

Anfang 2001 hat in den Ländern der Europäischen Union die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie begonnen. Diese fordert die Feststellung und langfristige Sicherstellung des mengenmäßigen und qualitativen Zustandes aller Gewässer und damit auch des Grundwassers.

Um in den Flussgebietseinheiten Nordrhein-Westfalens zu einer möglichst differenzierten Erhebung der für die Mengenbetrachtungen erforderlichen Grundwasserhaushaltsdaten zu kommen, haben sich der Geologische Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) und die Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) des Forschungszentrums Jülich zu einer Forschungsk Kooperation zum Thema Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen zusammengeschlossen.

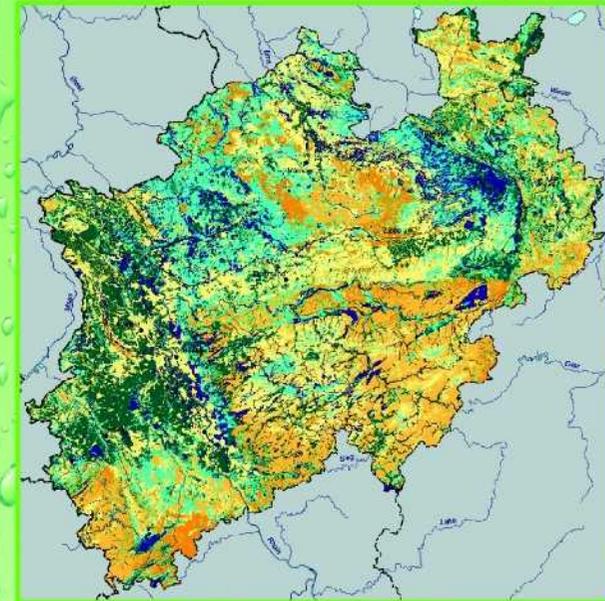
Flächendeckend für NRW wurden die Wasserbilanzgrößen reale Verdunstung, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung für die Periode 1979 – 99 quantifiziert und an Abflusspegeldata validiert. Die Berechnungen erfolgten mit dem Wasserhaushaltsmodell GROWA des FZ Jülich unter Verwendung umfangreicher, räumlich hoch aufgelöster digitaler Daten des GD NRW. Das Modell wurde im Rahmen des Vorhabens – vor allem im Hinblick auf die Berechnung der Grundwasserneubildung in Festgesteinregionen – entscheidend weiterentwickelt.

Die vorliegende Studie dokumentiert das Ergebnis dieser Kooperation, welches nur durch Bündelung des im GD NRW und des FZ Jülich vorhandenen Fachwissens und Datenmaterials realisierbar war.



Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen

H. Bogena, R. Kunkel, T. Schöbel,
H. P. Schrey und F. Wendland



Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment

Band/Volume 37

Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und
Technologische Entwicklung
in Kooperation mit dem
Geologischen Dienst NRW

Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen

Heye Bogena, Ralf Kunkel, Thomas Schöbel, Heinz Peter
Schrey und Frank Wendland

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment

Band/Volume 37

ISSN 1433-5530 ISBN 3-89336-329-7

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet
über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Herausgeber und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
ZENTRALBIBLIOTHEK
D-52425 Jülich
Telefon: 02461 61-5368 · Telefax: 02461 61-6103
e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de
Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2003

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment Band/Volume 37

ISSN 1433-5530
ISBN 3-89336-329-7

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Grundwasserneubildung als Teil des terrestrischen Wasserhaushalts	9
2.1	Grundbegriffe und Definitionen	11
2.2	Bestimmung der Grundwasserneubildung	15
2.3	Wasserhaushaltsuntersuchungen in Nordrhein-Westfalen	19
2.3.1	<i>Rheinisches Schiefergebirge</i>	19
2.3.2	<i>Niederrheinische Bucht</i>	21
2.3.3	<i>Niederrheinisches Tiefland</i>	22
2.4.4	<i>Münsterland</i>	23
2.3.5	<i>Landesweite Betrachtungen (KLIMA/GLADIS)</i>	25
3.	Das GROWA-Modell	29
3.1	Ermittlung der Gesamtabflusshöhe	31
3.1.1	<i>Ebene, grundwasserferne und unversiegelte Teilräume</i>	31
3.1.2	<i>Reliefiertes Gelände</i>	33
3.1.3	<i>Grundwasserbeeinflusste Standorte</i>	34
3.1.4	<i>Urbane Regionen</i>	38
3.1.5	<i>Rechentechnische Umsetzung</i>	39
3.2	Ableitung der Grundwasserneubildung	40
3.2.1	<i>Ermittlung der BFI-Werte aus Pegeldaten</i>	40
3.2.2	<i>Ausweisung abflusswirksamer Gebietskenngrößen</i>	43
3.2.3	<i>Zuweisung flächendifferenzierter BFI-Werte</i>	45
4.	Die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens	49
4.1	Niederrheinisches Tiefland	52
4.2	Niederrheinische Bucht	52
4.3	Westfälische Bucht und Westfälisches Tiefland	53
4.4	Weserbergland	54
4.5	Eifel und Siebengebirge	55
4.6	Süderbergland	55

5.	Datengrundlagen	57
5.1	Kartendarstellung und Aufbereitung der Datengrundlagen	60
5.2	Klimatische Datengrundlagen	61
5.2.1	<i>Niederschlagshöhe</i>	62
5.2.2	<i>Potenzielle Verdunstung nach Wendling</i>	66
5.3	Daten zur Bodenbedeckung	68
5.4	Bodenkundliche Datengrundlagen	72
5.4.1	<i>Inhalt und Aufbau der analogen Sachinformationen</i>	72
5.4.2	<i>Grundwasserstand</i>	75
5.4.3	<i>Stauhöhe</i>	79
5.4.4	<i>Pflanzenverfügbares Wasser im effektiven Wurzelraum</i>	79
5.5	Hydrogeologische Datengrundlage	87
5.5.1	<i>Geologischer Überblick</i>	87
5.5.2	<i>Hydraulische Leitfähigkeit der wasserführenden Gesteine</i>	89
5.6	Topografische Datengrundlage	92
5.7	Pegeldaten	95
6.	Modellergebnisse	99
6.1	Reale Verdunstungshöhe	101
6.2	Gesamtabflusshöhe	104
6.3	Grundwasserneubildungshöhe	107
6.4	Direktabflusshöhe	110
6.4	Dominante Abflusskomponenten	113
6.5	Austauschhäufigkeit des Bodenwasser	115
6.6	Flussgebietsbezogene Analysen	118
7.	Modellvalidierung	121
8.	Zusammenfassung und Diskussion	129
9.	Literaturverzeichnis	135
Anhang	143

1

Einleitung

Anfang 2001 hat in den Ländern der Europäischen Union die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie begonnen. Diese fordert in einer ersten Phase für alle Gewässer und damit auch das Grundwasser die Beschreibung des mengenmäßigen und qualitativen Zustandes. Zur Feststellung des mengenmäßigen Zustandes der Grundwasserkörper sind Kenntnisse über die mittlere Züsickerungsrate zum Grundwasser (Grundwasserneubildung) erforderlich. Die Grundwasserneubildung ist somit die zentrale Eingangsgröße für die Feststellung des Grundwasserdargebots in den Flussgebietseinheiten Nordrhein–Westfalens.

Der Geologische Dienst Nordrhein–Westfalen (GD NRW) und die Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) des Forschungszentrums Jülich haben sich zu einer selbsttragenden Forschungskoooperation zusammengeschlossen, um auf der Basis hochaufgelöster Datengrundlagen und aktueller Modellinstrumente die Grundwasserneubildung für Nordrhein-Westfalen zu berechnen. Auf diese Weise wird das in beiden Institutionen vorliegende Fachwissen und Datenmaterial gebündelt.

Der **Geologische Dienst NRW** ist die zentrale Institution für geowissenschaftliche Fachinformationen in Nordrhein-Westfalen. Der GD NRW erhebt und sammelt Daten über den Untergrund und die Böden, über Baugrund und Rohstoffe, Grundwasser und Erdbeben. Er wertet diese Daten aus und stellt die Ergebnisse in Datenbanken, Fachinformationssystemen und thematischen Kartenwerken bereit. Zu seinen Aufgaben gehört u.a. die Beratung von Politik und Verwaltung sowie Wirtschaft und Bürgern in Fragen des Grundwasser- und Bodenschutzes, der Erdbeben- und Risikovorsorge sowie der nachhaltigen Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen.

Ein thematischer Schwerpunkt der **Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) des Forschungszentrums Jülich** ist die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen für eine ressourcenschonende, nachhaltige Wassernutzung in makroskaligen Untersuchungsräumen. Hierzu wird mit geeigneten hydrologischen und hydrogeologischen Modellen u.a. das Wasserdargebot, die Gebietsentwässerung und der Transport von flächenhaft eingetragenen Nährstoffen in Boden und Grundwasser quantifiziert und im Hinblick auf die Entwicklung von Managementkonzepten analysiert.

Das übergeordnete Ziel der Kooperation zum Thema Grundwasserneubildung ist die landesweite, flächendifferenzierte Bestimmung und kartenmäßige Darstellung der im langjährigen Mittel vorliegenden räumlichen Variabilität der Wasserhaushaltsgrößen - hierbei insbesondere der Grundwasserneubildungshöhe - in ihrer Abhängig-

keit vom Zusammenspiel von Klima, Boden, Geologie, Topografie und Landnutzung. Die Ermittlung dieser Wasserhaushaltsgrößen sollte basierend auf dem Wasserhaushaltsmodell GROWA (Kunkel & Wendland, 1998; 2002) unter Verwendung umfangreicher, räumlich hochaufgelöster digitaler Datengrundlagen des GD NRW erfolgen. Im Rahmen des Vorhabens wurde das Modell, vor allem im Hinblick auf die Berechnung der Grundwasserneubildung in Festgesteinsregionen, weiterentwickelt.

Die vorliegende Studie dokumentiert die bisherigen Ergebnisse der Forschungskooperation. In den weiteren Phasen der Kooperation wird eine konvergente Weiterentwicklung der Wasserhaushaltsmodelle GROWA des FZ Jülich und GLADIS des Geologischen Dienstes NRW sowie eine landesweite Betrachtung des diffusen Nährstoffeintrags in die Oberflächengewässer angestrebt.

2

Grundwasserneubildung als Teil des terrestrischen Wasserhaushalts

raumanteil zum Teil erheblich reduziert, weswegen hier in der Regel, gegenüber dem unverfestigten Lockergestein, nur eine geringe Grundwasserwegsamkeit vorherrscht.

Die gesamte, aus einer Landschaft abfließende Wassermenge lässt sich aus der Wasserbilanzgleichung herleiten:

$$Q_{\text{gesamt}} = N - V_{\text{real}} + \Delta S \quad \text{Gl. 1}$$

mit	Q_{gesamt}	= Gesamtabfluss	(mm/a)
	N	= Niederschlag	(mm/a)
	V_{real}	= reale Verdunstung	(mm/a)
	ΔS	= Vorratsänderung	(mm/a)

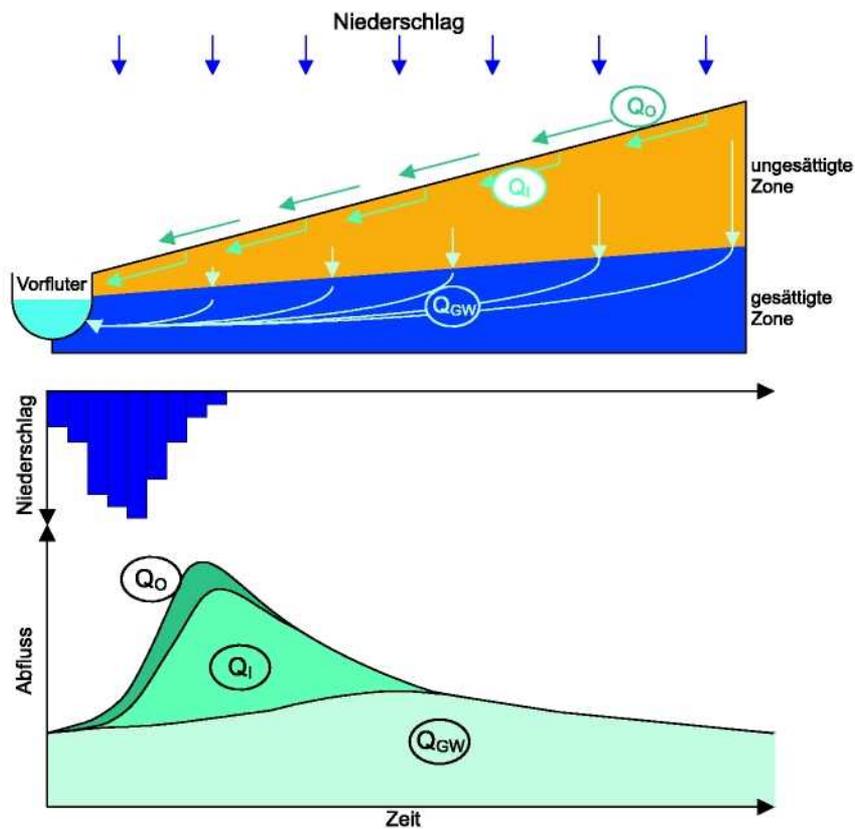


Abb. 2: Die Komponenten des Abflusses (in Anlehnung an Struckmeier, 1997); Q_o : Oberflächenabfluss, Q_i : Zwischenabfluss, Q_{GW} : Grundwasserabfluss.

Gl. 1 besagt, dass die einem Bilanzierungsraum zufließende Wassermenge, d.h. der Niederschlag, gleich der Wassermenge ist, die aus dem Bezugsraum abfließt bzw. zeitweise dort gespeichert wird. Bei langjährigen Betrachtungen kann der Term Vorratsänderung vernachlässigt werden. Der Gesamtabfluss Q_{gesamt} lässt sich in verschiedene Abflussanteile aufgliedern, die auf der Erdoberfläche, im Boden oder im Grundwasserbereich den Vorflutern mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten zuströmen. In Abb. 2 ist die Bildung der Abflusskomponenten während eines Niederschlagsereignisses sowie die aus den einzelnen Komponenten zusammengesetzte Abflusswelle im Vorfluter schematisch dargestellt.

Als Oberflächenabfluss (Q_o) wird nach DIN 4049-3 der Teil der abfließenden Wassermenge bezeichnet, der, ohne in den Boden eingedrungen zu sein, oberirdisch einem Vorfluter zuströmt. Nach einem Niederschlagsereignis erreicht der Oberflächenabfluss den Vorfluter im allgemeinen nach wenigen Stunden (Baumgartner & Liebscher, 1990). Von Peschke (1997) und Schwarze et al. (1991) wird dieser Abflussanteil auch als „schneller Direktabfluss“ bezeichnet.

Beim Eindringen in den Boden gelangt das Wasser entweder direkt in den Grundwasserbereich oder an eine wenig wasserleitende Schicht über dem eigentlichen Aquifer. Im letzten Fall wird das infiltrierende Wasser gestaut und fließt, soweit es nicht durch die Stauschicht versickert, dem größten Gefälle folgend oberhalb des eigentlichen Grundwasserbereiches in der wasserungesättigten Zone dem Vorfluter zu. Diese Abflusskomponente wird in DIN 4049-3 als Zwischenabfluss bzw. Interflow (Q_i) bezeichnet. Die Fließzeit des Zwischenabflusses bis zum Eintritt in den Vorfluter ist größer als die des Oberflächenabflusses (einige Tage), so dass ein späteres Ansteigen und langsames Abklingen der Abflussganglinien auftritt (siehe Abb. 2). Häufig wird in einen „unmittelbaren“ (schnellen) und einen „verzögerten“ (langsamen) Zwischenabfluss unterschieden, wobei dem „unmittelbaren Zwischenabfluss“ wesentlich höhere Volumenanteile zugeschrieben werden (Baumgartner & Liebscher, 1990). Peschke (1997) und Schwarze et al. (1991) bezeichnen diese Abflusskomponente als „verzögerten Direktabfluss“.

Die Summe aus Oberflächen- und Zwischenabfluss wird in der DIN 4049-3 als Direktabfluss (Q_d) bezeichnet. Der Direktabfluss ist damit die Summe aller Abflusskomponenten, welche mit nur geringer Zeitverzögerung nach einem abflussauslösenden Niederschlagsereignis den Vorfluter erreichen und eine schnelle Anschwellung des Vorfluters hervorrufen kann. In der vorliegenden Untersuchung wurde dieser Definition gefolgt.

Als Basisabfluss (Q_B) wird nach DIN 4049-3 der Teil des Abflusses bezeichnet, der nicht zum Direktabfluss zählt. Die Fließzeiten des Basisabflusses sind im allgemeinen deutlich höher als die der Direktabflusskomponenten. Von Peschke (1997) und Schwarze et al. (1991) wird der Basisabfluss in den „kurzfristigen“ Basisabfluss und den „langfristigen“ Basisabfluss unterschieden. Der langfristige Basisabfluss entspricht dabei weitestgehend der Grundwasserneubildung (GW_{neu}) (Peschke, 1997). Dieses Wasser bewegt sich als grundwasserbürtiger Abfluss (Q_{GW}) dem hydraulischen Potential folgend dem Vorfluter zu (siehe Abb. 2).

Nach DIN 4049-3 bezeichnet der Begriff der Grundwasserneubildung den Zugang von infiltriertem Wasser durch den Sickerraum zum Grundwasser. Die Infiltration ist der Zugang von Wasser u.a. aus dem Niederschlag in den Bodenraum. Während die Infiltration an der Obergrenze des durchwurzelten Bodenraumes gemessen wird, findet die eigentliche Grundwasserneubildung an der Oberfläche des Grundwasserkörpers statt (siehe Abb. 1). Von Grundwasserneubildung spricht man nur für das oberste Grundwasserstockwerk, wohingegen die Speisung von tieferen Stockwerken als Zusi-ckerung bezeichnet wird. Die mittlere jährliche Grundwasserneubildungsrate einer Land-schaft kann somit durch folgende Gleichung bilanziert werden:

$$GW_{neu} = N - V_{real} - Q_D \quad \text{Gl. 2}$$

mit	GW_{neu}	= mittlere Grundwasserneubildungsrate	(mm/a)
	N	= mittlere Niederschlagshöhe	(mm/a)
	V_{real}	= mittlere reale Verdunstungshöhe	(mm/a)
	Q_D	= mittlere Direktabflusshöhe	(mm/a)

Eine Auftrennung des Gesamtabflusses in die Hauptabflusskomponenten Grundwas-serneubildung bzw. Grundwasserabfluss und Direktabfluss ist eine wichtige Voraus-setzung für eine Analyse des Landschaftswasserhaushalts. Entscheidend hierbei ist, dass die Direktabflussanteile in der Regel Fließzeiten von weniger als einer Woche aufweisen, bevor sie ein Oberflächengewässer erreichen, während beim Grundwasser-abfluss Fließzeiten von bis zu mehreren Jahrzehnten auftreten können.

2.2 Bestimmung der Grundwasserneubildung

In diesem Kapitel wird kurz auf vorhandene Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserbildungshöhe eingegangen. In der Regel werden in Abhängigkeit von den hydro(geo)logischen Gegebenheiten, der Zielsetzung der Untersuchung, der Datenlage und der Größe des betrachteten Gebietes unterschiedliche Verfahren angewendet.

Die in Tab. 1 aufgeführten Verfahren wurden für unterschiedliche räumliche Auflösungen (von der detaillierten Betrachtung einzelner Hänge bis hin zu Einzugsgebieten) und für unterschiedliche zeitliche Auflösungen (von der ereignisbezogenen Betrachtung bis hin zu Angaben langjähriger Mittel) entwickelt. Jedes Verfahren besitzt gewisse Vor- und Nachteile, so dass für das konkrete Anwendungsgebiet und den Anwendungszweck das angemessene Verfahren auszuwählen ist. Allen aufgeführten Verfahren ist jedoch gemeinsam, dass sie entweder nur in kleinen Einzugsgebieten einsetzbar sind oder nur integrale Werte für ein Gesamteinzugsgebiet liefern.

Bei der Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate für große Landschaftsräume bzw. Flusseinzugsgebiete steht die Betrachtung größerer Zeiträume (langjährige Mittel) sowie eine möglichst hohe räumliche Differenzierung im Vordergrund. Die eingesetzten Berechnungsverfahren müssen dies berücksichtigen. Geeignete großräu-

Tab. 1: Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate (nach Renger et al., 1977, erweitert).

Art des Untersuchungsgebiets	Einsetzbare Verfahren	Nur unter besonderer Voraussetzung anwendbare Verfahren
überwiegend Lockergestein (mit Vorfluter)	MoMNO-Verfahren MoMNO _r -Verfahren A _n -Linien-Verfahren Trockenwetter-Abflussmessung Lysimeter Bodenwasserhaushalt Wasserhaushaltsgleichung Deterministische Modelle	TWA-Statistik Quellschüttungsmessungen Unterirdischer Abstrom Wasserwerksmethode Chloridmethode Tritium-Markierung
überwiegend Lockergestein (ohne Vorfluter)	Lysimeter Bodenwasserhaushalt Unterirdischer Abstrom Wasserhaushaltsgleichung Wasserwerksmethode Deterministische Modelle	Chloridmethode Tritium-Markierung
überwiegend Festgestein (mit Vorfluter)	MoMNO _r -Verfahren A _n -Linien-Verfahren Trockenwetter-Abflussmessung Wasserhaushaltsgleichung Deterministische Modelle	MoMNO-Verfahren TWA-Statistik Quellschüttungsmessungen Lysimeter Grundwassermodelle Wasserwerksmethode

mig einsetzbare Verfahren sollten darüber hinaus auf allgemein zugänglichen Eingabedaten beruhen und flächendeckend einsetzbar sein.

