

Stickstoffaufnahme und Biomasseertrag von Zwischenfrüchten und deren Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Folgekultur und Nitratgehalt in der Bodenlösung unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus im pannonischen Klimagebiet

Endbericht

Dezember 2005

Projekt-Nr.: 1246

Wissenschaftlicher Projektleiter: Univ.-Prof. Dr. Bernhard Freyer¹

Projektkoordination und Wissenschaftliche Bearbeitung: Mag. Thomas Rinnofner¹

Projekt-Mitarbeiter: a.o.Univ.-Prof. Dr. Jürgen K. Friedel¹, Mag. Renate Farthofer¹, Mag. Gabriele Pietsch¹, Christoph Gabler¹, Erich Lang¹, Dr. Helmut Wagentristl³

Kooperationspartner

a. o. Univ. Prof. Dr. Willibald Loiskandl², DI Alexandra Strauss-Sieberth²

¹Institut für Ökologischen Landbau (IfÖL)
Department für Nachhaltige Agrarsysteme
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)
Gregor Mendel Strasse 33, A-1180 Wien
+43-1-47654-3751 (fax – 3792)

²Institut für Landeskulturelle Wasserwirtschaft und Hydraulik (IHLW)
Department für Wasser – Atmosphäre - Umwelt
Universität für Bodenkultur (BOKU)
Muthgasse 18, A-1190 Wien
+43-1-36006-5450 (fax – 5499)

³Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur
Schlosshoferstrasse 31
2301 Groß-Enzersdorf
+43-2249-2302-0

Projektlaufzeit: 1. Oktober 2002 bis 30. September 2005

Stickstoffaufnahme und Biomassertrag von Zwischenfrüchten und deren Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Folgekultur und Nitratgehalte in der Bodenlösung unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus im pannonischen Klimagebiet

Zusammenfassung

Zu den wesentlichen Aufgaben von Zwischenfrüchten im ökologischen Landbau gehört die Aufnahme des nach der Hauptfrucht im Boden verbliebenen mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) und die damit verbundene Verringerung des Nitratauswaschungsrisikos. Bei anschließender Einarbeitung der Zwischenfrüchte bleibt dieser Stickstoff für die Folgekultur erhalten. Legume Zwischenfrüchte können zusätzlich Stickstoff aus der Luft fixieren (Biological Nitrogen Fixation, BNF) und in die Fruchtfolge einbringen. Ziel dieses Projekts war eine Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Zwischenfruchtgemenge auf den Stickstoffhaushalt sowie auf Erträge und Qualitäten der nachfolgenden Hauptfrüchte.

In einer vollständig randomisierten Blockanlage wurden drei Zwischenfruchtgemenge verschiedener Zusammensetzung (var1: Gemenge aus Leguminosen + Nicht-Leguminosen, var2: Leguminosen-Gemenge und var3: Nicht-Leguminosen-Gemenge) auf ihre Effizienz hinsichtlich dieser Leistungen im Vergleich zu einer Variante ohne Zwischenfruchtanbau (var4: Schwarzbrache) untersucht. Die Versuchsanlage befand sich auf den ökologisch bewirtschafteten Teilflächen der Versuchswirtschaft in Großenzersdorf (Tschernosem aus Löss, lehmiger Schluff, 550 mm NS, 9,8°C). Die Zwischenfruchtvarianten waren in folgenden Fruchtfolgeausschnitt eingebunden: Winterweizen + ZF (2002) - Kartoffel (2003) – Winterroggen + ZF (2004) – Sommergerste (2005).

Der Zwischenfruchtanbau im Jahr 2002 erbrachte gute Erträge. Sie lagen zwischen 35 und 60 dt TM ha⁻¹ gesampflanzlicher Biomasse und waren in var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) signifikant höher als in var 2 (leg). Der gesampflanzliche N-Ertrag lag bei 141 kg N ha⁻¹ in var1 (leg + n-leg) und um 90 kg N ha⁻¹ für var2 (leg) und var3 (n-leg). Die reine Leguminosenvariante fixierte 34 kg N ha⁻¹, die gemischte Variante sogar 48 kg N ha⁻¹. Var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) reduzierten den N_{\min} -Gehalt im Herbst auf einen vernachlässigbar geringen Wert. Auch var2 (leg) konnte den N_{\min} -Gehalt im Boden im Herbst 2002 bis zum Umbruch der Zwischenfrüchte signifikant auf 50 kg N ha⁻¹ gegenüber 80 kg N ha⁻¹ in var4 (sbr) reduzieren. Die Nitrat-Gehalte in der Bodenlösung in 140 cm Tiefe im folgenden Frühjahr blieben nur in var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) unter dem Grenzwert für Nitrat im Grundwasser von 45 mg NO₃ L⁻¹ (= 10 mg NO₃-N L⁻¹). Die Zwischenfrüchte im Herbst 2004 waren aufgrund der Trockenheit sehr schlecht entwickelt und hatten keine signifikanten Auswirkungen auf den N-Haushalt. Sickerung trat nur im Winterhalbjahr bis Mitte Mai auf. Die jährlichen Sickerungen betragen etwa 25 bis 70 mm. Der Austrag des

Stickstoffs unter die Untersuchungstiefe von 140 cm war aufgrund der niedrigen Sickerwassermengen gering. Die durchschnittliche jährliche Menge des verlagerten Stickstoffs erreichte für die var4 (sbr) mit 14 kg N ha^{-1} den höchsten Wert. Die N-Fracht in var1 (leg + n+leg) und var3 (n-leg) war mit 6 kg N ha^{-1} sehr gering, die der var2 (leg) lag mit 9 kg N ha^{-1} dazwischen.

Eine Ertragsdifferenzierung in den Folgefrüchten konnte weder in den Kartoffeln des Jahres 2003 noch in der Sommergerste 2005 festgestellt werden. Da die Kartoffeln die bessere N-Versorgung durch die Zwischenfrüchte aufgrund von Trockenheit und starkem Kartoffelkäferbefall nicht nutzen konnten, verlagerte sich der Effekt bis zu einem gewissen Ausmaß auf den als zweite Nachfrucht folgenden Winterroggen 2004. Dieser erbrachte in var1 (leg + n-leg) und var2 (leg) tendenziell höhere Erträge. Die Entwicklung der Zwischenfrüchte im Herbst 2004, vor der Sommergerste, war so gering, dass keine Auswirkung auf deren Ertrag erwartet werden konnte.

Aufgrund der ÖPUL-Förderung kann der Zwischenfruchtanbau derzeit ohne finanzielle Einbussen durchgeführt werden. Dies gilt für var1 (leg + n-leg) und var 3 (n-leg) auch ohne direkten Nutzen durch Mehrerträge in der Folgefrucht. Die var2 (leg) müsste Mehrerträge lukrieren, um ohne Verluste durchgeführt zu werden. Sie ist aber aus Sicht des Nitrathaushaltes und des Gewässerschutzes nicht empfehlenswert, da sie das Risiko der Nitratauswaschung nicht in ausreichendem Maß reduziert. Dadurch besteht gleichzeitig die Gefahr, dass der durch die BNF gewonnene Stickstoff umgehend wieder verloren geht.

Schlüsselwörter

Zwischenfrüchte, Stickstoffauswaschung, Leguminosen, Wasserhaushalt, Fruchtfolge

Nitrogen Uptake and Biomass Yield of Catch Crops and Effects on Yield and Quality of Subsequent Crops and Nitrate Contents in Soil Solution under Conditions of Organic Farming in the Pannonian Region

Summary

Among the main aims of catch crops (Cc) in organic farming is the uptake of inorganic soil nitrogen (N_{in}) remaining after the main crop, and the related reduction of the risk of nitrate leaching. After incorporation of these Cc into the soil, this N is saved for the following crop. Legume Cc can fix additional N from the air (Biological Nitrogen Fixation, BNF) and import it into the crop rotation. The aim of this project was to quantify the effects of different Cc mixtures on the N cycle and on yield and quality of subsequent main crops.

Three Cc mixtures of different composition (var1: mixture of legumes and non-legumes; var2: legume-mixture; var3: non-legume-mixture) were tested for their performance compared to a bare fallow variant (var4) in a completely randomised block design. The trial was located on organically managed fields of the experimental station of the University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna at Gross-Enzersdorf (Calcaric Phaeozems from Loess, silty loam, 550 mm precip., 9,8°C). The Cc variants were included in a crop rotation cutout of winter wheat + Cc (2002) – potatoes (2003) – winter rye + Cc (2004) – summer barley (2005).

Cc had a good total biomass yield of 35 – 60 dt DM ha⁻¹ in 2002. It was greater in var 1 (leg – n-leg) and var3 (n-leg) than in var2 (leg). The total plant N yield amounted to 141 kg N ha⁻¹ in var1 (leg + n-leg) and to 90 kg N ha⁻¹ in var2 (leg) and var3 (n-leg). The legume variant fixed 34 kg N ha⁻¹, the mixed variant var1 48 kg N ha⁻¹. Both var1 (leg + n-leg) and var3 (n-leg) reduced N_{in} contents in autumn to negligible low values. Var2 (leg) also reduced N_{in} contents in autumn 2002 until ploughing down the Cc to 50 kg N ha⁻¹ compared to 80 kg N ha⁻¹ in var4 (fallow). In the following spring, nitrate contents in soil solution in 140 cm depth remained below the limit for nitrate in ground water of 45 mg NO₃ L⁻¹ (= 10 mg NO₃-N L⁻¹) only in var1 (leg + n-leg) and var3 (n-leg). Cc were developed poorly in autumn 2004 due to drought, and had no significant effect on the N cycle. Leaching only occurred during the winter until mid of May. Annual leaching rates amounted to approx. 25 – 70 mm. N leaching below the assessed depth of 140 cm was low due to low amounts of leaching water. The mean annual N leaching rate yielded the greatest value in var4 (fallow) with 14 kg N ha⁻¹. In var1 (leg + n-leg) and var3 (n-leg), N leaching was very low with rates of 6 kg N ha⁻¹. Var2 (leg) was in between with 9 kg N ha⁻¹. A differentiation in the yield of the following main crops was found neither for potatoes in 2003 nor for summer barley in 2005. Because potatoes could not make use of the improved N availability from the catch crops due to drought and a severe

infestation with Colorado Beetle, the effect was prolonged to a certain extent until the second following crop winter rye in 2004. It tended to achieve greater yields in var1 (leg + n-leg) and var2 (leg). The development of the Cc in autumn 2004, before summer barley, was too poor to expect any yield effects.

Catch crops can be cultivated without financial losses at present due to the ÖPUL subsidies. This relates to var1 (leg + n-leg) and var3 (n-leg) even without a direct benefit from increments in subsequent crop. Var2 (leg) would have to achieve increments in order to be realised without losing.

But this variant is not recommendable regarding the N cycle because it reduces the risk of nitrate leaching insufficiently. This implements the risk of losing N that was gained by BNF immediately.

Keywords

Catch crop, nitrate leaching, legumes, water balance, N benefit, crop rotation

Inhaltsverzeichnis

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
1.1	PROBLEMSTELLUNG	3
1.2	HYPOTHESEN	4
1.3	PROJEKTZIELE	5
2	<u>MATERIAL UND METHODEN</u>	6
2.1	STANDORT UND FRUCHTFOLGE	6
2.2	WITTERUNG WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT	6
2.3	PROBENAHEME UND ANALYSEMETHODEN	8
2.3.1	N-ERTRAG UND TROCKENMASSEPRODUKTION	8
2.3.2	MINERALISCHER STICKSTOFF IM BODEN	8
2.3.3	STICKSTOFFNACHLIEFERUNG	8
2.3.4	MIKROBIELLER KOHLENSTOFF, MIKROBIELLER STICKSTOFF UND K_2SO_4 -EXTRAHIERBARER STICKSTOFF IM BODEN	9
2.3.5	ORGANISCHER KOHLENSTOFF UND GESAMTSTICKSTOFF IM BODEN	9
2.3.6	NITRATKONZENTRATION IN DER BODENLÖSUNG	9
2.3.7	MESSUNG BODENPHYSIKALISCHER EIGENSCHAFTEN	10
2.3.8	MESSUNG VON BODENWASSERPARAMETERN	10
2.4	BERECHNUNGS- UND SCHÄTZUNGSMETHODEN	10
2.4.1	ABSCHÄTZUNG DER STICKSTOFF-FIXIERLEISTUNG NACH DER DIFFERENZMETHODE	10
2.4.2	BERECHNUNG DER VERSICKERUNG ANHAND EINER KLIMATISCHEN WASSERBILANZ	11
2.4.3	SIMULATION DER WASSERBEWEGUNG	11
2.4.4	ERRECHNUNG DER NITRATVERSICKERUNG	12
2.4.5	WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG	12
3	<u>ERGEBNISSE</u>	13
3.1	BIOMASSEERTRAG, STICKSTOFFERTRAG UND STICKSTOFF-FIXIERUNG DER ZWISCHENFRÜCHTE	13
3.2	MINERALISCHER STICKSTOFF IM BODEN	15
3.3	STICKSTOFFNACHLIEFERUNG UND LABILER STICKSTOFF IM BODEN	17
3.4	MIKROBIELLER KOHLENSTOFF UND STICKSTOFF IM BODEN	18
3.5	ORGANISCHER KOHLENSTOFF UND GESAMTSTICKSTOFF IM BODEN	19
3.6	BODENWASSERHAUSHALT, NITRAT IN DER BODENLÖSUNG UND NITRATVERLAGERUNG	20
3.6.1	NITRATGEHALTE IN DER BODENLÖSUNG	20
3.6.2	KLIMATISCHE WASSERBILANZ	23
3.6.3	BERECHNUNG DER STICKSTOFFFRACHTEN	26
3.7	ERTRAG UND QUALITÄT DER KARTOFFELN 2003	27

3.8	ERTRAG UND ROHPROTEINGEHALTE DES WINTERROGGENS 2003/04	27
3.9	ERTRAG UND ROHPROTEINGEHALTE DER SOMMERGERSTE 2005	28
3.10	WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ZWISCHENFRÜCHTE	28
4	<u>DISKUSSION</u>	<u>30</u>
4.1	BIOMASSEERTRAG, STICKSTOFFERTRAG UND STICKSTOFF-FIXIERUNG DER ZWISCHENFRÜCHTE	30
4.2	STICKSTOFF- UND BODENWASSERHAUSHALT	32
4.3	VORFRUCHTWIRKUNGEN DER ZWISCHENFRÜCHTE	35
4.4	WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ZWISCHENFRÜCHTE	36
5	<u>SCHLUSSFOLGERUNGEN</u>	<u>38</u>
6	<u>AUSBLICK</u>	<u>39</u>
7	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>41</u>
8	<u>ANHÄNGE</u>	<u>43</u>
8.1	ANHANG 1 - BODENPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN	43
8.1.1	LABORUNTERSUCHUNGEN	43
8.2	ANHANG 2 – DATENERFASSUNG - BODENWASSERHAUSHALT	50
8.2.1	ALLGEMEIN	50
8.2.2	KURZBESCHREIBUNG DER SENSOREN	52
8.2.3	DATENINTERPRETATION	53
8.3	ANHANG 3 - SIMULATION	71
8.3.1	EINLEITUNG	71
8.3.2	ANWENDERMODELLERSTELLUNG	72
8.3.3	EINGANGSDATEN	73
8.3.4	FESTLEGUNG DES SIMULATIONSZEITRAUMES	76
8.3.5	MODELLKALIBRIERUNG UND VERIFIZIERUNG	77
8.3.6	ERGEBNISSE	78
8.4	ANHANG 4 – DIVERSE TABELLEN UND ABBILDUNGEN	84

Stickstoffaufnahme und Biomassertrag von Zwischenfrüchten und deren Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Folgekultur und Nitratgehalte in der Bodenlösung unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus im pannonischen Klimagebiet

Nitrogen Uptake and Biomass Yield of Catch Crops and Effects on Yield and Quality of Subsequent Crops and Nitrate Contents in Soil Solution under Conditions of Organic Farming in the Pannonian Region

T. Rinnofner¹, R. Farthofer¹, J.K. Friedel¹, G. Pietsch¹, A. Strauss-Sieberth², W. Loiskandl², B. Freyer¹

¹Institut für Ökologischen Landbau, Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien

²Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Department für Wasser–Atmosphäre–Umwelt, Universität für Bodenkultur

1 Einleitung

Im allgemeinen und besonders im Ökologischen Landbau ist der Zwischenfruchtanbau ein wichtiger Bestandteil der meisten Fruchtfolgen. Viele seiner Funktionen und Vorteile (vergl.: Hampl 1996; Renius et al. 1992; Kolbe et al. 2004) gelten mittlerweile als unbestritten:

- Aufnahme von Reststickstoff der Vorfrucht und Transfer zur Folgefrucht
- Anreicherung von Nährhumus
- Vermeidung von Bodenverschlammung und Erosion
- Förderung der Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität
- Versorgung der Bodenorganismen mit Kohlenstoff und Stickstoff
- Unterdrückung von Beikräutern, Schaderregern
- Abbau von phytopathogenen Stoffen im Boden

Anfang des 19. Jhdt. wurde der Zwischenfruchtanbau im Zuge der Verwendung von Leguminosen zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit etabliert. Es wurde vor allem die Luftstickstofffixierung der Leguminosen als Ursache wahrgenommen. Mit der industriellen Produktion von Stickstoffkünstdünger verlor der Zwischenfruchtanbau damit an Bedeutung. In der Folge traten die Futterproduktion aber auch die Humusproduktion und Verbesserung der Bodenstruktur durch den Zwischenfruchtanbau in Vordergrund. Damit gewannen Kreuziferen wie Senf oder Ölrettich mit ihrer, auch unter kühlen herbstlichen Bedingungen, noch beträchtlichen Produktion an pflanzlicher Biomasse an Bedeutung.

Mit den zunehmenden Anforderungen bezüglich Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit der Landwirtschaft ist die Nitratbelastung des Grundwassers zu einem wichtigen Thema geworden und hat damit dem Zwischenfruchtanbau zusätzliche Relevanz verliehen. Indem Zwischenfrüchte den nach der Ernte der Hauptfrucht im Boden verbleibenden mineralischen Stickstoff aufnehmen und ihn in nicht auswaschbarer Form im Pflanzenkörper zwischenspeichern, können sie wesentlich zur Verminderung der Nitratbelastung des Grundwassers (Hösch und Dersch, 2003) und gleichzeitig zur Versorgung der Nachfrucht beitragen.

Leguminosen spielen dabei eine zwiespältige Rolle. Sie bilden im Ökologischen Landbau eine wichtige Rolle als Stickstoffquelle. Durch die Symbiose mit Rhizobien können sie Luftstickstoff fixieren (Biologische Stickstofffixierung – BNF) und damit zur Pflanzenernährung beitragen. Genau diese Fähigkeit macht ihren Einsatz als Zwischenfrüchte zugleich wünschenswert, aber auch fragwürdig. Durch ihre BNF sind Leguminosen weniger auf den bodenbürtigen Stickstoff angewiesen, entziehen dem Boden in der Regel daher auch weniger Stickstoff und tragen weniger zur Verminderung des Auswaschungspotentials bei.

Eine Einschränkung des Anbaus von Zwischenfrüchten wird oft in einer zu knappen Wasserversorgung gesehen. Trockene Verhältnisse bei der Aussaat können zu Problemen beim Feldaufgang und Entwicklung der Pflanzen führen, sodass die Biomassebildung der

Zwischenfrüchte und damit viele ihre positiven Wirkungen stark reduziert werden, oder, unter sehr widrigen Bedingungen, ganz ausfallen. Damit wird der Aufwand und die Kosten für den Anbau in Frage gestellt. Daneben kann es durch die Wasserkonkurrenz bei den nachfolgenden Hauptfrüchten zu Ertragseinbußen kommen. Demgegenüber stehen positive Auswirkungen von Zwischenfrüchten auf die Bodenstruktur und damit auch auf die Wasserspeicherkapazität (Hampl 1996, Joyce et al. 2002), wodurch der Mehrverbrauch an Wasser wieder ausgeglichen werden könnte.

Damit stellen sich eine Reihe zu klärender Fragen zum Zwischenfruchtanbau unter den pannonischen Witterungsverhältnissen im Marchfeld und bezüglich des Einsatzes von legumen Zwischenfrüchten.

1.1 Problemstellung

Das Marchfeld im Osten Österreichs stellt das größte geschlossene Ackerbaugebiet Österreichs dar. Die Voraussetzungen für den Ackerbau in dieser Region sind insgesamt als gut zu bezeichnen. Einen einschränkenden Faktor stellt jedoch die relativ knappe Wasserversorgung dar. Der Jahresniederschlag beträgt im langjährigen Durchschnitt 550 mm. Trockenperioden fallen dabei hauptsächlich in den meist heißen, kontinental geprägten Sommer. Durch Niederschläge im Winterhalbjahr besteht trotz der insgesamt trockenen Bedingungen die Gefahr der Verlagerung von Stickstoff ins Grundwasser. In Ökologischen Betrieben, die im Marchfeld durchwegs viehlos wirtschaften, stellt der Anbau von Leguminosen die wichtigste Stickstoffquelle dar. Daher sollten sie in der Fruchtfolge einen Mindestanteil von 20 % nicht unterschreiten. Neben der Luzerne in der Hauptfruchtfolge könnten legume Zwischenfrüchte einen wichtigen Beitrag zum Ausgleich der Stickstoffbilanz leisten. Nach Müller und Thorupsen (2001) konnten unter den Versuchsbedingungen in Dänemark (8,1°C, 719 mm NS) verschiedene, als Herbstzwischenfrüchte angebaute, Leguminosen Fixierleistungen zwischen 32 kg N ha⁻¹ (Alexandrinderklee) und 149 kg N ha⁻¹ (Winterwicke) erreichen. Es kann zwar davon ausgegangen werden, dass Leguminosen nur Luftstickstoff in größerem Ausmaß fixieren, wenn das Stickstoffangebot im Boden zu gering ist, trotzdem zeigte sich in vielen Versuchen, dass Leguminosen, als Zwischenfrüchte oder auch als Hauptfrucht mehr Stickstoff im Boden hinterlassen als Nicht-Leguminosen. Daher ist die Effizienz legumer Zwischenfrüchte in der Reduktion des bodenbürtigen mineralischen Stickstoffs zu prüfen.

Die jeweiligen Vor- und Nachteile von legumen bzw. nicht-legumen Zwischenfrüchten unter pannonischen Standortbedingungen bedürfen einer Bewertung im Hinblick auf ihre Biomasseproduktion und Luftstickstoff-Fixierleistung, den Stickstoff- und Bodenwasserhaushalt, ihre Vorfruchtwirkungen und ihre Wirtschaftlichkeit. Dabei ist zu prüfen, ob sich die positiven Leistungen von Leguminosen und Nicht-Leguminosen durch Anbau von Gemengen kombinieren lassen.

1.2 Hypothesen

- I Sowohl Leguminosen- als auch Nichtleguminosen-Zwischenfrucht-Gemenge können bei ausreichender Wasserversorgung ansprechende Biomasseerträge in gleicher Höhe erzielen.
- II Leguminosen nehmen zunächst den verfügbaren Stickstoff aus dem Boden auf und fixieren nachfolgend N aus der Luft.
- III Über den Zwischenfruchtanbau kann die umsatzaktive organische Substanz (Nährhumus) im Boden erhöht werden. Im Ökologischen Landbau ist allgemein das Speichervermögen der Bodenmikroorganismen für N hoch. Da Zwischenfrüchte dem Boden N_{\min} entziehen und gleichzeitig C-reiche Verbindungen in den Wurzelraum abgeben, erhöhen sie die mikrobielle Aktivität und N-Immobilisationsrate. So können die Mikroorganismen dazu beitragen, dass bei ausreichendem C-Angebot der N_{\min} -Gehalt im Boden reduziert und damit die Verlagerung von Nitrat in tiefere Schichten minimiert wird.
- IV Legumer Zwischenfruchtanbau vor Sommergetreiden oder Hackfrüchten in einem Anbausystem ohne Stickstoffzufuhr durch Mineraldünger, ohne organische Dünger und ohne Pflanzenschutzmitteleinsatz trägt daher nicht zu einer kritischen N_{\min} -Anreicherung im Sickerwasser bei.
- V Das Fehlen einer Zwischenfrucht vor Winterungen mit guter Vorwinterentwicklung (wie Winterroggen) führt zu keiner kritischen Anreicherung mineralischen Stickstoffs, da dieser durch den Bedarf der Winterung weitgehend reduziert wird.
- VI Durch die N-Speicherung in Zwischenfrüchten verbessern sich Ertrag und Proteingehalt der Folgefrüchte.
- VII Die monetären Aufwendungen für den Zwischenfruchtanbau werden durch die Verringerung von Nährstoffverlusten und die positiven Vorfruchtwirkungen mehr als ausgeglichen.

1.3 Projektziele

1. Quantifizierung der Biomasseproduktion und Gesamt-Stickstoffaufnahme (Bodenstickstoff und Luftstickstoff) verschiedener Zwischenfrüchte (hier: überwiegend legume Stoppelfrüchte zur Gründüngung) aus der verfügbaren Bodenfraktion und über luftstickstoffbindende Rhizobien.
2. Quantifizierung der Stickstoffdynamik im Boden (0-140 cm) ab der Ernte der Hauptvorfrucht über die Zwischenfrucht bis hin zur nachfolgenden Hauptfrucht (Beginn der Wachstumsphase im Frühjahr), insbesondere der Nitratverlagerung, N in Biomasse, N_{org} (labile Stickstofffraktion), N-Mineralisierungspotential, N_{min} im Boden, N_{min} im Sickerwasser.
3. Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Zwischenfruchtgemenge auf die Erträge und Qualitäten der nachfolgenden Hauptfrüchte.
4. Wirtschaftlichkeitsberechnung der verschiedenen Varianten.

Bestandteil der Untersuchungen sind unterschiedlich lange Vegetationsperioden der Zwischenfrüchte, welche sich durch die jeweiligen Fruchtfolgepaare „Hauptfrucht – Zwischenfrucht – Hauptfrucht“ ergeben.

2 Material und Methoden

2.1 Standort und Fruchtfolge

Der Versuch wurde im Zeitraum von Juli 2002 bis Juli 2005 auf den ökologisch bewirtschafteten Teilfläche der, an die Universität für Bodenkultur Wien angeschlossenen, Versuchswirtschaft in Großenzersdorf durchgeführt. Dieser Standort liegt im pannonischen Klimagebiet. Die langjährigen Durchschnittswerte liegen für den Niederschlag bei 550 mm, für die Temperatur bei 9,8 °C. Der Boden ist ein aus Löss entstandener Tschernosem, dessen A – Horizont eine Mächtigkeit von durchschnittlich 50 – 60 cm hat. Der Löss reicht bis in eine Tiefe von 90 – 150 cm. Die vorherrschende Bodenart in der Krume ist lehmiger Schluff (Frank, 1999; siehe auch Anhang 1, Tabelle A 2). Der pH-Wert in CaCl₂ gemessen liegt bei 7,5 bis 7,6.

Um die Vor- und Nachteile von legumen bzw. nicht-legumen Zwischenfrüchten bewerten zu können, wurde ein Fruchtfolgeausschnitt (Tabelle A 12) über einen Zeitraum von drei Jahren verfolgt: ZF (2002) – Kartoffel (2003) – Winterroggen (2003/04) +ZF (2004) – Sommergerste (2005). Die unterschiedlichen Behandlungen ergaben sich aus drei Zwischenfruchtgemengen mit verschiedenen Gemengepartnern (Tabelle 1) und einer vierten Schwarzbrache-Variante als Referenz. Die vier Varianten wurden in einem Parzellenversuch in Form einer vollständig randomisierten Blockanlage (Abbildung A 35) geprüft.

Tabelle 1: Saatstärken in kg ha⁻¹ für die Varianten mit Zwischenfruchtanbau

	var1 (leg + n-leg)	var2 (leg)	var3 (n-leg)	var4 (sbr)
Futtererbse	40	80		
Saatwicke	20	40		
Platterbse	45	90		
Phacelia	2,5		5	
Ölrettich	3		6	
Stoppelrübe	2		4	

2.2 Witterung während der Projektlaufzeit

Das Klima am Standort ist pannonisch geprägt und man muss insbesondere im Sommer mit knapper Wasserversorgung und hohen Temperaturen rechnen. Die Wasserversorgung im Spätsommer und Herbst 2002, beim erstmaligen Anbau der Zwischenfruchtvarianten, war durch die relativ hohen Niederschläge im August außerordentlich gut (Abbildung 1). Für die folgende Hauptfrucht (Kartoffeln) im Anbaujahr 2003 kamen die typisch trockenen

Bedingungen zum Tragen. Die über dem langjährigen Durchschnitt liegenden Temperaturen verschärften den Trockenstress für die Pflanzen. Der Winterroggen (2003/04) fand günstigere Verhältnisse vor. Die eher geringen Niederschläge im Herbst 2003 wurden durch die Regenmengen im März und im Juni 2004 ausgeglichen. Durch die relativ späte Ernte des Winterroggens und die anfänglich trockenen Bedingungen im Spätsommer 2004 (August, September) wurde der Auflauf Zwischenfrüchte verzögert und der Aufwuchs war aufgrund der kurzen Vegetationsspanne äußerst gering. Bezüglich der Nitratverlagerung scheint in erster Linie der Herbst 2002 (112 mm NS im Oktober) eine kritische Periode gewesen zu sein. In geringerem Ausmaß trifft das auch für den Herbst 2004 zu.

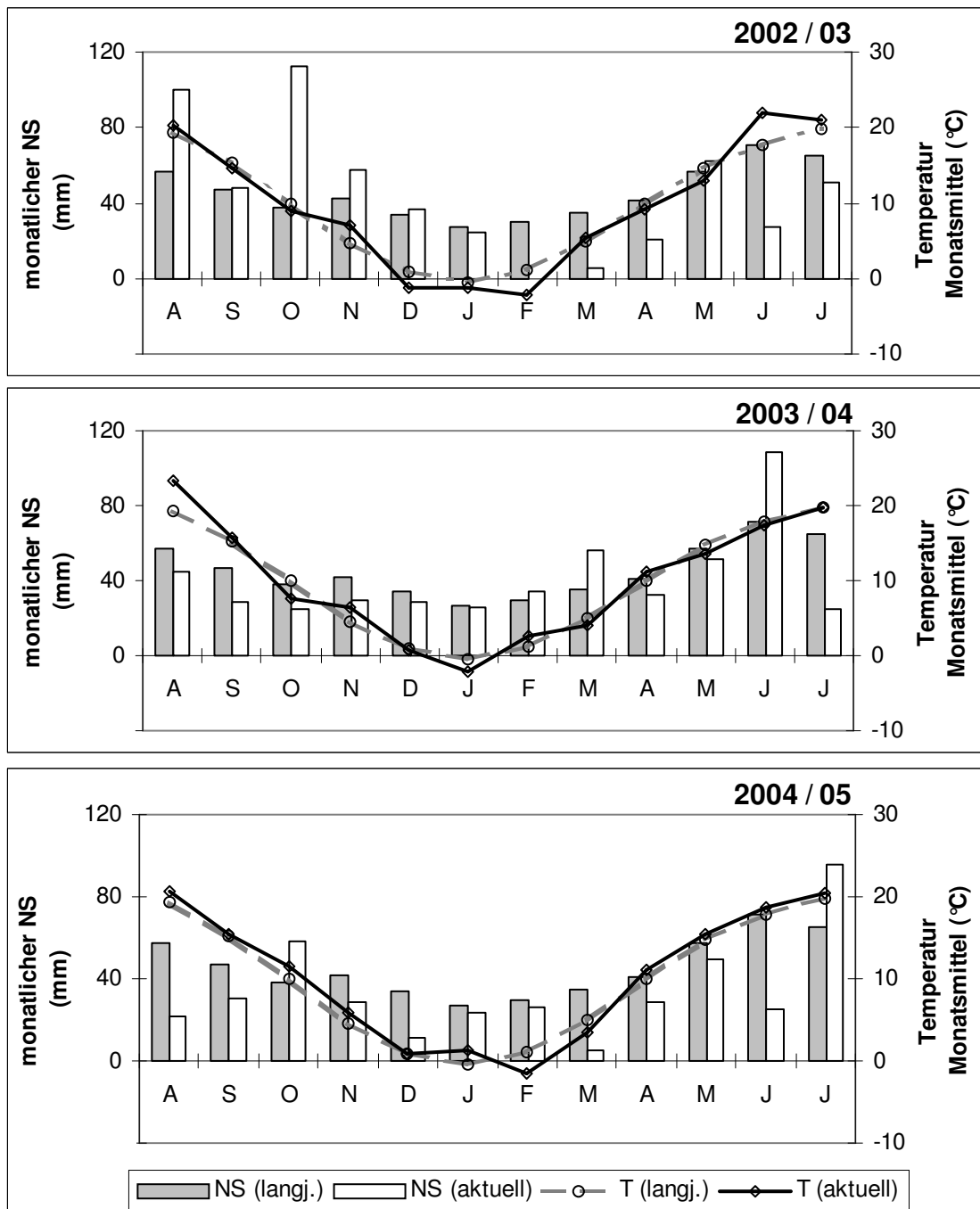


Abbildung 1: Witterungsverlauf während des Versuchs

2.3 Probenahme und Analysemethoden

2.3.1 N-Ertrag und Trockenmasseproduktion

Zur Bestimmung des Ertrages bzw. der Trockenmasseproduktion der jeweiligen Kultur wurde in jeder Parzelle eine Fläche von 2 m² händisch geerntet. Zur Bestimmung der Trockenmasse wurde ein Aliquot bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Bei Winterroggen und Sommergerste wurde der Ertrag zusätzlich mit Hilfe eines Parzellenmähdrescher erhoben. Der Kohlenstoff- und der Stickstoffgehalt des getrockneten Pflanzenmaterials wurde auf einem LECO C/N-Analyser bestimmt, womit auch der Stickstoffertrag der Zwischenfrüchte berechnet werden konnte.

2.3.2 Mineralischer Stickstoff im Boden

Der Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden wurde jeweils vor dem Anbau und nach der Ernte jeder Hauptfrucht bzw. nach dem Umbruch der Zwischenfrucht untersucht. Die Probenahme erfolgte mit Hilfe eines Bohrstocks bis in eine Tiefe von 120 cm. Die N_{min}-Gehalte wurden in Schichten von jeweils 30 cm (0 – 30 cm, 30 - 60 cm, 60 – 90 cm und 90 bis 120 cm) bestimmt. Aus jeder Parzelle wurde eine Mischprobe von acht Einstichen entnommen. Die Nitratbestimmung erfolgte nach ÖNORM L 1091 (1988:2). Dabei werden die Bodenproben mit einer CaCl₂-Lösung extrahiert und die Nitratgehalte der Extrakte am UV-VIS Photometer bei einer Wellenlänge von 330 nm gegen eine Eichgerade gemessen.

2.3.3 Stickstoffnachlieferung

Zu Vegetationsbeginn im Frühling wurden die Bodenproben aus der Schicht von 0 –30 cm auf ihr Stickstoffmineralisierungspotential untersucht. Dabei werden 5 g Boden in Eprovetten mit destilliertem Wasser überschichtet und dadurch in ein anaerobes Milieu gebracht. Danach werden sie verschlossen und 7 Tage bei einer Temperatur von 40 °C inkubiert. Dadurch läuft die Stickstoffmineralisierung nur bis zur Bildung von Ammonium ab. Die weitere Umsetzung zu Nitrat kann aufgrund des fehlenden Stickstoffs nicht erfolgen. Die Menge des gebildeten Ammoniums wird nach einer Farbreaktion photometrisch am UV-VIS-Photometer bei einer Wellenlänge von 660 nm bestimmt. Der Ammoniumgehalt gilt als Maß für das Potential des Bodens zur Stickstoffnachlieferung. Die Methode entspricht der Standardanweisung SAA33BO0201 der österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (Kandeler, 1993).

2.3.4 Mikrobieller Kohlenstoff, mikrobieller Stickstoff und K₂SO₄-extrahierbarer Stickstoff im Boden

Der Kohlenstoff und Stickstoff in der mikrobielle Biomasse im Boden wurden ebenfalls nur zu den Frühlingsterminen untersucht. Dazu wurde die Chloroform – Fumigations - Extraktionsmethode (Brookes et al., 1985, Vance et al., 1987) herangezogen. Dabei wird der C- bzw. der N-Gehalt im Boden einmal vor und einmal nach der Fumigation mit Chloroform gemessen. Die durch die Fumigation zusätzlich der Extraktion zugänglich gemachte C bzw. N wurde mit einem Kalibrationsfaktor zum mikrobiell gebundenen C bzw. N umgerechnet. Die Extraktion der Bodenproben erfolgt dabei mit 0,5 M K₂SO₄-Lösung. Die Bestimmung der C- und N-Gehalte der Extrakte wurden in einem Dimatoc 100 TOC-TNb-Analyser bestimmt. Der N-Gehalt der nicht fumigierten Proben, also der K₂SO₄-extrahierbare Stickstoff ist ein Maß für den labilen Stickstoff im Boden.

2.3.5 Organischer Kohlenstoff und Gesamtstickstoff im Boden

Der organische Kohlenstoff und der Gesamtstickstoff im Horizont von 0 – 30 cm wurden am 28. März 2003 und am 4. April 2005 gemessen um eine Veränderung dieser Parameter während der Versuchszeit zu erfassen. Die Messung erfolgte mit einem C/N – Analyser der Firma LECO. Um den organischen Kohlenstoff zu erhalten, muss vom Kohlenstoffwert der Gehalt an Karbonat-C abgezogen werden. Die Karbonatbestimmung erfolgte nach Scheibler (ÖNORM L1084).

2.3.6 Nitratkonzentration in der Bodenlösung

Während der Periode potentieller Nitratverlagerung wurden in Abständen von ein bis zwei Wochen Bodenlösung aus 80 cm bzw. 140 cm Bodentiefe gewonnen. Dazu wurde an Saugkerzen 24 h ein Unterdruck von 500 mbar zur Gewinnung der Bodenlösung angelegt. Die so gewonnene Bodenlösung wurde bis zur Analyse tiefgefroren bei –20°C aufbewahrt. Die Analyse erfolgte photometrisch auf einem UV-VIS-Potometer der Firma HP. Um andere stickstoffhaltige Substanzen zu erfassen, wurde auch der Gesamtstickstoffgehalt mit dem Dimatoc 100 TOC-TNb-Analyser der Firma Dimatec bestimmt. Da im ersten Jahr keine nennenswerten Konzentrationen an organisch gebundenem Stickstoff festgestellt wurden, wurden in den Folgejahren nur noch die Nitratgehalte analysiert.

2.3.7 Messung bodenphysikalischer Eigenschaften

Die erhobenen bodenphysikalischen Eigenschaften dienen der Standortbeschreibung und geben Aufschluss über die kleinräumige Heterogenität in der Versuchsanlage und über die Tiefenverteilung der Bodeneigenschaften in zwei Bodenaufschlüssen. Ermittelt wurden die Textur, die Lagerungsdichte, die Feststoffdichte, der Poren- und Substanzanteil, die Druckpotential – Wasseranteilsbeziehung sowie der Durchlässigkeitsbeiwert (k_s -Wert) (siehe Anhang 1).

2.3.8 Messung von Bodenwasserparametern

Die Bodenwasserdaten wurden mit Hilfe einer Dauermessstelle erfasst. Dabei wurde eine Parzelle jeder Variante doppelt instrumentiert. Die Messung des Bodenwassergehalts erfolgte durch FDR-Sonden (10 cm, 40 cm, 80 cm und 140 cm), die der Bodenwasserspannung mit Watermarks (10 cm, 40 cm, 80 cm) bzw. Tensiometern (80 cm und 140 cm). Das Messintervall betrug 10 min. Eine eingehendere Beschreibung der verwendeten Sensoren und der gesamten Messstelle findet sich in Anhang 2 (Kap. 8.2).

