



Regionalisierung in der Hydrologie

Forschungsbericht:

Regionalisierung der Abflußbildung über die Aggregation homogener Flächen unter Verwendung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und der 'Digitalen Reliefanalyse' (Programm SARA)

G. Gerold und B. Cyffka
Göttingen, März 1998

Bearbeiter: J. Sutmöller, J.-P. Krüger & M. Herbst

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Veranlassung und Problem.....	1
1.2 Skalenfrage des Problems	1
1.3 Ziel der Regionalisierung	2
2. Regionalisierungsstrategie und Methodik	4
2.1 Stand des Wissens über Lösungen	4
2.2 Lösungsweg und –methode	4
2.3 Ableitung und Zuweisung der Modellparameter.....	7
3. Anwendung der Regionalisierungsansätze im Untersuchungsgebiet Wernersbach	8
3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes und Datengrundlage	8
3.2 Aggregation zu Hydrological Response Units.....	11
3.3 Modellvalidierung	12
3.4 Ergebnisse der Modellsimulation.....	15
3.4.1 Abflußverhalten	15
3.4.2 Wasserhaushalt	21
3.4.3 Räumliche Differenzierung der Wasserflüsse	22
3.5 Vergleich mit den Verfahren und Ergebnissen der AG Peschke	26
3.5.1 Beschreibung der entwickelten Verfahren.....	26
3.5.2 Darstellung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse	28
3.5.3 Betrachtung von Einzelereignissen.....	29
3.6 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	31

4. Anwendung der Regionalisierungsansätze im Zielgebiet der oberen Leine	32
4.1 Gebietsbeschreibung und Datengrundlage.....	32
4.2 Aggregierung zu Hydrological Response Units.....	34
4.3 Parametrisierung pedohydrologischer Kennwerte	36
4.4 Modellvalidierung	38
4.5 Ergebnisse der Modellsimulation.....	41
4.5.1 Abflußverhalten	41
4.5.2 Wasserhaushalt	44
4.5.3 Gebietsdifferenzierte Analyse der Wasserflüsse	47
4.6 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	50
5. Abschließende Bewertung der entwickelten Regionalisierungsansätze.....	52
6. Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit	54
7. Offene Fragen und Forschungsbedarf.....	55
8. Zusammenfassung und Ausblick.....	56
9. Literatur	57

ANHANG

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur Vorgehensweise.....	6
Abbildung 2: Klimadiagramm der Station Grillenburg.....	10
Abbildung 3a & b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Ausgangsdiskretisierung.....	14
Abbildung 4a & b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie des Clusteransatzes.....	16
Abbildung 5a & b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Relief-Feuchte-Klassen.....	17
Abbildung 6a & b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Ausgangsdiskretisierung.....	39
Abbildung 6c: Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Ausgangsdiskretisierung.....	40
Abbildung 7a & b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Relief-Feuchte-Klassen.....	42
Abbildung 7c: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Relief-Feuchte-Klassen.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Skalenebene der Untersuchungsgebiete und bodenkundliche Grundlage.....	2
Tabelle 2: Einteilung der Relief-Feuchte-Klassen.....	5
Tabelle 3: Gütemaße der Abflußsimulation im Einzugsgebiet Wernersbach.....	19
Tabelle 4: Wasserhaushaltsbilanzierung mit WASMOD auf Basis der verschiedenen Gebietsdiskretisierungen für das Einzugsgebiet des Wernersbaches.....	21
Tabelle 5: Überblick über die Verfahren der Arbeitsgruppen Peschke und Gerold.....	27
Tabelle 6: Verwendete Gesteinsdurchlässigkeiten im Zielgebiet.....	38
Tabelle 7a: Wasserhaushaltsbilanz für das Zielgebiet obere Leine.....	45
Tabelle 7b: Mittlere Wasserhaushaltsbilanz für das Zielgebiet obere Leine.....	46
Tabelle 8: Anforderung und Empfehlungen zu den bodenbezogenen Geodaten.....	55

1. Einleitung

1.1 Veranlassung und Problem

Die Abschätzung der Auswirkungen zukünftiger Umweltveränderungen auf den Wasserhaushalt von Einzugsgebieten erfordert den Einsatz deterministisch-numerischer Simulationsmodelle zur räumlichen Beschreibung des hydrologischen Prozeßgefüges. Die Anwendung hydrologischer Modelle setzt mehr oder weniger (modellabhängig) umfangreiche Gebietsinformationen voraus. Zur räumlichen Verteilung der Basisdaten liegen in größeren Einzugsgebieten häufig keine oder ungenaue Angaben vor. Es müssen somit Methoden und Modellansätze entwickelt werden, deren Parameter aus allgemein verfügbaren Gebietsinformationen abgeleitet werden können und eine gebietsdifferenzierte Untersuchung des Wasserhaushaltes ermöglichen (Bork 1992).

Bei der Analyse und Modellierung des hydrologischen Prozeßgeschehens nimmt die ungesättigte Bodenzone eine zentrale Stellung ein. Die Prozesse der Abflußbildung, Versickerung und Verdunstung werden maßgeblich durch die Bodeneigenschaften (Textur, k-Werte usw.) gesteuert. Entscheidend für die erfolgreiche Anwendung hydrologischer Modelle auf der regionalen Maßstabsebene ist die Parametrisierung pedohydrologisch relevanter Kennwerte aus den zur Verfügung stehenden Bodenübersichtskarten. Dies setzt voraus, daß die entwickelten Regionalisierungsmethoden prinzipiell skalunenabhängig gültig sind.

1.2 Skalenfrage des Problems

Bisher hat es sich als zweckmäßig erwiesen, hydrologische Prozesse für Aussagen im mikro-, meso- und makroskaligen Bereich durch jeweils eigene Arbeitsmethoden, Modelle und Lösungstechniken zu beschreiben. Mit den entwickelten Regionalisierungsansätzen wurde der Versuch unternommen, die Modellentwicklung (im weitesten Sinne) in eine Richtung voranzutreiben, die skalunenabhängige und räumlich übertragbare Aussagen ermöglicht.

Obwohl die Skalierung maßgeblich von der Genauigkeit der zugrundeliegenden Daten abhängt, wurde die Einteilung in Mikro-, Meso- und Makroskala beibehalten (Dieckrüger & Richter 1997), da in den Testgebieten Lindengrund, Ziegenhagen, Eschenberg und Wernersbach sowie im Zielgebiet der oberen Leine auf allen Maßstabsebenen gearbeitet wurde (s. Tab. 1). Die Modellierung auf verschiedenen Skalierungsebenen beinhaltet, daß die Qualität und Verfügbarkeit der Basisdaten maßstabsabhängig ist und damit die Güte der Simulationsergebnisse beeinflusst.

Dies liegt u.a. darin begründet, daß für die hier betrachteten Raumskalen gemessene Modellparameter nicht berücksichtigt werden können. Die Datenlage erzwingt damit, daß die relevanten pedohydrologischen Kennwerte aus den Basisdaten der Bodenkarten abgeleitet werden müssen.

Tabelle 1: Skalenebene der Untersuchungsgebiete und bodenkundliche Grundlage

Gebiet	Größe (km²)	Skala	bodenkundl. Grundlage
Lindengrund	1.35	Obere Mikro-/untere Mesoskala	Eigene Kartierungen Forstl. Standortskartierung
Ziegenhagen	14.7	Mesoskala	Eigene Kartierungen Forstl. Standortskartierung
Eschenberg	1.95	Obere Mikro-/untere Mesoskala	Reichsbodenschätzung Forstl. Standortskartierung
Wernersbach	4.60	Mesoskala	Karte der Bodenarten der AG Peschke (1:10.000)
Obere Leine	992.0	Obere Meso-/untere Makroskala	Bodenübersichtskarten: 1:50.000; 1:200.000

1.3 Ziel der Regionalisierung

Die Regionalisierung pedohydrologischer Kennwerte beinhaltet die Darstellung der räumlichen Variabilität von Modellparametern, Eingangsgrößen und Randbedingungen und das Aufzeigen räumlicher Zusammenhänge. Um die skalunenabhängige Anwendbarkeit zu gewährleisten, wurde als Regionalisierungsstrategie die Ausweisung homogener Gebiete und deren Aggregation zu Flächen ähnlichen Wasserumsatzes gewählt (Hydrotopkonzept).

Die Zielsetzungen der Projektarbeiten lassen sich in den folgenden Punkten bzw. Fragestellungen zusammenfassen:

- Wie können aus allgemein verfügbaren Gebietsinformationen Modellparameter abgeleitet werden und welche Bedeutung haben sie für die Bodenwasserdynamik und die Abflußbildung auf den untersuchten Skalierungsebenen?

- Die Ausweisung und Aggregation von Hydrotopen ist von der Mikro- bis zur Makroskala mit einem Genauigkeitsverlust der Basisdaten verbunden. Welche Auswirkungen hat dies auf die Güte der Wasserhaushaltssimulationen?
- Können aus den Erkenntnissen der Untersuchungen Empfehlungen zu Mindestanforderungen an die benötigte Datengrundlage ausgesprochen werden?
- Wie können Flächen ähnlichen hydrologischen Verhaltens zusammengefaßt werden, ohne die charakteristischen Gebietseigenschaften aufzulösen?
- Sind die unter den vorgenannten Zielsetzungen entwickelten Regionalisierungsansätze gebiets- und skalunenabhängig anwendbar und wo liegen ihre Grenzen?

Die verfolgte Regionalisierungsstrategie wurde im Gewässerkundlichen Forschungsgebiet Ziegenhagen umgesetzt und mit Hilfe begleitender Routinemessungen zum hydrologischen Prozeßgeschehen verifiziert und getestet. Eine Übertragung der entwickelten Regionalisierungsansätze auf die Testgebiete Eschenberg und Wernersbach sollte die Anwendbarkeit auf unbekannte Untersuchungsgebiete belegen. Ziel des Forschungsvorhabens war, mit der Übertragung auf das Einzugsgebiet der oberen Leine die Skalunenabhängigkeit und damit die Allgemeingültigkeit der Regionalisierungsstrategie aufzuzeigen.

2. Regionalisierungsstrategie und Methodik

2.1 Stand des Wissens über Lösungen

Die Anwendung des Hydrotopkonzeptes zur modellhaften Beschreibung hydrologischer Fragestellungen hat in den letzten Jahren durch die Entwicklung und Möglichkeiten Geographischer Informationssysteme (GIS) stark an Bedeutung gewonnen. Der Einsatzbereich von GIS in der Modellierung liegt vornehmlich im Pre- und Postprocessing (Kovar & Nachtnebel 1996, van Deursen 1995). Zur Aufnahme, Analyse und Verwaltung geometrischer, topologischer und thematischer Daten stellen GIS ein geeignetes Werkzeug dar. Ein weiterer Gesichtspunkt in bezug auf die Anwendung hydrologischer Gebietsmodelle ist, daß durch die Verschneidung verschiedener Informationsebenen neue Gebietsinformationen erzeugt und abgeleitet werden können.

Die Anwendung des Hydrotopkonzeptes in der hydrologischen Modellierung wurde bereits in zahlreichen Untersuchungen erfolgreich nachgewiesen. Beispielhaft seien hier nur die Arbeiten von Diekkrüger (1992), Engelen & Kloostermann (1996), Flügel (1995), Lüllwitz (1993) oder Merz (1996) genannt. Allen ist jedoch gemeinsam, daß kleinere, gut untersuchte Einzugsgebiete als Forschungsobjekte dienen. Eine Übertragung auf größere und unbekanntere Gebiete scheiterte bislang an der ungenügenden Datenlage und dem unverhältnismäßig hohen Rechenzeitbedarf.

2.2 Lösungsweg und -methode

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden die Möglichkeiten der Regionalisierung der Abflußbildung im Sinne eines 'upscalings' untersucht. Insbesondere der Einfluß der naturräumlichen Variabilität pedohydrologischer Kenngrößen auf die Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone wurde anhand verschiedener Testgebiete ermittelt. Für die Übertragung auf das Zielgebiet der oberen Leine (bis zum Pegel Leineturm) wurde eine Methodik entwickelt, die unter Einbeziehung der räumlichen Verteilung ortsabhängiger Zustandsvariablen eine Veränderung und Anpassung der Modellparameter erlaubt.

Hierzu wurden zwei Regionalisierungsansätze entwickelt, anhand derer die Ausweisung und Aggregation von 'Hydrological Response Units' (HRU) für den Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone und für die Abflußbildung unter Einbeziehung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und des Programmsystems SARA zur digitalen Reliefanalyse durchgeführt wird. Die Umsetzung der Regionalisierungsansätze in ein physikalisch basiertes Modell wurde mit dem von Reiche (1991) entwickelten Wasserhaushaltsmodell WASMOD

realisiert. Das Modell berechnet für jede ausgewiesene Fläche anhand der gebildeten repräsentativen Parameterfelder und unter Vorgabe meteorologischer Eingangsgrößen die vertikalen Bodenwasserflüsse. Als Ergebnis der Simulation aller Teilflächen (HRU's) des Untersuchungsgebietes werden die Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Oberflächenabfluß und Grundwasserabfluß gebietsdifferenziert ermittelt.

In Ansatz 1 werden durch die Verschneidung von Nutzungs-, Boden- und Geologiemerkmalsdateien in ARC/INFO Kleinste Gemeinsame Geometrien vergleichbar den 'Representative Elementary Areas' (REA) erzeugt (Blöschl et al. 1995), die als Flächen mit gleicher Gebietsausstattung definiert sind. Auf die Ergebnisse der Modellsimulation wird für die Wasserhaushaltskomponenten Evapotranspiration nach HAUDE, Oberflächenabfluß und Grundwasserabfluß eine Clusteranalyse (hierarchisch agglomerativ nach WARD) angewendet und damit Flächen zu Wasserumsatztypen im Sinne der HRU's zusammengefaßt (s. Abb. 1).

Auf der Grundlage digitaler Höhenmodelle wird im zweiten Ansatz mit dem Programmpaket SARA (Köthe 1998, Köthe & Lehmeier 1993) eine automatische geomorphometrische und geomorphologische Reliefanalyse durchgeführt. Die berechneten flächenhaften Reliefeinheiten wurden mit mehrjährigen Messungen zur Erfassung der Bodenfeuchte in Beziehung gesetzt und der Zusammenhang von Bodenfeuchte und Reliefeinheiten mit dem Verfahren der multiplen Regression geprüft. Im Sinne der effektiven Parameter konnten vier verschiedene Reliefeinheiten als HRU's mit charakteristischen Unterschieden in der Bodenfeuchte statistisch abgesichert werden (s. Abb. 1). Dabei nimmt die Bodenfeuchte von den Senken- über die Konvergenz- und Hangbereiche bis zu den Scheitelbereichen kontinuierlich ab (s. Tab. 2).

Tabelle 2: Einteilung der Relief-Feuchte-Klassen

Reliefklasse	Kategorie 1	Kategorie 2	
1	Senkenbereich		Potentielle Abnahme Der Bodenfeuchte
2		Konvergenzbereich	
3		Intermediär- und Divergenzbereiche	
4	Scheitelbereich		

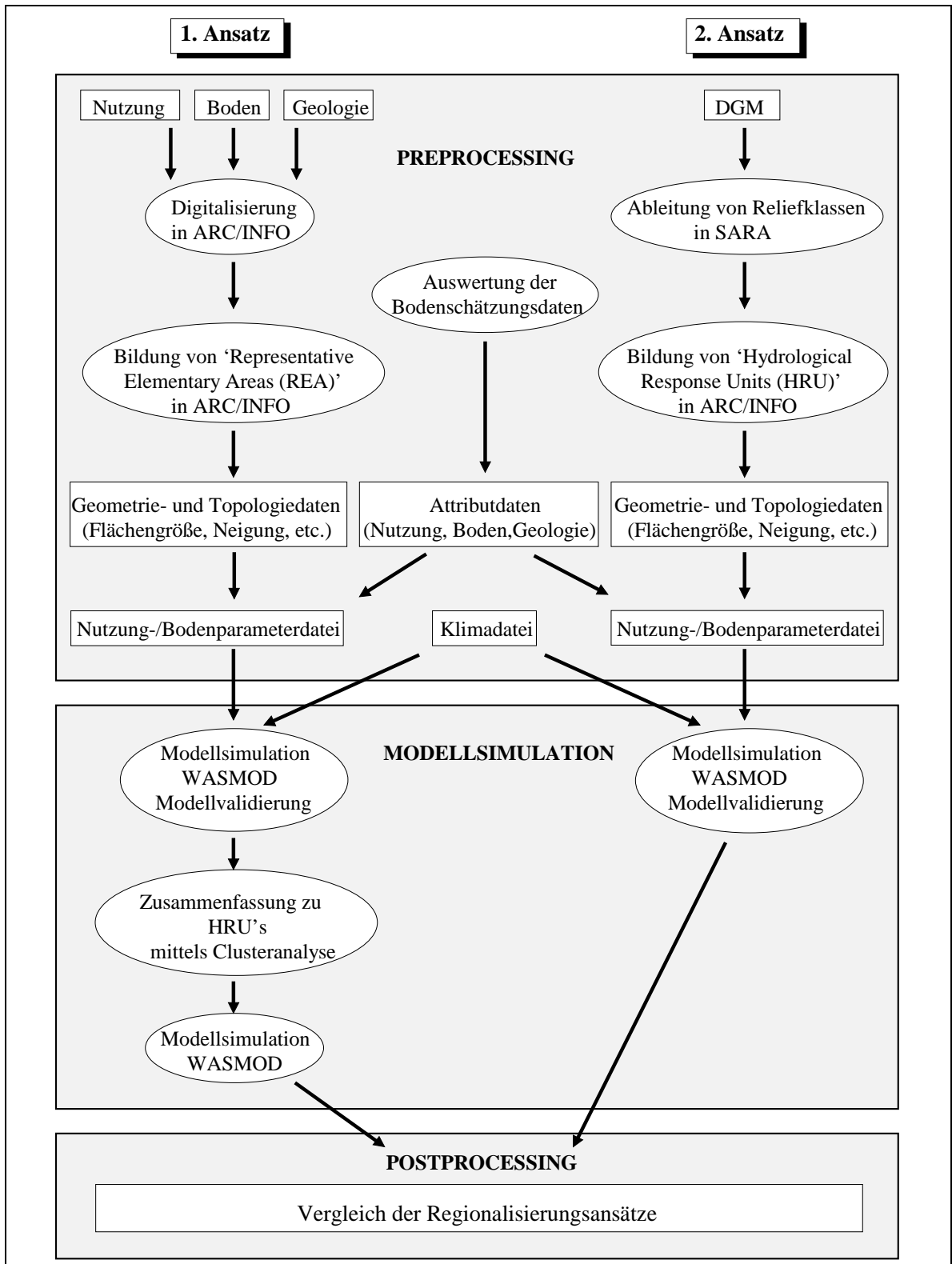


Abbildung 1: Schema zur Vorgehensweise

2.3 Ableitung und Zuweisung der Modellparameter

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette“ wurde zur Erfassung und Modellierung der Wasser- und Stoffdynamik das Modellsystem WASMOD (Water and Substance Simulation System) entwickelt (Reiche 1991). Das Wasserhaushaltsmodell basiert auf dem Ansatz der 'Hydrological Response Units' (HRU) und kann damit zur Überprüfung der entwickelten Regionalisierungsverfahren herangezogen werden. Die modellhafte Abbildung des hydrologischen Prozeßgeschehens mit WASMOD setzt eine Vielzahl von Eingabeparametern voraus, deren Erhebung in der Regel auf Einzugsgebietsebene nicht durchführbar ist. Demzufolge muß versucht werden, die benötigten Gebietsinformationen aus allgemein verfügbarem Datenmaterial abzuleiten.

Die Modellparameter, die aus der flächenhaften Gebietsinformation zu Boden, Geologie, Nutzung und Relief abgeleitet werden, können den Geometrien der REA's (Representative Elementary Areas) eindeutig zugewiesen werden. Die Zuweisung der Eingabeparameter für die zusammengefaßten Flächen der Clusteranalyse und der berechneten Bezugsgeometrien der Relief-Feuchte-Klassen ist nicht eindeutig möglich. Um die dominanten Strukturen eines Einzugsgebietes herauszuarbeiten, werden die Modellparameter den HRU's flächengewichtet zugewiesen. Das bedeutet, daß derjenige Parameter mit dem größten Flächenanteil pro aggregierter Geometrie für diese repräsentativ ist. Vorherige Untersuchungen im Gewässerkundlichen Forschungsgebiet Ziegenhagen mit der Verwendung arithmetischer Mittel der Parameter für die HRU's hatte deutlich schlechtere Ergebnisse zur Folge (Gerold et al. 1996).

Für beide Regionalisierungsansätze stellt sich die Problematik, daß teilweise sehr kleine Flächen ausgeschieden werden. Um einem zu detaillierten Flächenmosaik und damit einem erhöhten Rechenaufwand vorzubeugen, werden die sogenannten Sliverpolygone in das Nachbarpolygon mit der längsten gemeinsamen Grenze integriert.

Die berechneten Geometrien der Relief-Feuchte-Klassen weisen teilweise sehr langgestreckte Formen auf, so daß im Hinblick auf die Entwässerung keine eindeutige Flächenzuweisung möglich ist. Eine weitere Gebietsdifferenzierung nach Teileinzugsgebieten konnte hier Abhilfe schaffen. Dabei werden nur die Teileinzugsgebiete berücksichtigt, deren Vorfluter-Flächenindex größer als der mittlere Vorfluter-Flächenindex des Gesamteinzugsgebietes ist. Der Vorfluter-Flächenindex beschreibt das Verhältnis der Vorfluterlänge zur entwässerten Fläche. Ferner wird um das Vorfluternetz ein Buffer gelegt, um den Aufbau der Oberflächenabflußkaskade und eine exakte Zuweisung der Vorfluterabschnitte für die Nachbildung der Grundwasserströme zu erhalten.

3. Anwendung der Regionalisierungsansätze im Untersuchungsgebiet Wernersbach

Die entwickelten Regionalisierungsstrategien wurden, wie im Forschungsbericht 1996 bereits angekündigt, in einem weiteren Testgebiet, dem hydrologischen Versuchs- und Repräsentativgebiet Wernersbach überprüft. Die Untersuchung wurde in enger Kooperation mit der AG Peschke durchgeführt, die gleichzeitig ihre entwickelte Methodik im Gewässerkundlichen Forschungsgebiet Ziegenhagen getestet hat. Mit der Übertragung der Regionalisierungsansätze auf die Testgebiete der jeweils anderen Arbeitsgruppe sollte sowohl eine Überprüfung der entwickelten Methodik in einem unbekanntem Arbeitsgebiet als auch ein Vergleich der Regionalisierungsverfahren untereinander stattfinden.

3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes und Datengrundlage

Lage, naturräumliche Einordnung und Relief

Das Einzugsgebiet des Wernersbaches liegt ca. 25 km südwestlich von Dresden (WK 25, Blatt 31 Tharandter Wald) im nordwestlichen Teil des Landschaftsschutzgebietes Tharandter Wald. Der rein forstwirtschaftlich genutzte Tharandter Wald wird naturräumlich dem Osterzgebirge zugeordnet (Hanle 1992). Der tiefste Punkt des 4,6 km² großen Untersuchungsgebietes liegt bei 323 m ü. NN, der höchste Punkt bei 424 m ü. NN, wobei das gesamte Gebiet abgesehen vom Unterlauf des Wernersbaches verhältnismäßig schwach reliefiert ist (s. Anhang, Karte 1).

Geologie, Boden, Nutzung

Die Lage des Tharandter Waldes im Grenzbereich Erzgebirge/Nossen-Wilsdruffer-Schiefergebirge führt zu einer besonderen geologischen Vielfalt (Jordan & Weder 1995). Den Großteil der Fläche des Untersuchungsgebietes nehmen Paläorhyolithe ein, welche diskordant auf jungproterozoischem Erzgebirgskristallin bzw. altpaläozoischen Serien des Nossen-Wilsdruffer Schiefergebirges liegen (Fiedler & Thalheim 1988). Das Hangende der Paläorhyolithe bilden geringmächtige cenomane Ablagerungen, die als Erosionsrelikte jedoch nur noch an den Einzugsgebietsrändern anstehen. Die jüngsten Bildungen sind die Kolluvien und Verwitterungsdecken des Quartärs. Im gesamten Untersuchungsgebiet werden die Gesteinsschichten vor allem an flachen Hängen und im Bereich der Hangfüße von quartären Lockersedimenten (Auenlehme, Lößlehme und Fließerden) unterschiedlicher Mächtigkeiten überdeckt (s. Anhang, Karte 2).