Ein generelles Problem bei der Modellierung des Wasserhaushalts in großen Flusseinzugsgebieten ist die Modellunsicherheit, die aus oft stark generalisierten Eingangsdaten einerseits und vielfach vereinfachenden Berechnungsverfahren andererseits resultiert. Viele Modellparameter können nicht direkt aus physikalischen Messgrößen abgeleitet werden, sondern müssen abgeschätzt oder während der Modellierung kalibriert werden. Vor diesem Hintergrund und aufgrund der Tatsache, dass für die Prognose langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildungshöhe eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung der Abflussprozesse nicht angemessen ist, wurde für das vorliegende Vorhaben ein empirisches Modell für geeignet erachtet.

Eine Auswahl von empirischen Wasserhaushaltmodellen, die eine flächendeckende und flächendifferenzierte Berechnung von Grundwasserneubildungshöhen auf der Makroskala ermöglichen, ist in Tab. 2 aufgelistet. Diese Verfahren berechnen die Wasserhaushaltsgrößen in Form mittlerer Jahressummen aus empirisch ermittelten Beziehungen zu unterschiedlichen Gebietskenngrößen (Klima, Boden, Geologie, Relief etc.). In der Regel wurden hierzu aus Feld- und Lysimeteruntersuchungen gewonnene Punktdaten genutzt, die in die Fläche übertragen wurden. Sie werden verbreitet bei der Erstellung wasserwirtschaftlicher Übersichten eingesetzt.

Tab. 2: Auswahl makroskaliger empirischer Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate.

	DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980)	GABRIEL, ZIEGLER & JACOBS (1993) GEOFEM	GLUGLA & FÜRTIG (1997) ABIMO	KUNKEL & WENDLAND (1998) GROWA	GD NRW (2002) KLIMA/GLADIS
Einsatzbereich	Locker- und Festgestein	Festgestein	Lockergestein	Locker- und Festgestein	Lockergestein
Eingangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> ○ N_{Jahr} ○ Bodenart ○ Vegetation ○ Flurabstand ○ Reliefenergie 	<ul style="list-style-type: none"> ○ N_{Jahr} ○ Gewässerzahl GZ ○ hydrologische Gesteinseinheit 	<ul style="list-style-type: none"> ○ N_{Jahr} ○ ET_{pot} n. Penman ○ Effektivitätsparameter n ○ Landnutzung ○ Flurabstand ○ nutzbare Feldkapazität 	<ul style="list-style-type: none"> ○ N_{Sommer} ○ N_{Winter} ○ ET_{pot} ○ W_{pl} ○ Landnutzung ○ Versiegelung ○ Hangneigung ○ Flurabstand ○ hydrogeologische Gesteinseinheit 	<ul style="list-style-type: none"> ○ N_{Tag} ○ ET_{Tag} ○ W_{pl} ○ k_f / k_u ○ Landnutzung ○ Staunässe ○ Flurabstand ○ Hangneigung
Anwendungsbereiche	Niedersachsen, alte Bundesländer	Festgesteinsgebiete der ehem. DDR, Thüringen	Lockergesteinsgebiete der ehem. DDR, Sachsen-Anhalt	deutscher Teil des Elbeinzugsgebiets, Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen
Quellen	Wendland (1992), Grossmann (1997)	Jordan & Weder (1995)	Glugla, Eylich & König (1986), ATV-DVWK (2002)	Dörhöfer et al. (2001), Kunkel & Wendland (2002)	DIN 19687

Bei dem Verfahren von Dörhöfer & Josopait (1980) wird die Grundwasserneubildungshöhe aus der Gesamtabflusshöhe durch Subtraktion der Verdunstungs- und Direktabflussanteile vom Niederschlag bestimmt. Die Verdunstungshöhe wird dabei statisch durch die Bodenart und die Vegetation festgelegt und kann eine Obergrenze von 600 mm als Maximalverdunstung des mitteleuropäischen Klimaraumes nicht überschreiten. Dörhöfer & Josopait (1980) fanden eine enge Korrelation zwischen Reliefeigenschaften und Direktabflussanteilen. Dem entsprechend wird in ihrem Verfahren der Anteil der Grundwasserneubildung vom Gesamtabfluss im wesentlichen durch die Reliefenergie und zusätzlich durch den mittleren Flurabstand bestimmt. Das Verfahren von Dörhöfer & Josopait (1980) wurde beispielsweise für die Erstellung wasserwirtschaftlicher Rahmenpläne in Niedersachsen sowie zur Abschätzung der Grundwasserneubildungshöhe in den alten Bundesländern (Wendland, 1992) eingesetzt.

Von Gabriel et al. (1986, 1993) stammt das Verfahren GEOFEM zur Berechnung der grundwasserbürtigen Abflussanteile in Festgesteinsregionen. Das Verfahren greift auf das Lithofaziesprinzip zurück, dem eine Klassifizierung der Festgesteine anhand ihrer hydrogeologischen Eigenschaften zugrunde liegt. Hierzu wurden Abflussspendenschlüssel für verschiedene hydrogeologische Einheiten in hydrologisch abgrenzbaren Einzugsgebieten, sog. Gebietslysimeter, abgeleitet und mit Abflusswerten in Vorflutern korreliert. Unter Verwendung berechneter Gesamtabflusshöhen werden mit GEOFEM die Abflusskomponenten quantifiziert. Das Verfahren wurde auf verschiedene Festgesteinsregionen in den neuen Bundesländern angewendet, z.B. in Thüringen (MLNU, 1996).

Das Model ABIMO (Glugla & Fürtig, 1997) ist eine Weiterentwicklung des Programms RASTER (Glugla et al., 1976), welches zur Ermittlung der mittleren Jahressumme der realen Verdunstung entwickelt wurde. Bei diesem Ansatz werden ausschließlich die Vertikalprozesse des Landschaftswasserhaushalts an der Grenzfläche Atmosphäre/Biosphäre/Lithosphäre betrachtet (Lahmer et al., 2000). Kern dieses Modells ist die Bagrov-Beziehung (Bagrov, 1953), eine nichtlineare Beziehung zwischen Niederschlag und realer Verdunstung, bei der die Speichereigenschaften einer verdunstenden Fläche durch einen empirischen Effektivitätsparameter ausgedrückt werden. Der Effektivitätsparameter kann mittels Regressionsgleichungen in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften (nutzbare Feldkapazität, effektive Ausschöpfungstiefe) und der Landnutzung bestimmt werden (ATV-DVWK, 2002). In jüngerer Vergangenheit fand dieses Modell Anwendung bei Wasserhaushaltsuntersuchungen in Sachsen-Anhalt (Pfützner, 2001) und Brandenburg (Lahmer et al., 2000), sowie bei der Berechnung des Gesamtabflusses im Hydrologischen Atlas Deutschlands (HAD, 1998).

Von Kunkel & Wendland (1998, 2002) wurde das Modell GROWA zur Simulation von Gesamt- und Direktabfluss sowie der Grundwasserneubildung entwickelt. Zur Bestimmung der langjährigen realen Verdunstungshöhe wurde das Verfahren von Renger & Wessolek (1996) implementiert, bei dem durch Heranziehung von Lysimeterdaten für verschiedene Landnutzungstypen lineare Beziehungen zwischen der realen Verdunstungshöhe und klimatischen sowie bodenphysikalischen Standortfaktoren ermittelt wurden (siehe Kap. 3.1). Das Renger-Wessolek-Verfahren zur Verdunstungsberechnung wurde um Ansätze zur Berücksichtigung des Reliefs, des Grundwassereinflusses und der Versiegelung erweitert. Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung wird der Gesamtabfluss in die Komponenten Direktabfluss und Basisabfluss separiert. Dies erfolgt auf Basis gebietsspezifischer Baseflow Indizes (siehe Kap. 3.2). Das Modell wurde erfolgreich auf den deutschen Teil des Elbeeinzugsgebiets (Kunkel & Wendland, 1998, 2002), auf das Bundesland Niedersachsen (Dörhöfer et al., 2001) sowie Hamburg (Tetzlaff et al., 2002) angewendet.

Das Simulationsmodell KLIMA/GLADIS des Geologischen Dienstes NRW (Schrey, 1993) ist im Anhang der DIN 19687 beschrieben. Mit Hilfe des Modells wird auf Basis der Bodenkarte von NRW im Maßstab 1 : 50.000 (siehe Kap. 5.4) unter Einbeziehung des digitalen Höhenmodells DGM25 und Niederschlags- und Klimadaten für jede dargestellte Bodenfläche eine mittlere jährliche Sickerwasserrate (1961 bis 1990) aus dem durchwurzelteten Boden ermittelt. Unterschiedliche Vegetationsbedeckungen können durch spezifische Ansätze der Interzeption und Verdunstung nach Haude unter Rückgriff auf ATKIS- oder CORINE-Daten berücksichtigt werden. Durch die enge Anbindung an die digitale Bodenkarte (BK50) ist eine direkte Verknüpfbarkeit der Sickerwasserraten mit den aus der BK50 direkt abgeleiteten Bodenwasserhaushaltsparametern gegeben. Mittels verschiedener Rechenoperationen lassen sich zusätzlich leicht Austauschhäufigkeiten oder Verweilzeiten des Bodenwassers ermitteln. Nach LUA NRW (2000) liefert das Modell für den Lockergesteinsbereich recht plausible Sickerwasserraten.

2.3 Wasserhaushaltsuntersuchungen in Nordrhein-Westfalen

In den vergangenen Jahren sind eine Reihe von Untersuchungen zum Wasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen durchgeführt worden. Makroskalige Betrachtungen sind hierbei allerdings in der Minderzahl; das Gros der Arbeiten behandelt den Bodenwasser- oder Grundwasserhaushalt von Standorten oder mesoskaligen Einzugsgebieten. An dieser Stelle wird eine Auswahl groß- und kleinräumiger Untersuchungen gegeben, ohne hierbei den Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen.

2.3.1 *Rheinisches Schiefergebirge*

Die Festgesteinsregionen Nordrhein-Westfalens beschränken sich im wesentlichen auf das Weserbergland und das Rheinische Schiefergebirge. Hier wurden in der Vergangenheit zahlreiche hydrogeologische Untersuchungen zum Grundwasserangebot durchgeführt. Dabei wurden überwiegend Quellschüttungsuntersuchungen (z.B. Weyer, 1972 und Deutloff, 1974) aber auch Auswertungen von Grundwasserförderungen aus Brunnen (z.B. Hilden & Kamp, 1974) vorgenommen.

Weyer (1972) hat auf der Basis von weit über 1500 Messungen des Trockenwetterabflusses für über 1000 kleine Flusseinzugsgebiete im Karbon und Devon des Rheinischen Schiefergebirges eine Charakterisierung wichtiger Festgesteinseinheiten hinsichtlich der Grundwasserneubildung vorgenommen. In Tab. 3 sind aus dieser Arbeit Beispiele für Trockenwetterabflüsse im Rheinischen Schiefergebirge in Abhängigkeit von der Petrographie und der hydrodynamischen Gegebenheiten dargestellt. Aus der Tabelle geht hervor, dass für die karbonischen und devonischen Tonsteine und Tonschiefer überwiegend Werte um $1,5 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ (ca. 50 mm/a) festgestellt werden konnten. Hierbei muss allerdings von einem Mindestwert gesprochen werden, da es in der Winterperiode auch zu höheren Raten kommen kann. Weyer (1972) stellte weiterhin fest, dass der Trockenwetterabfluss auch eine zeitliche Konstanz aufweist und somit unabhängig von den klimatischen Schwankungen ist.

Die Grauwacken- und Sandsteingebiete zeigen deutlich höhere Trockenwetterabflüsse als Gebiete mit vorherrschenden tonigen Gesteinen. Auch die Variation der Werte ist hier höher. Weyer (1972) gibt für die typischen Gebiete dieses Gesteinstyps Werte zwischen $4,5$ und $9 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ (140 - 280 mm/a) an und begründet dies mit

Tab. 3: Trockenwetterabflüsse im Rheinischen Schiefergebirge in Abhängigkeit von der Petrographie und der hydrodynamischen Standortsituation (aus Weyer, 1972).

Stratigraphie	Messgebiet	Petrographie	Klüftung	Trockenwetterabfluss	
				l/s · km ²	mm/a
Karbon - Devon	Kreis Arnsberg	vorwiegend Tonstein	schwach	1,3-1,6	41-50
Oberkarbon		Tonstein und Sandstein	mittel	2,5	79
		hoher Sandsteinanteil	mittel	3,2	101
Unterkarbon		Sandstein Grauwacken	stark	5-9	158-284
		Platten- und Kieselkalk	stark	15-16	473-505
Oberdevon		Grauwackensandstein	stark	9-10	284-316
		Plattenkalk und Flinzkalk	stark	15	473
	Massenkalk	Störungen	>100	>3156	
Karbon - Devon	Kreis Brilon	Tonstein mit Sandsteinbänken	schwach	1,5	47
Oberkarbon		s.o. mit höheren Anteil an Sandsteinbänken	mittel	3,2	101
Unterkarbon		Tonstein	schwach	1,4	44
		Tonschiefer mit quarzitischen Sandsteinen	mittel	3	95
Mitteldevon		Tonschiefer mit Diabas	stark	5-6	158-189
		s.o. durch Intrusion aufgelockert	gestört	8-9	252-284
Unterdevon	Tonschiefer mit Einlagerungen von Keratophyr und quarzitischen Sandsteinen	gestört	~8	~252	
Mitteldevon	Drolshagen/ Eckenhagen	feinkörniger Sandstein	mittel	8-9	252-284
Givet		s.o. mit Kalksteinlinsen	mittel	36-40	1136-1262
Eifelstufe		sandreiche Ausbildung	mittel	5	158
		tonreiche Ausbildung	schwach	1,8	57
Emsstufe		Tonstein mit Sandsteineinlagerungen s.o. mit Einfluss einer Störungszone	schwach gestört	1,5 13-16	47 410-505
Unterdevon	Morsbach	Sandreicher Tonschiefer	schwach	1,5	47
Oberes Siegen			mittel	3-4	95-126
			Störung	5-7	158-221
Mittleres Siegen		Tonschiefer	schwach	1,5	47
Unterdevon	Eitdorf	überwiegend Ton- u. Siltstein, örtlich mit Sandsteineinlagerungen	schwach	1,9	60
Oberes Siegen			schwach	2,5	79
Mittleres Siegen		15-30% Sandstein homogen in Tonstein eingelagert			

einer stärkeren Variabilität der Hohlraumbildung in den verschiedenartigen Sandsteinen und Grauwacken bei gleicher tektonischer Beanspruchung.

Die weitaus höchsten Trockenwetterabflüsse werden in den Kalksteingebieten erreicht, wobei Weyer (1972) Werte zwischen 13 und 16 l/s·km² (410-505 mm/a) für die Typuslokalitäten angibt. Bei den Kalksteingebieten muss zudem beachtet werden, dass bei Heranziehung der morphologischen Wasserscheiden aufgrund ausgeprägter Verkarsungerscheinungen die tatsächlichen Einzugsgebiete der Vorfluter deutlich unter- bzw. überschätzt werden können. Nur so lässt sich der extrem hohe Wert für den Mitteldevonischen Massenkalk (über 100 l/s·km² bzw. 3155 mm/Jahr) erklären. Ein weiterer Faktor, der zu hohen Trockenwetterabflüssen und Grundwasserneubildungsraten führen kann, sind Störungszonen, die durch besondere tektonische Beanspruchung, aber auch durch vulkanische Aktivität entstehen können (siehe Tab. 3).

2.3.2 *Niederrheinische Bucht*

Die Niederrheinische Bucht ist durch Lockergesteinsaquifere gekennzeichnet, so dass die Abhängigkeit von Gesteinseinheit und Grundwasserneubildung bei weiten nicht so ausgeprägt ist wie in den Festgesteinsregionen. Der Erftverband, dessen Verbandsgebiet im wesentlichen in der Niederrheinische Bucht liegt, hat aus diesem Grunde ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Grundwasserneubildung angewendet. Hierbei wurde die Grundwasserneubildung aus der Differenz von Niederschlagshöhe und der potenziellen Verdunstungshöhe nach Turc (1961) ermittelt. Des Weiteren wurde der Direktabflussanteil auf Basis von Abflusswerten differenziert für die hydrogeologisch abgrenzbaren Teilräume (Eifel, Venloer-, Rheintal-, Erft- und Rurscholle) berücksichtigt. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist in Abb. 3 in Form einer für dieses Gebiet vom Erftverband herausgegebenen Isolinienkarte zur mittleren Grundwasserneubildung dargestellt (Hoffmann, 1995).

Wie die Abb.3 zeigt, liegt die auf diese Weise berechnete Grundwasserneubildung im zentralen bis südlichen Bereich des Verbandsgebiets zwischen 5 und 6 l/s*km² (160 und 190 mm/a). In den westlichen, nördlichen und östlichen Randbereichen werden Grundwasserneubildungsraten von mehr als 8 l/s*km² (250 mm/a) erreicht. Für bis in das Jahr 2030 in Anspruch genommene Abbaugelände der Braunkohle wird unterstellt, dass es aufgrund der stärker ausgeprägten Oberflächenentwässerung zu einer verminderten Grundwasserneubildung in Höhe von 3 l/s*km² (etwa 95 mm/a) kommt.

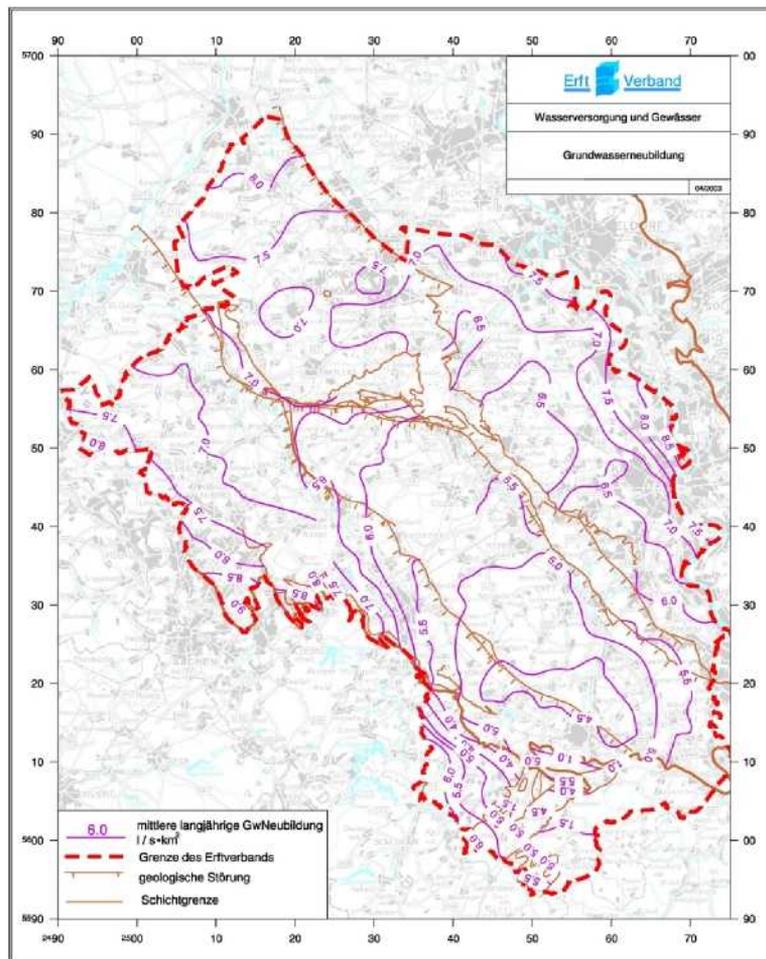


Abb. 3: Grundwasserneubildung in der Niederrheinischen Bucht für das Verbandsgebiet des Ertfverbands.

2.3.3 Niederrheinisches Tiefland

Für die Großlandschaft Niederrheinisches Tiefland existieren keine Gesamtbetrachtungen zur Grundwasserneubildung, wohl aber eine Vielzahl von Teilgebietsuntersuchungen. An dieser Stelle werden einige Untersuchungen lokaler Wasserverbände aufgeführt.

Burwick et al. (1982) haben die Grundwasserneubildung für das unterirdische Einzugsgebiet der Schwalm bis zum Pegel Pannenmühle untersucht. Hierbei wurde der

Grundwasserabfluss durch Ganglinienseparation ermittelt. Weiterhin wurden der Grundwasserverlust durch Aussickerung in tieferliegende Stockwerke, Grundwasserentnahmen und –einleitungen sowie Grundwasservorratsänderungen berücksichtigt. Um eine gebietsbezogene Grundwasserneubildung zu erhalten, wurde das unterirdische Einzugsgebiet für verschiedene Jahre auf Basis von Grundwassergleichplänen ermittelt. Je nach Grundwasserstand schwankte die Einzugsgebietsgröße zwischen 103,7 km² (1973) und 133,8 km² (1970). Insgesamt wurden sechs Wasserwirtschaftsjahre zwischen 1957 und 1976 zur Ermittlung der langjährigen Grundwasserneubildungsrate herangezogen. Burwick et al. (1982) ermittelten auf diese Weise eine mittlere Grundwasserneubildungsrate von rund 7,5 l/s*km² (ca. 240 mm/a) für das unterirdische Einzugsgebiet der Schwalm bis zum Pegel Pannenmühle. Die Autoren gehen jedoch davon aus, dass aufgrund von landwirtschaftlichen Bewässerungsmaßnahmen mit Werten von über 250 mm/Jahr gerechnet werden kann.

