

**Universität der Bundeswehr München**  
**Institut für Wasserwesen**  
**Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz**

**Mitteilungen**  
**Heft 118 / 2013**

**Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung  
und -konzentration auf verschlammungsgefährdeten  
landwirtschaftlichen Nutzflächen**

**Dr.-Ing. Florian Winter**

München 2013

## **Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen; Heft 118

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse  
Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert  
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek  
Hydromechanik und Wasserbau

Institut für Wasserwesen  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg  
Tel: +49 (0)89/6004-3375 (Karina Myslik)  
Fax: +49 (0)89/6004-3858  
<http://www.unibw.de/ifw/WWR>

Satz: Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München  
85577 Neubiberg

Copyright: Shaker Verlag, Aachen 2013  
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany  
Druck gefördert aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München

**ISBN 978-3-8440-2242-1**

Shaker Verlag GmbH \* Postfach 101818 \* 52018 Aachen  
Telefon : 02407 / 9596-0 \* Telefax 02407 / 9596-9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) \* E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort zur Dissertation von Florian Winter**

In den letzten Jahrzehnten sind vermehrt Sturzfluten zu beobachten, die in kleinen steilen Einzugsgebieten große Schäden anrichten. Der quantitativen Beschreibung und Vorhersage derartiger Extremabflüsse kommt eine besondere Bedeutung zu, um rechtzeitig Evakuierungsmaßnahmen einzuleiten oder durch Vorsorgemaßnahmen den Schaden zu begrenzen. Bis heute können allerdings Höhe und Verlauf von Hochwasserwellen, die aus erosiven Starkniederschlägen resultieren, nicht ereignisbezogen vorhergesagt werden. Es ist auch nicht bekannt, in welcher Größenordnung landwirtschaftlich unterschiedliche Bearbeitungsverfahren (konservierende versus konventioneller Bodenbearbeitung) den Hochwasserverlauf auf unterschiedlichen Skalen verändert.

Hierzu leistet Herr Dr.-Ing. Florian Winter in der vorliegenden Dissertation einen Beitrag. Er bearbeitet die in der (natur-) wissenschaftlichen Forschung noch immer ungelöste Fragestellung, unter welchen System- und Randbedingungen Ackerböden verschlammten können und wie sich die veränderten Bodeneigenschaften auf die Abflussbildung und -konzentration auswirken. Die Beantwortung dieser Frage würde neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn auch in praktischer Hinsicht Lösungsansätze liefern wie die bessere Bestimmung der kolloidal gebundenen Stoffeinträge in die Gewässer oder eine Verbesserung der Hochwasservorhersage nach Starkniederschlägen.

Zunächst wertet Herr Winter aus verschiedenen Datensätzen abgeschlossener Forschungsvorhaben 726 Berechnungsexperimente mit insgesamt 24384 Abflussmessungen auf 209 Bodenarten statistisch aus. Die erstellte Berechnungsdatenbank beinhaltet ferner 20 invariante und 3 variable Bodeneigenschaften, 4 Regen- sowie 4 Landnutzungseigenschaften. Aus diesem Datenfundus gelingt es Herrn Winter, statistische Beziehungen für die Verschlämmung bzw. Infiltration aufzustellen und anhand eines modifizierten Horton-Ansatzes in das bekannte hydrologische Modell WaSiM zu integrieren. WaSiM wird zusätzlich um die Module 2-dimensionaler Oberflächenabfluss und Re-Infiltration erweitert.


Anschließend stellt Herr Winter das erweiterte hydrologische Modell für die Forschungsgebiete Scheyern (nördlich von München) und Weiherbach (nordöstlich von Karlsruhe) auf. Bei der Modellierung des Weiherbaches mit einer Einzugsgebietsgröße von 3,5 km<sup>2</sup> (Pegel Menzingen) zeigt sich allerdings, dass insbesondere das Verschlämmungsmodul in seiner jetzigen Parametrisierung ungeeignet ist, die Abflussverschärfung aufgrund der Verschlämmung realistisch abzubilden. Die erosiven Flächen können zwar realistisch modelliert werden, die simulierten Abflüsse sind dagegen nicht plausibel. Das bedeutet allerdings kein Negativum der Dissertation. Im Gegenteil ist es ein wissenschaftlich wertvolles

Ergebnis, dass es trotz sorgfältigster Datenanalyse von Beregnungsversuchen auf der Plotskala nicht möglich ist, die entsprechenden Regressionsformeln für das *Horton-Modell* auf die (untere) Mesoskala zu übertragen. Insofern ist es nur folgerichtig, dass Florian Winter in seinen Schlussfolgerungen dazu rät, „eine Vereinfachung des Modells der weiteren Detaillierung der einzelnen Prozesse vorzuziehen“.

Möchte man in der Prozessforschung Fortschritte erzielen, müssen neue Messkonzepte entwickelt werden, die die Prozesse abbilden können. Diese Erkenntnisse sind dann durch Abstraktionen auf weniger intensiv beprobte Einzugsgebiete zu übertragen.

Die Arbeit deckt ein äußerst breites Spektrum ab – von sehr umfangreicher statistischer Analyse experimenteller Daten bis hin zu komplexen Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsmodellierungen mit physikalisch basierten Modellen. Die besondere Leistung von Dr.-Ing. Florian Winter besteht darin, dass er mit äußerster Sorgfalt die vorhandenen experimentellen Daten statistisch analysiert hat und dann schlussfolgert, dass trotz der sehr guten Datensituation keine allgemein gültigen, belastbaren Beziehungen für die Verschlämmung von Böden und ihr Einfluss auf die Abflussbildung und –konzentration gefunden werden können. Dieses Ergebnis ist meines Erachtens wertvoller als viele andere Untersuchungen, die zwar gute Anpassungen dokumentieren, welche aber lediglich auf ein (willkürliches) „Datenfitting“ für ihr spezielles Untersuchungsgebiet beruhen.