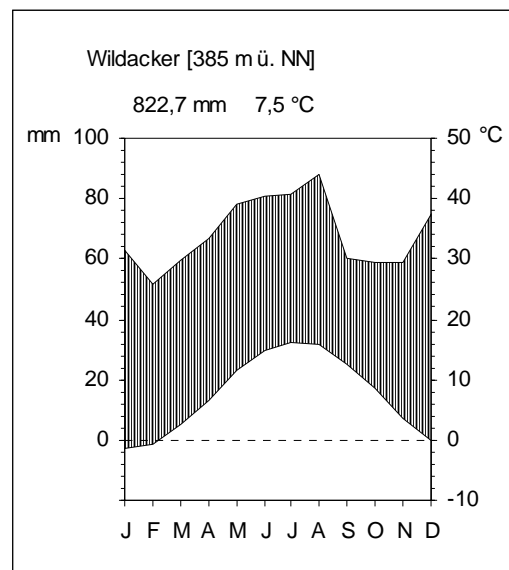
Aus den Verwitterungsprodukten des Rhyoliths und der Sandsteine sowie des eingetragenen Lösses bildeten sich im Pleistozän mittels Kryoturbation und Solifluktion sowie im Holozän mittels Erosion und Akkumulation die Ausgangssubstrate der Bodenbildung (Fiedler & Thalheim 1988). Als Bodenarten überwiegen tief- und mittelgründige lehmige Schluffe bis Schlufflehme. Sandige Bodenarten sind im Untersuchungsgebiet nur wenig verbreitet (Peschke 1990). Aus bodenhydrologischer Sicht zeichnen sich die Böden mit überwiegend bindigen Substraten durch gute Speichereigenschaften und eingeschränkte Leitfähigkeiten aus, wobei jedoch vereinzelt an Standorten mit hohen Skelettgehalten die Versickerung gegenüber der Speicherung dominant ist (s. Anhang, Karte 3).

Das Einzugsgebiet des Wernersbaches wird rein forstwirtschaftlich genutzt. Bei den Laub- und Nadelwaldbeständen handelt es sich weitgehend um Mischbestände, wobei die dominierende Baumart die Fichte (*Picea abies*) ist. Eine Krautschicht ist unter den Nadelholzbeständen nur ausgesprochen schwach entwickelt. Reine Laubholzbestände (Rotbuche, Eiche, Birke) sind kaum vertreten (s. Anhang, Karte 4).

Klima und Hydrologie

Die meteorologischen Daten stammen, mit Ausnahme der Niederschlagswerte, von der etwa 4km vom Untersuchungsgebiet Wernersbach entfernt gelegenen Klimastation Grillenburg (Wildacker). Die Temperatur beträgt im langjährigen Jahresmittel 7,5 °C. Für den Zeitraum von 1970 bis 1989 liegt die unkorrigierte mittlere Jahresniederschlagssumme bei 865,9 mm (Peschke 1990). Der Jahresgang der gemittelten Monatsniederschläge weist ein deutliches Maximum im Sommer auf, dazu kommt ein weniger ausgeprägtes Maximum im Winter. Das Niederschlagsminimum wird im Februar erreicht (s. Abb. 2).

Abbildung 2: Klimadiagramm der Station Grillenburg (langjährige Reihe 1959-1988)



Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich über die Jahre 1993 bis 1996. Mit Jahresniederschlagssummen unter dem langjährigen Mittel waren die Jahre 1993 und 1996 vergleichsweise trocken. Überdurchschnittlich feucht gestaltete sich das Jahr 1995, während 1994 gegenüber dem langjährigen Mittel nur unwesentlich mehr Niederschlag gefallen ist. Alle 4 Jahre weisen Extremereignisse wie längere Trockenperioden oder große Niederschlagsereignisse auf (s. Anhang, Tabelle A1). Die mittleren Jahrestemperaturen lagen 1993 mit 8,4°C, 1994 mit 9,6°C und 1995 mit 8,6°C über dem langjährigen Mittel. Mit einer Jahresmitteltemperatur von 6,8°C war das Jahr 1996 das kühlsste im Untersuchungszeitraum.

Die beschriebene morphologische, hydrogeologische und pedohydrologische Varianz im Einzugsgebiet erzeugt ein komplexes Abflußgeschehen, bei dem alle Arten der Abflußbildung möglich sind (Peschke 1990). Obwohl fast das gesamte Einzugsgebiet bewaldet ist, ergibt sich mit 10,2 l/s·km² eine vergleichsweise hohe Abflußspende. Dabei machen sich die Einflüsse des nur wenig durchlässigen Gesteinsuntergrundes und der niedrigen Wasserleitfähigkeiten der Böden bemerkbar. Ferner stehen relativ geringen mittleren Abflußmengen vor dem Hintergrund der Einzugsgebietsgröße extreme Hochwasserabflüsse gegenüber. Niedrige hydraulische Speicher- und Leitfähigkeiten des Rhyoliths und der Kreidesandsteine drücken sich in geringen Niedrigwasserabflüssen aus. Grundwasserneubildung und Versickerung sind für das Abflußgeschehen nur lokal begrenzt von Bedeutung (Etzenberg 1996).

Instrumentelle Gebietsausstattung und Datengrundlage

Das Einzugsgebiet des Wernersbaches wird seit 1967 als Versuchs- und Repräsentativgebiet des Institutes für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden genutzt (Peschke 1991). Im Untersuchungszeitraum von 1993 bis 1996 waren alle fünf Teileinzugsgebiete mit Meßpegeln ausgestattet. Daneben existieren drei Niederschlagsmeßstellen sowie mehrere Bodenfeuchtemeßstellen.

Für die Untersuchung standen flächenbezogene Daten zum Boden, zur Nutzung und zur Geologie, ein DGM (Rasterweite 10m), sowie Zeitreihen zum Witterungsverlauf und zu Bodenfeuchte- und Abflußmessungen zur Verfügung. Für die Jahre 1993 bis 1996 wurden die an der Station Wildacker gemessenen Tagesminima und -maxima der Lufttemperatur übernommen. Aus der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur wurde das Sättigungsdefizit (14:00 Uhr) ermittelt. Aus den Niederschlagsdaten der drei Meßstationen innerhalb des Einzugsgebietes wurde das arithmetische Mittel berechnet und als Niederschlagsinput zugrundegelegt. In den Wintermonaten, in denen aus meßtechnischen Gründen keine Niederschlagsdaten aus dem Gebiet vorliegen, wurde auf Niederschlagswerte der Station Wildacker zurückgegriffen.

3.2 Aggregation zu Hydrological Response Units

Die Berechnung gebietsdifferenzierter Wasserhaushaltsbilanzen im Untersuchungsgebiet Wernersbach erfolgte auf der Grundlage von Bezugsgeometrien, die mit den für die Simulation benötigten Informationen zu Nutzung, Boden, Geologie und Relief parametrisiert wurden. Die Flächenschwerpunkte der ausgewiesenen Geometrien werden im Sinne der effektiven Parameter (Tietje 1993, Merz 1996) als für die jeweilige Fläche repräsentativer Standort erachtet. Kleinräumige Heterogenitäten pedohydrologischer Parameter (Ambroise & Viville 1986, Gerold et al. 1992, Richter & Dieckkrüger 1996) können hierbei nicht berücksichtigt werden.

Kleinste Gemeinsame Geometrien und Clusteranalyse

Für die Flächenaggregation des ersten Ansatzes wurde die Flächennutzung mit den Geometrien der Bodenarten und der Geologie verschnitten und die Sliverpolygone eliminiert. Ferner wurden mit Hilfe des Grid-Moduls in ARC/INFO 11 Teileinzugsgebiete ermittelt und das Vorfluternetz mit einem 10m breiten Buffer versehen. Durch die Verschneidung mit den Teileinzugsgebiets- und Vorflutergeometrien erhält man für das Einzugsgebiet des Wernersbaches eine Gesamtzahl von 447 Polygonen.

Um die homogenen Teilflächen der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien zusammenzufassen, wurden die Jahressummen der Evapotranspiration, des Oberflächen- und Grundwasserabflusses als Simulationsergebnis des Jahres 1993 einer Clusteranalyse unterzogen. Die aggregierten Geometrien wurden ebenfalls mit einem Vorfluterbuffer und den Teileinzugsgebieten überlagert, so daß durch die acht ausgewiesenen Cluster eine Flächenreduzierung auf 162 Polygone erzielt werden konnte.

Relief-Feuchte-Klassen

Dem zweiten Ansatz liegt die Annahme einer reliefabhängigen, hypothetischen Bodenfeuchteverteilung zugrunde (vgl. Kap. 2.2). Auf Basis des DGM wurden mit dem Programmsystem SARA flächenhafte Reliefeinheiten ausgegliedert und im GIS zu vier Klassen im Sinne von HRU's aggregiert. Die Geometrien der Relief-Feuchte-Klassen wurden mit den ausgewiesenen Teileinzugsgebietsgrenzen und dem Vorfluterbuffer überlagert. Nach der Eliminierung der Sliverpolygone beträgt die Gesamtanzahl der Teilflächen 184.

Die für beide Ansätze vorgenommene flächengewichtete Zuweisung von Geoinformationen läßt im Vergleich mit der ursprünglichen Verteilung, die über die Ausgangsdiskretisierung der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien repräsentiert ist, nur geringfügige Unterschiede erkennen (s. Anhang, Tab. A2). Dabei ist eine verstärkte Zunahme vor allem der Flächenanteile zu beobachten, die auch in der ursprünglichen Verteilung den größten Anteil am Einzugsgebiet einnehmen. Sehr kleine Flächen werden teilweise nicht berücksichtigt. Größere Informationsverluste bei den Relief-Feuchte-Klassen liegen in der grundlegend anderen Flächenstruktur gegenüber den Geometrien des Clusteransatzes begründet.

3.3 Modellvalidierung

Die Modellvalidierung wurde über die Flächen der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien vorgenommen. Dazu wurden sowohl die am Gebietsauslaß gemessenen Abflußwerte mit den simulierten Abflüssen verglichen als auch die Bodenfeuchteverläufe einzelner Standorte einer Bewertung unterzogen.

Untersuchungen in den anderen Testgebieten haben gezeigt, daß eine Einbindung des geologischen Untergrundes im Modell unbedingt erforderlich ist (vgl. Gerold & Cyffka 1996). Die Kf-Parameter des untersten Kompartiments steuern einerseits die zeitvariante Höhe des Basisabflusses und beeinflussen zudem entscheidend die Wassergehalte (θ) der darüber liegenden Bodenkompimente. Da für die geologischen Einheiten im Einzugsgebiet Wernersbach keine Meßwerte verfügbar sind, mußte zunächst eine schrittweise Anpassung an die

Gesteinsdurchlässigkeiten auf der Grundlage von Literaturwerten vorgenommen werden (s. Anhang, Tab. A3). Zur Vermeidung von Parameterinteraktionen wurde für jeden Testlauf jeweils nur der Kf-Wert einer geologischen Einheit verändert. Die Kalibrierung der Gesteinsdurchlässigkeiten wurden anhand der Ausgangsdiskretisierung für das Jahr 1993 durchgeführt.

Abflußverhalten

Insgesamt werden die Abflußereignisse von WASMOD in guter zeitlicher Deckung nachvollzogen (s. Abb. 3a & 3b). Größere Differenzen am Anfang des Simulationszeitraums sind auf eine fehlenden Vorlaufphase zurückzuführen, so daß die vom Modell angenommenen Bodenwassergehalte und Grundwasserstände nicht den realen Verhältnissen entsprechen (s. Abb. 3a). Abweichungen von der gemessenen Ganglinie in den Winterhalbjahren beruhen auf dem relativ einfach gehaltenen Schneemodul (Gradtag-Schmelzfaktor), das bei Temperaturen um den Gefrierpunkt nicht immer in der Lage ist, den Aggregatzustand und somit die Abflußwirksamkeit des Niederschlags richtig nachzubilden. Die Überzeichnung einzelner Hochwasserscheitel in den Sommerhalbjahren ist mit dem Fehlen eines Interflow- Moduls und der Nichtberücksichtigung einer Streuauflage sowie eines Makroporensystems zu erklären.

Schwierigkeiten bestehen bei der Wiedergabe des Basisabflusses, dies gilt insbesondere für die Jahre 1993 und 1994 (s. Abb. 3a). In diesen Jahren werden die Jahresabflußmengen teilweise um das Doppelte überschätzt. Die beste Übereinstimmung mit der Pegelmessung findet sich 1995, in dem die Abflußmenge vom Modell um 0,3% zu niedrig berechnet wird (s. Abb. 3b). Im Mittel des Untersuchungszeitraums liegt der Fehler bei 22% über den gemessenen Abflußmengen.

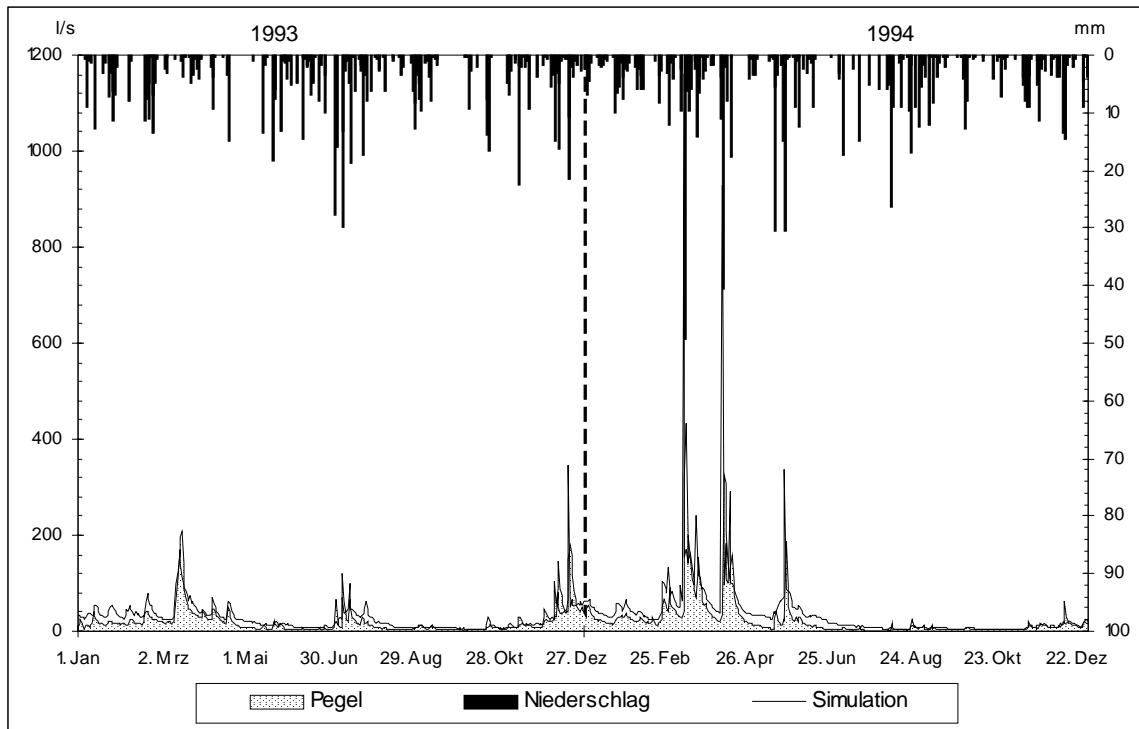


Abbildung 3a : Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Ausgangsdiskretisierung

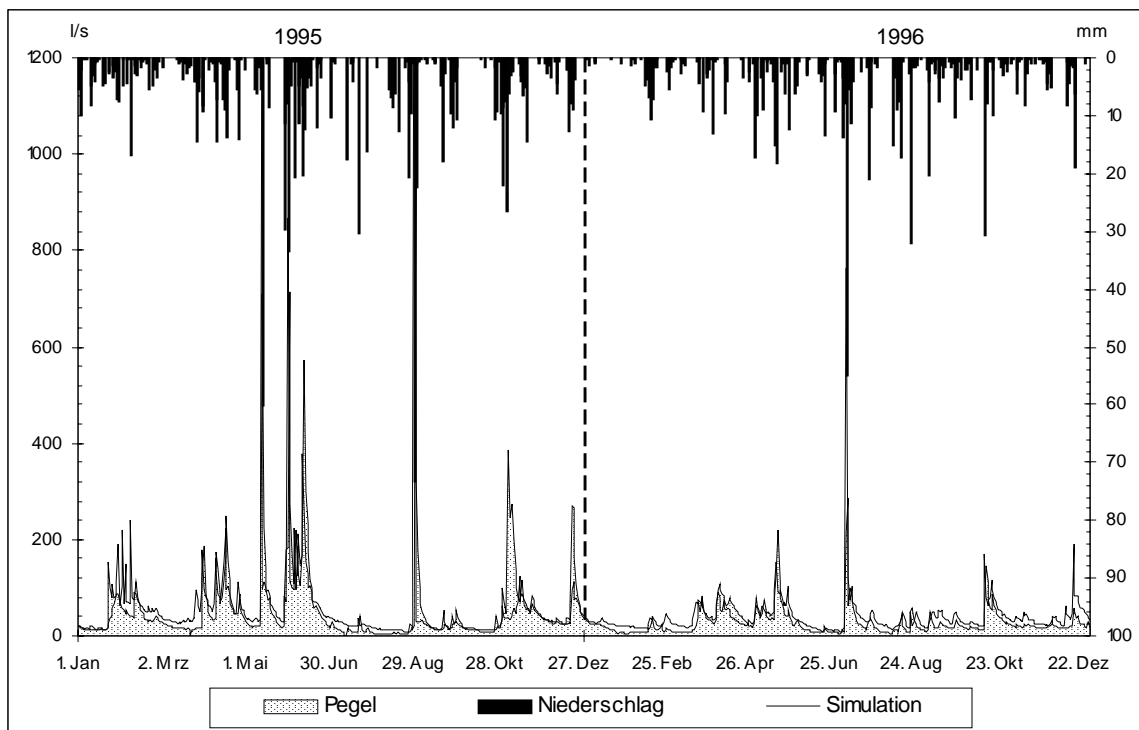


Abbildung. 3b : Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Ausgangsdiskretisierung

Bodenfeuchte

Als weitere Kontrolle, ob die vom Modell berechneten Ergebnisse plausibel sind, erfolgte eine Überprüfung anhand gemessener Bodenwassergehalte. Generell ist anzumerken, daß vom Modell eine mittlere Bodenfeuchte für ein 20cm mächtiges Kompartiment berechnet wird, während die Meßwerte punktbezogen sind. Ebenso werden die Bodenfeuchtedaten eines flächenrepräsentativen Standortes (Simulation) mit denen eines Einzelstandorts (Messung) verglichen.

Der Validierungszeitraum reichte vom Mai 1993 bis Ende 1994. In diesem Zeitraum wurden in Monatsabständen Bodenfeuchtemessungen durchgeführt. An den meisten Terminen zeigte sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Allerdings werden die absoluten Wassergehalte gering unterschätzt. Die zeitliche Dynamik der modellierten sommerlichen Desorptionsvorgänge wurde im wesentlichen von den Meßwerten bestätigt. Die mittlere absolute Abweichung der Simulation (Mean Absolute Error nach Green & Stephenson 1986) betrug für den gesamten Validierungszeitraum 4,6 Vol.%.

3.4 Ergebnisse der Modellsimulation

Ausgehend von einer gelungen Modellanpassung, die den Abfluß als integrierende Größe gut abbildet, schließt sich die Untersuchung des Abflußverhaltens beider Ansätze und eine Quantifizierung der Simulationsgüte an. Auf Basis der vier simulierten Jahre wird der mittlere Wasserhaushalt gebietsdifferenziert berechnet und mit dem mittleren Wasserhaushalt des Einzugsgebiets Wernersbach verglichen. Ferner werden die Auswirkungen der verschiedenen Gebietsdiskretisierungen auf die räumliche Differenzierung des Wasserumsatzes näher betrachtet.

3.4.1 Abflußverhalten

Clusteransatz

Die zeitliche Dynamik der Abflußbildung wird im wesentlichen erfaßt (s. Abb. 4a & 4b). Schwierigkeiten bestehen zu Beginn des Simulationszeitraumes und in den Winterhalbjahren (vgl. Kap. 3.3). Für die Jahre 1993 und 1994 werden die Basisabflüsse ebenfalls zu hoch berechnet, sie liegen jedoch geringfügig unter denen der Simulation der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien. Dem steht eine stärkere Überzeichnung der Hochwasserspitzen gegenüber.

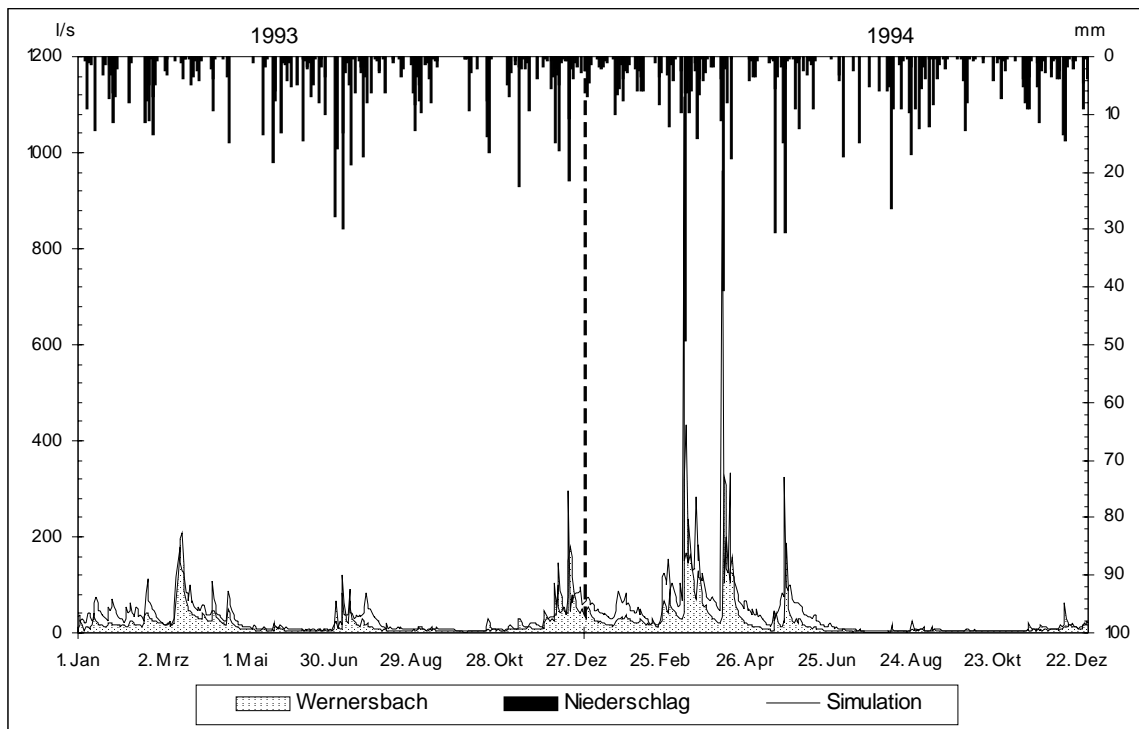


Abbildung 4a: Gemessene und simulierte Abflußgangline des Clusteransatzes

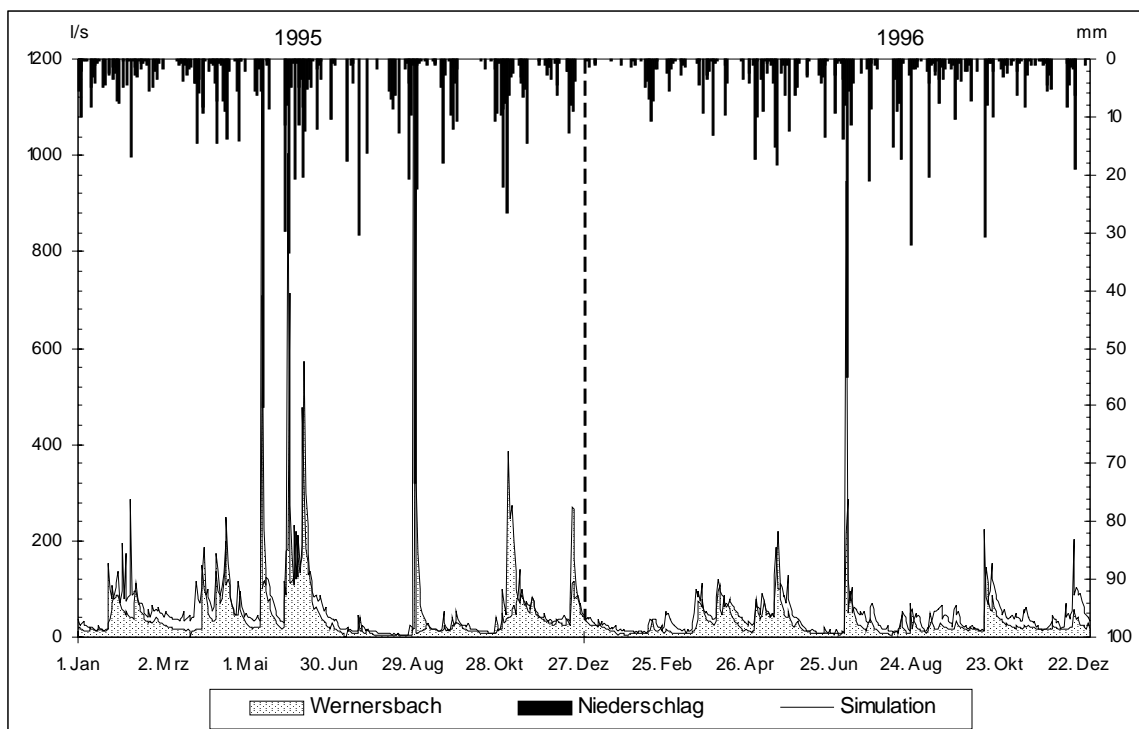


Abbildung 4b: Gemessene und simulierte Abflußgangline des Clusteransatzes

Die gemessenen Rückgangslinien verlaufen vielfach unter denen der simulierten Ganglinien, so daß die Gebietsretention im allgemeinen höher liegt, als vom Modell angenommen. Die beste

Übereinstimmung mit der gemessenen Jahresabflußsumme ist 1995 mit einer Abweichung von 10,4% zu verzeichnen. Die mittlere prozentuale Abweichung von den Meßwerten beträgt im Untersuchungszeitraum 32,7%.