Spelter & Trumpff (1982) haben eine vergleichbare Untersuchung für das unterirdische Einzugsgebiet der Niers bis zum Pegel Wickrathberg (Fläche: 42,5 km²) durchgeführt. In dieser Untersuchung wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Durchlässigkeiten der Lockergesteinsschichten auf die Grundwasserneubildung überschlägig berücksichtigt. Die Autoren geben für Ihr Untersuchungsgebiet eine mittlere Grundwasserneubildungsrate von 186,2 mm/a an.

Hellekes & Guenther (1982) berechneten ebenfalls für das Nierseinzugsgebiet die Grundwasserneubildung, jedoch für das unterirdische Einzugsgebiet bis zum Pegel Trabrennbahn mit einer Gesamtfläche von 181 km². Sie ermittelten eine mittlere Grundwasserneubildung von etwa 208 mm/a. Bei der Berücksichtigung von Tiefenversickerung und Rohrnetzverlusten und veränderten Einzugsgebietsgrößen geben die Autoren eine maximale Grundwasserneubildung von etwa 278 mm/a an.

2.4.4 *Münsterland*

Für das Münsterland gibt Schroeder (1983) Werte der Grundwasserneubildung unter Wald auf Basis von Auswertungen der Großlysimeteranlage St. Arnold an. Die Ergebnisse stützen sich auf eine siebzehnjährige Datenbasis von Lysimeterabläufen unter Grünland, Eichen-Buchenwald und Weymouthskiefernwald. Betrachtet wurden die Differenz der Sickerwasserabläufe aus Wald und Grünland, die vor allem bestandes- und verdunstungsabhängig sind (Schroeder, 1983). Der Autor schließt aufgrund dieser Beobachtungen darauf, dass im Münsterland mit einer Minderung der Grundwasserneu-

bildungsrate unter Nadelwald von 220 mm/a und unter Laubwald von 100 mm/a gegenüber Grünland zu rechnen ist.

Schroeder & Wyrwich (1990) beschreiben eine auf Dörhöfer & Josopait (1980) beruhende Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung für die Gebiete der Halterner Sande (Gesamtfläche: 1082 km²) und der Ijsselmeerszuflüsse. In Abhängigkeit der Standortfaktoren Bodengruppe, Bodenbedeckung wurden 14 unterschiedliche mittlere Verdunstungshöhen ermittelt, die zum Teil auf den Lysimeterauswertungen von Schroeder (1983) beruhen (siehe Tab. 4). In Anlehnung an Dörhöfer & Josopait (1980) wurde zur Bestimmung der Grundwasserneubildung der in Abhängigkeit von Bodengruppe, Reliefenergie und Bewuchs berechnete Direktabfluss vom Gesamtabfluss abgezogen. Für die Validierung wurde der Engelradingbach im Bereich der Halterner Sande betrachtet. Für das 5,58 km² große unterirdische Einzugsgebiet des Pegels Heiden wurde mit dem MoMNQ-Verfahren ein mittlerer jährlicher Grundwasserabfluss von 171 mm (Zeitreihe: 1965-1985) bestimmt und mit dem Schroeder & Wyrwich-Verfahren von 185 mm berechnet.

Struckmeier (1990) untersuchte den Wasserhaushalt des Münsterländer Beckens und analysierte dessen hydrologische Systeme. Das Münsterländer Becken ist eine große geologische Struktureinheit, dessen Fläche von nahezu 11.000 km² nahezu vollständig zu Nordrhein-Westfalen gehört. Die Grundwasserneubildungsrate ermittelte Struckmeier (1990) durch Subtraktion eines Reduktionsbetrages, der durch Lysimeteruntersuchungen in Abhängigkeit vom Niederschlag, geologisch-lithologischen Parametern und der Bodenbedeckung ermittelt wurde, vom mittleren Jahresniederschlag (Periode 1931-1960). In Tab. 5 sind die entsprechenden Werte aufgelistet. Des Weiteren wurden Abschläge in Abhängigkeit von der Hangneigung nach Dörhöfer & Josopait (1980), zum Flurabstand nach Renger & Strebel (1983) und zum Versiegelungsgrad berücksichtigt.

Tab. 4: Mittlere Verdunstungshöhen in Abhängigkeit der Bodengruppe und der Bodenbedeckungsarten in mm/a nach Schroeder & Wyrwich (1990); N: Jahresniederschlag.

	Acker, Grünland	Wald			bebaute Flächen	Wasserflächen
		Laub	Misch	Nadel		
Terrestrische Sandböden	380	480	540	600	0,2 N	1,0 N
Terrestrische Lehmböden	440	540	600	660		
Semiterrestrische Böden	550	650	700	750		

Tab. 5: Reduktionsbeträge in Abhängigkeit von der geologisch-pedologischen Einheit und der Bodennutzung in mm/a (Struckmeier, 1997).

Geologisch-pedologische Einheit	Bodennutzung	
	Acker- und Grünland	Wald
Sand, Sand und Kies	360	440
Geschiebelehm	480	490
Ton und Schluff	530	530
verkarsteter Kalkstein	400	500
Kalkstein, Kalkmergelstein u. Kalksandstein	500	580
Mergelstein u- Tonmergelstein	530	580
Sandlöß über Sand oder Kalkstein	420	480
geringmächtiger Sand über Ton, Schluff o. Mergelstein	510	550
Geschiebelehm über Sand o. Kalkstein	430	460
Geschiebelehm über Mergelstein u. Tonmergelstein	700	700

Auf Grundlage dieser Methodik wurde von Struckmeier (1990) eine flächendeckende Karte für die Westfälische Bucht erstellt, welche die regionale Verteilung der Grundwasserneubildung für die Periode 1931-1960 widerspiegelt. Hiernach werden die höchsten Raten (400 bis 550 mm/a) im nordöstlichem Teil des Beckens (Vorland des Teutoburger Waldes und Osnings) und im Westen (Haltener Sande, oberes Dinkel- und Vechtegebiet) erreicht. Geringe Raten (50 bis 150 mm/a) sind auf das südwestliche Ruhrgebiet und die zentralen Bereiche des Münsterländer Beckens (vorwiegend Geschiebemergel- und Emschermergel-Gebiete) beschränkt.

2.3.5 Landesweite Betrachtungen (KLIMA/GLADIS)

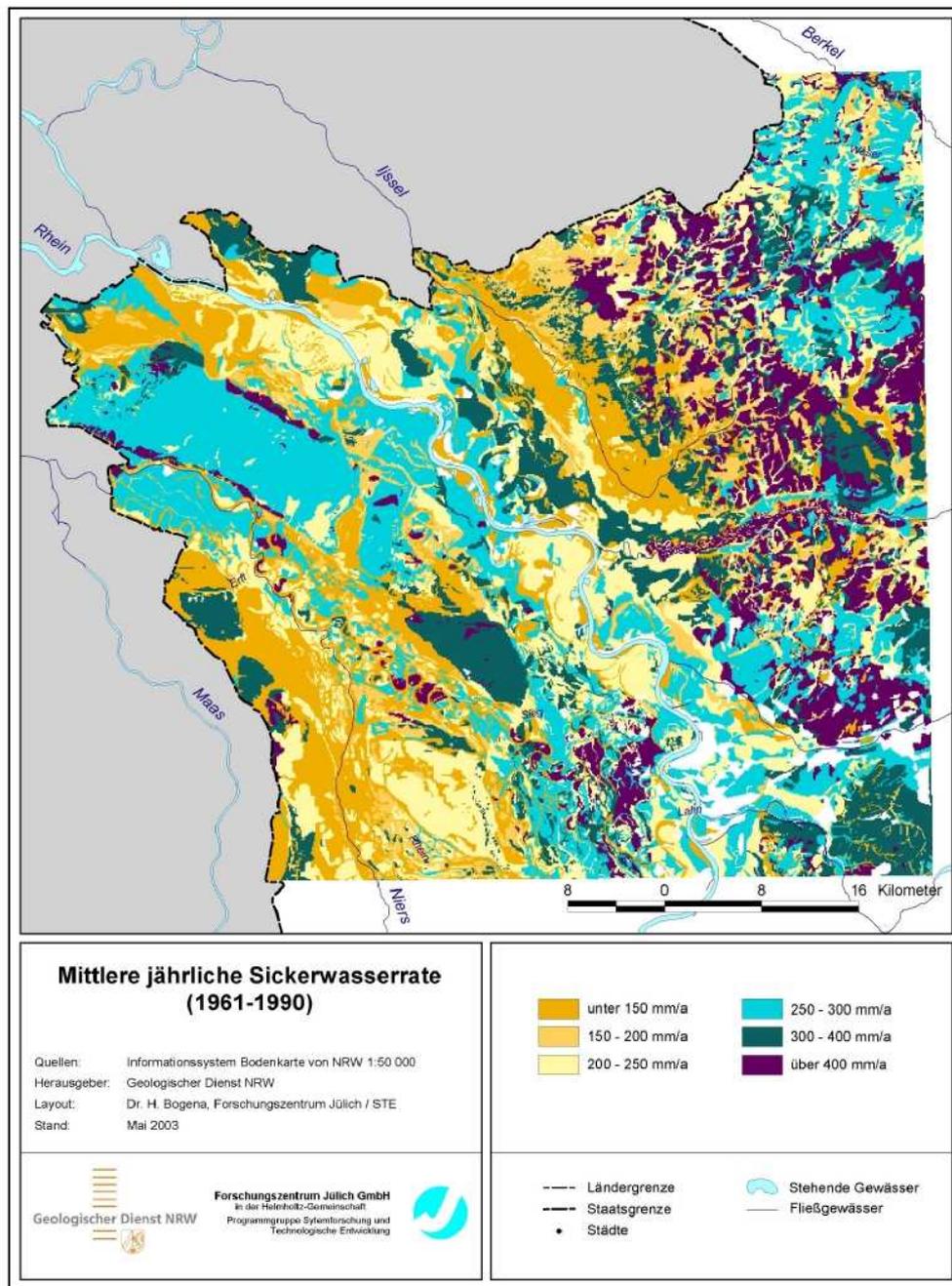
Einen landesweiten Ansatz zur Abschätzung der Sickerwasserrate aus Böden verfolgt der Geologische Dienst NRW (vergl. Kap. 2.2).

Das Verfahren wurde für die Lockergesteinsregionen Nordrhein-Westfalens umgesetzt. Die hierauf basierende Karte der Sickerwasserrate von NRW ist mit durchschnittlich 1000 bis 3000 Flächen je Karte sehr detailliert, da der hohe Informationsgehalt der Bodenkarte vollständig genutzt wird. Für die vertikale Sickerwassersimulation mit dem Speicher-Kaskadenmodell KLIMA/GLADIS werden zum Einen die substratbedingten Wasserhaushaltsparameter (hydraulische Leitfähigkeit, nFK, FK, kap. Aufstiegsrate usw.) abgeleitet und zum Anderen die standortbezogenen Besonderheiten (Grundwasser- und Staunässeverhältnisse) berücksichtigt. Die individuelle Zuordnung von tägli-

chen Niederschlags- und Klimazeitreihen zu den Bodenflächen sowie die Verwendung des digitalen Höhenmodells DGM25 des Landesvermessungsamts NRW zur Ermittlung von Direktabflussbeträgen nach dem Ansatz von Dörhöfer & Josopait (1980) führen zu differenzierteren Ergebnissen. Zur Zeit bleiben laterale Wasserbewegungen und Informationen über den tieferen Untergrund unterhalb von 2 m unberücksichtigt. In hängigen Festgesteinsbereichen kann der laterale Interflow aus den zur Verfügung stehenden Daten nur grob abgeschätzt werden.

In Karte 1 ist die mit dem Modell KLIMA/GLADIS berechnete mittlere Sickerungsrate der Periode 1961 bis 1990 für die Bodeneinheiten der BK50 bei ackerbaulicher Nutzung für die Regionen Niederrhein, südwestliches Westmünsterland und westliches Bergisches Land dargestellt. Die Berechnung erfolgte hier für die Nutzungskategorie Acker mit einer Interzeption von 10%, um bodenbedingte Flächendifferenzierungen besser beurteilen zu können. Erkennbar ist der Niederschlags- und Klimaeinfluss bei zunehmender Geländehöhe. Für den Ausschnitt ergeben sich durchschnittliche jährliche Sickerwasserraten (1961 bis 1990) von ca. $7,9 \text{ l/s*km}^2$ (ca. 250 mm/a) für Acker, ca. $7,1 \text{ l/s*km}^2$ (ca. 224 mm/a) für Grünland und ca. $6,0 \text{ l/s*km}^2$ (ca. 188 mm/a) für Mischwald.

Die von KLIMA/GLADIS berechnete Sickerwasserrate entspricht nur im grundwasserfernen Lockergesteinsbereich der Grundwasserneubildung. Aus diesem Grunde ist das Verfahren in Festgesteinsregionen nur eingeschränkt zur Berechnung der Grundwasserneubildungsrate einsetzbar.



Karte 1: Mittlere jährliche Sickerwasserrate der Periode 1961 bis 1990, berechnet mit dem Verfahren KLIMA/GLADIS für die Bodeneinheiten der BK50 bei ackerbaulicher Nutzung.

3

Das GROWA-Modell

3.1 Ermittlung der Gesamtabflusshöhe

Grundlage für die Berechnung der Gesamtabflusshöhe ist die Wasserhaushaltsgleichung, nach der die Gesamtabflusshöhe im langjährigen Mittel durch die Differenz von Niederschlagshöhe und realer Verdunstungshöhe gegeben ist.

$$Q_{gesamt} = N - ETr \quad \text{Gl. 3}$$

mit	Q_{gesamt}	= Gesamtabflusshöhe	(mm/a)
	N	= Jahresniederschlagshöhe	(mm/a)
	ETr	= reale Verdunstungshöhe	(mm/a)

Im Gegensatz zu den Niederschlagshöhen, die an Niederschlagsstationen direkt gemessen werden, muss die reale Verdunstungshöhe durch Modellansätze ermittelt werden.

3.1.1 Ebene, grundwasserferne und unversiegelte Teilräume

Das Verfahren von Renger & Wessolek (1996) erlaubt eine Berechnung der jährlichen Höhe der realen Verdunstung (ETr_{RW}) für ebene, grundwasserferne und unversiegelte Standorte:

$$ETr_{RW} = a \cdot N_{wi} + b \cdot N_{so} + c \cdot \log(W_{pfl}) + d \cdot ET_o + e \quad \text{Gl. 4}$$

mit	ETr_{RW}	= Reale Verdunstung nach Renger-Wessolek	(mm/a)
	N_{so}	= Niederschlag im Sommerhalbjahr (1.4.-30.9)	(mm/a)
	N_{wi}	= Niederschlag im Winterhalbjahr (1.10-31.3)	(mm/a)
	W_{pfl}	= pflanzenverfügbares Bodenwasser	(mm)
	ET_o	= Potenzielle Verdunstung nach Haude	(mm/a)

Die Bodenbedeckung geht über die landnutzungsspezifischen Regressionskoeffizienten $a...e$ in Gl. 4 ein, die in Tab. 6 aufgeführt sind. Für Ackerland, Grünland und Nadelwald werden die Regressionskonstanten nach Renger & Wessolek (1996) verwendet. Bei den für die Bodenbedeckungskategorie Laubwald nach Renger & Strebel (1980) verwendeten Konstanten ist zu beachten, dass anstelle der Niederschlagshöhen in den Halbjahren nur die mittlere Jahresniederschlagshöhe eingeht und die

Tab. 6: Regressionskonstanten für die Verdunstungsberechnung nach ¹Renger & Wessolek (1996) ²Renger & Strebel (1980) und ³Proksch (1990).

Landnutzung	a	b	c	d	e
Ackerland ¹	0,08	0,39	153	0,12	-109
Grünland ¹	0,10	0,48	286	0,10	-330
Nadelwald ¹	0,29	0,33	166	0,19	-127
Laubwald ²	0,047	0,047	0	0,02	430,1
vegetationslose Fläche ³	0,074	0,074	0	0	59,2

pflanzenverfügbare Bodenwassermenge unberücksichtigt bleibt. Zur Ermittlung der mittleren realen Verdunstungshöhe von vegetationslosen Flächen wird ein einfacher Ansatz von Proksch (1990) angewendet, welcher aus Lysimeterergebnissen für unterschiedliche Böden abgeleitet wurde (DVWK, 1996). Hierbei ist zu beachten, dass nur die Jahresniederschlagshöhe betrachtet wird.

Im Rahmen der großräumigen Umsetzung des GROWA-Modells dienen die CORINE Bodenbedeckungsdaten des Statistischen Bundesamtes Wiesbaden (Statistisches Bundesamt, 1997) als Datenbasis zur Differenzierung der Bodenbedeckung, da sie flächendeckend für Deutschland sowie weitere europäische Länder vorliegt. Nach Angaben von ATV-DVWK (2002) werden für die Verdunstungsberechnung die 44 Bodenbedeckungskategorien von CORINE denen entsprechenden Landnutzungseinheiten zugeordnet bzw. anteilige Kombinationen derselben gebildet (siehe Kap. 5.4).

Die Jahressumme der potenzielle Verdunstungshöhe ET_0 in Gl. 4 bezieht sich auf die Methode von Haude (1954). Von der FAO (Food and Agriculture Organization) wird jedoch als international einheitlicher Standard die Gras-Referenzverdunstung (Allen et al., 1994) empfohlen, welche auf der Penman-Monteith-Beziehung basiert (ATV-DVWK, 2002). Diese wird für Deutschland seitens des DWD von Wendling (1995) bundesweit ermittelt. Bei der Verwendung der Gras-Referenzverdunstung nach Wendling (1995) muss die Regressionskonstante d folgendermaßen modifiziert werden (Kunkel & Wendland, 1998):

$$d_{\text{Haude}} = 0.926 \cdot d_{\text{Wendling}} \quad \text{Gl. 5}$$

Dem empirischen Berechnungsverfahren von Renger & Wessolek (1996) liegt der physikalische Ansatz von Rijtema (1968) zur Berechnung der realen Verdunstung zugrunde. Er berücksichtigt eine Vielzahl von Standortfaktoren, um die kleinräumige

Variabilität von Böden und Vegetation zu berücksichtigen. Das Verfahren ist jedoch auf ebene, grundwasserferne und unversiegelte Standorte beschränkt, bei denen die Sickerwasserrate aus dem Boden der Grundwasserneubildung entspricht. Hennings (2000) gibt als Anwendungsgrenze für das Verfahren eine maximale Hangneigung von 3,5% an. Darüber hinaus gelten noch klimatologische Einschränkungen. Bei landwirtschaftlicher Nutzung soll der Jahresniederschlag 800 mm und bei forstwirtschaftlicher Nutzung 1300 mm nicht überschreiten. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, ist der Berechnungsansatz nach Renger & Wessolek (1996) nicht direkt einsetzbar.

Um eine universelle Anwendung des Renger-Wessolek-Verfahrens zu gewährleisten, wurden von Kunkel & Wendland (1998, 2002) Erweiterungen der Methodik vorgenommen. Die Modifikationen betreffen die Berücksichtigung von Relief, Grundwassereinfluss und Versiegelung. Darüber hinaus wurde sichergestellt, dass die berechnete reale Verdunstungshöhe einerseits nicht größer wird als die maximale Verdunstung und andererseits bei grundwasserfernen Standorten nicht kleiner ist als die Niederschlagshöhe.

3.1.2 Reliefiertes Gelände

In reliefiertem Gelände wird die reale Verdunstungshöhe zusätzlich von der Hangneigung und der Hangexposition beeinflusst. Dieser Einfluss kann in Form eines Korrekturfaktors f_h berücksichtigt werden:

$$ETr_{\text{relief}} = f_h(\alpha, \phi) \cdot ETr_{\text{RW}} \quad \text{Gl. 6}$$

mit: ETr_{relief} = Reale Verdunstungshöhe in reliefiertem Gelände (mm/a)

Von Golf (1981) wurde hierzu eine Untersuchung in Mittelgebirgsregionen durchgeführt, deren Ergebnisse verallgemeinert wurden (Kunkel & Wendland, 1998):

$$f_h(\alpha, \phi) = \phi \left[1,605 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(\alpha - 90) - 2,5 \cdot 10^{-4} \right] + 1 \quad \text{Gl. 7}$$

mit: α = Hangexposition gegenüber Nord [°]
 ϕ = mittlere Hangneigung [°]

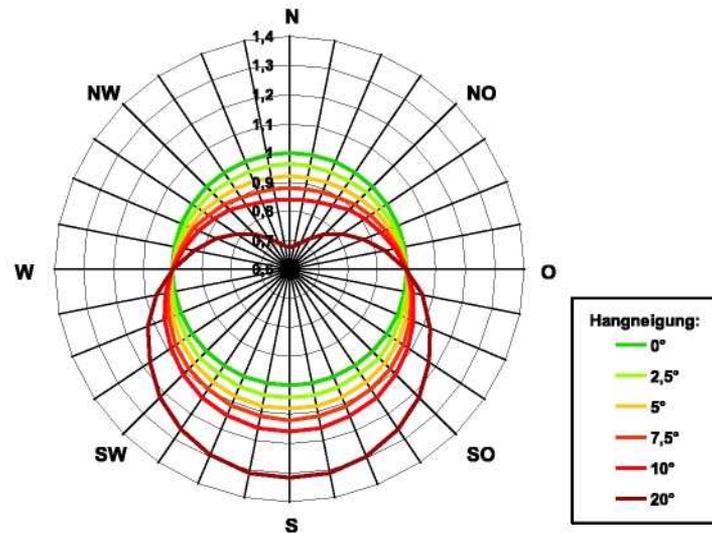


Abb. 4: Die Höhe des Korrekturfaktors f_n in Abhängigkeit der Faktoren Hangneigung und Exposition.

