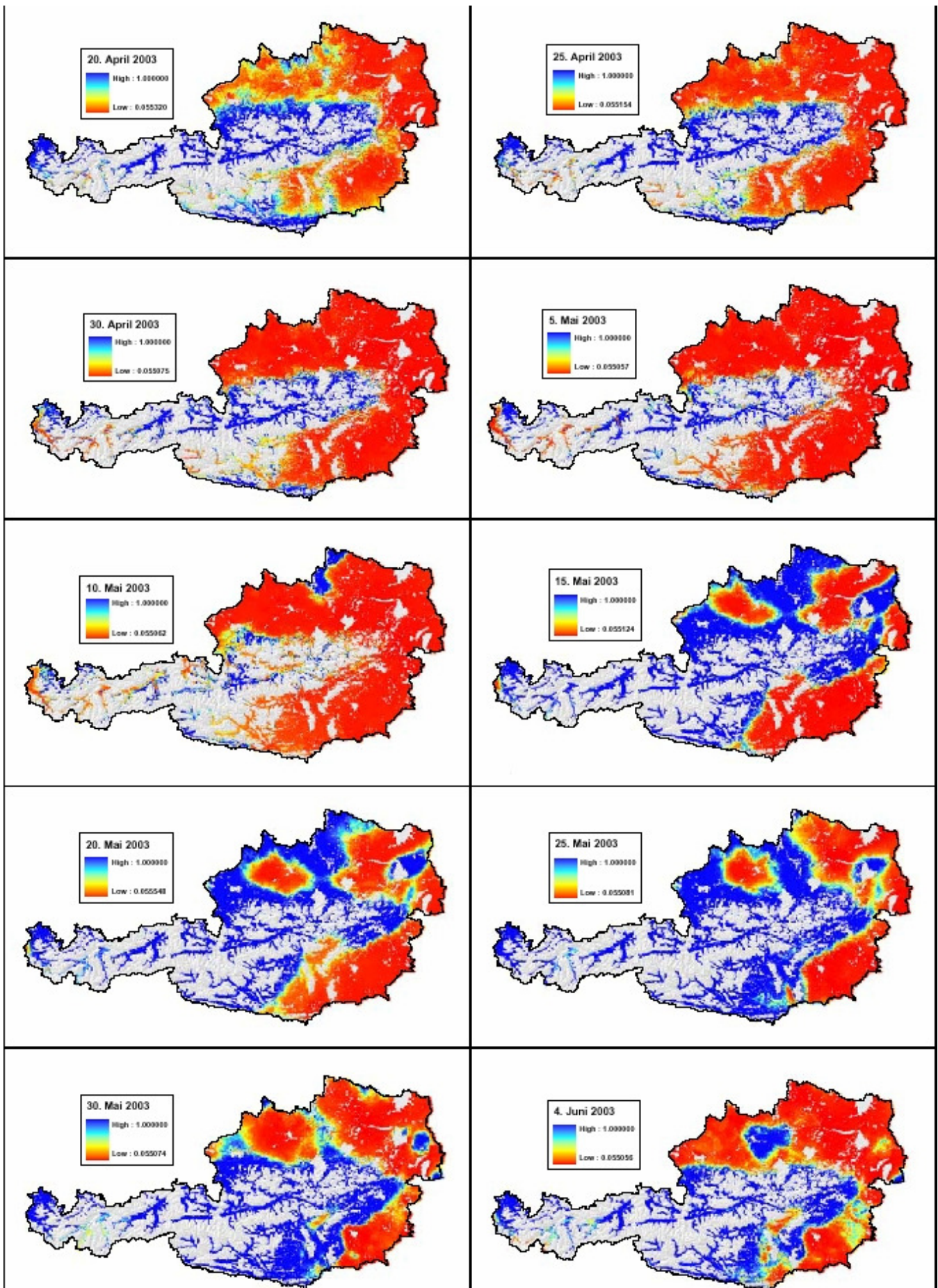


Abb. 87: Ausgegebener relativer Wuchsfaktor aus GRAM im Grünland in Österreich im Mai 2003.