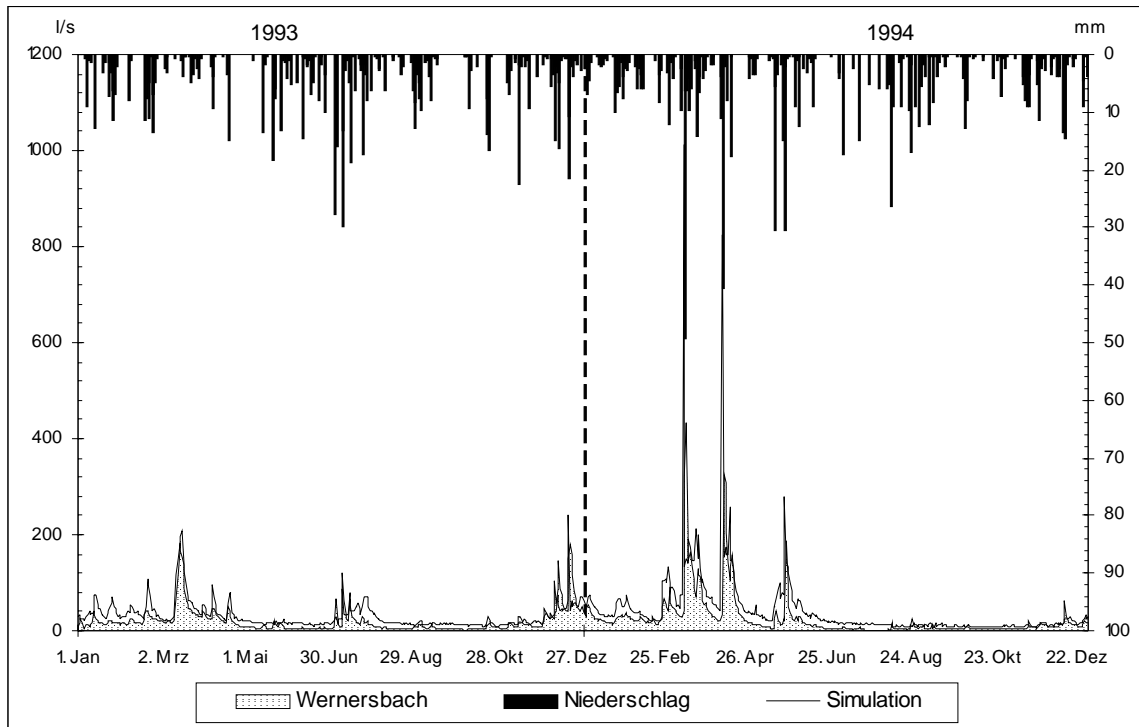


Abbildung 5a: Gemessene und simulierte Abflußgangline der Relief-Feuchte-Klassen

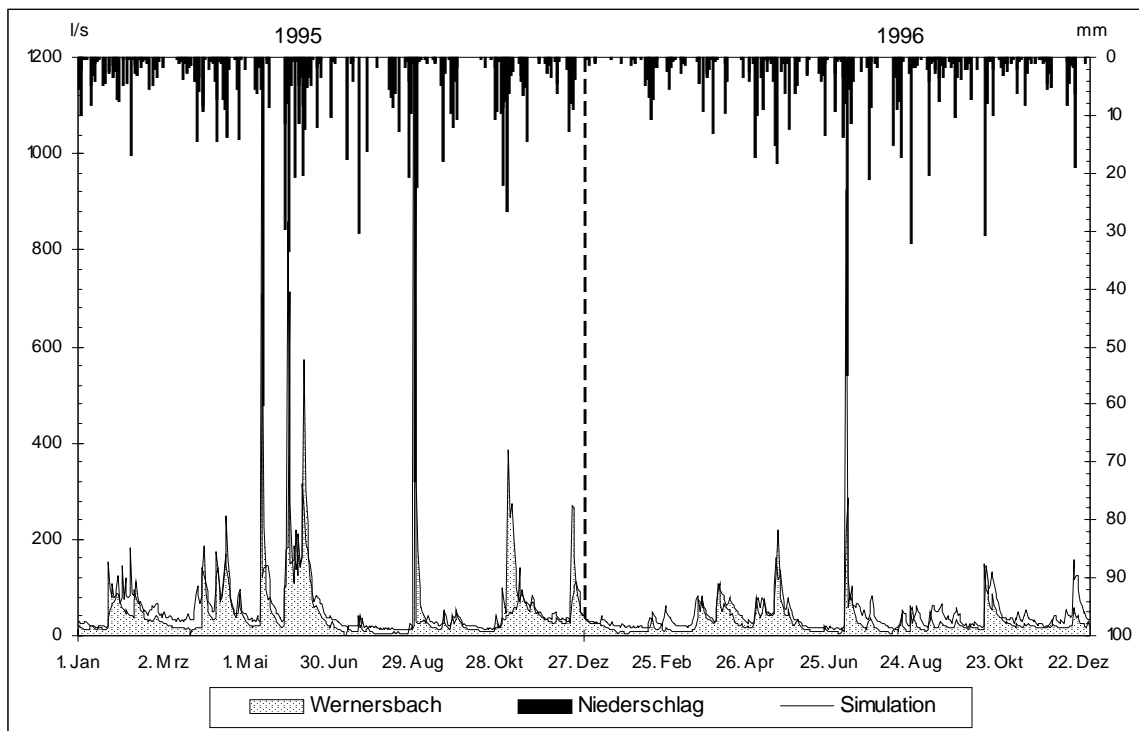


Abbildung 5b: Gemessene und simulierte Abflußgangline der Relief-Feuchte-Klassen

Relief-Feuchte Klassen

Das Abflußverhalten des Wernersbaches wird über den Ansatz der Relief-Feuchte-Klassen realistisch nachgezeichnet (s. Abb. 5a & 5b). Die Simulationsergebnisse zeigen im wesentlichen die gleichen Unstimmigkeiten wie beim ersten Ansatz. Besonders in den Jahren 1993 und 1994 weichen die simulierten Basisabflüsse deutlich von der Pegelmessung ab. Die Hochwasserscheitel werden im Vergleich zum Clusteransatz weniger deutlich überzeichnet. Die geringsten Abweichungsbeträge der Jahresabflußsummen ergeben sich für das Jahr 1995 mit 9,1%. Die mittlere Abweichung beträgt im Simulationszeitraum 35,2%.

Vergleich des Abflußverhaltens beider Ansätze

Die simulierten Abflußganglinien der Regionalisierungsansätze sind auf den ersten Blick sehr ähnlich. Zur Herausarbeitung von Unterschieden dienen verschiedene Gütemaße. Die mittlere absolute Abweichung (*Mean Absolute Error*) (1), und das mittlere Abweichungsquadrat (*Root Mean Square Error*) (2) berücksichtigen an einzelnen Zeit- oder Meßpunkten den Abstand zwischen den beiden Ganglinien (Green & Stephenson 1986).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M - S|_i \quad (1)$$

n = Anzahl der Beobachtungen
M = Meßwert
S = Simulationswert

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_o(t) - q_s(t))^2 \right)^{0,5} \quad (2)$$

n = Anzahl der Beobachtungen
q_o(t) = gemessene Abflußrate zum Zeitpunkt t
q_s(t) = simulierte Abflußrate zum Zeitpunkt t

Bestimmt wird die absolute Flächengröße der Divergenz (*Sum of Absolute Areas of Divergence*) zwischen den Ganglinien. Das dabei zu lösende Integral kann durch die Gleichung (3) angenähert werden (Green & Stephenson 1986):

$$SAAD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(q_o(t) - q_s(t))_i + (q_o(t) - q_s(t))_{i+1}}{2} * \Delta t \right|_i \quad (3)$$

- n = Anzahl der Beobachtungen
 $q_o(t)$ = gemessene Abflußrate zum Zeitpunkt t
 $q_s(t)$ = simulierte Abflußrate zum Zeitpunkt t
 Δt = Zeitschritt

Als Gütemaß der Übereinstimmung von Kurven dient der *IA (Index of Agreement)* (4) (Willmott 1981), bei dem eine Gewichtung in bezug auf die gemessenen mittleren Abflußraten stattfindet:

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_o(t) - q_s(t))^2_i}{\sum_{i=1}^n (|q_o(t) - q_{mean-o}| + |q_s(t) - q_{mean-o}|)^2_i} \quad (4)$$

- n = Anzahl der Beobachtungen
 $q_o(t)$ = gemessene Abflußrate zum Zeitpunkt t
 $q_s(t)$ = simulierte Abflußrate zum Zeitpunkt t
 q_{mean-o} = mittlere gemessene Abflußrate

Die Summenparameter sind durch die Verwendung der absoluten Abweichungsbeträge direkt und der *IA* durch die Berücksichtigung der mittleren Abflußrate indirekt von der Höhe der Abflußbeträge abhängig. Der dimensionslose *IA* nimmt Werte zwischen 0.0 und 1.0 an. Je höher der Index, desto besser ist die Übereinstimmung von Simulation und Messung. Bei den Summenparametern deutet eine niedrige Fehlersumme auf eine gute Modellanpassung hin (s. Tab. 3).

Tabelle 3: Gütemaße der Abflußsimulation im Einzugsgebiet Wernersbach

	MAE			RMSE			SAAD			IA		
	KGG	FKL	CLU	KGG	FKL	CLU	KGG	FKL	CLU	KGG	FKL	CLU
1993	12,61	15,20	13,82	21,28	21,49	22,31	4353,0	5304,5	4703,2	0,846	0,845	0,851
1994	21,99	23,99	24,31	83,03	74,14	83,84	7252,2	8167,8	8226,6	0,443	0,526	0,473
1995	38,55	38,06	41,81	128,02	131,07	142,82	11210,5	11340,5	12414,1	0,532	0,536	0,506
1996	18,27	20,60	20,92	47,82	55,58	58,37	6227,4	7084,7	7162,8	0,414	0,386	0,371
Ø	22,85	24,46	25,22	80,66	80,98	88,50	29058,4	31912,5	32532,5	0,536	0,553	0,523

[KGG =Kleinste Gemeinsame Geometrien, FKL = Relief-Feuchte-Klassen, CLU = Cluster]

Dem Güteindex *IA* zufolge ergibt sich die beste Modellanpassung für die Simulation auf Grundlage der Relief-Feuchte-Klassen. Die Differenzen zwischen den Gebietsdiskretisierungen sind insgesamt gering. Die besten Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung zeigen sich in allen Ansätzen für das Jahr 1993.

Hinsichtlich der Summenparameter werden die geringsten Abweichungen zu den Pegelmessungen mit Hilfe der Ausgangsdiskretisierung der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien erzielt. Die Relief-Feuchte-Klassen liefern im Vergleich zum Clusteransatz im gesamten Untersuchungszeitraum bei allen Summenparametern bessere Übereinstimmungen.

Die Unterschiede der Summenparameter zwischen den Gebietsdiskretisierungen sind als gering zu beurteilen. Die maximalen mittleren Abweichungen im Vergleich zur Ausgangsdiskretisierung betragen für den *MAE* 10,9% (Relief-Feuchte-Klassen), für den *RMSE* 9,0% (Clusteransatzes) und für den *SAAD* 12,4% (Relief-Feuchte-Klassen).

Bei beiden Regionalisierungsansätzen werden die Basisabflüsse im Simulationszeitraum von WASMOD überschätzt. Die Berechnung des Basisabflusses erfolgt im Modell in Abhängigkeit vom Grundwassergefälle und der Gesteinsdurchlässigkeit. Vor dem Hintergrund der Komplexität der hydrogeologischen Situation im Einzugsgebiet Wernersbach werden die Grundzüge des Basisabflußverhaltens durch das Modell wiedergegeben. Bessere Übereinstimmungen ließen sich eventuell mit einem detaillierteren Kluftgrundwassermodell realisieren. Dazu ist jedoch eine aufwendige Parametrisierung erforderlich (Schöniger 1990), die nicht über allgemein verfügbare Gebietskennwerte erfolgen kann.

Bei Starkniederschlägen werden von WASMOD häufig zu hohe Scheitelabflüsse simuliert. Liegen die Tagesniederschlagssummen unter 40mm/d, schwanken die mittleren Abweichungen der Scheitelabflüsse bei allen drei räumlichen Diskretisierungen um 25%. Ausgeprägte Abweichungen von rund 150% sind bei Niederschlägen über 40mm/d zu verzeichnen. Die Überschätzung der Scheitelabflüsse bei hohen Tagesniederschlagssummen resultiert aus der vollständigen Aufsättigung der oberen Bodenkompimente. Da modellbedingt weder Makroporenfluß noch lateraler bodeninnerer Abfluß berücksichtigt werden, kann die Komplexität der Bildung schneller Abflüsse nur unvollständig erfaßt werden.

3.4.2 Wasserhaushalt

Die ermittelten Wasserhaushaltsbilanzen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der Modellaufbau von WASMOD sieht eine Bilanzierung in Grundwasserabfluß, Oberflächenabfluß, Evaporation, Transpiration und Interzeption vor. Die Differenz zwischen der Summe dieser Bilanzglieder und der Niederschlagsmenge wird als Speicheränderung (Bodenwasser, Schneedecke) betrachtet. Der Betrag eines möglichen Grundwasserabstroms geht demnach in die Speicheränderung mit ein.

Tabelle 4: Wasserhaushaltsbilanzierung mit WASMOD auf Basis der verschiedenen Gebietsdiskretisierungen für das Einzugsgebiet Wernersbach 1993 bis 1996

		Nieder- schlag	Abfluß		Evapotranspiration		Speicher Δ
			GW	OA	ET	IN	
Kleinste Gemeinsame Geometrien							
1993	mm/a	814	167	22	327	277	22
	[%]	100	20,5	2,6	40,2	34,0	2,7
1994	mm/a	876	205	69	342	279	-19
	[%]	100	23,4	7,8	39,1	31,9	-2,2
1995	mm/a	1123	273	141	331	312	66
	[%]	100	24,3	12,5	29,5	27,8	5,9
1996	mm/a	764	230	36	229	250	18
	[%]	100	30,2	4,8	30,0	32,7	2,4
Cluster							
1993	mm/a	814	174	22	323	277	18
	[%]	100	21,4	2,7	39,6	34,0	2,3
1994	mm/a	876	222	63	337	280	-26
	[%]	100	25,3	7,2	38,5	31,9	-2,9
1995	mm/a	1123	304	137	325	312	45
	[%]	100	27,0	12,2	29,0	27,8	4,0
1996	mm/a	764	238	45	223	250	9
	[%]	100	31,1	5,9	29,2	32,7	1,1
Relief-Feuchte-Klassen							
1993	mm/a	814	197	14	318	281	5
	[%]	100	24,2	1,7	39,0	34,5	0,6
1994	mm/a	876	247	46	331	284	-32
	[%]	100	28,2	5,2	37,8	32,4	-3,6
1995	mm/a	1123	327	109	318	317	53
	[%]	100	29,1	9,7	28,3	28,2	4,7
1996	mm/a	764	255	31	218	253	7
	[%]	100	33,4	4,1	28,5	33,1	0,9

[GW = Grundwasserabfluß, OA= Oberflächenabfluß, ET = Evaporation+Transpiration, IN = Interzeption]

Die Wasserhaushaltsbilanzen der Ansätze weisen untereinander nur geringe Unterschiede auf. Die Abweichungsbeträge der Bilanzgrößen von Relief-Feuchte-Klassen und des Clusteransatzes schwanken zwischen 0 und 4,8% der Jahresniederschlagssumme im Vergleich zu den Kleinsten Gemeinsamen Geometrien. Am auffälligsten weichen die Abflußanteile der Relief-Feuchte-

Klassen ab. Hier verlagert sich das Verhältnis von Grundwasser- zu Oberflächenabfluß in Richtung Grundwasserabfluß. Dies hat seinen Grund in der Verschiebung der Flächenanteile des Rhyoliths und der quartären Lockersedimente, die über die sensitiven Kf-Werte des untersten Modellkompartiments direkt den Basisabfluß und indirekt den Oberflächenabfluß steuern (s. Anhang, Tab. A2).

Die mittlere Summe aus Evaporation und Transpiration weist je nach räumlicher Diskretisierung Größen zwischen 296 und 308 mm/a auf. Die mittleren Interzeptionsraten schwanken zwischen 280 und 284 mm/a. Für Mitteleuropa werden für Nadelholzbestände Interzeptionsanteile von 20 bis 40% der jährlichen Niederschläge angenommen (Hoffmann 1992), so daß die von WASMOD berechneten Werte für das Untersuchungsgebiet Wernersbach in einer realistischen Größenordnung liegen (s. Tab. 4).

Nach der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung kann die Evapotranspiration aus der Differenz zwischen gemessenem Niederschlag und Abfluß berechnet werden. Diese beträgt für das Einzugsgebiet Wernersbach 609mm/a. Einem Abflußanteil von gemessenen 241mm/a (28%) vom Freilandniederschlag (850mm/a) steht je nach Gebietsdiskretisierung ein berechneter mittlerer Abflußanteil von 32 bis 34% gegenüber. Die Evapotranspiration wird unter Berücksichtigung der Speicheränderung von WASMOD auf Grundlage der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien mit 66% vom Freilandniederschlag berechnet, während die Differenz zwischen gemessenem Niederschlag und gemessenem Abfluß 72% beträgt. Hier zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Messungen und den Simulationen auf Basis der verschiedenen Gebietsdiskretisierungen.

3.4.3 Räumliche Differenzierung der Wasserflüsse

Mit den herkömmlichen Methoden zur Modellvalidierung können überprüfbare Aussagen bezüglich der Abflußzusammensetzung am Gebietsauslaß und zum Gebietswasserhaushalt getroffen werden. Eine gebietsdifferenzierte Analyse der Wasserhaushaltskomponenten kann nur indirekt erfolgen, indem die Plausibilität zwischen Parameterkombination und Flächen mit ähnlichen Wasserumsätzen untersucht wird.

Evapotranspiration

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der klassifizierten prozentualen Anteile der Evapotranspiration, ergibt sich für alle zugrundeliegenden Gebietsdiskretisierungen ein homogenes Gesamtbild. Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, daß während des gesamten Untersuchungszeitraumes vergleichbare räumliche Muster gebildet werden.

Zunächst fallen die Baumschul- und Wiederaufforstungsflächen auf, die aufgrund geringerer Interzeptionsverluste mit maximal 64% des Jahresniederschlags die niedrigsten Evapotranspirationsraten aufweisen. Allerdings werden diese Flächen infolge der räumlich begrenzten Verbreitung nur bei der Flächendiskretisierung des ersten Regionalisierungsansatzes der Clusteranalyse berücksichtigt. Eine detaillierte räumliche Differenzierung der Evapotranspiration innerhalb der Waldbestände könnte durch Berücksichtigung des Bestandesalters und der Bestandesart erreicht werden. In diesem Zusammenhang wäre die Erstellung von bestandesarten- und altersbezogenen Phänologiedateien sinnvoll.

Bei allen Gebietsdiskretisierungen zeichnet sich die Tendenz ab, daß in den Teileinzugsgebieten N-Bach und unterer Wernersbach für die Flächen der Leitbodenart sandiger Lehm überdurchschnittlich hohe Evapotranspirationsraten berechnet werden. Räumlich decken sich diese Flächen mit den Flächen des Cluster 3, in dem die im Mittel höchsten Verdunstungsbeträge aller Cluster ermittelt werden. Tatsächlich werden für die tonigen Schluffe (Ut2, Ut3) der Leitbodenart lehmiger Schluff bis Schlufflehm bei niedrigen pF-Werten ($< 2,5$) geringere Wassergehalte angenommen als bei den tonigen Lehmen (Lt2) der Leitbodenart sandiger Lehm. Nach der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Bodenkunde 1994: 297) gilt jedoch, daß bei entsprechenden Lagerungsdichten die schwach tonigen Lehme (Lt2) eine im Vergleich zu den schwach bis mittel tonigen Schluffen (Ut2, Ut3) um die Hälfte reduzierte nutzbare Feldkapazität besitzen. Hier zeigt sich offenkundig eine Schwäche der im Modell verwendeten Pedotransferfunktion.

Vergleichsweise hohe Evapotranspirationsanteile werden zudem auf den ausgedehnten Scheitelbereichen im südlichen Teil des Einzugsgebietes des Wernersbaches berechnet. Ursächlich hierfür ist eine Faktorenkombination aus Flächen geringer Hangneigung mit Böden niedriger Leitfähigkeit und einem dementsprechend großen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat.

Beim Clusteransatz bleiben die räumlichen Strukturen, die sich aufgrund der Nutzung und der Bodendifferenzierung ergeben, erhalten. Bei den Relief-Feuchte-Klassen entsteht ein im Vergleich zum ersten Regionalisierungsansatz homogeneres Bild. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Relief-Feuchte-Klasse und der Höhe des Evapotranspirationsanteils am Jahresniederschlag ist nicht feststellbar.

Oberflächenabfluß

Bei der Simulation des Oberflächenabflusses zeichnen sich in allen vier Jahren gleiche räumliche Strukturen ab. Die höchsten Abflüsse treten in den Auenbereichen auf. Diese Flächen weisen eine Faktorenkombination aus geringen Grundwasserflurabständen und hohen lateralen Wasserzuschüssen auf. Bei den Bodenarten handelt es sich um Schwemmlöhme über Bachschutt und schluffig-lehmige Kolluvien. Der dominante Nutzungstyp ist Nadelwald. Räumlich decken sich diese Bereiche im wesentlichen mit den Clustern 1 und 4, bzw. mit den Senken und den Konvergenzbereichen am Hang.

In den Teileinzugsgebieten N-Bach, Etzenbach und im östlichen Teil des unteren Wernersbaches sind die simulierten Oberflächenabflüsse mit maximal 8% am Jahresniederschlag vergleichsweise gering. Infolge der hohen Speicherkapazität der Leitbodenart sandiger Lehm wird die Aufsättigung des Bodens verzögert, so daß die Voraussetzungen für die Bildung von Oberflächenabfluß nicht gegeben sind. Hinzu kommt, daß sich für die beiden obersten Bodenkompimente aufgrund der hohen C_{org} -Gehalte von 11% der Trockensubstanz sehr große Speicher- und Leitfähigkeiten ergeben.

Ein großer Teil der Einzugsgebietsfläche weist in allen drei Gebietsdiskretisierungen einen Oberflächenabflußanteil von 0-4% am Jahresniederschlag auf. Die geringen Oberflächenabflüsse dieser Teilflächen beruhen auf Starkniederschlagsereignissen, bei denen es zur Aufsättigung der obersten Bodenkompimente kommt.

Bei den kleinsten gemeinsamen Geometrien liefern im niederschlagsarmen Jahr 1993 fast ausschließlich die Bereiche mit Auenböden größere Anteile an Oberflächenabfluß. Beim Clusteransatz werden diese räumlichen Strukturen ebenfalls wiedergegeben. Die Abweichungen bei den Relief-Feuchte-Klassen beruhen darauf, daß in erster Linie die Senken- und Konvergenzbereiche für die Oberflächenabflußbildung relevant sind. Besonders die Konvergenzbereiche ziehen sich teilweise sehr weit den Hang hinauf, woraus sich im Flächenmittel größere Grundwasserflurabstände ergeben. Damit ist die für die Bildung von Oberflächenabfluß notwendige Aufsättigung des Profils oft nicht gegeben.