In Abb. 4 ist die Abhängigkeit des Korrekturfaktors von der Hangexposition und der Hangneigung grafisch dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass die Verdunstung an südexponierten Hängen die Verdunstung an Nordhängen überwiegt. So ergibt sich beispielsweise für eine Hangneigung von 10° bei südexponierten Hängen eine um 16 % höhere Verdunstung als in ebenem Gelände. Bei nordexponierten Hängen ergibt sich dagegen bei einer Hangneigung von 10° eine Verdunstung, die nur 84 % des Wertes für ebene Bedingungen entspricht. Diese Unterschiede werden mit steigender Hangneigung größer. Aufgrund des additiven Zusammenhangs von Niederschlag und realer Verdunstung bei der Berechnung der Gesamtabflusshöhe kann dies unter bestimmten Bedingungen zu einer erheblichen Korrektur der Abflusshöhen führen.

3.1.3 Grundwasserbeeinflusste Standorte

Bei grundwassernahen Standorten führt die Anwendung von Gl. 4 zu einer Unterschätzung der realen Verdunstungshöhe, da durch kapillaren Aufstieg ständig Wasser für den Verdunstungsprozess zur Verfügung steht. Daher wird hier davon ausgegangen,

dass die reale Verdunstung einer maximalen Verdunstung entspricht:

$$ETr_{gw} = ET_{max} \quad \text{Gl. 8}$$

mit: ETr_{gw} = reale Verdunstung grundwassernaher Standorte (mm/a)
 ET_{max} = mittlere jährliche maximale Verdunstung (mm/a)

Die maximale Verdunstung stellt eine Modifikation der potenziellen Verdunstung dar, welche einen unter der theoretischen Bedingung einer Grassfläche mit 12 cm hohem Bewuchs erreichbaren Verdunstungswert wiedergibt (siehe Kap. 5.3.2). Die tatsächlich erreichbare Verdunstungshöhe anderer Landnutzungsformen kann jedoch deutlich von diesem Wert abweichen. Man spricht deswegen von der sogenannten maximalen Verdunstung (ET_{max}), die je nach der Vegetationsart und -höhe kleiner oder größer als die potenzielle Verdunstung sein kann. Die maximale Verdunstung wird mittels eines Parameters f aus der potenziellen Verdunstung (ET_o) berechnet (ATV-DVWK, 2002):

$$ET_{max} = f \cdot ET_o \quad \text{Gl. 9}$$

Die Werte für den Parameter f wurden über Regressionsgleichungen in Abhängigkeit von Landnutzung, Vegetationshöhe und nutzbarer Feldkapazität des Bodens auf Basis von Lysimeter- und Pegeldata für unterschiedliche Standortbedingungen bestimmt (ATV-DVWK, 2002). Glugla et al. (1999) gehen davon aus, dass die reale Verdunstungshöhe bei Lysimetern mit ausreichender Feuchtverfügbarkeit, d.h. mit hoher bodeninnerer Kapillarität und somit hohem Kapillarwasseraufstieg in die verdunstungsbeeinflussten Bodenzone, der maximalen Verdunstung entspricht:

$$f = \frac{ET_{max}}{ET_o} \approx \frac{ETr_{Lysimeter}}{ET_o} \quad \text{Gl. 10}$$

mit $ETr_{Lysimeter}$ = gemessene Verdunstung des Lysimeters (mm/a)

Für Lysimeter mit Böden aus tiefgründigem Löß wurde ein Wert für $f = 1,51 \pm 0,76$ erhalten (ATV-DVWK, 2002).

Für versiegelte und unbewachsene Standorte wurden von Glugla et al. (1999) die Verdunstungswerte unbewachsener Lysimeter nach ausgiebigen Niederschlagsereignissen mit der Gras-Referenzverdunstung verglichen. Für bewaldete Flächen mit Laub- und Nadelwald wurden Beobachtungsdaten von nicht wägbaren Lysimetern genutzt, wobei sich die reale Verdunstung aus der Differenz von korrigiertem Niederschlag und gemessener Sickerwasserhöhe ergibt. Glugla et al. (2002) konnten auf diese Weise folgenden Zusammenhang feststellen:

$$ET_{\max} = \frac{ET_r}{0,8} \quad \text{Gl. 11}$$

Auf Basis von Gl. 11 wurde der Parameter f für unreliefierte Regionen in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und vom Umtriebsalter berechnet (ATV-DVWK, 2002). Das Umtriebsalter entspricht hierbei dem Bestandsalter bei Fällung der Bäume. Somit entspricht der jeweilige Wert für f dem Mittelwert über alle Entwicklungsstufen bis zum Bestandsalter bei Fällung. In Abb. 5 ist die Abhängigkeit des Parameters f von der Bodenart und dem jeweiligen Umtriebsalter dargestellt.

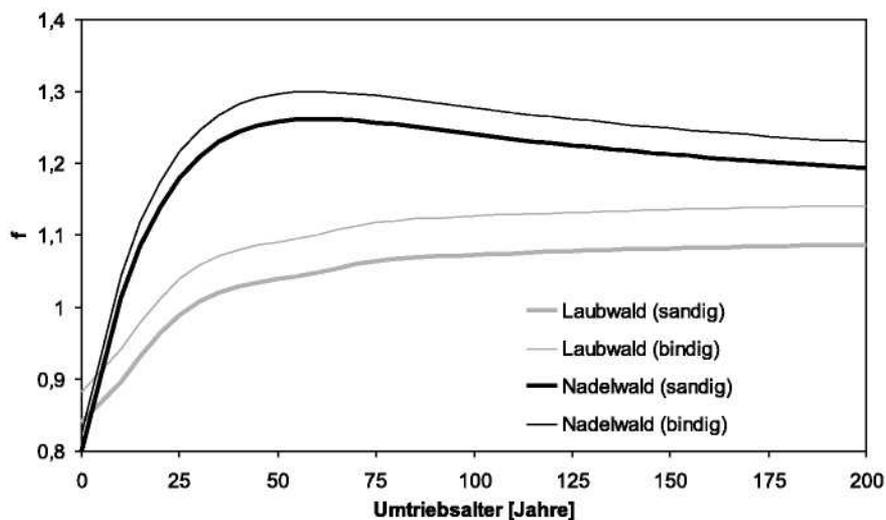


Abb. 5: *Vieljähriger Mittelwert des Parameters f für Nadel- und Laubwald auf verschiedenen Böden in Abhängigkeit vom Umtriebsalter (UA), berechnet nach Tab. 7.*

Des Weiteren wird bei der Ermittlung der maximalen Verdunstung der Einfluss von Hangneigung und –exposition durch einen zusätzlichen Faktor f_H berücksichtigt, der analog zu Gl. 7 berechnet wird:

$$ET_{\max} = f_H \cdot f \cdot ET_0 \quad \text{Gl. 12}$$

In Tab. 7 sind die Beziehungen zur Berechnung des Parameters f nach ATV-DVWK (2002) aufgelistet. Die Parameter z_B (mittlere Bewuchshöhe des Pflanzenstandes) und UA (mittleres Umtriebsalter des Pflanzenbestandes) wurden auf Basis der Landnutzungskategorien von CORINE abgeschätzt (siehe Anhang, Tab. 26).

Tab. 7: Gleichungen zur Berechnung des Parameters f (entnommen aus ATV-DVWK, 2002); Q_{nFK} : Volumenanteil des Wassers im Boden in Prozent bei nutzbarer Feldkapazität.

Landnutzungs-kategorie	Gleichung
Versiegelte Fläche	$f = 0,8$
Vegetationslose Fläche	$\Theta_{nFK} \leq 8,5 \text{ Vol.}\% \rightarrow f = 0,8$ $\Theta_{nFK} \geq 8,5 \text{ Vol.}\% \rightarrow f = 0,0186 \cdot \Theta_{nFK} + 0,6419$
Grünland/Gras (mittlere Grashöhe: 12 cm)	$\Theta_{nFK} \leq 11 \text{ Vol.}\% \rightarrow f_{12cm} = 0,0125 \cdot \Theta_{nFK} + 0,7108$ $\Theta_{nFK} \geq 11 \text{ Vol.}\% \rightarrow f_{12cm} = 0,2866 \cdot \ln(\Theta_{nFK}) + 0,6419$
Grünland/Gras (mittlere Grashöhe variabel)	$f = f_k(z_B) \cdot f_{12cm}$ $5\text{cm} < z_B \leq 20\text{cm} \rightarrow f_k = 0,0676 \cdot \ln(z_B) + 0,8321$ $z_B \geq 20\text{cm} \rightarrow f_k = -0,7 \cdot 10^{-5} \cdot z_B^2 + 0,37 \cdot 10^{-2} \cdot z_B + 0,9661$
Ackerland	$f = 0,221 \cdot \Theta_{nFK} - 0,431$
Laubwald	Sandige Böden ($\Theta_{nFK} \leq 16 \text{ Vol.}\%$) $UA \leq 90 \text{ Jahre} \rightarrow f = 0,84 + 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot UA + 0,508 \cdot 10^{-3} \cdot UA^2 - 0,233 \cdot 10^{-4} \cdot UA^3 + 0,422 \cdot 10^{-6} \cdot UA^4 - 0,3494 \cdot 10^{-8} \cdot UA^5 + 0,10946 \cdot 10^{-10} \cdot UA^6 = f_{SL1}$ $UA > 90 \text{ Jahre} \rightarrow f = 1,038 + 0,49 \cdot 10^{-3} \cdot UA + 0,155 \cdot 10^{-5} \cdot UA^2 - 0,1686 \cdot 10^{-8} \cdot UA^3 = f_{SL2}$ Bindige Böden ($\Theta_{nFK} > 16 \text{ Vol.}\%$) $UA \leq 90 \text{ Jahre} \rightarrow f = 1,05 \cdot f_{SL1}$ $UA > 90 \text{ Jahre} \rightarrow f = 1,05 \cdot f_{SL2}$
Nadelwald	Sandige Böden ($\Theta_{nFK} \leq 16 \text{ Vol.}\%$) $UA \leq 130 \text{ Jahre} \rightarrow f = 0,8 + 0,2694 \cdot 10^{-1} \cdot UA + 0,63924 \cdot 10^{-3} \cdot UA^2 - 0,8052 \cdot 10^{-5} \cdot UA^3 - 0,5785 \cdot 10^{-7} \cdot UA^4 - 0,223 \cdot 10^{-9} \cdot UA^5 + 0,356 \cdot 10^{-12} \cdot UA^6 = f_{SL1}$ $UA > 130 \text{ Jahre} \rightarrow f = 1,35 + 0,108 \cdot 10^{-2} \cdot UA + 0,178 \cdot 10^{-5} \cdot UA^2 = f_{SL2}$ Bindige Böden ($\Theta_{nFK} > 16 \text{ Vol.}\%$) $UA \leq 130 \text{ Jahre} \rightarrow f = 1,03 \cdot f_{SL1}$ $UA > 130 \text{ Jahre} \rightarrow f = 1,03 \cdot f_{SL2}$

3.1.4 Urbane Regionen

Die Berücksichtigung des Einflusses der Versiegelung in urbanen Regionen auf die reale Verdunstung und die Grundwasserneubildungshöhe ist aufgrund der hohen Variabilitäten in der Bebauungs- und Siedlungsstruktur sehr schwierig. So existieren eine Reihe von Untersuchungen mit zumeist nicht übertragbaren Ergebnissen.

Die hier vorliegende Methodik basiert auf den Untersuchungen von Wessolek & Facklam (1997), die den Einfluss der Versiegelung auf die Grundwasserneubildung im Raum Berlin untersucht haben. Die in versiegelten Regionen reduzierte Verdunstung wurde von Kunkel & Wendland (1998) folgendermaßen berücksichtigt:

$$ETr_{\text{versiegelt}} = ETr_{RW} - f_v \cdot G \quad \text{Gl. 13}$$

mit: $ETr_{\text{versiegelt}}$ = reale Verdunstung von Versiegelungsflächen (mm/a)
 G = Versiegelungsgrad (%)
 f_v = Korrekturfaktor (-)

Der Korrekturfaktor f_v wurde durch einen Vergleich zwischen den nach Gl. 4 für eine hypothetisch unversiegelte Situation berechneten realen Verdunstung und den sich nach Wessolek & Facklam (1997) für den Raum Berlin ergebenden Verdunstung bestimmt (Kunkel & Wendland, 1998). Hierbei ergab sich ein Wert für f_v von 3,44.

Nach ATV-DVWK (2002) lassen sich unter Verwendung der CORINE-Nomenklatur Anteile der versiegelten Fläche ableiten (Tab. 8). Im Rahmen eines Forschungspro-

Tab. 8: Versiegelungsgrade der urbanen CORINE-Landnutzungskategorien nach ATV-DVWK (2002) und Faktoren zur Modifikation der realen Verdunstungshöhe.

Kategorie Nr.	Landnutzungskategorie	Versiegelungsgrad [%]	$f_v \cdot G$ [mm/a]
1.1.1	durchgängig städtischer Prägung	80	275,2
1.1.2	nicht durchgängig städtischer Prägung	35	120,4
1.2.1	Industrie- u. Gewerbeflächen	85	292,4
1.2.2	Straßen- u. Eisenbahnnetze	50	172,0
1.2.3	Hafengebiete	80	275,2
1.2.4	Flughäfen	30	103,2
1.3.3	Baustellen	20	68,8
1.4.2	Sport- u. Freizeitanlagen	15	51,6

jekts der Umweltbehörde Hamburg wurde das Modell GROWA auf die Metropolregion Hamburg als Beispiel für einen stark urban überprägten Raum angewendet (Tetzlaff et al., 2002). Im Gegensatz zu früheren Anwendungen des GROWA Modells, z.B. in Niedersachsen (Dörhöfer et al., 2001) und im Elbeeinzugsgebiet (Kunkel & Wendland, 1998), standen für das Stadtgebiet Hamburg (ca. 740 km²) sehr hoch aufgelöste Daten zur Versiegelung im Maßstab 1:20.000 bzw. 1:5.000 zur Verfügung. Diese Basis ließ eine Unterscheidung von 30 Landnutzungsklassen mit zugehörigen Versiegelungsgraden zu, die bei der Berechnung des Gesamtabflusses und der Grundwasserneubildung eine hohe Differenzierung der Versiegelung ermöglicht haben.

3.1.5 Rechentechnische Umsetzung

Die beschriebene Methodik ermöglicht es, den Gesamtabfluss flächendeckend und -differenziert für makroskalige Naturräume (z.B. Flusseinzugsgebiete) als auch für administrative Einheiten (z.B. Bundesländer) zu berechnen. Das GROWA-Modell arbeitet rasterbasiert, wobei die Auflösung der Rasterzellen praktisch beliebig gewählt werden kann. Die Eingabedaten werden jeweils von dem Modell eingelesen und die anschließende Berechnung der realen Verdunstung und des Gesamtabflusses erfolgt einzeln für jede Rasterzelle (Abb. 6).

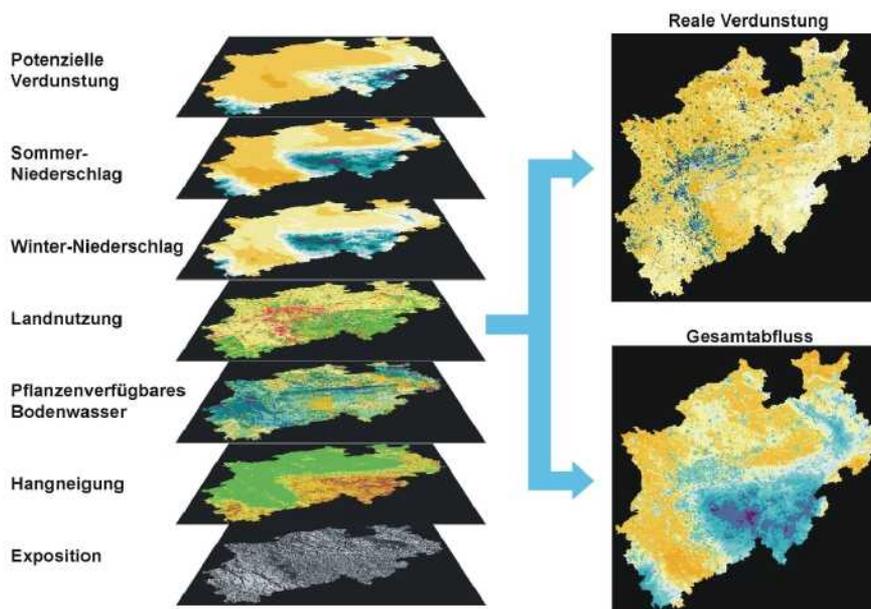


Abb. 6: Eingabe- und Ausgabedaten des GROWA-Modells.

Zur Ermittlung des grundwasserbürtigen Abflusses wurde von Wundt (1958) ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem der Grundwasserabfluss aus den monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüssen (MoMNQ) einer längeren Jahresreihe abgeleitet wird:

$$Q_{\text{GW}} \approx \sum_i^n \text{MoNQ}_i / n \quad \text{Gl. 16}$$

mit	MoNQ	= niedrigster Abfluss in einem Monat	(m ³ /s)
	n	= Anzahl der Monate (mindestens 20 Jahre)	(-)

In erster Näherung gibt der MoMNQ-Wert für nicht signifikant überprägte Gebiete im **Lockergestein** die mittlere Grundwasserführung eines Flusses wieder und ist somit ein Maß für die Grundwasserneubildung in einem Einzugsgebiet. Bei der Anwendung des GROWA-Modells im Einzugsgebiet der Elbe (Kunkel & Wendland, 1998) und in Niedersachsen (Dörhöfer et al., 2001) zeigte sich, dass mit MoMNQ-Werten plausible Basisabflussanteile ermittelt werden können.

Im Bereich von **Festgesteinen** entsprechen die MoMNQ-Werte jedoch nicht der mittleren Grundwasserneubildung, da die monatlichen Niedrigwasserabflüsse in regenreichen Monaten signifikante Anteile von Direktabfluss (Oberflächen- und Zwischenabfluss) enthalten, die vom MoMNQ-Verfahren mit erfasst werden. Aus diesem Grunde wurde für die Festgesteinsregionen ein Verfahren angewendet, welches in Anlehnung an Kille (1970) bzw. Demuth (1993) eine Reduzierung der MoMNQ-Werte um den Zwischenabflussanteil erlaubt.

Das grafische Kille-Verfahren ist eine Modifikation des Wundt-Verfahrens, wobei die einzelnen MoNQ-Werte in aufsteigender Größe angeordnet werden. Ein Beispiel hierfür ist für den Pegel Rebbelroth (Agger) in Abb. 7 dargestellt. Hierdurch wird eine Summenhäufigkeit erhalten, die nach Demuth (1993) in zwei Typen unterteilt werden kann (Typ I S-förmig, Typ II parabolisch). Das Kille-Verfahren kann nur auf Typ I angewendet werden, wobei der lineare Abschnitt der Verteilung zur Anpassung einer Geraden genutzt wird. Der um den Zwischenabfluss reduzierte MoMNQ-Wert (MoMNQ_r) wird nach Kille in der Mitte der Verteilung auf der Y-Achse abgelesen und entspricht der mittleren Grundwasserneubildung.

Dieser Verfahrensgang wurde aufgegriffen, indem zunächst wie bei Kille (1970) bzw. Demuth (1993) die Summenhäufigkeit aus den MoNQ-Werten gebildet wird. Mit Hil-

fe einer Regressionsanalyse wird dann durch iterative Reduzierung des Definitionsbereichs der MoNQ-Werte der lineare Abschnitt der Summenhäufigkeit ermittelt. Hierzu werden zuerst die maximalen, dann die minimalen MoNQ-Werte bei jedem Iterationsschritt weggelassen. Als Abbruchkriterium dient das Erreichen eines maximalen Bestimmtheitsmaßes der Regressionsgraden. Der MoMNQ_r-Wert ergibt sich dann zu:

$$\text{MoMNQ}_r = m \cdot \frac{n}{2} + y_0 \quad \text{Gl. 17}$$

mit m = Steigung der Regressionsgraden (mm/a)
 y_0 = Achsenabschnitt (mm/a)

Am Beispiel des Pegels Rebbelroth (Agger) in Abb. 7 wird der Unterschied zum Wundt-Verfahren deutlich. Bei der Verwendung des MoMNQ-Verfahrens nach Wundt wird ein sehr hoher Wert (198,9 mm) für die Grundwasserneubildungshöhe erhalten. Dieser resultiert, wie in Abb. 7 ersichtlich ist, aus dem relativ großen Anteil überdurchschnittlich hoher MoNQ-Werte, die z.B. aufgrund von Schneeschmelze oder während niederschlagsreichen Perioden hohe Anteile an Direktabfluss aufweisen können.

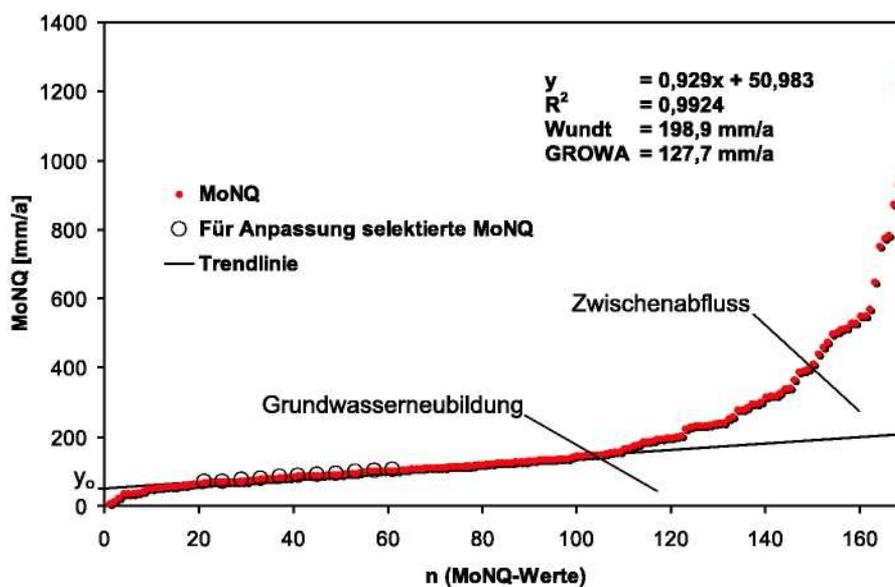


Abb. 7: Verfahrensgang zur Ermittlung einzugsgebietsbezogener Grundwasserneubildungsraten im Festgesteinsbereich am Beispiel des Pegels Rebbelroth (Agger).