Die Arbeit von Florian Winter kann folgende Doktoranden ermutigen, weiter an diesem spannenden und wichtigen Thema zu forschen und insbesondere neue Erkenntnisse in der Skalenproblematik verschlammungsgefährdeter Einzugsgebiete zu erlangen.

  
Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

# Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und –konzentration auf verschlammungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Markus Disse (Erstprüfer)

Prof. Dr. agr. Karl Auerswald (Zweitprüfer)



vorgelegt von

**Dipl.-Hyd. Florian Winter**

München 2013



Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Thema der Dissertation	Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und –konzentration auf verschlammungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen
Verfasser	Florian Winter
Promotionsausschuss Vorsitzender	Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby Universität der Bundeswehr München Institut für Verkehrswesen und Raumplanung Professur für Raumplanung und Mobilität
1. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Markus Disse Universität der Bundeswehr München Institut für Wasserwesen Professur für Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz
2. Berichterstatter	Prof. Dr. agr. Karl Auerswald Technische Universität München Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt Lehrstuhl für Grünlandlehre
Tag der Prüfung	13.06.2013

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 28.06.2013





## Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München.

Danken möchte ich in erster Linie Prof. Dr.-Ing. Markus Disse für die Ermöglichung dieser Dissertation, für seine Betreuung während meiner Zeit am Institut und für die hilfreichen Diskussionen. In meinen Jahren am Lehrstuhl für Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz konnte ich viele Erfahrungen in der Mitarbeit an Lehrveranstaltungen des Masterstudiengangs *Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften* und in verschiedenen Forschungsprojekten sammeln, die mir wertvolle Erfahrungen und Erkenntnisse auch zum Verfassen dieser Arbeit einbrachten.

Weiterhin möchte ich Prof. Dr. agr. Karl Auerswald danken, der mir immer wieder neue Einblicke in das wissenschaftliche Arbeiten, den Umgang mit Daten und der Interpretation der Ergebnisse geben konnte, von dem ich viel für die Bearbeitung von wissenschaftlichen Problemen gelernt habe und der das Zweitreferat dieser Dissertation übernahm. Prof. Dr. Peter Fiener danke ich für die Unterstützung bei der Sichtung der Beregnungsdatenbank und seine Hinweise zur Analyse der Daten.

Danken möchte ich auch dem Prüfungsausschuss des Promotionsverfahrens, vor allem ihrem Vorsitzenden Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby.

Im Laufe der Jahre habe ich mit vielen Kollegen am Institut und am Lehrstuhl zusammengearbeitet, obwohl das Projekt, das dieser Dissertation zugrunde liegt, immer eine Einzelkämpferarbeit war. Für eine tolle Atmosphäre und Unterstützung möchte ich allen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl und am Institut danken.

Des Weiteren ist man als Doktorand auch immer von der Zuarbeit junger Wissenschaftler in Form einer Prüfungsarbeit oder wissenschaftlichen Hilfstätigkeiten abhängig. Deswegen möchte ich meinen HiWis Simon, Christian und Jochen danken.

Für die umfangreiche Hilfe mit WaSiM danke ich dem Modellentwickler Jörg Schulla, der mit seinen zahlreichen Hinweisen und umfangreichen Erklärungen zu stets neuen Erkenntnissen und zum Verständnis der Modellstruktur beigetragen hat.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Eleonore und Bernhard Winter sowie meinem Bruder Bastian, außerdem meinen Freunden, die mich privat großartig unterstützten und damit ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.



## Kurzfassung

Die Bewirtschaftungsform und damit die Bodenbearbeitung haben umfangreiche Auswirkungen auf die Abflussbildung und -konzentration. Durch die Umstellung von der konventionellen zur konservierenden Bodenbewirtschaftung ergeben sich positive Effekte im Hinblick auf den Wasserrückhalt in der Fläche: Eine ganzjährig angestrebte Bodenbedeckung (Anbau einer Zwischenfrucht, Belassen von Ernterückständen auf der Ackerkrume) verringert die Verschlammungsneigung der Böden, verbessert das Mikroklima in Bodennähe und erhöht die Infiltrationsleistung. Pflanzenreste auf dem Boden erhöhen den Fließwiderstand und verringern die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses. Dieser kann durch Re-Infiltration auf ungesättigten Flächen in den Boden gelangen. Dadurch erhöhen sich wiederum die Speicherwirkung des Bodens sowie der verfügbare Wasservorrat für die Feldfrucht.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss von Landnutzung und -bewirtschaftung auf den Direktabfluss in der unteren Mesoskala räumlich hoch auflösend mit Hilfe eines physikalisch-basierten Wasserhaushalts-Modells abzubilden. Damit sollen die Möglichkeiten der Abflussreduzierung durch Flächenneugestaltung, infiltrationsfördernde Bewirtschaftung und Etablierung lokaler Maßnahmen erfasst werden.

Es wird eine Datenbank vorgestellt, die aus den Beregnungsexperimenten mehrerer Forschergruppen besteht und sowohl die Abflussganglinien der einzelnen Experimente in ihrem zeitlichen Verlauf als auch die zeit-invarianten (Bodeneigenschaften) wie variablen (Beregnungs- und Bearbeitungseigenschaften) Randbedingungen zu jedem einzelnen Beregnungsversuch sowie die punktuellen Messergebnisse (*time to ponding*, *time to runoff*) zusammenfasst.

Die Datensätze der Beregnungsdatenbank werden umfangreich analysiert: Durch Optimierungsalgorithmen (*Simulated Annealing*) werden aus den gemessenen Infiltrationsraten der einzelnen Versuche die besten Parameter für ein modifiziertes Infiltrationsmodell nach HORTON ermittelt. Diese optimierten Parameter werden mit den Boden- und Bearbeitungseigenschaften der Beregnungsexperimente verknüpft und durch statistische Regressionsmethoden geschätzt. Es wird ein einfach anzuwendendes multiples Regressionsmodell entwickelt, das die infiltrationssteuernden Parameter der modifizierten HORTON-Gleichung aus allgemein verfügbaren Daten hinreichend gut schätzen kann.