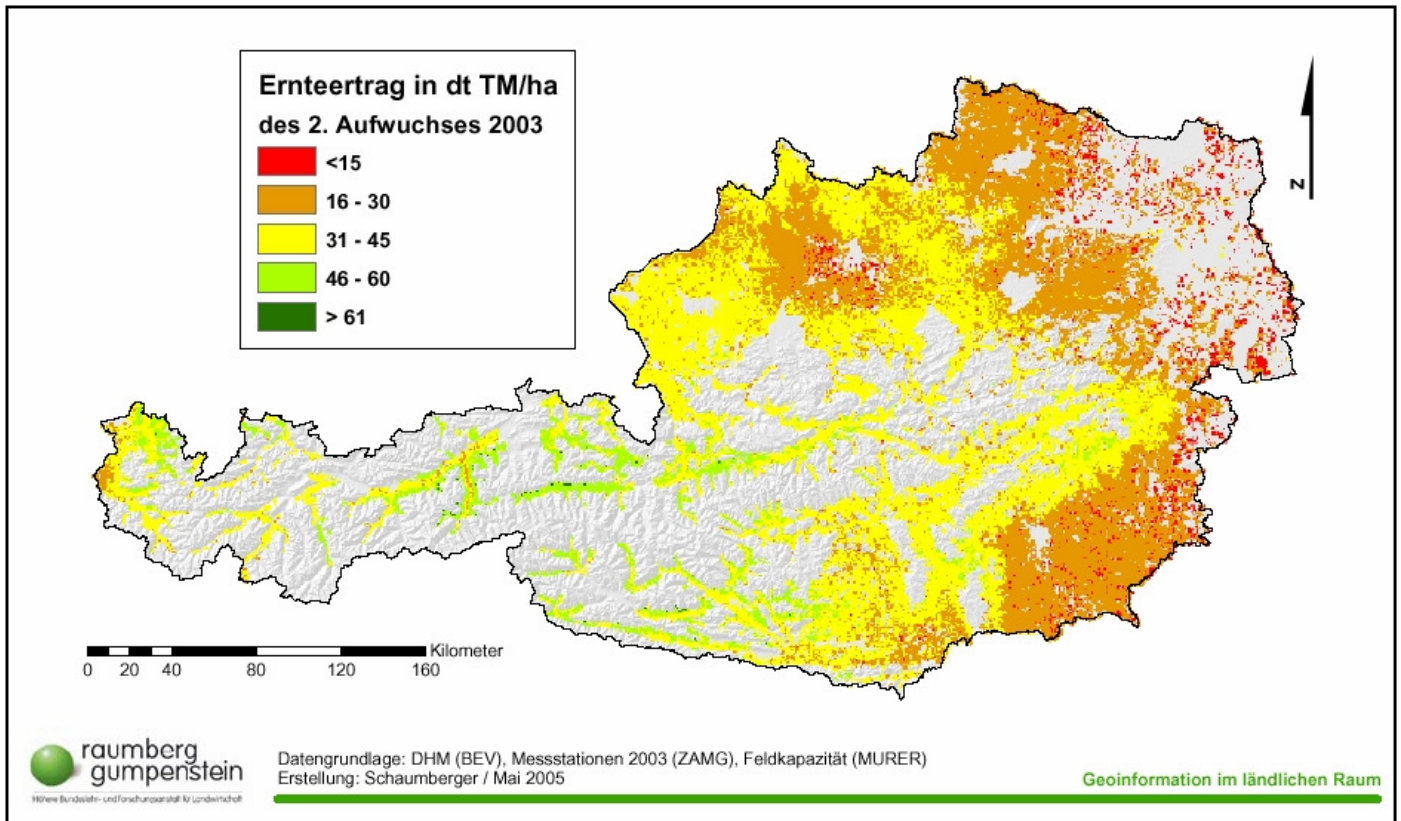


Abb. 88: Ausgegebener Grünlandtrockenmasseertrag des im Osten Österreichs stark durch Trockenheit beeinträchtigten 2. Schnittes aus GRAM in 2003.