Die räumliche und zeitliche Dynamik der Oberflächenabflußbildung wird in allen Gebietsdiskretisierungen nachvollzogen. Abweichungen der stärker aggregierten Ansätze im Vergleich mit den kleinsten gemeinsamen Geometrien treten zum Teil bei der Ausweisung der abflußbeitragenden Flächen auf.

Grundwasserabfluß

Hohe Grundwasserabflüsse werden in allen Jahren für die Aufforstungs- und Pflanzgartenflächen simuliert. Bedeutende Anteile liefern in gleicher Weise Flächen, auf denen kein oder kaum Oberflächenabfluß auftritt. Demgegenüber beträgt die Grundwasserneubildungsrate in den Auenbereichen weniger als 5% der Jahresniederschlagssumme.

In bezug auf die Bodenarten ergeben sich die höchsten Grundwasserabflüsse auf Flächen, die von den Leitbodenarten lehmiger Sand und sandiger Lehm eingenommen werden. Die Auensedimente (Schwemmlerme über Bachschutt und tiefgründig schluffig-lehmige Kolluvien) tragen dagegen kaum zur Grundwasserneubildung bei. Beim Gesteinsuntergrund ergeben sich die geringsten Grundwasserabflüsse für die Bereiche der schluffreichen und skelettarmen Auelehme des Quartärs. Zwischen den Paläorhyolithen und den Kreidesandsteinen sind aufgrund der geringen Unterschiede in der Durchlässigkeit (s. Anhang, Tab. 3) keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

Beim Vergleich der räumlichen Strukturen zwischen den Gebietsdiskretisierungen werden für den Clusteransatz gegenüber den Kleinsten Gemeinsamen Geometrien homogenere Strukturen herausgearbeitet. Flächen, die nutzungsbedingt hohe Grundwasserabflüsse beisteuern (Aufforstung, Baumschule) sowie Bereiche mit geringen Grundwasserabflüssen (Auen), sind in den Clustergeometrien wiederzufinden. Die flächenhafte Verteilung der Clustergeometrien, die zwischen 10 und 40% an Grundwasserabfluß vom Jahresniederschlag erzeugen, weicht in Teilbereichen von der Verteilung auf Basis der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien ab. Bei den Relief-Feuchte-Klassen zeigen sich im Prinzip die gleichen Strukturen wie beim Clusteransatz. Vereinzelt werden in den Auenbereichen allerdings höhere Grundwasserabflüsse berechnet.

Speicheränderung

Die Differenz, die aus der Niederschlagssumme abzüglich der simulierten Verdunstungs- und Abflußsumme resultiert, wird als Speicheränderung bilanziert. Ist die Bilanz positiv wird eine Rücklage gebildet, sonst findet ein Aufbrauch statt.

Für den Untersuchungszeitraum wird nur für das Jahr 1994 ein Aufbrauch je nach Gebietsdiskretisierung in Höhe von 2,2-3.6% des Jahresniederschlags simuliert. Die räumliche Diskretisierung ergibt, daß dabei auf mehr als der Hälfte des Einzugsgebietes ein Aufbrauch von bis zu 4% und mehr des Jahresniederschlags stattfindet. Auf dem Verebnungsbereich im Südwesten des Teileinzugsgebietes Triebenbach wird jedoch auch 1994 ein Rückhalt von 2 bis 4% der Jahresniederschlagssumme gebildet. Auf diesem rückhaltintensiven Bereich wird in keinem der simulierten Jahre ein Aufbrauch berechnet. Die Simulationsergebnisse auf Basis der Relief-Feuchte-Klassen spiegeln diesen Sachverhalt allerdings aufgrund der Gebietsdiskretisierung nicht eindeutig wieder.

Insgesamt ähneln sich die räumlichen Strukturen der Speicheränderung wie auch der anderen Wasserhaushaltskomponenten bei allen drei Gebietsdiskretisierungen, lediglich in Teilbereichen treten Abweichungen auf.

3.5 Vergleich mit den Verfahren und Ergebnissen der AG Peschke

Mit Anwendung der entwickelten Verfahren beider Arbeitsgruppen in einem Untersuchungsgebiet soll überprüft werden, ob die hinsichtlich der Regionalisierungsstrategie ähnlichen, jedoch methodisch unterschiedlichen Regionalisierungsansätze zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Das Einzugsgebiet des Wernersbaches bietet für einen Vergleich gute Voraussetzungen, da die Heterogenität des Gebietes eine Vielzahl von Abflußbildungsprozessen bedingt, die über langjährige Gebietskenntnisse der AG Peschke empirisch abgesichert sind.

3.5.1 Beschreibung der entwickelten Verfahren

Das Regionalisierungsziel der AG Peschke liegt in der Erfassung von Teilflächen, die durch eine bestimmte Art der Prozeßdominanz gekennzeichnet sind. Die Ausweisung der Flächen wird über ein wissenbasiertes System, dem Modell WBS FLAB, in Kombination mit dem Geographischen System ARC/INFO bewerkstelligt. Im Gegensatz zu unseren Ansätzen, die über die Aggregation von Gebietseigenschaften ein Parameterupscaling durchführen, fußt die Methodik der AG Peschke auf einem Upscaling von Prozessen. Im Regelwerk des Modells werden unter Verknüpfung verschiedener Vorgaben Flächen gleicher Prozeßdominanz ermittelt und entsprechend einer Wichtungsvorschrift aggregiert. Ausgewiesen werden Flächentypen mit Horton'schem Oberflächenabfluß, Sättigungsflächenabfluß und Zwischenabfluß (Interflow). Zusätzlich gliedert das Modell Flächen aus, auf denen überwiegend Speicherung und/oder Versickerung dominieren. Als Ergebnis des Regionalisierungsverfahrens der AG Peschke liegt letztlich eine Flächenverteilung dominanter Abflußkomponenten vor.

Demgegenüber steht der Ansatz unserer Arbeitsgruppe (s. Kap. 2), der die Aggregation von 'Hydrological Response Units' auf Grundlage charakteristischer Gebietseigenschaften zum Gegenstand der Untersuchung hat. Der prinzipielle Unterschied beider Ansätze ist in ihrer jeweiligen Methodik zu sehen. Während bei unserem Verfahren die hydrologische Flächenreaktion aus einer spezifischen Parameterkombination resultiert, ergibt sich diese bei der AG Peschke als Folge der Aggregation von Prozessen. Einen Überblick über die unterschiedlichen Verfahren gibt Tabelle 5.

Tabelle 5 : Überblick über die Verfahren der Arbeitsgruppen PESCHKE und GEROLD

	AG PESCHKE	AG GEROLD
Regionalisierungsziel	Ausweisung von Flächen gleicher Prozeßdominanz	Ausweisung von 'Hydrological Response Units'
Regionalisierungsmethode	Prozeßupscaling	Parameterupscaling
Regionalisierungsinstrumente	<ul style="list-style-type: none"> • WBS FLAB (wissenbasiertes System) • GIS ARC/INFO 	<ul style="list-style-type: none"> • WASMOD (hydrologisches Modell) • GIS ARC/INFO • SARA (System zur digitalen Reliefanalyse)
Gütekriterium	<ul style="list-style-type: none"> • Übereinstimmung von empirischer und simulierter Flächenverteilung • Plausibilität der Flächenreaktion auf Grundlage von Kenntnis der Einzel-eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Übereinstimmung von gemessener und simulierter Abflußganglinie • Plausibilität der berechneten Wasserhaushaltsgrößen
Ergebnis der Modellsimulation	<ul style="list-style-type: none"> • Flächen gleicher Prozeßdominanz 	<ul style="list-style-type: none"> • räumliche/zeitliche Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Oberflächenabfluß und Grundwasserabfluß

3.5.2 Darstellung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Eine gute Vergleichsmöglichkeit mit den Flächen gleicher Prozeßdominanz der AG Peschke bietet der Ansatz der Relief-Feuchte-Klassen. Beide Verfahren zeigen hinsichtlich ihrer Flächeneinteilung ähnliche Strukturen. So entsprechen die Sättigungsflächen und bedingt die Zwischenabflußflächen des WBS FLAB in Grundzügen den Senken- und Konvergenzbereichen der Relief-Feuchte-Klassen. In gleicher Weise korrespondieren die Speicher- und Versickerungsflächen mit den Scheitel- bzw. Divergenz- und Intermediärbereichen.

Ein grundsätzliches Problem bei der Gegenüberstellung der simulierten Wasserhaushaltskomponenten zu den Flächentypen des WBS FLAB ist die fehlende Berechnung des Zwischenabflusses bei WASMOD. Weiterhin kann das Modell WASMOD nicht zwischen den Oberflächenabflußarten des Horton'schen Oberflächenabflusses und des Sättigungsflächenabflusses bilanzieren, obwohl beide Bildungsmechanismen möglich sind. Der Horton'sche Oberflächenabfluß wird bei Überschreiten der Infiltrationskapazität und der daraus folgenden lateralen Verlagerung des Überschußwassers gebildet. Auf der nächsten hangabwärts gerichteten Fläche kann das Überschußwasser reinfiltrieren oder - je nach Sättigung des Oberbodens und der Infiltrationskapazität - an die nächste Fläche weiter gegeben werden. Dagegen kann es in den Auenbereichen aufgrund der hohen Grundwasserstände zur Aufsättigung über das gesamte Profil kommen. Hier entsteht dann Sättigungsflächenabfluß, der im Modell ebenso als Oberflächenabfluß ausgewiesen wird.

Bei Betrachtung der simulierten Jahressummen der Relief-Feuchte-Klassen kongruieren die Bereiche mit sehr hohen Oberflächenabflußanteilen überwiegend mit den Flächen, auf denen das WBS FLAB Sättigungsflächenabfluß als dominanten Prozeß ausweist. In feuchten Jahren (1995) zeigen zusätzlich die Bereiche mit mittleren Oberflächenabflußanteilen Analogien zu den Flächen mit überwiegend Zwischenabfluß. Ein Vergleich der Grundwasserneubildung bei WASMOD, die im wesentlichen über die Gebirgsdurchlässigkeit determiniert ist, mit den Versickerungsflächen des WBS FLAB ist nur eingeschränkt möglich, da hier ausschließlich den Leitfähigkeiten der Böden Rechnung getragen wird. Die von WASMOD ausgewiesenen Flächen mit sehr hoher Evapotranspiration weisen eine strukturelle Ähnlichkeit zu den Speicherflächen mit vorwiegender Ausschöpfung durch Verdunstung auf. Ein direkter Vergleich ist jedoch fragwürdig, da die Unterschiede innerhalb der Relief-Feuchte-Klassen zu gering sind, als daß von einer eindeutigen Differenzierung ausgegangen werden könnte. Zudem stellt sich bei WASMOD das Problem, daß die im Modell integrierte Pedotransferfunktion bei sandigen Lehmen zu hohe Wassergehalte ableitet und in diesen Bereichen die Transpirationsbeträge entsprechend überschätzt werden.

Da der Methodenvergleich auf Jahresbilanzebene nur eine eingeschränkte Aussagekraft zuläßt, werden nachfolgend Einzelereignisse betrachtet.

3.5.3 Betrachtung von Einzelereignissen

Gerade die Bildung schneller Abflußkomponenten wird neben den Gebietseigenschaften in besonderem Maße über den aktuellen Zustand des Gebietes und die Niederschlagscharakteristik bestimmt. Dementsprechend finden sich im Verlauf eines Jahres unterschiedliche Verteilungen der abflußbeitragenden Flächen infolge von Änderungen der maßgebenden Einflußfaktoren. Die Struktur des WBS FLAB sieht eine Differenzierung bezüglich potentieller Abflußbeitragsflächen für feuchte respektive trockene Gebietszustände vor. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, einen direkten Vergleich beider Ansätze über die Flächenreaktionen bei unterschiedlichen Gebietsfeuchten vorzunehmen.

Während der knapp einmonatigen Niederschlagsperiode vom 27.05.95 - 25.06.95 fielen große Niederschlagsmengen meist mittlerer bis hoher Intensität auf ein schon relativ feuchtes Einzugsgebiet. Kontinuierliche Regenfälle in Verbindung mit einer hohen Initialfeuchte führten im genannten Zeitraum zu extremen Abflußereignissen. Die steuernden Einflußgrößen hinsichtlich der Gebietsreaktion sind bei derartigen Ereignissen im wesentlichen der Auffeuchtungsgrad und die Niederschlagscharakteristik, während die gebietspezifischen Faktoren stärker in den Hintergrund treten. Demgegenüber steht als Vergleich die hypothetische Flächenverteilung des WBS FLAB bei feuchtem Gebietszustand (25mm/5h). In diesem Fall simuliert das WBS FLAB eine mittlere bis maximale Verteilung der schnell und intensiv abflußbeitragenden Flächen.

Die Relief-Feuchte-Klassen zeigen von der Gebietsreaktion her ein ähnliches Verhalten. Die potentiellen Sättigungsflächen beschränken sich vor allem auf die vorfluternahen Bereiche mit geringen Grundwasserflurabständen. Diese Reaktion kommt bei der WASMOD-Simulation über sehr hohe Oberflächenabflüsse in den Senken- und Konvergenzbereichen zum Ausdruck. Bereiche, in denen WASMOD mittlere bis hohe Oberflächenabflüsse simuliert, interpretiert das WBS FLAB vielfach als Flächen mit vorwiegend Zwischenabfluß. Vor dem Hintergrund einer detaillierten, empirischen Gebietskenntnis können diese von WASMOD ausgewiesenen Bereiche zu einem Großteil als hypodermischer Abfluß gedeutet werden. Obwohl diese Komponente bei WASMOD keine Umsetzung findet, ist erkennbar, daß sich bei beiden Verfahren der Arbeitsgruppen die potentiell abflußwirksamen Bereiche in wesentlichen Zügen decken. Parallelitäten zeigen darüberhinaus die Bereiche, in denen aufgrund geringer Hangneigungen vertikaler Feuchteaustausch der dominante Prozess ist.

Weniger eindeutig stellt sich die Situation bei weithin trockenem Gebietszustand dar. Zum Vergleich wurde ein knapp zweiwöchiger Zeitraum vom 31.08.95 - 11.09.95 gewählt, in dem Niederschlag hoher Intensität auf ein relativ trockenes Einzugsgebiet fiel. Nahezu 96% der eingetragenen Menge sind auf zwei extreme Niederschlagsereignisse in den ersten zwei Tagen zurückzuführen. Bei geringer Vorfeuchte entscheiden dabei in zunehmendem Maße die Gebietseigenschaften über die Art der Abflußbildung.

Im konkreten Fall zeigen sich bei der WASMOD-Simulation hohe Oberflächenabflüsse sowohl auf Flächen mit starker Hangneigung als auch auf Flächen, deren Bodenzusammensetzung durch einen hohen Schluffanteil gekennzeichnet ist. Offensichtliche Sättigungsflächen, wie sie bei mehr oder weniger feuchtem Gebietszustand in den Senken- und Konvergenzbereichen zu beobachten sind, treten hier nicht in dem Ausmaß zutage. Hohe Oberflächenabflüsse, vor allem in Teilbereichen des unteren Wernersbaches, sind nach Aussage der AG Peschke überwiegend als Zwischenabfluß zu interpretieren.

Die WBS FLAB Simulation (50mm/5h) zeigt bei Gebietszuständen geringer Vorfeuchte teilweise eine abweichende Gebietsreaktion, auch wenn von der Hypothese ausgegangen wird, daß es sich bei den von WASMOD simulierten Oberflächenabflüssen zu einem großen Teil um Zwischenabfluß handelt. Danach beschränken sich die schnell und intensiv abflußbeitragenden Areale auf das Wegenetz (Horton'scher Oberflächenabfluß), den Sättigungsflächenabfluß der bachnahen Flächen und auf Flächen mit vornehmlich Zwischenabfluß. Die hohen Oberflächenabflüsse (>45mm) der WASMOD-Simulation werden bei trockenen Gebietszuständen im WBS FLAB überwiegend als Flächen mit Speicherung nahezu ohne Versickerung und Versickerung mit temporären Stauerscheinungen ausgewiesen.

Schwierigkeiten bestehen bei der WASMOD-Simulation im nordöstlichen Bereich des Einzugsgebietes, wo modellbedingt deutlich zu hohe Oberflächenabflüsse simuliert werden. Ursache hierfür sind die fehlerhaft berechneten bodenphysikalischen Eigenschaften der Bodenart sandiger Lehm (s. Kap. 3.4.3), die bei einem derartigen Niederschlagsereignis eine schnelle Aufsättigung der obersten Bodenkompimente zur Folge haben.

3.6 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Nach Aussage der AG Peschke ist das WBS FLAB in der Lage, über die Simulation von Flächen dominanter Prozeßbildung die beobachtete Gebietsreaktion real abzubilden. Damit wäre vor dem Hintergrund weiterführender Untersuchungen die Basis für eine gebietsdifferenzierte hydrologische Modellierung geschaffen. Die Ausweisung abflußbeitragender Flächen auf Grundlage der WASMOD-Simulation kann nur unter Vorbehalt betrachtet werden, da die Modellformulierung hinsichtlich der Bildung schneller Abflußkomponenten ausschließlich eine Bilanzierung des Oberflächenabflusses vorsieht. Dabei werden die absoluten Werte des Oberflächenabflusses vor allem bei hohen Niederschlagsintensitäten und -summen wegen der fehlenden Berechnung des Zwischenabflusses vom Modell häufig überschätzt. Dennoch läßt sich die Dynamik der Abflußbildung in Abhängigkeit von der Niederschlagscharakteristik und der Gebietsfeuchte gleichwohl gebietsdifferenziert über die Ergebnisse der WASMOD-Simulation erkennen.

Eindeutigere Ergebnisse hinsichtlich der Darstellung von Abflußbeitragsflächen liefert das Verfahren der AG Peschke. Dennoch zeigen beide Flächenverteilungen in weiten Teilen Parallelitäten auf, wenn auch der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen beider Verfahren nicht immer klar abgrenzbar ist. Deutlich wird sowohl die Abhängigkeit der Gebietsreaktion von der Vorfeuchte bzw. dem Auffeuchtungsverlauf als auch von den Gebietseigenschaften. Hohe Niederschlagsintensitäten sind potentiell Auslöser schneller Abflußkomponenten insbesondere auf fast gesättigten und gering durchlässigen Böden. Sättigungsflächen sind bei beiden Verfahren überwiegend in den grundwasserbeeinflussten Auenbereichen (Senken- und Konvergenzbereiche) lokalisiert. Bei trockenen Gebietszuständen und hohen Niederschlagsintensitäten werden mit dem Modell WASMOD verbreitete Oberflächenabflüsse simuliert. Das WBS FLAB weist dagegen deutlich weniger Flächen aus, auf denen Horton'scher Oberflächenabfluß, Sättigungsflächenabfluß oder Zwischenabfluß die dominante Abflußkomponente darstellen.

Vor dem Hintergrund einer sehr guten empirischen Gebietskenntnis läßt sich festhalten, daß die entwickelten Verfahren der Arbeitsgruppen in Ansätzen zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Abweichende Ergebnisse in der gebietsdifferenzierten Prozeßinterpretation bedürfen jedoch der weiteren Diskussion zwischen den Arbeitsgruppen.

4. Anwendung der Regionalisierungsansätze im Zielgebiet der oberen Leine

Mit der Übertragung der entwickelten Regionalisierungsansätze auf das Zielgebiet der oberen Leine wird die gebiets- und skalenunabhängige Anwendbarkeit der Methodik überprüft. Die Größe des Zielgebietes setzt voraus, daß die benötigten Modellparameter aus allgemein verfügbaren Gebietsinformationen zu Relief, Nutzung, Boden und Geologie abgeleitet werden können. Mit der nachfolgenden Beschreibung des Untersuchungsgebietes wird das Einzugsgebiet der oberen Leine kurz in seinen wesentlichen Grundzügen charakterisiert und die verwendete Datengrundlage erläutert.

4.1 Gebietsbeschreibung und Datengrundlage

Lage, naturräumliche Einordnung und Relief

Das Zielgebiet der Leine oberhalb des Pegels Leineturm umfaßt eine Fläche von 992 km². Das Einzugsgebiet wird durch die Schichtstufenlandschaft des südniedersächsischen Berglandes geprägt, in die der Leinetalgraben eingebettet ist (vgl. Topographische Karte 1:100.000, Regionalkarte 15, Leinetal). Mit Höhen von 123m ü.NN bis 515m ü.NN weist das Zielgebiet eine relativ hohe Reliefenergie auf. Besonders im Oberlauf der Leine und an den Grabenrändern treten teilweise größere Hangneigungen auf. Der Leinetalgraben dagegen ist nur schwach reliefiert und aufgrund seines tektonischen Ursprungs bis auf den Oberlauf als breite Talaue angelegt.

Geologie, Boden, Nutzung

Im Untersuchungsgebiet finden sich überwiegend mesozoische Festgesteine (s. Anhang Tabelle A4). Diese Gruppe umfaßt im wesentlichen triassische Sedimente, die zusammen etwa drei Viertel der Einzugsgebietsfläche ausmachen. Der mittlere Buntsandstein ist bei Mächtigkeiten zwischen 200 bis über 400m vorwiegend sandig ausgebildet, während sich der etwa 150m mächtige obere Buntsandstein (Röt) weitgehend aus tonigen Ablagerungen zusammensetzt.

Der Muschelkalk erreicht insgesamt Mächtigkeiten von etwa 200m. Der Untere Muschelkalk besteht vorwiegend aus Mergelkalken, während der Mittlere Muschelkalk primär mergelig-tonig bis tonig-dolomitsch ausgebildet ist. Der Obere Muschelkalk besteht überwiegend aus körnigen Kalken und Mergelsteinen. Wegen ihrer Härte treten die bankig ausgebildeten Ceratiten- und

Trochitenschichten des Oberen Muschelkalks ebenso wie der Wellenkalk des Unteren Muschelkalks als Schichtstufenbildner in Erscheinung.

Die Gesteine des Keupers bestehen in den unteren und oberen Schichten vor allem aus tonig-sandigen Sedimenten, während die zwischengelagerten Ton- und Mergelsteine dem Mittleren Keuper angehören. Die Mächtigkeiten der Keupersedimente schwanken zwischen 250 bis über 350m. Gesteine des Jura und Tertiär finden im Einzugsgebiet nur geringe Verbreitung (Niedersächsisches Umwelt-Ministerium 1993).

Im gesamten Untersuchungsgebiet werden die Gesteinsschichten an flachen Hängen und besonders im Bereich des Leinetalgrabens von quartären Lockergesteinen unterschiedlicher Mächtigkeiten überdeckt. Zu nennen wären insbesondere sandig/kiesige Flußsedimente, Geschiebelehme, Fließerden, Auenlehme und der zu Lößlehm verwitterte Löß. Die Mächtigkeiten der Lößablagerungen betragen im Mittel 1-3m, gebietsweise bis zu 6m (Seedorf & Meyer 1992).

Die Bodentypen des Zielgebietes sind in Abhängigkeit von ihrem Ausgangssubstrat im wesentlichen durch drei übergeordnete Bodengesellschaften charakterisiert: Löß-, Sandstein- und Karbonatverwitterungsböden (s. Anhang Tabelle A4). Bei den Böden über Löß handelt es sich um Parabraunerden und Schwarzerden, die bei dichter Lagerung des Lösses oder tonigem Untergrund in Pseudogleye und Gleye übergehen. Schwarzerden finden sich nur noch sporadisch. Die Lessivierung und die damit verbundene relative Anreicherung von Schluff im Oberboden der Parabraunerden führt zu Verschlammung und Erosion, so daß besonders im Bereich der Hangfüße Kolluvien ausgebildet sind.

In den Kalksteinhochlagen sind flachgründige, stark steinige Rendzinen der vorherrschende Bodentyp. An flacher geneigten Unterhängen gehen diese in lehmige, oft tiefgründige Braunerden über. Braunerden finden sich darüberhinaus in verschiedenster Ausprägung als silikatische Verwitterungsprodukte des Buntsandsteins oft in enger Vergesellschaftung mit Rankern oder in deren Übergangsform zum Pseudogley. Über reinen Tonsteinen oder bei sehr hohen Tongehalten haben sich in Unterhanglagen Pelosole entwickelt. Im Leinetal und in deren Nebentälern sind tonige und schluffige, in Flußnähe oft kalkhaltige Auenböden entstanden (Niedersächsisches Umwelt-Ministerium 1993).