2.4 Berechnungs- und Schätzungsmethoden

2.4.1 Abschätzung der Stickstoff-Fixierleistung nach der Differenzmethode

Die Stickstofffixierleistung wurde nach der erweiterten Differenzmethode (Stülpnagel, 1982) geschätzt. Dabei wurde für die Varianten mit Leguminosenanteil (var1 bzw. var2) die Differenz der gesampflanzlichen Stickstoffaufnahme zur var3 (n-leg) als Referenzkultur gebildet. Zusätzlich wurde der Gehalt mineralisierten Stickstoffs im Boden zum Zeitpunkt der Erhebung berücksichtigt.

$$N_{\text{fix}} = (N_{\text{pfl-leg}} + N_{\text{min (leg)}}) - (N_{\text{pfl (ref)}} + N_{\text{min (ref)}})$$

N_{fix}	Fixierleistung des Leguminosenbestandes
$N_{\text{pfl-leg}}$	Gesampflanzlicher Stickstoff des Leguminosenbestandes
$N_{\text{pfl (ref)}}$	Gesampflanzlicher Stickstoff in der Referenzkultur
$N_{\text{min (leg)}}$	Mineralischer Stickstoff unter dem Leguminosenbestand
$N_{\text{min (ref)}}$	Mineralischer Stickstoff unter der Referenzkultur

Voraussetzungen der erweiterten Differenzmethode sind gleiche N-Mineralisierung der organischen Bodensubstanz in Leguminosen- und Referenzvariante und gleiche räumliche und zeitliche Verteilung der Wurzeln von Leguminosen und Referenzkultur.

2.4.2 Berechnung der Versickerung anhand einer klimatischen Wasserbilanz

Die Versickerung wurde anhand der klimatischen Wasserbilanz (Ehlers, 1997) berechnet. In die Bilanz gehen Niederschlag, Evaporation, Transpiration und die Änderung des Bodenwassergehalts ein. Da der Oberflächenabfluss aufgrund der zu vernachlässigenden Niveauunterschiede im Gelände gleich null gesetzt wurde, konnte aus der Bilanzierung dieser Daten die Versickerung berechnet werden. Evaporation und Transpiration wurden aus Witterungsdaten nach der Methode von Penman-Monteith (Allen et al., 1998) berechnet. Dazu wurde eine Excel-Rechentabelle verwendet, die vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur zur Verfügung gestellt wurde. Die Wetterdaten wie auch der Niederschlag stammen aus den Messungen der Wetterstation des Instituts für Pflanzenbau, die sich in einer Entfernung von etwa 500 m zur Versuchsanlage befindet. Teilweise mussten Daten aufgrund von Messausfällen ergänzt werden. Dabei wurde auf Daten der Wetterstation in Großenzersdorf zurückgegriffen. Der Bodenwassergehalt wurde anhand der Messungen der Dauermessstation berechnet. Der Bodenwassergehalt wurde für die Schicht von 0 – 140 cm Tiefe gemessen, daher bezieht sich die anhand der klimatischen Wasserbilanz errechnete Sickerung auf Bodenwasser, das unterhalb dieser Tiefe versickert ist.

$$S = N + B - (T + E) - \Delta R$$

S	Sickerung	T	Transpiration
N	Niederschlag	E	Evaporation
B	Beregnung	ΔR	Änderung des Bodenwassergehalts

2.4.3 Simulation der Wasserbewegung

Die Simulation der Wasserbewegung hatte die folgenden Aufgaben zu erfüllen.

- Die Berechnung der aufgestellten Wasserbilanz sollte unterstützt werden, vor allem in Hinblick auf die zu erwartende Versickerung in tieferen Schichten.
- Das kalibrierte Modell sollte zur Nachbildung der Bodenwasserdynamik, für den Zeitraum für den die Datenerfassung noch nicht errichtet war, verwendet werden.
- Das Anwendermodell sollte die Analyse unterschiedlicher Szenarien, auch über das Projekt hinaus, ermöglichen.

Für die Simulation wurde die Software HYDRUS-1D (Simunek et al., 2005) herangezogen. Das genaue Vorgehen ist in Anhang 3 beschrieben.

2.4.4 Errechnung der Nitratversickerung

Die Nitratversickerung wurde anhand der Sickerungen, die aus der klimatischen Wasserbilanz bzw. aus der Simulation ermittelt wurden, und den Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in 140 cm Tiefe errechnet.

2.4.5 Wirtschaftlichkeitsberechnung

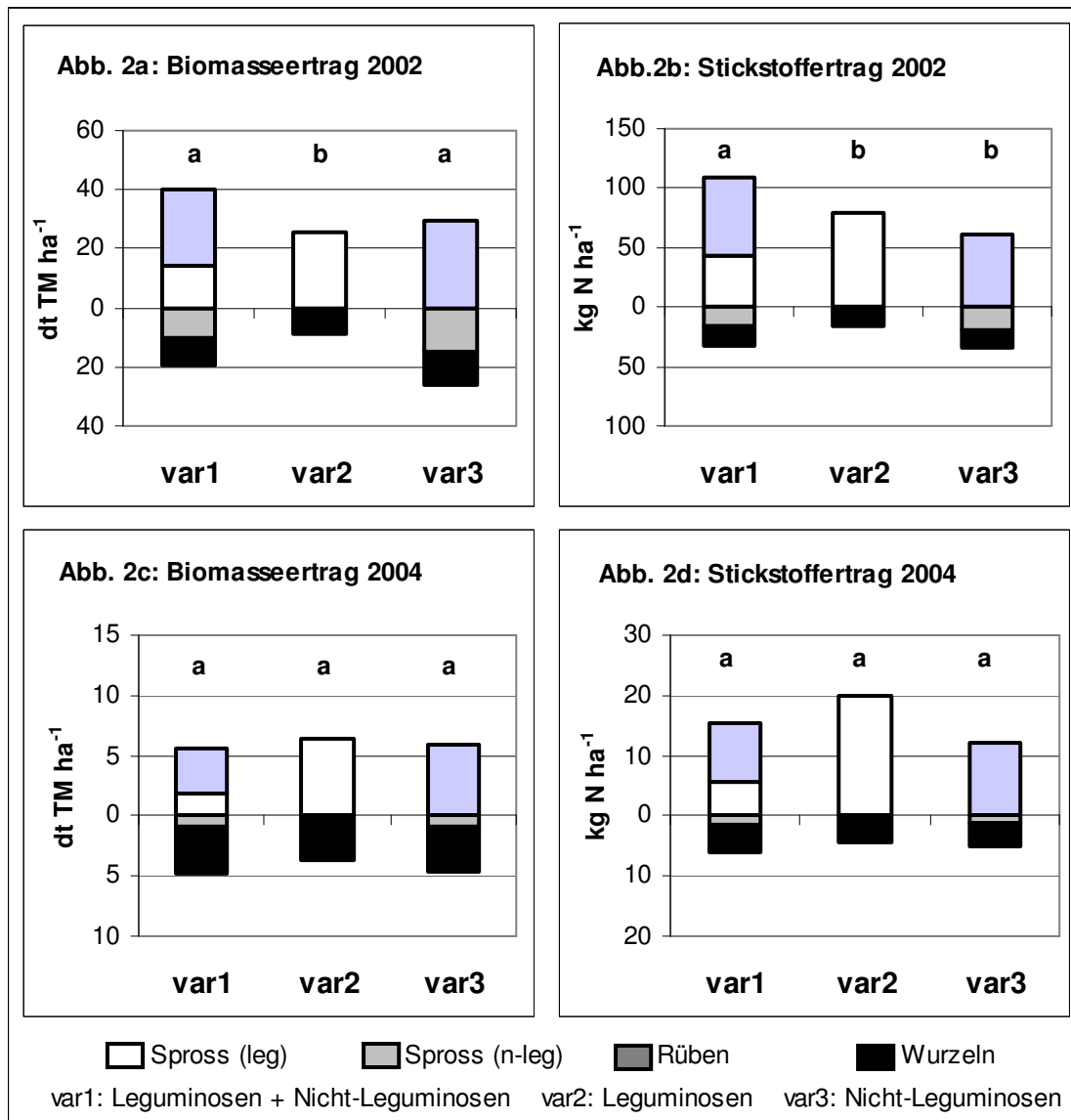
Ob der Zwischenfruchtanbau im Marchfeld wirtschaftlich lohnend ist, wurde anhand einer Gesamtdeckungsbeitragsrechnung für die Fruchtfolge abgeschätzt. Es wurde für jede Variante der durchschnittliche Gesamtdeckungsbeitrag für die entsprechende Fruchtfolge pro Hektar und Jahr berechnet. Dieser wurde als Mittelwert der Deckungsbeiträgen der einzelnen Fruchtfolgejahre errechnet. Damit geht der Deckungsbeitrag jeder Hauptfrucht mit 20 %, die Kosten für den Zwischenfruchtanbau (zweimal in der Fruchtfolge) mit 40 % in den Gesamtdeckungsbeitrag ein (Tabelle A 21). Da die ÖPUL-Prämie für die gesamte förderungswürdige Fläche und nicht nur für den im entsprechendem Jahr begrünzten Anteil ausbezahlt wird, kann sie voll eingerechnet werden. Zur Berechnung der einzelnen Deckungsbeiträge wurden Saatgutpreise (lt. Preisliste RWA) und die Erlöse für die Hauptkulturen (aus Betriebserhebung) für das Jahr 2004 zugrunde gelegt. Es wurde das EDV-Programm verwendet, das ebenso wie die Broschüre Standarddeckungsbeiträge im Ökologischen Landbau 2002/03 (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung II/2, 2002) von der Internetseite des Lebensministeriums bezogen wurde. Die Sätze für die variablen Maschinenkosten wurden nach Kogler et al. (2005) aktualisiert. Die Versuchserträge lagen in Abhängigkeit der Jahreswitterung bis zu 60 % über bzw. unter den Durchschnittserträgen der Region (Schneeberger et al., 2005) und unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Varianten (Tabelle 9 und Tabelle 10). Um vom Einfluss der Jahreswitterung zu abstrahieren und repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurden für alle Varianten die Durchschnittserträge für die Berechnung verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Biomasseertrag, Stickstoffertrag und Stickstoff-Fixierung der Zwischenfrüchte

Die Erträge der Zwischenfrüchte (Abbildung 2) aus den Jahren 2002 bzw. 2004 waren höchst unterschiedlich. Im Jahr 2002 konnten die Zwischenfrüchte bereits am 30. Juli angebaut werden, und die Wasserversorgung war durch ausreichende Niederschläge sichergestellt. Die Vegetationsspanne reichte für einen guten Aufwuchs der Zwischenfrüchte und zu einer beachtlichen Trockenmassenbildung aus. Die Aussaat der Zwischenfrüchte im Jahre 2004 erfolgte aufgrund der späteren Ernte des vorangegangenen Winterroggens erst am 12. August. Zusätzlich wurde der Auflauf durch anfangs trockene Verhältnisse verzögert. Die Folge war eine mangelhafte Entwicklung der Zwischenfrüchte. Die gesamt-pflanzliche Biomasse im Jahr 2002 waren in der var1 (leg + n-leg) mit 60 dt TM ha⁻¹ und in der var3 (n-leg) mit 56 dt TM ha⁻¹ signifikant höher als in der var2 (leg) mit 35 dt TM ha⁻¹. Im gesamt-pflanzlichen Stickstoffertrag lag var1 (leg + n-leg) mit 141 kg N ha⁻¹ signifikant höher als die beiden anderen Varianten mit 96 kg N ha⁻¹ in var2 (leg) bzw. 94 kg N ha⁻¹ in var3 (n-leg). Die höheren Biomasseerträge in den Varianten mit Nicht-Leguminosen sind auf die gute Wüchsigkeit von Ölrettich und Stoppelrübe zurückzuführen, insbesondere auf den relativ hohen Anteil der unterirdischen Biomasse durch die Rübenbildung. Durch den höheren Stickstoffgehalt der Leguminosen verschieben sich die Grenzen der homogenen Gruppen, sodass var1 (leg + n-leg) sich von den beiden anderen Varianten signifikant unterschied.

Der Zwischenfruchtanbau im Herbst 2004 führte zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den Varianten. Die Trockenmasse-Erträge lagen zwischen 10 dt ha⁻¹ und 11 dt ha⁻¹, die Stickstofferträge zwischen 17 kg N ha⁻¹ und 24 kg N ha⁻¹, wobei die var2 (leg) den tendenziell höchsten N-Ertrag erreichte. Dies erklärt sich maßgeblich über die trockenen Verhältnisse beim Anbau der Zwischenfrüchte. Die bessere Wasserversorgung im Oktober konnte aufgrund der niedrigen Temperaturen und der kurzen Tageslänge nicht mehr wesentlich zur Ertragsbildung beitragen.



Werte mit gleichen Buchstaben über den Säulen unterscheiden sich zum jeweiligen Termin nicht signifikant im gesamt-pflanzlichen Biomasse- bzw. Stickstoffertrag (Tukey; $P < 0,05$)

Abbildung 2: Biomasseerträge und Stickstofferträge der Zwischenfruchtvarianten

Stickstoff-Fixierung der Zwischenfruchtvarianten mit Leguminosen

In var1 (leg + n-leg) und var2 (leg) wurden die Fixierleistung (BNF) und der Luftstickstoffanteil (Ndfa) des gesamt-pflanzlichen Stickstoffs jeweils für den gesamten Bestand berechnet. Aufgrund der hohen Streuung konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Die tendenziell höhere Fixierleistung der var1 (leg + n-leg) kann durch die Wechselwirkung von Leguminosen und Nicht-Leguminosen erklärt werden. Die Nicht-Leguminosen senken den Stickstoffgehalt im Boden ab und regen die Leguminosen dadurch zu verstärkter Luftstickstofffixierung an. Im Jahr 2004 ist eine solche Wechselwirkung aufgrund der kurzen Vegetationsspanne und der geringen Biomasseproduktion eher unbedeutend.

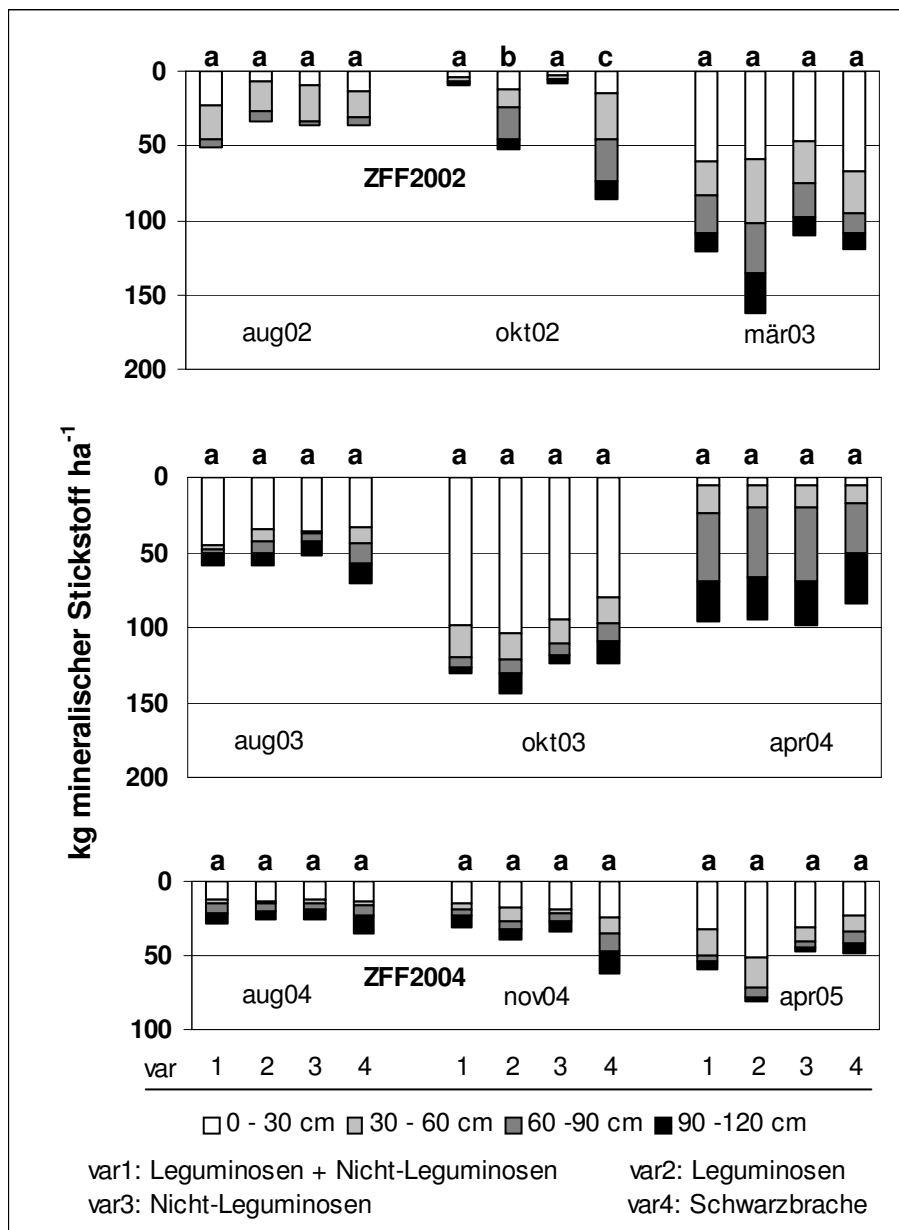
Tabelle 2: Luftstickstoff-Fixierung (BNF) und Luftstickstoffanteil (Ndfa) des gesamt-pflanzlichen Stickstoffertrages der leguminosenhaltigen Zwischenfruchtvarianten

	ZFF 2002		ZFF 2004	
	BNF (kg N ha ⁻¹)	Ndfa (%)	BNF (kg N ha ⁻¹)	Ndfa (%)
var1 (leg + n-leg)	48 ^a	32 ^a	2 ^a	10 ^a
var2 (leg)	34 ^a	35 ^a	14 ^a	56 ^a

Mittelwerte einer Spalte mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (P < 0,05)

3.2 Mineralischer Stickstoff im Boden

Ein Hauptaugenmerk des Versuchs lag in der Auswirkung der verschiedenen Zwischenfrüchte auf den Gehalt mineralischen Stickstoffs im Boden. Der Gehalt an mineralischen Stickstoff (Abbildung 3) konnte durch den Zwischenfruchtanbau im Herbst 2002 in allen drei Varianten mit Zwischenfrüchten signifikant reduziert werden. Als Referenz wurde die Schwarzbrache in var4 (sbr) herangezogen. var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) waren effizienter als var2 (leg). Bis zum Anbau der nachfolgenden Kartoffeln Anfang April 2003 ging diese Differenzierung allerdings weitgehend verloren. Auffallend war der zu diesem Zeitpunkt tendenziell höhere N_{min}-Gehalt in var2 (leg), während die drei anderen Varianten eine offensichtlich homogene Gruppe bildeten. Die Nivellierung lässt eine Verlagerung des Stickstoffs in var2 (leg) und var4 (sbr) unterhalb der Untersuchungstiefe von 120 cm vermuten (vgl. Kap. 3.6). Der nach dem Winter 2004/05 tendenziell höhere N_{min}-Gehalt in var2 (leg) kann auf eine verstärkte Mineralisierung zurückzuführen sein. Diese Annahme wird durch die N_{min}-Werte 2004/05 gestützt. Aufgrund der niedrigen Erträge der ZFF 2004 (Abbildung 2) waren auch ihre Auswirkungen auf den N_{min}-Gehalt im Boden gering. Es wurden jedoch ähnliche Muster wie in den N_{min}-Gehalten nach dem Zwischenfruchtanbau 2002 gefunden. Im April 2005 ist eine höhere Mineralisierungsrate in var2 (leg) am hohen N_{min}-Gehalt im obersten Horizont gut zu erkennen.



Die Mittelwerte eines Termins mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ($P < 0,05$)

Abbildung 3: Mineralischer Stickstoff im Boden für die gesamte Versuchslaufzeit

3.3 Stickstoffnachlieferung und labiler Stickstoff im Boden

Das Stickstoffmineralisierungspotential des Bodens der obersten 30 cm wurde zu den Beprobungsterminen zu Beginn jeder Vegetationsperiode untersucht. Innerhalb der jeweiligen Termine konnten zwischen den Varianten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Es war kein Hinweis darauf zu finden, dass in var2 (leg) das Mineralisierungspotential durch die Leguminosen-Residuen erhöht wurde, wie es die höheren Gehalte an mineralischem Stickstoff in dieser Variante in den Jahren nach Anbau der Zwischenfrüchte nahegelegt hätten. Vergleicht man die Termine untereinander, fällt das insgesamt geringere Mineralisierungspotential im Frühling 2004 auf. Da das aber im selben Ausmaß auf die Schwarzbrache zutrifft ist dies nicht mit den fehlenden Zwischenfrüchten im Herbst 2003 in Verbindung zu bringen.

Der mit K_2SO_4 extrahierbare Stickstoff als Maß für die labile Stickstofffraktion im Boden wurde im Zuge der Bestimmung des mikrobiellen Stickstoffs (Kap.2.3.4) im Boden gemessen. Der labile Stickstoff im Boden in der var1 (leg + n-leg) war in allen drei Jahren signifikant höher als in var4 (sbr). Für die var2 (leg) gilt dasselbe für die Jahre 2003 und 2005, also den Jahren mit Zwischenfruchtanbau im vorangegangenen Herbst. var3 (n-leg) unterschied sich in keinem Jahr von der var4 (sbr).

Tabelle 3: Stickstoffmineralisierungspotential und K_2SO_4 extrahierbarer N

	Stickstoffnachlieferung ($\mu\text{g NH}_4\text{N g}^{-1}$)			labiler Stickstoff (kg N ha^{-1})		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005
var1 (leg + n-leg)	35,7 ^a	22,5 ^a	31,3 ^a	75 ^a	40 ^a	59 ^{ab}
var2 (leg)	35,0 ^a	24,7 ^a	27,9 ^a	73 ^a	34 ^{ab}	64 ^a
var3 (n-leg)	34,1 ^a	20,5 ^a	33,9 ^a	60 ^b	36 ^{ab}	51 ^{bc}
var4 (sbr)	31,9 ^a	22,7 ^a	22,4 ^a	64 ^b	31 ^b	50 ^c

Mittelwerte derselben Spalte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ($P < 0,05$).

3.4 Mikrobieller Kohlenstoff und Stickstoff im Boden

Der Gehalt an mikrobiellem Kohlenstoff und Stickstoff im Boden als Maß für die mikrobielle Biomasse wurde jeweils im Frühling zu Vegetationsbeginn gemessen. In den Jahren 2003 bzw. 2005 wurden im vorigen Herbst jeweils die Zwischenfruchtvarianten angebaut. Die Proben wurden Ende März im Jahr 2003 bzw. Anfang April im Jahr 2005 genommen. Im Jahr 2004 wurden die Proben Anfang April entnommen, der Kultur war Winterroggen. Dadurch sollten anhaltende Veränderungen möglichst unbeeinflusst von einer jahreszeitlichen Dynamik festgestellt werden. Innerhalb der Varianten wurden zu denselben Terminen keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Wie bei der N-Nachlieferung wurden im Frühling 2004 niedrigere Werte an C_{mic} gemessen als in den beiden anderen Jahren. N_{mic} zeigte diese Unterschiede zwischen den Jahren nicht.

Tabelle 4: Mikrobieller Kohlenstoff und Stickstoff im Boden zu den Frühlingsterminen

Jahr	mikrobieller C ($\mu\text{g g}^{-1}$)				mikrobieller N ($\mu\text{g g}^{-1}$)			
	var1	var2	var3	var4	var1	var2	var3	var4
2003	304	232	369	263	37	33	36	31
2004	202	227	179	204	34	38	31	36
2005	251	276	210	229	36	41	32	32

var1: Leguminosen + Nichtleguminosen; var2: Leguminosen; var3: Nichtleguminosen;
var4: Schwarzbrache

Die Werte für C_{mic} bzw. N_{mic} unterschieden sich innerhalb der Probenahmetermine nicht signifikant (Tukey, $P < 0,05$)

3.5 Organischer Kohlenstoff und Gesamtstickstoff im Boden

Der organische Kohlenstoff und der Gesamtstickstoff im Boden gelten als Maßzahlen für den Humusgehalt. Um diesbezügliche Veränderungen festzuhalten, wurden diese Parameter zu Beginn und am Ende des Versuchs, jeweils zu Vegetationsbeginn, gemessen. Zu keinem der beiden Untersuchungszeitpunkte wurden signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Auch zwischen ersten und zweiten Termin ergaben sich keine signifikanten Veränderungen.

Tabelle 5: Organischer Kohlenstoff C_{org} und Gesamtstickstoff N_t im Boden (0 – 30 cm)

Jahr	organischer C in %				Gesamtstickstoff in %			
	var1	var2	var3	var4	var1	var2	var3	var4
2003	1,98	2,03	1,98	2,00	0,17	0,17	0,17	0,17
2005	1,94	1,89	2,08	1,87	0,17	0,16	0,17	0,15

var1: Leguminosen + Nichtleguminosen; var2: Leguminosen; var3: Nichtleguminosen;
var4: Schwarzbrache

Die Werte für C_{mic} bzw. N_{mic} unterschieden sich innerhalb der Probenahmeterminale nicht signifikant (Tukey, $P < 0,05$)

3.6 Bodenwasserhaushalt, Nitrat in der Bodenlösung und Nitratverlagerung

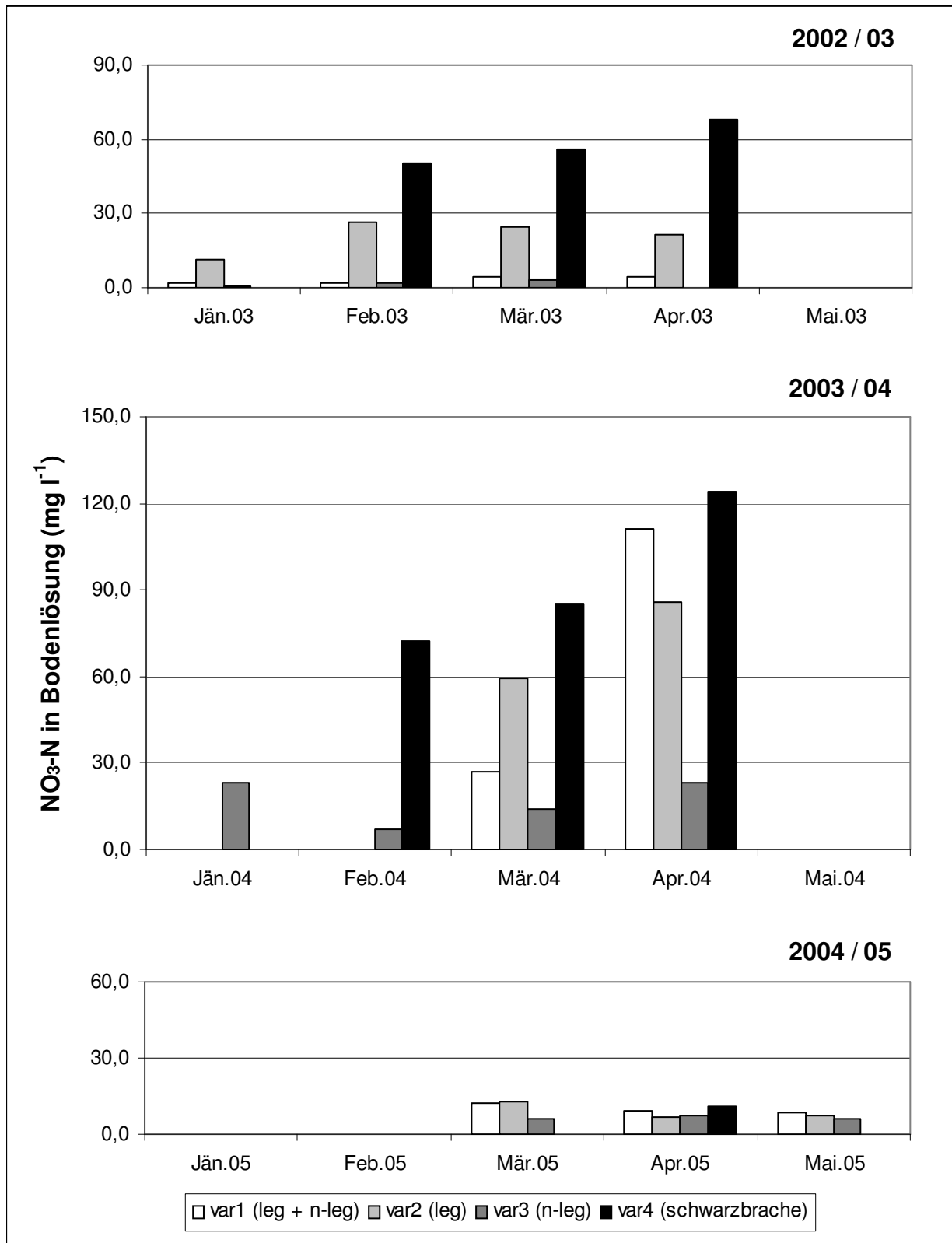
3.6.1 Nitratgehalte in der Bodenlösung

Im ersten Versuchsjahr wurde zwischen Jänner 2003 und April 2003 in einem Intervall von ein bis zwei Wochen Bodenlösung mittels Saugkerzen gewonnen. In den darauffolgenden Jahren wurde der Untersuchungszeitraum von November bis Mai bzw. bis Juni ausgeweitet. Im Verlauf des Untersuchungszeitraumes wurde die Probenahme zusehends schwieriger und es fielen mehrere Saugkerzen trocken. Daher war eine statistische Auswertung, speziell für die Tiefe von 80 cm nur teilweise möglich.

Grundsätzlich waren in 80 cm Tiefe ähnliche Unterschiede zwischen den Varianten wie in den Bodenlösungen aus 140 cm Tiefe festzustellen. Im Zeitraum 2002/03 und 2003/04 waren die in 80 cm Tiefe gemessenen Werte durchwegs höher als in 140 cm Tiefe. Im Untersuchungszeitraum 2004/05 lagen die Werte in beiden Tiefen etwa gleich hoch (Abbildung 1). Der hohe Wert in var1 (leg + n-leg) im April 2004 beruht auf den Messwert einer einzigen Probe, und gibt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die durchschnittlichen unter dieser Variante zu diesem Zeitpunkt wieder.

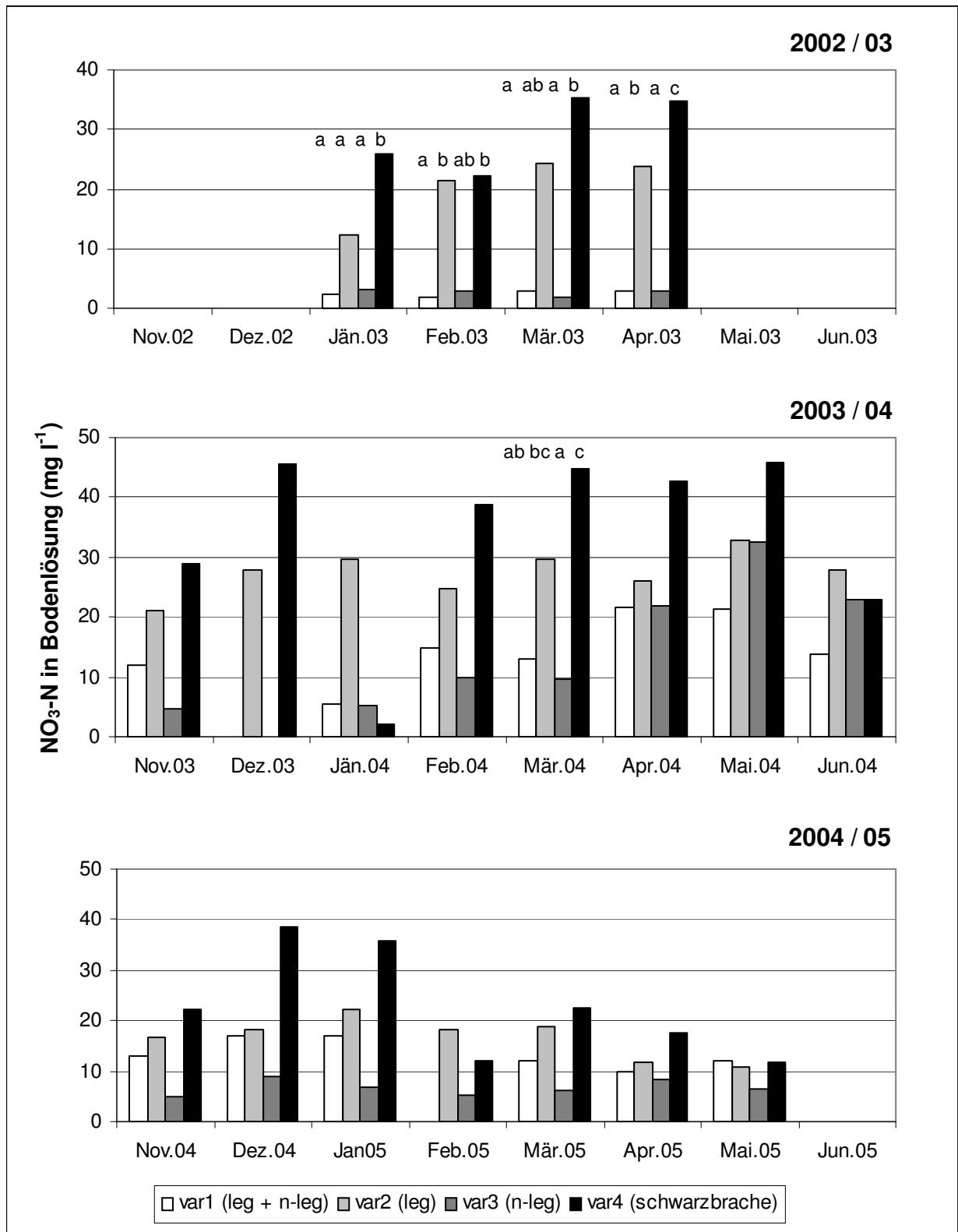
In 140 cm Tiefe konnten nach dem erstmaligen Anbau der Zwischenfrüchte im Herbst 2002 signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Diese Unterschiede korrelierten weitgehend mit den Gehalten an mineralischem Stickstoff im Boden im Herbst. Schon im Jänner 2003 war der Nitratgehalt in der Bodenlösung aus 140 cm Tiefe unter der Schwarzbrache mit 26 mg N l^{-1} signifikant höher als in den Varianten mit Zwischenfrüchten wo sich die Nitratgehalte zwischen 2 mg N l^{-1} und 12 mg N l^{-1} bewegten. Bis in den April ließen sich die Varianten in drei homogenen Gruppen aufspalten. Die var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) hatten mit 3 mg N l^{-1} die niedrigsten Werte, gefolgt von var2 (leg) mit 24 mg N l^{-1} und var4 (schwarzbrache) mit 35 mg N l^{-1} (Abbildung 5).

In der Periode von 2003/04 wurden, obwohl im Herbst zwischen der Kartoffelernte und dem Anbau des Winterroggens keine Zwischenfrüchte angebaut waren, in var1 (sbr) tendenziell wieder die höchsten Nitratkonzentrationen gefunden. Im März war die N-Konzentration in var4 (sbr) sogar signifikant höher als in var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg). In var2 (leg) war der Gehalt an gelöstem Nitrat noch immer signifikant höher als in var3 (n-leg).



Es konnte nicht zu jedem Termin Bodenlösung aus allen Varianten gewonnen werden. Aufgrund der fehlenden Daten konnten die Ergebnisse nicht statistisch geprüft werden.

Abbildung 4: Nitrat-Stickstoffgehalte in der Bodenlösung aus 80 cm.



Säulen eines Termines mit gleichem Buchstaben unterschieden sich nicht signifikant. (Tukey, $P < 0,05$). Es sind nur Termine bezeichnet, zu denen signifikante Unterschiede gefunden wurden.

Abbildung 5: Nitrat-Stickstoffgehalte in der Bodenlösung aus 140 cm.

3.6.2 Klimatische Wasserbilanz und Wasserbewegung

Die Klimatische Wasserbilanz wurde für potentielle Sickerperioden für das Bodenprofil bis in 140 cm Tiefe erstellt. Dabei wurde die Änderung des Wassergehalts aus den Messwerten der FDR-Sonden (Kap. 8.2.3) berechnet. Die Variabilität der Wassergehaltsmessungen der FDR – Sonden aufgrund der inhomogenen Bodenverhältnisse war höher, als eine etwaige Auswirkung der verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten auf den Bodenwassergehalt. Daher wurde für das im Boden gespeicherte Wasser ein über alle Varianten gemittelter Wert verwendet (Abbildung 6). Für die Periode zwischen Herbst 2002 und Frühling 2003 konnte keine Bilanz erstellt werden, da die Sensoren aufgrund verspäteter Projektbewilligung und Lieferung der Instrumente erst im Frühjahr 2003 eingebaut wurden. Bei der Auswahl der Zeiträume der Bilanzierung mussten Zeitpunkte ausgeschlossen werden, zu denen der Boden gefroren war und die FDR-Sonden in Folge keine korrekten Werte für den Wassergehalt im Boden liefern konnten. Die nach Penman-Monteith (Allen et al., 1998) geschätzten Werte für die Evapotranspiration unterschieden sich während des verbliebenen Bilanzierungszeitraumes für die vier Varianten nur in vernachlässigbarem Ausmaß. Der einzige Unterschied in der Bewirtschaftung während dieses Zeitraumes, der Zwischenfruchtanbau im Herbst 2004, führte zu einem sehr geringen Aufwuchs, sodass die Werte für die Evapotranspiration nur unwesentlich von Bestand beeinflusst wurden. Während des restlichen Zeitraumes war die Bewirtschaftung für alle Varianten dieselbe. Da sowohl die Wassergehaltsänderungen und die Evapotranspiration für alle Varianten gleich angesetzt werden konnten, ist demzufolge auch die Bilanzierung ein Mittelwert für alle Varianten (Tabelle 6). Wegen der geringen Niederschläge lagen die aus der klimatischen Wasserbilanz errechneten Werte für die Sickerung in einer Größenordnung, die an der Grenze der Genauigkeit des Verfahrens liegt, sodass zur Errechnung von Stickstofffrachten, wenn möglich die Werte aus der Simulation herangezogen wurden.

Die Simulation erfolgte mit Hilfe des Programms HYDRUS-1D (vgl. Kap. 8.3). Dadurch konnten auch für den Zeitraum vor Inbetriebnahme der Feldmessstelle die Wassergehalte und letztlich die Sickerungen errechnet werden. Für die Wintermonate 2002/03 (23.10.2002 bis 28.03.2003) betrug die Sickerung laut Simulation ca. 30 mm (Abbildung A 33). Für die Wintermonate 2003/04 (11.10.2003 bis 29.02.2004) berechnete das Modell eine Wassernachlieferung aus tieferen Schichten von 12 mm, womit in diesem Zeitraum keine Verlagerung von Stickstoff in tiefere Schichten zu befürchten wäre. Auch die Ergebnisse der klimatischen Wasserbilanz weisen für diesen Zeitraum eine Wassernachlieferung aus tieferen Schichten aus. In den Perioden zwischen 13.03.2004 - 12.04.2004 und 13.04.2004 und 12.05.2004 wurden aus der Wasserbilanz Sickerungen errechnet, die zu einer Abschätzung der Stickstoff-Frachten herangezogen wurden (Tabelle 7). Die für die Periode vom 13.05.2004 bis 12.06.2004 errechnete Sickerung hingegen kann auf eine Unterschätzung des Wassergehaltes im Boden und der Evaporation nach Starkregen Anfang Juni zurückgeführt werden, da kein Oberflächenstau berücksichtigt und die Speicherung in den oberen 10 cm nur näherungsweise erfasst werden. Eine Sickerung in diesem Zeitraum ist auszuschließen, wenn man berücksichtigt, dass die Wassergehaltssensoren in den Tiefen 80 cm bzw. 140 cm kaum eine Erhöhung anzeigen.