Das hydrologische Modellierungssystem WaSiM wird um zwei Komponenten erweitert: um ein Verschlammungsmodul, das dem Modul zur Wasserbewegung in der ungesättigten Zone vorangeschaltet ist und um ein Modul zur Abflusskonzentration des Oberflächenabflusses nach dem Ansatz der kinematischen Welle.

Die Modellerweiterungen und die zugrundeliegenden Prozessbeschreibungen werden auf verschiedenen Skalen angewendet: Auf der *Plotskale* können einzelne Beregnungsversuche aus der Datenbank besser simuliert werden als ohne die Modellerweiterung. Durch die konservierende Bodenbearbeitung und die erosionsverringende Fruchtfolge auf den Ackerflächen (*Hangskale*) des Klostersguts Scheyern kann im Modell ein hoher Abflussanteil an Zwischenabfluss nachgewiesen werden, der durch die erhöhte

Ausbildung stabiler Makroporen und als zeitlich verzögerte Abflusskomponente größeren Anteil am Gesamtabfluss hat. Bei der Simulation der konventionellen Bodenbearbeitung auf der *unteren Mesoskala* (Weiherbachgebiet) können bei einzelnen Starkregenereignissen räumlich detailliert verschlammungsgefährdete Bereiche ausgewiesen werden.

## Abstract

Tillage practices and thus soil cultivation have significant impacts on runoff generation and concentration processes. By changing conventional tillage towards conservational tillage positive effects regarding natural water retention can be achieved. In attempting a constant soil coverage throughout the year (by catch crop cultivation and mulch tillage) the susceptibility to surface crusting is reduced, the microclimate at the soil surface is improved and hence infiltration is enhanced. Crop remains on the soils surface increase flow resistance and decrease flow velocity of the surface runoff, so that runoff can enter the soil layer by re-infiltration on unsaturated areas. The retention capacity of the soil and thus the available water storage for field crops is improved.

The objective of this work is to simulate the impacts of land use and tillage practices on surface runoff in the lower mesoscale in high spatial resolution by a physically based water balance model. Thereby the potential of runoff reduction by reallocation of arable land, soil management promoting infiltration capacity and establishment of local measures can be determined.

A database of rainfall simulations on arable fields is introduced that combines the data of several research groups: the hydrographs of the experiments, the time invariant (soil properties) and variable (sprinkler and tillage properties) boundary conditions of every single experiment and the punctual measurements (*time to ponding, time to runoff*) are summarized.

The data sets of the rainfall simulation database are analyzed extensively. By means of optimization algorithms (*Simulated Annealing*) the optimized parameters of a modified HORTON type infiltration model are determined from the measured infiltration rates. The optimized parameter sets are combined with the boundary conditions of the experiments (soil and tillage properties) and estimated by statistical regression methods. An easily applicable multiple regression model is developed that is able to sufficiently estimate the infiltration parameters of the modified HORTON equation from commonly available data.

The hydrological modeling system WaSiM is extended by two components: a surface sealing module that precedes the water movement into the unsaturated zone and a surface routing module using the kinematic wave approach for surface runoff.

The model extensions and the underlying mathematical process descriptions are applied on several spatial scales: On the *plot scale* single experiments from the rainfall simulation database can predict hydrographs better than without the model extensions. Conservational tillage and crop rotation reducing erosion is modeled on the *slope scale* (arable fields on the Scheyern experimental farm) showing a high ratio of interflow in total runoff as delayed runoff component, thus representing the formation of stable macropores. Conventional tillage is modeled on the *lower mesoscale* (Weiherbach catchment) indicating areas prone to surface sealing during high precipitation events in spatial detail.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>v</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>xi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Erfassung und Modellierung hydrologischer Teilprozesse bei der Abflussbildung und –konzentration auf der Mikroskala .....	1
1.2 Veranlassung und DFG-Projekt .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Landwirtschaft und Bewirtschaftungsformen.....	5
2.1.1 Landwirtschaftliche Nutzfläche und Ernte in Deutschland .....	5
2.1.2 Konventionelle Bodenbearbeitung .....	6
2.1.3 Konservierende Bodenbearbeitung .....	7
2.1.4 Weitere Bearbeitungsverfahren.....	7
2.2 Infiltration und Abflussbildungsprozesse .....	8
2.2.1 Infiltrationsmodelle.....	9
2.2.1.1 Exponentialmodell nach Horton.....	9
2.2.1.2 Modell von Green & Ampt .....	10
2.2.1.3 Infiltration aus der Richards-Gleichung.....	11
2.2.2 Makroporen .....	12
2.2.3 Oberflächenabfluss und Abflusskonzentration .....	12
2.3 Bodenwasserbewegung .....	14
<b>3 Stand der Wissenschaft</b> .....	<b>17</b>
3.1 Abflussgeschehen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen .....	17
3.1.1 Verschlämmung und Wassererosion .....	20
3.1.1.1 Teilprozesse der Oberflächenverschlämmung .....	23
3.1.1.2 Einflussfaktoren .....	24
3.1.2 Abflusskonzentration .....	28
3.1.3 Einfluss der Bewirtschaftungsform .....	30
3.2 Modellierungsansätze .....	32
3.2.1 Modellierung der Abflussbildung auf landwirtschaftlichen Flächen.....	32
3.2.2 Modellierung der Verschlämmung.....	33
3.2.3 Modellierung der Bodenbearbeitung.....	37
3.2.4 Modellierung der Abflusskonzentration .....	38
3.3 Skalenabhängigkeit der Prozesse der Abflussbildung und –konzentration .....	40
3.3.1 Plotskale .....	41
3.3.2 Hangskale .....	41
3.3.3 Einzugsgebietsskale.....	42