Aus bodenhydrologischer Sicht weisen die flachgründigen Rendzinen neben den Rankern die ungünstigsten Eigenschaften auf, so daß diese Flächen überwiegend mit Wald bestanden sind. Innerhalb dieser nehmen Laubwälder den größten Flächenanteil im Einzugsgebiet der oberen Leine ein (s. Anhang Tabelle A4). Bei den Beständen handelt es sich fast ausschließlich um Buchenreinbestände, die auf den Kalksteinhöhenzügen vereinzelt mit Esche, Ulme, Berg- und Spitzahorn vergesellschaftet sind. In diesen Bereichen findet sich zudem eine stark entwickelte Krautschicht, die wiederum in den Sandsteinbuchenwäldern nur spärlich ausgebildet ist. Die

nährstoffarmen Ranker der Sandsteinhöhenzüge sind zudem vielfach mit Nadelhölzern, in der Hauptsache mit Fichte, vereinzelt auch mit Kiefer und Lärche bestanden. Die Talbereiche und flachen Hangpartien unterliegen fast ausschließlich der Ackernutzung. Grünlandflächen sind überwiegend auf tonige, schwer bearbeitbare Böden beschränkt. Insgesamt handelt es sich beim Einzugsgebiet der oberen Leine aufgrund der wertvollen Lößlehmböden um einen intensiv bewirtschafteten Agrarraum. (Seedorf & Meyer 1992).

Klima

Für das Einzugsgebiet der oberen Leine wurde zur Erstellung von Klimaszenarien auf meteorologische Daten von 16 ausgewählten Meßstellen, überwiegend des Deutschen Wetterdienstes, zurückgegriffen. Die mittlere potentielle Verdunstung wird auf Grundlage der Meßperiode von 1951-1965 für die obere Leine mit 450 bis 550mm pro Jahr angegeben (Niedersächsisches Umwelt-Ministerium 1993). Das Jahresmittel der Lufttemperatur liegt zwischen 8° und 9°C, wobei der Januar mit durchschnittlichen Tagesmittelwerten von -2° bis 0°C der kälteste und der Juli mit im Mittel zwischen 15° bis 17°C der wärmste Monat des Jahres ist (Seedorf & Meyer 1992).

Die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen liegen überwiegend zwischen 600 und 800mm (Zeitraum 1931-1960). Im jahreszeitlichen Verlauf weisen die monatlichen Niederschlagshöhen ein deutliches Maximum in den Monaten Juni bis August auf. Die Niederschläge sind in dieser Zeit hauptsächlich konvektiver Entstehung. Mit zunehmender Höhenlage konzentriert sich das Regenmaxima in den Wintermonaten. Die geringsten Niederschläge fallen in den Monaten Februar und März sowie im Oktober (Niedersächsisches Umwelt-Ministerium 1993).

4.2 Aggregierung zu Hydrological Response Units

In Analogie zur Vorgehensweise im Testgebiet Wernersbach wurden im Zielgebiet der oberen Leine die Flächen homogener Gebietsausstattung ausgewiesen und parametrisiert. Aufgrund der Gebietsgröße und der Zielvorgaben des Schwerpunktprogrammes wurden die Modellparameter aus allgemein verfügbaren Gebietsinformationen zu Boden, Geologie, Nutzung und Relief abgeleitet. Folgende Datengrundlage und Datenquelle wurde verwendet:

- Bodenübersichtskarten Maßstab 1:50.000 und 1:200.000 des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung

- Bodengeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:100.000 der Thüringer Landesanstalt für Geologie
- Karte der Lithofaziesseinheiten der AG Schwarze
- Überwachte Landnutzungsklassifikation LANDSAT – TM Daten (1993)
- Digitales Geländemodell des Amtes für Militärisches Geowesen, 30m Rasterweite

Kleinste Gemeinsame Geometrien und Clusteranalyse

Die Verschneidung der Basisinformationen zu den Flächen der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien ergibt ein Flächenmosaik von über zehntausend Einzelpolygonen. Durch die Eliminierung der Sliverpolygone reduziert sich die Gesamtzahl auf rund 5000 Flächen. Damit stellt sich die Problematik, daß aufgrund der großen Flächenanzahl der Zeitaufwand von mehreren Tagen für eine Modellrechnung nicht akzeptabel ist. Entgegen der in den Testgebieten entwickelten Vorgehensweise muß für die obere Leine eine weitere Flächenaggregation erfolgen. Indem schrittweise alle Polygone mit einer Flächengröße bis zu 500.000 m² (= 0.05% der Gesamtfläche) in das Nachbarpolygon mit der längsten gemeinsamen Grenze integriert wurden, konnte die Anzahl der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien auf 737 Einzelflächen verringert werden. Die mit der notwendigen Aggregation verbundene Generalisierung der Gebietsinformationen hat keine signifikanten Veränderungen der Gebietseigenschaften zur Folge (s. Anhang, Tabelle A4). Das Ziel der Aggregation wurde mit einer Verringerung der Rechenzeit auf unter einen Tag pro Simulation erreicht.

Die Simulationsergebnisse für das Jahr 1986 dienten als Eingangsgrößen für die Clusteranalyse. Anhand des Elbow-Kriteriums wurden sechs Cluster ausgewiesen und damit die Geometrien der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien zu insgesamt 401 Flächen mit ähnlichem Wasserumsatz zusammengefaßt. Die Bezugsgeometrien der Clusteranalyse wurden mit Hilfe von ARC/INFO erstellt. Die Zuweisung der Modellparameter zu den HRU's erfolgte wie in den Testgebieten flächengewichtet.

Relief-Feuchte-Klassen

Auf Basis des MilGeo-Datensatzes wurden mit dem Programmsystem SARA die flächenhaften Reliefeinheiten der Senken-, Konvergenz-, Divergenz- und Scheitelbereiche berechnet. Die Geometrien der Relief-Feuchte-Klassen wurden unter Zuhilfenahme von ARC/INFO im Sinne der HRU's aggregiert. Um eine eindeutige Entwässerungsrichtung der oftmals weitläufigen und langgestreckten Flächen zu ermöglichen, wurden die ausgewiesenen Reliefeinheiten durch Teileinzugsgebiete untergliedert. Nach der Eliminierung der Sliverpolygone beträgt die Gesamtanzahl der HRU's 740 Einzelflächen.

Die für beide Ansätze vorgenommene flächengewichtete Zuweisung von Geoinformationen läßt im Vergleich mit der ursprünglichen Verteilung relativ geringe Unterschiede erkennen (s. Anhang, Tabelle A4). Allerdings ist zu beobachten, daß bereits dominante Strukturen verstärkt herausgearbeitet werden. So nehmen beispielsweise die Ackerflächen bei den Bezugsgeometrien der Relief-Feuchte-Klassen und der Clusteranalyse auf Kosten der übrigen Landnutzungsklassen zu. Grünflächen werden durch die Aggregation fast vollständig verdrängt.

4.3 Parametrisierung pedohydrologischer Kennwerte

Zur Parametrisierung der pedologischen Kennwerte kann auf verschiedene digitale Kartenwerke zugegriffen werden. Die Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 erfüllt nicht die Anforderungen, da für die ausgewiesenen Bodeneinheiten wichtige pedologische Kennwerte fehlen bzw. nicht abgeleitet werden können. Anders verhält es sich mit den Bodenübersichtskarten des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung im Maßstab 1:200.000 und 1:50.000. Beide Kartenwerke haben jedoch den Nachteil, daß die Landesgrenze gleichzeitig auch die Begrenzung der kartierten Bodentypen darstellt. Für den Thüringer Bereich des Einzugsgebietes der oberen Leine, der immerhin rund ein Drittel des Untersuchungsgebietes umfaßt, wurde von der Thüringer Landesanstalt für Geologie die Bodengeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:100.000 in digitaler Form überlassen.

Aufgrund der abweichenden Terminologie mußte eine Angleichung der verschiedenen Bodenübersichtskarten durchgeführt werden. Nach eingehender Prüfung der Kartenwerke erwies sich die Anpassung der Leitbodenkarte Thüringens an die Bodenübersichtskarte des Landes Niedersachsen (BÜK50) als gangbarer Weg. In einem ersten Schritt wurden die Leitbodenformen der Thüringer Karte aufgrund vergleichbarer geologischer Ausgangssubstrate und ähnlicher Substratzusammensetzung zusammengefaßt. So entfallen von den ursprünglich 29 Bodeneinheiten der Thüringer Bodenkarte insgesamt 17 Leitbodenformen, so daß abschließend die verbleibenden 12 Bodeneinheiten mit den Leitprofilen der BÜK50 verknüpft werden konnten.

Die Geologische Karte im Maßstab 1:1.000.000 wurde von der Arbeitsgruppe Schwarze auf Plausibilität überprüft. Als überarbeitetes Kartenwerk wurde die flächenhafte Ausweisung von Lithofaziseinheiten den Arbeitsgruppen des SPP zur Verfügung gestellt. Die vergleichende Betrachtung der geologischen Karte und der Lithofazieskarte mit der Bodenübersichtskarte verdeutlicht, daß zwischen den beiden letztgenannten flächenhaft ähnliche Strukturen auftreten. Da die Unterschiede zwischen den Lithofaziseinheiten maßgeblich die hydrogeologischen Eigenschaften beschreiben, wurde diese Einteilung für die Parametrisierung des Gesteinsuntergrundes gewählt.

Die Leitprofile der BÜK50 enthalten unter anderem Angaben zur horizontbezogenen Bodenart, Mächtigkeit, Lagerungsdichte, C_{org} - und Skelettgehalt. Mit Hilfe der NIBIS-Methodenbank (Müller et al. 1992) wurden für die Profilbodenarten die Ton- und Schluffgehalte nach der Verknüpfungsregel 1.1 abgeleitet. Weiterhin wurde nach Regel 1.11 in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte für jede Bodenart die gesättigte Leitfähigkeit ermittelt. Da sowohl für die Texturgehalte als auch für die kf-Werte jeweils Spannweiten genannt werden, wurde einheitlich mit den Mittelwerten gerechnet. Eine Ausnahme bilden nur die Böden (Bodenhorizonte) mit hohen Skelettgehalten (> 40%), die mit dem Maximalwert der gesättigten Leitfähigkeit versehen wurden. Diese Vorgehensweise führte bereits in den Testgebieten zu verbesserten Simulationsergebnissen. Die Zuweisung und Ableitung der pedohydrologischen Modellparameter im Zielgebiet der oberen Leine ist eindeutig. Die Modellvalidierung beschränkt sich damit auf die Ableitung der hydrogeologischen Kennwerte, was in erster Linie die Gesteinsdurchlässigkeiten betrifft.

Für die ausgewiesenen Lithofaziesseinheiten konnte die Arbeitsgruppe Schwarze keine Durchlässigkeitsbeiwerte angeben. Hier stehen nur allgemeine Angaben aus der Literatur zur Verfügung, die teilweise große Schwankungsbreiten von mehreren Zehnerpotenzen für eine hydrogeologische Einheit nennen. Die Literaturwerte können folglich nur einen ersten Anhaltspunkt für die Wahl der Gesteinsdurchlässigkeit geben. Die Kalibrierung der Gesteinsdurchlässigkeiten wurde zur Vermeidung von Parameterinteraktionen schrittweise durchgeführt, indem jeweils die Durchlässigkeit einer geologischen Einheit pro Testlauf verändert wurde. Mit den in Tabelle 6 aufgelisteten Durchlässigkeitsbeiwerten wurden im Laufe der Modellkalibrierung die besten Simulationsergebnisse erzielt. Diese Kf-Werte bilden die Grundlage sämtlicher Modellsimulationen der untersuchten Gebietsdiskretisierungen.

Tabelle 6: Verwendete Gesteinsdurchlässigkeiten im Zielgebiet (Schwarze et al. 1996)

Lithofaziesseinheit	Kf-Wert (cm/Tag)	Kf-Wert (m/sec)
Rezente Bildung	50	$5,8 \cdot 10^{-6}$
Löß	50	$5,8 \cdot 10^{-6}$
Buntsandstein	25	$2,9 \cdot 10^{-6}$
Kalkstein	75	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Schluff- Tonstein	10	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Känozoikum,	10	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Känozoikum, sandig/kiesig	100	$1,2 \cdot 10^{-5}$

4.4 Modellvalidierung

Als Grundlage für die Modellvalidierung im Zielgebiet der oberen Leine wurden die gemessenen Tagesabflüsse am Pegel Leineturm herangezogen. Gemessene Bodenfeuchteverläufe einzelner Standorte standen nicht zur Verfügung. Als weiteres Kriterium zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wurde die allgemeine Wasserhaushaltsbilanz für das Einzugsgebiet der oberen Leine berücksichtigt (Niedersächsisches Umweltministerium, 1993). Der Simulationszeitraum umfaßt die Jahre 1985 bis 1993, das Jahr 1984 diente als Vorlaufphase. Die Modellvalidierung wurde auf Grundlage der Ausgangsdiskretisierung für das Jahr 1985 durchgeführt und anhand der folgenden Jahre überprüft.

Abflußverhalten

Die simulierte Abflußganglinie der Jahre 1985 bis 1993 spiegelt in wesentlichen Grundzügen die gemessene Abflußkurve am Pegel Leineturm wieder (s. Abb. 6a bis 6c). Die auf Basis der Tageswerte berechneten Korrelationskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße untermauern den visuellen Eindruck einer guten Modellkalibrierung. Die Güte der Simulation kommt durch den mittleren Korrelationskoeffizienten von 0.79 und das mittlere Bestimmtheitsmaß von 0.63 zum Ausdruck (s. Anhang, Tab. A5). Nur das Jahr 1985 fällt mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.52 und einem Bestimmtheitsmaß von 0.27 aus dem Rahmen, obwohl der optische Vergleich dies nicht unbedingt erwarten läßt. Der Grund für die negativ abweichenden Güteindizes ist in der überdurchschnittlich hohen Anzahl kleinerer und mittlerer Abflußereignisse zu sehen, die vom Modell sowohl über- als auch unterschätzt werden (s. Abb. 6a).

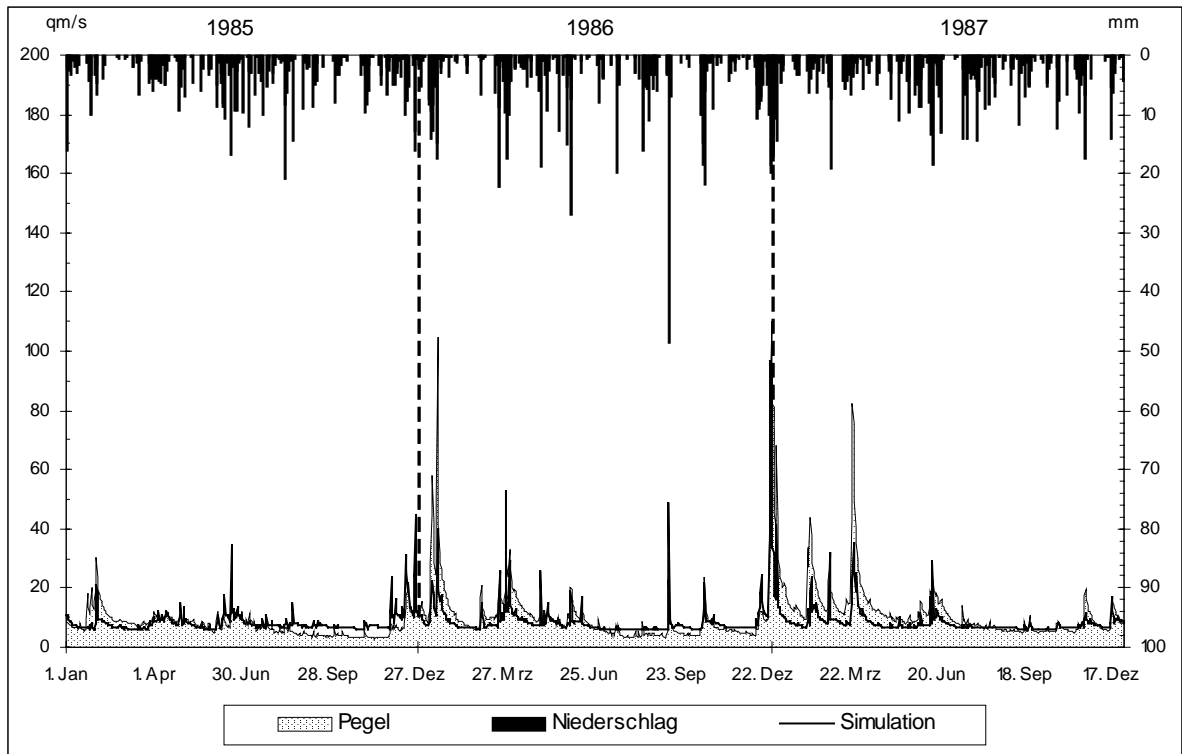


Abbildung 6a: Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Jahre 1985 bis 1987

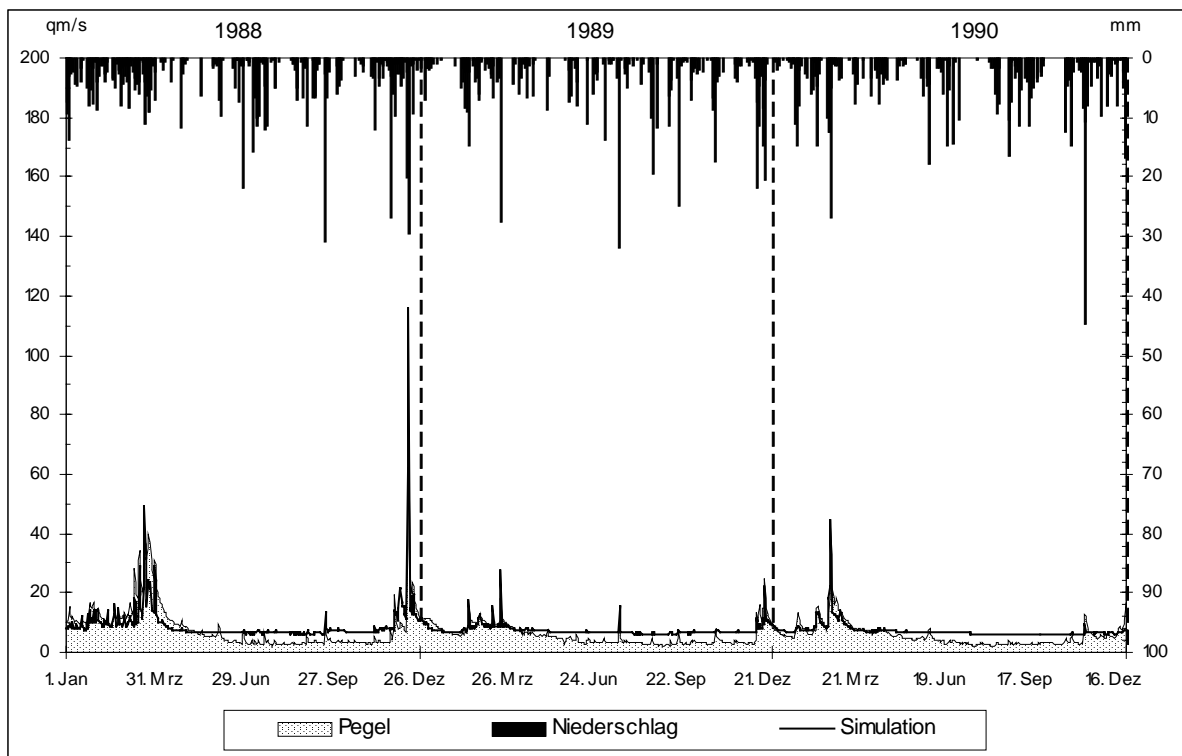


Abbildung 6b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Jahre 1988 bis 1990

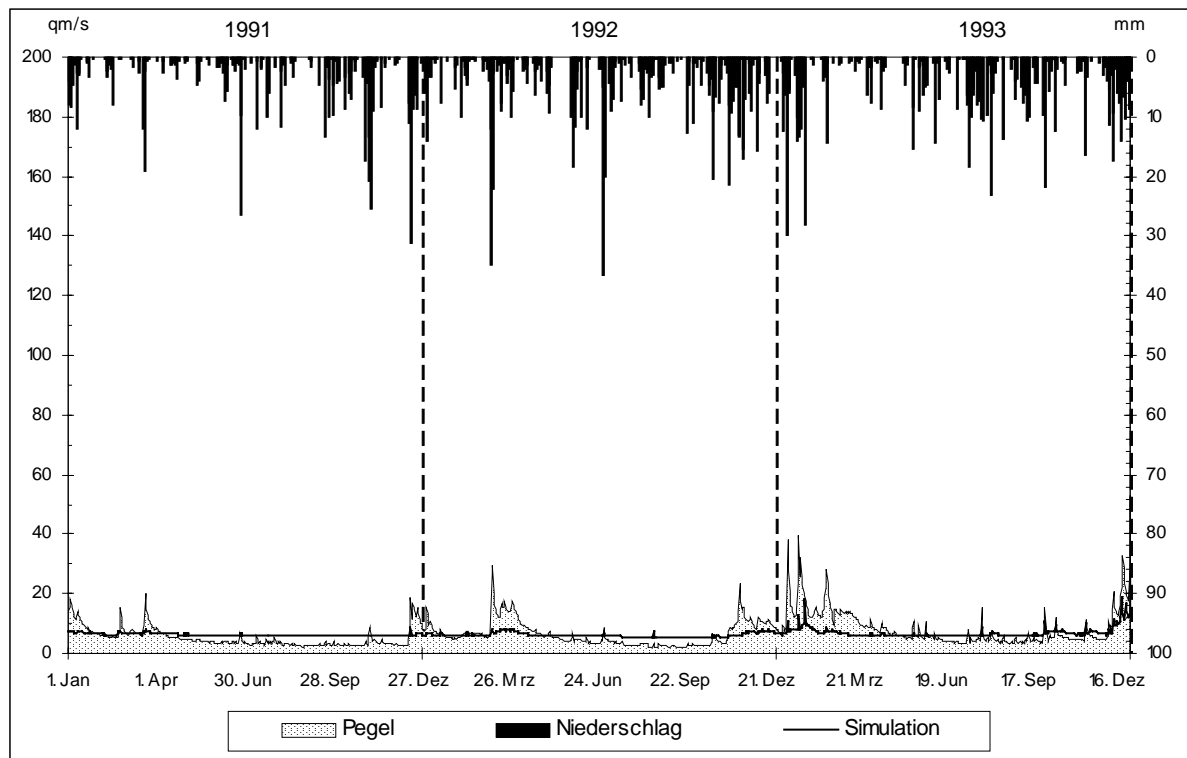


Abbildung 6c: Gemessene und simulierte Abflußganglinie für die Jahre 1991 bis 1993

Insgesamt treten bei der Abflußsimulation im Zielgebiet die gleichen Probleme und Schwächen auf, wie sie bereits in den verschiedenen Testgebieten zu beobachten ist. Einzelereignisse werden teilweise in ihrer Abflußspitze deutlich zu hoch simuliert, während die Rückgangslinie gegenüber den realen Verhältnissen zu schnell abfällt. Weiterhin werden trotz des implementierten Schneemoduls nicht alle Hochwasserereignisse im Winter in zeitlicher Übereinstimmung abgebildet. Schließlich wird während ausgeprägter Trockenperioden im Sommerhalbjahr das Basisabflußniveau nicht erreicht. Die in allen Untersuchungsgebieten auftretenden fehlerhaften Simulationssequenzen können weitgehend auf Modellschwächen zurückgeführt werden. In Anbetracht der Zielsetzung langfristige Wasserflüsse nachzubilden, können die Simulationsergebnisse als gelungen bewertet werden.

Wasserhaushalt

Im wasserwirtschaftlichen Rahmenplan für die obere Leine (bis Pegel Nörten-Hardenberg) wird für das dreißigjährige Mittel (1931 – 1960) ein Gebietsniederschlag von 678 mm angegeben (Niedersächsisches Umweltministerium 1993). Während des Simulationszeitraumes von 1985 bis 1993 beträgt die mittlere jährliche Niederschlagshöhe 702 mm. Davon verdunsten im Mittel 62.3% (437 mm) und 34.3% (241 mm) werden als Oberflächenabfluß und Grundwasserneubildung in die Vorfluter abgegeben. Die restlichen 3.3% (23 mm) werden als Rücklage bilanziert (s. Tab. 7b). Für

das dreißigjährige Mittel ergibt die klimatische Wasserbilanz eine Verdunstungsrate von 62.0% (420 mm) und einen Abfluß von 38% (258 mm). Damit wird eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Wasserbilanzen erzielt. Inwieweit die regional differenzierte Betrachtung der simulierten Wasserbilanzen plausible Ergebnisse liefert, wird nachfolgend untersucht.