Auch die Potenzialveränderungen lassen keine abwärtsgerichtete Wasserbewegung erkennen. Für das Winterhalbjahr 2004/2005 sind, wie aus der klimatischen Wasserbilanz zu ersehen, ähnliche Verhältnisse anzunehmen. Nur für die Monate April und Mai wurden Sickerungen errechnet, während in den vorangehenden Monaten die Bilanz auf eine Wassernachlieferung aus tieferen Schichten schließen lässt. Ein zusätzliches Indiz für die Sickerung im Frühling bildet die Zunahme des Wassergehaltes in 140 cm Tiefe (Abbildung 6), die immer leicht versetzt zu den Auftauzeitpunkten gemessen wurde. Niederschlagsereignisse im Herbst, die aus der Dynamik der Messwerte in 10 cm Tiefe zu ersehen sind, schlugen sich im Messzeitraum nie in höheren Messwerten für den Wassergehalt in 140 cm Tiefe nieder. Das lässt auf keine oder nur sehr geringe Sickerungen im Herbst schließen.

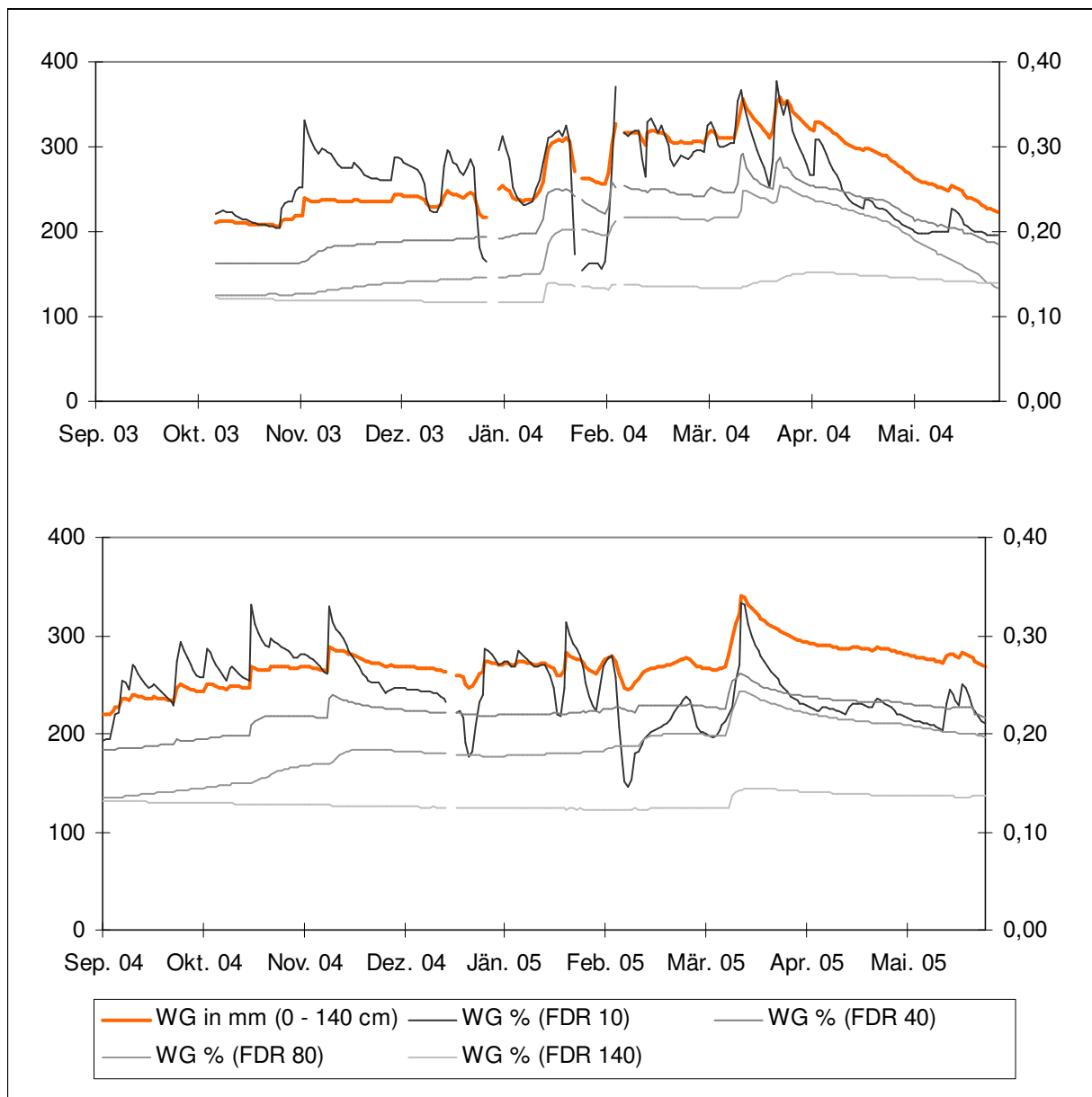


Abbildung 6: Messwerte der FDR-Sonden und errechneter Wassergehalt in der Schicht bis 140 cm Tiefe (gemittelt über alle Varianten)

Tabelle 6: Sickerungen, berechnet nach der Klimatischen Wasserbilanz

Zeitraum		Wasserbilanzdaten (mm)			
von	bis	NS	ET	Δw	Sickerung
08.10.2003	30.11.2003	39,2	40,9	31,6	-33,3
01.12.2003	02.01.2004	30,4	18,7	6,4	5,3
03.01.2004	12.02.2004	43,0	41,7	56,6	-55,3
13.02.2004	12.03.2004	19,2	21,8	10,6	-13,2
13.03.2004	12.04.2004	68,2	51,5	-15,9	32,6
13.04.2004	12.05.2004	34,2	61,0	-61,8	35,0
13.05.2004	12.06.2004	101,4	65,6	-10,1	45,9
01.09.2004	30.09.2004	33,6	24,7	23,8	-14,9
01.10.2004	31.10.2004	58,6	35,4	23,6	-0,4
01.11.2004	30.11.2004	28,8	31,1	0,7	-3,0
01.12.2004	31.03.2005	66,2	70,3	29,9	-34,0
01.04.2005	30.04.2005	28,8	37,2	-13,4	5,0
01.05.2005	31.05.2005	49,2	51,0	-19,6	17,8

NS: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; Δw : Änderung des Wasservorrats im Boden

Die Sickerwassermengen zur Berechnung der Stickstofffrachten stammen aus den Ergebnissen der Simulation, bzw. aus der Klimatischen Wasserbilanz.

Tabelle 7: Sickerwassermengen zur Berechnung der Frachten

von	bis	Sickerung (mm)	Quelle
23.10.2002	28.03.2003	30	Simulation
11.10.2003	29.02.2004	< 0*	Simulation
13.03.2004	12.04.2004	33	Wasserbilanz
13.04.2004	12.05.2004	35	Wasserbilanz
01.09.2004	31.03.2005	< 0	Wasserbilanz
01.04.2005	30.04.2005	5	Wasserbilanz
01.05.2005	31.05.2005	18	Wasserbilanz

*: Wasseraufstieg

3.6.3 Berechnung der Stickstofffrachten

Die Stickstofffrachten wurden aus den in Tabelle 7 angeführten Sickerwassermengen und den für diese Zeiträume durchschnittlichen Konzentrationen in der Bodenlösung in 140 cm Tiefe berechnet. Die in den jeweiligen Winterhalbjahren verlagerten Mengen sind in Tabelle 8 aufsummiert. Für die Wintermonate 2002/2003 wurde aus der Simulation eine Sickerung von ca. 30 mm errechnet. Die sich daraus ergebenden Stickstoffausträge lagen zwischen 1 kg N ha⁻¹ in var1 (n-leg) und 8 kg N ha⁻¹ in var4 (sbr). Die erwartete Reduktion der ausgetragenen N-Mengen durch Nicht-Leguminosen in der Zwischenfruchtmischung ist erkennbar. Für die Periode 2003/04 wurden insgesamt höhere Frachten berechnet, die auf höhere Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung sowie höhere Sickerwassermengen zurückzuführen waren. 2004/05 waren die Frachten wieder geringer. Die geringen Mengen sind hier weniger auf den Zwischenfruchtanbau als auf die trockenen Bedingungen im Herbst zurückzuführen, die eine geringere Mineralisierung des Stickstoffs und geringere Sickerungen zur Folge hatten. Ein Unterschied zwischen den Variante ist nicht mehr erkennbar.

Tabelle 8: Ausgetragene Stickstoffmengen (kg N ha⁻¹) für die Winterhalbjahre

Variante	var1 (leg + n-leg)	var2 (leg)	var3 (n-leg)	var4 (sbr)
2002/03	1	6	1	8
2003/04	13	20	15	30
2004/05	3	2	2	3
Insgesamt	17	28	18	41
Jährlicher Durchschnitt	6	9	6	14
Durchschnittl. Reduktion gegenüber Schwarzbrache	8	5	8	-

3.7 Ertrag und Qualität der Kartoffeln 2003

Die Ertragsbildung der Kartoffeln im Jahre 2003 war durch die trockenen Bedingungen und die massenhafte Entwicklung der Kartoffelkäfer stark eingeschränkt. Trotz mehrmaligen Einsatzes von *Bacillus thuringiensis*-Präparaten und händischen Entfernung des Käfers war die Auswirkung auf den Ertrag verheerend. Eine Differenzierung zwischen den Varianten konnte nicht festgestellt werden (Tabelle 9). Da die Kartoffeln aufgrund der eingeschränkten Entwicklung die bessere Versorgung durch die Zwischenfrüchte nicht nutzten, wurde eine Auswirkung auf die zweite Nachfrucht (Winterroggen) wahrscheinlicher.

Tabelle 9: Ertrag und N-Gehalt in den Kartoffeln

	Kartoffelertrag (FM in dt ha⁻¹)	N-Gehalt (%)
var1 (leg + n-leg)	156 ^a	1,48 ^a
var2 (leg)	159 ^a	1,62 ^a
var3 (n-leg)	157 ^a	1,49 ^a
var4 (sbr)	166 ^a	1,42 ^a

Werte einer Spalte mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey, $P < 0,05$)

3.8 Ertrag und Rohproteingehalte des Winterroggens 2003/04

Die Bedingungen für den Winterroggen im Jahr 2004 waren in Summe sehr gut und führten zu insgesamt hohen Erträgen von bis zu 59 dt ha⁻¹ (Tabelle 10). Zwischen der Kartoffelernte und dem Winterroggen im Herbst 2003 wurden keine Zwischenfrüchte angebaut. Es konnte aber eine gewisse Auswirkung der Zwischenfrüchte des Jahres 2002 erwartet werden, zumal die Kartoffeln aufgrund des trockenen Sommers 2003 die bessere Stickstoffversorgung durch die Zwischenfrüchte nicht nutzen konnte. Die Erträge und Proteingehalte unterlagen einer starken zufälligen Variabilität, die sich auch durch die Versuchsanlage in Blöcken nicht ausreichend berücksichtigen ließ. Variantenunterschiede waren dementsprechend nicht absicherbar. In der var4 (sbr) wurde eine tendenziell niedriger Kornerntrag erreicht, als in den Varianten mit Zwischenfrüchten. Die höhere Strohproduktion in var2 (leg) spricht für eine bessere Versorgung im April und Mai 2004, vor dem Ährenschieben. Zum Zeitpunkt der Probenahme Anfang April 2004 finden sich in var2 aber weder mit höheren Gehalte an mineralischen Stickstoff noch ein höheres Stickstoffmineralisierungspotential oder ein höher Gehalt an mikrobieller Biomasse.

Tabelle 10: Erträge und Rohproteingehalte im Winterroggen 2003/04

	Kornertrag (TM in dt ha⁻¹)	Rohprotein (%)	Strohertrag (TM in dt ha⁻¹)
var1 (leg + n-leg)	59 ^a	9,0 ^a	72 ^a
var2 (leg)	55 ^a	9,4 ^a	94 ^a
var3 (n-leg)	58 ^a	9,5 ^a	75 ^a
var4 (sbr)	46 ^a	8,3 ^a	78 ^a

Werte einer Spalte mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey, P < 0,05)

3.9 Ertrag und Rohproteingehalte der Sommergerste 2005

Die Kornerträge der Sommergerste 2005 waren lagen zwischen 28 dt ha⁻¹ und 35 dt ha⁻¹ und lagen damit in einem für die Region durchschnittlichen Bereich, obwohl die Wasserversorgung aufgrund der geringen Niederschläge im April und Mai nicht optimal war (Tabelle 11). Die Unterschiede zwischen den Varianten waren nicht signifikant. Tendenziell waren die Erträge in den Varianten mit Leguminosen in den Zwischenfrüchten (var1 und var2) höher. Der Gehalt an Rohprotein war gering und auf einem Niveau von P=0,05 war zwischen den Varianten nicht zu differenzieren.

Tabelle 11: Ertrag und Rohproteingehalt in der Sommergerste 2005

	Kornertrag (TM in dt ha⁻¹)	Rohprotein (%)	Strohertrag (TM in dt ha⁻¹)
var1 (leg + n-leg)	33 ^a	8,3 ^a	52 ^a
var2 (leg)	35 ^a	9,7 ^a	53 ^a
var3 (n-leg)	28 ^a	8,3 ^a	51 ^a
var4 (sbr)	30 ^a	9,3 ^a	51 ^a

Werte einer Spalte mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey, P < 0,05)

3.10 Wirtschaftlichkeit der Zwischenfrüchte

Direkte finanzielle Auswirkungen des Zwischenfruchtanbaus sind auf der Ausgabenseite die zusätzlichen Aufwände durch Saatgutkosten und Anbaumaßnahmen, auf der Einkommenseite können durch einen etwaigen Mehrertrag der Folgefrucht höhere Erlöse erzielt werden. Ohne Einbeziehung der ÖPUL-Prämie für Winterbegrünung lagen die

Unterschiede zwischen den Varianten wegen einer fehlenden Ertragsdifferenzierung der Folgefrüchte ausschließlich im Mehraufwand für den Zwischenfruchtanbau. Bei Berücksichtigung der derzeit gültigen ÖPUL-Prämie für Begrünung von Ackerflächen im Herbst und Winter ist sowohl mit var1 (leg + n-leg) als auch mit var3 (n-leg), unter den für Erträge, Erzeugerpreise, Saatgutkosten und variable Maschinenkosten getroffenen Annahmen (vgl. Kap. 2.4.3), ein höherer Gesamtdeckungsbeitrag für die Fruchtfolge zu erzielen als mit var4 (sbr). Nur var2 (leg) bleibt aufgrund der höheren Saatgutkosten auch mit der ÖPUL-Prämie geringfügig unter dem Deckungsbeitrag der Fruchtfolge ohne Zwischenfruchtanbau. Die Differenz beträgt weniger als € 20,- pro Hektar und Jahr (Tabelle 12).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen in diesem Versuch findet sich in der Literatur vielfach der Beleg für die ertragssteigernde Wirkung von Zwischenfrüchten auf die nachfolgende Hauptfrucht, sowohl bei Kartoffeln, als auch bei Getreiden (Dachler und Köchl, 1994; Reents und Möller, 2000). Die Deckungsbeiträge dieser Hauptfrüchte würden entsprechend steigen (Tabelle A 18 bis Tabelle A 19). Eine Ertragssteigerung von 5 % bei den Kartoffeln würde deren Deckungsbeitrag um € 142,- erhöhen. Dieser Betrag kommt für den Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge zwar nur im Ausmaß der mit Kartoffel bestellten Teilfläche (20 %), d.h. mit etwa € 28,- zum Tragen. Dies würde aber ausreichen um auch var2 (leg) bei Berücksichtigung der ÖPUL-Prämie ohne finanzielle Verluste anzubauen. Ohne Berücksichtigung der ÖPUL-Prämie könnte nur die kostengünstigste Zwischenfruchtvariante, die var3 (n-leg), und nur bei einer Ertragssteigerung der Kartoffeln um 10%, mit der Variante ohne Zwischenfruchtanbau in ökonomischer Hinsicht konkurrieren.

Tabelle 12: Gesamtdeckungsbeiträge der Fruchtfolgen bezogen auf Hektar und Jahr

	GDB (€/ha)	ÖPUL (€/ha)	GDB + ÖPUL (€/ha)
var1 (leg + n-leg)	155,00	87,20	242,20
var2 (leg)	120,00	87,20	207,20
var3 (n-leg)	189,00	87,20	276,20
var4 (sbr)	225,00	-----	225,00

GDB: Gesamtdeckungsbeitrag der gesamten Fruchtfolge pro Hektar und Jahr ohne Berücksichtigung von Förderungen; ÖPUL: ÖPUL-Prämie für Herbst- und Winterbegrünung

Eine andere Möglichkeit der ökonomischen Bewertung der Zwischenfrüchte kann über den Wert des Stickstoffs im biologischen Landbau vorgenommen werden. Zwischenfrüchte erhalten zum einen Stickstoff für die Fruchtfolge, indem sie dessen Auswaschung verhindern, zum anderen fixieren legume Zwischenfrüchte zusätzlich Stickstoff aus der Luft. Die Kosten für eine Düngung im entsprechendem Ausmaß müssen beim Deckungsbeitrag der Variante ohne Zwischenfrüchte in Rechnung gestellt werden. Zur Abschätzung dieser Kosten wurde die sehr kostengünstige Form der Düngung mit Vinasse ausgewählt. Die Fa. Soeppenberg gab für den Preis einen Richtwert von 35 € / t Vinasse im Gebiet um

Langenzersdorf an. Dieser Richtwert hängt stark von der Entfernung zum Produktionsort ab, da der Transport einen Großteil der Kosten verursacht. Bei einem durchschnittlichen N-Gehalt von 2 % errechnet sich ein Preis von € 1,75 / kg N. Unter Berücksichtigung der variablen Maschinenkosten belaufen sich die Kosten für die Ausbringung von Vinasse im Ausmaß von 80 kg N ha⁻¹ (entsprechend der Annahme einer Fixierleistung von 40 kg N bei jedem Anbau von legumen Zwischenfrüchten) auf etwa € 200.- / ha. Diese Kosten schlagen sich im Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge var4 (sbr) allerdings nur mit 20 %, d. h. € 40.- negativ zu Buche, da die Düngung nur einmal in der Fruchtfolge erfolgen müsste. Unter Berücksichtigung der ÖPUL-Prämie kann nach dieser Betrachtungsweise auch die teuerste Zwischenfruchtvariante var2 (leg) der var4 (sbr) als ökonomisch gleichwertig angesehen werden (vgl Tabelle 12). Ohne Einbeziehung der Förderung ist allerdings nur die kostengünstigste var3 (n-leg) der var4 (sbr) gleichzustellen.

4 Diskussion

4.1 Biomasseertrag, Stickstoffertrag und Stickstoff-Fixierung der Zwischenfrüchte

Beim Zwischenfruchtanbau im Herbst 2002 hatten die Kruziferen den Hauptanteil an der Biomassebildung. In var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg), beide mit Ölrettich und Stoppelrübe im Gemenge, waren die Erträge signifikant höher als in var2 (leg) (Abbildung 2). Dies ist mit auf die Spätsaatverträglichkeit der Kruziferen zurückzuführen, die auch unter den kühlen herbstlichen Bedingungen noch sehr gut gedeihen. Der gesamt-pflanzliche Stickstoffertrag des Bestandes der var1 (leg + n-leg) war mit 141 kg N ha⁻¹ signifikant höher als in var2 (leg) und var3 (n-leg) mit 96 kg N ha⁻¹ bzw. 94 kg N ha⁻¹. Das spricht für einen Synergie-Effekt der Leguminosen und Nichtleguminosen im Gemenge. Die Reduktion des bodenbürtigen Stickstoffs durch die Nichtleguminosen fördert die Stickstoff-Fixierung der Leguminosen und führt letztlich zu einem höheren Stickstoffertrag im gesamten Bestand. Die nach der erweiterten Differenzmethode geschätzte Stickstoff-Fixierung war in var1 (leg + n-leg) mit 48 kg N ha⁻¹ tendenziell höher als in var2 (leg) mit 34 kg N ha⁻¹ (Tabelle 2). Während der Zwischenfruchtanbau im Herbst 2002 durch, für die Region, außerordentlich gute Wasserversorgung begünstigt war, fand der Anbau im Herbst 2004 unter außerordentlich trockenen Bedingungen statt und zeigte damit die Problematik der von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlichen Wasserversorgung auf. Die Erträge der Zwischenfrüchte, und in der Folge die Stickstofferträge und die Stickstoff-Fixierleistungen der legumen Zwischenfrüchte waren in diesem Jahr äußerst gering, und ihre Auswirkung auf den Stickstoffhaushalt vernachlässigbar.

Die Ergebnisse des Jahres 2002 lassen sich gut mit Ergebnissen von Standorten mit allgemein höherer Wasserversorgung in Beziehung setzen. Reents und Möller (2000) verglichen in ihren Untersuchungen in Oberbayern verschiedene Zwischenfrüchte bezüglich ihres Biomasseertrages und ihrer Auswirkung auf den N-Gehalt des Bodens und die Erträge

der Folgefrucht. Am Standort in Viehhausen (7,7°C; 790 mm NS) bestanden die Varianten der Zwischenfrüchte aus verschiedenen Leguminosen in Reinsaat und denselben Leguminosen im Gemenge mit Ölrettich. Die Biomasseerträge lagen zwischen 26 dt TM ha⁻¹ (Perserklee) und 38,9 dt TM ha⁻¹ (Saatwicke + Ölrettich). Der Ölrettich in Reinkultur erreichte immerhin 36,3 dt TM ha⁻¹. Das Gemenge aus Leguminose und Ölrettich erbrachte in fast allen Fällen einen höheren Ertrag, als die entsprechende Leguminose in Reinsaat. Es bestätigt sich damit, dass der Ölrettich (und andere Kruziferen) wesentlich zur Massebildung beitragen. Der Stickstoffertrag im Versuch von Reents und Möller (2000) war in der Variante mit Saatwicke + Ölrettich am höchsten, am niedrigsten im Gemenge Perserklee + Ölrettich und bei Ölrettich in Reinsaat. Insgesamt bestätigt das die Ergebnisse bezüglich Biomasseertrag und Stickstoffertrag in unseren Untersuchungen. Leguminosen im Gemenge mit Nichtleguminosen ergeben höhere Trockenmasseerträge als die Leguminosen in Reinsaat. Leguminosen konnten aber aufgrund des höheren Stickstoffanteils in der Biomasse ebenso hohe Stickstofferträge erzielen wie Nichtleguminosen-Gemenge mit höheren Trockenmasseerträgen. Die Hypothese I bezüglich einer gleichwertigen Ertragsbildung von legumen und nichtlegumen Zwischenfrüchten konnte damit nicht bestätigt werden.

In Zwischenfruchtvarianten mit Leguminosen (im Gemenge oder als Reinsaat) wird ein Teil des Stickstoffertrages der Pflanzen aus der BNF bezogen. Biederbeck et al. (1996) fanden unter trockenen Bedingungen in Saskatchewan, Canada Fixierleistungen zwischen 6 kg N ha⁻¹ und 69 kg N ha⁻¹. Müller und Thorup-Kristensen (2001) untersuchten auf der Insel Funen in Dänemark (719 mm NS; 8,1 °C; sandiger Lehm) die Stickstoff-Fixierleistung verschiedener legumen Zwischenfrüchte und kamen dabei auf Werte bis zu 149 kg N ha⁻¹. Die für var1 (leg + n-leg) und var2 (leg) geschätzte Stickstoff-Fixierung der Zwischenfrüchte im Herbst 2002 liegen im unteren Bereich dieser Vergleichswerte. Aufgrund der standorttypischen Trockenheit ist dies nicht überraschend. In beiden Varianten stammte trotzdem ein erheblicher Anteil des gesamt-pflanzlichen Stickstoffs aus der BNF. Dementsprechend war eine geringere Reduktion des mineralischen Stickstoffs im Boden zu erwarten als in var3 (n-leg). Dies traf allerdings nur für die var2 (leg) zu (vgl. Kap. 3.2 und Kap. 4.2).

Die gravierenden Unterschiede zwischen den Jahren 2002 und 2004 zeigen die starke Abhängigkeit des Erfolges eines Zwischenfruchtanbaus von der Witterung. In feuchten Jahren kann der Zwischenfruchtanbau im Marchfeld zu durchaus befriedigenden Ergebnissen bezüglich Biomasseertrag, Stickstoffertrag und Stickstoff-Fixierleistung führen, während in trockenen Jahren der Erfolg fast gänzlich ausbleiben kann. Unter günstigen Bedingungen erzielte ein Gemenge aus Leguminosen und Nichtleguminosen das beste Ergebnis.

4.2 Stickstoff- und Bodenwasserhaushalt

Zwischenfrüchte als adäquates Mittel zur Verringerung des Stickstoffaustrages durch Versickerungen sind unumstritten. So fanden Hösch und Dersch (2003) in Untersuchungen über einen Zeitraum von 10 Jahren, im Bereich der konventionellen Landwirtschaft, Zwischenfruchtanbau als die mit Abstand wirksamste Bewirtschaftungsmaßnahme, um den Stickstoffaustrag durch Sickerung zu reduzieren. Askegaard et al. (2005) kamen für Fruchtfolgen im Organischen Landbau zu ähnlichen Ergebnissen. Nur der Anbau von Zwischenfrüchten führte zu einer deutlichen Reduktion (30 – 38 % auf sandigem Boden) des N-Austrages durch Versickerung. Beide Untersuchungen fanden allerdings unter feuchteren klimatisch Bedingungen, als die im Marchfeld statt.

Die Verringerung des Stickstoffaustrags basiert zum einen auf die Reduktion des Gehaltes an mineralischem Reststickstoff im Boden. Durch den zusätzlichen Wasserbedarf, und durch eine Erhöhung der Wasserspeicherkapazität des Bodens (Joyce, 2002), können Zwischenfrüchte zum anderen auch den Wasserhaushalt beeinflussen und zu einer Verminderung der Sickerwassermengen führen.

Durch die günstigen Bedingungen im Herbst 2002 (ausreichende Wasserversorgung, möglichst früher Aussattermin) und entsprechender Biomasseproduktion war eine deutliche Differenzierung der Zwischenfruchtwirkung auf den Gehalt an mineralischen Stickstoff im Boden zu messen. Var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) hinterließen nur unbedeutende Mengen mineralischen Stickstoff im Boden. Var2 (leg) führte zwar zu einer signifikanten Reduktion im Vergleich zur Referenz ohne Zwischenfruchtanbau, hinterlies aber noch immer beträchtliche Mengen mineralischen Stickstoffs im Boden. Zum Zeitpunkt des Umbruchs der Zwischenfrüchte, Anfang November 2002, befanden sich zwischen 60% und 70% des mineralischen Stickstoffs in var2 (leg) bzw. var4 (sbr) in einer Tiefe zwischen 30 cm und 90 cm (Abbildung 3). Da die Mineralisierung des Stickstoffs zum größten Teil im A_p -Horizont abläuft, weist dies auf eine Verlagerung hin. Die Hypothese II, Leguminosen würden erst den bodenbürtigen Stickstoff aufnehmen und erst dann zusätzlich Luftstickstoff fixieren, wurde nicht bestätigt. Auch die Annahme, dass durch die erhöhte Aktivität der mikrobiellen Biomasse im Boden (siehe Kap. 1.2) ausreichende Mengen an Stickstoff organisch gebunden würden, um auch bei legumen Zwischenfrüchten den Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden weitgehend zu reduzieren (Hypothese III), wurde nicht bestätigt. Das Gemenge aus Leguminosen und Nichtleguminosen konnte hingegen bei einer tendenziell sogar höheren Stickstoff-Fixierleistung als im reinen Leguminosenbestand den mineralischen Stickstoff im Boden auf einen vernachlässigbar geringen Wert absenken.

Die Differenzierung des mineralischen Stickstoffs im Boden hielt nicht bis zur nächsten Probenahme Ende März 2003 an. Der herbstliche Überhang in den var2 (leg) und var4 (sbr) hat sich wahrscheinlich in tiefere Schichten verlagert. In var2 (leg) war der N_{\min} -Gehalt tendenziell höher. Das ist zum einen ein Hinweis auf die rasche Mineralisierung der Leguminosen-Residuen auch schon bei sehr niedrigen Temperaturen (Magid et al., 2001; Quemada and Cabrera, 1995), und zum anderen auf einen positiven Priming-Effekt

(Kuzayakov et al., 2000), durch den zusätzlich zur rascheren Freisetzung des organisch gebundenen Stickstoffs aus den Residuen auch vermehrt Stickstoff aus der organischen Substanz im Boden mineralisiert wird. Nach dem Zwischenfruchtanbau im Herbst 2004 konnten zwar keine signifikant Unterschiede zwischen den Varianten abgesichert werden, aber in ihren Tendenzen spiegelten die Gehalte an mineralischen Stickstoff die Ergebnisse der Probenahmetermine im Herbst 2002 und im Frühjahr 2003 wider. Das Niveau war insgesamt niedriger. Die trockene Witterung im Spätsommer bzw. Herbst des Jahres 2004 hat also nicht nur einen schlechten Aufwuchs der Zwischenfrüchte zur Folge, sondern führte auch zu einer geringeren N-Mineralisation. Bei insgesamt trockenen Wintern ist außerdem kaum eine Sickerung zu erwarten, wodurch die Nitratbelastung des Grundwassers einigermaßen entschärft ist. Zu Problemen könnten längere milde, niederschlagsreiche Perioden im Herbst, nach dem Umbruch der Zwischenfrüchte, oder im Frühjahr vor dem Anbau der Folgefrucht führen. Dies gilt allerdings unabhängig von der Entwicklung der Zwischenfrüchte.

Ähnliche Auswirkungen von legumen und nichtlegumen Zwischenfrüchten auf die N_{\min} -Gehalte fanden auch Reents und Möller (2000). Nach dem Anbau von Ölrettich bzw. Ölrettich im Gemenge mit einer Leguminose als Zwischenfrucht lagen die N_{\min} -Gehalte nach Umbruch dieser Zwischenfrüchte um 5 kg N ha^{-1} . Wurden die verwendeten Leguminosen in Reinsaat angebaut, wurden im Schnitt noch etwa 20 kg N ha^{-1} gemessen. Die Erhöhung des N_{\min} -Gehaltes bis in den April war nach Ölrettich und Ölrettich im Gemenge mit einer Leguminose geringer als nach Leguminosen. Miersch und Vetter (2000) fanden in eigenen Untersuchungen und in einem Literaturüberblick zur Auswirkung von verschiedenen Zwischenfrüchten auf den N_{\min} -Gehalt und das Auswaschungspotential dieselbe generelle Reihung. Leguminosen hinterlassen die höchsten Gehalte an mineralischen Stickstoff, Nichtleguminosen die niedrigsten, Gemenge aus legumen und nichtlegumen Zwischenfrüchten liegen meist dazwischen.

In der NO_3 -Konzentration in der Bodenlösung spiegelte sich das Muster der N_{\min} -Gehalte wider. In 140 cm Tiefe war im Jänner 2003 die Konzentration in var4 (sbr) mit $26 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$ am höchsten, gefolgt von var2 (leg) mit $12 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$. Die Konzentration der beiden Varianten mit Nicht-Leguminosen lagen mit ca. $3 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$ erheblich niedriger. Die Konzentrationen in diesen beiden Varianten blieben bis April 2003 auf diesem niedrigen Niveau, während sie sich in var2 (leg) auf $24 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$ und in var4 (sbr) auf $35 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$ steigerten. Im Herbst 2004 wurden zwischen Kartoffelernte und Anbau des Winterroggen auf keiner Variante Zwischenfrüchte angebaut. In der Bodenlösung in 140 cm Tiefe wurden im folgenden Winter und Frühling durchschnittlich höhere NO_3 -Konzentration gefunden als im Vorjahr. Tendenziell zeigten sich die Gehalte in den Varianten noch immer beeinflusst vom Zwischenfruchtanbau im Herbst 2002. Das weist auf eine sehr langsame Verlagerung unterhalb von 140 cm hin. Es ist auch anzunehmen, dass im Sommer mit dem Kapillarstrom auch wieder Nitrat nach oben transportiert wird. Der Zwischenfruchtanbau im Herbst 2004 führte nur zu geringer Differenzierung zwischen den Varianten. Die Nitrat-N-Gehalte waren insgesamt niedriger als im Vorjahr. In var3 (n-leg) wurden tendenziell niedrigere Gehalte gemessen.

Der Grundwasserschwellenwert für NO_3 liegt nach der Novellierung des Jahres 2002 (BGBl. II Nr. 147/2002) bei $45 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ (entspricht $10 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$). Wird dieser Wert auch als Grenzwert für die Konzentration in der Bodenlösung bzw. im potentiellen Sickerwasser angenommen, blieben im Frühjahr 2003 nur var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) unterhalb dieser Schwelle. In den folgenden Sickerungsperioden überstiegen die Konzentration in den Bodenlösung aller Varianten zumindest in bestimmten Perioden den Grenzwert. Die niedrigsten Werte wurden durchgehend in var3 (n-leg) gefunden.

Die Bestimmung der Sickerung und der tatsächlich verlagerten Stickstoffmengen ist für ein Gebiet mit so geringer Sickerwasserbildung wie das Marchfeld sehr von der Genauigkeit der Eingangsdaten abhängig. Die aus der Wasserbilanz errechneten Ergebnisse konnten aufgrund teilweise fehlender Ausgangsdaten und durch Verfälschung der Messwerte für den Wassergehalt im Bodenprofil durch bestimmte Witterungsereignisse (Starkregen, Frost) nicht während des gesamten Untersuchungszeitraums verwendet werden. Für die verbleibenden Zeiträume standen Ergebnisse aus der Simulation zur Verfügung. Als Ursache für die eingeschränkte Anwendbarkeit der klimatischen Wasserbilanz kann einerseits eine Überschätzung der Evapotranspiration in den Wintermonaten angenommen werden. Zum anderen beinhaltet auch die Berechnung des Wassergehaltes eine Ungenauigkeit, da dabei angenommen wird, dass sich dieser zwischen den Messsonden in zwei benachbarten Tiefenstufen linear verändert. Niederschläge, die in der oberen Bodenschicht zu Veränderungen führen, können durch die FDR - Sonden in 10 cm Tiefe nicht erfasst werden. Trotz der oben beschriebenen Unsicherheiten geben die errechneten Werte Auskunft über die Versickerungspotenziale für die aktuellen Verhältnisse. Die aus der klimatischen Wasserbilanz in den Frühjahrsmonaten berechnete Sickerung wird auch durch das Ansteigen der Wassergehalte in 140 cm Tiefe zu diesem Zeitpunkt gestützt.

Während die klimatische Wasserbilanz nur Auskunft über die Summe von zu- und abgeflossenen Wassermengen gibt, aber keine Ergebnisse zur Dynamik der Wasserbewegung liefert, basiert die Simulation auf der Lösung der instationären Bewegungsgleichung (Richards-Gleichung) und ist somit prozessorientiert. Sie ermöglicht deshalb eine echte Bilanzierung und Angabe von Mengen. Weiters erfolgt eine Angabe der Richtung der Wasserbewegung und vor allem wird ein besseres Verständnis der Prozessabläufe, z.B. Umlagerungsprozesse im Profil können veranschaulicht werden, unterstützt. Die Kombination der verschiedenen Messungen von Wassergehalt und Wasserspannung mit Simulationen diente wesentlich der Beschreibung der Versuchsbedingungen. Dadurch ist eine sehr gute Ergebnisinterpretation möglich, Fehlinterpretationen werden vermieden. Informationen über potentielle Versickerungen wurden ausgewiesen.

In den Winter- bis Frühjahrsmonaten traten in allen Jahren geringe Sickerwassermengen (Tabelle 7) auf, die bei hohen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zu einer durchschnittlichen jährlichen Nitratverlagerung von 9 kg N ha^{-1} führten (Tabelle 8). Die jährliche Stickstofffracht konnte durch Zwischenfruchtgemenge, die Nichtleguminosen enthalten, gegenüber Schwarzbrache um 8 kg N ha^{-1} reduziert werden. Zwischenfruchtgemenge aus Leguminosen erzielten nur eine Verringerung um 5 kg N ha^{-1} (Tabelle 8).

Liebhard et al. (2005) modellierten für dasselbe Untersuchungsgebiet Sickerwassermengen und Stickstofffrachten für eine Fruchtfolge mit Zuckerrübe im konventionellen Abbau. Es wurden verschiedene Bodenbearbeitungsmethoden aber auch der Anbau von Zwischenfrüchten im Vergleich zur Brache untersucht. Die Eingangsdaten für die Modellierung stammten von Erhebungen aus zehn Jahren Feldversuch. Die Modellierung betraf hauptsächlich den Einfluss verschiedener im Marchfeld vorhandener Bodenarten unterschiedlicher Durchlässigkeit. Die errechneten jährlichen Sickerungen lagen im 10 jährigen Durchschnitt, je nach Bodenart und Bewirtschaftung, zwischen 42 und 168 mm, die N-Frachten zwischen 0,1 – 20,5 kg N ha⁻¹. Der Zwischenfruchtanbau reduzierte laut diesen Untersuchungen (Liebhard et al., 2004) die jährliche N-Frachten um 2,0 bis 4,6 kg N ha⁻¹. Diese Verringerung ist in etwa halb so groß wie die in unserer Untersuchung durch Zwischenfruchtgemenge erzielten Effekte.

4.3 Vorrfruchtwirkungen der Zwischenfrüchte

In der Fruchtfolge des vorliegenden Versuches wurden nach den Zwischenfrüchten im Jahr 2002 Kartoffeln, nach denen im Jahr 2004 Sommergerste angebaut. Aufgrund des guten Aufwuchs und der hohen Biomasseproduktion der Zwischenfrüchte im Herbst 2002 war, ausgehend von Ergebnissen aus anderen Versuchen (z.B. Reents und Möller, 2000), eine Ertragssteigerung bei Kartoffeln zu erwarten. Die Witterung im Sommer 2003 war allerdings extrem trocken und zusätzlich wurden die Kartoffeln massiv durch einen Befall mit Kartoffelkäfer geschädigt. Dadurch kamen etwaige Vorteile durch die vorangegangenen Zwischenfrüchte nicht zum Tragen, und es wurden zwischen den Varianten keine Unterschiede in den Erträgen festgestellt. Den einzigen Hinweis auf eine bessere Stickstoffversorgung in den Varianten mit Zwischenfrüchten, vor allem in var2 (leg) gaben die tendenziell höheren N-Anteile sowohl in den Knollen als auch im Kartoffelkraut dieser Varianten im Vergleich zur Schwarzbrache. Es zeigte sich, dass bei zu trockenen Bedingungen die höhere Stickstoffversorgung nicht genutzt werden konnte. Es konnten aber auch keine Ertragseinbußen aufgrund der Wasser Konkurrenz der Zwischenfrüchte zur nachfolgenden Hauptfrucht festgestellt werden. Die zweite nachfolgenden Hauptfrucht, der Winterroggen (2003/04), konnte anscheinend noch von der Zwischenfruchtwirkung profitieren. Die Kornerträge in den Varianten mit Zwischenfrüchten im Herbst 2002 lagen tendenziell alle über dem in der Variante ohne Zwischenfruchtanbau (Tabelle 10).