Bei Verwendung des MoMNQ_r-Verfahrens wird durch die Eliminierung des Direktabflussanteils ein Wert von 127,7 mm ermittelt, welcher der tatsächlichen Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet des Pegels Rebbelroth wesentlich besser entspricht (vergl. Kap. 2.3.1).

3.2.2 *Ausweisung abflusswirksamer Gebietskenngrößen*

Nachdem im ersten Schritt die Gebietsmittel der BFI-Werte für die betrachteten Einzugsgebiete auf Basis der Abflussdaten abgeleitet wurden, erfolgt in einem zweiten Schritt durch Berücksichtigung abflusswirksamer Gebietsmerkmale bzw. -parameter die Disaggregation und Übertragung auf Regionen, für die keine brauchbaren Pegeldaten vorliegen.

Hierzu wird ein hierarchischer Ansatz verwendet, bei dem der Wert einer Gebietskenngröße als ausschließlich bestimmend für den BFI-Wert angesehen wird. Weitere Standortparameter werden erst dann betrachtet, wenn die primäre Gebietskenngröße nicht relevant ist (siehe Abb. 8). Insgesamt wurden 21 unterschiedliche Gebietsmerkmale definiert, denen jeweils ein BFI-Wert zugeordnet ist (siehe Kap. 3.2.3):

- Zwei Versiegelungsklassen zur Abtrennung der Grundwasserneubildung in urbanen Regionen entsprechend ihrem Versiegelungsgrad.
- Sieben Klassen zur Berücksichtigung des Einflusses der Geologie auf die Grundwasserneubildung im Festgestein.
- Drei Klassen zur Unterscheidung des Einflusses des Grundwasserflurabstandes auf die Grundwasserneubildung im Lockergestein.
- Zwei Klassen zur Abbildung von Staunäseeinflüssen auf die Grundwasserneubildung im Lockergestein.
- Sieben Klassen zur Berücksichtigung des Einflusses unterschiedlicher Hangneigungen auf die Grundwasserneubildung im Lockergestein.

Der hierarchische Ansatz ist dementsprechend fünfstufig gegliedert. Zunächst wird für den versiegelten Anteil in jedem Flächenelement bzw. jeder Rasterzelle angenommen, dass dort die Grundwasserneubildung vernachlässigbar ist. Für den verbleibenden Anteil des Flächenelements wird dann überprüft, ob eine signifikante künstliche Entwässerung, z.B. Rohr- oder Grabenentwässerung, vorliegt. Ist dies der Fall, wird ein entsprechender BFI-Wert hierfür angesetzt (siehe Kap. 3.2.3). Sind keine detaillierten Angaben hinsichtlich der Versiegelung und der verbleibenden Bodenbede-

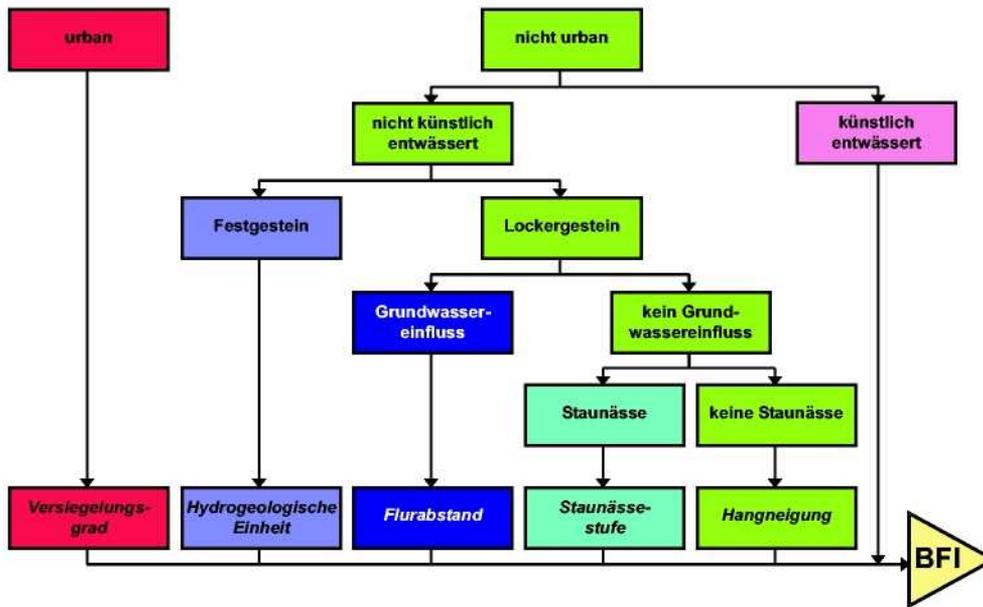


Abb. 8: Hierarchische Zuweisung abflussrelevanter Gebietsmerkmale im GROWA Modell.

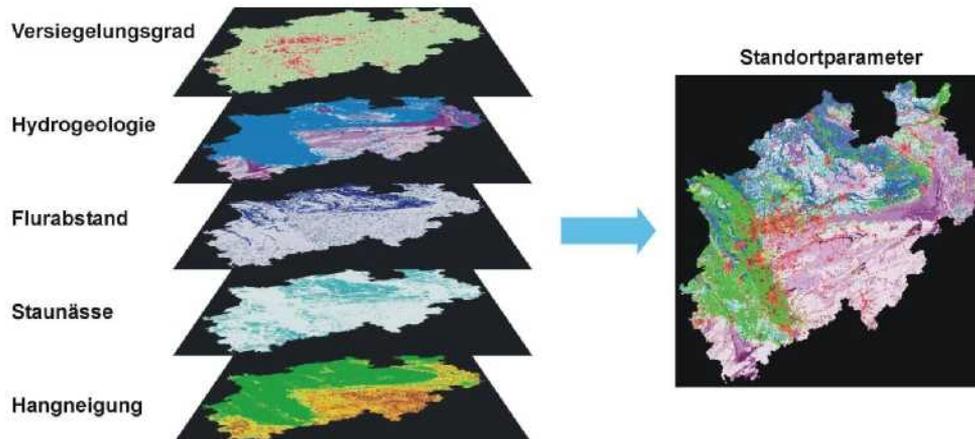


Abb. 9: Eingabe- und Ausgabedatensätze des GROWA-Modells zur Separation der Abflusskomponenten.

ckung vorhanden, z.B. bei der Verwendung der CORINE Daten, wird ein repräsentativer Wert für das gesamte Flächenelement verwendet. Tritt weder Versiegelung noch künstliche Entwässerung auf, wird als nächstes in Festgesteins- und Lockergesteinsbereiche unterschieden. Im Lockergestein werden weiterhin die bodenhydrologischen Faktoren Flurabstand und Staunässe sowie die Hangneigung betrachtet. Im Festgesteinsbereich wird die hydrogeologische Gesteinseigenschaft als maßgebliche abflusswirksame Gebietseigenschaft angesehen.

Abb. 9 zeigt die Eingabe- und Ausgabedatensätze des GROWA-Modells zur Ermittlung der abflusswirksamen Standortparameter in NRW. Die Versiegelungsstufen wurden anhand der CORINE Daten ausgewiesen (siehe Kap. 5.3). Die hydrogeologischen Eigenschaften wurden dem Hydrogeologischen Informationssystem HK100 des Geologischen Dienstes NRW entnommen (siehe Kap. 5.5). Die bodenphysikalischen und topografischen Daten für die Lockergesteinsregionen wurden dem digitalen Bodeninformationssystem BK50 entnommen (siehe Kap. 5.4) bzw. auf Basis des digitalen Geländemodells DGM25 berechnet (siehe Kap. 5.6).

3.2.3 Zuweisung flächendifferenzierter BFI-Werte

Bei der Anwendung des GROWA-Modells im Elbeinzugsgebiet (Kunkel & Wendland, 1998) und in Niedersachsen (Dörhöfer et al., 2001) konnte gezeigt werden, dass die Anwendung von BFI-Werten der Literatur (siehe Tab. 9) im Lockergesteinsbereich zu

Tab. 9: BFI-Werte in Abhängigkeit von den Kenngrößen mittlerer Flurabstand, Hangneigung (nach Dörhöfer & Josopait, 1980), Staunässestufe (nach Hennings, 2000) und Versiegelung (nach Wessolek & Facklam, 1997).

Versiegelungsstufe	mittlerer Flurabstand	Staunässestufe	Hangneigung	BFI-Wert
I (10 – 45%)	> 2 m	keine Staunässe	< 1 %	1
	1,3 – 2 m	1 (sehr schwach)	1 – 3,5 %	0,9
			3,5 - 7 %	0,82
			7 - 10 %	0,67
			10 – 13 %	0,59
	0,8 – 1,3 m	2 (schwach)	0,5	
0,4 – 0,8 m	3-4 (mittel - stark)	0,44		
II (45 – 75%)	< 0,4 m	5 (sehr stark)	> 15 %	0,4
				0,33
III (75 – 90%)				0,28
IV (>90%)				0,2

realistischen Grundwasserneubildungsraten führt. Auf eine weitere Kalibrierung der BFI-Werte auf Basis der im Lockergesteinsbereich Nordrhein-Westfalens gemessenen MoMNQ-Werte wurde verzichtet, da viele Flüsse in den Lockergesteinsregion Nordrhein-Westfalens stark anthropogen überprägte Abflussverhältnisse aufweisen (z.B. durch massive Einleitungen von Sumpfungswässern).

Kunkel & Wendland (1998) konnten feststellen, dass die in Tab. 9 angegebenen BFI-Werte für die Festgesteinsregionen nicht eingesetzt werden können, da der Einfluss der geologischen Untergrundverhältnisse den der Bodeneigenschaften bei weitem überwiegt. Eine Reihe anderer Autoren (z.B. Gabriel & Ziegler, 1989, Schwarze et al., 1991) weisen ebenfalls darauf hin, dass dem Einfluss der geologischen Untergrundverhältnisse besondere Bedeutung bei der Quantifizierung der Abflussanteile zukommt. Aus diesem Grunde berücksichtigten Kunkel & Wendland (1998) die geologischen Untergrundverhältnisse als zentrale Kenngröße bei der Abtrennung des Basisabflusses in Festgesteinsregionen.

Die Basisabflussanteile in den unversiegelten Festgesteinsregionen Nordrhein-Westfalens wurden daher auch hier auf Basis der geologischen Untergrundverhältnisse bestimmt. Hierzu wurden aus dem Fachinformationssystem Hydrogeologische Karte (HK100) neun hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit unterscheidbare Festgesteinseinheiten ausgewiesen (siehe Kap. 5.5.2). Da bislang eine Charakterisierung der Gesteinseinheiten der HK100 hinsichtlich der Verteilung von Basis- und Direktabfluss nicht vorliegt, wurden durch Kalibrierung an Abflussdaten zahlreicher Pegelstationen in Nordrhein-Westfalen (Kap. 5.7) adäquate BFI-Werte ermittelt. In Tab. 10 sind die hydraulischen Leitfähigkeitsklassen der HK100 und die durch die Kalibrierung ermittelten BFI-Werte aufgeführt.

Tab. 10: Die hydraulischen Leitfähigkeitsklassen der HK100 und die ermittelten BFI-Werte.

Klasse	Durchlässigkeit	kf-Wert	BFI-Wert
I	sehr hoch	$>10^{-2}$ m/s	0,12
II	hoch	$>10^{-3} - 10^{-2}$ m/s	0,18
III	mittel	$>10^{-4} - 10^{-3}$ m/s	0,29
IV	mäßig	$>10^{-5} - 10^{-4}$ m/s	0,3
V	gering	$>10^{-7} - 10^{-5}$ m/s	0,57
VI	sehr gering	$>10^{-9} - 10^{-7}$ m/s	0,6
VII	äußerst niedrig	$<10^{-9}$ m/s	0,9

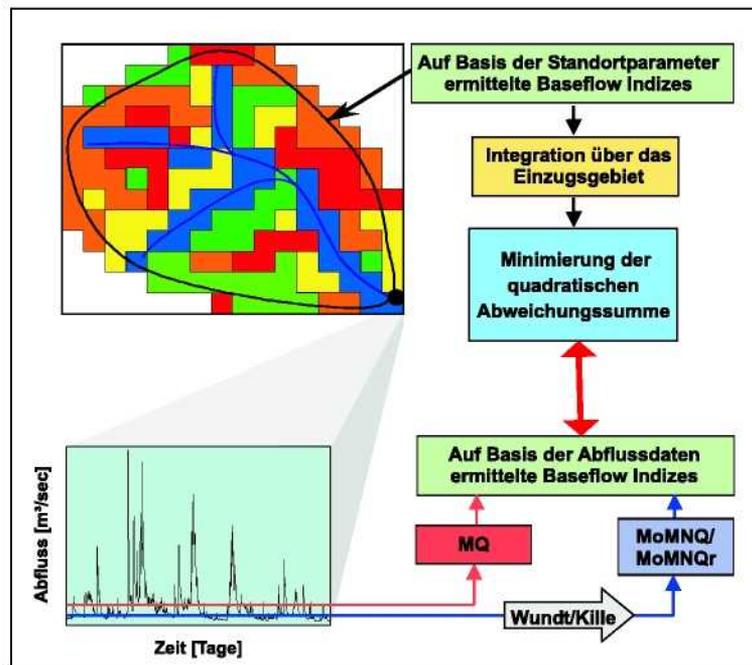


Abb. 10: Verfahrensgang im GROWA-Modell zur Ermittlung der BFI-Werte.

In Abb. 10 ist der Verfahrensgang im GROWA-Modell zur Ermittlung der Basisabflussanteile zusammenfassend dargestellt. Die Kalibrierung erfolgte einzugsgebietsbezogen. Hierzu wurden die relativen Flächenanteile (a_i) der einzelnen Standortparameter in jedem Untersuchungsgebiet mit den jeweiligen (BFI_i) multipliziert, addiert, und mit den beobachteten Baseflow Indizes (BFI_{gem}) verglichen:

$$BFI_{gem} = MoMNO_{(r)} \quad \Leftrightarrow \quad BFI_{ber} = \sum_{i=1}^n BFI_i \cdot a_i \quad \text{Gl. 18}$$

Die Summe läuft hierbei über alle 21 unterscheidbaren Standortmerkmale, z.B. in den Lockergesteinsregionen über die in Tab. 9 ausgewiesenen Kategorien der Grundwasser- und Staunässebeeinflussung sowie der Hangneigung. In einem nächsten Schritt wurden nur die Baseflow Indizes der sieben Standortmerkmale im Festgestein variiert, so dass die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Basisabflussanteilen über alle betrachteten Einzugsgebiete den kleinsten Wert (Min) annimmt (Maximum-Likelihood Verfahren):

$$\sum_{j=1}^n (\text{BFI}_{\text{gem}} - \text{BFI}_{\text{ber},j})^2 = \text{Min}$$

Gl. 19

Zur Berechnung von BFI_{gem} wurde, wie bereits beschrieben, in Lockergesteinsregionen das Verfahren nach Wundt und in Festgesteinsgebieten das Verfahren nach Kille angewandt. Auf diese Weise ergab sich ein Satz von BFI-Werten, der für die Gesamtheit der betrachteten Einzugsgebiete zu einer optimalen Anpassung führt. Dieser Parametersatz wurde anschließend flächendeckend auf ganz Nordrhein-Westfalen angewendet. Wie das Korrelationsdiagramm in Abb. 11 zeigt, wird mit dem vorgestellten Verfahren eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Basisabflussanteilen am Gesamtabfluss erreicht. Dies dokumentieren auch der lineare Korrelationskoeffizient von $r^2=0,93$ und das mittlere Residuum, welches nur 12,2 % beträgt. Der gewählte Ansatz ermöglicht es also, die im langjährigen Mittel auftretenden Basisabflussanteile am Gesamtabfluss sowohl in den Lockergesteinsregionen als auch in den Festgesteinsregionen in befriedigender Weise zu reproduzieren.

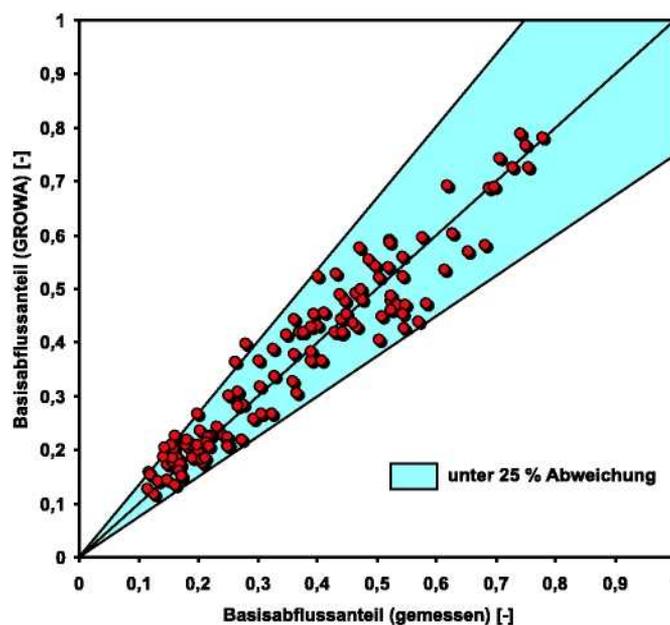


Abb. 11: Vergleich der gebietsbezogenen gemessenen und berechneten Basisabflussanteile.

4

Die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens

Ein zentraler Bestandteil der folgenden Kapitel sind thematische Karten, in denen die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Wasserhaushaltsmodellierung dargestellt werden. Bei der Beschreibung und Interpretation dieser Karten wird zumeist auf die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens Bezug genommen, deren Grundlage die Geographische Landesaufnahme im Maßstab 1:200.000 (BLR, 1959-79) ist. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die naturräumliche Ausstattung der Groß- und Teillandschaften Nordrhein-Westfalens gegeben, wie sie in Abb. 12 dargestellt sind. Zusätzlich werden die Grundwasservorkommen und ihre wasserwirtschaftliche Bedeutung für die Region beschrieben.



Abb. 12: Die Groß- und Teillandschaften Nordrhein-Westfalens (nach Dinter, 1998).

4.1 Niederrheinisches Tiefland

Das Niederrheinische Tiefland erstreckt sich als klar gegliederte Flussterrassenlandschaft beiderseits des Niederrheins unterhalb von Düsseldorf (Dinter, 1998). In die ebenen, getrepten Terrassen sind die weiten Sohlentäler der Flussauen mit ihren Altstromrinnen sowie der Stauchmoränenwall der Niederrheinischen Höhen eingeschaltet. Die Höhenlage beträgt fast durchweg weniger als 100 m ü. NN und sinkt zur niederländischen Grenze auf etwa 15 m ü. NN ab.

Es dominieren zumeist grundwassernahe quartäre Sande und Kiese an der Oberfläche, in den Auen auch Hochflutlehme und teils ausgedehnte Niedermoore. Bei einer mittleren Jahrestemperatur von über 9°C herrscht ein ausgeglichenes, atlantisch geprägtes Klima mit milden Wintern und einer langen Vegetationsperiode. Die Jahresniederschläge liegen zumeist zwischen 700 und 750 mm. In der Nutzung zeigt sich im allgemeinen ein charakteristischer Wechsel zwischen Grünland in den Niederungen und Ackerland auf den trockeneren Lehm- und Sandplatten. Nur lokal sind größere Waldkomplexe eingeschaltet, wobei Kieferbestände dominieren.

Aufgrund der weiten Verbreitung von Lockergesteinssedimenten bildet das Niederrheinische Tiefland zusammen mit der Niederrheinischen Bucht eine der größten Grundwasserressourcen in Deutschland (BRBS, 1980). Im Niederrheinischen Tiefland stehen flächenmäßig etwa ein Drittel der ergiebigsten Aquifere Nordrhein-Westfalens an.

4.2 Niederrheinische Bucht

Die Niederrheinische Bucht schließt sich südlich an das Niederrheinische Tiefland an, wobei ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal die Lößbedeckung ist (Dinter, 1998). Sie überzieht die nach Süden auf ca. 200 m ü. NN ansteigende Ebene, die durch mehrere Terrassenstufen und –horste (z.B. die Ville) sowie durch die Auen von Rhein, Erft und Rur gegliedert ist.

Das Klima ist mit einer Jahrestemperatur von über 9°C relativ warm und trocken, wodurch eine lange Vegetationszeit bedingt wird. Aufgrund der Leelage zur Eifel betragen die Jahresniederschläge meist weniger als 700 mm, in der Zülpicher Börde sogar

weniger als 600 mm. Der Einfluss des Grundwassers tritt außerhalb der Auenbereiche zurück. Der Ackerbau herrscht in dieser typischen Bördenlandschaft vor. Grünland ist weitgehend auf die Flussaunen beschränkt und Wald findet sich fast nur bei fehlender Lößauflage (z.B. Bergische Heideterrasse und Teile der Ville). Westlich von der Ville ist die Landschaft zusätzlich durch den großflächigen Braunkohlenabbau geprägt.