4.5 Ergebnisse der Modellsimulation

Ausgehend von einer gelungenen Modellkalibrierung im Zielgebiet der oberen Leine schließt sich die Untersuchung des Abflußverhaltens und der gebietsdifferenzierten Wasserumsätze der Clusteranalyse und der Relief-Feuchte-Klassen an. Dabei werden die wesentlichen Charakteristika herausgearbeitet und näher betrachtet.

4.5.1 Abflußverhalten

Die zeitliche Dynamik der Abflußbildung wird bei den Aggregationen der Clusteranalyse (s. Anhang, Abb. 1a bis 1c) und der Relief-Feuchte-Klassen in seinen wesentlichen Grundzügen erfaßt (s. Abb. 7a bis 7c). Modellbedingte Fehlinterpretationen des Abflußverhaltens können auf die bereits im Kapitel zur Modellvalidierung (s. Kap. 3.3 und 4.3) genannten Gründe zurückgeführt werden.

Im Vergleich mit den Simulationsergebnissen der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien ist zu beobachten, daß während des gesamten Untersuchungszeitraumes die Hochwasserereignisse sowohl bei der Simulation auf Grundlage der Clusteranalyse als auch der Relief-Feuchte-Klassen deutlich besser abgebildet werden. Welcher Einfluß infolge der veränderten Bezugsgeometrien den pedohydrologischen Modellparametern und/oder den Reliefparametern für die Abnahme der Oberflächenabflüsse zukommt, ist letztendlich nicht eindeutig zu quantifizieren. Die Verschiebung der Flächenanteile zu Gunsten von Böden mit einer höheren Speicherfähigkeit (Braunerden) kann nur als eine Ursache für die Reduzierung der Oberflächenabflußbildung angesehen werden (s. Anhang, Tab. A4). Erst die gebietsdifferenzierte Betrachtung der Wasserflüsse erlaubt eventuell weitere Erklärungsansätze.

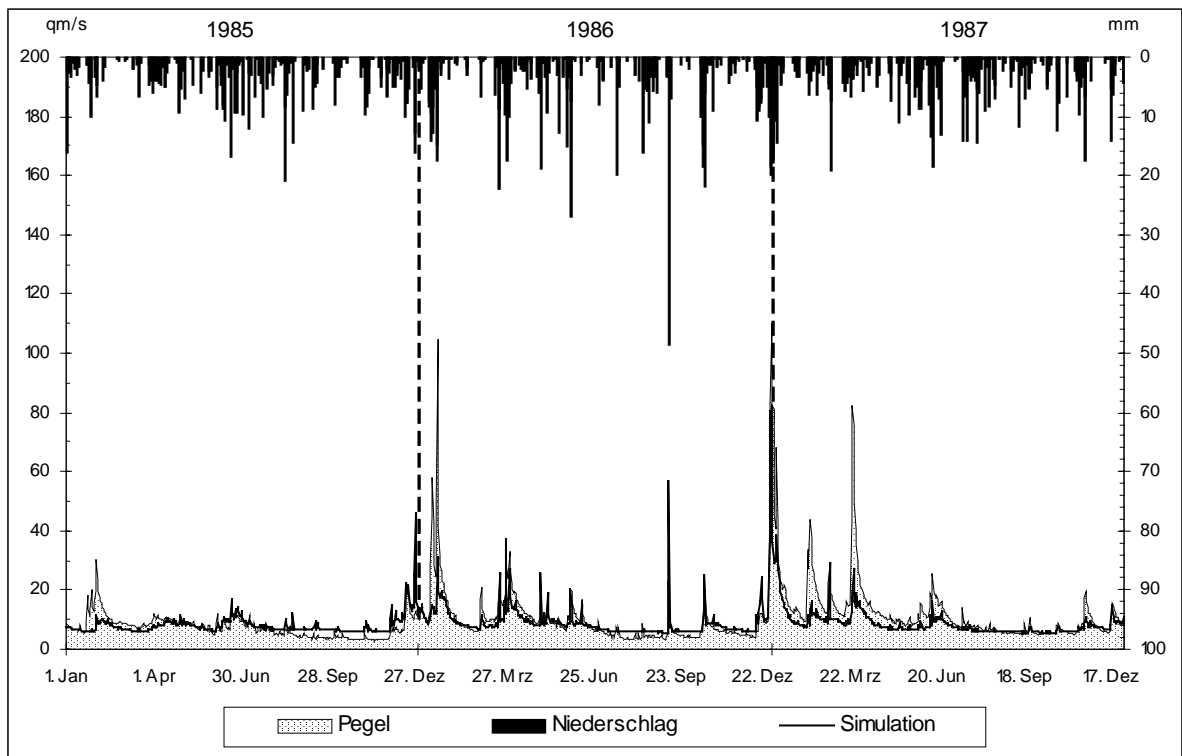


Abbildung 7a: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Relief-Feuchte-Klassen

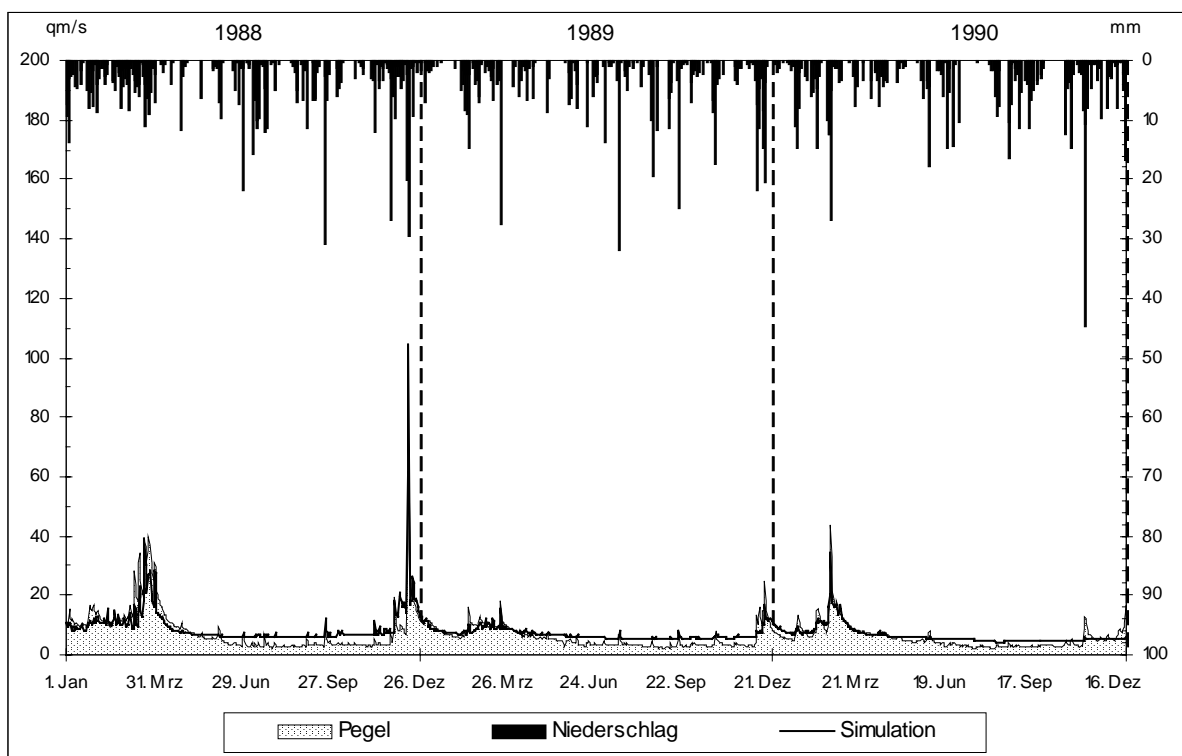


Abbildung 7b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Relief-Feuchte-Klassen

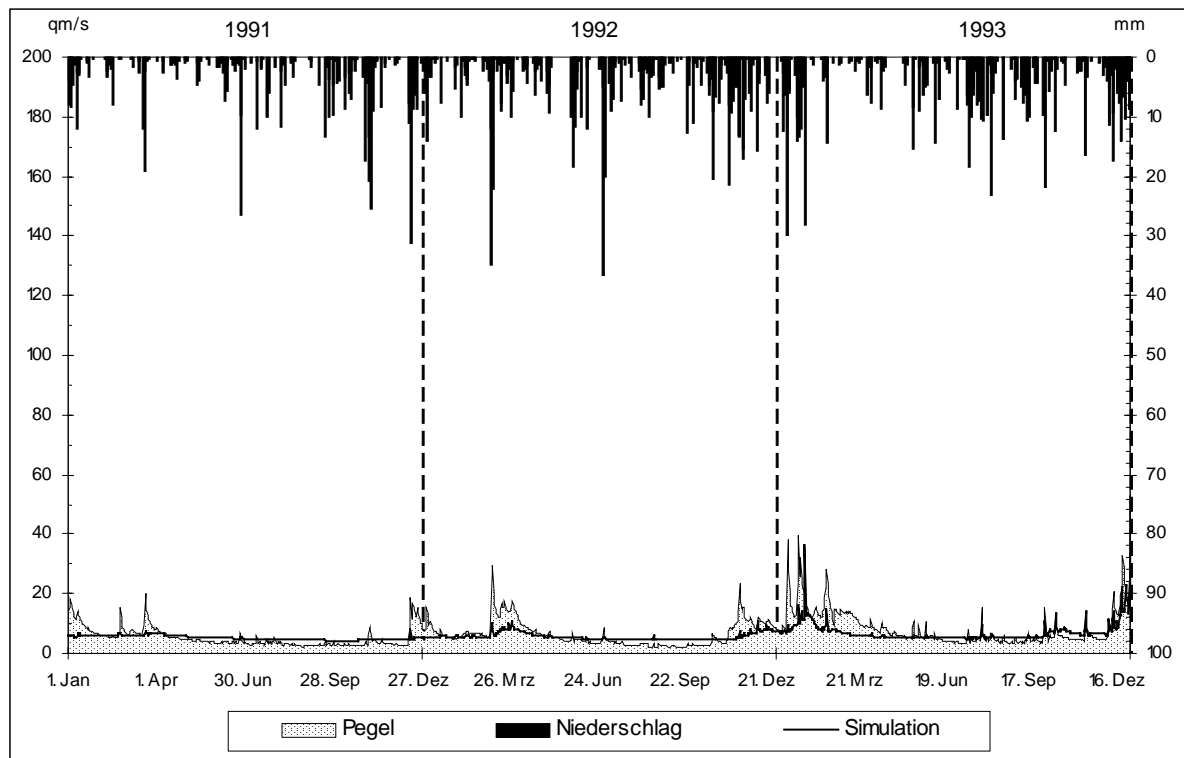


Abbildung 7c: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Relief-Feuchte-Klassen

Im Gegensatz zur Clusteranalyse wird bei der Simulation der Relief-Feuchte-Klassen die Rückgangslinie vielfach realistischer nachgezeichnet (s. Abb. 7a bis 7c). Dies zeigen die Hochwasserereignisse im Winter 1986/87 und 1988/89 oder auch das März-Ereignis 1990 sehr deutlich. Die Rückgangslinie wird im Modell fast ausschließlich aus der Grundwasserneubildung gebildet. Dabei ist der Grundwasserabfluß pro aggregierter Fläche das Ergebnis aus der zugewiesenen Gesteinsdurchlässigkeit und dem Potentialgefälle zum Vorfluter. Da die prozentualen Anteile der Lithofaziesseinheiten zwischen den Gebietsdiskretisierungen nur wenig variieren (s. Anhang, Tab. A4), kommt den in Abhängigkeit von der Flächenaggregation berechneten Reliefparametern größere Bedeutung zu.

Die Dynamik des Grundwasserabflusses wird auf Grundlage der Relief-Feuchte-Klassifizierung im Vergleich zum ersten Regionalisierungsansatz am besten abgebildet. Während das Basisabflußniveau bei der Ausgangsdiskretisierung und bei der Clusteranalyse teilweise zu hoch abgebildet werden, lassen die Ergebnisse der Relief-Feuchte-Klassen eine deutlich bessere Anpassung erkennen.

Die Simulationsgüte der Aggregationsansätze liegt im Zielgebiet der oberen Leine über der der Ausgangsdiskretisierung. Der mittlere Korrelationskoeffizient beträgt für die Simulationsergebnisse der Cluster 0.80 und für die Relief-Feuchte-Klassen sogar 0.82. Das Bestimmtheitsmaß liegt im Mittel mit 0.65 (Cluster) und 0.68 (Relief-Feuchte-Klassen) ebenfalls höher als für die Simulationsergebnisse der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien (s. Anhang, Tab.

A5). Abgesehen vom Jahr 1985, das in allen Gebietsdiskretisierungen nur befriedigende Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung zeigt, kann die Modellanpassung des ersten Ansatzes als gut bezeichnet werden. Die Simulationsergebnisse der Relief-Feuchte-Klassen können mit Korrelationskoeffizienten, die von rund 0.80 bis über 0.90 betragen und entsprechend hohen Bestimmtheitsmaßen als sehr gute Modellanpassung angesehen werden.

4.5.2 Wasserhaushalt

Der mittlere Gebietsniederschlag von rund 680mm (30-jähriges Mittel) wird während des Untersuchungszeitraumes von 1985 bis 1993 mit rund 700mm bei allen Gebietsdiskretisierungen leicht übertroffen (s. Tab. 7b). Dabei treten in fünf von neun Jahren überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen auf, wobei die Jahre 1986 und 1993 mit jeweils mehr als 800mm Niederschlag sehr feucht waren (s. Tab. 7a). Das Jahr 1991 war mit rund 520mm Jahresniederschlagssumme sehr trocken. Damit werden während des Simulationszeitraumes sehr unterschiedliche hydrologische Randbedingungen erfaßt, die in ihren Auswirkungen auf die Wasserhaushaltskomponenten kurz betrachtet werden sollen.

Die berechneten Wasserhaushaltsbilanzen weisen in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Aggregationsverfahrens nur geringe Unterschiede auf (s. Tab. 7b). Wie bereits in Kapitel 4.3 erläutert, entsprechen die simulierten Wasserbilanzen dem dreißigjährigen Mittel des wasserwirtschaftlichen Rahmenplanes der oberen Leine. Aufgrund der im Mittel überdurchschnittlich hohen Niederschläge wird für den gesamten Untersuchungszeitraum eine leichte Speicherauffüllung berechnet.

Die Oberflächenabflüsse können mit dem Modell WASMOD zum einen flächenbezogen (OA_A) und zum anderen als Abflußanteil im Vorfluter (OA_V) bilanziert werden. Diese Unterscheidung ist sinnvoll, da die gebildeten Oberflächenabflüsse im Gebiet teilweise reinfiltrieren bevor der Vorfluter erreicht wird. Während die simulierten Oberflächenabflüsse im Gebiet unabhängig von der Flächendiskretisierung sehr ähnlich sind, infiltrieren bei der Relief-Feuchte-Klassifizierung annähernd die Hälfte der Direktabflüsse wieder. Daß dies durchaus realistisch ist, zeigen die deutlich besser abgebildeten Abflußspitzen im Vergleich zu den Simulationsergebnissen der Ausgangsdiskretisierung (s. Kap. 4.4.1).

Tabelle7a: Wasserhaushaltsbilanz für das Zielgebiet obere Leine (1985 – 1993)

		Nieder- Schlag	Abfluß			Verdunst. ET	Speicher Δ
			GW	OA _A	OA _V		
Kleinste Gemeinsame Geometrien							
1985	Mm/a	667	228	28	22	300	117
	[%]	100	34.2	4.2	3.3	45.0	17.5
1986	Mm/a	819	249	62	48	387	135
	[%]	100	30.4	7.6	5.9	47.3	16.5
1987	Mm/a	774	253	30	23	463	35
	[%]	100	32.7	3.9	3.0	59.8	4.5
1988	Mm/a	742	262	55	42	327	111
	[%]	100	35.3	7.4	5.7	44.1	15.0
1989	Mm/a	582	231	9	7	393	-49
	[%]	100	39.7	1.6	1.2	67.5	-8.4
1990	Mm/a	642	224	10	7	610	-199
	[%]	100	34.9	1.6	1.1	95.0	-31.0
1991	Mm/a	522	165	1	0	454	-97
	[%]	100	31.6	0.2	0.0	87.0	-18.6
1992	Mm/a	751	190	10	1	561	-1
	[%]	100	25.3	1.3	0.1	74.7	-0.1
1993	Mm/a	815	217	12	7	438	153
	[%]	100	26.6	1.5	0.9	53.7	18.8
Cluster							
1985	Mm/a	661	243	11	10	319	89
	[%]	100	36.8	1.7	1.5	48.3	13.5
1986	Mm/a	812	263	42	40	387	122
	[%]	100	32.4	5.2	4.9	47.7	15.0
1987	Mm/a	770	242	41	18	463	47
	[%]	100	31.4	5.3	2.3	60.1	6.1
1988	Mm/a	737	244	63	35	326	132
	[%]	100	33.1	8.6	4.8	44.2	17.9
1989	Mm/a	579	244	6	6	388	-59
	[%]	100	42.1	1.0	1.0	67.0	-10.2
1990	Mm/a	639	227	6	6	599	-193
	[%]	100	35.5	0.9	0.9	93.7	-30.2
1991	Mm/a	522	200	5	1	454	-133
	[%]	100	38.3	1.0	0.2	87.0	-25.5
1992	Mm/a	751	202	9	3	556	-10
	[%]	100	26.9	1.2	0.4	74.0	1.3
1993	Mm/a	811	223	15	14	439	135
	[%]	100	27.5	1.9	1.7	54.1	16.7
Relief-Feuchte-Klassen							
1985	Mm/a	666	246	30	12	300	108
	[%]	100	36.9	4.5	1.8	45.1	16.2
1986	Mm/a	815	265	65	40	386	124
	[%]	100	32.5	8.0	4.9	47.4	15.2
1987	Mm/a	772	268	29	13	463	28
	[%]	100	34.7	3.8	1.7	60.0	3.6
1988	Mm/a	741	277	57	34	325	105
	[%]	100	37.4	7.7	4.6	43.9	14.2
1989	Mm/a	579	221	10	2	389	-33
	[%]	100	38.2	1.7	0.4	67.2	-5.7
1990	Mm/a	642	203	10	4	594	-159
	[%]	100	31.6	1.6	0.6	92.5	-24.8
1991	Mm/a	522	165	1	0	454	-97
	[%]	100	31.6	0.2	0	87.0	-18.6
1992	Mm/a	749	177	3	2	557	13
	[%]	100	23.6	0.4	0.3	74.4	1.7
1993	Mm/a	814	212	21	15	438	149
	[%]	100	26.1	2.6	1.8	53.8	18.3

[GW = Grundwasserabfluß, OA= Oberflächenabfluß (A= Gebiet; V= Vorfluter), ET = Evapotranspiration]

Tabelle 7b: Mittlere Wasserhaushaltsbilanz für das Zielgebiet obere Leine 1985 – 1993

		Nieder- Schlag	Abfluß			Verdunst. ET	Speicher Δ
			GW	OA _A	OA _V		
Kleinste Gemeinsame Geometrien							
Mittel	mm/a	702	224	24	17	437	23
	[%]	100	31.9	3.4	2.4	62.3	3.2
Cluster							
Mittel	mm/a	698	232	22	15	437	14
	[%]	100	33.2	3.2	2.2	62.6	2.0
Relief-Feuchte-Klassen							
Mittel	mm/a	700	226	25	14	433	26
	[%]	100	32.3	3.6	1.8	61.9	3.7

[GW = Grundwasserabfluß, OA= Oberflächenabfluß (A= Gebiet; V= Vorfluter), ET = Evapotranspiration]

Während des Simulationszeitraumes fallen die teilweise sehr hohen Speicheränderungen auf (s. Tab. 7a). Diese werden jedoch nicht nur durch den Aufbrauch bzw. die Auffüllung des Grundwasseraquifers hervorgerufen, sondern können auch das Ergebnis der Magazinierung einer Schneedecke sein, die über die Jahreswende hinaus erhalten bleibt. Die Bilanzierung der Schneeakkumulation ist im Modell nicht vorgesehen. Die größten absoluten wie auch prozentualen Schwankungsbreiten in der Jahresbilanz treten bei der Evapotranspiration auf. Diese nimmt Werte von knapp 45% bzw. 300mm bis zu 95 % bzw. 600mm (1990) an, wobei zwischen den Gebietsdiskretisierungen keine markanten Unterschiede zu beobachten sind (s. Tab. 7a). Insgesamt erscheinen die Ergebnisse der Verdunstungsberechnung mit einem Gebietsmittel von rund 60% an der Gesamtbilanz als zu gering (s. Tab. 7b). Obwohl das Zielgebiet überwiegend agrarisch genutzt wird, wird die Verdunstungsleistung vom Modell offensichtlich leicht unterschätzt.

Der Grundwasserabfluß reagiert im Vergleich zu den übrigen Bilanzgliedern sichtbar gedämpft auf die jährlichen Witterungsschwankungen. Von 1985 bis 1988 ist eine leichte kontinuierliche Zunahme der Absolutwerte der Grundwasserabflüsse zu verzeichnen. Die folgenden drei Jahre sind durch eine teilweise starke Abnahme der Grundwasserneubildung gekennzeichnet, bevor die Wellenbewegung ab dem Jahr 1992 wieder in einen Anstieg umschlägt. Den Oberflächenabflüssen (OA_V) fällt in der Gesamtbilanz nur eine untergeordnete Rolle zu. Der maximale Anteil während des Untersuchungszeitraumes beträgt knapp 6% (1986) und liegt abgesehen vom Jahr 1988 meist deutlich unter 2% (s. Tab. 7a).

Inwieweit die Abweichungen in der Abflußbildung das Ergebnis der unterschiedlichen Gebietsdiskretisierung sind, soll abschließend in der gebietsdifferenzierten Betrachtung der Wasserhaushaltskomponenten untersucht werden.

4.5.3 Gebietsdifferenzierte Analyse der Wasserflüsse

Die Simulation der Wasserflüsse auf Grundlage der verschiedenen Gebietsdiskretisierungen in bezug auf die Abflußganglinie am Pegel Leinerturm und auf die allgemeine Wasserhaushaltsbilanzierung ist das Ergebnis des Integrals der Teilflächen, die es im weiteren zu untersuchen gilt. Dabei kann die gebietsdifferenzierte Analyse der Wasserhaushaltskomponenten nur indirekt erfolgen, indem die Plausibilität zwischen Parameterkombination und Flächen mit ähnlichen Wasserumsätzen untersucht wird. Am Beispiel der Jahre 1986, 1989 und 1993 werden die Wasserhaushaltskomponenten Evapotranspiration, Grundwasserabfluß, Oberflächenabfluß und Speicheränderung in ihrer flächenhaften Verteilung analysiert.

Evapotranspiration

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der klassifizierten prozentualen Anteile der Evapotranspiration weisen die Gebietsdiskretisierungen der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien und der Relief-Feuchte-Klassen ein ähnliches Gesamtbild auf. Die räumlichen Muster der Clusteranalyse weichen aufgrund der teilweise sehr großen Einzelflächen von den Ergebnissen der Ausgangsdiskretisierung lokal ab.

Der Verdunstungsanteil an der Jahressumme der Niederschläge fällt in den exemplarisch untersuchten Jahren sehr unterschiedlich aus. Im überdurchschnittlich feuchten Jahr 1986 werden in weiten Teilen des Einzugsgebietes der oberen Leine weniger als 50% der Niederschläge als Evapotranspiration simuliert. 1989 werden dagegen vielfach 60% und teilweise mehr als 70% der Verdunstung zugeführt, während im Jahr 1993 fast flächendeckend 50-60% in der Jahresbilanz der Evapotranspiration zufallen.

Für das Jahr 1986 werden die höchsten Verdunstungsraten auf den Flächen mit Nadel- und Laubwaldnutzung simuliert. Da ganzjährig ausreichend Niederschlag gefallen ist, wird die gebietsdifferenzierte Verdunstungsverteilung durch die Vegetationsparameter (Blattflächenindex, Durchwurzelungstiefe und Haude-Faktor) hervorgerufen. Dies stellt sich im Jahr 1989 anders dar. Die Monate Mai bis Juli waren relativ niederschlagsarm, so daß nun die Wasserverfügbarkeit zum limitierenden Faktor wird. So ist es nicht verwunderlich, daß die Flächen mit einem grundwassernahen Standort (Auenbereiche) bzw. mit Böden hoher Speicherkapazität (Auenböden, Parabraunerden) die höchsten Verdunstungswerte aufweisen.