<b>4</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>45</b>
4.1	Experimentelle Daten.....	45
4.1.1	Infiltrationsversuche .....	45
4.1.2	Beschreibung der Berechnungsdatenbank .....	46
4.2	Grundlagen der Modellerweiterung zur Abflussbildung und –konzentration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen .....	52
4.2.1	Modellierung der dynamischen Verschlämmung .....	54
4.2.2	Abflusskonzentration auf der Bodenoberfläche .....	55
4.3	WaSiM.....	64
4.3.1	Modellkonzept und -eignung .....	64
4.3.2	Datenbedarf .....	65
4.3.3	Relevante Modellansätze.....	67
4.3.4	Modellerweiterungen .....	72
4.3.4.1	Verschlämmungsmodul ( <i>Silting Up</i> ) .....	75
4.3.4.2	Oberflächenabfluss ( <i>Surface Routing</i> ).....	76
4.4	Parameteroptimierung.....	78
<b>5</b>	<b>Beschreibung der Untersuchungsgebiete .....</b>	<b>83</b>
5.1	Scheyern.....	83
5.1.1	Klimatische Verhältnisse .....	84
5.1.2	Geologie und Böden.....	85
5.1.3	Gewässer und Grundwasser.....	86
5.1.4	Landnutzung.....	86
5.1.5	Abflussmessungen.....	88
5.1.6	Datengrundlage für die Modellierung.....	91
5.1.7	Bodenparametrisierung .....	91
5.1.8	Parametrisierung der Landnutzung.....	95
5.2	Weierbach .....	95
5.2.1	Klimatische Verhältnisse .....	97
5.2.2	Geologie und Böden.....	97
5.2.3	Gewässer und Grundwasser.....	99
5.2.4	Landnutzung.....	99
5.2.5	Abflussereignisse.....	100
5.2.6	Datengrundlage für die Modellierung.....	101
5.2.7	Bodenparametrisierung .....	101
5.2.8	Parametrisierung der Landnutzung.....	102
<b>6</b>	<b>Empirische Analysen der experimentellen Daten .....</b>	<b>105</b>
6.1	Analyse der Berechnungsdatenbank .....	105
6.1.1	Bodenarten in der Berechnungsdatenbank .....	105
6.1.2	Bildung von Abfolgen .....	107
6.1.2.1	Zusammenhang zwischen den Messdaten der Berechnungsexperimente .....	110
6.1.2.2	Zusammenhang einzelner Variablen.....	111
6.1.3	Schätzung der Infiltrationsparameter .....	114
6.2	Regressionsmodelle für deterministische Ansätze der verschlämmungsgesteuerten Infiltration ....	117
6.2.1	Hauptkomponentenregression .....	117
6.2.2	Multiples lineares Modell für modifizierten Horton-Ansatz .....	117
6.2.3	Überprüfung des Regressionsmodells nach Schröder (2000) .....	126
6.2.4	Überprüfung des Regressionsmodells nach Zimmermann et al. (2008) .....	131