In der Niederrheinischen Bucht stehen flächenmäßig etwa 17% der grundwasserergiebigen Lockergesteine Nordrhein-Westfalens an. Der tiefreichende Braunkohlentagebau hat in den Einzugsgebieten von Rur und Erft zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels geführt. Jährlich werden ca. 1,2 Mrd. m³ Brunnensümpfungswasser gefördert, wovon fast 20 % für öffentliche und gewerbliche Zwecke genutzt werden (BRBS, 1980). Die angespannte Wasserversorgungslage in weiten Teilen der Bucht wird durch die Nutzung von Rhein-Uferfiltrat ausgeglichen (BRBS, 1980).

4.3 Westfälische Bucht und Westfälisches Tiefland

Die Westfälische Bucht bildet zusammen mit der Teillandschaft Westfälisches Tiefland eine zusammenhängende Großlandschaft (Dinter, 1998). Sie ist morphologisch bis auf den Westen und Nordwesten von Mittelgebirgen umschlossen. Die überwiegend ebene bis flachwellige Landschaft (etwa 40 bis 100 m ü. NN) ist eiszeitlich überprägt. Der kreidezeitliche Untergrund erreicht jedoch an vielen Stellen die Oberfläche (z.B. die Kalksteine der Baumberge, Beckumer Berge und Stemmer Berge und die aus den Haltener Sanden aufgebauten Borkenberge, der Haard und Hohen Mark). Die eiszeitlichen Deckschichten wechseln zwischen meist grundwassernahen Sandböden (Westmünsterland, Emssandebene, Senne) und stauwasserbeeinflussten Lehm Böden (Kernmünsterland). Am Nordrand der Mittelgebirge erstrecken sich Lößzonen (Soester Börde, Lübbecker Lößland). Im Norden und Nordwesten sind größere, entwässerte Hochmoorkomplexe vorhanden. Die jährlichen Niederschlagshöhen von im Mittel 700 bis 800 mm werden nur großräumig im Soester und Mindener Raum unterschritten. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bis auf die südlichen Bereiche unter 9°C.

Die Landnutzung ist agrarisch geprägt, wobei in den Sandgebieten Grünland und in den Lehm- und Lößgebieten Ackerland dominiert. Die Agrarflächen werden durch zum Teil dichte Feldgehölze, Wallhecken und Ufergehölze zu einer Parklandschaft gegliedert. Am Südwestrand der Bucht befindet sich das stark zersiedelte Ruhrgebiet.

Mit über 4000 km² besitzt die Westfälische Bucht mit ca. 46 % den größten Flächenanteil an grundwassererergiebigem Lockergesteinen in Nordrhein-Westfalen. Hierbei stellen insbesondere die Haltener Sande im südwestlichen Teil der Westfälischen Bucht eine Grundwasserregion (Ausdehnung rd. 770 km²) dar, die für die regionale und überregionale Trink- und Brauchwasserversorgung von großer Bedeutung ist (MUNLV, 2000). Aufgrund des großflächigen Auftretens sehr gering durchlässiger Tonmergel- und Mergelsteine, welche eine Barriere für den Grundwasserfluss darstellen, zählt die Westfälische Bucht jedoch generell zu den Gebieten mit geringeren Grundwasservorkommen (BRBS, 1980).

4.4 Weserbergland

Das Weserbergland ist weitestgehend aus mesozoischen Gesteinen aufgebaut und ragt keilförmig in das nordwestdeutsche Tiefland hinein. Nur stellenweise werden Höhen von über 400 m ü. NN erreicht; der überwiegende Teil weist Höhen von 60 bis 300 m auf. Die langgestreckten Ketten des Teutoburger Waldes und des Wiehen- und Wesergebirges schließen eine Vielzahl unregelmäßig angeordneter Berggrücken, Platten, Becken und Täler ein (Dinter, 1998). Der Untergrund wird aus Sand- und Tonsteinen sowie Mergeln und Kalken gebildet, wobei vor allem im Westteil verbreitet Löß aufliegt.

Die jährlichen Niederschlagshöhen liegen im Bereich von 700 bis 900 mm/a. Hiervon weichen das Eggegebirge mit 1200 mm/a und die Warburger Börde mit weniger als 600 mm/a deutlich ab. Die Jahresmitteltemperatur liegt um die 8°C. Die Lößlehmgebiete (Ravensberger Hügelland) werden intensiv ackerbaulich genutzt. Geschlossene Waldflächen finden sich bis auf einige kleine Vorkommen hauptsächlich auf den randlichen Bergketten.

Das Weserbergland zählt insgesamt ebenfalls zu den Gebieten mit geringeren Grundwasservorkommen (BRBS, 1980). In den Bereichen der mesozoischen Kalksteine treten jedoch auch Kluffgrundwasserleiter auf, die lokal sehr ergiebig sein können, z.B. die bekannten Karstquellen der Pader im Raum Paderborn.

4.5 Eifel und Siebengebirge

Die Großlandschaft der Eifel ist aus den zu Nordrhein-Westfalen gehörenden Teilen der Osteifel, der Westeifel und des Vennvorlandes zusammengesetzt (Dinter, 1998). Weiterhin werden hierzu noch Teile des Mittelrheingebietes mit dem Siebengebirge hinzugezählt. Die Eifel ist vorwiegend aus devonischen Grauwacken, Sandsteinen, Quarziten und Tonschiefern aufgebaut. In einigen Bereichen stehen auch Kalke, Mergel und Dolomite an (Kalkeifel, Mechernicher Voreifel, Vennvorland). Morphologisch ist die Eifel durch Hochflächen geprägt, die von Härtlingszügen überragt werden (200 bis 600 m ü. NN). Die Hochflächen werden durch zahlreiche Kerb- und Sohltäler durchbrochen. Das Siebengebirge ist vollständig aus vulkanischen Gesteinen aufgebaut.

Im Bereich der Hochlagen des Hohen Venns fallen über 1200 mm Jahresniederschlag, die weiter in Richtung Osten auf unter 700 mm/a absinken. Im Siebengebirge werden wieder 800 mm/a überschritten. Starke Unterschiede sind auch bei den Jahrestemperaturen zu verzeichnen (von unter 7°C in den Hochlagen bis auf über 9°C in der Voreifel und dem Mittelrheintal). Die Hochlagen der Eifel sind vorwiegend von Wald bedeckt, wobei in den Kalkgebieten auch Agrarland stark vertreten sein kann. Auf den Hochebenen des Hohen Venns sind Mooregebiete verbreitet.

Die Eifel zählt laut BRBS (1980) zu den Gebieten mit überwiegend geringen Grundwasservorkommen. Der Grund hierfür ist der hohe Anteil an Festgesteinen mit mäßiger bis sehr geringer Trennfugendurchlässigkeit. Nennenswerte Grundwasservorkommen finden sich nur in den Lockergesteinen der größeren Flussauen und in den Kalkgesteinen mit höheren Trennfugendurchlässigkeiten. Aufgrund dieser Untergrundverhältnisse gepaart mit relativ hohen Niederschlägen sind in dieser Region zahlreiche Talsperren angelegt worden, die zum Teil auch der Trinkwasserversorgung dienen (z.B. Rurtalsperre, Urftalsperre).

4.6 Süderbergland

Unter dem Begriff „Süderbergland“ werden die Teillandschaften „Bergisches Land“ sowie „Sauer- und Siegerland“ zusammengefasst. Es bildet das rechtsrheinische Gegenstück zur Eifel. Auch hier wird der Untergrund durch Grauwacken und Schiefer-

steine beherrscht, wobei sich Kalkgesteine auf einzelne Massenkalkvorkommen und auf die Briloner Hochfläche beschränken. Morphologisch ähnelt diese Region der Eifel, allerdings werden mit dem Rothaargebirge Höhenwerte von über 800 m ü. NN erreicht.

Entsprechend niedrig sind im Süderbergland die Jahrestemperaturen (in den Hochlagen des Rothaargebirges unter 6°C). Die mittleren Jahresniederschläge erreichen die höchsten Werte in ganz Nordrhein-Westfalen (1000 bis 1400 mm/a). Das Süderbergland ist weitestgehend von Waldflächen bedeckt, wobei die Talböden zumeist unter Grünlandnutzung stehen. Lokal weist Ackerland auch größere Flächenanteile auf, wie im niederbergischen Lößbereich um Mettmann, auf der Briloner Hochfläche und im Leebereich des Rothaargebirges um Medebach (Dinter, 1998).

Wie die Eifel zählt auch das Süderbergland zu den Gebieten mit überwiegend geringen Grundwasservorkommen (BRBS, 1980). Neben den Talfüllungen der größeren Flüsse (z.B. Ruhr, Wupper und Sieg) bilden vor allem Vorkommen von Massenkalken (z.B. Wupper-Ennepe-Mulde, Attendorner Kalksenke, Briloner Hochfläche) einzelne isolierte Grundwasservorkommen. Die niedrigen Durchlässigkeiten der anstehenden Festgesteine und die hohen Niederschläge führten zur Anlage von zahlreichen Talsperren, die vorwiegend der Trinkwasserversorgung dienen. So werden z.B. in den Talsperren des Ruhreinzugsgebiets, die auch zur Versorgung der südlichen Westfälischen Bucht dienen, etwa 474 Mio. m³ Wasser gespeichert.

5

Datengrundlagen

Für die Ermittlung der Grundwasserneubildung werden flächendifferenzierte klimatische, hydrologische, pedologische, topografische und hydrogeologische Basisdaten benötigt. Die für diese Arbeit verwendeten Datengrundlagen werden in diesem Kapitel in Hinblick auf Herkunft, Erfassungsmethodik und Genauigkeit beschrieben. Weiterhin werden besondere Verfahrensschritte bei der Datenaufbereitung erläutert sowie die regionalen Besonderheiten beschrieben.

Alle in dieser Arbeit verwendeten Datengrundlagen entstammen Datenbeständen, die von Bundes- und Landesbehörden für die Berechnung der Grundwasserneubildung zur Verfügung gestellt wurden. In Tab. 11 sind die verwendeten Datengrundlagen zusammenfassend dargestellt. Die klimatischen Kenngrößen wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aufbereitet. Die pedologischen und hydrogeologischen Kenngrößen wurden vom Geologischen Dienst NRW im Rahmen der Forschungs Kooperation abgeleitet. Als topografische Gebietskenngrößen konnten Datensätze des Landesvermessungsamts NRW verwendet werden. Gewässerkundliche Datengrundlagen wurden vom Landesumweltamt NRW, von den Staatlichen Umweltämtern in NRW sowie verschiedenen Wasserverbänden zur Verfügung gestellt. Zusätzliche Pegeldata

Tab. 11: Datengrundlagen für die Modellierung und Validierung des Wasserhaushalts von Nordrhein-Westfalen.

Themengebiet	Datengrundlage	Datentyp	Quelle
Grunddaten	Verwaltungsgrenzen Fließgewässer, Seen	Vektor	DLM1000 (Bundesanstalt f. Kartographie u. Geodäsie)
Klima	Sommerniederschlag Winterniederschlag Potenzielle Verdunstung nach Wendling	Raster	Deutscher Wetterdienst
Boden	effektive Durchwurzelungstiefe nutzbare Feldkapazität kapillare Aufstiegshöhe Flurabstand Staunässegrad	Vektor	BK50 (Geologischer Dienst NRW)
Landnutzung	Bodenbedeckungskategorien	Vektor	CORINE Land Cover (Statistisches Bundesamt)
Hydrogeologie	Durchlässigkeitsklassen	Vektor	HK100 (Geologischer Dienst NRW)
Topografie	Hangneigung Hangexposition	Raster	DGM25 (Landesvermessungsamt NRW)
Validierung	Einzugsgebietsgrenzen	Vektor	Landesumweltamt NRW
	Tagesmittel der Abflüsse	Punkt	Landesämter, Wasserverbände

ten wurden von der Wasserwirtschaftsverwaltung Rheinland-Pfalz übermittelt. Detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Datenbeständen finden sich in den Kapiteln 5.1 bis 5.7.

Alle Datenbestände wurden in das Geographische Informationssystem ArcView bzw. das Datenbanksystem Access eingebettet. In ArcView erfolgt sowohl die Datenhaltung als auch die Analyse und Ergebnisauswertung.

5.1 Kartendarstellung und Aufbereitung der Datengrundlagen

Für die flächendifferenzierte kartografische Darstellung der langjährigen mittleren Wasserhaushaltssituation in Nordrhein-Westfalen und der hierfür maßgeblichen Einflussgrößen ist eine digitale Grundkarte des Bundeslandes eine unabdingbare Voraussetzung. Die Geometrie der digitalen Grundkarte stellt das geografische Referenzsystem für die Bearbeitung des gesamten Forschungsvorhabens dar, auf welches sowohl alle Datengrundlagen als auch alle Modellrechnungen bezogen wurden. Für das Forschungsvorhaben wurde von einem Bearbeitungsmaßstab von etwa 1 : 50.000 bis 1 : 100.000 ausgegangen. Dieser Maßstab ist ein Kompromiss zwischen dem Anspruch, einerseits eine möglichst detaillierte Modellanalyse durchzuführen und andererseits der Notwendigkeit, eine konsistente Übersicht über das gesamte Gebiet Nordrhein-Westfalens zu erstellen.

Für die Berechnung der Grundwasserneubildung wurde eine Flächendifferenzierung der verfügbaren Gebietsinformationen auf Rasterbasis verwendet. Daher mussten alle raster- und vektorbasierten Eingangsdaten in ein einheitliches Basisraster überführt werden. Hierbei waren folgende Randbedingungen zu beachten:

- Die Daten mussten rationell verarbeitbar sein, d.h. der Rechenleistung eines aktuellen PCs angepasst sein.
- Das statistische Verhalten der Datensätze sollte durch die Rasterung unverändert bleiben.
- Durch die Rasterung durfte kein signifikanter Informationsverlust auftreten.

Entscheidend für die Wahl der Rastergröße ist der Datensatz mit der höchsten Auflö-

sung, d.h. der mit den kleinsten Polygonen. Dies ist in diesem Fall die Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50.000 (BK50), so dass sich die Wahl der Rasterweite an diesem Datensatz orientieren muss.

Dörhöfer et al. (2001) haben für das Bundesland Niedersachsen untersucht, wie sich unterschiedliche Rasterungen (50 bis 1000 m) auf den Informationsgehalt der niedersächsischen Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 auswirken. Der zu überprüfende Informationsgehalt wurde über die Kriterien „Diversität der Bodentyp-Klassen“ und „Abweichungen von der primären Flächengröße pro Bodentyp-Klasse“ definiert. Die Untersuchung zeigte, dass bei Rasterweiten von 1000 m und 500 m nicht alle Bodentypklassen in dem Rasterdatensatz repräsentiert werden. Bei einer Rasterung von 250 m blieben zwar alle Bodentypklassen erhalten, jedoch traten Abweichungen der Flächengrößen von bis 30 % auf. Bei der 50 und 100 m Auflösung waren die Abweichungen zu vernachlässigen (unter 5 %), so dass dort eine Transformation auf ein Raster von 100*100 m² als optimal angenommen wurde. Da der für Nordrhein-Westfalen verwendete Datensatz mit der höchsten Flächenauflösung (BK50) ebenfalls den Maßstab 1:50.000 aufweist, wurden für die Modellierung alle Eingangsdaten auf eine Rasterweite von 100 m transformiert.

Für die räumliche Diskretisierung wurde ein Gitternetz gewählt, welches das Bundesland Nordrhein-Westfalen gleichmäßig überdeckt. Bei der gewählten Auflösung von 100 m ergibt sich hierbei ein Raster von 2576 Zeilen und 2550 Spalten mit insgesamt 6,57 Mio. Rasterzellen. Dabei entfallen ca. 3,4 Mio. Rasterzellen auf die Fläche Nordrhein-Westfalens. Die Wasserhaushaltsgrößen wurden für jede Zelle separat berechnet. Als geografisches Bezugssystem wurde das geodätische Gauß-Krüger-Netz mit dem 6. Längengrad als Bezugsmeridian verwendet.

5.2 Klimatische Datengrundlagen

Alle klimatischen Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) erstellt. Dabei handelt es sich um folgende digitale Datensätze der Periode 1979-1999:

- Mittlere Niederschlagshöhe im hydrologischen Sommerhalbjahr
- Mittlere Niederschlagshöhe im hydrologischen Winterhalbjahr
- Mittlere jährliche potenzielle Verdunstungshöhe nach Wendling

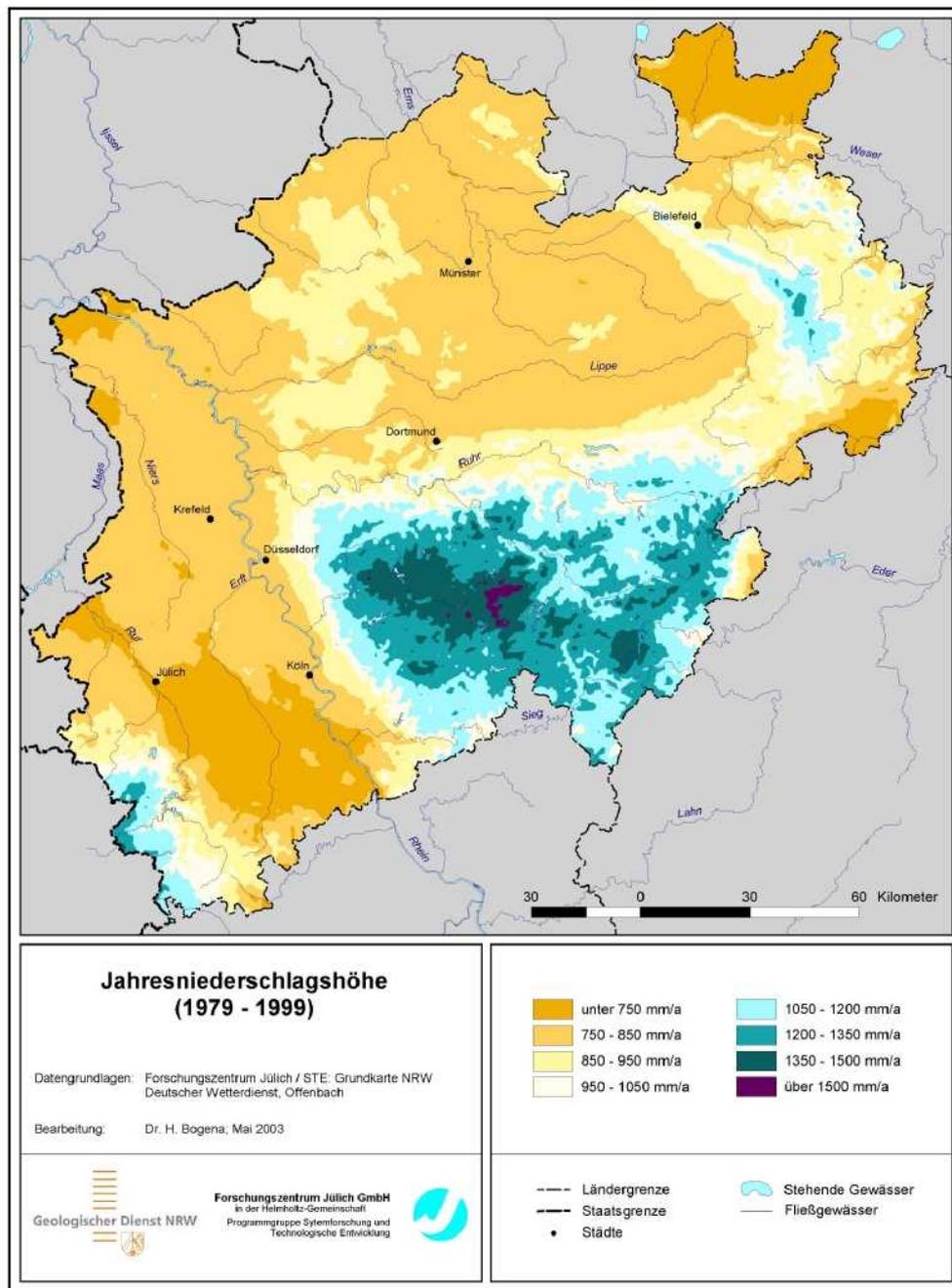
Als Grundlage für die Erstellung der flächendeckenden Klimadaten dienen die Klima- und Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes. Die Stationswerte wurden vom DWD mit dem IDW-Verfahren (Inverse Distance Weighting Interpolation) unter Berücksichtigung einer Höhenkorrektur regionalisiert (siehe hierzu auch Müller-Westermeier, 1995 und Wendling, 1995). Mit diesem Verfahren wurden vom DWD zunächst Datensätze für die verschiedenen Monate des Zeitraums 1979-1999 erstellt. Durch Mittelwertbildung bzw. Addition dieser Basisraster wurden hieraus die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im hydrologischen Sommerhalbjahr (1979-1999) und die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im hydrologischen Winterhalbjahr (1979-1999) abgeleitet. In analoger Weise wurde mit dem Datensatz zur potenziellen Verdunstung nach Wendling verfahren.

Wie in Kap. 5.1 dargelegt, wurde ein einheitliches Raster mit einer Rasterweite von 100 m für die Modellierung gewählt. Die Daten des DWD lagen jedoch im 1x1 km² Rasterformat vor, so dass eine Disaggregation der Raster-Daten des DWD vorgenommen werden musste. Hierzu wurde das Verfahren des Ordinary Kriging (Matheron, 1963) angewendet. Die im folgenden vorgestellten Klimadaten sind somit die auf ein 100 m Raster disaggregierten Originaldaten des DWD.