Die niedrigsten Evapotranspirationsraten werden wie auch 1993 im Westen des Zielgebietes simuliert. Dies ist weder nutzungsbedingt (Ackerland und Wald) noch pedologisch begründet. Vielmehr scheint der gut durchlässige Kalkstein im Untergrund bei gleichzeitig hohem Grundwassergefälle bereits während kürzerer Trochenperioden die Wasserverfügbarkeit einzuschränken. Ansonsten werden im Jahr 1993 kaum regionale Unterschiede in der Verdunstungstätigkeit bilanziert.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Evapotranspiration in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf und den nutzungsbedingten, pedologischen, geologischen und orographischen Modellparametern sehr unterschiedliche Verteilungsmuster zur Folge hat.

Oberflächenabfluß

Vergleichbar mit den Ergebnissen der Evapotranspirationsberechnung weist auch die räumliche Verteilung der simulierten Oberflächenabflüsse zwischen der Ausgangsdiskretisierung und den Relief-Feuchte-Klassen ein ähnliches Muster auf. Die zusammengefaßten Flächen der Clusteranalyse ergeben teilweise ein abweichendes Bild der Oberflächenabflußverteilung.

Die Jahre 1986 und 1993 sind durch zahlreiche Hochwasserereignisse gekennzeichnet (s. Abb. 7a & 7c). Dementsprechend hoch ist die Anzahl der Flächen, auf denen Oberflächenabfluß simuliert wird. Besonders 1986 ist der Anteil der Flächen mit einem Direktabflußanteil von $> 25\%$ offenbar unrealistisch hoch. Diese Flächen erhalten jedoch aus den vorgestellten Nachbarpolygonen hohe laterale Wasserzuschüsse. Wie die differenzierte Bilanz der Oberflächenabflüsse im Gebiet und im Vorfluter verdeutlicht (s. Tab. 7a), infiltriert je nach Gebietsdiskretisierung im Mittel annähernd die Hälfte der gebildeten Oberflächenabflüsse. Im Jahr 1989 treten nur wenige Abflußereignisse auf (s. Abb. 7b), so daß die Anzahl der Flächen und die Höhe der Direktabflußanteile stark reduziert werden.

Im Gegensatz zur Verdunstung weisen die Oberflächenabflüsse unabhängig vom Witterungsverlauf ähnliche Strukturen auf. Besonders die Hangbereiche der Lößvorkommen mit den z.T. durch Staunässe beeinflussten Parabraunerden sind für die Bildung schneller Abflußkomponenten anfällig. Aufgrund der geringen Gesteinsdurchlässigkeit sind die Flächen mit Schluff- und Tonstein im Untergrund unabhängig von den pedologischen Gegebenheiten für die Oberflächenabflußbildung prädestiniert. Die meist landwirtschaftliche Nutzung der Flächen begünstigt diese Prozeßentwicklung, da besonders im Winter weitgehend die schützende Funktion einer Vegetationsdecke fehlt. Die Talbereiche der Leine werden infolge zu geringer Hangneigung von der Direktabflußbildung ausgenommen, ebenso weisen viele Kalksteinflächen (hohe Kf-Werte) keinen Oberflächenabfluß auf.

Im Gegensatz zur Evapotranspiration ist die Oberflächenabflußbildung an bestimmte Parameterkombinationen geknüpft. Bei Überschreiten einer Hangneigung von $> 2^\circ$ (Modellvorgabe) neigen besonders die Flächen mit relativ undurchlässigen Bodeneigenschaften (hohe Ton- und Schluffanteile) oder entsprechend gering durchlässigen Untergrund zur Bildung schneller Abflußkomponenten.

Grundwasserabfluß

Der mit dem Modell WASMOD berechnete Grundwasserabfluß fällt bei der gebietsdifferenzierten Betrachtung durch das komplexe Verteilungsmuster auf. Weder für die untersuchten Jahre noch für die zugrundeliegenden Gebietsdiskretisierungen lassen sich auf den ersten Blick Abhängigkeiten in bezug auf die Gebietscharakteristika oder den Witterungsverlauf erkennen.

Der simulierte Grundwasserabfluß ist im Modell als eine Funktion des Potentialgefälles des Grundwassers in Abhängigkeit von der Geländehöhe zum Vorfluter, der Vorfluterentfernung und der Gebirgsdurchlässigkeit implementiert. Folglich zeichnen sich besonders die vorfluterfernen und gut durchlässigen Flächen des Kalksteins als Grundwasserneubildungsgebiete aus. Weiterhin liefern die vorfluterfernen Buntsandsteinflächen und aufgrund der hohen Durchlässigkeit der Böden die Auenbereiche überdurchschnittlich hohe Grundwasserabflüsse.

Auf den zweiten Blick entspricht das Verteilungsmuster der Grundwasserabflüsse in etwa dem Spiegelbild der Oberflächenabflußverteilung. Hohe Grundwasserabflüsse korrespondieren mit niedrigen bis keinen Direktabflüssen, während die niedrigen Grundwasserneubildungsraten der Löß- und Schluff-Tonsteinflächen mit mittleren bis hohen Oberflächenabflußanteilen zusammenfallen.

Infolge der zeitlich verzögerten Reaktion spielen witterungsspezifische Gegebenheiten in der Jahresbilanz der berechneten Grundwasserabflüsse eine untergeordnete Rolle. Die langjährige Simulation hat gezeigt, daß die Grundwasserneubildung in erster Linie ein Ergebnis der Gebirgsdurchlässigkeit im Zusammenspiel mit den orographischen Faktoren ist. Die pedologischen und nutzungsspezifischen Eigenschaften einer Flächen können vorgegebene Tendenzen verstärken bzw. abschwächen.

Speicheränderung

Der Verbrauch bzw. die Speicherauffüllung (Rücklage) wird aus der Differenz aus Niederschlagssumme abzüglich der simulierten Evapotranspiration und Abflußsumme gebildet.

In den Jahren 1986 und 1993 findet infolge der erhöhten Niederschlagstätigkeit auf einem Großteil der Flächen eine Rücklagenbildung statt. Das Jahr 1989 ist dagegen durch einen nahezu flächendeckenden Verbrauch gekennzeichnet. Extrem rückhaltintensive oder gering speicherfähige Flächen sind kaum anzutreffen und können keiner geologischen, pedologischen, nutzungsspezifischen oder orographischen Parameterkombination zugeordnet werden. Die Speicheränderung kann somit ausschließlich als witterungsabhängige Größe definiert werden.

Insgesamt lassen die simulierten Wasserhaushaltsgrößen einen starken Zusammenhang zu den berücksichtigten Gebietskennwerten erkennen. Allerdings kann die Dominanz eines Prozesses nicht auf einen Parameter zurückgeführt werden, sondern ist flächenspezifisch als Faktorenkombination der zugrundeliegenden Eingangsparameter zu verstehen.

4.6 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Die Simulation des hydrologischen Prozeßgeschehens mit dem Modell WASMOD setzt eine Anzahl von Modellparametern voraus, deren Messung in der Regel nur räumlich eingeschränkt (Mikroskala) durchgeführt werden kann. Demzufolge muß versucht werden, die benötigten Kennwerte aus allgemein verfügbaren Informationen abzuleiten.

Angaben zu Humusgehalt, Textur, Lagerungsdichte und Horizontmächtigkeit können den Bodenübersichtskarten unterschiedlicher Maßstabsgröße entnommen werden. Als hilfreiches Informationssystem zur Ableitung effektiver Parameter, wie z.B. k-Werte, hat sich die NIBIS-Methodenbank des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung erwiesen (Müller et al. 1992). Der Einsatzbereich der Methodenbank liegt auch in kleineren Maßstabsbereichen (< 1:25.000), wie die Arbeiten im Einzugsgebiet der oberen Leine gezeigt haben.

Als äußerst sensitiv und problematisch für die Anwendung von Pedotransferfunktionen im Berg- und Hügelland hat sich der Einfluß der Lagerungsdichte und des Skelettgehaltes gezeigt. Um die an Substrat-/Schichtwechsel gebundene sprunghafte Veränderung der Dichtewerte und Skelettgehalte bei der Ableitung effektiver Parameter (kf-Werte) zu berücksichtigen, wird in Anlehnung an die NIBIS-Methodenbank bei Überschreitung eines Skelettgehaltes von 40% die Durchlässigkeit der Böden erhöht.

Die Anwendung der Clusteranalyse auf die Simulationsergebnisse der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien ergibt ein differenziertes Bild. Im Zielgebiet der oberen Leine wird im Vergleich zu den Testgebieten eine kleinere Anzahl an Clustern und deren großräumigere Verteilung berechnet. Dies kann auf den Genauigkeitsverlust der Basisdaten im Einzugsgebiet der oberen Leine zurückgeführt werden. Die statistische Auswertung der Clusteranalyse ergibt in bezug auf die geogenen, nutzungs- und reliefspezifischen Parameter keine signifikante Abhängigkeit. Vielmehr repräsentiert jeder Cluster eine Faktorenkombination der zugrundeliegenden Eingangsparameter in statistischer Abhängigkeit der Wasserhaushaltsgrößen Evapotranspiration, Oberflächenabfluß und Grundwasserabfluß.

Die Clusterung der Kleinsten Gemeinsamen Geometrien führt in allen Untersuchungsgebieten zu einer erheblichen Reduzierung der Flächenanzahl. Im Zielgebiet der oberen Leine müssen aus Gründen zu langer Rechenzeiten die Flächen der Ausgangsdiskretisierung in ARC/INFO vorab zusammengefaßt werden, indem kleinere Teilflächen den Nachbarflächen mit der längsten gemeinsamen Grenzen zugewiesen werden. Damit ist im Zielgebiet die Grenze der Anwendbarkeit des Regionalisierungsansatzes über die Clusteranalyse erreicht bzw. überschritten.

Zur Validierung des Modells wurden langjährig gemessene Abflußganglinien und Wasserhaushaltsbilanzen herangezogen. Die Ergebnisse des mit WASMOD simulierten Abflußverhaltens sind im Zielgebiet insgesamt als gut zu bewerten. Die Dynamik der gemessenen

Abflußanglinien und der jahreszeitliche Verlauf werden realistisch nachgezeichnet. Damit kann die Zielvorstellung, langfristige Wasserflüsse statt Einzelereignisse zu simulieren, erfüllt werden.

Die Simulationsergebnisse der entwickelten Regionalisierungsansätze lassen auch im Einzugsgebiet der oberen Leine keine signifikanten Unterschiede erkennen. Die statistische Überprüfung der Simulationsgüte (Green & Stephenson 1986) in bezug auf die gemessenen Abflüsse ergeben Korrelationskoeffizienten nach Pearson, die im allgemeinen zwischen $r = 0.7$ und $r = 0.9$ liegen.

Die Ergebnisse der Verdunstungsberechnung erscheinen mit einem Gebietsmittel von rund 60% an der Gesamtbilanz als zu gering. Obwohl das Zielgebiet überwiegend agrarisch genutzt wird, wird die Verdunstungsleistung vom Modell offensichtlich leicht unterschätzt. Die Simulation der Bodenwasserflüsse beruht auf dem Darcyschen Gesetz, wobei die Modelleingaben zur gesättigten Wasserleitfähigkeit anhand von Textur, Humusgehalt und Lagerungsdichte über Pedotransferfunktionen abgeleitet werden. Die im Modell WASMOD integrierten Pedotransferfunktionen berechnen für sehr schluffreiche und gleichzeitig tonarme Böden zu geringe Wassergehalte, so daß sich daraus die verminderte Verdunstung erklären läßt.

Die z.T. sehr hohen Oberflächenabflüsse von 30% und mehr liegen in der Modellphilosophie begründet. Die aggregierten Teilflächen sind vergleichbar einer Baumstruktur aneinander gekoppelt mit der Folge, daß vorfluternahe Flächen teilweise hohe Zuflußraten aus den Nachbarflächen erhalten. Die differenzierte Betrachtung der Oberflächenabflußanteile verdeutlicht, daß annähernd die Hälfte der gebildeten Direktabflüsse wieder infiltriert bevor der Vorfluter erreicht wird.

Insgesamt lassen die simulierten Wasserhaushaltsgrößen starke Zusammenhänge mit den berücksichtigten Gebietskennwerten erkennen. Flächen mit hohen Grundwasserabflüssen sind vornehmlich an hohe Gesteinsdurchlässigkeiten des Untergrundes (Kalkstein) gebunden und weisen geringe Oberflächenabflußanteile auf. Die schnellen Abflußkomponenten des Oberflächenabflusses werden auf den tonreichen Böden gebildet. Überdurchschnittliche Verdunstungsraten werden dagegen auf den Flächen mit Nadel- und Laubwaldnutzung simuliert. Allerdings kann die Dominanz eines Prozesses nicht auf einen Parameter zurückgeführt werden, sondern ist flächenspezifisch als Ergebnis einer Faktorenkombination der zugrundeliegenden Eingangsparameter zu verstehen.

5. Abschließende Bewertung der entwickelten Regionalisierungsansätze

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden die Möglichkeiten der Regionalisierung der Abflußbildung im Sinne eines 'upscalings' untersucht. Insbesondere der Einfluß der naturräumlichen Variabilität pedohydrologischer Kenngrößen auf die Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone wurde anhand verschiedener Testgebiete ermittelt. Hierzu wurden zwei Regionalisierungsansätze entwickelt, anhand derer die Ausweisung und Aggregation von HRU's für den Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone und für die Abflußbildung unter Einbeziehung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und des Programmsystems SARA durchgeführt wird. Die Umsetzung der Regionalisierungsansätze in ein physikalisch basiertes Modell wurde mit dem Wasserhaushaltsmodell WASMOD realisiert.

Den Berechnungen der HRU's der Reliefanalyse liegt in allen Untersuchungsgebieten ein hochauflösendes digitales Geländemodell von 10m (Wernersbach) über 20m (Ziegenhagen) bis rund 30m (obere Leine) zugrunde. In allen untersuchten Einzugsgebieten (s. Tab. 1) dominieren die Intermediär- und Divergenzbereiche mit einem Flächenanteil von 50-60%. Die Senkenbereiche nehmen in den Testgebieten nur einen Flächenanteil von 7-8% ein, während der prozentuale Anteil im Zielgebiet rund 17% beträgt. Für die Scheitelbereiche werden Flächenanteile von 10% bis 25% berechnet. Die verbleibenden Flächen werden zu 10-30% durch die Konvergenzbereiche eingenommen.

Die Einteilung in die vier Relief-Feuchte-Klassen hat sich in allen Untersuchungsgebieten als sehr effektiv erwiesen. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der flächenhaften Reliefeinheiten ist aufgrund der definierten Klasseneinteilung eindeutig, wobei die Genauigkeit der ausgewiesenen HRU's maßgeblich durch das zugrundeliegende DGM fixiert wird.

Die Anwendung der Clusteranalyse auf die Simulationsergebnisse der Ausgangsdiskretisierung ergibt ein differenziertes Bild. Im Testgebiet Ziegenhagen wird im Vergleich zum Zielgebiet eine größere Anzahl an Clustern und deren kleinräumigere Verteilung berechnet. Dies kann auf den Genauigkeitsverlust der Basisdaten im Einzugsgebiet der oberen Leine zurückgeführt werden. Die unterschiedliche Anzahl und Verteilung der Cluster in den Testgebieten, die zwischen 6 Clustern (Eschenberg) und 8 Clustern (Ziegenhagen und Wernersbach) liegt, beruht auf der größeren Variabilität der Gebietsausstattung in den letztgenannten Testgebieten. Die statistische Auswertung der Clusteranalyse ergibt in bezug auf die geogenen, nutzungs- und reliefspezifischen Parameter keine signifikante Abhängigkeit. Vielmehr repräsentiert jeder Cluster eine Faktorenkombination der zugrundeliegenden Eingangsparameter in statistischer Abhängigkeit der Wasserhaushaltsgrößen Evapotranspiration, Oberflächenabfluß und Grundwasserabfluß.

Die Clusterung der Ausgangsdiskretisierung führt in allen Untersuchungsgebieten zu einer erheblichen Reduzierung der Flächenanzahl, im Testgebiet Ziegenhagen beispielsweise von 400 auf 268 HRU's, im Zielgebiet der oberen Leine von 737 auf 405 HRU's. Die Anzahl der HRU's der Clusteranalyse entspricht in den Testgebieten jeweils annähernd der Anzahl der HRU's aus der Reliefanalyse. Im Zielgebiet der oberen Leine müssen aus Gründen zu langer Rechenzeiten die aggregierten REA's der Ausgangsdiskretisierung in ARC/INFO vorab zusammengefaßt werden, indem kleinere Teilflächen den Nachbarflächen mit der längsten gemeinsamen Grenzen zugewiesen werden. Damit ist im Zielgebiet die Grenze der Anwendbarkeit des Regionalisierungsansatzes über die Clusteranalyse erreicht bzw. überschritten.

Die Ergebnisse des mit WASMOD simulierten Abflußverhaltens sind sowohl in den Testgebieten als auch im Zielgebiet insgesamt als gut zu bewerten. Die Dynamik der gemessenen Abflußanglinien und der jahreszeitliche Verlauf werden realistisch nachgezeichnet. Damit kann die Zielvorstellung, langfristige Wasserflüsse statt Einzelereignisse zu simulieren, erfüllt werden.

Die Simulationsergebnisse der entwickelten Regionalisierungsansätze lassen keine signifikanten Unterschiede erkennen. Die statistische Überprüfung der Simulationsgüte (Green & Stephenson 1986) in bezug auf die gemessenen Abflüsse ergeben Korrelationskoeffizienten nach Pearson, die in den Testgebieten im allgemeinen zwischen $r = 0.7$ und $r = 0.9$ liegen und im Zielgebiet der oberen Leine für den zugrundeliegenden Simulationszeitraum von 1985 bis 1993 im Mittel $r = 0.8$ betragen.

Obwohl im Einzugsgebiet der oberen Leine die Datenqualität deutlich schlechter ist als in den Testgebieten, ist die Simulationsgüte im Zielgebiet mit den Ergebnissen aus den Testgebieten vergleichbar. Dies wird u.a. dadurch begründet, daß der im Modell nicht berücksichtigten Interflowkomponente im Einzugsgebiet der oberen Leine im Gegensatz zu den Testgebieten nur eine untergeordnete Rolle bei der Abflußbildung zukommt.

Die Ergebnisse aus den verschiedenen Einzugsgebieten belegen, daß mit den entwickelten Regionalisierungsansätzen das komplexe Abflußgeschehen auf der Grundlage allgemein verfügbarer Daten abgebildet werden kann. Die Verfahren sind prinzipiell gebiets- und skalenunabhängig anwendbar und lassen keine signifikanten Unterschiede in den Simulationsergebnissen erkennen. Wie die Ergebnisse aus dem Zielgebiet jedoch verdeutlichen, kann die Aggregation über die Clusteranalyse nur durchgeführt werden, wenn bereits die Flächen der Ausgangsdiskretisierung zusammengefaßt werden. Im Vergleich zur Clusteranalyse stellt damit die Aggregation über die Relief-Feuchte-Klassen den effektiveren Regionalisierungsansatz dar, zumal aufgrund der definierten Klassen die Aggregation bereits im Preprocessing vorgenommen wird.

6. Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit

Die entwickelten Regionalisierungsansätze stellen einen erfolgversprechenden Weg dar, das komplexe Geschehen der Bodenwasserflüsse und somit der Abflußbildung eines Einzugsgebietes auf der Grundlage pedohydrologischer Kennwerte, die aus allgemein verfügbaren Gebietskennwerten abgeleitet werden können, zu erfassen und nachzubilden. Die gebiets- und skalunenabhängige Anwendbarkeit der Methodik wurde mit der Übertragung auf das Zielgebiet der oberen Leine nachgewiesen.

Aus den Erkenntnissen der Projektarbeiten können in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Dieckrüger/Richter für die verschiedenen Maßstabebenen Empfehlungen zu den Mindestanforderungen an die bodenbezogenen Geodaten gegeben werden (s. Tab. 8).

Tabelle 8: Anforderungen und Empfehlungen zu bodenbezogenen Geodaten

Skalenebene	Mindestanforderungen	Empfehlungen
Mikroskala	Reichsbodenschätzung (1:5000) Bodenübersichtskarte (1:25.000)	Eigene Kartierungen Inselflurkarten (1:1000) Forstliche Standortkartierungen
Mesoskala	Bodenübersichtskarte (1:50.000)	Reichsbodenschätzung (1:5.000) Bodenübersichtskarte (1:25000)
Makroskala	Bodenübersichtskarte (1:200.000) Bodenübersichtskarte (1:1.000.000)	Bodenübersichtskarte (1:50.000)

Die Übertragung der entwickelten Regionalisierungsansätze auf das Einzugsgebiet der oberen Leine hat gezeigt, daß das Zielgebiet mit einer Größe von knapp 1000 km² als Obergrenze für eine praktikable Anwendbarkeit angesehen werden muß. Die Ausweitung des Einsatzbereiches auf Flußeinzugsgebiete, wie z.B. der Weser, wäre erst durch weitere Vereinfachungen in der Modellstruktur denkbar.

7. Offene Fragen und Forschungsbedarf

Mit den herkömmlichen Methoden zur Modellvalidierung konnten in den Testgebieten aufgrund der umfangreichen Gebietskenntnisse gute Ergebnisse erzielt werden. Für das Zielgebiet der oberen Leine können mit den bisherigen Methoden überprüfbare Aussagen bezüglich der Abflussszusammensetzung am Gebietsauslaß und zum Wasserhaushalt getroffen werden. Eine regional differenzierte Analyse der Abflussszusammensetzung bzw. einzelner Wasserhaushaltskomponenten kann nur indirekt erfolgen, indem die Plausibilität zwischen Parameterkombination und Flächen ähnlichen Wasserumsatzes untersucht wird. Es stellt sich deshalb die Frage, ob aufwendigere Methoden, wie z.B. die radargestützte Bodenfeuchteanalyse, die für bestimmte Fragestellungen eine bessere Validierung ermöglichen würde, in Betracht gezogen werden sollten.

Die Überprüfung der in WASMOD integrierten Pedotransferfunktionen zeigte Mängel bei den Simulationsergebnissen auf schluffreichen und gleichzeitig tonarmen Böden (zu geringe Bodenwassergehalte). Die Anwendung und Übertragung der Transferfunktionen auf Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Böden entsprechender Substratmerkmale ist folglich mit Fehlern behaftet. Es stellt sich jedoch die Frage, ob allgemeingültige Pedotransferfunktionen entwickelt werden können, die gebietsunabhängig einsetzbar sind. Eine Lösung dieses Problems könnte darin bestehen, für die Hauptbodenarten (wie Ton- und Schluffböden, Lehm usw.) bereits entwickelte und speziell angepaßte Transferfunktionen (Vereecken et al. 1989) in bestehende Modelle zu integrieren.

Die Abschätzung der Auswirkungen möglicher Landnutzungs- und Klimaveränderungen auf das hydrologische Prozeßgefüge meso- bis makroskaliger Einzugsgebiete wird in Zukunft eine immer wichtigere Rolle für landschaftsplanerische Entscheidungen spielen. Mit der entwickelten Regionalisierungsstrategie steht eine Methodik zur Verfügung, mit deren Hilfe die Folgen möglicher Veränderungen regional differenziert herausgearbeitet und in grundsätzliche Strategien für Problemlösungen umgesetzt werden können. Dabei stößt der Einsatz hochauflösender Prozeßmodelle jedoch an methodische (Verfügbarkeit räumlich und zeitlich hochaufgelöster Daten) und technische (Rechenkapazität) Grenzen, so daß eine Vereinfachung der verwendeten hydrologischen Modelle notwendig wird.

Mit dem Einsatz prognosefähiger Einzugsgebietsmodelle können auf Grundlage der entwickelten Regionalisierungsstrategie zukünftige Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt postuliert werden. Das Ziel weiterer Forschungen sollte darin bestehen, allgemeingültige Strategien für eine nachhaltige Landschaftsentwicklung zu entwickeln.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Schwerpunkt der Projektarbeiten der Göttinger Arbeitsgruppe ist die Aggregation 'homogener Pedohydrotope' (im Sinne der HRU's) für den Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone und für die Abflußbildung unter Einbeziehung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und dem Programmsystem SARA zur digitalen Reliefanalyse. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei Regionalisierungsansätze zur Ausweisung von 'Hydrological Response Units' (HRU) entwickelt, die eine Ableitung flächenvariabler Bodenkennwerte aus allgemein verfügbaren Relief-, Nutzungs-, Boden- und Geologiebasisdaten erlauben. Die Ergebnisse der Regionalisierungsansätze werden mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WASMOD getestet und bewertet.