Die Zwischenfruchtbestände im Herbst 2004 waren, aufgrund der Trockenheit beim Anbau und des daher verzögerten Auflaufens, sehr gering. Die Erträge und Proteingehalte der nachfolgenden Sommergerste unterschieden sich in den vier Varianten nicht signifikant. Tendenzuell waren die Erträge in var2 (leg) am höchsten. Auch der Rohproteingehalt war in dieser Variante tendenziell höher als in den beiden anderen Varianten mit Zwischenfrüchten. In var4 (sbr) war der Rohproteingehalt jedoch genauso hoch.

Entgegen dieser Ergebnisse ist vor allem auf leichten Böden und bei ausreichender Wasserversorgung eine ertragssteigernde Wirkung durch Zwischenfruchtanbau vielfach belegt. Nach Renius et al. (1992) kann man bei der ersten Nachfrucht einen Mehrertrag von

4 – 6 % erwarten. Dieser ist natürlich auch stark von der Fruchtfolge und den klimatischen Standortbedingungen abhängig. Dachler und Köchl (1994) untersuchten die Auswirkung verschiedener Zwischenfrüchte (Untersaaten und Stoppelsaaten, Leguminosen und Nichtleguminosen) auf den Ertrag der ersten und zweiten Nachfrucht. Sie konnten nur bei den Untersaaten signifikante Mehrerträge feststellen, bei denen es sich durchwegs um Leguminosen handelte. Die gemessenen Mehrerträge waren am feuchteren Standort in Wieselburg (836 mm; 8,5 °C) höher als am Standort in Fuchsenbigl (500 mm; 9,1 °C), der eher den Verhältnissen am Standort der vorliegenden Untersuchung entspricht.

Reents und Möller (2000) erfassten in ihren Untersuchungen in Oberbayern (790 mm; 7,7 °C; Lehmböden) die Auswirkung von verschiedenen Zwischenfrüchten auf Ertrag und Qualität der Folgefrüchte. Die geprüften Hauptkulturen waren dabei Winterweizen bzw. Kartoffeln. Der Weizenertrag nach Ölrettich als Zwischenfrucht war dabei signifikant geringer als der nach Sommerwicke oder Futtererbse. Die Erträge in den Varianten mit Gemengen aus der jeweiligen Leguminose und Ölrettich als Zwischenfrucht lagen dazwischen. Auch die Proteingehalte im Weizen wurden durch Leguminosen positiv beeinflusst und lagen nach Futtererbse als Zwischenfrucht signifikant höher als nach Ölrettich. Die Prüfung der Erträge der Kartoffeln als Nachfrucht führte zu ähnlichen Ergebnissen. Sie lagen bei legumen Zwischenfrüchten tendenziell, bei der Zottelwicke sogar signifikant höher als bei der Variante mit Ölrettich als Zwischenfrucht. Der Stärkegehalt in den Kartoffeln war nach Zottelwicke als Zwischenfrucht signifikant geringer als nach Ölrettich.

Hansen et al. (2000) verglichen Anbausysteme, in denen nach jahrelangem Zwischenfruchtanbau dieser ausgesetzt wurde und solche in denen nach Jahren erstmals wieder bzw. kontinuierlich Zwischenfrüchte angebaut wurden. Das Aussetzen des Zwischenfruchtanbaus führte in den ersten vier Jahren zu keinen Ertragseinbußen, während das etablieren von Zwischenfrüchten nach zwei Jahren die Erträge bereits auf das Niveau eines Systems mit kontinuierlichem Zwischenfruchtanbau steigerte.

4.4 Wirtschaftlichkeit der Zwischenfrüchte

Ohne Berücksichtigung der ÖPUL-Förderung könnten bei günstigen Witterungsbedingungen und entsprechenden Mehrerträgen durch den Zwischenfruchtanbau zumindest var3 (n-leg), bei außerordentlich hohen (und damit außerordentlich unwahrscheinlichen) Mehrerträgen auch var1 (leg + n-leg) ohne finanzielle Einbußen durchgeführt werden. Wie das Jahr 2004 zeigte, muss aufgrund der wechselnden Witterungsverhältnissen auch mit dem Ausfallen von Zwischenfruchtwirkung gerechnet werden. Generell ist daher festzuhalten, dass der Zwischenfruchtanbau im Marchfeld nur mit Hilfe der derzeitigen ÖPUL-Förderung ohne wirtschaftliche Verluste zu betreiben ist.

Die durch den Zwischenfruchtanbau verursachten Mehrkosten können je nach Art der Zwischenfrüchte ganz oder teilweise durch die derzeit gültige ÖPUL-Prämie ausgeglichen werden. Das Saatgut für die in diesem Versuch verwendeten nicht-legumen Zwischenfrüchte

war gegenüber den legumen Zwischenfrüchten erheblich günstiger. Daher würde ein Zwischenfruchtanbau entsprechend der var3 (n-leg) letztlich keine Mehrkosten verursachen und hätte bezüglich der Reduktion des auswaschungsgefährdeten Stickstoff eine optimale Wirkung. Eine monetäre Berücksichtigung des in den leguminosenhaltigen Varianten aus der Luft fixierten Stickstoffs würde auch den Anbau Zwischenfrüchten entsprechend var1 (leg + n-leg) und var2 (leg) rechtfertigen.

Eine große Zahl der Leistungen von Zwischenfrüchten geht in die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus nicht ein, da sie teilweise erst langfristig Auswirkungen zeigen, z.B. Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch Humusaufbau und Erhöhung der mikrobiellen Aktivität oder Erosionsschutz. Andere führen zu keinem direkten finanziellen Vorteil für den Landwirt, haben aber enorme ökologische Bedeutung, wie die damit verbundene Erhöhung der Biodiversität in Agrarsystemen und der Grundwasserschutz. Wenn diese Leistungen auch schwer in Zahlen zu fassen sind, bilden sie doch eine wichtige Argumentationsbasis für den Zwischenfruchtanbau und dessen Förderung.

5 Schlussfolgerungen

Der Zwischenfruchtanbau im Rahmen dieses Projektes wurde in den zwei Jahren (2002 bzw. 2004) mit sehr unterschiedlichem Erfolg und Ergebnis durchgeführt. Die beiden Jahre stellen gewissermaßen zwei Extrema der möglichen Witterungsverhältnisse im Marchfeld dar. Im Jahr 2002 war eine gute Wasserversorgung gegeben, und die Zwischenfrüchte kamen problemlos zum Auflauf und erreichten eine sehr gute Biomasseproduktion. Im Jahr 2004 dagegen führten die trockenen Bedingungen zu sehr geringen Erträgen und die Zwischenfruchtwirkung war dementsprechend gering.

Unter günstigen Witterungsbedingungen hat sich ein Gemenge aus Legumen und nichtlegumen Zwischenfrüchten in mehrfacher Hinsicht als empfehlenswert erwiesen. Die Ertragsbildung der Zwischenfrüchte und ihre gesamt-pflanzliche Aufnahme von Stickstoff waren in dieser Variante am höchsten. Obwohl ein beträchtlicher Anteil des Stickstoffs aus der Luft fixiert, und somit zusätzlich in den Kreislauf eingebracht wurde, reduzierte var1 (leg + n-leg) den mineralischen Stickstoffgehalt im Boden in gleichem Ausmaß wie der Bestand aus nicht-legumen Zwischenfrüchten.

Die Methodik der klimatischen Wasserbilanz zur Ermittlung der Sickerwassermengen ist für einen trockenen und inhomogenen Versuchsstandort sehr empfindlich gegenüber Unsicherheiten in den Eingangsdaten. Prozessorientierten Simulationsmodellen zur Ermittlung der Sickerung ist der Vorzug zu geben. Eine Auswirkung des Zwischenfruchtanbaus auf die Sickerwassermengen konnte weder anhand der klimatischen Wasserbilanz noch in der Simulation nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen, dass die kleinräumige Inhomogenität des Bodens, insbesondere in Hinblick auf seine Wasserspeicherefähigkeit, eine weitaus größere Auswirkung auf die Sickerung hat als die Zwischenfrüchte.

Die Simulation in Verbindung mit der Datenerfassung diente sehr wesentlich der Beschreibung der Versuchsbedingungen. Dadurch konnten Fehlinterpretationen vermieden werden. Weiters bestand die Möglichkeit, fehlende Datensätze zu ergänzen. Schlussendlich konnten Informationen über potentielle Versickerungen ausgewiesen werden.

Zwischenfruchtgemenge, die Nichtleguminosen enthalten, konnten die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser sowie die Nitratausträge reduzieren.

Auf die Ertragsbildung in der Folgefrucht wurde in diesen Untersuchungen keine signifikanten Auswirkungen festgestellt. In ähnlichen Untersuchungen wurden zumeist ertragssteigernde Wirkungen von Zwischenfrüchten gefunden, die in der Reihenfolge Nicht-Leguminosen < Gemenge aus Leguminosen und Nichtleguminosen < Leguminosen zunahmen.

Vom ökologischen Standpunkt, insbesondere hinsichtlich der Nitratproblematik im Grundwasser sind var1 (leg + n-leg) und var3 (n-leg) gleichermaßen empfehlenswert. Da es in unserem Versuch zu keiner signifikanten Differenzierung in der Ertragsbildung der Hauptfrüchte kam, wäre damit der kostengünstigeren var3 (n-leg) der Vorzug zu geben. Dabei sollten allerdings der durch BNF zusätzlich eingebrachte Stickstoff in var1 (leg + n-leg)

nicht außer acht gelassen werden, durch den bei günstigeren Bedingungen für die Folgekultur durchaus höhere Erträge zu erwarten sind. Die reine Leguminosen-Variante bringt gegenüber der Mischvariante keine Vorteile, aber ein deutliches Nitratauswaschungsrisiko mit sich. Letztlich bleiben die var1 (leg + n-leg) und die var3 (n-leg) empfehlenswert. Wobei bei guter Wasserversorgung und ausreichend frühem Aussattermin eher var1 (leg + n-leg) angebaut werden sollte, und bei trockenen Bedingungen und spätem Aussattermin (und damit unsicheren Erfolg) der kostengünstigeren var3 (n-leg) der Vorzug gegeben werden sollte.

6 Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass Zwischenfruchtgemenge aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen die positiven Auswirkungen der Gemengepartner kombinieren. Es bildete den höchsten Ertrag, reduzierte den Gehalt an mineralischem Stickstoff sehr effizient und bringt trotzdem zusätzlichen Stickstoff in den Boden ein. Es zeigte sich auch, dass Auswirkungen auf den Ertrag der Folgefrüchte sehr von den aktuellen Witterungsverhältnissen mitbeeinflusst werden. Abgesicherte Aussagen könnten diesbezüglich daher nur aufgrund langjähriger Versuche gemacht werden.

Ein interessante Fragestellung im Anschluss an diese Arbeit liegt in der Optimierung der Artenzusammenstellung von Zwischenfruchtgemengen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen, wobei auf eine gegenseitige Ergänzung hinsichtlich der Bodendurchwurzelung (flach – tief), ihrer Keimansprüche und der Vertäglichkeit mit den Hauptfrüchten in der Fruchtfolge Rücksicht genommen werden muss.

Ein andere Fragestellung wäre die Art des Zwischenfruchtanbaus. Dabei scheint die Etablierung als Untersaat untersuchenswert. Vor allem vor Winterungen könnte sich dies als sinnvoll erweisen, da, wie sich zeigte, auch die kurze Brache zwischen Kartoffelernte und Anbau des Winterroggens zu einer beträchtlichen Anreicherung des mineralischen Stickstoffs im Herbst führte. In niederschlagsreichen Jahren ist eine Aussaat der Winterung in die Zwischenfrucht denkbar, wie sie in der Arbeit von Mauscherling et al. (2005) unter den allerdings deutlich feuchteren Bedingungen bei Kiel erfolgreich durchgeführt wurde.

Es konnte gezeigt werden, dass das Anwenderwerkzeug zum Studium der Wasserbewegung ein geeignetes Mittel darstellt und noch einige weitere Studien ermöglicht. Es ist zu empfehlen, weitere Analysen in einer eigenen Publikation zu veröffentlichen.

Danksagung

Wir danken Christoph Gabler, Bärbel Tappeser, Erich Lang, Wolfgang Sokal und Fritz Forster für ihre fachkundige Mitarbeit im Feld und Labor. Josef Eitzinger unterstützte die Berechnungen der Evapotranspiration. Ruth Kratochvil sind wir für die Hilfestellung bei der Kalkulation der Deckungsbeiträge zu herzlichem Dank verpflichtet. Ermöglicht wurde das Projekt durch die Finanzierung durch das Lebensministerium.

7 Literaturverzeichnis

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, D.(1998): Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Pap.No.56. Rome.
- Askegaard, M.; Olesen, J.E.; Kristensen, K. (2005): Nitrate leaching from organic arable crop rotations: effects of location, manure and catch crop. *Soil Use and Management* 21-2: 181 – 188.
- Beck, T. (1975): Der Einfluß langjähriger Monokultur auf die Bodenbelebung im Vergleich zur Fruchtfolge. *LWF* 31: 268-276.
- Bodenkundliche Kartieranleitung, AG Boden, 4 Auflage, Hannover 1994
- Brookes, P. C.; Landman, A.; Pruden, G.; and Jenkinson, D. S. (1985): Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* 17, 837-842.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2002): Standardbeiträge für den Biologischen Landbau 2002/03. Wien. <http://gpool.lfrz.at/gpool/main.cgi?catid=13732&rq=cat&catt=fs&tfqs=catt>. Letzter Zugriff: 22.11.2005.
- Dachler, M. und Köchl, A. (1994): Die Wirkung verschiedener Gründüngungspflanzen auf Ertrag und Erlös der Folgekultur. *Die Bodenkultur*, 45 (2), 139 – 146.
- Ehlers, W. (1997): Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. *Pflanzenbauwissenschaften* 1 (3): 97-108.
- Frank, R. (1999): Bodenzustandsinventur des Schläges R 1/2 der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf mittels Kriging- und Polynominterpolation. Diplomarbeit, Institut für Bodenforschung der Universität für Bodenkultur Wien, 1-71.
- Hampel U. (1996): Gründüngung, Grundlage der Bodenfruchtbarkeit. Graz: Leopold Stocker Verlag
- Hansen, E.M.; Kristensen, K.; Djurhuus, J. (2000): Yield Parameters as Affected by Introduction or Discontinuation of Catch Crop Use. *Agronomy Journal* 92: 909-914.
- Hösch J.; Dersch G. (2003): Einfluss von Bewirtschaftungsmassnahmen auf den zeitlichen Verlauf von N-Verlusten. 10-Lysimetertagung, 29.-30. April 2003, HBLA Raumberg, Irdring, Austria. 2003; 67-70.
- Joyce, B.A.; Wallender, W.W.; Mitchel, J.P.; Huyck, L.M.; Temple, S.R.; Brostrom, P.N.; Hsiao, T.C. (2002): Infiltration of Soil Water Storage under Winter Cover Cropping in California's Sacramento Valley. *Transaction of the ASAE* 45 (2): 315 – 326.
- Kandeler, E. (1993): Bestimmung der N-Mineralisation im anaeroben Brutversuch. In: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, and R. Margesin (Hrsg): *Bodenbiologische Arbeitsmethoden.*, 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 160-161.
- Kastanek, F., Hauer, G., Loiskandl, W. (2002): The concept of virtual lysimeters to measure groundwater recharge and evapotranspiration.. In: Singh, V.P., Al-Rashed, M., Sherif, M.M. (Eds.): *Surface Water Hydrology*, vol. 1. Proceedings of the International Conference on Water Resources Management in Arid Regions
- Kogler, F.; Blumauer, E.; Deimel, M.; Lindner, H.; Pröll, W.; Moitzi, G.(2005): ÖKL-Richtwerte für die Maschinenselbstkosten 2005. Wien: ÖKL Eigenverlag.
- Kolbe, H.; Schuster, M.; Hänsel, M.; Grünbeck, A.; Schließer, I.; Köhler, A.; Karalus, W.; Krellig, B.; Pommer, R.; Arp, B. (2004): Zwischenfrüchte im Ökologischen Landbau. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft - Fachmaterial. Eigenverlag.
- Kuzyakov, Y.; Friedel, J.K.; and Stahr, K. (2000): Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1485-1498.

- Liebhard, P.; Schmid, E.; Bodner, G.; Kaul, H.P. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung und einer Zwischenfruchtbeegrünung auf Sickerwasserkriterien bei Zuckerrübe im semiariden Produktionsgebiet. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 17: 48 – 49.
- Liebhard, P.; Schmid, E.; Sinabell, F. (2004): Effect of Reduced Tillage Systems and Covercrops on Sugar Beet Yield and Quality, Groundwater Recharge and Nitrogen Leaching in the Pannonic Region Marchfeld, Austria. *Pflanzenbauwissenschaften* 8: 1 –9.
- Miersch, M. und Vetter, R. (2000): Stickstoffversorgung und -dynamik in Fruchtfolgen vieharter Betriebe des ökologischen Landbaus. ITADA. Müllheim, Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung. Abschlußbericht zum Projekt A 1.5 des Grenzüberschreitenden Instituts zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung.
- Magid, J.; Henriksen, O.; Thorup-Kristensen, K.; Müller, T. (2001): Disproportionally high N-mineralisation rates from green manures at low temperatures – implications for modelling and management in cool temperate agro-ecosystems. *Plant and Soil* 228: 73 – 82.
- Mauschering, I.; Loges, R.; Taube, F. (2005): Beisat von Zwischenfrüchten als Möglichkeit zur Reduktion der N-Auswaschung in Wintergetreide. In: Kämpf, A.; Claupein, W.; Graeff, S.; Diepenbrock, W. (Hrsg.): *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*. Band 17. 48. Jahrestagung vom 27. bis 29. September 2005 in Wien. Kurzfassung der Vorträge und Poster. Stuttgart: Verlag Günther Heimbach, 140 – 141.
- Müller, T. and Thorup-Kristensen (2001): N-fixation of Selected Green Manure Plants in an Organic Crop Rotation. *Biological Agriculture and Horticulture*. Vol.18, 345 – 363.
- Paltineanu, C.C., Starr, J.L. (1997): Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci.Soc.Am.* J.61, 1576-1585.
- Quemada, M.; Cabrera, M.L. (1995): Carbon and Nitrogen Mineralized from Leaves and Stems of Four Cover Crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 471 –477.
- Reents, H. J. and Möller, D. (2000): Effects of different green manure catch crops grown after peas on nitrate dynamics in soils and on yield and quality of subsequent potatoes and wheat. T. Alföldi, W. Lockeretz, and U. Niggli (Eds.): *Proceedings 13th International IFOAM Scientific Conference*, Zürich. 73-76.
- Renius, W.; Lütke Entrüp, E.; Lütke Entrüp, N. (1992): *Zwischenfruchtanbau zur Futtergewinnung und Gründüngung. Ein Baustein zur Bodenfruchtbarkeit und zum Umweltschutz*. 3. Auflage. Frankfurt am Main: DLG-Verlag
- Schneeberger, W.; Eder, M.; Darnhofer, I.; Walla, Ch.; Zollitsch, W. (2005): *Stand des Ökologischen Landbaus in Österreich*. www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/_/H730-sozial/H733/pub/Biolandbau/2005_BIL_Biolandbau.pdf Letzter Zugriff: 22.11.2005
- Simunek, J., M. Th. van Genuchten and M. Sejna (2005): *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media*, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 270 pp.
- Stülpnagel, R. (1982): Schätzung der von Ackerbohnen symbiotisch fixierten Stickstoffmenge im Feldversuch mit der erweiterten Differenzmethode. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 150: 446-458.
- Vance, E. D.; Brookes, P. C.; and Jenkinson, D. S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19, 703-707.

8 Anhänge

8.1 Anhang 1 - Bodenphysikalische Untersuchungen

8.1.1 Laboruntersuchungen

Für die Bodenansprache und zur Entnahme von Bodenproben (gestörte und ungestörte) wurden zwei Bodenaufschlüsse errichtet. Die Bodenproben wurden am IHLW und am Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen analysiert. (Tabelle A 1)

Die ungestörten, vertikal entnommenen Stechzylinder dienten zur Bestimmung der Druckpotential - Wasseranteilsbeziehung, sowie zur Ermittlung der Trockendichte und des Porenanteils, zusätzlich wurde der Substanzanteil gemessen.

Mit den gestörten Bodenproben wurde die Korngrößenanalyse durchgeführt und die Feststoffdichte ermittelt.

Die erhobenen Bodenparameter dienen der Standortbeschreibung und geben Aufschluss über die kleinräumige Heterogenität in der Versuchsanlage und über die Tiefe in den Bodenaufschlüssen.

Tabelle A 1: Aufstellung für Probenentnahme und Probenbezeichnung

Plot 6	Petzenkirchen		IHLWW
Tiefe	Ungestörte Bodeprobe	Gestörte Bodenprobe	Gestörte Bodenprobe
0 – 33	6 AP (3X)	267,268,270 (1 Mischprobe)	L6AP (1X)
33 – 60	6 A (3X)	272, 275, 277 (1 Mischprobe)	L6A (1X)
60 – 85	6 AC (3X)	281, 282, 283 (1 Mischprobe)	L6AC (1X)
85+	6 C (3X)	284,285, 292 (1 Mischprobe)	L6C (1X)
Plot 9			
0 – 35	9 AP (4X)	297, 298, 299, 300 (1 Mischprobe)	L9AP (1X)
35 – 64	9 A (4X)	348, 349, 350, 351 (1 Mischprobe)	L9A (1X)
64 – 103	9 AC (4X)	353, 358, 364, 367 (1 Mischprobe)	L9AC (1X)
103+	9 C (4X)	369, 370,373, 376 (1 Mischprobe)	L9C (1X)
Parameter	η_p , ρ_d , Substanzanteil	ρ_s	Korngrößenanalyse

Die aus den Laboruntersuchungen gewonnenen Bodenparameter sind auch notwendige Eingangsparameter für die Simulation der vertikalen Wasserbewegung. Detaillierte Angaben zur Simulation sind im Anhang 3 zu finden.

8.1.1.1 Korngrößenanalyse

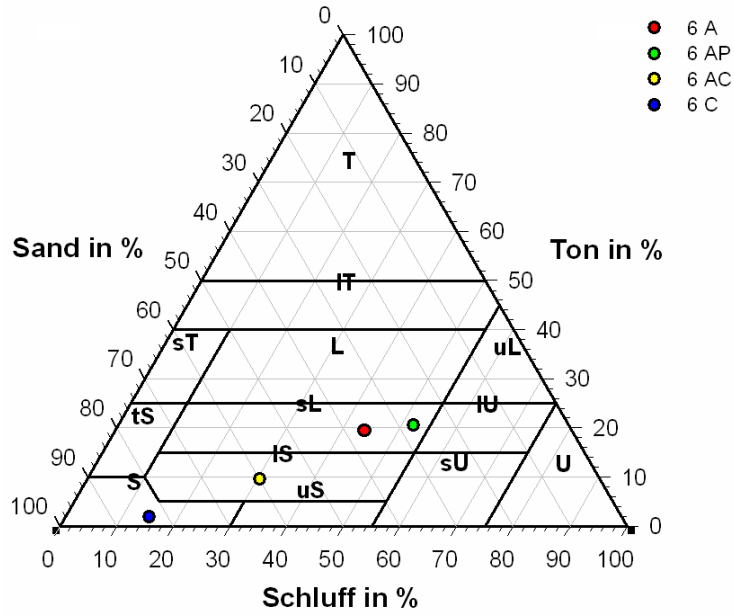
Die Korngrößenanalyse wurde an gestörten Bodenproben nach Ö-Norm L 1061 am IHLW durchgeführt (Tabelle A 2). Der Boden weist keinen nennenswerten Grobboden mit Korngrößen von > 2 mm auf. Die Analyse erfolgte durch Nasssiebung des Feinbodens bis 0,063 mm Teilchengröße und für die Korngröße < 0,063 mm durch Schlämmung (Sedimentationsverfahren nach KUBIENA).

Tabelle A 2: Korngrößenanalyse

Plot 6					
Tiefe (cm)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Bodenart nach Österr. Texturdreieck	Bodenart nach Bodenkundliche Kartierung
0 – 33	27,4	52,1	20,5	Sandiger Lehm	Lu
33 – 60	36,4	44,0	19,5	Sandiger Lehm	Ls2
60 – 90	59,9	30,6	9,5	Lehmiger Sand	Sl3
90 +	83,3	14,8	1,9	Sand	Su2
Plot 9					
0 – 35	19,1	58,7	22,2	Lehmiger Schluff	Lu
35 – 64	11,3	61,5	27,3	Schluffiger Lehm	Lu
64 – 103	12,5	60,2	27,3	Schluffiger Lehm	Uls
103 +	13,3	76,8	9,9	Schluff	Us

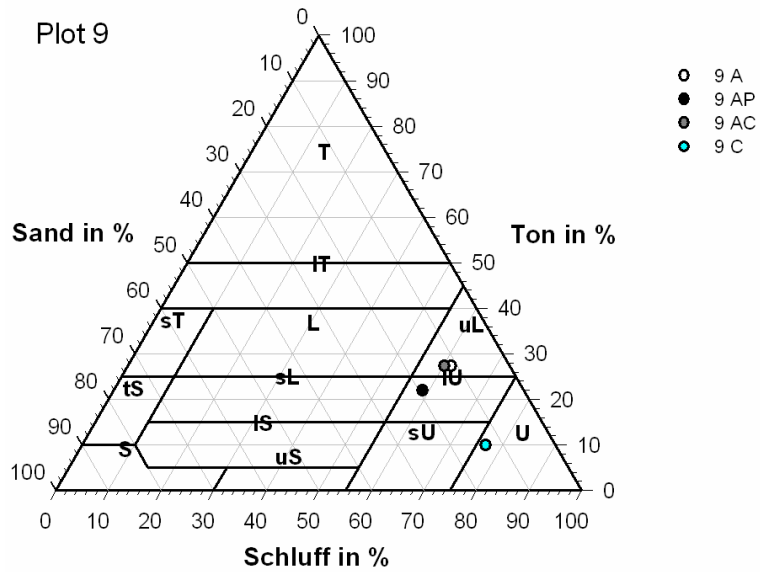
Die Bodenarten wurden entsprechend dem Österreichischen Texturdreieck bestimmt (Abbildung A 1). Zusätzlich sind in Tabelle A 2 die Bodenarten nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung eingetragen, die für die Abschätzung der Durchlässigkeitswerte Verwendung fand.

Plot 6



Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L 1050

Plot 9



Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L 1050

Abbildung A 1: Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L1050

Abbildung A 2 zeigt die beiden repräsentativen Bodenprofile. Diese Bodenprofile wurden auch der Simulation zugrunde gelegt. Das Bodenprofil Plot 6 enthält bis 60 cm sandigen Lehm und von 60 cm bis 90 cm lehmigen Sand. Ab 90 cm steht Sand an. Das Bodenprofil Plot 9 enthält bis 35 cm lehmigen Schluff und von 35 cm bis 103 cm schluffigen Lehm. Ab der Tiefe 103 cm steht Schluff an. Beide Aufschlüsse weisen im obersten Bodenbereich (0-10cm) einen höheren Anteil an organische Substanz auf.

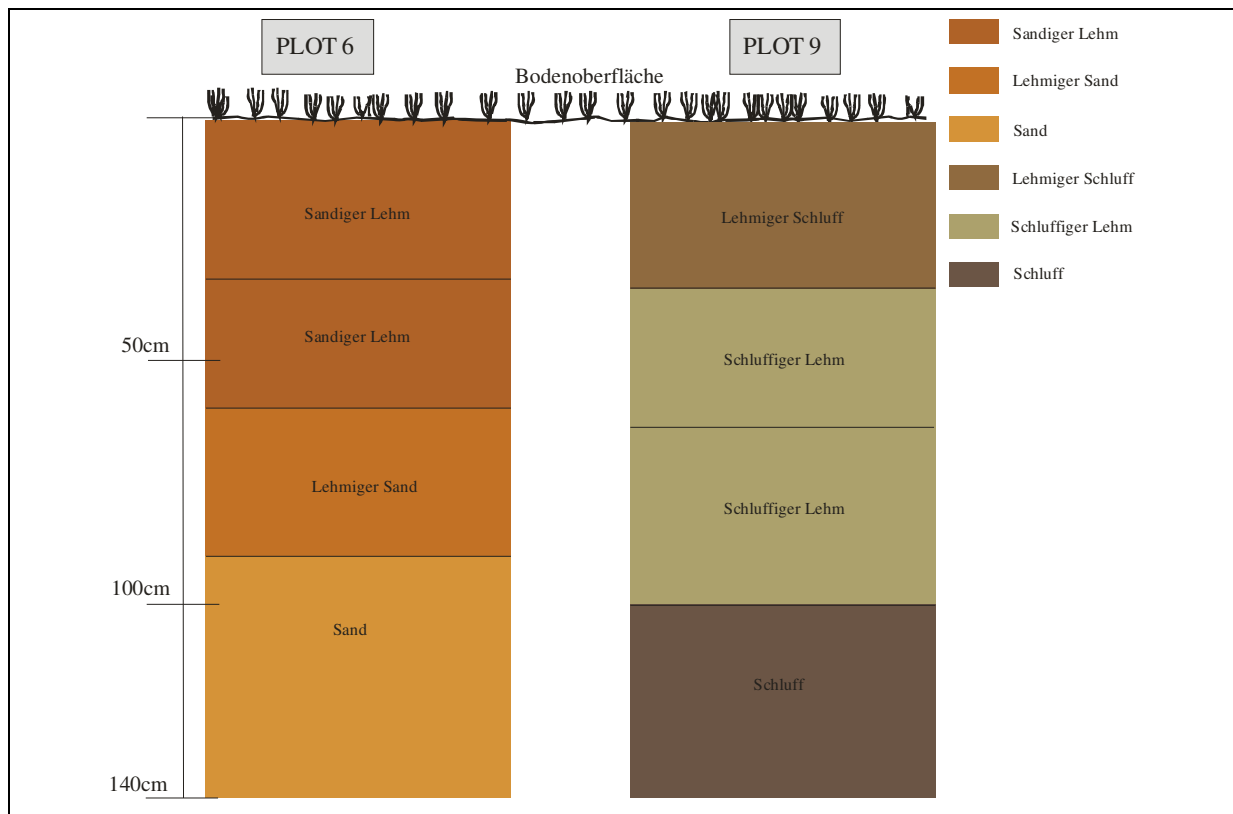


Abbildung A 2: Darstellung der Bodenprofile für Plot 6 und Plot 9

8.1.1.2 Feststoffdichte, Trockendichte, Porenanteil und Substanzanteil

Die gestörten Bodenproben dienen der Bestimmung der Feststoffdichte nach Ö-Norm L1068. Die Trockendichte und der Porenanteil wurden mit Hilfe der ungestörten Bodenproben (Stechzylinder) ermittelt. Die vorangestellten Untersuchungen wurden am Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen durchgeführt.

Die Trockendichte und Feststoffdichte sind zur Bestimmung des Porenanteils notwendig. Der Porenanteil gibt Auskunft über den höchst möglichen Wasseranteil bei Sättigung im Boden. In Tabelle 3 sind diese Bodenparameter dargestellt.

Tabelle A 3: Feststoffdichte, Trockendichte, Porenanteil und Substanzanteil (Mittelwerte)

Plot 6				
Tiefe (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	n_p (Vol%)	Substanzanteil(Vol%)
0 - 33	2,68	1,35	49,8	50,2
33 - 60	2,69	1,33	50,7	49,3
60 - 85	2,73	1,32	51,5	48,5
85 +	2,73	1,37	49,7	50,3
Plot 9				
0 - 35	2,67	1,29	51,8	48,2
35 - 64	2,68	1,31	50,8	49,2
64 - 103	2,72	1,32	51,4	48,6
103 +	2,76	1,45	47,4	52,6

Die Feststoffdichte nimmt mit erhöhten Sandanteil im Bodenprofil Plot 6 bzw. mit höherem Schluffgehalt im Bodenprofil Plot 9 zu. Die Trockendichte zeigt für das Bodenprofil Plot 6 nur eine geringe Variation hingegen im Bodenprofil Plot 9 eine deutliche Zunahme mit der Tiefe. Daraus folgt analog die Variation des Porenanteils der den kleinsten Wert im Bodenprofil Plot 9 in der größten Entnahmetiefe aufweist. Der eingetragene Substanzanteil ist der Unterschied des Porenanteils auf 100%.

8.1.1.3 Druckpotential - Wasseranteilsbeziehung

Die Aufnahme der Druckpotential – Wasseranteilsbeziehung wurde nach Ö-Norm L1063 wieder vom Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen durchgeführt (Tabelle A 4).

Für jede Tiefenstufe standen mehrere Stechzylinder (Plot 6 3 Stück; Plot 9 4 Stück je Schicht) zur Verfügung. Für die einzelnen Druckstufen wurde der Mittelwert der Wasseranteile gebildet.

Tabelle A 4: Mittelwerte der Druckpotential – Wasseranteilsbeziehung

Plot 6					
Tiefe (cm)	0 hPa	60 hPa	300 hPa	800 hPa	15000 hPa
0 - 33	49,1	35,8	27,6	24,8	13,8
33 - 60	48	37	30	26,9	15
60 - 85	49,2	33,4	15,7	12,6	6,4
85 +	47,2	34,9	5,9	4,3	2,2
Plot 9					
0 - 35	49,3	32,1	27,2	25,4	14,3
35 - 64	50,3	32,7	29,9	28,3	18,9
64 - 103	50,7	36,1	31,3	29,3	5,3
103 +	50,5	44,5	33,8	22,9	6,2

Die ermittelten Wertepaare wurden zur Aufstellung einer Druckpotential-Wasseranteilsfunktion verwendet. Die Wertepaare wurden in das Programm RETC (Retention - Curve Fitting) eingegeben und eine Ausgleichskurve ermittelt.

Der Vergleich des Porenanteils aus Tabelle A 3 mit den Startwerten für die Entwässerungskurve (gesättigte Bodenprobe und Druck = 0) zeigt doch einige Unterschiede die in der Methodik der Bestimmung zu suchen sind, d.h. mit Ausnahme der Proben in der Tiefe 103 + für Bodenprofil – Plot 9 sind alle Werte etwas geringer. Dies kann als nicht hundertprozentige Sättigung gedeutet werden. Der kleinere Wert ist sicher den Vorgängen im Boden näher. In der ungesättigten Bodenzone wird dieser Wert jedoch kaum erreicht und der geringfügige Unterschied ist nicht störend. Der einzige abweichende Wert könnte als Ursache eine geringfügig zu groß ermittelte Trockendichte haben. Für die Simulation werden nur die Druckpotential-Wasseranteilsbeziehungen verwendet.

8.1.1.4 K_s -Wert

Für die Simulation ist neben der Druckpotential-Wasseranteilsbeziehung noch eine weitere Beziehung, die entweder den Wasseranteil oder die Wasserspannung mit dem kapillaren Leitvermögen in Bezug setzt, erforderlich. Diese Funktion kann als Beziehung aus der Wasseranteils-Wasserspannungsbeziehung erstellt werden. Jedoch werden damit nur relative Werte des kapillaren Leitvermögens beschrieben. Um Absolutwerte zu erhalten wird der Durchlässigkeitsbeiwert benötigt.

Da im Projekt keine k_s -Wert Bestimmung vorgesehen war, wurden diese entsprechend der bodenkundlichen Kartieranleitung abgeschätzt (Tabelle A 7). Zusätzlich wurde eine Durchlässigkeitsbeiwertermittlung aus der Textur und der Trockendichte mit der Software Rosetta Lite 1.0 durchgeführt (Tabelle A 7). Der Auswertung liegt ein neuronales Netzwerk zu Grunde. Für die Eingabe muss die Bodenklassifizierung nach der Texturklasseneinteilung nach USDA erfolgen. (Tabelle A 5 und Tabelle A 6)

Tabelle A 5: Klasseneinteilung nach USDA

Fraktion	Grenzen (mm)
Sand	0,05 - 2
Schluff	0,002 – 0,05
Ton	< 0,002

Tabelle A 6: Texturklasseneinteilung nach USDA

Plot 6			
Tiefe (cm)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
0 - 33	36,8	42,7	20,5
33 - 60	45,6	34,9	19,5
60 - 90	66,5	24,0	9,5
90 +	86,4	11,7	1,9
Plot 9			
0 - 35	29,8	48,0	22,2
35 - 64	22,7	50,0	27,3
64 - 103	23,2	49,5	27,3
103 +	26,2	63,9	9,9

In Tabelle A 7 sind die k_s -Werte aus der Literatur und dem Programm Rosetta dargestellt und zeigen eine gute Übereinstimmung.

Tabelle A 7: Mittelwerte der k_s -Werte aus der Literatur und dem Programm Rosetta

Plot 6		
Tiefe (cm)	k_s -Wert (cm/d) Bodenkundl.Kartier.	k_s -Wert (cm/d) Rosetta
0 - 33	13	17,1
33 - 60	17	22,4
60 - 90	30	85,1
90 +	111	350,7
Plot 9		
0 - 35	13	22
35 - 64	13	17,5
64 - 103	16	16,5
103 +	16	27,4

8.2 Anhang 2 – Datenerfassung - Bodenwasserhaushalt

8.2.1 Allgemein

Mit Hilfe einer Feldmessstelle (Abbildung A 3 und Abbildung A 4), die mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet ist, wird die Dynamik des Bodenwasserhaushaltes erfasst.

Der Aufbau der Feldmessstelle erfolgte in Anlehnung des „virtuellen Lysimeters“ (Kastanek et al. 2002). Dabei wird die Änderung des Wasseranteils und der Wasserspannung über ein Bodenprofil erfasst.

Die Wasserspannung wurde in den oberen Schichten (10 cm, 40 cm und 80 cm) mit Blocksensoren (Watermark) und in den unteren Schichten (80 cm und 140 cm) mit Tensiometern gemessen. In der Tiefe von 80cm überlappen sich Watermark- und Tensiometermessungen.

Die Erfassung des Wasseranteils erfolgte durch FDR Sonden in den Tiefen 10 cm, 40 cm, 80 cm und 140 cm.

Die Bodentemperatur wurde in der oberen Schicht mit einem eigenen Temperatursensor (10 cm Tiefe) und in den Tiefen 80 cm und 140 cm mit einem Tensiometer mit eingebautem Temperatursensor erfasst.

Die Sensorenzusammenstellung ist aus der Tabelle A 8 ersichtlich.

Tabelle A 8: Tiefenanordnung der Sensoren je Profilgrube

Tiefe	Tensiometer	Watermark	FDR-Sensor	Temperatur Sensor
0,10 m		XXXX	XXXX	X
0,40 m		XX ¹ X ² X ²	XXXX	
0,80 m	XXXX	XXXX	XXXX	X
1,40 m	XXXX		XXXX	X

¹ Plot 9_2 auf 80 cm

² Plot 10 auf 60 cm

Sämtliche Sensoren sind an einem Datenlogger (jeweils ein Delta-T-Logger pro Profilgrube) angeschlossen. Das Messintervall wurde auf 10 Minuten eingestellt. Die gespeicherten Daten wurden über eine Schnittstelle mit einem LAP-Top ausgelesen. Für die Energieversorgung sorgte eine Solaranlage (Abbildung A 4). Die Profilgrube für Plot 9/10 wurde als erste fertig gestellt und der Messbeginn war Mitte Februar 2003. Die zweite Profilgrube (Plot 5/6) nahm den Betrieb Mitte April 2003 auf.