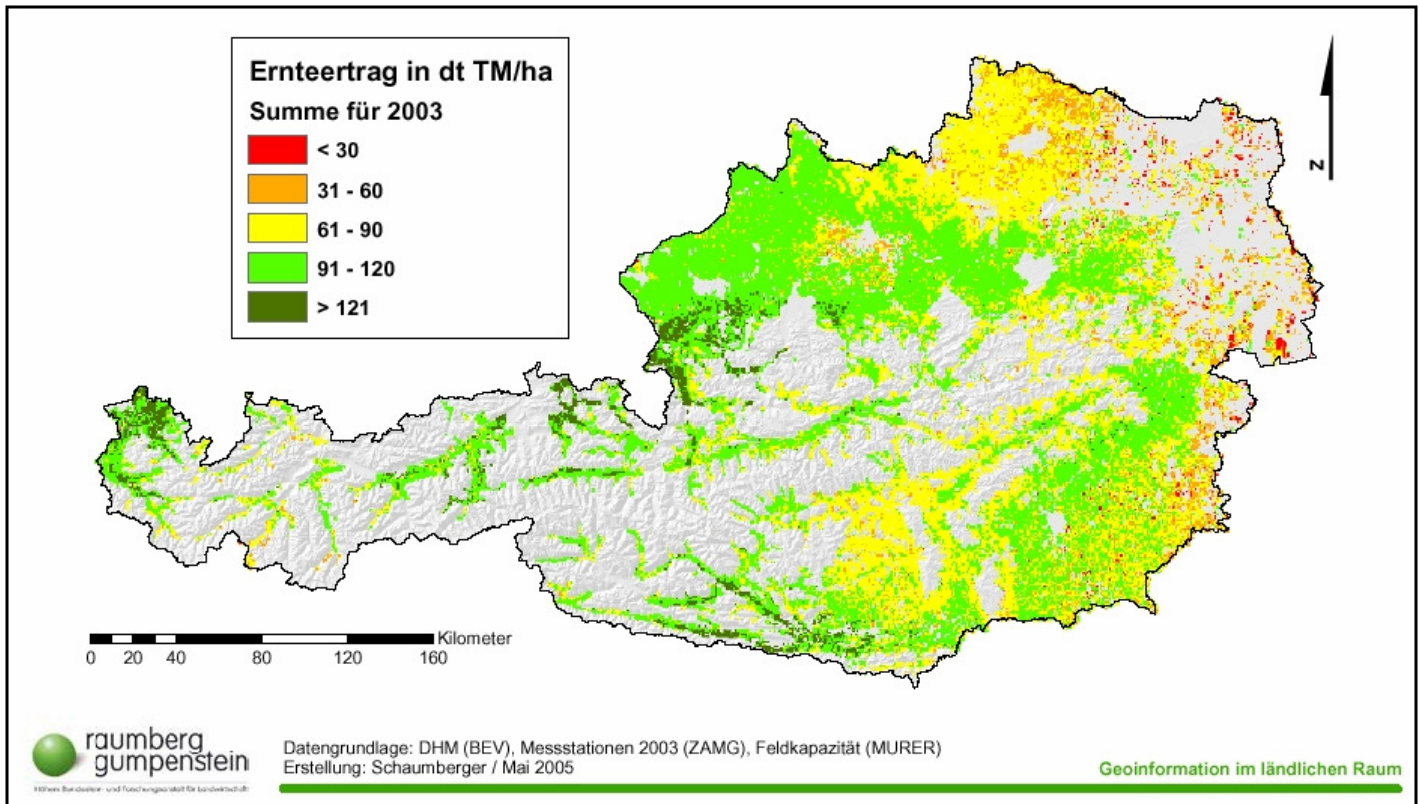


Abb. 89: Ausgegebener jährlicher Trockenmasseertrag aus GRAM im Grünland in Österreich 2003.