6.2.5	Zusammenfassung Regressionsmodelle .....	133
6.3	Statistisches Abflussmodell der Beregnungsversuche .....	134
6.3.1	Vorgehensweise .....	134
6.3.2	Abhängigkeit des Abflussvolumens $Q$ von Randbedingungen .....	136
6.3.3	Schätzung des Anfangsverlustes $P_{IR}$ .....	137
6.3.4	Gesamtmodell und Diskussion .....	139
6.3.5	Zusammenfassung Statistisches Abflussmodell .....	143
<b>7</b>	<b>Modellierung mit WaSiM .....</b>	<b>145</b>
7.1	Modellierung der ungesättigten Zone in WaSiM .....	145
7.1.1	Abflussbildung .....	145
7.1.2	Verifizierung des Richards-Modells für Bodenfeuchteprofile .....	149
7.2	Verifizierung der Regressionsmodelle in WaSiM .....	151
7.2.1	Modellaufbau .....	152
7.2.2	Modellierung von Beregnungsversuchen .....	152
7.3	Modellierung der konservierenden Bodenbearbeitung in WaSiM .....	156
7.3.1	Modellaufbau .....	156
7.3.2	Einzelereignisse auf integriert bewirtschafteten Flächen .....	159
7.3.3	Zusammenfassung .....	165
7.4	Modellierung der konventionellen Bodenbearbeitung in WaSiM .....	166
7.4.1	Modellaufbau .....	166
7.4.2	Ereignisbasierte Modellierung .....	169
7.4.2.1	Kalibrierung ohne Modellerweiterungen .....	169
7.4.2.2	Schrittweises Zuschalten der Modellerweiterungen .....	172
7.4.2.3	Kalibrierung mit Modellerweiterungen .....	175
7.4.3	Kontinuierliche Modellierung .....	181
7.4.4	Szenario: Konservierende Bearbeitung im Weiherbach .....	185
7.4.5	Zusammenfassung .....	188
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>189</b>
8.1	Modellerweiterung .....	189
8.1.1	Verschlämmungsmodul .....	189
8.1.2	Abflusskonzentration .....	190
8.2	Skalenproblematik .....	191
8.2.1	Räumliche Auflösung .....	191
8.2.2	Zeitliche Auflösung .....	192
8.3	Unsicherheiten der Modellierung und der Parametrisierung .....	193
8.4	Modellkomplexität .....	194
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>197</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>201</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>215</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Ausschnitt aus der Steuerdatei mit der Bodenparametrisierung für das Verschlämmungsmodul .....</b>	<b>217</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Ausschnitt aus der Steuerdatei mit der Bodenparametrisierung für Surface Routing .....</b>	<b>219</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Beschreibung des C++ Parsers in der WaSiM-Steuerdatei .....</b>	<b>221</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Darstellung der Regressionsmodelle für die einzelnen Beregnungsversuche .....</b>	<b>223</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Vergleich der pF-Kurven nach BROOKS & COREY und VAN-GENUCHTEN für einen Schluffboden.....	16
Abb. 3-1: Schema der Abhängigkeit der Abflussbildung von der Landnutzung.....	18
Abb. 3-2: Typische Entwicklung der Bodenbedeckung bei Feldfrüchten in Mitteleuropa, saisonale Verteilung des Niederschlags und der Regenintensität für den Standort Scheyern (nach Fiener et al. 2011a) .....	19
Abb. 3-3: Prinzipskizze des Verschlämmungsprozesses: Durch die mechanische Wirkung der Regentropfen werden Bodenaggregate zerstört, lagern sich in größeren Poren ab und verursachen eine Abtrennung der Infiltrationswege in die Bodenmatrix sowie die Makroporen.....	21
Abb. 3-4: Teilprozesse und Faktoren der Oberflächenverschlämmung und der Abflussbildung.....	24
Abb. 4-1: Beregnungsanlagen der einzelnen zusammengefassten Messkampagnen .....	50
Abb. 4-2: Übersichtskarte der Untersuchungsplots der einzelnen Teildatensätze SY, WB, FS, FB und WS.....	50
Abb. 4-3: Fließrichtungen in WaSiM von der mittleren Rasterzelle ausgehend .....	56
Abb. 4-4: Prinzip und Beispiel für multiple Fließrichtungen mit Gewichtungen .....	58
Abb. 4-5: Modellstruktur von WaSiM .....	66
Abb. 4-6: Flussdiagramm der Abflussbildung und -konzentration in WaSiM bis Version 8.1.1.....	74
Abb. 4-7: Flussdiagramm der Abflussbildung und -konzentration in WaSiM ab Version 8.1.1 .....	75
Abb. 4-8: Darstellung des SCE-Algorithmus im 2-dimensionalen Fall .....	80
Abb. 5-1: Luftbild vor und nach der Umstellung der Bewirtschaftungsform 1991 .....	84
Abb. 5-2: Klimadiagramme der beiden Stationen B01 und B02 auf der Klostergut Scheyern.....	84
Abb. 5-3: Flächennutzung und Kleineinzugsgebiete auf dem Gelände des Forschungsguts Scheyern .....	87
Abb. 5-4: Einzugsgebiete auf dem Kehrfield des Klostergutes Scheyern (integrierte Bewirtschaftung) .....	88
Abb. 5-5: Einteilung der Ackerschläge auf die Einzugsgebiete und Lage der begrünten Abflussmulde (Grassed Waterway) auf dem Klostergut Scheyern .....	90
Abb. 5-6: Gemessene Abflüsse der einzelnen Ereignisse in [mm] auf den Einzugsgebieten des Kehrfieldes .....	90
Abb. 5-7: Standorte der Hood Infiltrometer Messungen auf dem Kehrfield in Scheyern und die Bodenklassifikation des oberen Bodenhorizonts für die Einzugsgebiete E01-E07; Hintergrund: Standortkundliche Bodenkarte von Bayern (1:25000).....	93
Abb. 5-8: Übersichtskarte über das Einzugsgebiet des Weiherbachs mit Höhenlinien und meteorologischen und hydrologischen Messstationen .....	96
Abb. 5-9: links: Blick über das landwirtschaftlich geprägte Weiherbachgebiet von den Kuppen im Osten in Richtung Süd-Westen; rechts: das Gerinne des Weiherbaches direkt oberhalb des Pegels Menzingen.....	96
Abb. 5-10: Klimadiagramm der Station WB0 im Einzugsgebiet des Weiherbachs (Zeitraum 1990 - 1996) und Jahresniederschläge von 1991 - 1996 .....	97
Abb. 5-11: Bodentypen im nördlichen Weiherbachgebiet .....	98
Abb. 5-12: Vegetationszeiten der Haupt- und Zwischenfrüchte im Weiherbachgebiet (verändert nach Plate & Zehe 2008, Ritz 2000).....	103
Abb. 6-1: Verteilung der Bodenartenhauptgruppen (links); Anteile der Bodenart an den Verschlämmungsneigungsklassen aus KA5 (rechts); n=209.....	106
Abb. 6-2: Anteil der Bodenarten in der Beregnungsdatenbank.....	106
Abb. 6-3: Bodenartendreieck nach KA5 (links) und der US Soil Classification (rechts).....	107
Abb. 6-4: Beobachtungswerte der Versuche Nr. 41 und 42 aus dem Teildatensatz Scheyern mit Beregnungspause von 30 min .....	108
Abb. 6-5: Aufbereitung des Beregnungsversuches Nr. 41 und 42 des Teildatensatzes Scheyern, aufgetragen als Infiltrationsrate auf die kumulierte effektive kinetische Energie $E_{kin}$ .....	109
Abb. 6-6: Zusammenhang zwischen den beobachteten Größen bei einzelnen Abfolgen .....	110
Abb. 6-7: Scree-Plot der Hauptkomponenten (PCA).....	112
Abb. 6-8: Ladungen der ersten 6 Hauptkomponenten (PC).....	113
Abb. 6-9: Biplot von PC1 gegen PC2.....	113