Die Versuchsanlage ist durch einen Zugangstreifen getrennt. In diesem wurden zwei Gruben ausgehoben von denen aus die Sensoren in den ungestörten Bereich der Versuchsplots eingebaut wurden. (Abbildung A 3)

Jeder Plot wurde mit doppelter Sensoranzahl ausgerüstet, damit eine Kontrolle gegeben ist. Zusätzlich dazu können auch die Sensoren, vor allem in größerer Tiefe, in den entsprechenden Tiefenstufen miteinander verglichen werden.

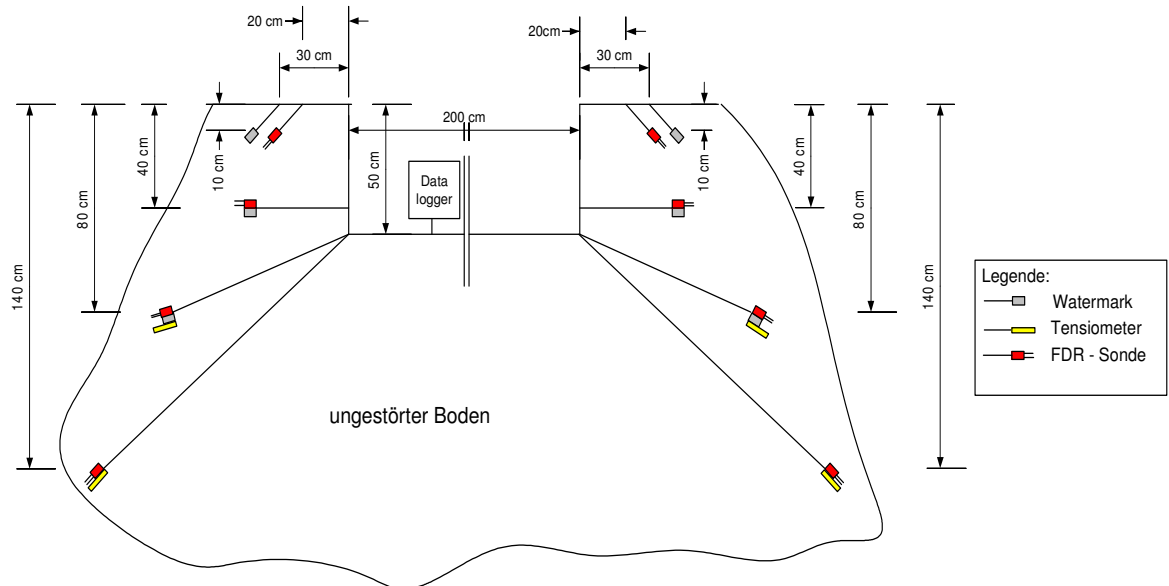


Abbildung A 3: Schematischer Aufbau der Messstation Zwischenfrucht

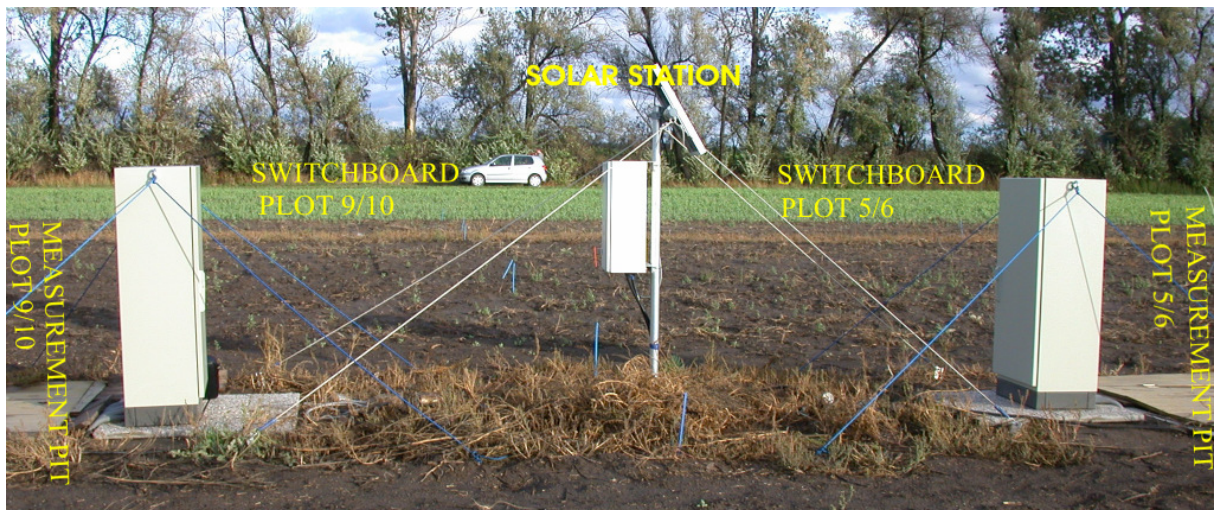


Abbildung A 4: Messstation Zwischenfrucht

8.2.2 Kurzbeschreibung der Sensoren

8.2.2.1 Watermark

Der Watermark dient zur indirekten Messung der Wasserspannung. Es ein Gleichgewicht zwischen der Wasserspannung im Boden und im Blocksensoren. Im Block selbst wird die elektrische Leitfähigkeit ermittelt, diese ist eine Funktion des Wasseranteils der sich entsprechend dem Matrixpotential einstellt. Der Watermark ist ein „Granular matrix sensor“ mit zwei konzentrisch angeordneten Elektroden. Zum Schutz ist das Trägermaterial in eine Kunststoffhülle gebettet. Zur Abminderung des Einflusses des Salzgehaltes im Boden sind die Elektroden in Gips eingebettet. Der ideale Messbereich liegt bei 30 hPa bis 2000 hPa Bodenwasserspannung, daher wurden die Watermarksensoren im oberen Bereich angeordnet, da im pannonischen Raum Tensiometer auf Grund der Messbereichsüberschreitung ständig trocken fallen. In tieferen Schichten ist der Einsatz der Tensiometer längerfristig erfolgsversprechend.

Die Watermarksensoren wurden vor dem Einbau am IHLWW mit einem Druckplattenapparat kalibriert. Die Kalibrierfunktion diente zur Umrechnung des Messsignals in physikalische Werte (Wasserspannung in hPa). Die gemessenen Bodentemperaturen dienten auch zur Kompensation des Temperatureinflusses der Watermarksensoren.

8.2.2.2 Tensiometer

Die verwendeten Tensiometer bestehen aus einer Keramikkerze, der Hohlraum wird mit einem piezometrischen Druckaufnehmer abgeschlossen. Das im Boden herrschende Potential wird über die Poren der Keramikkerze in den mit Wasser gefüllten Hohlraum übertragen und mit dem Druckaufnehmer kontinuierlich aufgezeichnet.

Der Messbereich der Tensiometer beträgt ungefähr 0 ...900 hPa. Der absolute Messwert gilt immer nur für den jeweiligen Messort. Das Tensiometer misst für die Pflanze wichtige Bodeneigenschaft direkt, es muss als Messinstrument nicht geeicht werden.

Es wurden 2 unterschiedliche Bauarten von Tensiometer verwendet. T4 und T8, die sich durch einen eingebauten Temperatursensor unterscheiden. Die Tensiometer der Bauart T8 wurden in Plot 5 und Plot 10 eingebaut.

Sowohl Tensiometer als auch Watermarksensoren, sind auf einen guten Bodenanschluss angewiesen. Daher wurden beide Sensoren beim Einbau mit anstehendem Bodenmaterial eingeschlämmt.

8.2.2.3 FDR - Sonde

Bei der FDR-Methode (Frequency Domain Reflectometry Methode) wird die elektrische Kapazität, die von der Dielektrizitätskonstante von Boden, Luft und Wasser abhängt, zwischen zwei Elektroden gemessen. Die elektrische Kapazität, die sich um den Sensor

einstellt, ist abhängig von der Zusammensetzung des Boden-Wasser-Luft Kontinuums und somit stark von einem gute Kontakt zwischen Sensor und Boden abhängig (Paltineanu und Starr, 1997; Campbell, 1990). Der Messbereich liegt bei 0 – 100 vol% bzw. 0 - 1m³/m³.

8.2.3 Dateninterpretation

Aufgezeichnet wurden die Zeitreihen der Wassergehalts-, der Wasserspannung- und der Temperaturänderungen. Zur leichteren Dateninterpretation sind die Jahresniederschläge als Abbildung 3 vorangestellt. Die Niederschlagsdaten (Tagesmittelwerte) kommen von der Station Raasdorf, fehlende Daten wurden durch Werte der Station Grossenzersdorf ergänzt.

Die Abbildungen sind so gestaltet, dass jeweils Wiederholungen gemeinsam dargestellt werden, z.B. sind in Abbildung 4 für den Plot 5 die Auszeichnung 5-1 und 5-2 (Wiederholung) eingetragen. Plot 5 und Plot 6 bzw. Plot 9 und 10 sind spiegelbildlich zur Messgrube angeordnet.

Aus den aufgezeichneten Daten wurden die Änderungen der gespeicherten Wassermenge und die Gradienten für den oberen und den unteren Profilabschnitt ermittelt. Gemeinsam mit dem Niederschlag und der Verdunstung wird mit der Änderung der gespeicherten Wassermengen die Wasserbilanz erstellt. Da dies einen zentralen Punkt der Untersuchungen darstellt ist dafür ein eigenes Kapitel vorgesehen.

Als fehlendes Glied folgt die Versickerung in tieferen Schichten. Zur Kontrolle der Plausibilität dient der berechnete Gradient. Damit kann zumindest die Tendenz der Richtung der Wasserbewegung abgeschätzt werden.

Betrachtet man die Zeitreihen im Einzelnen so ist naturgemäß im oberen Bodenbereich die größte Dynamik ersichtlich. Die Änderungen korrelieren gut mit den Regenereignissen, wobei Wasseranteils- und Wasserspannungsänderungen gegenläufig reagieren. In der Tiefe von 80 cm wurde eine Überlappung der Wasserspannungsmessung angeordnet um einen Vergleich der unterschiedlichen Messsysteme zu ermöglichen. Die Übereinstimmung der Wasserspannungen kann als zufriedenstellend angesehen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass Tensiometer um einen Messbereich bis maximal 800 hPa haben und es daher immer wieder, besonders im Jahr 2003, zu einer Entleerung der Keramikkerzen kam. Die scheinbare Dynamik in Abbildung A 14 und Abbildung A 16 ist durch das Wiederbefüllen und den erneuten Lufteintritt in der Keramikkerze zu erklären. Zeiträume, wo der Messbereich überschritten wird sind auch bei der Gradienteninterpretation zu berücksichtigen.

Die Wiederholungen und die symmetrischen Plots (5/6 bzw. 9/10) zeigen eine gute Übereinstimmung in den Änderungen des Wassergehaltes. Deutlich erkennbar ist die jeweilige Austrocknungsphase im Sommer und die Wiederauffüllung des Bodenspeichers ab dem Herbst und über die Wintermonate. Mit einer Versickerung ist deshalb vor allem zu Beginn des Frühjahres zu rechnen. In der Tiefe von 140 cm wurden geringe Wassergehaltsänderungen gemessen, wobei Plot 5 und 6 eine Schwankungsbreite von 0,1

bis $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ aufweisen (Abbildung A 6 und Abbildung A 7). Für Plot 9 und 10 lag der Wassergehalt mehr oder weniger konstant bei $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Abbildung A 8 und Abbildung A 9).

Die Aufzeichnung der Temperatur stellt für die biologische Aktivität eine interessante Information dar. Darüber hinaus ist sie unumgänglich für die Temperaturkompensation der Watermarkensensoren. Bei Auftreten von Frost wird auch die Wassergehaltsmessung beeinflusst.

Der Gradient (Abbildung A 20 und Abbildung A 21) wurde durch Überlagerung des gemessenen Druckpotential und dem Schwerkraftpotential aus den benachbarten Messpunkten errechnet. Für den oberen Rand wurden Watermarkmessung in 10 cm und 40 cm und für den unteren Rand die Tensiometerwerte in einer Tiefe von 80 cm und 140 cm herangezogen.

Während für den oberen Bereich ein Wechsel von Aufwärts- und Abwärtsbewegung, entsprechend den atmosphärischen Bedingungen, ersichtlich ist, konnte für die Versickerung größerer Tiefe kaum eine Bewegung gemessen werden. Damit kann nicht vollständig eine Versickerung ausgeschlossen werden, jedoch bezüglich der Menge gefolgert werden, dass kaum nennenswerte Mengen an Wasser bewegt wurden.

Abbildung A 5: Zeitreihe der Jahresniederschläge (Tagesmittelwerte)

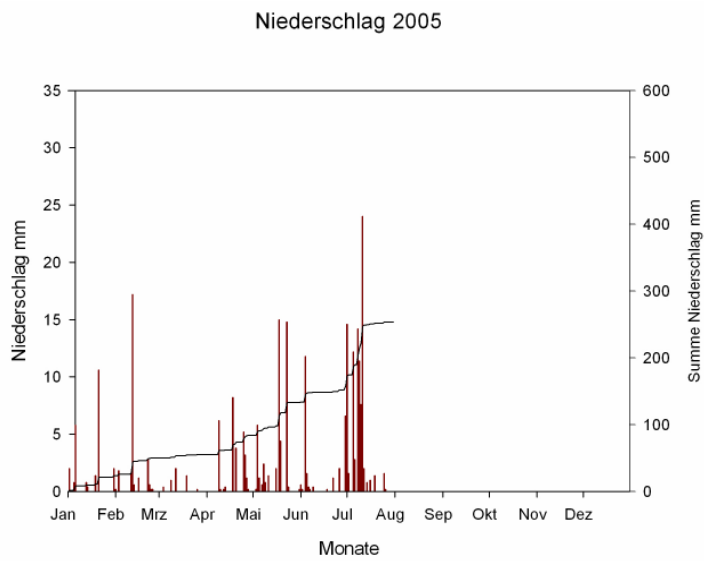
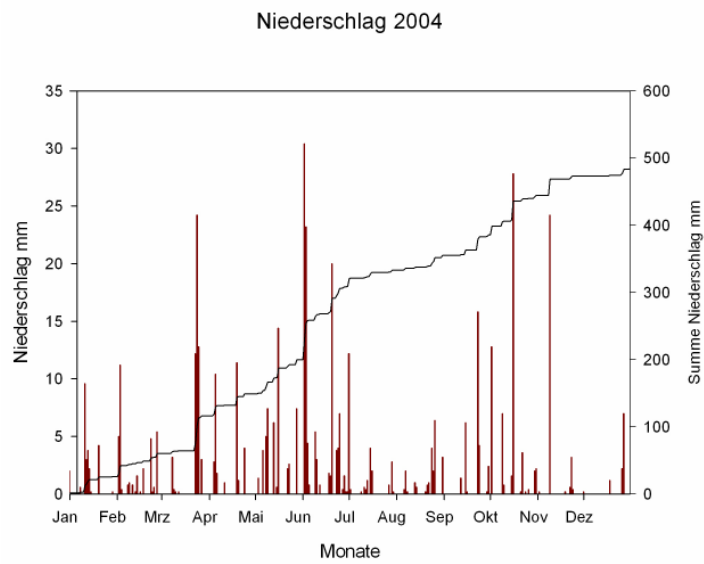
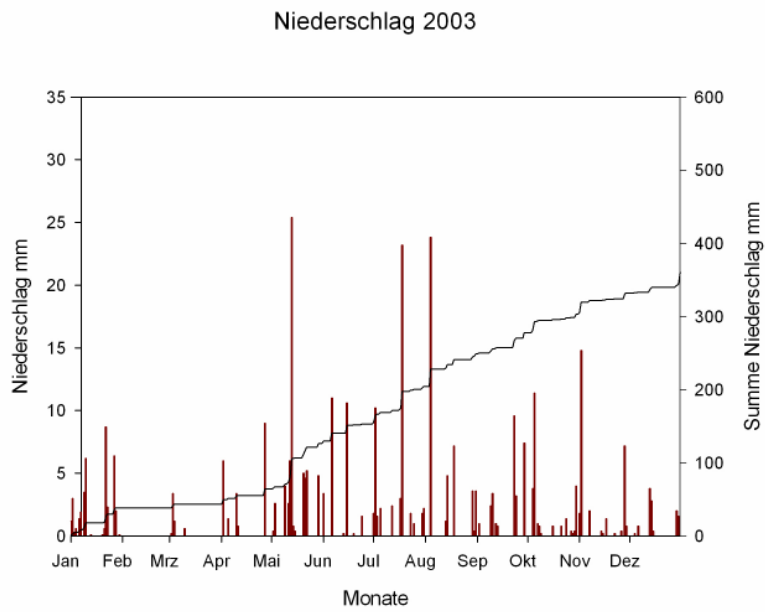
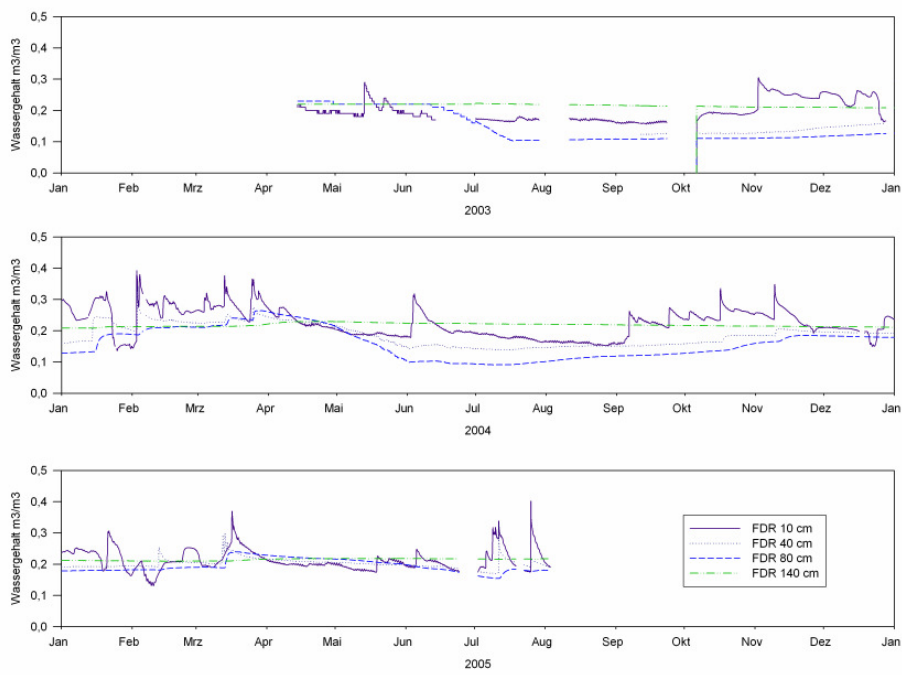


Abbildung A 6: Zeitreihen FDR Plot 5

Jahresübersicht FDR Plot 5-1



Jahresübersicht FDR Plot 5-2

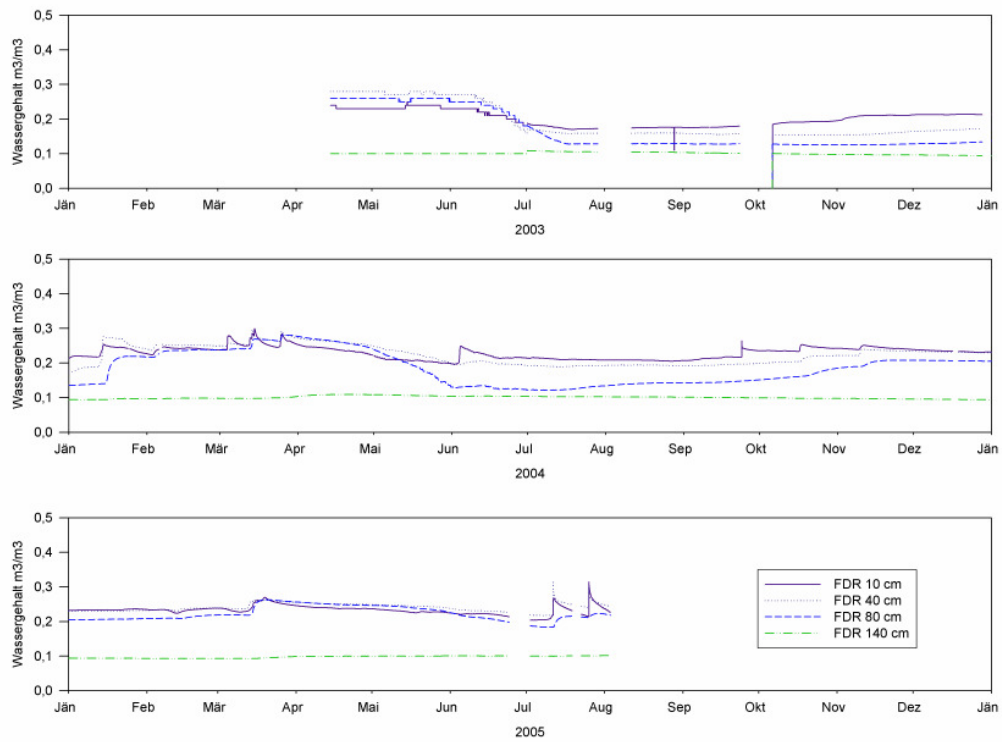
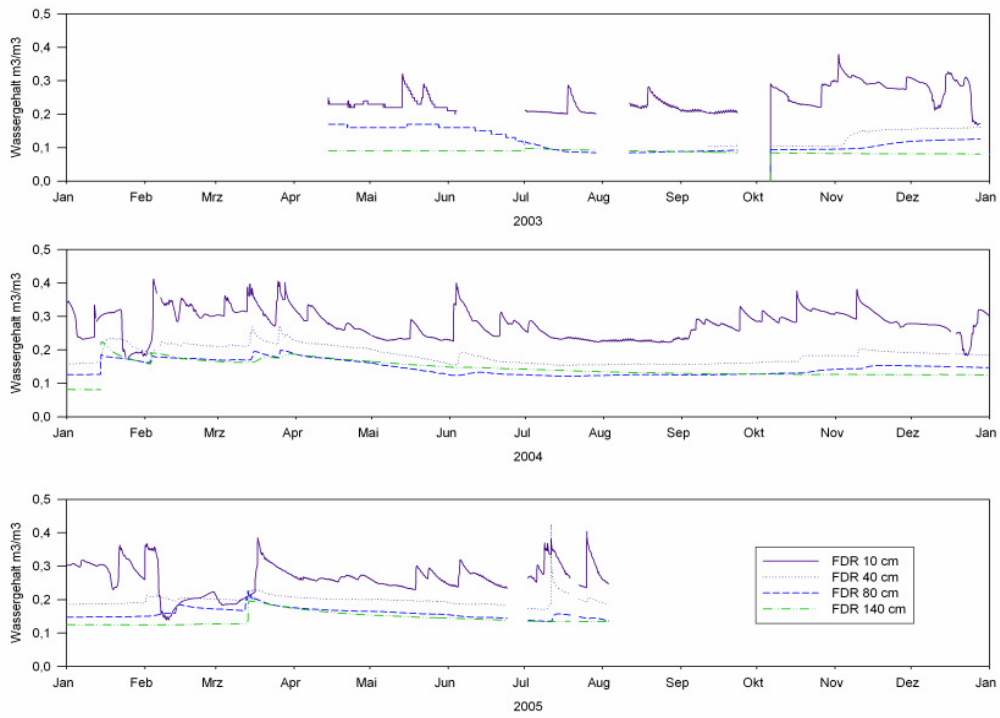


Abbildung A 7: Zeitreihen FDR Plot 6

Jahresübersicht FDR Plot 6-1



Jahresübersicht FDR Plot 6-2

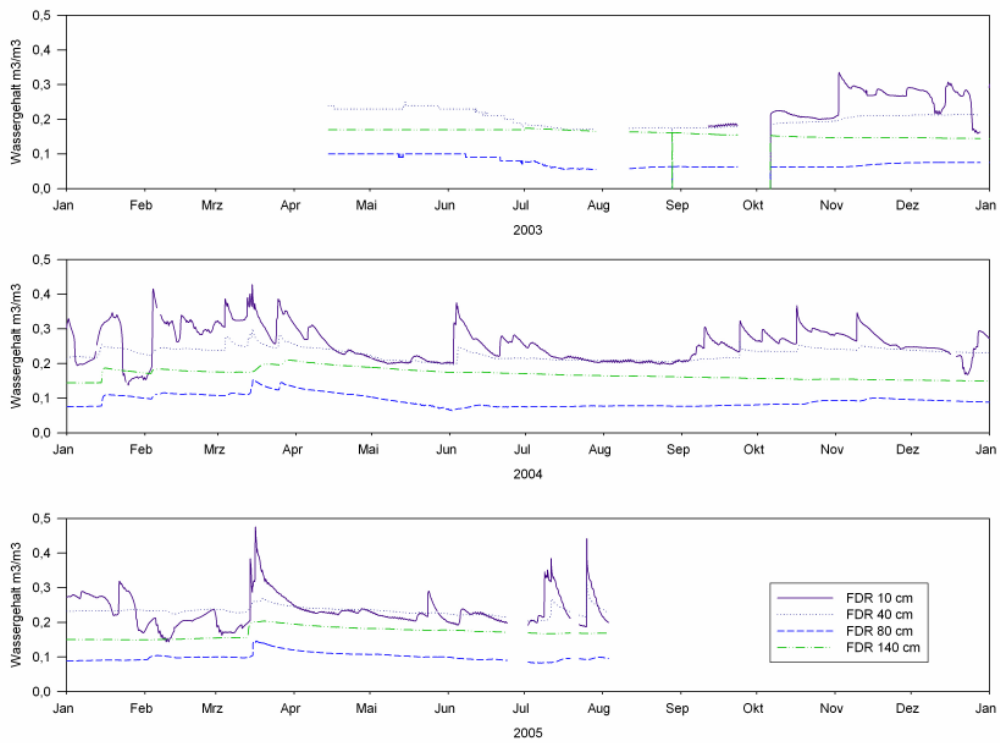
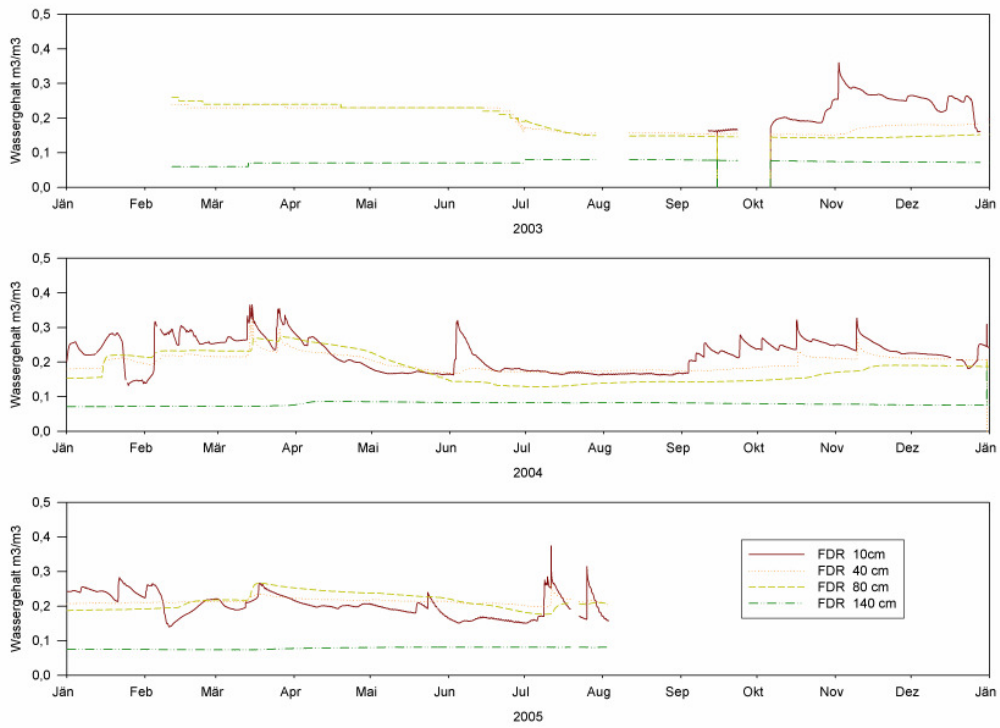


Abbildung A 8: Zeitreihen FDR Plot 9

Jahresübersicht FDR Plot 9-1



Jahresübersicht FDR Plot 9-2

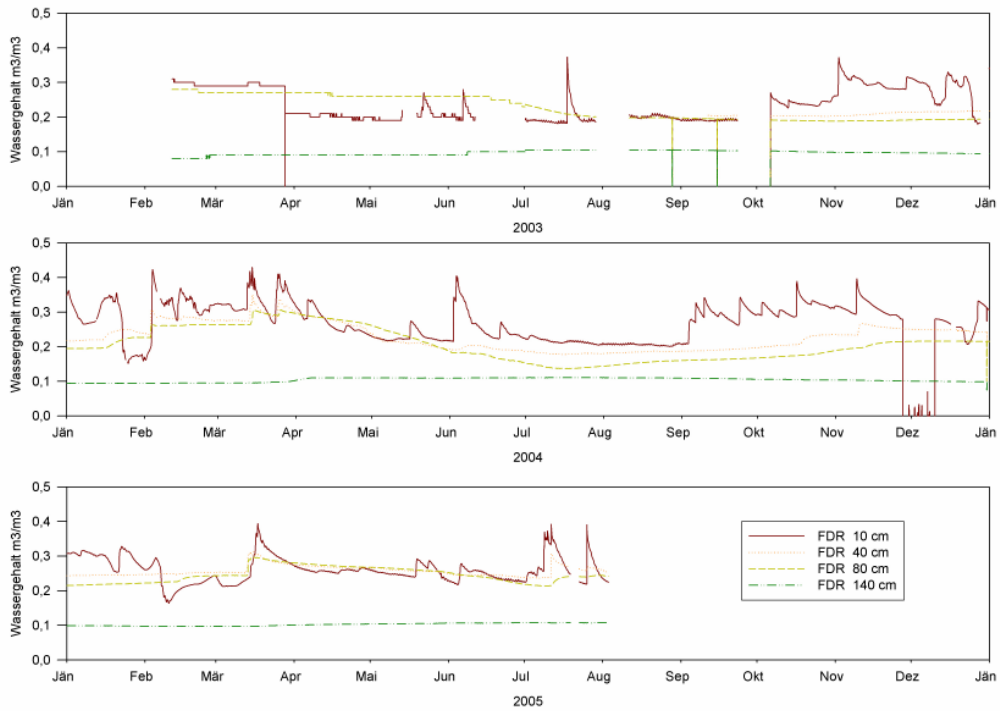
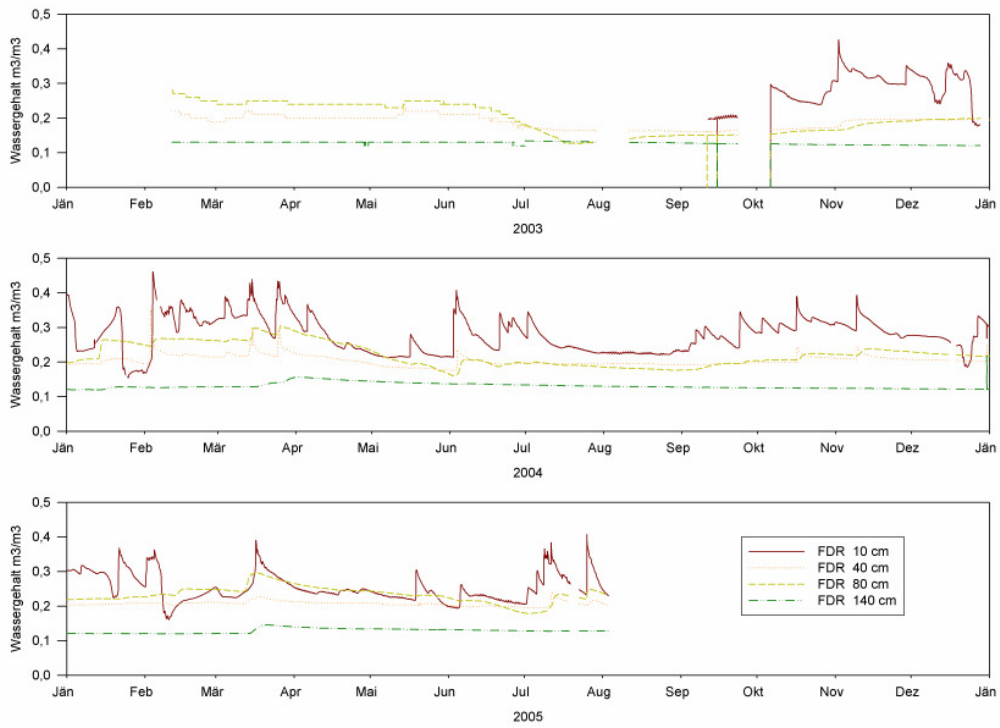


Abbildung A 9: Zeitreihen FDR Plot 10

Jahresübersicht FDR Plot 10-1



Jahresübersicht FDR Plot 10-2

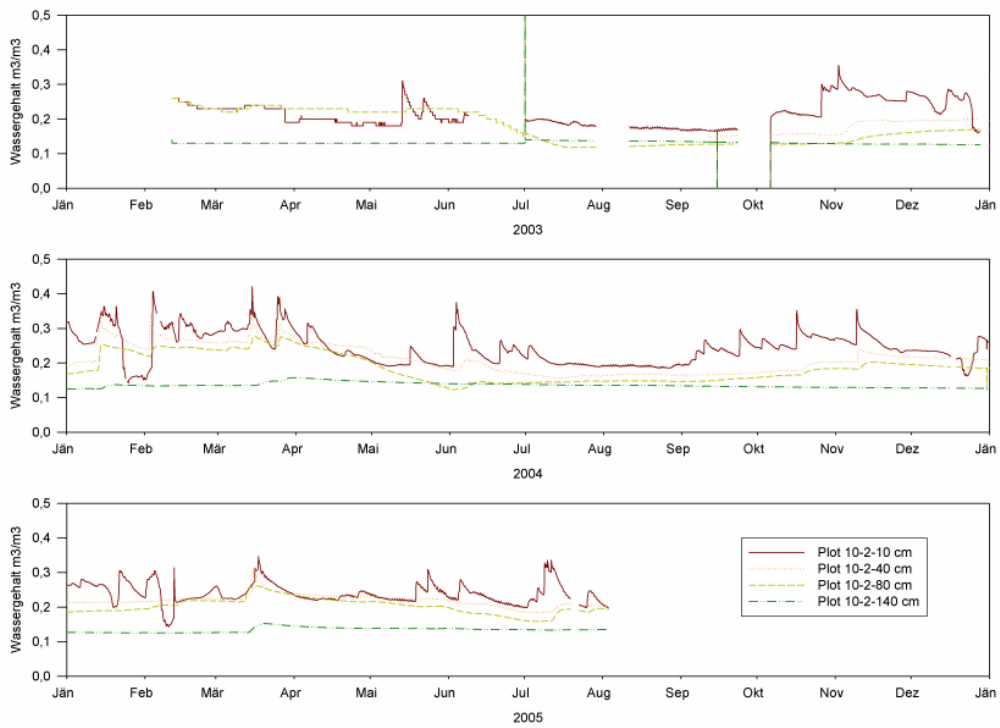
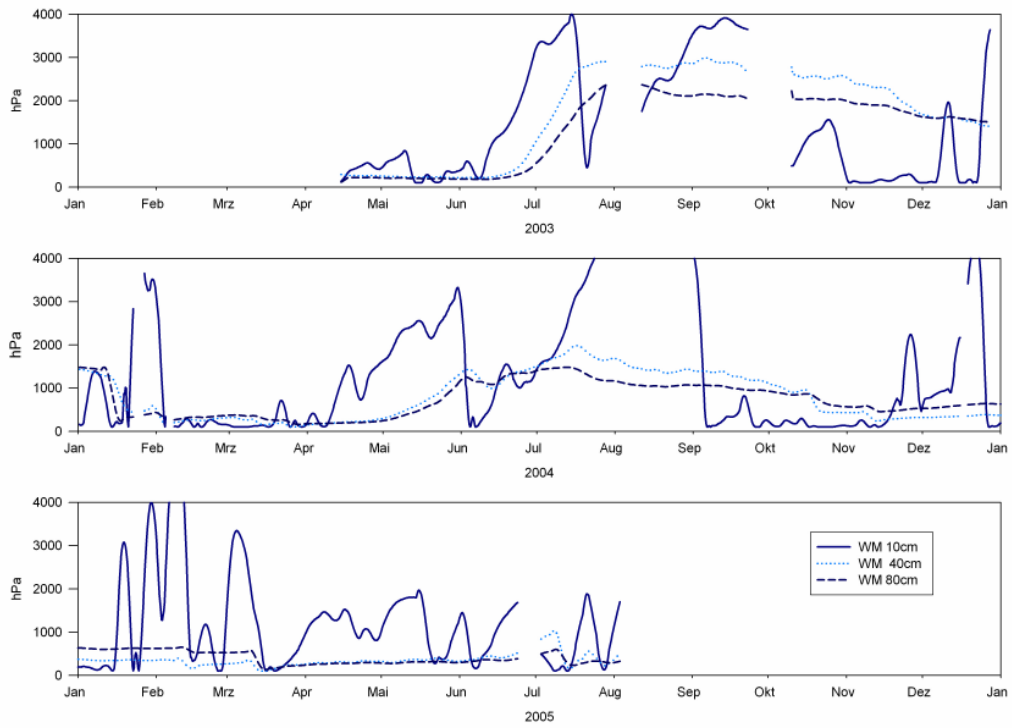