4. Limitationen und Ausblick zur Weiterentwicklung des Systems

- Die Ertragsbeziehung der verschiedenen Trockenheitsindizes (z.B. SPI, NPet), Kennwerte (wie Trockentage) sind nur in extrem trockenen Jahren sichtbar, aber schlecht quantifizierbar, standortabhängig.
- Die Simulation des Bodenwassergehaltes mit dem vereinfachten FAO Bodenwasserbilanzmodell verlief an den 4 Versuchsstandorten befriedigend. Durch die flächendeckend verfügbare Datenbasis für Witterungsdaten und einigen einfachen Bodendaten (Feldkapazität, Welkepunkt) u. Oberflächendaten (Hangneigung etc.) lassen sich damit Bodenwasserdefizite bzw. abgeleitete Stressparameter des Grünlandes räumlich quantifizieren.
- Die Ertragsbeziehung des Bodenwassergehaltes ist ebenfalls unbefriedigend quantifizierbar, da standortabhängig, und nur Extremjahre lassen sich derzeit einfach identifizieren.
- Das getestete empirisch-statistische Modell GRAM und das komplexe Wachstumsmodell MACROS wiesen die besten quantitativen Ertragsbestimmungen auf, sofern sie gut kalibriert sind. Da GRAM in Kombination mit dem FAO Modell wesentlich weniger Eingabedaten benötigt, wurde es für die GIS-implementation verwendet. Die Güte des Modells, getestet an 16 Versuchstandorten, erreicht in der Mehrzahl der Fälle eine Maximalabweichung von 35% des Ertrages. In jedem Fall lässt sich aus den Kennwerten ableiten ob Trockenheit die Ursache für Ertragseinbussen ist. Die Genauigkeit des Modelles könnte noch gesteigert werden, wenn die Parametrisierung und Kalibrierung noch über weitere Versuchsjahre durchgeführt werden könnte.
- Die verschiedenen Interpolationsverfahren für Witterungsparameter sollten noch weiter getestet bzw. verbessert werden. Dies betrifft vor allem die Strahlungsbilanz und den Niederschlag. Eine besondere Priorität hat die Verbesserung der räumlichen Erfassung/Repräsentanz des Niederschlages möglichst in Echtzeit, wobei hier noch grosser Forschungsbedarf besteht.
- Die für die Berechnung der Bodenwasserbilanz nötigen Bodendaten (nutzbare Feldkapazität) auf Gridbasis weisen örtlich offensichtlich grössere Abweichungen bzw. Unsicherheiten auf. Diese wichtige digitale Datenbasis sollte in Zukunft weiter verbessert werden (auch in der räumlichen Auflösung) um die räumliche Repräsentanz bzw. Genauigkeit sicherzustellen. Die Güte der Berechnung von Bodenwasserbilanzkomponenten hängt in besonderem Ausmaß davon ab. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor stellt die Parametrisierung.
- Ein grosser Unsicherheitsfaktor bei der Berechnung der Bodenwasserbilanzkomponenten stellt weiterhin auch die Parametrisierung des Oberflächenabflusses bei verschiedenen Hangneigungen im Grünland dar. Eine Limitierung diesbezüglich ist auch, dass der kapillare Aufstieg im FAO-modell derzeit vernachlässigt wird und das eine für alle Grünlandtypen gleichmässige Wurzeltiefe angenommen wurde. Hier sollten künftige Forschungsergebnisse und neue Daten zur Verbesserung des Systems genutzt werden.

- Das empirische Ertragsmodell GRAM unterscheidet derzeit nicht zwischen verschiedenen Grünlandartenzusammensetzungen. Auch hier könnten weitere Verbesserungen vorgenommen werden, sobald eine entsprechende Datenbasis vorliegt.
- Eine schrittweise Annäherung von Indizes zu mehr komplexen Methoden zur Bestimmung von Trockenschäden wird empfohlen, insbes. bei GIS implementation. Es besteht jedoch eine starke Abhängigkeit der Modellgüte von räumlich verfügbaren Daten und deren Qualität.
- Die Kombination mehrerer Methoden in einem Entscheidungshilfesystem, wird aufgrund der unterschiedlichverfügbaren räumlichen Daten (und deren Qualität) ein für eine großräumig Anwendung geeignetstes Bewertungsmodell darstellen, insbesondere wenn die Anwendungsansprüche und -potentiale zunehmen. Eine interessante Perspektive ist z.B. die Ausweitung des Systems auf andere landwirtschaftliche Kulturpflanzen in Österreich oder die Einbeziehung von Wettervorhersagen für Vorwarnungen.