Abb. 6-10: Kerndichteschätzungen der Infiltrationsparameter nach 100 Optimierungsläufen für einzelne Sequenzen mittels Simulated Annealing am Beispiel SEQ=3900214 .....	115
Abb. 6-11: Beste Übereinstimmung der beiden Optimierungsalgorithmen Simulated Annealing (SA) und Non-Linear Least Squares (NLS) am Beispiel der SEQ=3900214 .....	115
Abb. 6-12: Kerndichteschätzung und Box-Whisker-Plots der optimierten Horton-Variablen $f_o$ , $f_e$ und $c_v$ für n=213 Sequenzen in der <i>HorKal</i> -Datenbank .....	116
Abb. 6-13: Beziehungen zwischen der Endinfiltrationsrate und Boden- und Bearbeitungskenngrößen (n=213) .....	118
Abb. 6-14: Simulierte (inkl. Konfidenzintervall) und optimierte Werte für die Multiple Regression und Kerndichteverteilung der Fehler für $f_e$ .....	119
Abb. 6-15: Der Abflussbeiwert wird zu einem Teil durch die Verschlammungsneigung $c_v$ erklärt (links); Stabile Bodenaggregate hoher Dichte weisen eine niedrigere Verschlammungsneigung auf (rechts) .....	120
Abb. 6-16: Beziehungen zwischen der Verschlammungsneigung und Boden- und Bearbeitungskenngrößen (n=213) .....	120
Abb. 6-17: Simulierte (inkl. Konfidenzintervall) und optimierte Werte für die Multiple Regression und Kerndichteverteilung der Fehler für $c_v$ .....	121
Abb. 6-18: Die Neigung der Infiltrationskurve bestimmt bei der HORTON-Funktion die physikalisch schwer zu erfassende Anfangsinfiltrationsrate $f_o$ (links); kurz nach der Bodenbearbeitung zeigen sich höhere Anfangsinfiltrationsraten, deren Streuung mit der Zeit abnimmt (rechts) .....	122
Abb. 6-19: Simulierte (inkl. Konfidenzintervall) und optimierte Werte für die Multiple Regression und Kerndichteverteilung der Fehler für $f_o$ .....	123
Abb. 6-20: BoxPlot der RMSE der optimierten Experimente, sowie den geschätzten Experimenten aus des Kalibrierdatensatzes ( <i>HorKal</i> ) sowie des Validierungsdatensatzes ( <i>HorVal</i> ) .....	124
Abb. 6-21: Simulierte und optimierte Infiltrationsverläufe einzelner Sequenzen aus der Beregnungsdatenbank .....	125
Abb. 6-22: Kerndichteschätzung und Box-Whisker-Plots bei Anwendung des Approximationsmodells 1 nach SCHRÖDER (2000) für n=169 Sequenzen in der <i>HorKal</i> -Datenbank .....	128
Abb. 6-23: Kerndichteschätzung und Box-Whisker-Plots bei Anwendung des Approximationsmodells 2 nach SCHRÖDER (2000) für n=169 Sequenzen in der <i>HorKal</i> -Datenbank .....	129
Abb. 6-24: Box-Whisker-Plots der RMSE bei den optimierten Datensätzen (n=213) und des Approximationsmodells 2 nach SCHRÖDER (2000) .....	129
Abb. 6-25: Kerndichteschätzung und Box-Whisker-Plots bei Anwendung der neu geschätzten Koeffizienten von Approximationsmodell 1 nach SCHRÖDER (2000) für n=169 Sequenzen in der <i>HorKal</i> -Datenbank .....	130
Abb. 6-26: Kerndichteschätzung und Box-Whisker-Plots bei Anwendung der neu geschätzten Koeffizienten von Approximationsmodell 2 nach SCHRÖDER (2000) für n=169 Sequenzen in der <i>HorKal</i> -Datenbank .....	130
Abb. 6-27: Box-Whisker-Plots der RMSE bei den optimierten Datensätzen (n=213) und der Anwendung der neu geschätzten Koeffizienten der Approximationsmodelle nach SCHRÖDER (2000) .....	131
Abb. 6-28: Kerndichteschätzung und Box-Whisker-Plots bei Anwendung des Regressionsmodells nach ZIMMERMANN et al. (2008) für n=213 Sequenzen in der <i>HorKal</i> -Datenbank .....	132
Abb. 6-29: Box-Whisker-Plots der RMSE bei den optimierten Datensätzen (n=213) und der Anwendung des Regressionsmodells nach ZIMMERMANN et al. 2008 .....	132
Abb. 6-30: Darstellung der simulierten Infiltrationsverläufe nach dem Regressionsansatz von ZIMMERMANN et al. 2008 mit dem niedrigsten bzw. höchsten RMSE und dem optimierten Verlauf .....	133
Abb. 6-31: Typischer Abflussverlauf über das beregnete Volumen (links); Kerndichteschätzung des kumulierten Niederschlags [mm] zum Zeitpunkt $t_R$ (rechts) .....	135
Abb. 6-32: Ergebnisse der linearen Modelle auf das Abflussvolumen nach 30 mm Niederschlag und deren Residuen .....	136
Abb. 6-33: Zusammenhang zwischen einzelnen Einflussfaktoren und $P_{tr}$ bei allen Trockenläufen der Beregnungsdatenbank (n = 327) .....	138