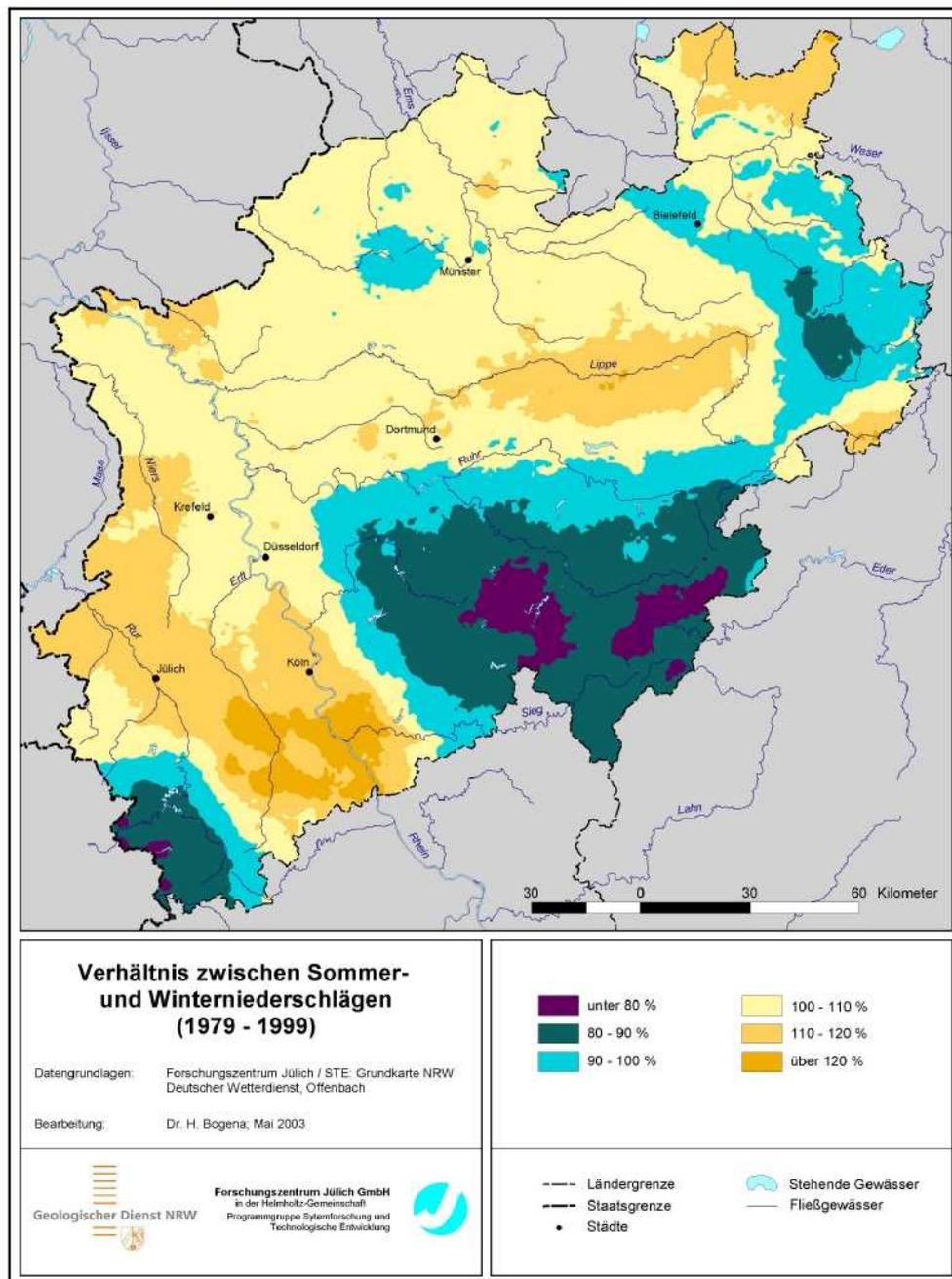
5.2.1 *Niederschlagshöhe*

In das Verfahren zur Bestimmung der Wasserhaushaltsgrößen gehen die mittlere Niederschlagshöhe im hydrologischen Sommerhalbjahr und die mittlere Niederschlagshöhe im hydrologischen Winterhalbjahr ein. Zur Beschreibung der Niederschlagsverhältnisse in Nordrhein-Westfalen wird im folgenden auf die jährlichen Niederschlagshöhen (Karte 2) sowie auf das Verhältnis zwischen Sommer- und Winterniederschlägen (Karte 3) des Bezugszeitraums näher eingegangen.

Die in Karte 2 dargestellten Jahresniederschlagshöhen betragen je nach Region weniger als 700 mm/a bis hin zu mehr als 1400 mm/a. Infolge der überwiegend von Südwesten bis Nordwesten einfließenden Meeresluft sind die Niederschlagshöhen in den Kammlagen der Mittelgebirge gegenüber den Niederschlagshöhen auf den Ostseiten (Leelagen) erhöht. Besonders deutlich wird dieser Effekt im südlichen Bereich der Niederrheinischen Bucht, wo die Höhenlagen des Hohen Venns eine signifikante Regenabschattung bewirken. Während in den Kammlagen der Mittelgebirge Niederschlagshöhen von 1400 mm/a und mehr auftreten können, sind im Windschatten Niederschlagshöhen unter 700 mm/a keine Seltenheit.



Karte 2: Die mittleren Jahresniederschlagshöhen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979 bis 1999.



Karte 3: Das Verhältnis zwischen Sommer- und Winterniederschlägen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979 bis 1999.

Der Luv-Effekt, also die Hebung von Luftmassen aufgrund der morphologischen Gegebenheiten, wird im zentralen Bereich des Bergischen Lands, den sogenannten Bergischen Hochflächen, besonders deutlich. Trotz der relativ moderaten mittleren Höhe von 240 m ü. NN werden hier Jahresniederschlagshöhen von etwa 1250 mm/a erreicht. Das weiter im Osten befindliche Rothaargebirge weist eine mittlere Höhe von über 560 m ü. NN auf, wobei der Jahresniederschlag dort mit rund 1240 mm/a sogar etwas geringer ausfällt als in den Bergischen Hochflächen. An diesem Beispiel zeigt sich, dass bei einer Betrachtung der Abhängigkeit der Niederschlagsmenge von der topografischen Höhe auch die Luv- und Lee-Effekte zu berücksichtigen sind.

In Tab. 12 sind statistische Kennwerte zu den Jahresniederschlagshöhen in den Großlandschaften Nordrhein-Westfalens dargestellt, welche auf Grundlage der Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes für den Zeitraum 1979-1999 berechnet wurden. Die in den Mittelgebirgsregionen gegenüber den Flachlandregionen erhöhten Niederschläge sind deutlich zu erkennen. Auch die Variationsbreiten der Gesamtniederschläge sind mit Werten um 1000 mm/a regional sehr unterschiedlich. Die höchsten Streubreiten sind erwartungsgemäß in den Mittelgebirgsregionen (Sauer- und Siegerland) zu finden. Für das gesamte Bundesland NRW ergibt sich damit eine Streubreite von 1100 mm/a. Diese Differenziertheit der Niederschlagshöhen ist Ausdruck der Reliefgliederung in NRW mit einem ausgeprägten Wechsel von Flachland- und Mittelgebirgsregionen.

Karte 3 zeigt das Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlägen im Bezugszeitraum (1979-1999). Bei einem Verhältnis von 100 % ist die Niederschlagshöhe im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) genauso hoch wie die im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April). Bei Werten unter 100 % überwiegt der

Tab. 12: Statistische Kennwerte zur mittleren Jahresniederschlagshöhe (1979-1999) bezogen auf die Großlandschaften in NRW

Großlandschaft	Minimalwert	Maximalwert	Streubreite	Mittelwert
Westfälische Bucht	748 mm/a	1120 mm/a	372 mm/a	832 mm/a
Weserbergland	632 mm/a	1364 mm/a	732 mm/a	897 mm/a
Bergisches Land	748 mm/a	1559 mm/a	811 mm/a	1163 mm/a
Westfälisches Tiefland	659 mm/a	916 mm/a	257 mm/a	737 mm/a
Niederrheinische Bucht	572 mm/a	1118 mm/a	546 mm/a	763 mm/a
Niederrheinisches Tiefland	710 mm/a	955 mm/a	245 mm/a	793 mm/a
Sauer- und Siegerland	674 mm/a	1672 mm/a	999 mm/a	1165 mm/a
Eifel (mit Siebengebirge)	663 mm/a	1415 mm/a	752 mm/a	928 mm/a
Nordrhein-Westfalen gesamt	572 mm/a	1672 mm/a	1100 mm/a	912 mm/a

Winterniederschlag, bei Werten über 100 % der Sommerniederschlag. Die aufgetretenen Niederschlagsverhältnisse liegen im Bereich von unter 80 % bis über 125 %. Im Westen und Norden Nordrhein-Westfalens ist ein recht ausgeglichenes Niederschlagsverhältnis zu beobachten. In den Mittelgebirgsräumen überwiegen jedoch deutlich die Winterniederschläge. Somit fallen dort die höchsten Niederschläge in dem Zeitraum des geringsten Verdunstungspotenzials. Aufgrund der geringen Transpirationsraten im Winter und der damit verbundenen hohen Bodenfeuchten kann ein Großteil des Niederschlagswassers schnell abflusswirksam werden. Im Gegensatz dazu treten in der Niederrheinischen Bucht die höchsten Niederschlagsmengen im Sommer und daher zur Zeit der höchsten potenziellen Verdunstung auf.

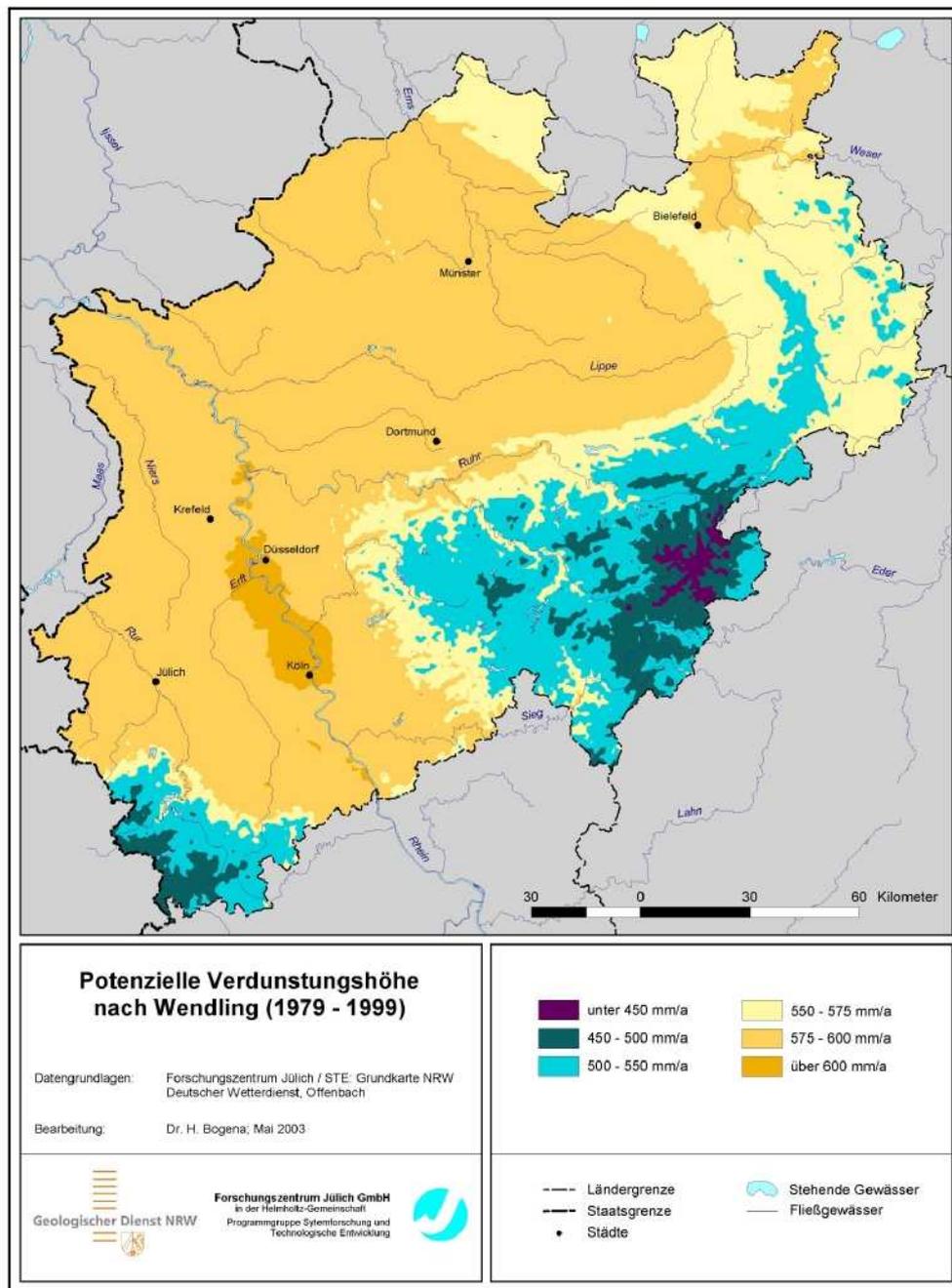
5.2.2 *Potenzielle Verdunstung nach Wendling*

Aufgrund des hohen Messaufwandes werden zur Ermittlung der Verdunstung in der Regel Modelle genutzt, welche es ermöglichen, die Verdunstung aus leichter zugänglichen Messgrößen zu berechnen. Die potenzielle Verdunstung ist jene Verdunstung, die sich allein aus den meteorologischen Daten ergibt. Sie beschreibt die unter den gegebenen klimatischen Bedingungen maximal mögliche Verdunstung, die bei unbegrenztem Wasservorrat von einer definierten Bodenoberfläche auftreten kann. Um hierbei eine einheitliche Berechnung zu ermöglichen, müssen die Randbedingungen (Vegetation, Landnutzung und Bodeneigenschaften) vorher definiert sein.

Von der FAO (Food and Agriculture Organization) wird als international einheitlicher Standard die Gras-Referenzverdunstung empfohlen, welche auf der Penman-Monteith-Beziehung basiert (Allen et al., 2000). Hierbei wurden folgende Randbedingungen festgelegt: ganzjährige Grasbedeckung (12 cm Höhe), kein Trockenstress (mindestens ca. 50% der nutzbaren Feldkapazität) und eine mittlere Albedo von 0,23.

In der vorliegenden Arbeit wurden die mit dem Verfahren von Wendling (1995) ermittelten potenziellen Verdunstungshöhen des DWD verwendet. Bei diesem Verfahren wurde die Gras-Referenzverdunstung zur Berechnung langjähriger Verdunstungshöhen modifiziert. Weiterhin wurden Faktoren zur Berücksichtigung der Höhe und der Küstennähe eingeführt (ATV-DVWK, 2002). Die deutschlandweite Umsetzung des Verfahrens fand Eingang in den Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD, 1998).

Karte 4 zeigt die jährlichen potenziellen Verdunstungshöhen nach Wendling (1979-1999) in Nordrhein-Westfalen. Zusätzlich sind in Tab. 13 auf die Großlandschaften



Karte 4: Die mittlere potenzielle Verdunstungshöhe in Nordrhein-Westfalen nach Wendling für die Periode von 1979 bis 1999.

Tab. 13: Statistische Kennwerte zur jährlichen potenziellen Verdunstungshöhe nach Wendling (1979-1999) bezogen auf die Großlandschaften in NRW.

Großlandschaft	Minimalwert	Maximalwert	Streubreite	Mittelwert
Westfälische Bucht	528 mm/a	593 mm/a	65 mm/a	582 mm/a
Weserbergland	499 mm/a	585 mm/a	86 mm/a	563 mm/a
Bergisches Land	495 mm/a	599 mm/a	104 mm/a	571 mm/a
Westfälisches Tiefland	561 mm/a	579 mm/a	17 mm/a	574 mm/a
Niederrheinische Bucht	584 mm/a	608 mm/a	24 mm/a	596 mm/a
Niederrheinisches Tiefland	585 mm/a	605 mm/a	20 mm/a	594 mm/a
Sauer- und Siegerland	402 mm/a	583 mm/a	181 mm/a	520 mm/a
Eifel (mit Siebengebirge)	461 mm/a	602 mm/a	141 mm/a	543 mm/a
Nordrhein-Westfalen gesamt	402 mm/a	608 mm/a	206 mm/a	569 mm/a

bezogene statistische Kennwerte aufgelistet, die auf Basis des Rasterdatensatzes des Deutschen Wetterdienstes berechnet wurden. Die potenzielle Verdunstung ist abhängig von verschiedenen, zum Teil höhenabhängigen meteorologischen Einflussgrößen (z.B. Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung etc.). Somit wird die räumliche Verteilung der potenziellen Verdunstung von den morphologischen Gegebenheiten überprägt. In den Mittelgebirgsräumen werden aufgrund der niedrigen Lufttemperaturen und den hohen Luftfeuchten, insbesondere in den Wintermonaten, die niedrigsten Verdunstungshöhen erreicht. So weisen das Sauer- und Siegerland einen Minimalwert der potenziellen Verdunstung von 402 mm/a und einen Mittelwert von 520 mm/a auf. Aufgrund der ausgeprägten Höhengliederung sind hier auch die höchsten Streubreiten zu verzeichnen. Die potenziellen Verdunstungshöhen in den Flachlandregionen liegen zwischen 574 bis 594 mm/a, wobei die höchsten Werte im Bereich des Rheingrabens zwischen Köln und Düsseldorf mit Werten um 605 mm/a erreicht werden. Die Streubreite der potenziellen Verdunstung liegt in allen Flachlandregionen bei unter 25 mm/a, was auf die ausgeglicheneren Klimaverhältnisse sowie vor allem die geringe Höhendifferenzierung in diesen Landschaftsräumen zurückzuführen ist.

5.3 Daten zur Bodenbedeckung

Die verwendeten Daten zur Bodenbedeckung wurden durch das Statistische Bundesamt im Rahmen des EU-Programms CORINE (Coordination of Information on the Environment) erhoben. Ziel des Programms war die Erstellung einheitlicher und ver-

gleichbarer Bodenbedeckungsdaten für das gesamte Gebiet der Europäischen Union. In Deutschland steht ein Basisdatenbestand für das statistische Informationssystem zur Bodennutzung (STABIS) und andere nationale geographische Informationssysteme zur Verfügung. Die Erhebung erfolgte im Maßstab 1:100.000 unter zusätzlicher Nutzung von topographischen Karten (TK100) und panchromatischen Luftbildern (Statistisches Bundesamt, 1997). Erfasst wurden Flächen homogener Bodenbedeckung mit einer Mindestfläche von 25 ha bzw. einer Mindestbreite von 100 m bei linearen Objekten. Die Auswertung basiert auf Satellitenbildern aus den Jahren 1989 bis 1992. Der Datenbestand von CORINE enthält 44 Bodenbedeckungskategorien, von denen 28 in Nordrhein-Westfalen vorkommen (Karte 5). In Tab. 26 im Anhang sind die Gesamtflächen und die Flächenanteile der CORINE Landnutzungskategorien aufgelistet.

Im GROWA-Modell werden die folgenden Landnutzungseinheiten unterschieden: versiegelte Flächen, vegetationslose Flächen, Grünland, Ackerland, Laubwald, Nadelwald und Gewässer. Für die Verdunstungsberechnung müssen dafür die stärker differenzierten CORINE-Bodenbedeckungskategorien den entsprechenden Landnutzungseinheiten zugeordnet bzw. anteilige Kombinationen derselben gebildet werden. Hierzu wurden die in Nordrhein-Westfalen auftretenden 28 Kategorien nach CORINE auf Basis einer Empfehlung des ATV-DVWK (2002) in diese sieben Landnutzungsgruppen zusammengefasst. Der hierbei verwendete Schlüssel ist in Tab. 14 aufgeführt.