Die Ergebnisse der Modellsimulationen aus den Testgebieten und dem Zielgebiet der oberen Leine zeigen, daß mit den entwickelten Methoden das komplexe hydrologische Prozeßgeschehen von Einzugsgebieten verschiedener Skalierungsebenen regional differenziert erfaßt und nachgebildet werden kann. Im Vergleich zur Clusteranalyse stellt die Aggregation über die Reliefanalyse den effektiveren Regionalisierungsansatz dar, da die Berechnung der HRU's aufgrund der definierten Klasseneinteilung bereits im Preprocessing erfolgt.

Die zukünftigen Arbeiten werden zunächst die Vereinfachung des verwendeten Wasserhaushaltsmodells WASMOD beinhalten, um den Einsatz in meso- und makroskaligen Flußeinzugsgebieten zu ermöglichen. Schwerpunkt der Modellverifikation wird in der vertikalen Aggregation des Bodenkomplexes und in der Implementierung allgemeingültiger Pedotransferfunktionen bestehen. Mit dem Regionalisierungsansatz der Relief-Feuchte-Klassen steht eine Methodik zur Verfügung, mit deren Hilfe die Auswirkungen möglicher Landnutzungs- und Klimaveränderungen auf den Landschaftswasserhaushalt regional differenziert untersucht werden kann.

9. Literatur

- AG BODENKUNDE (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. verbesserte und erweiterte Auflage, -Hannover.
- AMBROISE, B. & D. VIVILLE (1986): Spatial variability of textural and hydrodynamic properties in a soil unit of the Ringelbach study catchment, Vosges (France), Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 58, -Berlin.
- BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE & R. WEIBER (1994): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg, 594 S.
- BLÖSCHL, G., R.B. GRAYSON & M. SIVAPALAN (1995): On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling. - In: Hydrological Processes, Vol. 9, S. 313-330.
- BORK, H.-R. (1992): Regionalisierung bodenhydrologischer Parameter und Zustandsvariablen. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Weinheim; S. 201-220.
- DIEKKRÜGER, B. (1992): Standort- und Gebietsmodelle zur Simulation der Wasserbewegung in Agrarökosystemen. - Landschaftsökologie und Umweltforschung, H. 19, 169 S., Braunschweig.
- DIEKKRÜGER, B. & O. RICHTER [Hrsg.] (1997): Regionalization in Hydrology. - Extended Abstracts, International Conference 10 - 14 March 1997, Braunschweig.
- DVWK (1982): Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebots, Teilbände 1 u. 2, DVWK-Schriften, H. 58, Hrsg. Deutscher Verband für Wasser- und Kulturbau, -Hamburg, Berlin.
- ENGELN, G.B. & F.H. KLOOSTERMANN (1996): Hydrological Systems Analysis. Methods and Application. - Water Science and Technology Library, Vol 20, Dordrecht.
- ETZENBERG, C. (1996): Hydrologische Untersuchungen im Repräsentativ- und Versuchsgebiet Wernersbach - ein kurzer Abriss, IHI-Schriften, H. 2 Wasser im System Boden - Pflanze - Atmosphäre, -Zittau.
- FIEDLER, H.J. & K. THALHEIM (1988): Geologisch-pedologischer Exkursionsführer Osterzgebirge, Teil I: Geologie und Petrographie, Teil II: Bodengeologie und Pedologie, -Dresden.
- FLÜGEL, W.-A. (1995): Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, Germany. - In: Hydrological Processes, Vol. 9, S. 423-436.
- GEROLD, G. & R. REUM & S. WAGNER (1992): Flächenhafte Erfassung der Bodenparameter, Bodendifferenzierung und Bodenerosion, Schlußbericht zur 1. Phase des BMFT-Verbundprojektes „Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet“, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe, H. 41, -Karlsruhe.

- GEROLD, G. & B. CYFFKA (1996): Forschungsbericht zu GE 431/6-2, Regionalisierung der Abflußbildung über die Aggregation homogener Flächen unter Verwendung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und der 'Digitalen Reliefanalyse' (Programm SARA), unveröff.,- Göttingen.
- GEROLD, G. & J. SUTMÖLLER, G. BUSCH & J.-P. KRÜGER (1996): Anwendung von GIS, SARA und Wasserhaushaltsmodellierung für die Regionalisierung der Abflußbildung, Modellierung und Simulation räumlicher Systeme mit Geographischen Informationssystemen, Proceedings-Reihe der Informatik'96, Bd. 9, -Klagenfurt.
- GREEN, I.R.A. & D. STEPHENSON (1986): Criteria for comparison of single event models, Hydrologic Sciences Journal, H. 31, -Oxford.
- HANLE, A. (1992): Erzgebirge, -Mannheim.
- HOFFMANN, H.-D. (1992): Modellierung der Interzeption von Waldbeständen und Überlegungen zur Regionalisierung der Modellparameter, Regionalisierung in der Hydrologie, Ergebnisse von Rundgesprächen / DFG, Mitteilungen der Senatskommission f. Wasserforschung, - Weinheim
- JORDAN, P. & H.-J. WEDER (1995): Hydrogeologie, Grundlagen und Methoden, Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen, -Stuttgart.
- KÖTHER, R. & F. LEHMEIER (1993): SARA - Ein System zur automatischen Relief-Analyse. - Standort, H. 4/93.
- KÖTHER, R. (1998): SARA - Ein Programmsystem zur automatischen geomorphographischen Reliefanalyse und seine Anwendung am Beispiel der Bodenkartierung. - Dissertation Geogr. Inst. Univ. Göttingen (in Vorbereitung).
- KOVAR, K. & H.P. NACHTNEBEL (1996): Application of geographic information systems in hydrology and water resources management: Proceedings of the HydroGIS'96 conference held in Vienna, Austria, from 16 to 19 April 1996. IAHS Publication No. 235, 711 S., Wallingford.
- LÜLLWITZ, T. (1993): Vergleichende Hydrologische Modellierung mit dem Modell PRMS unter Anwendung von Geographischen Informationssystemen. - Diss. Uni. Bonn.
- MATHEß, G. & K. UBELL (1983): Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt, -Berlin.
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Vorganges in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. - IHW, H. 56, Karlsruhe.
- MÜLLER, U., C. DEGEN & C. JÜRGING (1992): Dokumentation zur Methodenbank des Fachinformationssystems Bodenkunde (FIS Boden), Hrsg. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, -Hannover, unveröffentlicht.
- NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Obere Leine - Hrsg. Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover.
- PESCHKE, G. (1990): Hydrologisches Experimental- und Repräsentativgebiet „Wernersbach“, Exkursionsführer, -Dresden.

- PESCHKE, G (1991): Das Einzugsgebiet des Wernersbaches - Forschungsobjekt für Probleme der Hydrometeorologie, Hydrologie und von Waldökosystemen, Wissenschaftl. Zeitschr. d. Technischen Universität Dresden 40 H. 5/6, -Dresden.
- REICHE, E.W. (1991): Entwicklung, Validierung und Anwendung eines Modellsystems zur Beschreibung und flächenhaften Bilanzierung der Wasser- und Stickstoffdynamik in Böden. - Kieler Geogr. Schr., 29.
- RICHTER, O. & B. DIEKKRÜGER (1996): Wasser- und Stoffdynamik über räumlichen Punktprozessen, Sonderforschungsbereich 179 „Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen“, Abschlußbericht Band 1, Landschaftsökologie und Umweltforschung, Hrsg. Richter, O. & Herrmann, A., H. 24, -Braunschweig.
- SCHÖNIGER, M. (1990): Beitrag zur Abflußbildung und Grundwasserneubildung im paläozoischen Festgestein (Lange Bramke, Oberharz), Landschaftsökologie und Umweltforschung, Hrsg. Richter, O. & Herrmann, A., H. 18, -Braunschweig
- SCHWARZE, R., W. DRÖGE & K. OPPERDEN (1996): Regionalisierung von Abflußkomponenten, Verweilzeiten und Umsatzräumen in kleinen Mittelgebirgseinzugsgebieten. Bericht zum Forschungsvorhaben der DFG. Dresden.
- SEEDORF, H.H. & H.H. MEYER (1992): Landeskunde Niedersachsen - Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes. Band 1: Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung. Wachholtz Verlag, Neumünster.
- TIETJE, O. (1993): Räumliche Variabilität bei der Modellierung der Bodenwasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone, Landschaftsökologie und Umweltforschung, Hrsg. Richter, O. & Herrmann, A., H. 21, -Braunschweig.
- VAN DEURSEN, W.P.A. (1995): Geographical Information Systems and Dynamic Models. - Nederlandse Geografische Studies 190, Utrecht.
- VEREecken, H.J., J.MAES, J. FEYEN & P. DARIUS (1989): Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content, Soil Sci. Soc., Vol. 148, -Madison
- WILLMOTT, C. J. (1981): On the validation of models, Physical Geography, H. 2,-Silver Spring.

Tabelle A1: Monatswerte der Gebietsniederschläge und des Temperaturmittels (Station Grillenburg, langjährige Mittelwerte nach Peschke 1990)

Monat	Niederschlag [mm]					Temperatur [°C]
	1993	1994	1995	1996	Mittel*	Mittel**
Januar	68,6	66,1	79,9	4,8	66,2	-1,4
Februar	71,1	42,7	55,9	44,3	51,4	-0,7
März	29,7	151,3	55,8	39,4	58,7	2,5
April	34,3	91,7	99,6	40,7	68,5	6,6
Mai	68,3	100,0	137,9	107,6	80,5	11,4
Juni	68,0	41,4	154,6	54,6	79,4	14,7
Juli	163,5	47,3	82,8	140,1	88,6	16,3
August	40,8	114,8	154,4	93,6	98,9	15,8
September	53,2	40,6	92,1	73,4	63,5	12,7
Oktober	54,2	47,1	26,5	74,7	60,9	8,5
November	62,4	65,5	123,2	39,5	70,0	3,6
Dezember	100,0	68,0	60,4	51,2	79,5	0,1
Σ	813,8	876,4	1123,2	764,0	865,9	X: 7,5

* Meßzeitraum 1970 bis 1989 ** Meßzeitraum 1959 bis 1988 [X = Jahresmittelwert]

Tabelle A2: Prozentuale Flächenanteile von Nutzung, Leitbodenart und Geologie im Vergleich mit der ursprünglichen Verteilung im Einzugsgebiet Wernersbach

Geoinformation	Kleinste Gemeinsame Geometrien	Relief-Feuchte-Klassen	Clusteransatz
Nutzung			
Laubwald	1,1	0,2	1,1
Nadelwald	95,6	99,0	95,7
Aufforstung	0,2	0,0	0,2
Baumschulfläche	3,2	0,8	3,0
Leitbodenart			
tiefgründiger lehmiger Schluff bis Schlufflehm	39,4	43,3	44,3
mittelgründiger lehmiger Schluff bis Schlufflehm	31,0	31,4	26,8
sandiger Lehm	19,3	20,1	20,3
lehmiger Sand	3,6	0,1	2,2
Schwemmléhm über Bachschutt/-schotter	2,8	2,8	3,1
tiefgründiges schluffig/lehmiges Kolluvium	3,9	2,4	3,4
Geologische Einheit			
Auenlehm	16,2	10,8	15,4
toniger Löß mit Rhyolithschutt	2,0	0,1	1,3
Löß	7,2	2,0	5,8
Plänersandstein	18,1	19,8	19,5
Penninischer Sandstein	3,2	1,5	0,6
fluviatile und äolische Sandsteine	7,6	8,2	12,0
Rhyolith	40,1	50,1	40,3
quarzarmer Rhyolith	5,6	7,6	5,0

Tabelle A3: Verwendete Kf-Werte (Geologie) im Einzugsgebiet Wernersbach

Geologische Einheit	Kf [m/s]	Kf [m/s] Literatur	Quelle
Holozän (Auenlehm)	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$ bis $4,63 \cdot 10^{-6}$	AG BODENKUNDE (1994)
Pleistozän (Lößlehm)	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$ bis $4,63 \cdot 10^{-6}$	AG BODENKUNDE (1994)
Pleistozän (toniger Lößlehm, skelettreich)	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$ bis $4,63 \cdot 10^{-6}$	AG BODENKUNDE (1994)
Plänersandstein	$1,74 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$ bis $1,00 \cdot 10^{-5}$	DVWK (1982)
Pennricher Sandstein	$1,74 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$ bis $1,00 \cdot 10^{-5}$	DVWK (1982)
Fluviatile und äolische Sandsteine	$1,74 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$ bis $1,00 \cdot 10^{-5}$	DVWK (1982)
Paläorhyolith	$9,26 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$ bis $3 \cdot 10^{-6}$	MATHEß & UBELL (1983)
Quarzarmer Paläorhyolith	$9,26 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$ bis $3 \cdot 10^{-6}$	MATHEß & UBELL (1983)

Tabelle A4 : Prozentuale Flächenanteile der Geodaten im Einzugsgebiet der oberen Leine

Bodentyp	Original	KGG	Cluster	FKL
Auenboden	6,04	7,90	4,33	6,80
Kolluvium	3,47	1,42	0,88	0,41
Gley-Schwarzerde	0,19	0,23	0,23	0,00
Parabraunerde-Schwarzerde	0,58	0,68	1,16	0,76
Pseudogley	1,33	1,31	0,45	0,78
Pelosol-Pseudogley	0,12	0,06	0,06	0,03
Parabraunerde	22,24	22,56	23,63	26,12
Braunerde	24,49	23,46	23,35	24,02
Rendzina	24,77	26,00	29,17	24,45
Braunerde-Rendzina	0,21	0,15	0,00	0,08
Ranker	5,92	5,44	3,76	6,29
Braunerde-Ranker	6,27	6,97	8,64	6,33
Pseudogley-Pelosol	0,08	0,11	0,00	0,03
Rendzina-Pelosol	1,80	1,53	0,62	1,03
Braunerde-Pelosol	2,19	2,18	3,65	2,87
Kultosol	0,22	0,00	0,05	0,00
Wasserflächen	0,07	0,00	0,00	0,00
Lithofazieseinheit	Original	KGG	Cluster	FKL
Randzschstein	0,02	0,00	0,00	0,00
Buntsandstein	31,53	30,61	33,54	34,11
Kalkstein	29,84	30,84	32,15	29,90
Schluff- und Tonstein	14,09	12,61	12,83	10,83
Rezente Bildung	5,85	6,92	3,59	5,99
Känozoikum sandig/kiesig	0,49	0,48	0,30	0,15
Känozoikum schluffig/tonig	0,12	0,12	0,07	0,00
Löß	18,06	18,43	17,53	19,01
Nutztyp	Original	KGG	Cluster	FKL
Wasser	0,02	0,00	0,00	0,00
Bebauung	2,97	2,16	0,95	0,84
Laubwald	29,44	30,81	28,84	24,55
Nadelwald	4,73	1,28	0,59	0,96
Grünland	5,68	1,35	0,17	0,38
Ackerland	57,16	64,40	69,44	73,26

[KGG = Kleinste Gemeinsame Geometrien, FKL = Relief-Feuchte-Klassen]

Tabelle A5 : Gütemaße der Abflusssimulation im Einzugsgebiet der oberen Leine

	KGG				FKL	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
1985	0.524	0.274	0.501	0.251	0.548	0.301
1986	0.830	0.690	0.856	0.733	0.879	0.773
1987	0.877	0.769	0.912	0.832	0.912	0.831
1988	0.797	0.636	0.794	0.631	0.861	0.740
1989	0.806	0.649	0.867	0.752	0.923	0.852
1990	0.795	0.632	0.833	0.693	0.854	0.729
1991	0.865	0.748	0.910	0.829	0.780	0.608
1992	0.855	0.731	0.764	0.584	0.836	0.699
1993	0.706	0.498	0.733	0.538	0.767	0.588
Ø	0.784	0.625	0.797	0.649	0.818	0.680

[r = Korrelationskoeffizient (nach Pearson), r² = Bestimmtheitsmaß]

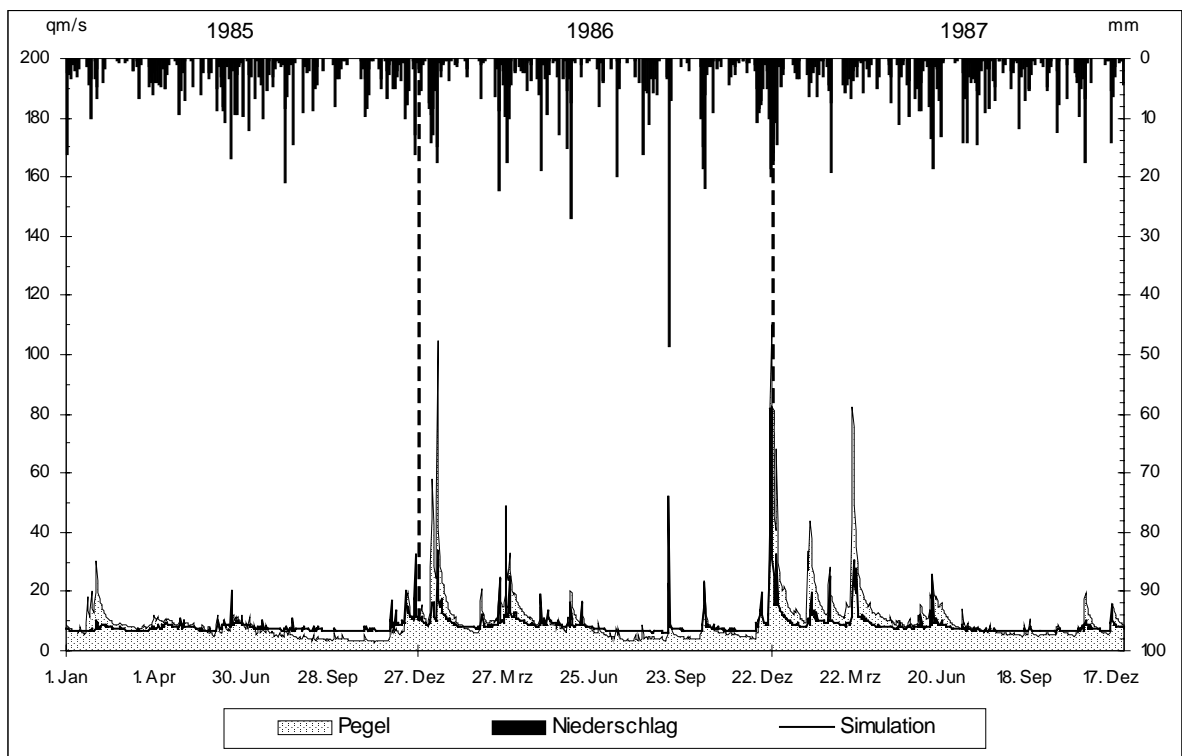


Abbildung 1a: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Clusteranalyse für das Einzugsgebiet der oberen Leine

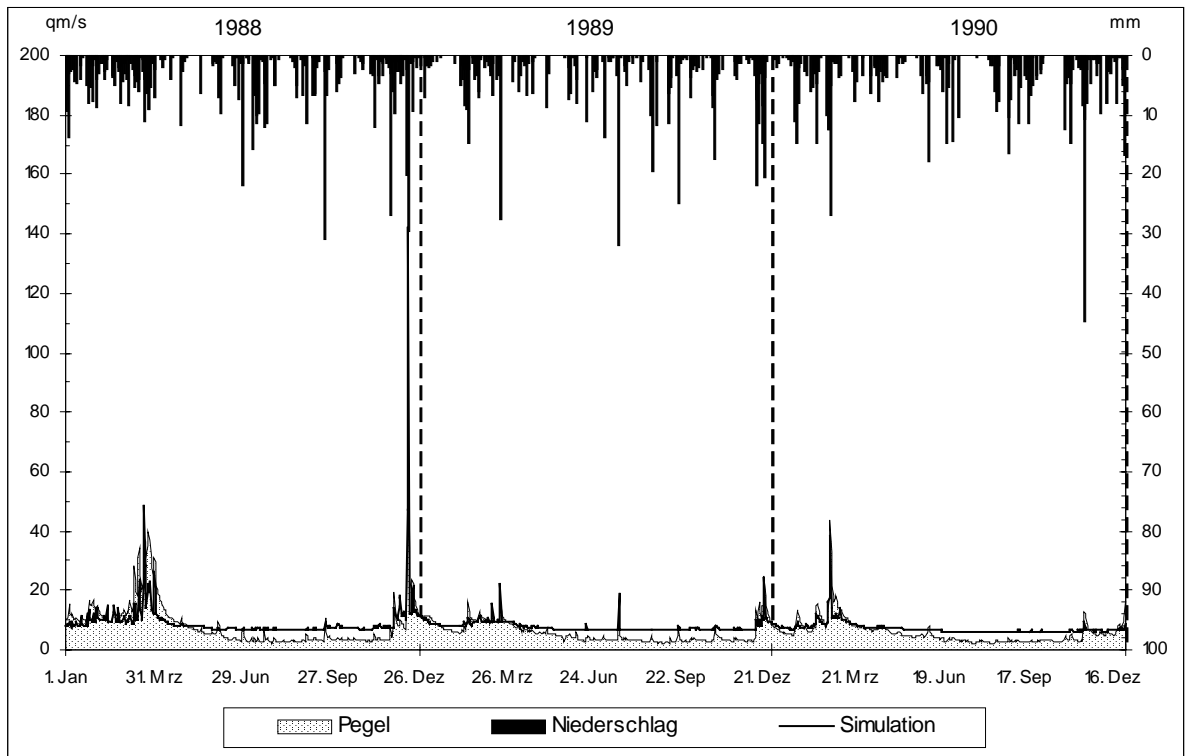


Abbildung 1b: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Clusteranalyse für das Einzugsgebiet der oberen Leine

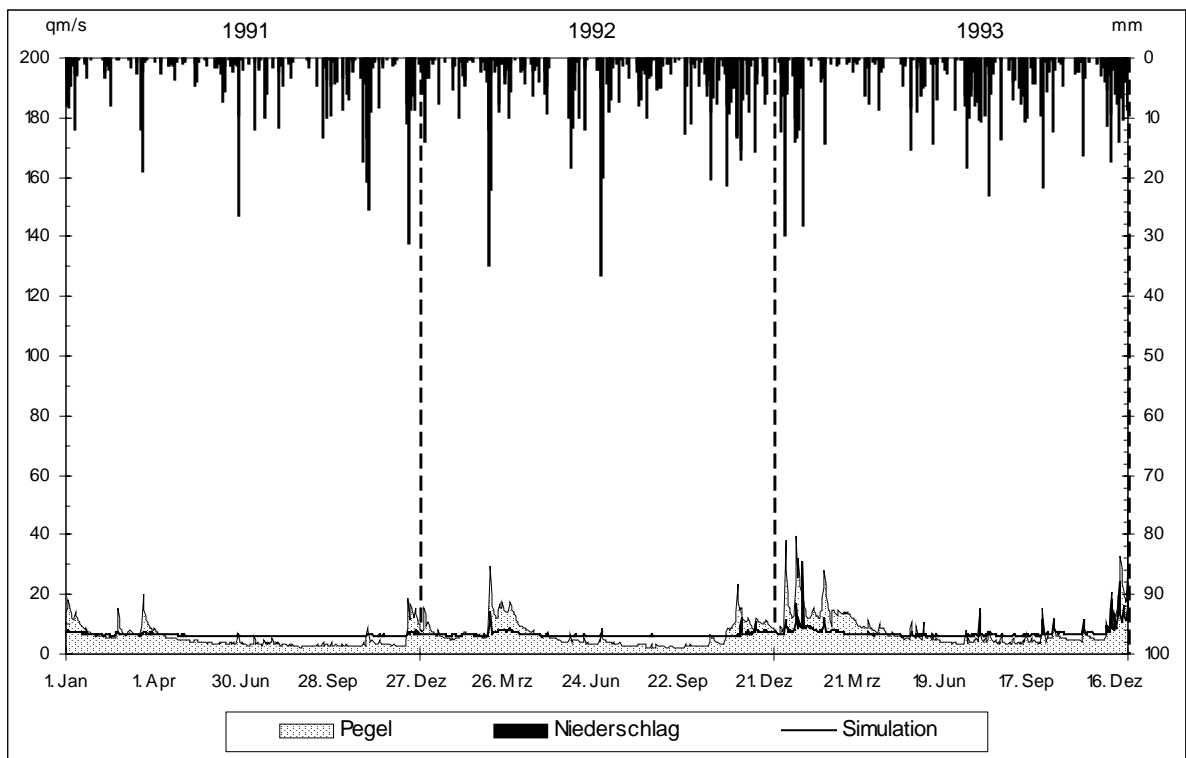


Abbildung 1c: Gemessene und simulierte Abflußganglinie der Clusteranalyse für das Einzugsgebiet der oberen Leine