Abbildung A 10: Zeitreihen Watermark Plot 5

Jahresübersicht Watermark Plot 5-1



Jahresübersicht Watermark Plot 5-2

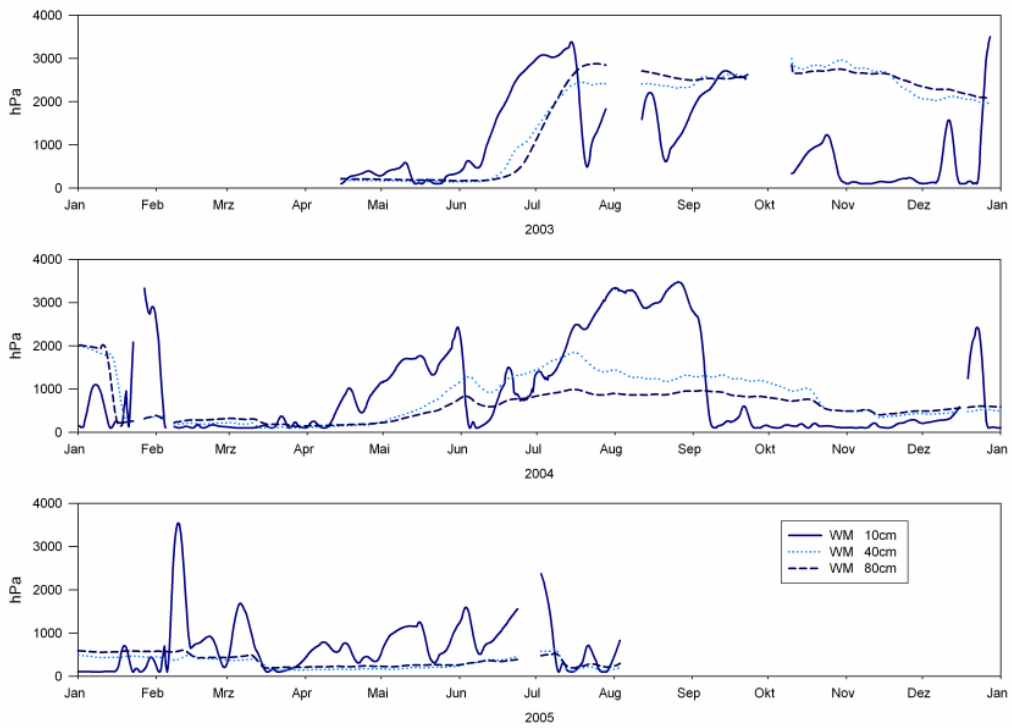
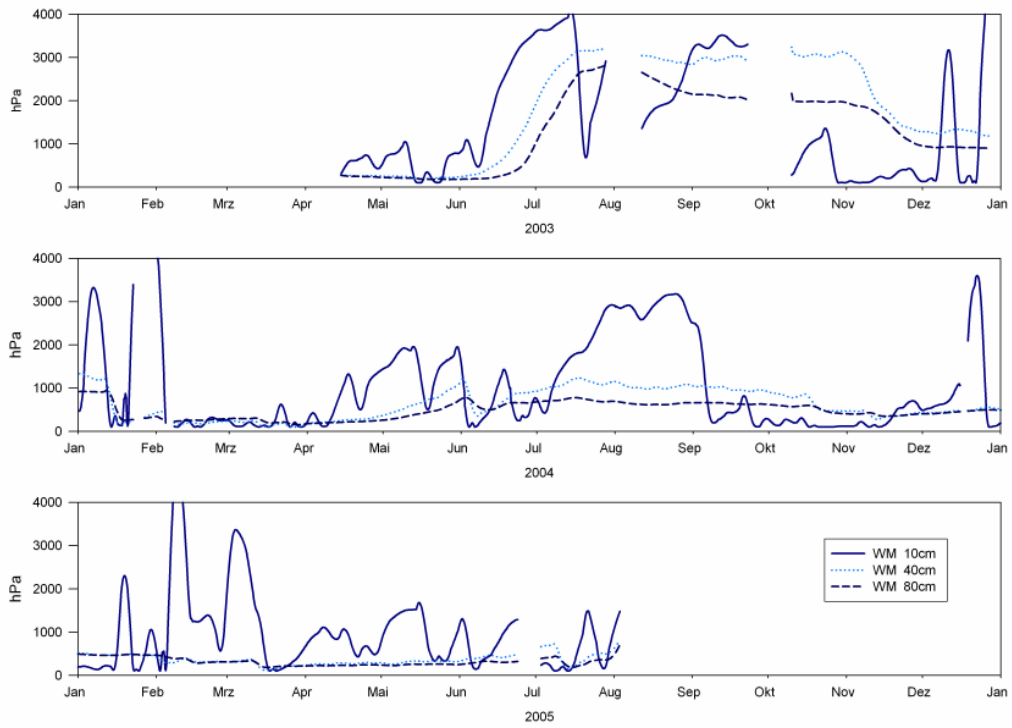


Abbildung A 11: Zeitreihen Watermark Plot 6

Jahresübersicht Watermark Plot 6-1



Jahresübersicht Watermark Plot 6-2

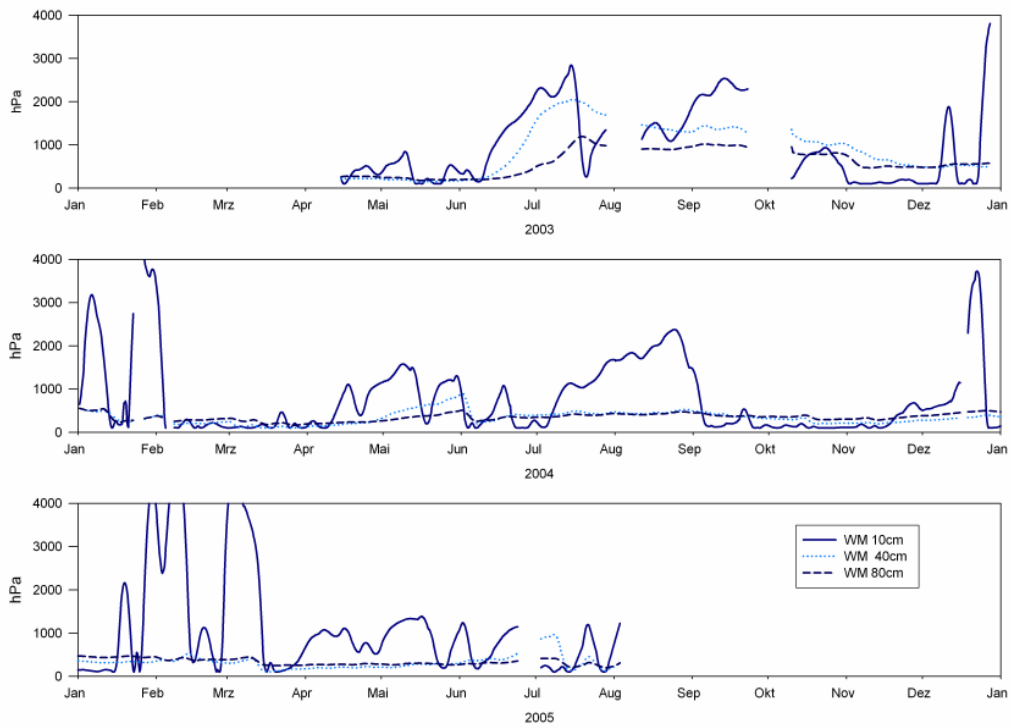
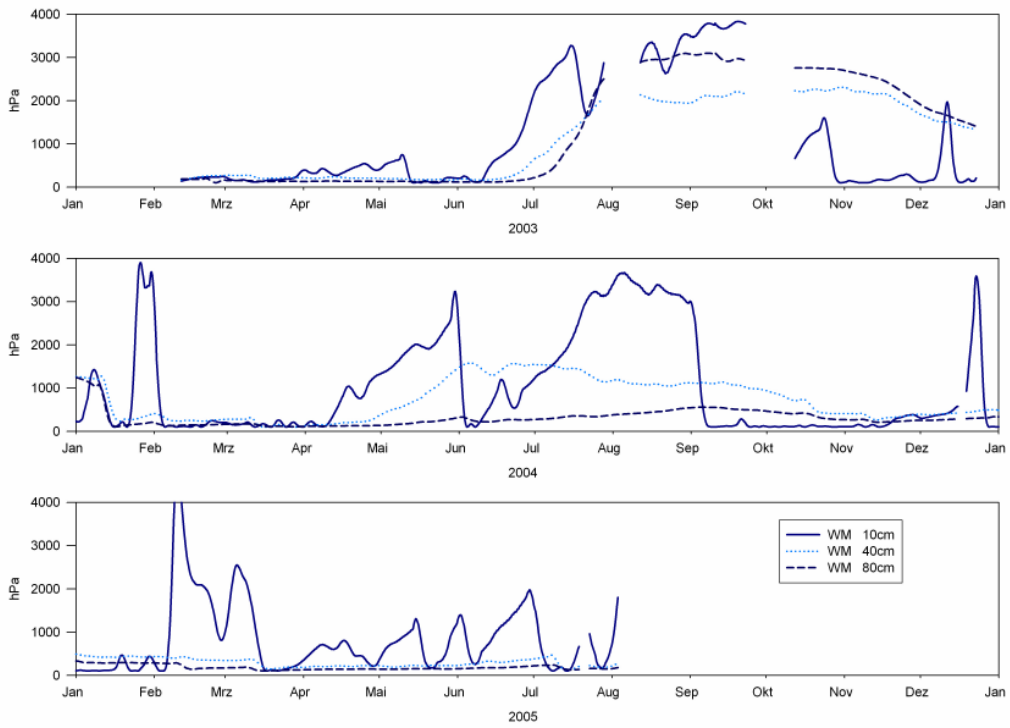


Abbildung A 12: Zeitreihen Watermark Plot 9

Jahresübersicht Watermark Plot 9-1



Jahresübersicht Watermark Plot 9-2

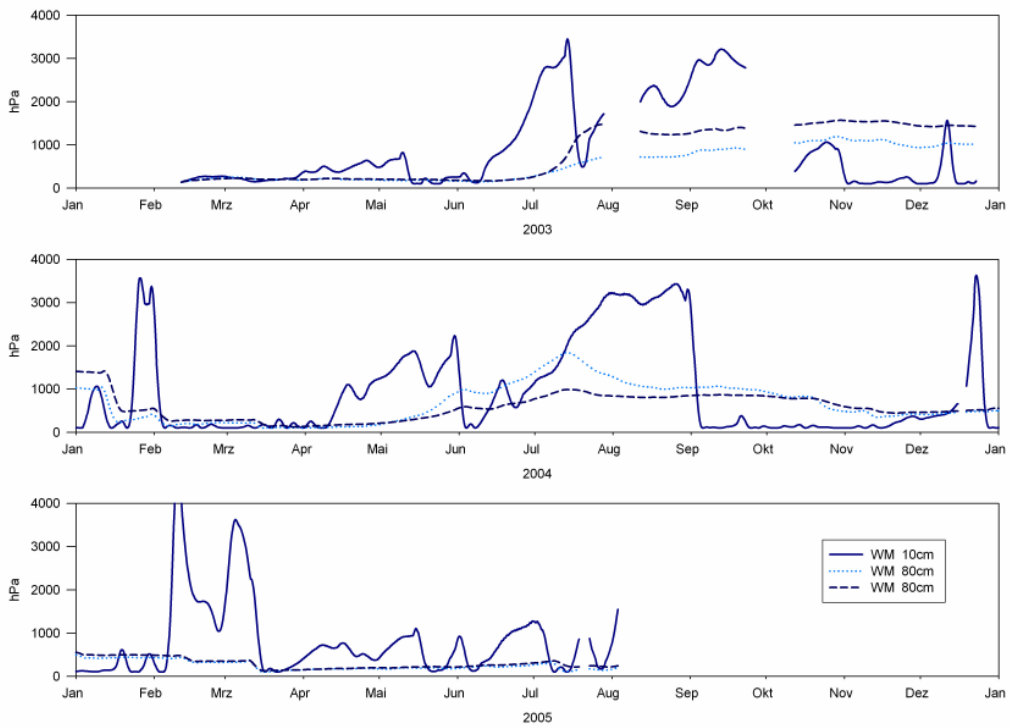
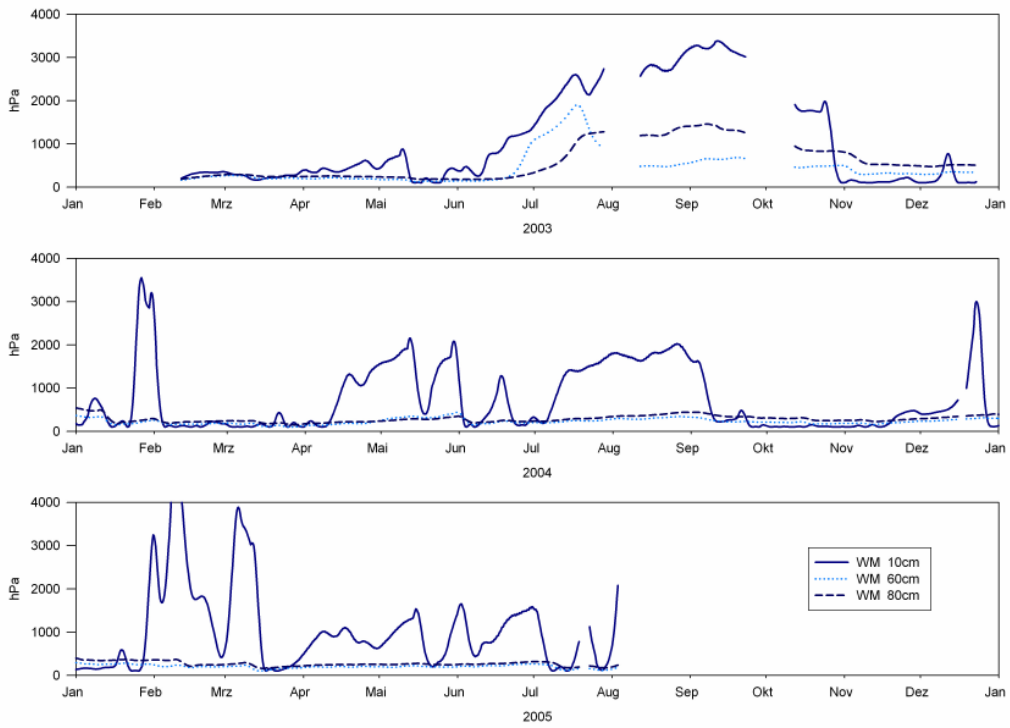


Abbildung A 13: Zeitreihen Watermark Plot 10

Jahresübersicht Watermark Plot 10-1



Jahresübersicht Watermark Plot 10-2

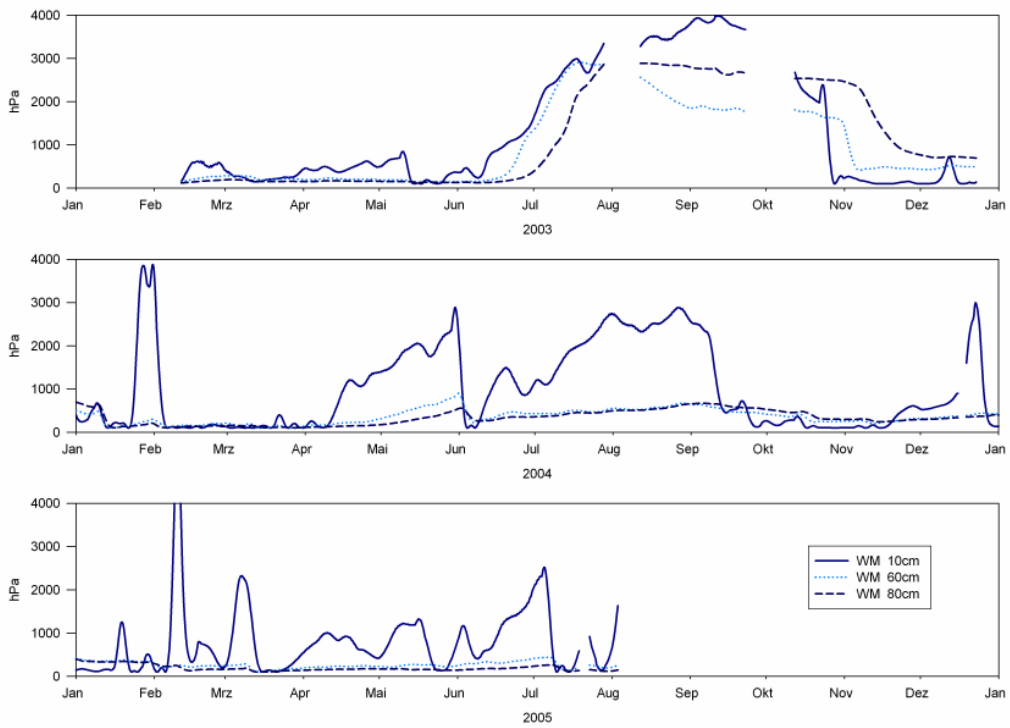


Abbildung A 14: Zeitreihen Tensiometer Plot 5

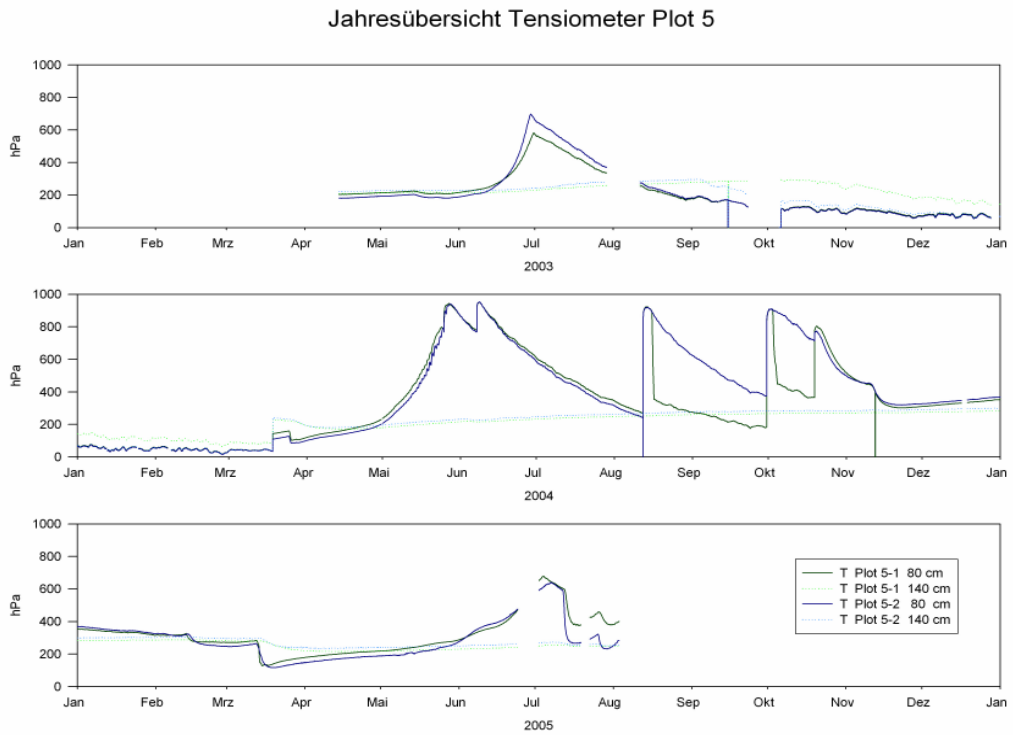


Abbildung A 15: Zeitreihen Tensiometer Plot 6

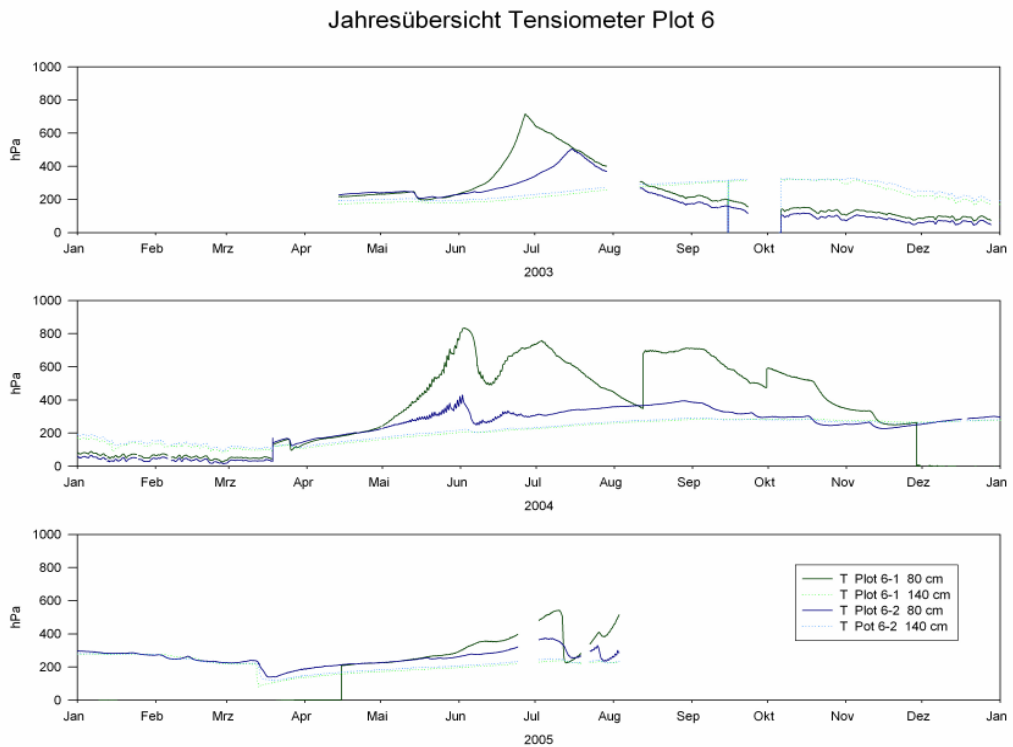


Abbildung A 16: Zeitreihen Tensiometer Plot 9

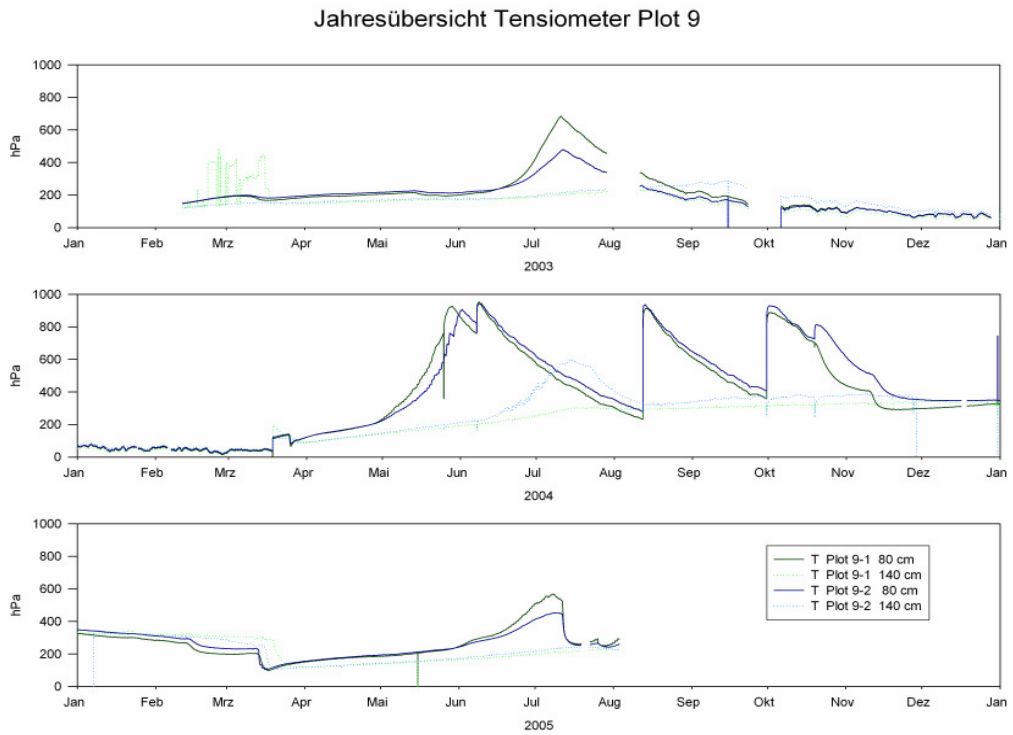


Abbildung A 17: Zeitreihen Tensiometer Plot 10

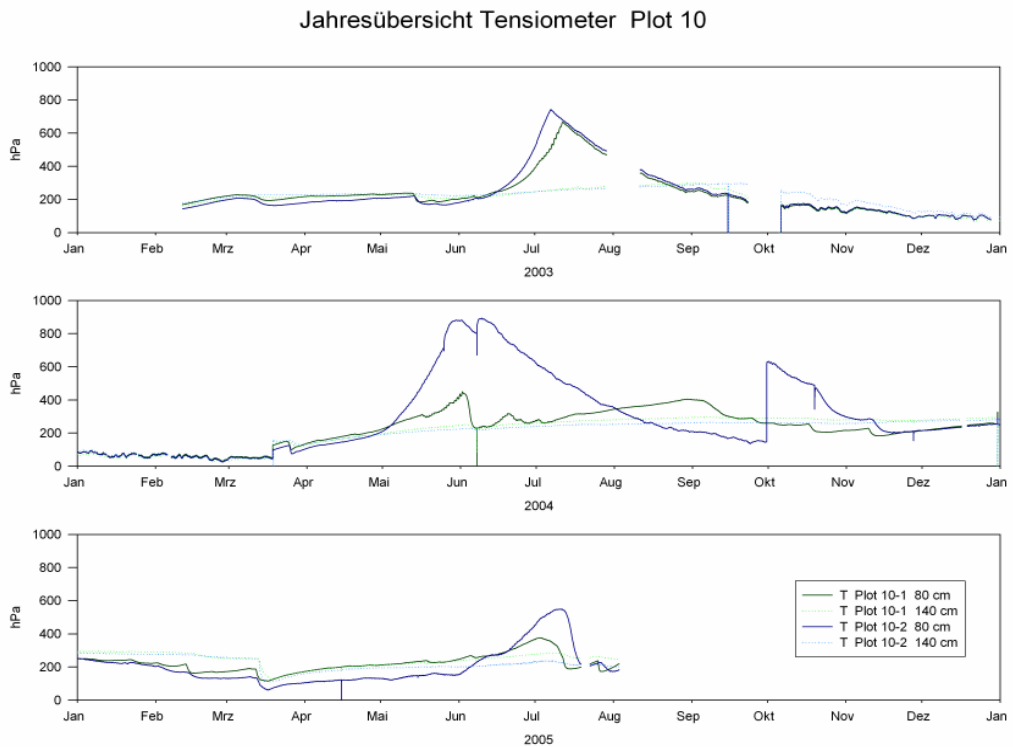


Abbildung A 18: Zeitreihe Bodentemperatur Plot 5

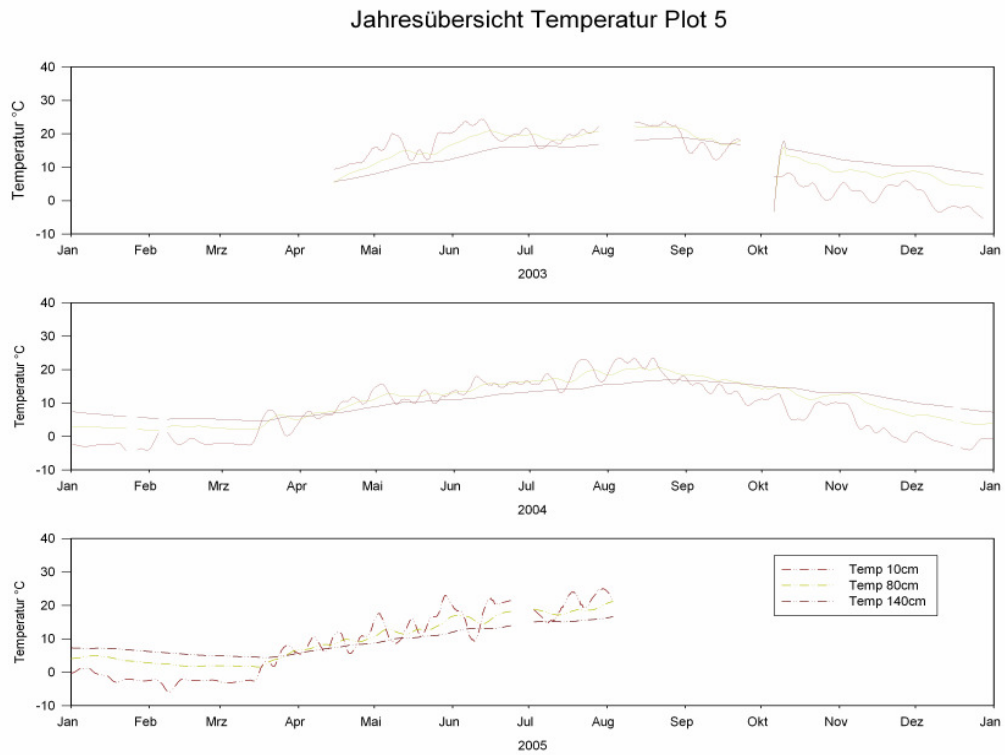
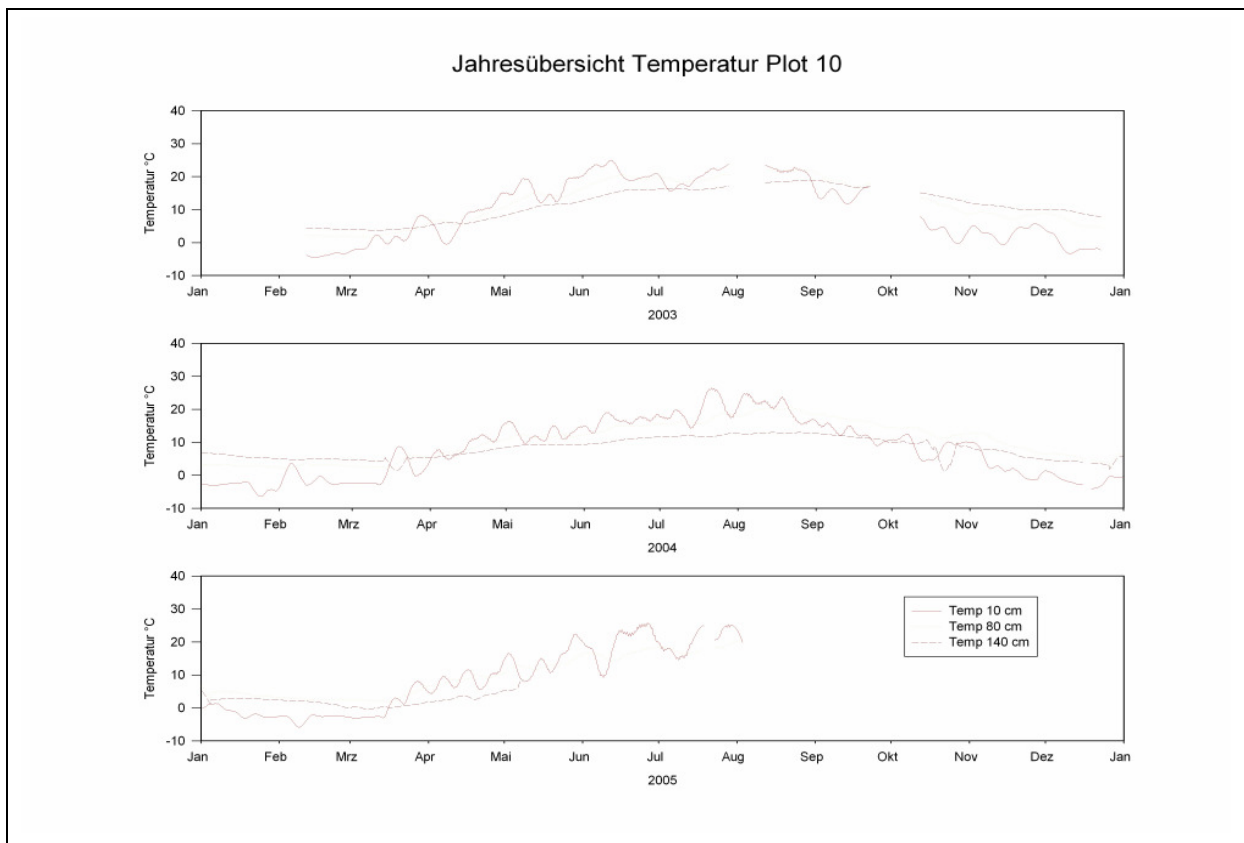


Abbildung A 19: Zeitreihe Bodentemperatur Plot 10



Gradientenverlauf:

Der Gradientenverlauf wurde in der oberen Schicht (10 – 40 cm) und unteren Schicht (80 – 140 cm) dargestellt. Es wurde aus den Daten der Wasserspannung ermittelt. (Watermark und Tensiometer)

Abbildung A 20: Jahresverläufe Plot 5/6



Gradientendarstellung 2005, Plot 5,6

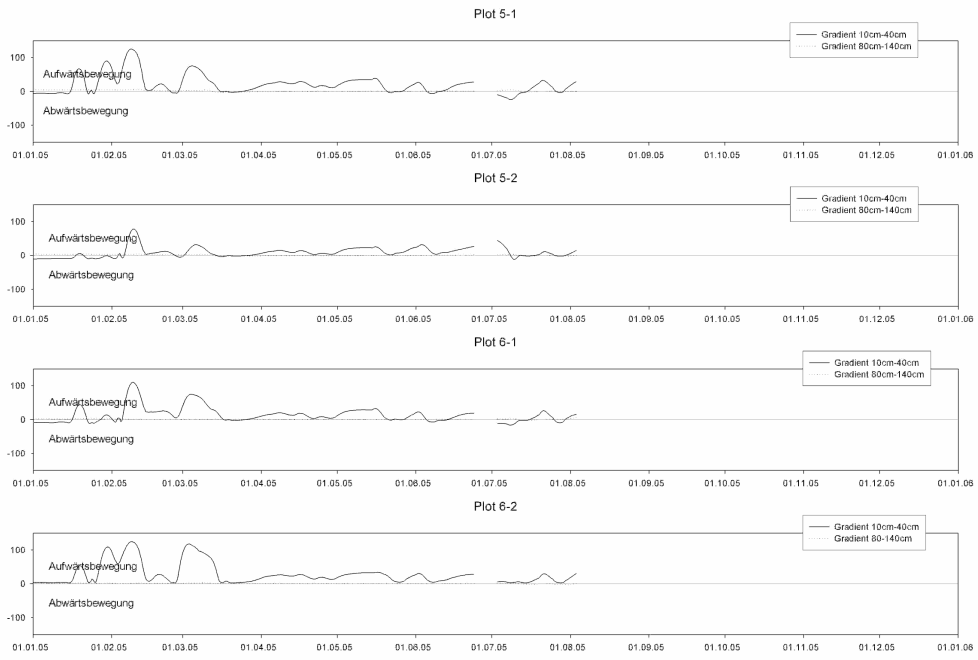
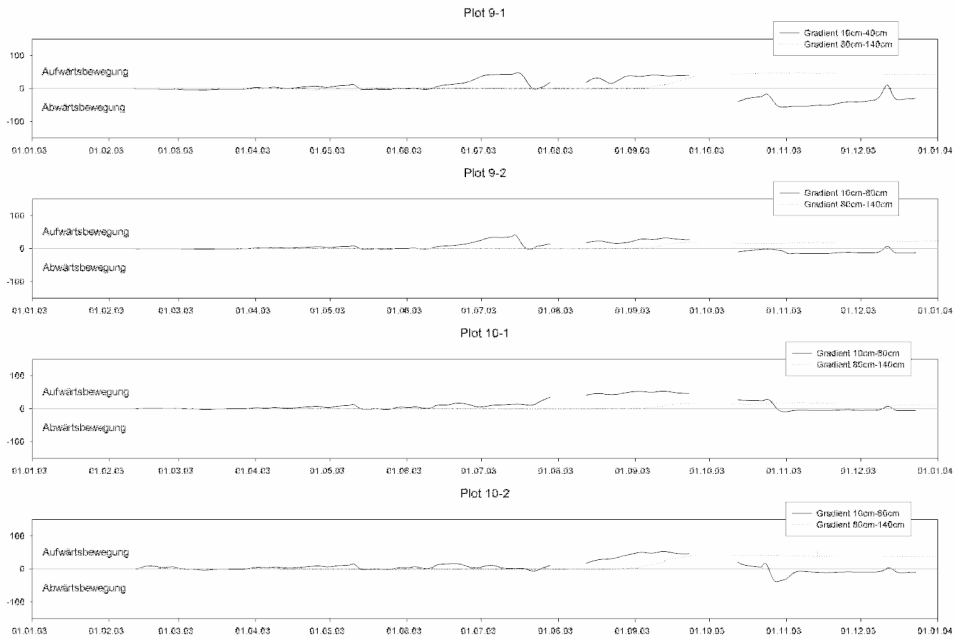
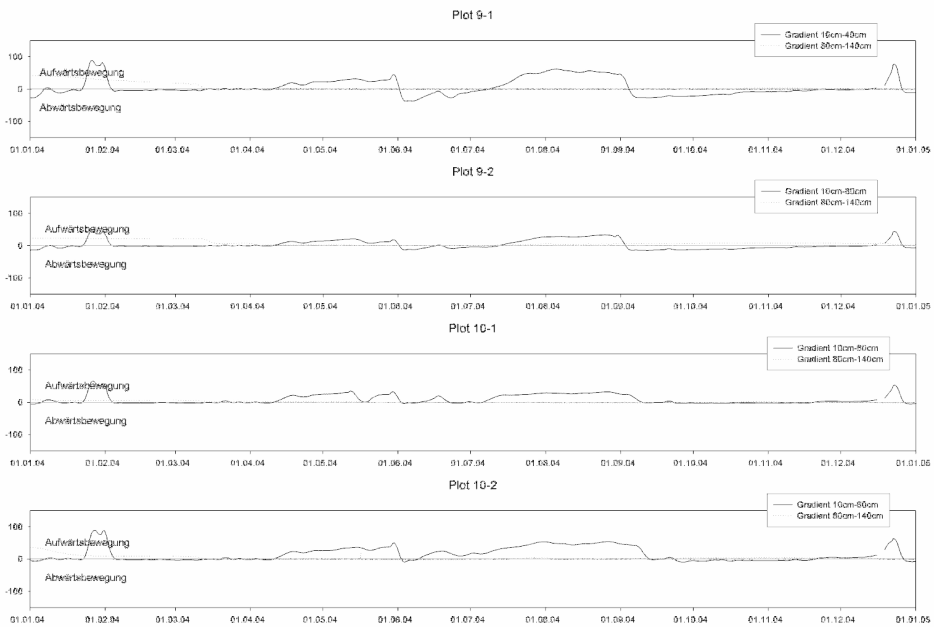


Abbildung A 21: Jahresverläufe Plot 9/10

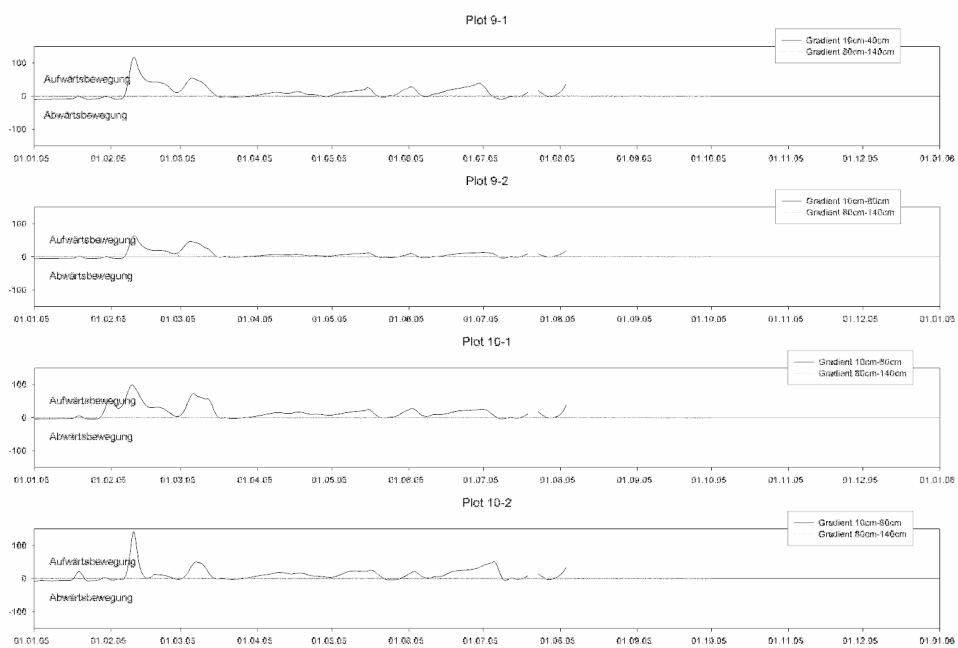
Gradientendarstellung 2003, Plot 9,10



Gradientendarstellung 2004, Plot 9,10



Gradientendarstellung 2005, Plot 9,10



8.3 Anhang 3 - Simulation

8.3.1 Einleitung

Die Simulation der Wasserbewegung hat die folgenden Aufgaben zu erfüllen:

- a) Die Berechnung der aufgestellten Wasserbilanz zu unterstützen, vor allem in Hinblick auf die zu erwartende Versickerung in tieferen Schichten.
- b) Das kalibrierte Modell soll zur Nachbildung der Bodenwasserdynamik, für den Zeitraum für den die Datenerfassung noch nicht errichtet war, verwendet werden.
- c) Das Anwendermodell soll die Analyse unterschiedlicher Szenarien, auch über das Projekt hinaus, ermöglichen.