5. Zusammenfassung

Der im Rahmen des Projektes durchgeführte Modellvergleich zur Bestimmung der Trockenschäden im österreichischen Grünland und die Modellvalidierung zur Ertragsbestimmung im Grünland führte zu einer Eingrenzung der verwendbaren Modelle und schliesslich zur Auswahl eines geeigneten Modelles zur GISimplementation für das österreichische Grünland. Die Ergebnisse zeigen dass die Wachstumsmodelle für eine quantitative Abschätzung von Trockenschäden im Grünland bei guter Kalibrierung verwendet werden können, allerdings ist die Datenbasis für eine ausreichende Parametrisierung und Validierung an vielen Standorten noch ungenügend. Dazu sollten die Ertragsdaten weiterer Versuchsjahre an mehrerer Standorte herangezogen werden.

Aufgrund der Ergebnisse an den Versuchsstandorten konnte eine geeignete Methodenkombination selektiert werden, die einerseits eine GISimplementation unter Nutzung der derzeit vorhandenen räumlichen Datenbasis erlaubt als auch den Ansprüchen einer Trockenschadensversicherung genügen könnte. Diese Version besteht neben einem für das GIS geeignete Aufbereitung klimatologischer Daten (wie räumliche Interpolationsverfahren der Wetterdaten) aus dem adaptierten FAO-Bodenwasserbilanzmodell und des darauf aufbauenden empirisch-statistischen Ertragsmodelles GRAM. Diese Version kann als erste einfache Stufe eines Entscheidungshilfesystems verwendet werden, das in Zukunft noch wesentliche und vielfältige Verbesserungen bzw. Anwendungspotentiale bieten kann.

Auch die Entwicklung von einfachen Trockenschadensindikatoren für Grünland durch Trockenheitsindizes zeigte gute Ergebnisse, sind allerdings nur für qualitative Aussagen zu gebrauchen. Die Unsicherheit für quantitative Vorhersagen für Ertragseinbussen ist an den in diesem Projekt getesteten Regionen /Standorten (für die Bestimmung der Versicherungsansprüche von Trockenheit) zu gross.

5. Literatur

Allen, G.A., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. 'Crop Evapotranspiration – guidelines for Computing Crop Water Requirements' FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 78-86.

Brisson, N, C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussi re, Y. M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J. P. Gaudill re, C. H nault, F. Maraux, B. Seguin and H. Sinoquet, 2003. An overview of the crop model STICS. *Europ. J. Agronomy* 18, 309-332.

Eitzinger, J., Trnka, M., Gruszczynski, G., 2004. DESSIS - A simple and cost effective Decision Support System for Irrigation Scheduling and drought management. In: Thysen, I., and Hocevar A. (Eds.), *Online Agrometeorological Applications with Decision Support on the Farm Level*, (COST Action 718: Meteorological Applications for Agriculture). Dina Research Report, 109, 89-98; DINA Publication, P.O. Box 50, DK-8830 Tjele, Tjele, DK.

Formayer H, S. Eckhardt, P. Haas, M. Lexer, 2003. Frequency of dry spells, defined by thresholds of accumulated potential evapotranspiration sums (PETs), in Austria. Poster Presentation at the ICAM/MAP Meeting 2003.

Fu, P. and P.M. Rich. 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*, San Diego, USA, <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>.

Fu, P. and P.M. Rich. 2000. A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*, Lake Buena Vista, 10–12 January 2000.

Han, D., P. O'Kiely and Da-Wen Sun, 2003. Application of Water-stress Models to estimate the Herbage Dry Matter Yield of a Permanent Grassland Pasture Sward Regrowth. *Biosystems Engineering* 84 (1), 101-111.

Kroes, J.G., J.C. van Dam, J. Huygen, and R.W. Vervoort, 1999. User's Guide of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Technical Document 48, Alterra Green World Research, Wageningen, Report 81, Department of Water Resources, Wageningen University, 127 p.

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA, pp. 179-184.

Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. Ten Berge and A. Bakema, 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops.- Pudoc Wageningen.

Steinacker, R., C. H., P ttschacher, and W. P ttschacher, 1999. A Transparent Method for the Analysis and Quality Evaluation of Irregularly Distributed and. *Monthly Weather Review* **128**(7): 2303–2316.

Stenitzer, E., 1987. SIMWASER - Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. - Mitt. Nr. 31 d. Bundesanstalt f r Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen.

Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke, 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.