Abb. 6-34: Simulierte und gemessene Werte für die Gesamtanpassung und Kerndichtevertelung der Fehler für $Q$ .....	140
Abb. 6-35: Simulierte Abflussvolumina $Q_{60} \times (P_{20} - P_{60})$ für verschiedene Parameterkombinationen.....	142
Abb. 6-36: Simulierte und gemessene Abflussraten verschiedener Experimente auf derselben Parzelle (SOIL=5019) .....	143
Abb. 7-1: Gemessene und simulierte Abflussraten bei variierender Mächtigkeit der Berechnungsschichten in WaSiM bei einer Berechnungsintensität von $I = 34$ mm/h .....	147
Abb. 7-2: Abhängigkeit der Diskretisierung der Berechnungsschichten in WaSiM bei konstanter Regenintensität auf den Abflussbeginn $t_R$ .....	147
Abb. 7-3: Abhängigkeit der Diskretisierung der Berechnungsschichten in WaSiM bei konstanter Regenintensität auf den Abflussbeiwert $\psi$ .....	148
Abb. 7-4: Bodenfeuchteprofile für Vorläufe aus dem Teildatensatz WB für Simulationen mit HYDRUS1D und WaSiM .....	150
Abb. 7-5: Vergleich des Vordringens der Feuchtefront in den Boden bei einer Simulationsdauer von einem Monat .....	151
Abb. 7-6: Ergebnisse der Optimierung der VAN-GENUCHTEN-Parameter für die Bodentypen der Beregnungsversuche des Teildatensatzes WB .....	153
Abb. 7-7: pF-Kurven der oberen Horizonte beider Bodentypen der Standortmodelle, deren Parameter im Modelllauf ohne Erweiterung innerhalb ihrer Parametergrenzen (grau) optimiert wurden; initiale Werte sind dick dargestellt, minimale und maximale pF-Kurven gestrichelt.....	154
Abb. 7-8: Beispielhafte Ergebnisse der Optimierung der VAN-GENUCHTEN-Parameter der Böden bei der Simulation von Beregnungsversuchen in WaSiM ohne Modellerweiterung.....	154
Abb. 7-9: Beispielhafte Ergebnisse der Optimierung der Koeffizienten der Regressionsgleichungen des Verschlammungsmoduls bei der Simulation von Beregnungsversuchen in WaSiM mit Modellerweiterung .....	155
Abb. 7-10: Box-Plots der Gütemaße der Simulationen der Beregnungsversuche des Teildatensatzes WB mit WaSiM (ohne/mit Modellerweiterung).....	156
Abb. 7-11: Bodenbedeckungsgrade, Niederschlag und Abfluss auf den Ackerschlägen A17 und A18 in täglichen Zeitschritten .....	158
Abb. 7-12: Kumulierte Werte der modellierten Abflüsse und des gemessenen Abflussvolumens sowie zeitlicher Verlauf der Verschlammungsspeichers für das Ereignis im Juni 1995 auf den Einzugsgebieten E02 und E03 .....	161
Abb. 7-13: Kumulierte Werte der modellierten Abflüsse und des gemessenen Abflussvolumens sowie zeitlicher Verlauf der Verschlammungsspeichers für das Ereignis im Juli 1996 auf dem Einzugsgebiet E03 .....	161
Abb. 7-14: Kumulierte Werte der modellierten Abflüsse und des gemessenen Abflussvolumens sowie zeitlicher Verlauf der Verschlammungsspeichers für das Ereignis im Mai 1999 auf dem Einzugsgebiet E03 .....	162
Abb. 7-15: Anteil der Abflusskomponenten am Gesamtabfluss bei Einzelereignissen auf den Einzugsgebieten E02 und E03.....	162
Abb. 7-16: Oberflächenabfluss beim Ereignis am 05.07.1996 auf den Einzugsgebieten E05 und E06.....	164
Abb. 7-17: Verteilung der Bodentypen im 50m-Raster bis zum Pegel Menzingen .....	166
Abb. 7-18: Landnutzung im Einzugsgebiet Pegel Menzingen im 50m Raster für das Jahr 1994.....	168
Abb. 7-19: Landnutzung im Einzugsgebiet Pegel Menzingen im 50m Raster für das Jahr 1995.....	169
Abb. 7-20: Abflussganglinien am Pegel Menzingen für die Ereignisse 1 - 4 nach der Kalibrierung ohne Modellerweiterungen .....	171
Abb. 7-21: Abflussganglinien am Pegel Menzingen für die Ereignisse 1 - 4 mit optimierten Parametern und aktiviertem <i>Surface Routing</i> Modul .....	172
Abb. 7-22: Abflussganglinien am Pegel Menzingen für die Ereignisse 1 - 4 mit optimierten Parametern und aktiviertem <i>Surface Routing + Silting Up</i> Modul .....	174
Abb. 7-23: $k_s$ der verschiedenen Ap-Horizonte im Verhältnis zum Gütemaß RMSE bei der SCE-Kalibrierung von Ereignis 1 .....	175

Abb. 7-24: Abflussganglinien am Pegel Menzingen für die Ereignisse 1 - 4 nach der Kalibrierung mit Modellerweiterungen .....	176
Abb. 7-25: Verschlammung und Oberflächenabfluss für das Ereignis 01 am 27.06.1994 .....	177
Abb. 7-26: Entwicklung der Gütewerte mit den Modellierungsansätzen der Einzelereignisse .....	178
Abb. 7-27: Abhängigkeit des RMSE von den kalibrierten Parameter im SCE-Algorithmus .....	180
Abb. 7-28: Kontinuierliche Simulation des hydrologischen Sommerhalbjahres der Jahre 1994 und 1995 am Pegel Menzingen .....	182
Abb. 7-29: Kontinuierliche Simulation des hydrologischen Sommerhalbjahres der Jahre 1994 und 1995 am Pegel Menzingen ohne die Modellerweiterungen .....	184
Abb. 7-30: Kontinuierliche Simulation des hydrologischen Sommerhalbjahres der Jahre 1994 und 1995 am Pegel Menzingen bei konservierender Bodenbearbeitung .....	186
Abb. 7-31: Vergleich der simulierten Abflüsse bei Parametrisierung der konventionellen und konservierenden Bodenbearbeitung für das Ereignis am 19.-21.09.1995 am Pegel Menzingen .....	188

## Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1: Beregnungs- und Ploteigenschaften der Beregnungsexperimente nach Kampagnen.....	47
Tab. 4-2: Variablenbezeichnungen in der Beregnungsdatenbank.....	51
Tab. 4-3: Identifikation landwirtschaftlicher Maßnahmen und die dadurch beeinflussten hydrologischen Prozesse aus der Literaturrecherche.....	53
Tab. 4-4: Sonderfälle bei der Bestimmung der Fließrichtung.....	57
Tab. 4-5: Empirische Koeffizienten $a, b, c$ zur Bestimmung des Rauigkeitskoeffizienten $k_{st}$ für konservierende Bodenbearbeitung.....	60
Tab. 4-6: Erweiterung in WaSiM ab Version 8.1.1.....	73
Tab. 4-7: Parametrisierung des Verschlämmungsmoduls in der Landnutzungstabelle in WaSiM.....	76
Tab. 4-8: Parametrisierung des Verschlämmungsmoduls in der Bodentabelle in WaSiM.....	76
Tab. 4-9: Parametrisierung des Surface-Routing-Moduls im Abschnitt [surface_routing] in der WaSiM- Steuerdatei.....	77
Tab. 4-10: Parametrisierung des Surface-Routing-Moduls in der Landnutzungstabelle in WaSiM.....	78
Tab. 4-11: Gütefunktionen und ihre mathematische Formulierung für die Parameteroptimierung der Kopplung SCE mit WaSiM.....	81
Tab. 5-1: Abflussereignisse auf den Einzugsgebieten des Kehrfeldes von 1993 - 2001.....	89
Tab. 5-2: Bodenart nach Korngrößenverteilung (Klassifizierung nach KA5).....	93
Tab. 5-3: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit aus den Experimenten.....	94
Tab. 5-4: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach Experimenten und der Analyse der Bodenproben und Anwendung der PTF nach SCHEINOST 1995, CARSEL & PARRISH 1988 und RAWLS & BRAKENSIEK 1989.....	94
Tab. 5-5: Flächennutzung des Weiherbachgebiets.....	100
Tab. 5-6: Kenndaten der größten N-A-Ereignisse am Pegel Menzingen.....	101
Tab. 5-7: Mualem-van-Genuchten-Parameter für die Bodenhorizonte im Weiherbachgebiet.....	102
Tab. 6-1: Einstufung der Verschlämmungsneigung nach KA5.....	107
Tab. 6-2: Codierung der Teildatensätze der Beregnungsdatenbank.....	110
Tab. 6-3: Lageparameter der optimierten Parameter des modifizierten HORTON-Modells.....	116
Tab. 6-4: Bestimmtheitsmaße $R^2$ der Hauptkomponentenregression.....	117
Tab. 6-5: p-Werte der erklärenden Variablen der multiplen Regressionsansätze für die Schätzung der Infiltrationsparameter in der modifizierten HORTON-Gleichung;.....	123
Tab. 6-6: Im Teildatensatz SY erhobene Bodenkenngößen für jede Beregnungsparzelle.....	126
Tab. 6-7: Ergebnisse der Anpassung der Approximationsmodelle nach SCHRÖDER (2000) an die optimierten Parameter der Beregnungsdatenbank.....	127
Tab. 6-8: Zusammenfassung der Gütemaße der Infiltrationsraten [mm/h] über die Regressionsansätze auf die einzelnen SEQ von <i>Horkal</i> .....	133
Tab. 6-9: Anpassung des Gesamtmodells mit der Methode der kleinsten Quadrate.....	140
Tab. 6-10: Gütemaße für die Anwendung des Gesamtmodells auf die Beregnungsdatenbank.....	141
Tab. 7-1: Parametrisierung der Bodenschichten (Mittelwerte und Standardabweichung) nach SCHÄFER (1999) für die Simulation der Beregnungsversuche mit Kalibrierung der VAN-GENUCHTEN-Parameter und die Anzahl der Simulationen, bei denen die Kalibrierung ohne Modellerweiterung an die Parametergrenzen stößt....	153
Tab. 7-2: Mittelwerte der Gütemaße bei der Simulation von Beregnungsversuchen des Teildatensatzes WB in WaSiM.....	156
Tab. 7-3: Charakterisierung der einzelnen für die Modellierung herangezogenen Einzugsgebiete.....	157
Tab. 7-4: Ausgewählte Niederschlag-Abfluss-Ereignisse und zugehörige Bewirtschaftung auf den Einzugsgebieten E02 und E03.....	159
Tab. 7-5: Ausgewählte Niederschlag-Abfluss-Ereignisse und zugehörige Bewirtschaftung auf den Einzugsgebieten E05 und E06.....	163
Tab. 7-6: Kenngößen der einzelnen Felder bei den simulierten Ereignissen.....	165

Tab. 7-7: N-A-Ereignisse am Pegel Menzingen zur Simulation der konventionellen Bewirtschaftung.....	167
Tab. 7-8: Anhaltswerte für den Rauigkeitsbeiwert nach MANNING-STRICKLER .....	168
Tab. 7-9: Parameter für die SCE-Kalibrierung der Einzelergebnisse .....	170
Tab. 7-10: RMSE und optimierte Parameter für die SCE-Kalibrierung der einzelnen Ereignisse ohne Modellerweiterungen .....	171
Tab. 7-11: Werte der Gütefunktionen für die Ereignisse 1 - 4 bei der Kalibrierung ohne Modellerweiterungen .....	172
Tab. 7-12: Werte der Gütefunktionen für die Ereignisse 1 - 4 mit optimierten Parametern und aktiviertem <i>Surface Routing</i> Modul.....	173
Tab. 7-13: Werte der Gütefunktionen für die Ereignisse 1 - 4 mit optimierten Parametern und aktiviertem <i>Surface Routing + Silting Up</i> Modul.....	174
Tab. 7-14: Werte der Gütefunktionen für die Ereignisse 1 - 4 bei der Kalibrierung mit Modellerweiterungen.	176
Tab. 7-15: Vergleich der beobachteten und simulierten Abflusskenngrößen sowie Anteil der simulierten Abflusskomponenten am Gesamtabfluss für die Ereignisse 1 – 4 .....	179
Tab. 7-16: RMSE und optimierte Parameter für die SCE-Kalibrierung der einzelnen Ereignisse .....	179
Tab. 7-17: Kenngrößen der Abflussereignisse im hydrologischen Sommerjahr 1994 am Pegel Menzingen ohne (oE) und mit (mE) Modellerweiterungen .....	181
Tab. 7-18: Kenngrößen der Abflussereignisse im hydrologischen Sommerjahr 1995 am Pegel Menzingen ohne (oE) und mit (mE) Modellerweiterungen .....	181
Tab. 7-19: Langfristige Aufteilung der Abflusskomponenten der Monate April - Oktober für die Jahre 1994 und 1995 in [mm] .....	183
Tab. 7-20: Kenngrößen der Abflussereignisse im hydrologischen Sommerjahr 1994 am Pegel Menzingen bei konservierender Bodenbearbeitung (kons) m Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (konv) 187	
Tab. 7-21: Kenngrößen der Abflussereignisse im hydrologischen Sommerjahr 1995 am Pegel Menzingen bei konservierender Bodenbearbeitung (kons) m Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (konv) 187	
Tab. 7-22: Langfristige Aufteilung der Abflusskomponenten der Monate April - Oktober für die Jahre 1994 und 1995 in [mm] bei konservierender Bodenbearbeitung.....	187