Für die Simulation wird die Software HYDRUS-1D herangezogen, da es sich bei der gegenständlichen Fragestellung um die Beschreibung der vertikalen Wasserbewegung handelt. HYDRUS-1D ist sowohl für die Simulation des Wasser- als auch des Stofftransportes geeignet. Zusätzlich kann auch die Wärmebewegung in einem Boden beschrieben werden. Da nur der Wassertransport von Interesse ist, wird im weiteren nur auf diesen Bezug genommen.

HYDRUS-1D wurde für die Beschreibung der stationären oder instationären Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone entwickelt. Das Programm kann auch einen gesättigten Teil einbeziehen, z.B. bei variierenden Grundwasserständen. Der Wassertransport wird mit Hilfe der Richards' Gleichung beschrieben. Die mathematisch numerische Umsetzung erfolgt mit Hilfe der Methode der finiten Elemente, basierend auf dem Galerkin - Verfahren. Die notwendige Diskretisierung erfolgt durch ein Dreiecksnetz. Aus den einzelnen finite Element Matrizen wird eine globales Gleichungssystem aufgebaut. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang die Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln. Dafür wird in der entsprechenden Gleichungen ein Senkenterm eingeführt. Als Modelle für diesen Senkenterm stehen die Ansätze von Feddes und van Genuchten zur Verfügung. Ein Vorteil von HYDRUS-1D ist die Möglichkeit das Wurzelwachstum zu berücksichtigen.

Für die instationäre Modellierung sind neben den Randbedingungen noch Anfangsbedingungen notwendig. Es muss entweder die Potenzial- oder die Wassergehaltsverteilung zu Beginn bekannt sein. Diese Werte werden von den Messungen vor Orte bereitgestellt. Als Schlüsselparameter sind die Druckpotenzial - Wasseranteilsbeziehung und zumindest der Durchlässigkeitsbeiwert notwendig. Mit Hilfe der Funktion für die Druckpotential – Wasseranteilsbeziehung wird in Verbindung mit dem Durchlässigkeitsbeiwert eine weitere für die Simulation notwendige Beziehung für das kapillare Leitvermögen aufgestellt. Das kapillare Leitvermögen kann entweder in Bezug zum Druckpotenzial oder zum Wasseranteil gesetzt werden.

8.3.2 Anwendermodellerstellung

Das Bodenprofil wurde entsprechend der Profilaufnahme mit 4-Schichten aufgebaut (Abbildung A 22), jeder Schicht wurde eine Materialeigenschaft zugeordnet. Die Materialeigenschaft ist durch die Retentionsfunktionen charakterisiert.

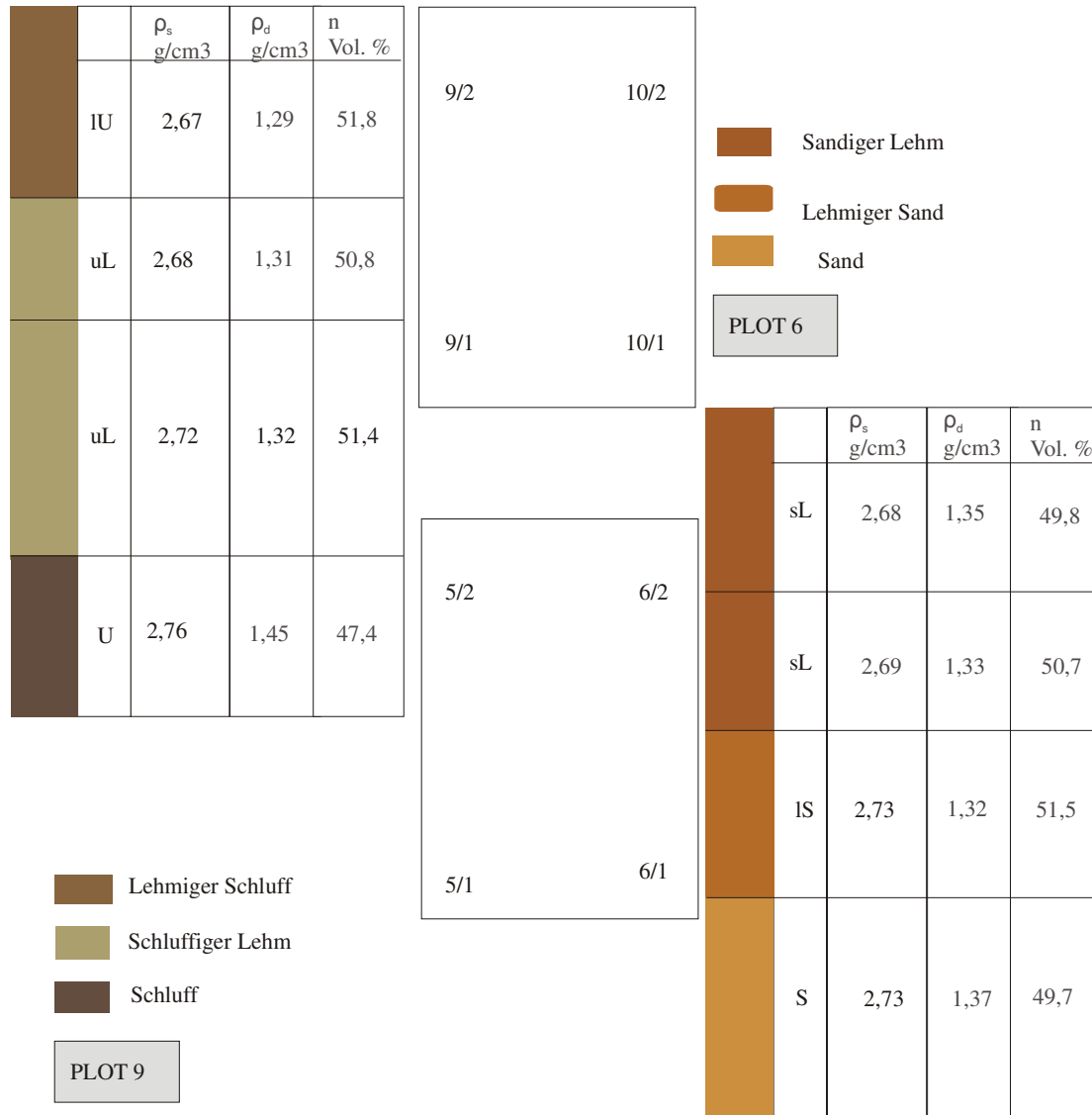


Abbildung A 22: Bodenkundlicher Profilaufbau

Die Anwendermodellerstellung kann in die folgenden fünf Arbeitsschritte gegliedert werden:

1. Geometrische Umsetzung des Bodenprofils und Zuweisung der Materialeigenschaften.
2. Kalibrierung Berechnungsparameter optimieren, Festlegung der k_s – Werte
3. Vergleich mit Zeitreihen Wasseranteil (FDR – Messung)
4. Simulationszeiträume festlegen (Tabelle A 10)
5. Berechnung für Versuchsbeginn

8.3.2.1 Simulationsgeometrie und Festlegung der Randbedingungen

Der Schichtaufbau aus Felderhebung (Abbildung A 2) wurde als erster Schritt in HYDRUS nachgebildet (Abbildung A 23).

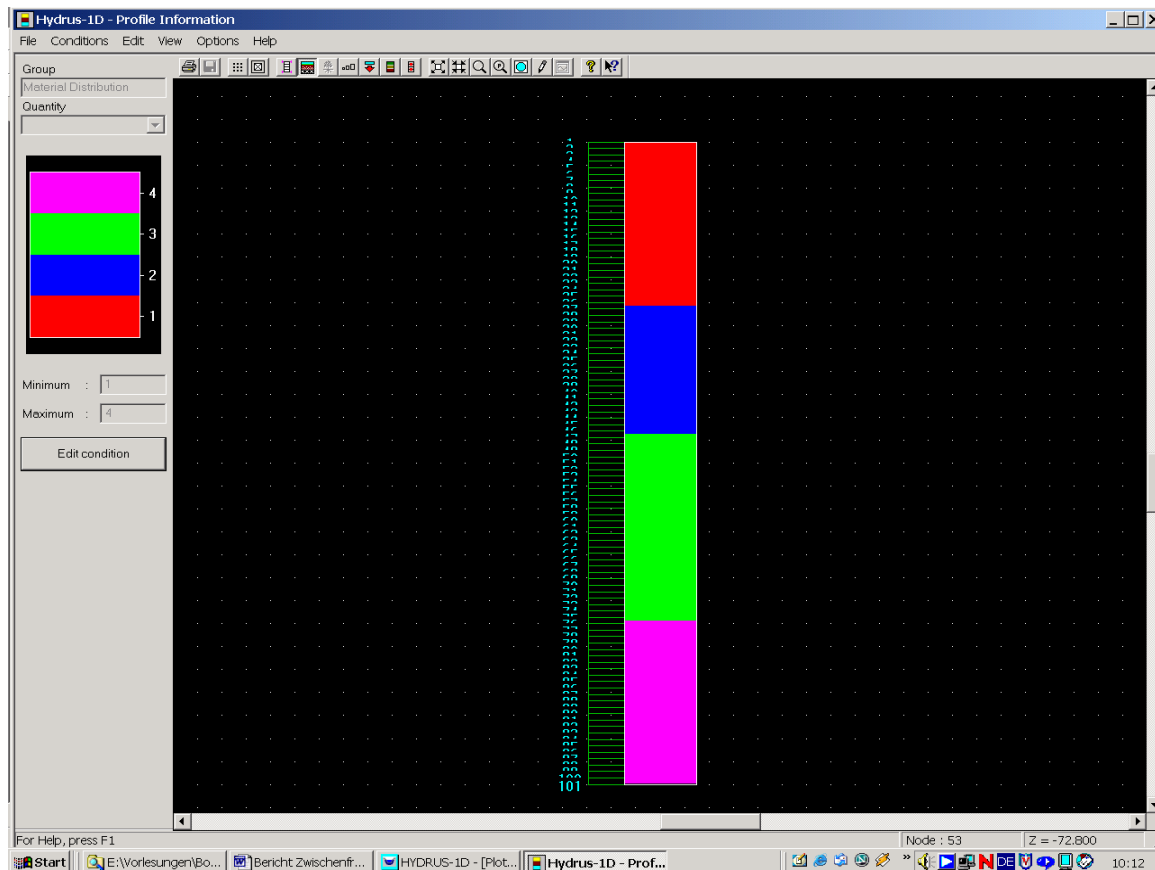


Abbildung A 23: Profilmachbildung, Materialeigenschaften und Diskretisierung

Die obere Randbedingung ist als sogenannte "Atmosphärische Randbedingung" gewählt. Dies ermöglicht die Eingabe von Daten für den Niederschlag, der Evaporation und Transpiration. Die untere Randbedingung konnte auf Grund von Messwerten (Wassergehalt in der Tiefe 140 cm; Anhang 3) für den jeweiligen Simulationszeitschritt festgelegt werden. Formal ist dazu eine Potenzialwertbedingung festzulegen.

8.3.3 Eingangsdaten

8.3.3.1 Zuordnung der Materialeigenschaften und Bodenkennwerte

Für die Simulation sind grundsätzlich zwei Bedingungen notwendig:

- 1) Eine Wasseranteils – Wassergehalt Beziehung und
- 2) eine Beziehung für das kapillare Leitvermögen.

Für die erste Bedingung standen Messwerte vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, IKB Petzenkirchen zur Verfügung. Die Parameterfunktionen innerhalb der ungesättigten Zone können mit den Modellen von Brooks and Corey, van Genuchten und Vogel and Cislérova` (modifiziertes van Genuchten Modell) erstellt werden. Für die Simulation im Projekt wurde das Modell nach van Genuchten gewählt. Für die aufgenommenen Wertepaare wurden die notwendigen Parameter mit Hilfe einer Ausgleichsfunktion (RETC) ermittelt (Abbildung A 24).

Plot 6

	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I
1	0	0,48	0,07	1,17	25	0,5
2	0	0,47	0,06238	1,16028	25	0,5
3	0,0598	0,49231	0,02638	1,77344	85,14	0,5
4	0,02821	0,47212	0,01439	2,75996	350,68	0,5

Plot 9

	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I
1	0	0,49279	0,30927	1,13457	22	0,5
2	0	0,50294	0,75199	1,12328	17,5	0,5
3	0	0,5	0,10802	1,1418	16,5	0,5
4	0	0,49588	0,00696	1,43242	27,4	0,5

Abbildung A 24: Van Genuchten Parameter für Plot 6 und Plot 9

Beispielhaft sind die Funktionen für Plot 9 in Abbildung A 25 dargestellt.

Hydraulic Properties: Theta vs. h

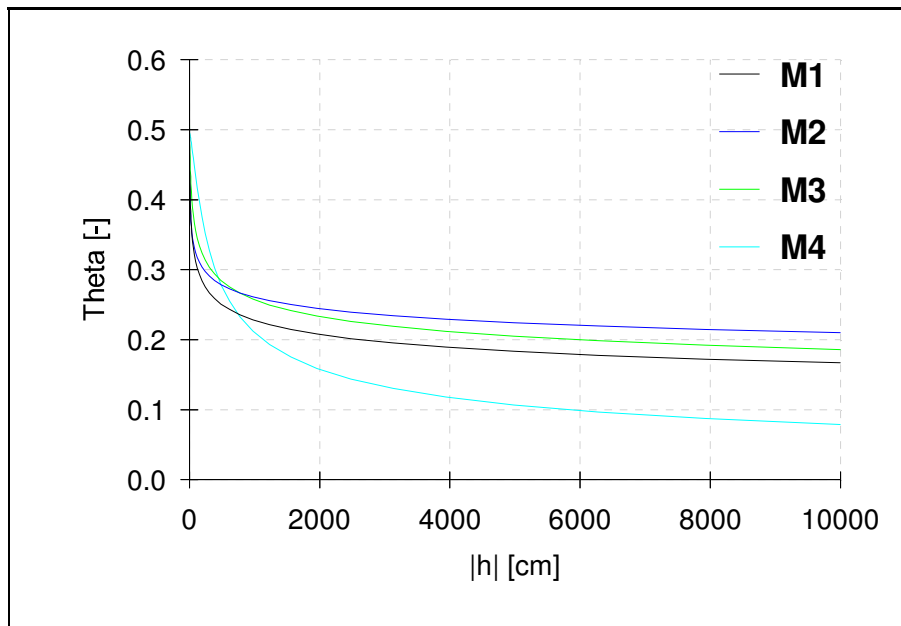


Abbildung A 25: Van Genuchten Funktionen für Plot 9

Für die Erstellung der Funktion des kapillaren Leitvermögens konnte auf die Bodenanalyse im Anhang 2 Bezug genommen werden. Der dort gefundene Durchlässigkeitsbeiwert in Verbindung mit dem Modell von van Genuchten liefert die zweite geforderte Bedingung (Abbildung A 26). Analog wurde für Plot 6 die Funktion aufgestellt.

Hydraulic Properties: log K vs. h

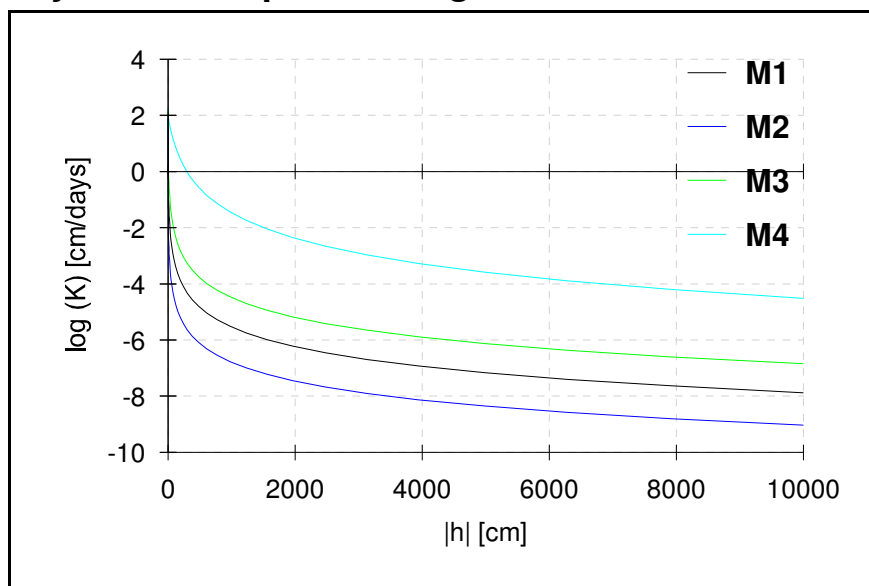


Abbildung A 26: Funktionen für das kapillare Leitvermögen Plot 9

8.3.4 Festlegung des Simulationszeitraumes

Die Wasserspannungsstartwerte wurden aus den Wasseranteilen der FDR Messung vom 1.09. 2003 ermittelt. Die Wahl des ersten Simulationszeitraumes 1.9.03 bis 10.10.03 erfolgte aufgrund der Brache. Für die weiteren Simulationen wurden das Jahr 2003/2004 jeweils für Plot 6 und Plot 9 festgelegt. Zum Vergleich wurde auch eine Simulation des nicht durch Messungen abgedeckten Zeitraumes im Jahr 2002 durchgeführt (Tabelle A 10).

Tabelle A 9: Aufstellung der Fruchtfolge für die Versuchsdurchführung

Fruchtfolge				
von	bis	Tage	Kultur	Wurzeltiefe
01.08.2002	31.10.2002	92	Zwischenfrucht 2002	80 cm
01.11.2002	15.04.2003	166	Brache2002/03	
16.04.2003	04.08.2003	111	Kartoffel 2003	40 cm
05.08.2003	10.10.2003	67	Brache2003	
11.10.2003	02.08.2004	297	Winterroggen 2003	120 cm
03.08.2004	12.08.2004	10	Stoppeln	
13.08.2004	17.11.2004	97	Zwischenfrucht 2004	50 cm
18.11.2004	31.03.2005	134	Mulch 2004/05	
01.04.2005	18.07.2005	109	Sommergerste2005	120 cm
19.07.2005	30.07.2005	13	Stoppeln	

Für jede neue Fruchtart müssen die Pflanzenparameter neu definiert werden, d.h. es wird jeweils eine eigene Simulation durchgeführt. Über die Fruchtfolge gibt Tabelle 2 Auskunft. Die Endwerte der Berechnung bilden jeweils die Startwerte für die folgende Simulation. Die grafische Aneinanderreihung kann bei Bedarf nach Beendigung der einzelnen Zeitabschnitte erfolgen.

Tabelle A 10: Festlegung der Simulationsläufe

Fruchtfolge						
von	bis	Tage				Anmerkung
23.10.2002	31.03.2003	157	Plot6V2			
Errichtung der Feldmessstelle						
1.05.2003	04.08.2003	96	Plot61	Plot91		
01.09.2003	10.10.2003	40	Plot62 Plot62a/b	Plot92	Brache	<i>August, Daten nicht durchgehend Kalibrierung</i>
11.10.2003	29.02.2004	142	Plot63b	Plot93b		
01.03.2003	02.08.2004	155	Plot63b1	Plot93b1		

Die Niederschlagswerte und die Werte für die Evaporation und die Transpiration wurden vom Institut für Meteorologie für den Standort Raasdorf zur Verfügung gestellt. Die Verdunstung wurde nach den Empfehlungen der FAO, Penman Montheith Methode (Allen et al.; 1998), berechnet.

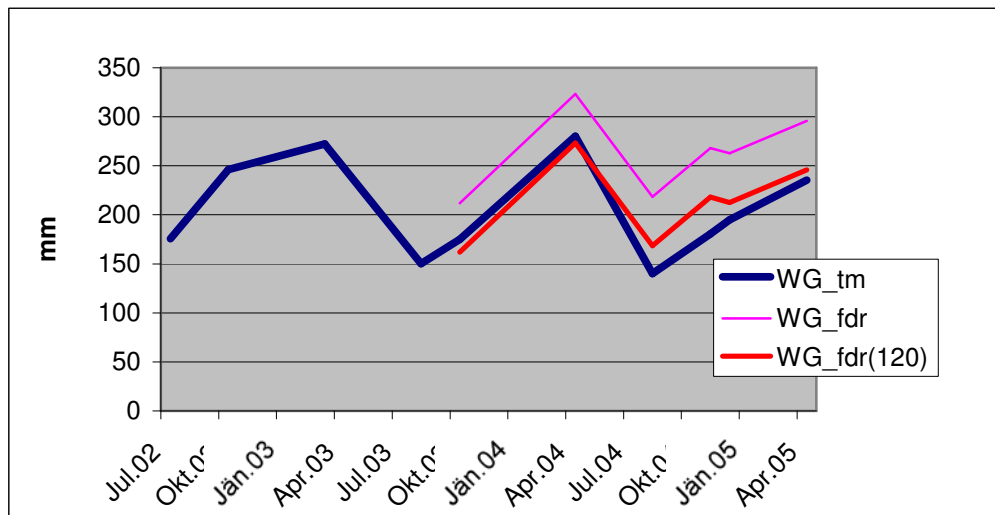
8.3.5 Modellkalibrierung und Verifizierung

Die Kalibrierung erfolgte durch die Optimierung der notwendigen Funktionen und der Randbedingung im Vergleich zu den gemessenen Werte (Zeitreihen). Begonnen wurde mit dem Monat September 2003, da in diesem Zeitraum eine Brache vorlag und daher der Wasserentzug durch den Bewuchs noch keine entscheidende Rolle spielt und die Bodenparameter davon unabhängig optimiert werden können. Für die detaillierten Simulationen müssen dann die Wurzelwachstumsparameter für den Wasserentzug durch die Pflanzenwurzeln an die jeweilige Kultur angepasst werden.

Bei der Analyse der Daten musste festgestellt werden, dass die einzelnen Parameter nicht konsistent waren. Durch die Überbestimmung der Wasserspannung, direkte Messung und Werte aus der Druckpotential – Wasseranteil- Beziehung war jedoch ein Vergleich möglich. Der Druckpotentialverlauf über die Tiefe zeigte ein durchaus plausibles Bild, das gut mit den gemessenen Wasseranteilen in Einklang steht. Auch die Übereinstimmung der Messungen mit den Tensiometern und den Werten, die der Watermarksensor in der Tiefe von 80 cm anzeigt ist zufriedenstellend.

Zur Entscheidung welche Möglichkeit den realistischsten Anfangswert liefert konnten auch gravimetrische gemessene Werte mit Messungen der FDR-Sonde herangezogen werden. Die Mittelwerte wurden aus den 4 Varianten gebildet und mit jenen der zeitlich zugehörigen

FDR-Messungen verglichen. Die korrigierte Funktion trägt der Tatsache Rechnung, dass die Profiltiefen unterschiedlich sind und eine Abminderung daher notwendig ist. Der errechnete Wert der aus der FDR-Messung wurde um ca. 50 mm reduziert. Dieser Abminderungswert ist eine Folgerung der Wasseranteile einerseits entsprechend der gemessenen Wasserspannungen in der Tiefe in 140 cm und andererseits aus der Deckung der beiden Kurven in Abbildung 6 ersichtlich. Die gravimetrische Wassergehaltsbestimmung wird bei diesem Ansatz als Feldkalibrierung herangezogen und entsprechende Startwerte (siehe oben) können so vorgegeben werden.



Legende: WG_tm gravimetrisch bestimmte Wassergehalte in der Schicht bis 120 cm Tiefe; WG_fdr aus den mit den FDR-Sonden gemessenen Werten bestimmter Wassergehalt in der Schicht bis 140 cm Tiefe; WG_fdr(120) umgerechnet auf 120 cm Tiefe

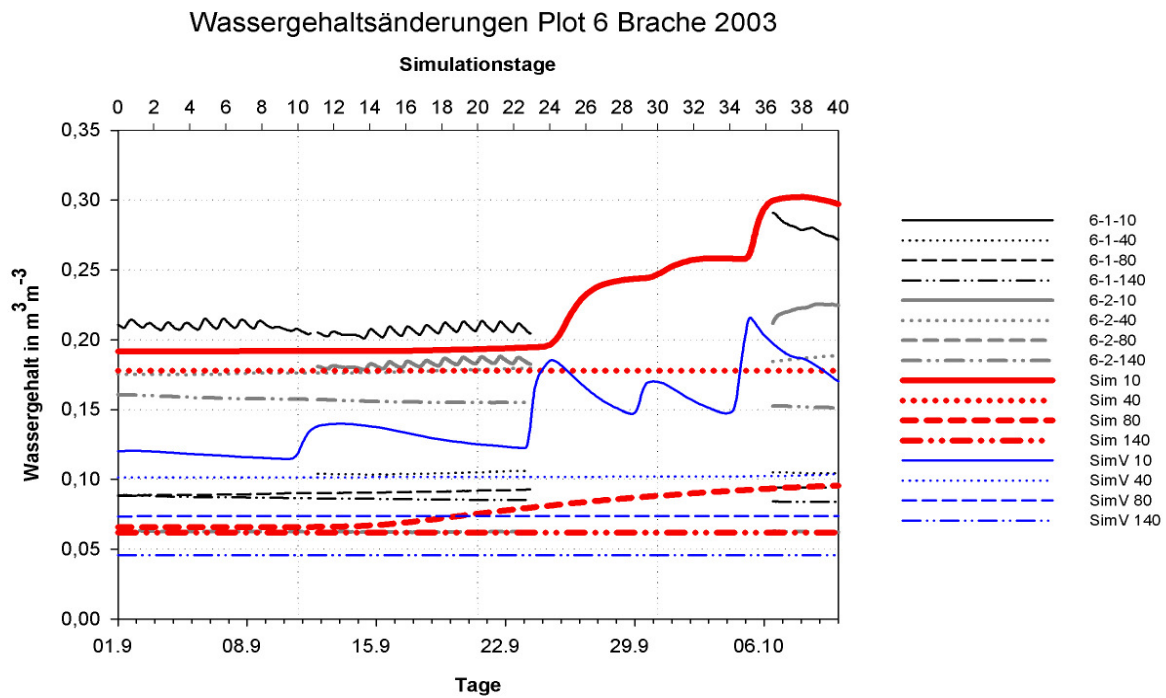
Abbildung A 27: Vergleich gravimetrisch gemessener Werte mit Messungen der FDR-Sonde

Die Funktionen der Wasseranteils – Wasserspannungsbeziehung konnten praktisch unverändert beibehalten werden. Eine geringe Korrektur war nur in Bezug zum Restwassergehalt notwendig. Dadurch konnte ein stabiles Verhalten der Programmläufe erreicht werden. Als Vorarbeit für die Simulation erfolgte ein Simulationsdurchgang mit stationären Bedingungen (kein Niederschlag und Verdunstung) für beide Plots zur Erstellung einer Anfangspotenzialverteilung im Profil.

8.3.6 Ergebnisse

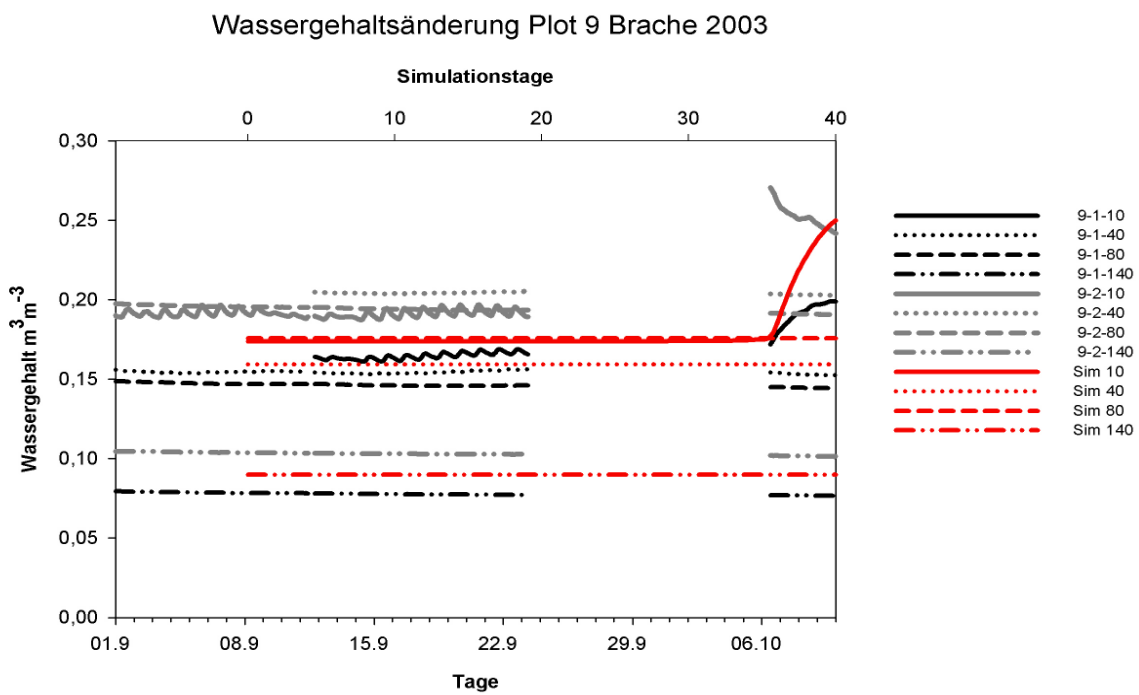
Mit dem kalibrierten Daten wurde die erste Simulation für die Messperiode 1.09.2003 – 10.10. 2003 (Brache, Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet.

Abbildung A 28 und Abbildung A 29) durchgeführt. Durch diese Simulation konnte das Anwendermodell verifiziert werden.



Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet.

Abbildung A 28: Vergleich Simulation und Messwerte bei Brache 03 für Plot 6



Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet.

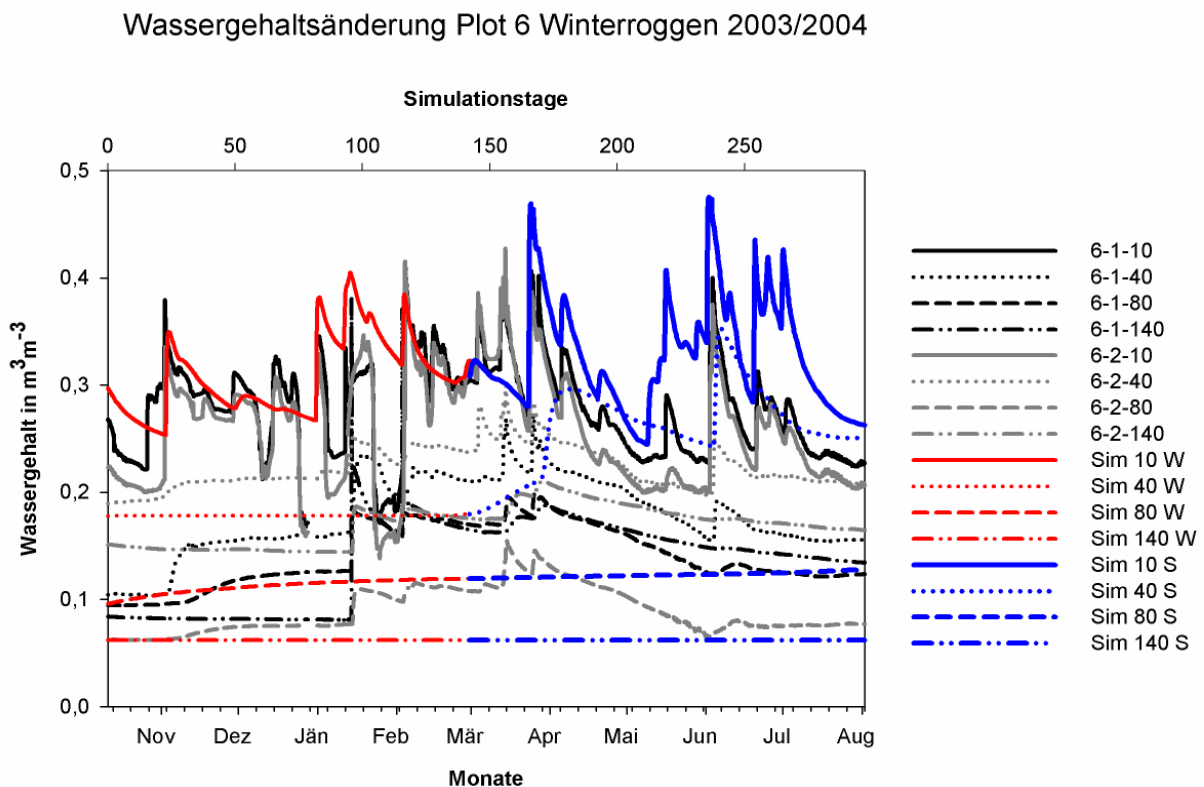
Abbildung A 29: Vergleich Simulation und Messwerte bei Brache 03 für Plot 9

Die anfänglich konstanten Wassergehaltswerte konnte durch die Simulation wiedergegeben werden. Die fehlenden Messdaten wurden durch die Simulation ergänzt. Die höheren Werte im Oktober wurden ebenfalls erreicht. In Abbildung 6 ist eine alternative Berechnung mit der Wasserspannung–Wasseranteils-Beziehung nach USDA blau eingetragen. Dadurch kann gezeigt werden, dass die vorher gewählten Beziehungen besser an den Boden angepasst sind. Die simulierten Werte lagen in der Regel innerhalb der Schwankungsbreite der beiden Wiederholungen.

Zum weiteren Test des Anwendermodells wurde die Kultur Winterroggen durchgerechnet, jeweils wieder für Plot 6 und Plot 9 (Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet. W bezeichnet die Winterperioden, ohne Wurzelwachstumsfunktion, S Sommerperioden, das modellierte Wurzelwachstum wird berücksichtigt).

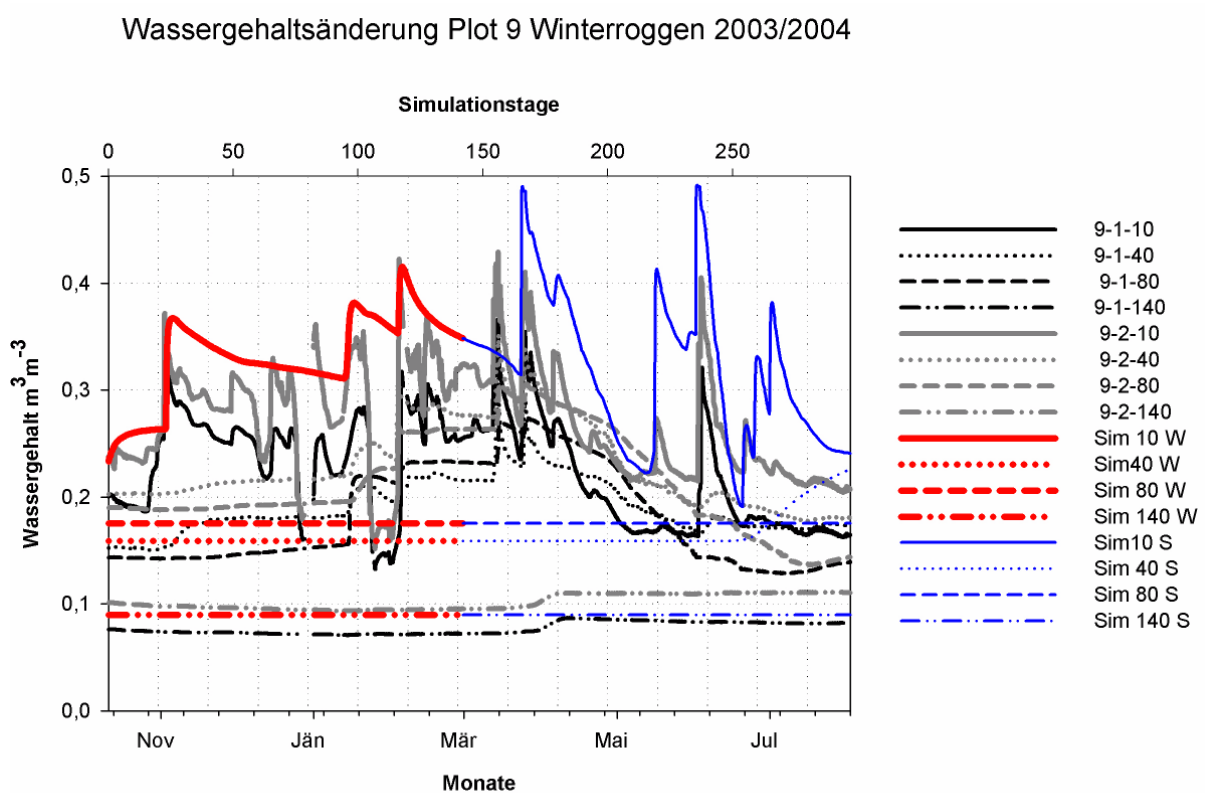
Abbildung A 30 und Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet. W bezeichnet die Winterperioden, ohne Wurzelwachstumsfunktion, S Sommerperioden, das modellierte Wurzelwachstum wird berücksichtigt.

Abbildung A 31). Die Simulation über die Wintermonate ist relativ unproblematisch. Zu berücksichtigen ist, dass die Messwerte Sprünge immer dann aufweisen wenn die Sensoren eingefroren sind. Der Endwert im März 2004 wurde zufriedenstellend erreicht. Bis zum Ende des Simulationszeitraumes konnte eine geringe Überschätzung des gespeicherten Bodenwasser beobachtet werden. Ein Grund könnte in den aus der Literatur bzw. eigenen früheren Untersuchungen geschätzten Parametern liegen. Auch Streuungen in den meteorologischen Daten sind eine mögliche Ursache.



Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet. W bezeichnet die Winterperioden, ohne Wurzelwachstumsfunktion, S Sommerperioden, das modellierte Wurzelwachstum wird berücksichtigt.

Abbildung A 30: Vergleich Simulation und Messwerte bei Winterroggen 03/04 für Plot 6



Die simulierten Verläufe sind mit Sim gekennzeichnet. W bezeichnet die Winterperioden, ohne Wurzelwachstumsfunktion, S Sommerperioden, das modellierte Wurzelwachstum wird berücksichtigt.

Abbildung A 31: Vergleich Simulation und Messwerte bei Winterroggen 03/04 für Plot 9

Eine der wesentlichsten Aufgaben war die Beurteilung des nicht durch kontinuierliche Messdaten abgesicherten Zeitraumes. Es standen jedoch gravimetrisch gemessenen Werte am Anfang und am Ende des Simulationszeitraumes zur Verfügung. Diese konnten mit dem unveränderten Anwendermodell zufriedenstellend nachgebildet werden (Abbildung A 32).

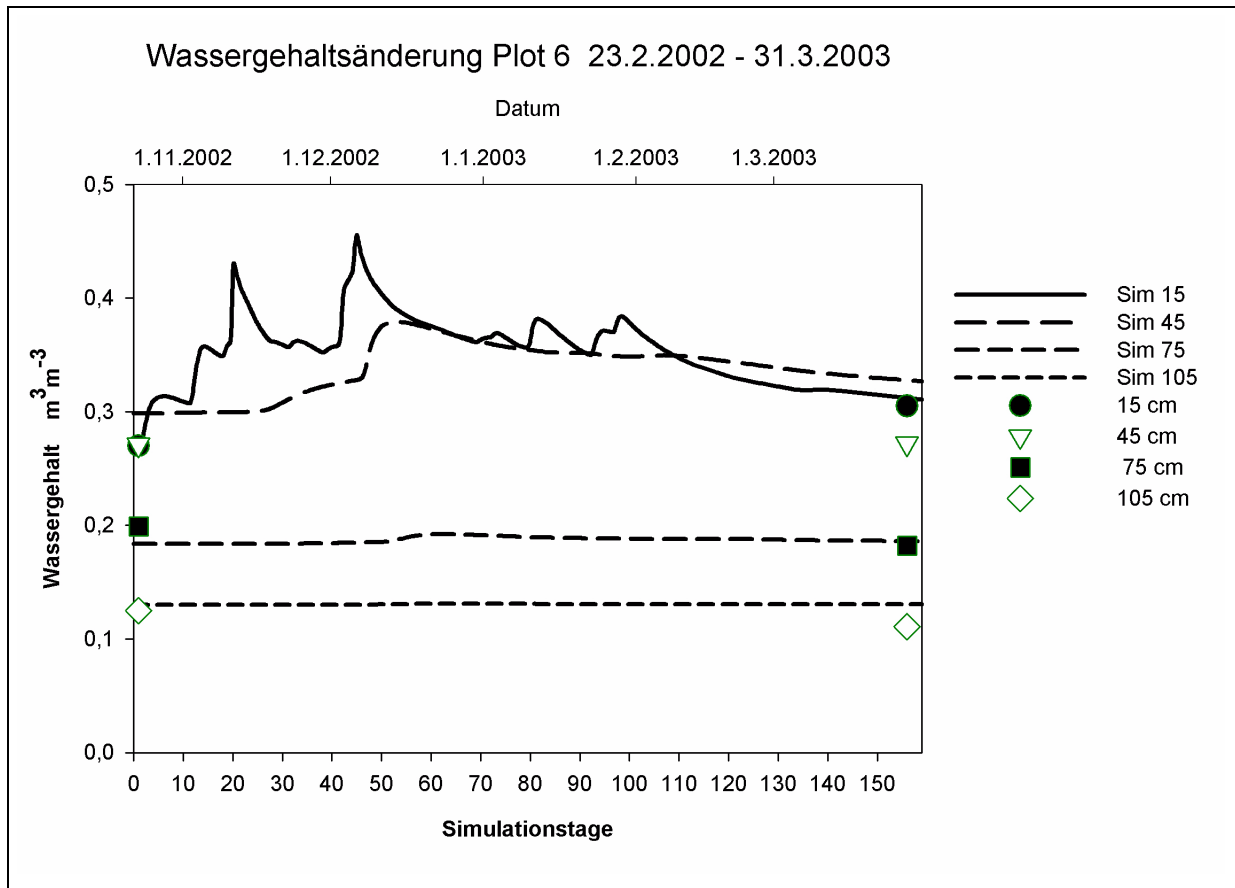


Abbildung A 32: Simulation für Versuchszeitraum 2002

Teil der Berechnung ist auch die Wasserbilanz und daher ist ein direkter Vergleich der Flüsse durch die untere Berandung der Wintermonate 2002/2003 und 2003/2004 möglich (Abbildung A 33 und Abbildung A 34). Positive Werte entsprechen kapillarem Aufstieg, negative Werte einer Sickerung. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen führen zu einem konträrem Verhalten des Flusses für diese Zeiträume. Für die Wintermonate 2002/2003 wurde eine Sickerung von ca. 30 mm errechnet. Demgegenüber steht eine Wassernachlieferung aus tieferen Schichten für die Wintermonate 2003/2004.

Cum. Bottom Flux

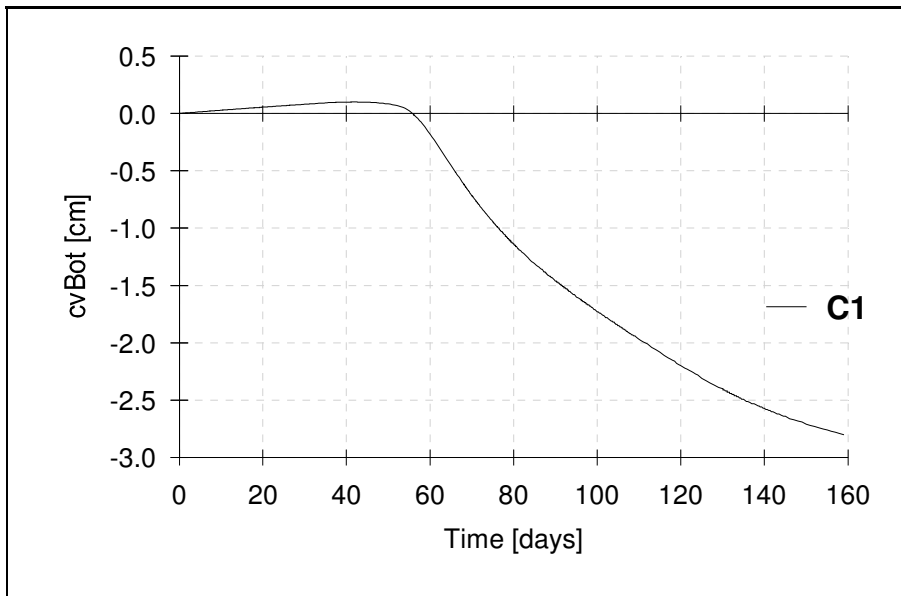


Abbildung A 33: Simulation für Plot 6 2002 23.10.02 - 28.3.03

Cum. Bottom Flux

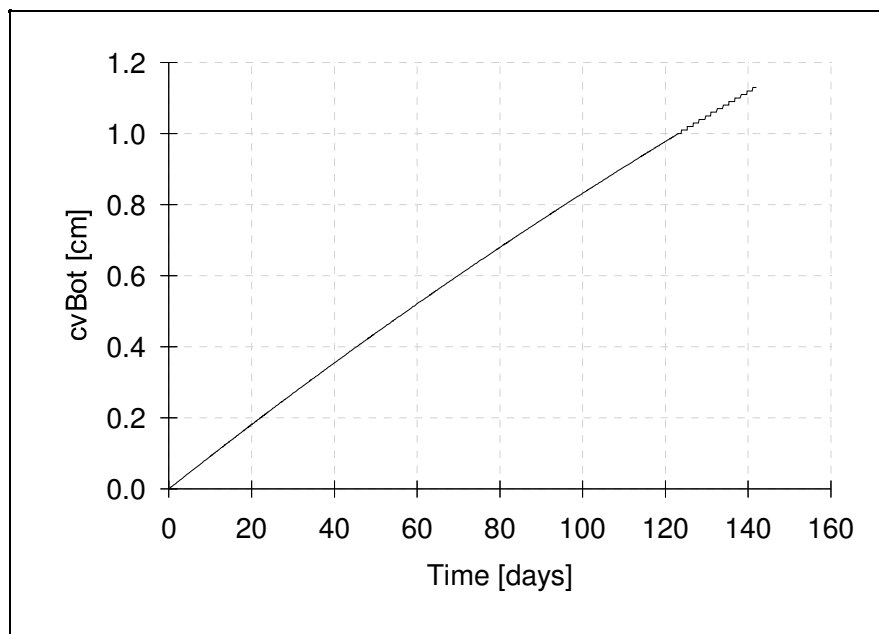


Abbildung A 34: Simulation für Plot 6 11.10.03 - 29.02.04

8.4 Anhang 4 – Diverse Tabellen und Abbildungen

Tabelle A 11: Zeittafel der Feldarbeiten

Datum	Maßnahme
09.07.2002	Auswahl geeigneter Flächen
15.07.2002	Einbau der Saugkerzen
31.07.2002	Bodenprobennahme (ZA)
30.07.2002	Zwischenfruchtanbau 2002
19.08.2002	Auflaufbonitur
21.10.2002	Ertragserhebung ZF
23.10.2002	Bodenproben (ZB)
28.10.2002	Wurzelproben
5.11.2003	Mulchen der ZFF
28.03.2003	Bodenproben (ZC)
16.04.2003	Bodenbearbeitung, Anbau Kartoffeln
04.08.2003	Kartoffelernte
07.08.2003	Bodenproben (ZD)
10.10.2003	Bodenbearbeitung, Anbau Winterroggen
09.10.2003	Bodenproben (ZE)
09.04.2004	Bodenproben (ZF)
20.07.2004	Ertragserhebung Winterroggen (händisch)
22.07.2004	Ertragserhebung Winterroggen (mit Parzellenmähdrescher)
05.08.2004	Bodenproben (ZG)
12.08.2004	Saatbeetbereitung (Grubber) und Zwischenfruchtanbau
03.11.2004	Ernte ZFF (Ertragserhebung)
04.11.2004	Bodenproben (ZH)
05.11.2004	Wurzelprobennahme ZFF
17.11.2004	einarbeiten der ZFF mit Grubber
16.12.2004	Bodenprobennahme (ZI) für N_{\min} und N-Mineralisierung
31.03.2005	Anbau der Sommergerste
04.04.2005	Bodenprobennahme (ZJ) für C/N, N-Mineralisierung, N_{\min}
18.07.2005	Ernte Sommergerste mit Parzellenmähdrescher, m^2 -Ertragserhebung

Tabelle A 12: Fruchtfolgeausschnitt der Projektlaufzeit

Kultur	von	bis	Tage
Zwischenfrucht 02	01.08.2002	31.10.2002	92
Brache 2002/03	01.11.2002	15.04.2003	166
Kartoffeln 2003	16.04.2003	04.08.2003	111
Brache 2003	05.08.2003	10.10.2003	67
Winterroggen 2003	11.10.2003	02.08.2004	297
Stoppeln	03.08.2003	12.08.2003	10
Zwischenfrucht 2004	13.08.2004	17.11.2004	97
Brache 2004/05	18.11.2004	31.03.2005	134
Sommergerste 2005	01.04.2005	18.07.2005	109
Stoppeln	19.07.2005	30.07.2005	13

Tabelle A 13: Biomasseerträge der Zwischenfrüchte in dt TM ha⁻¹

	ZFF2002			ZFF2004		
	OI	UI	TOTAL	OI	UI	TOTAL
var1 (leg + n-leg)	40,2	19,7	59,9	5,7	4,9	10,6
var2 (leg)	25,7	8,9	34,6	6,4	3,6	10,0
var3 (n-leg)	29,5	26,0	55,5	6,0	4,6	10,6

Legende: ZFF Zwischenfrüchte; OI oberirdische Biomasse; UI unterirdische Biomasse; TOTAL gesamt-pflanzliche Biomasse

Tabelle A 14: N-Erträge der Zwischenfrüchte in kg N ha⁻¹

	ZFF2002			ZFF2004		
	OI	UI	TOTAL	OI	UI	TOTAL
var1 (leg + n-leg)	109	32	141	15	6	21
var2 (leg)	80	16	96	20	4	24
var3 (n-leg)	60	34	94	12	5	17

Legende: ZFF Zwischenfrüchte; OI oberirdische N-Ertrag; UI unterirdische N-Ertrag; TOTAL gesamt-pflanzlicher N-Ertrag

Tabelle A 15: Mineralischer Stickstoff (kg N ha⁻¹) im Boden für alle Parzellen zu allen Probenahmeterminen

par	wh	var	31. Jul. 02					23. Okt. 02				
			a	b	c	d	g	a	b	c	d	g
1	1	1	29,3	23,0	17,5	0,0	69,7	3,8	2,6	0,0	3,2	9,5
2	2	2	11,7	14,8	9,4	0,0	35,9	18,2	13,6	21,2	9,9	63,0
3	3	1	23,4	18,9	6,5	0,0	48,8	3,7	2,8	2,7	2,0	11,2
4	4	4	12,0	21,6	7,5	0,0	41,1	17,6	16,7	13,5	9,4	57,3
5	1	2	7,4	20,2	10,4	0,0	38,1	13,5	10,3	25,6	6,7	56,0
6	2	4	12,8	6,4	8,4	0,0	27,5	13,7	26,5	24,8	15,4	80,5
7	3	4	4,3	7,6	4,1	0,0	16,0	11,6	31,5	29,9	10,1	83,1
8	4	2	0,0	6,6	4,8	0,0	11,4	5,9	8,8	14,7	5,3	34,8
9	1	3	12,5	20,4	2,1	0,0	35,0	2,0	3,4	0,0	2,1	7,5
10	2	1	18,6	23,9	0,0	0,0	42,5	4,1	2,8	1,4	1,3	9,6
11	3	3	0,0	12,3	3,9	0,0	16,2	3,4	2,1	2,5	2,3	10,3
12	4	3	1,6	16,5	0,3	0,0	18,3	2,8	1,3	0,4	0,6	5,1
13	1	4	26,9	31,1	1,2	0,0	59,2	15,7	47,5	46,3	12,6	122,1
14	2	3	25,5	48,3	0,8	0,0	74,6	3,9	2,3	0,8	0,8	7,8
15	3	2	8,4	26,5	0,0	0,0	34,9	8,9	16,1	25,6	5,8	56,4
16	4	1	22,1	22,0	1,4	0,0	45,5	5,3	1,1	0,5	1,6	8,5
par	wh	var	28. Mär. 03					7. Aug. 03				
			a	b	c	d	g	a	b	c	d	g
1	1	1	64,3	26,5	11,8	8,3	111,0	50,8	4,0	4,3	8,2	67,2
2	2	2	64,0	26,1	6,6	3,6	100,3	40,2	4,6	5,7	6,8	57,4
3	3	1	60,5	10,4	9,2	2,9	82,9	48,7	2,4	1,9	7,9	61,0
4	4	4	53,2	21,6	8,1	1,3	84,2	24,0	1,5	3,9	3,3	32,7
5	1	2	59,6	25,2	30,4	27,3	142,5	52,3	7,7	10,1	8,5	78,6
6	2	4	90,5	46,1	21,7	17,5	175,7	36,5	9,7	9,6	12,4	68,2
7	3	4	77,6	25,6	9,1	11,4	123,7	18,6	6,2	10,6	9,2	44,5
8	4	2	60,4	59,4	46,2	40,2	206,3	20,9	0,0	4,0	3,8	28,7
9	1	3	48,6	23,8	13,0	5,6	91,0	49,8	2,1	6,3	12,4	70,7
10	2	1	39,3	9,0	7,9	2,4	58,7	49,4	2,3	2,7	9,4	63,8
11	3	3	29,1	10,2	3,8	1,1	44,2	21,4	0,0	5,2	8,3	34,9
12	4	3	64,1	17,5	11,0	4,4	97,0	22,6	0,0	1,6	3,6	27,8
13	1	4	48,0	18,7	15,9	9,0	91,6	56,7	23,5	28,2	28,0	136,4
14	2	3	48,4	59,6	63,3	38,9	210,3	52,7	2,1	7,1	12,3	74,2
15	3	2	54,2	59,5	51,0	34,4	199,2	27,0	19,0	10,8	11,8	68,6
16	4	1	76,9	43,5	77,9	33,5	231,8	34,4	0,8	1,1	6,3	42,6
par	wh	var	9. Okt. 03					9. Apr. 04				
			a	b	c	d	g	a	b	c	d	g
1	1	1	113,4	24,8	8,8	5,0	151,9	6,0	23,1	30,4	19,6	79,2
2	2	2	75,9	22,8	8,2	15,9	122,8	6,7	18,7	56,1	13,6	95,1
3	3	1	78,9	17,3	4,7	2,6	103,5	7,8	19,1	40,1	22,7	89,7
4	4	4	58,5	8,6	4,6	6,5	78,2	4,8	11,1	23,4	20,4	59,6
5	1	2	148,1	22,9	10,3	9,4	190,8	4,9	9,1	50,9	38,9	103,9
6	2	4	82,0	22,9	15,3	16,6	136,7	6,2	17,6	53,5	26,1	103,5
7	3	4	70,7	20,8	13,5	12,2	117,2	4,1	7,5	16,8	38,0	66,5
8	4	2	103,6	11,6	4,3	4,3	123,8	3,6	5,3	11,0	25,0	44,9
9	1	3	95,4	14,2	9,3	5,4	124,3	5,3	22,4	57,3	28,4	113,5
10	2	1	111,4	22,9	7,9	4,7	146,8	4,6	19,9	57,1	42,7	124,3
11	3	3	82,1	19,3	6,2	4,3	111,9	3,2	8,5	52,2	30,4	94,2
12	4	3	77,0	13,4	3,9	4,1	98,4	5,3	6,1	21,4	14,8	47,7
13	1	4	111,3	16,8	10,2	26,7	165,0	5,3	11,1	43,6	44,3	104,3
14	2	3	124,4	18,6	9,6	7,9	160,4	5,3	22,9	67,6	42,3	138,2
15	3	2	88,9	13,8	14,2	21,7	138,6	4,9	25,0	71,0	36,5	137,3
16	4	1	92,7	19,6	5,5	5,1	122,8	3,6	9,7	56,8	19,3	89,5

Fortsetzung Tabelle A 15: Mineralischer Stickstoff (kg N ha⁻¹) im Boden für alle Parzellen zu allen Probenahmeterminen

par	wh	var	5. Aug. 04					4. Nov. 04				
			a	b	c	d	g	a	b	c	d	g
1	1	1	14,1	7,2	8,7	4,2	34,2	12,7	2,6	8,8	12,2	36,4
2	2	2	12,1	1,9	1,3	8,1	23,4	19,3	12,4	4,2	6,5	42,4
3	3	1	11,6	1,1	4,1	6,4	23,2	14,6	0,0	2,6	4,4	21,6
4	4	4	12,0	0,9	2,0	4,7	19,6	27,8	8,6	5,4	6,9	48,7
5	1	2	18,2	3,6	2,9	4,6	29,3	20,7	10,8	7,2	5,8	44,5
6	2	4	14,5	0,0	2,3	11,3	28,1	20,1	12,3	4,7	10,7	47,8
7	3	4	12,3	2,6	2,3	6,7	24,0	20,0	10,8	11,1	9,5	51,4
8	4	2	8,2	0,0	3,5	5,5	17,1	13,7	5,2	5,3	9,4	33,5
9	1	3	15,7	5,3	6,1	11,3	38,4	16,3	3,1	5,0	6,1	30,5
10	2	1	11,4	2,0	13,1	9,4	35,8	16,9	4,5	6,9	10,5	38,8
11	3	3	13,6	2,2	3,0	6,2	25,0	15,6	4,2	3,0	4,1	26,8
12	4	3	11,2	2,4	1,4	3,2	18,2	12,1	2,6	3,1	3,4	21,3
13	1	4	17,2	5,1	22,4	23,7	68,4	28,9	13,4	25,3	32,9	100,4
14	2	3	8,4	2,0	2,0	6,8	19,2	31,1	4,1	6,8	15,4	57,4
15	3	2	13,0	2,8	11,0	4,3	31,1	17,8	7,4	5,2	8,2	38,7
16	4	1	10,2	2,0	0,0	6,6	18,8	17,2	5,0	0,6	2,1	24,9
par	wh	var	16. Dez. 04					4. Apr. 05				
			a	b	c	d	g	a	b	c	d	g
1	1	1	22,9	20,4	14,3	18,0	75,6	42,8	21,4	3,6	10,4	78,2
2	2	2	21,5	6,2	8,8	8,2	44,7	33,6	22,1	2,7	2,3	60,7
3	3	1	12,0	8,5	3,9	7,1	31,5	25,4	14,5	2,2	1,8	43,9
4	4	4	16,2	16,9	4,6	10,5	48,2	16,6	12,5	1,9	2,7	33,8
5	1	2	8,6	21,3	10,4	12,5	52,8	61,1	18,3	5,3	9,0	93,7
6	2	4	16,6	15,5	8,2	10,5	50,7	24,4	11,1	10,7	5,7	51,8
7	3	4	15,4	13,2	5,4	11,7	45,6	18,0	10,6	11,0	5,9	45,5
8	4	2	15,7	4,7	9,5	10,7	40,6	38,2	21,3	10,7	1,0	71,1
9	1	3	15,7	8,6	4,3	8,1	36,7	24,7	14,3	6,4	1,2	46,6
10	2	1	13,9	4,2	9,5	9,2	36,7	25,5	11,4	9,4	1,8	48,1
11	3	3	13,0	5,6	5,9	5,2	29,8	31,9	5,1	3,7	2,6	43,4
12	4	3	10,7	14,3	2,2	5,9	33,2	38,4	7,8	2,5	3,5	52,3
13	1	4	26,8	3,2	27,7	35,5	93,2	32,6	7,9	8,3	13,8	62,5
14	2	3	19,8	5,9	1,8	5,7	33,2	30,2	9,9	4,2	2,8	47,0
15	3	2	28,0	11,6	9,0	12,8	61,4	72,5	21,0	4,6	2,5	100,5
16	4	1	12,2	7,0	4,7	4,4	28,3	36,8	20,5	4,2	3,5	65,0

a: 0 – 30 cm, b: 30 – 60 cm, c: 60 – 90 cm, d: 90 – 120 cm

Tabelle A 16: Biomasse- und Stickstofferträge der Zwischenfrüchte 2002

par	var	biomasseproduktion - tm in kg / ha							n - gehalt in kg / ha			
		spross		rüben	wurzeln	summe aller zff der variante			leg	n-leg	rüben	wurzeln
		leg	n-leg	ölr., strü.	alle zff	oberirdisch	unterirdisch	gesamt				
1	1	760	3172	1540	715	3932	2255	6187	21,97	88,18	28,96	11,08
2	2	2520			948	2520	948	3468	74,60			17,59
3	1	1704	2217	747	795	3920	1542	5462	50,00	56,31	11,17	14,70
4	4											
5	2	2674			1089	2674	1089	3762	92,90			21,12
6	4											
7	4											
8	2	2871			758	2871	758	3629	83,83			13,65
9	3		3456	1544	1340	3456	2884	6340		65,31	21,00	18,27
10	1	1776	2346	998	1624	4121	2623	6744	57,89	58,88	15,83	26,75
11	3		3036	1350	924	3036	2274	5310		64,66	15,26	13,31
12	3		2246	1179	1009	2246	2188	4434		46,26	15,15	13,02
13	4											
14	3		3055	1935	1127	3055	3062	6117		65,53	23,61	15,32
15	2	2195			746	2195	746	2942	68,39			12,99
16	1	1489	2606	755	708	4095	1463	5558	44,31	58,10	10,30	10,91
mw	1	1432	2585	1010	961	4017	1971	5988	43,54	65,37	16,56	15,86
mw	2	2565			885	2565	885	3450	79,93			16,34
mw	3		2948	1502	1100	2948	2602	5550		60,44	18,75	14,98

Tabelle A 17: Biomasse- und Stickstofferträge der ZFF2004

par	var	biomasseproduktion - tm in kg / ha							n - gehalt in kg / ha			
		spross		rüben	wurzeln	summe aller zff der variante			leg	n-leg	rüben	wurzeln
		leg	n-leg	ölr., strü.	alle zff	oberirdisch	unterirdisch	gesamt				
1	1	91	546	170	471	638	641	1279	2,64	15,19	3,19	5,81
2	2	723			535	723	535	1258	21,41			5,42
3	1	176	268	58	624	444	682	1126	5,15	6,82	0,87	6,55
4	4											
5	2	542			229	542	229	771	18,84			3,10
6	4											
7	4											
8	2	609			334	609	334	943	17,78			4,12
9	3		667	148	434	667	582	1249		12,61	2,02	5,01
10	1	220	495	94	309	714	403	1117	7,16	12,42	1,49	3,63
11	3		941	90	376	941	466	1406		20,03	1,02	3,69
12	3		313	56	261	313	317	629		6,44	0,71	3,02
13	4											
14	3		471	89	404	471	493	964		10,11	1,08	3,79
15	2	699			347	699	347	1045	21,76			4,80
16	1	261	205	26	197	466	224	689	7,75	4,57	0,36	2,22
mw	1	187	379	87	400	565	487	1053	5,68	9,75	1,48	4,55
mw	2	643			361	643	361	1004	19,95			4,36
mw	3		598	96	369	598	464	1062		12,30	1,21	3,88

Tabelle A 18: Deckungsbeiträge für Winterweizen und Kartoffel

Winterweizen											
Speiseware											
Ausgangsdaten		Einheit									
Ertrag feldfallend		dt/ha		36,00		38,00		40,00		42,00	
Verlust (Vorreinigung,...)		%		2,5%		2,5%		2,5%		2,5%	
Nettoertrag		dt/ha		35,10		37,05		39,00		40,95	
Anteil Speiseware		%		100%		100%		100%		100%	
Preis Speiseware		€/dt		21,50		21,50		21,50		21,50	
Leistung		Einheit €/Einheit		€/ha		€/ha		€/ha		€/ha	
Speiseware		dt		21,50		755		797		839	
Summe		€/ha		755		797		839		880	
		Einheit €/Einheit		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha	
Saatgut		kg		0,581		116,10		116,10		200	
Ernteversicherung		ha				17,00		17,00		116,10	
Lohndrusch		ha				95,00		95,00		17,00	
Trocknung / Reinigung		dt		1,60		36,0		57,60		38,0	
Ein-/Auslagerung		dt		1,10		35,1		38,61		60,80	
Vermarktungsgebühr		dt		0,36		35,1		12,74		40,76	
Variable Maschinenkosten		ha						128,74		39,0	
Summe		€/ha		466		472		478		484	
Deckungsbeitrag		€/ha		289		325		361		396	

Kartoffel											
Stärkekartoffel											
Ausgangsdaten		Einheit									
Ertrag feldfallend		dt/ha		225		238		250		263	
Verlust (Vorreinigung,...)		%		6,0%		6,0%		6,0%		6,0%	
Nettoertrag		dt/ha		212		223		235		247	
Stärkegehalt		%		18,0%		18,0%		18,0%		18,0%	
Preis in €/kg Stärke		€/kg		0,670		0,670		0,670		0,670	
Leistung		Einheit €/Einheit		€/ha		€/ha		€/ha		€/ha	
Speiseware		kg Stä.		0,670		2.551		2.692		2.834	
Summe		€/ha		2.551		2.692		2.834		2.976	
		Einheit €/Einheit		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha	
Pflanzgut		kg		0,5383		1.077		1.077		2.000	
Pflanzenschutzmittel		ha				125,00		125,00		1.077	
Ernteversicherung		ha				17,00		17,00		125,00	
Lohnernte		ha				475,00		475,00		17,00	
Verwertungsbeitrag		dt Stä.		0,00		38,07		0,00		475,00	
Variable Maschinenkosten		ha						377,16		44,42	
Summe		€/ha		480		622		763		905	
Deckungsbeitrag		€/ha		480		622		763		1.047	

Tabelle A 19: Deckungsbeiträge für Winterroggen und Sommergerste

Winterroggen													
Speiseware													
Ausgangsdaten		Einheit											
Ertrag feldfallend	dt/ha	36,00		38,00		40,00		42,00		44,00			
Verlust (Vorreinigung,...)	%	2,5%		2,5%		2,5%		2,5%		2,5%			
Nettoertrag	dt/ha	35,10		37,05		39,00		40,95		42,90			
Anteil Speiseware	%	100%		100%		100%		100%		100%			
Preis Speiseware	€/dt	11,70		11,70		11,70		11,70		11,70			
Preis Futterware	€/dt	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00			
Leistung		Einheit	€/Einheit	€/ha		€/ha		€/ha		€/ha			
Speiseware		dt	11,70	411		433		456		479			
		Einheit	€/Einheit	Menge	€/ha	Menge	€/ha	Menge	€/ha	Menge	€/ha		
Saatgut	kg	0,52		87,62	87,62	170	87,62		87,62		87,62		
Ernteversicherung	ha			17,00	17,00		17,00		17,00		17,00		
Lohndrusch	ha			95,00	95,00		95,00		95,00		95,00		
Trocknung / Reinigung	dt	1,60	36,0	57,60	38,0	60,80	40,0	64,00	42,0	67,20	44,0	70,40	
Ein-/Auslagerung	dt	1,10	35,1	38,61	37,1	40,76	39,0	42,90	41,0	45,05	42,9	47,19	
Vermarktungsgebühr	dt	0,36	35,1	12,74	37,1	13,45	39,0	14,16	41,0	14,86	42,9	15,57	
Variable Maschinenkosten	ha			119,97		119,97		119,97		119,97		119,97	
Summe		€/ha		429		435		441		447		453	
Deckungsbeitrag		€/ha		-18		-1		16		32		49	

Sommergerste													
Futterware													
Ausgangsdaten		Einheit											
Ertrag feldfallend	dt/ha	32,40		34,20		36,00		37,80		39,60			
Verlust (Vorreinigung,...)	%	2,5%		2,5%		2,5%		2,5%		2,5%			
Nettoertrag	dt/ha	31,59		33,35		35,10		36,86		38,61			
Anteil anerkannte Ware	%	100%		100%		100%		100%		100%			
Preis anerkannte Ware	€/dt	16,50		16,50		16,50		16,50		16,50			
Leistung		Einheit	€/Einheit	€/ha		€/ha		€/ha		€/ha			
Anerkannte Ware		dt	16,50	521		550		579		608			
Summe		€/ha		521		550		579		608		637	
		Einheit	€/Einheit	Menge	€/ha	Menge	€/ha	Menge	€/ha	Menge	€/ha		
Saatgut	kg	0,47		93,16	93,16	200	93,16		93,16		93,16		
Ernteversicherung	ha			17,00	17,00		17,00		17,00		17,00		
Lohndrusch	ha			95,00	95,00		95,00		95,00		95,00		
Trocknung / Reinigung	dt	1,60	32,4	51,84	34,2	54,72	36,0	57,60	37,8	60,48	39,6	63,36	
Ein-/Auslagerung	dt	1,10	31,6	34,75	33,3	36,68	35,1	38,61	36,9	40,54	38,6	42,47	
Vermarktungsgebühr	dt	0,36	31,6	11,47	33,3	12,10	35,1	12,74	36,9	13,38	38,6	14,02	
Variable Maschinenkosten	ha			128,74		128,74		128,74		128,74		128,74	
Deckungsbeitrag		€/ha		89		113		136		160		183	

Tabelle A 20: Deckungsbeiträge bzw. Kosten der Rotationsbrache und der Zwischenfrüchte

Flächenstilllegung (Rotationsbrache)													
einjährig													
Ausgangsdaten		Einheit											
Saatmenge		kg		20,0		22,5		25,0		27,5		30,0	
Leistung		Einheit €/Einheit		€/ha		€/ha		€/ha		€/ha		€/ha	
Sonstiges				0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Summe		€/ha		0		0		0		0		0	
Variable Kosten		Einheit €/Einheit		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha	
Saatgut		kg 3,40		20,0 68,00		22,5 76,50		25,0 85,00		27,5 93,50		30,0 102,00	
Variable Maschinenkosten				65,06		65,06		65,06		65,06		65,06	
Summe		€/ha		133		142		150		159		167	
Deckungsbeitrag		€/ha		-133		-142		-150		-159		-167	

Zwischenfrucht - var1 (leg + n-leg)													
Ausgangsdaten		Einheit											
Saatmenge		kg		90,0		101,3		112,5		123,8		135,0	
Variable Kosten		Einheit €/Einheit		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha	
Saatgut		kg 1,21		90,0 108,90		101,3 122,51		112,5 136,13		123,8 149,74		135,0 163,35	
Variable Maschinenkosten				39,13		39,13		39,13		39,13		39,13	
Summe		€/ha		148		162		175		189		202	
Deckungsbeitrag		€/ha		-148		-162		-175		-189		-202	

Zwischenfrucht - var2 (leg)													
Ausgangsdaten		Einheit											
Saatmenge		kg		168,0		189,0		210,0		231,0		252,0	
Variable Kosten		Einheit €/Einheit		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha	
Saatgut		kg 1,06		168,0 178,08		189,0 200,34		210,0 222,60		231,0 244,86		252,0 267,12	
Variable Maschinenkosten				39,13		39,13		39,13		39,13		39,13	
Summe		€/ha		217		239		262		284		306	
Deckungsbeitrag		€/ha		-217		-239		-262		-284		-306	

Zwischenfrucht - var3 (n-leg)													
Ausgangsdaten		Einheit											
Saatmenge		kg		12,0		13,5		15,0		16,5		18,0	
Variable Kosten		Einheit €/Einheit		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha		Menge €/ha	
Saatgut		kg 3,40		12,0 40,80		13,5 45,90		15,0 51,00		16,5 56,10		18,0 61,20	
Variable Maschinenkosten				39,13		39,13		39,13		39,13		39,13	
Summe		€/ha		80		85		90		95		100	
Deckungsbeitrag		€/ha		-80		-85		-90		-95		-100	

Tabelle A 21: Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolgen pro Hektar und Jahr ohne Berücksichtigung von Direktzahlungen

Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge - var1									
Verfahren	Ertrag in dt/ha	Preis in €/dt	var. Kosten in €/ha	DB in €/ha	Fläche in ha	Σ DB in €	Anteil Fläche bzw. GDB	Feldarbeit in AKh/ha	Feldarbeit AKh
Winterweizen - Speiseware	40,0	21,50	478	361	0,20	72	20,00%	10,9	2
Kartoffel - Speiseware	250,0	12,00	2.071	763	0,20	153	20,00%	86,7	17
Winterroggen - Speiseware	40,0	11,70	429	16	0,20	3	20,00%	10,2	2
Sommergerste - Braugerste	36,0	16,50	443	136	0,20	27	20,00%	10,9	2
Rotationsbrache			150	-150	0,20	-30	20,00%	4,4	1
var1 (leg + n-leg)			175	-175	0,40	-70	40,00%	2,8	1
GDB ohne Direktzahlungen					1,00	155			26

Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge - var2									
Verfahren	Ertrag in dt/ha	Preis in €/dt	var. Kosten in €/ha	DB in €/ha	Fläche in ha	Σ DB in €	Anteil Fläche bzw. GDB	Feldarbeit in AKh/ha	Feldarbeit AKh
Winterweizen - Speiseware	40,0	21,50	478	361	0,20	72	20,00%	10,9	2
Kartoffel - Speiseware	250,0	12,00	2.071	763	0,20	153	20,00%	86,7	17
Winterroggen - Speiseware	40,0	11,70	429	16	0,20	3	20,00%	10,2	2
Sommergerste - Braugerste	36,0	16,50	443	136	0,20	27	20,00%	10,9	2
Rotationsbrache			150	-150	0,20	-30	20,00%	4,4	1
var2 (leg)			262	-262	0,40	-105	40,00%	2,8	1
GDB ohne Direktzahlungen					1,00	120			26

Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge - var3									
Verfahren	Ertrag in dt/ha	Preis in €/dt	var. Kosten in €/ha	DB in €/ha	Fläche in ha	Σ DB in €	Anteil Fläche bzw. GDB	Feldarbeit in AKh/ha	Feldarbeit AKh
Winterweizen - Speiseware	40,0	21,50	478	361	0,20	72	20,00%	10,9	2
Kartoffel - Speiseware	250,0	12,00	2.071	763	0,20	153	20,00%	86,7	17
Winterroggen - Speiseware	40,0	11,70	429	16	0,20	3	20,00%	10,2	2
Sommergerste - Braugerste	36,0	16,50	443	136	0,20	27	20,00%	10,9	2
Rotationsbrache			150	-150	0,20	-30	20,00%	4,4	1
var3 (n-leg)			90	-90	0,40	-36	40,00%	2,8	1
GDB ohne Direktzahlungen					1,00	189			26

Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge - var4									
Verfahren	Ertrag in dt/ha	Preis in €/dt	var. Kosten in €/ha	DB in €/ha	Fläche in ha	Σ DB in €	Anteil Fläche bzw. GDB	Feldarbeit in AKh/ha	Feldarbeit AKh
Winterweizen - Speiseware	40,0	21,50	478	361	0,20	72	20,00%	10,9	2
Kartoffel - Speiseware	250,0	12,00	2.071	763	0,20	153	20,00%	86,7	17
Winterroggen - Speiseware	40,0	11,70	429	16	0,20	3	20,00%	10,2	2
Sommergerste - Braugerste	36,0	16,50	443	136	0,20	27	20,00%	10,9	2
Rotationsbrache			150	-150	0,20	-30	20,00%	4,4	1
var4 (sbr)									
GDB ohne Direktzahlungen					1,00	225			25

Abbildungen

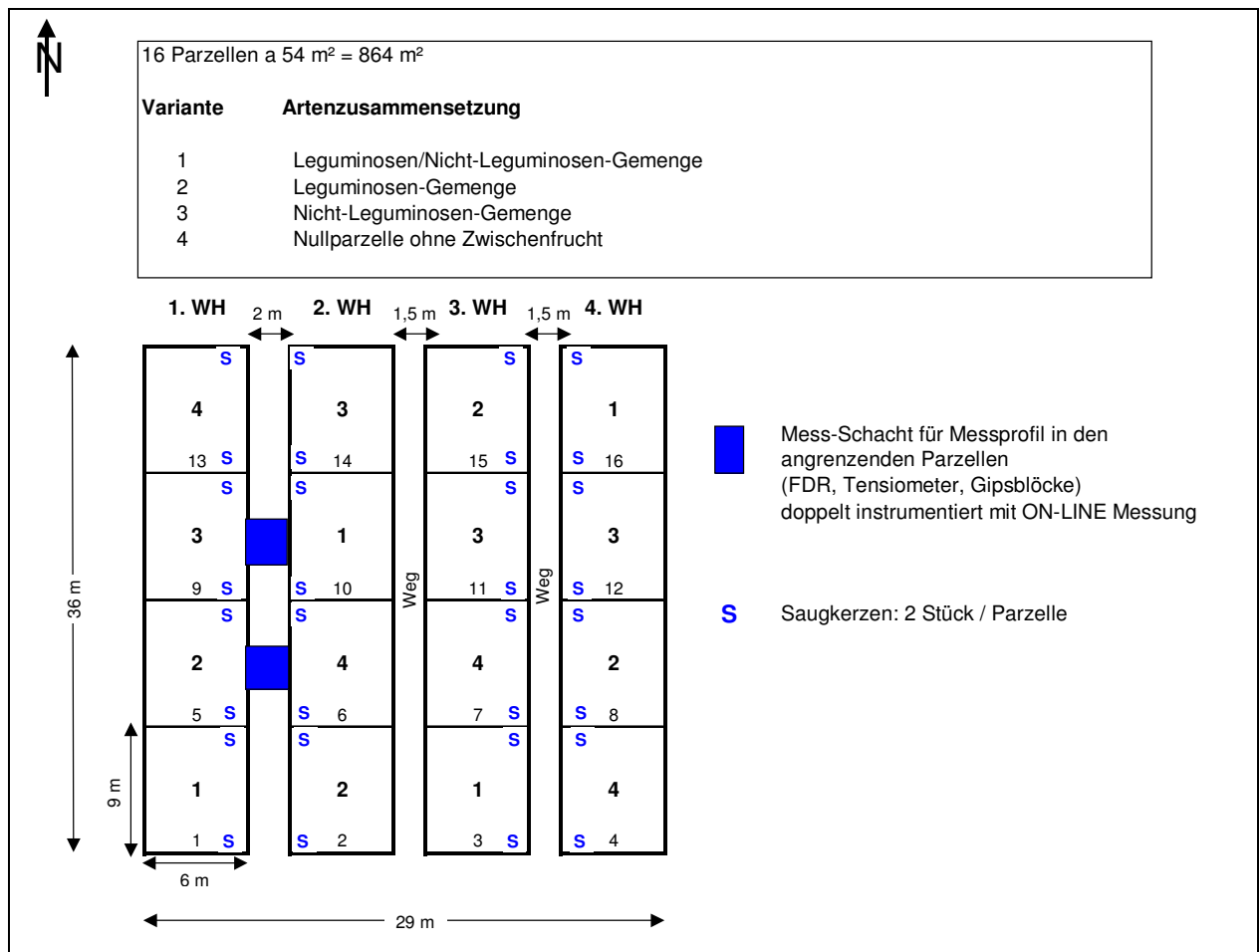


Abbildung A 35: Versuchsplan