Auf Basis der Landnutzungsgruppierung ergibt sich die in Abb. 13 dargestellte Häufigkeitsverteilung. Fast die Hälfte des Gebietes des Bundeslandes NRW (48,1 %) wird durch die Landnutzungsgruppe „Ackerland“ vertreten. Schwerpunktmäßig ist diese Landnutzungsgruppe in den Tieflandsregionen Nordrhein–Westfalens und im Weser-

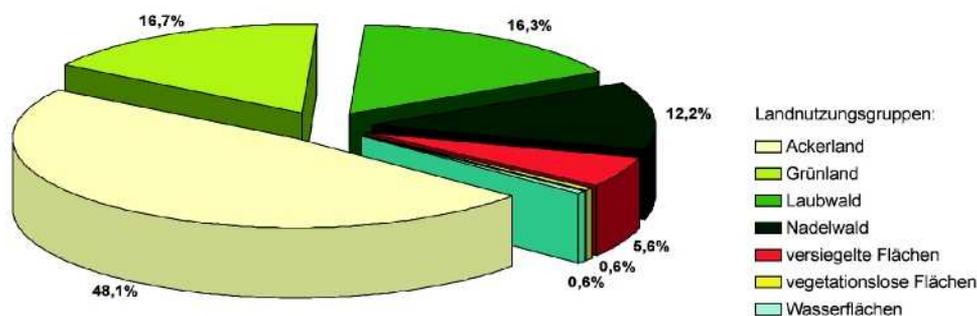
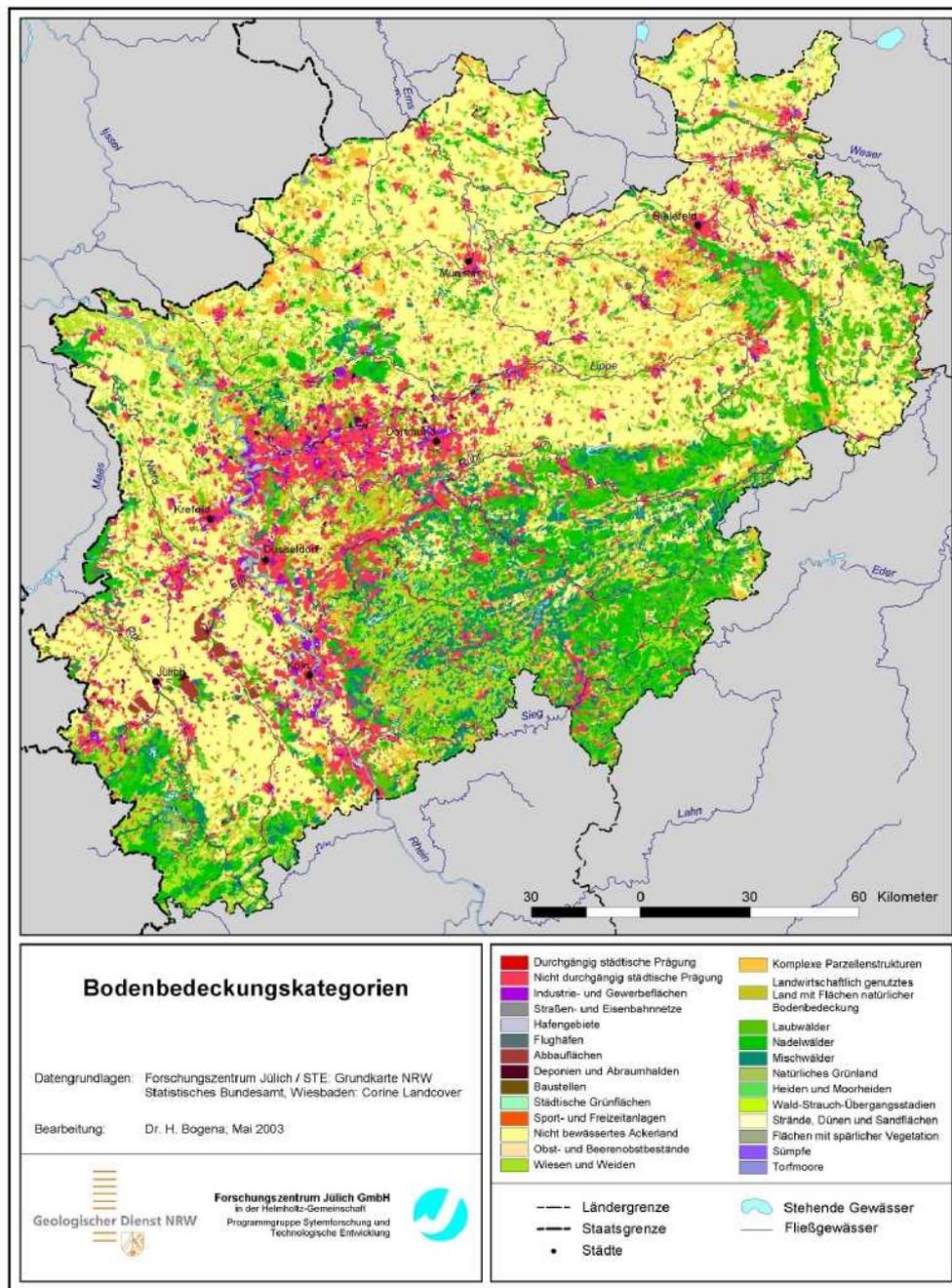


Abb. 13: Flächenanteile der Landnutzungsgruppen in Nordrhein-Westfalen.

Tab. 14: Anteile in Prozent der in GROWA verwendeten Landnutzungsgruppen nach ATV-DVWK (2002), sowie die Parameter Bewuchshöhe und Umtriebsalter (Z_B bzw. UA) für die Berechnung der maximalen Verdunstung (s. Tab. 26 für weitere Erläuterungen).

CORINE Kategorie	versiegelte Fläche [%]	vegetationslose Fläche [%]	Grünland		Ackerland [%]	Laubwald		Nadelwald		Gewässer [%]
			[%]	Z_B [cm]		[%]	UA [a]	[%]	UA [a]	
1.1.1	80		10	12		10	100			
1.1.2	35		20	12	20	15	100			
1.2.1	85		10	12		10	30			
1.2.2	50	20	20	12		5	100			
1.2.3	80	10	10	12		10	100			
1.2.4	30		70	12						
1.3.1		70	25	12						5
1.3.2		80	20	12						
1.3.3	20	80								
1.4.1			50	12		50	100			
1.4.2	15		60	12	5	10	100			
2.1.1					100					
2.2.2						100	20			
2.3.1			100	20						
2.4.2			35	20	40	25	10			
2.4.3			35	20	40	15	50	10	50	
3.1.1						100	155			
3.1.2								100	85	
3.1.3						50	155	50	85	
3.2.1			100	12						
3.2.2			50	20		50	50			
3.2.4						50	15	50	10	
3.3.1		100								
3.3.3		50	50	12						
4.1.1			50	20	40	10	50			
4.1.2			100	20						
5.1.1										100
5.1.2										100

bergland vertreten. Mit 28,4 % bilden die Waldkategorien „Laubwald“, „Nadelwald“ und „Mischwald“ die Landnutzungsgruppe mit dem zweitgrößten Flächenanteil in Nordrhein-Westfalen und die dominierende Landnutzungsgruppe in den Mittelgebirgsregionen. Die Bodenbedeckungskategorie „Grünland“ tritt demgegenüber mit ca. 16,7 % zurück. Grünland stellt insbesondere in der Westfälischen Bucht eine bedeutende Bodenbedeckungskategorie dar. Aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte von im Schnitt 520 Personen pro km² nehmen versiegelte Flächen in Nordrhein-Westfalen mit ca. 5,6 % einen relativ hohen Flächenanteil ein.



Karte 5: Die Bodenbedeckungskategorien nach CORINE für Nordrhein-Westfalen.

5.4 Bodenkundliche Datengrundlagen

Der Wasser- und Stoffhaushalt eines Landschaftsraumes wird in besonderer Weise durch pedologische Einflussgrößen bestimmt. Für die Verdunstung steht den Pflanzen nur das im Wurzelraum gespeicherte Wasser zur Verfügung, die sogenannte pflanzenverfügbare Bodenwassermenge. Dieser bodenhydrologische Kennwert geht in die Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen ein (Kap. 3.1.1). Zu seiner Ableitung sind Angaben über die nutzbare Feldkapazität, die effektive Durchwurzelungstiefe und die kapillare Aufstiegshöhe erforderlich. Die bodenhydrologischen Kennwerte Grundwasser- und Stauwasserstufe des Bodens sind zur Ausweisung von grundwassernahen Standorten mit erhöhtem Verdunstungspotenzial und zur Abtrennung des Basisabflussanteils von der Gesamtabflusshöhe wichtig (Kap. 3.2.2).

Alle bodenkundlichen Parameter wurden der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1 : 50.000 (BK50) entnommen. Der Maßstab dieser Karte gibt bei ausreichender Genauigkeit einen vergleichenden Überblick über die Böden des Landes und deren regionale Bedeutung. Die BK50 beschreibt jede Bodeneinheit durch die nach Flächenanteilen quantifizierten Bodentypen, den Grundwasser- und Staunäseeinfluss, die Geogenese bzw. Gesteinsart mit ihrer Stratigrafie und die Bodenartenschichtung bis in 2 m Tiefe (Schrey, 1994). Die Bodenartenschichtung enthält je Schicht nach Flächenanteilen quantifizierte Angaben zu den Fein- und Skelettbodenarten, Humus- und Kalkgehalten und zur Mächtigkeit. Jede Einheit wird zudem durch klassifizierte Angaben zur Sorptionsfähigkeit, zur Wasserspeicherkapazität und zur Durchlässigkeit sowie durch die Spanne der Bodenwertzahlen beschrieben. Auf dieser Basis werden in Verbindung mit Kennwerten aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden, 1994) die vorgestellten Auswertungen berechnet.

5.4.1 *Inhalt und Aufbau der analogen Sachinformationen*

Die BK50 beschreibt in einheitlicher Weise den Bodenaufbau bis 2 m Tiefe für das Land Nordrhein-Westfalen durch Bodeneinheiten (Legendeneinheiten). Eine Bodeneinheit umfasst Böden gleichartiger oder ähnlicher Entwicklung und vergleichbaren Substrataufbaus. Die Zusammenfassung erfolgt vorrangig bodensystematisch, d.h. nach dem Bodentyp und nach der bodenartigen Zusammensetzung, nachrangig werden auch Einflüsse des Gesteins, des Reliefs und der Bodenkultur mit einbezogen (Schlichting, 1970). Die auf einem Blatt vorkommenden Bodeneinheiten der Rand-

aufstellung sind entsprechend der deutschen bodenkundlichen Systematik (Mückenhäuser 1962) gegliedert:

- In der terrestrischen Abteilung sind die grundwasserfreien oder nur im tieferen Unterboden von Grundwasser beeinflussten „trockenen Landböden“, also die Ranker, Rendzinen, Braunerden, Parabraunerden und Podsole zusammengefasst.
- Der semiterrestrischen Abteilung zugeordnet sind die mineralischen Stau- nässe- und Grundwasserböden, also die Pseudogleye, Stagnogleye, Gleye, Moor- und Anmoorgleye.
- Die dritte Abteilung der organogenen Böden umfasst die Nieder-, Hoch- und Übergangsmoore.
- Den Abschluss bilden die künstlich veränderten Böden der meist überbau- ten Stadtgebiete, der Braunkohletagebaue, Halden, Steinbrüche, Kies-, Sand- und Tongruben.

Die Bodeneinheiten erscheinen farbig und mit einer Flächeneinschreibung, die als Kombinationen von Buchstaben und Ziffern bereits wichtige Informationen über Bodenart und Bodentyp gibt. Die Sachinformationen zu den Bodeneinheiten sind in drei Spalten aufgegliedert. Spalte 1 beschreibt unter den farbigen Kästchen der Bodeneinheiten die Bodenartenschichtungen in ihrer Zusammensetzung aus Sanden, Lehmen, Schluffen, Tonen und Torfen mit Skelett, Humus oder Kalkgehalten bis 2 m Tiefe. In Spalte 2 finden sich die vorherrschenden und begleitenden Bodentypen bzw. Subtypen dieser Bodeneinheit sowie das bodenbildende, stratigrafisch eingeordnete Ausgangsgestein. Spalte 3 informiert stichwortartig in gleichbleibender Reihenfolge über die Wertigkeit der Flächen im Rahmen der Bodenschätzung und kennzeichnet die Einheit allgemein nach Bodenart, Verbreitung und Geländelage. Ferner wird dargestellt, wie die Flächen zum Zeitpunkt der Erhebung in der Regel genutzt wurden und wie Ertragssicherheit und Ertragsleistung einzuschätzen sind.

In Tab. 15 sind beispielhafte Erläuterungen zu den ergänzenden Angaben der BK50 dargestellt. Die Bearbeitbarkeit ackerfähiger Böden der Einheit wird in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte im jahreszeitlichen Witterungsverlauf („Stundenböden“ oder „Minutenböden“), von der Hangneigung und vom Skelettgehalt („dichte Steinbestreuung“) bewertet; für weidefähiges Grünland wird auf mangelnde Trittfestigkeit hingewiesen. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Lockergesteins werden durch Angaben über die Sorptionsfähigkeit, Wasserkapazität und Wasserdurchlässigkeit charakterisiert. Außerdem finden sich hier neben Hinweisen auf die in der

Tab. 15: Erläuterung der ergänzenden Angaben der BK50.

	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Bodenschätzung (Bodenzahl oder Grünlandgrundzahl)	unter 18	18 bis 35	35 bis 55	55 bis 75	über 75
Ernteertrag [dt. Getreide/ha]	unter 35	35 bis 40	40 bis 50	50 bis 55	über 55
Sorptionsfähigkeit (T-Wert) [cmol/kg]	unter 2	2 bis 6	6 bis 12	12 bis 20	über 20
Nutzbare Wasserkapazität (nFK) für durchwurzelbaren Bodenraum bis max. 10 dm Tiefe [l/m ² bzw. mm/10 dm]	unter 50	50 bis 90	90 bis 140	140 bis 200	über 200
Wasserdurchlässigkeit des wassergesättigten Bodens (kf-Wert) [cm/Tag]	unter 1	1 bis 10	10 bis 40	40 bis 100	über 100
Basensättigung (V-Wert, Anteil der austauschbaren Kationenbasen an der Austauschkapazität) [%]	unter 5	5 bis 20	20 bis 45	45 bis 75	über 75

Bodenkarte durch Zeichen verdeutlichten Grundwasser- und Staunässeangaben eventuell auftretende Besonderheiten wie Ortstein oder Raseneisenstein, Übersandung, Erosionsgefährdung, Verschlammbarkeit, Dürreempfindlichkeit, Überflutungsgefahr, Melioration, Dränung, Grundwasserabsenkung und anthropogene Überformungen.

Die Überführung der analogen Legende in die digitale Legende wird als Kodierung bezeichnet, der folgende Vorstellungen zugrunde liegen (Schrey, 1994): Alle bodenkundlichen Sachdaten werden nach einheitlichen Gesichtspunkten digital erfasst. Grundlage dazu ist ein Datenschlüssel (Wörterbuch), der die verbalen Formulierungen aus der analogen Karte in alphanumerische Codes übersetzt, sowie eigens für die Kodierung entwickelte Syntaxregeln (Grammatik). Der Datenschlüssel lehnt sich an die Bodenkundliche Kartieranleitung der Geologischen Landesämter an und passt diese den spezifischen Belangen des Landes Nordrhein-Westfalen an. Durch die ausschließliche Verwendung definierter Codes und Regeln ist sichergestellt, dass jeder Sachverhalt der Kartenlegende durch eine eindeutige Kodierung der sachlichen und quantitativen Zusammenhänge beschrieben wird. Dadurch erhält man einen Datenbestand, der in seinen Beschreibungen formal reproduzierbar, von Zufälligkeiten frei ist und keine abgeleiteten Daten enthält. Auswertungen zu Themenkarten erfolgen durch ein Programm, das diesen Datenbestand prüft, die Kodierung in allgemein lesbaren Text zurückübersetzt und die Sachinformationen mit Kennwerten verknüpft.

Die Sachinformationen lassen sich im Zuge der Kodierung nicht nur durch Quantifizierung und Ergänzung präzisieren, sondern teilweise auch entflechten. Dies gilt für Einheiten, die mehrere Bodentypen auflisten, die erst in der Einzelfläche durch die Angabe zum Grundwasser oder zur Staunässe konkretisiert werden, oder für Boden-

artenschichtungen, die petrografische Varianten unterschiedlicher Ausgangsgesteine zusammenfassen. In solchen Fällen lassen sich die ursprünglichen Daten im Autorengespräch oft flächenscharf regionalisieren, zumal die digitale Karte nicht den begrenzten Satzspiegel der Legende einer Druckkarte, sondern den fast unbegrenzten Speicherplatz des Computers hat.

5.4.2 *Grundwasserstand*

Die Bodenkarte ist konzipiert für Aufgaben der Land- und Forstwirtschaft, des Boden- und Bodennutzungsschutzes, des Natur- und Landschaftsschutzes sowie der Landschaftspflege. Entsprechend ihrer Zielrichtung zeigt die Bodenkarte die Wasserverhältnisse bis zwei Meter unter Geländeoberfläche auch für kleinräumige, geringmächtige Grundwasserkörper einschließlich des geschlossenen Kapillarsaums, der je nach Bodenart und Lagerungsdichte zwischen ein und fünf Dezimetern liegt. Aus diesen Differenzierungen ergeben sich Abweichungen gegenüber den Angaben zur Grundwasseroberfläche in hydrogeologischen und hydrologischen Karten.

Das oberflächennahe Grundwasser bestimmt wesentlich die Entwicklung und Eigenschaften der Böden und damit deren Nutzungsmöglichkeit oder Meliorationsbedürftigkeit. Der Grundwasserstand schwankt im Jahresverlauf in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf, vom Substrat, von der Geländelage und der Vegetation mehr oder weniger stark. Daher wird neben dem mittleren Grundwasserstand auch die Amplitude seiner Schwankungen dargestellt. Vor allem unter Wald sind die Schwankungen nach unten sehr stark und die Nassphasen der durch Staunässe geprägten Böden kürzer als unter landwirtschaftlicher Nutzung.

Der Grundwasserstand kann anthropogen beeinflusst sein durch Bergsenkung, Drainage, Vorflutregelung, Grundwasserentnahme von Wasserwerken, Industrie oder als Absenkung im Bereich des Braunkohletagebaus sowie durch den Rückstau oberflächennaher Grundwasserströmungen vor Bauwerken wie Autobahnen oder Kanälen. Nur die detaillierte Kenntnis der konkreten Einflüsse ermöglicht Aussagen über die so verursachten Grundwasserstandsänderungen. Böden in Auenlagen zeichnen sich vor allem in der Nähe der Vorfluter durch extrem starke, kurzzeitige Schwankungen des Grundwasserstands als Folge der sogenannten „Auenhydrologie“ aus. Hier bestimmen Niederschläge, Zuflüsse über die Wasserführung der Flüsse mit leichter zeitlicher Verzögerung und entfernungsabhängiger Intensität den Grundwasserstand.

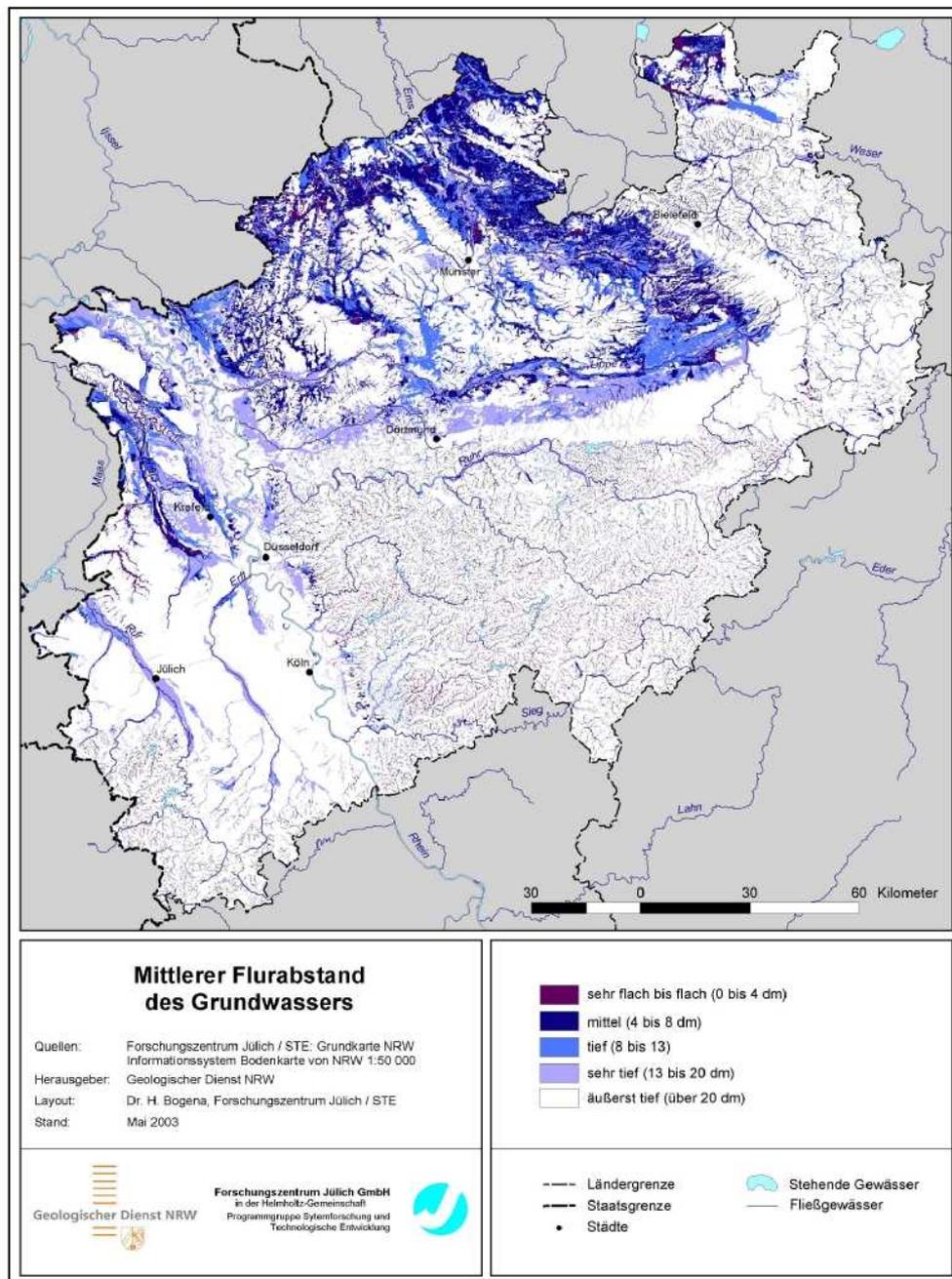
Der Abstand zwischen effektiver Durchwurzelungstiefe und Grundwasseroberfläche sowie die ungesättigte Wasserleitfähigkeit und Porengrößenverteilung des Bodens in diesem Tiefenabschnitt bestimmen den kapillaren Aufstieg von Grundwasser in den von Wurzeln erschlossenen Bodenraum und damit die Wasserreserve, die der Vegetation während trockener Witterungsperioden zusätzlich zur nutzbaren Feldkapazität bereitgestellt wird.

Die Grundwasserstufe kennzeichnet den mittleren Flurabstand des Grundwassers einschließlich des geschlossenen Kapillarsaums in Dezimetern unter der Geländeoberfläche (GOF) mit einer normalen Schwankungsamplitude von einer Tiefenstufe bezogen auf das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Grundwasserfreie Böden erhalten die Grundwasserstufe „0“. Im Bodeneinheitensymbol wird der numerischen Grundwasserstufe ein „G“ für Grundwasser oder ein „H“ für Hanggrundwasser sowie ein weiterer Buchstabe für die Höhe des mittleren Schwankungsbereichs vorangestellt (siehe Tab. 16).

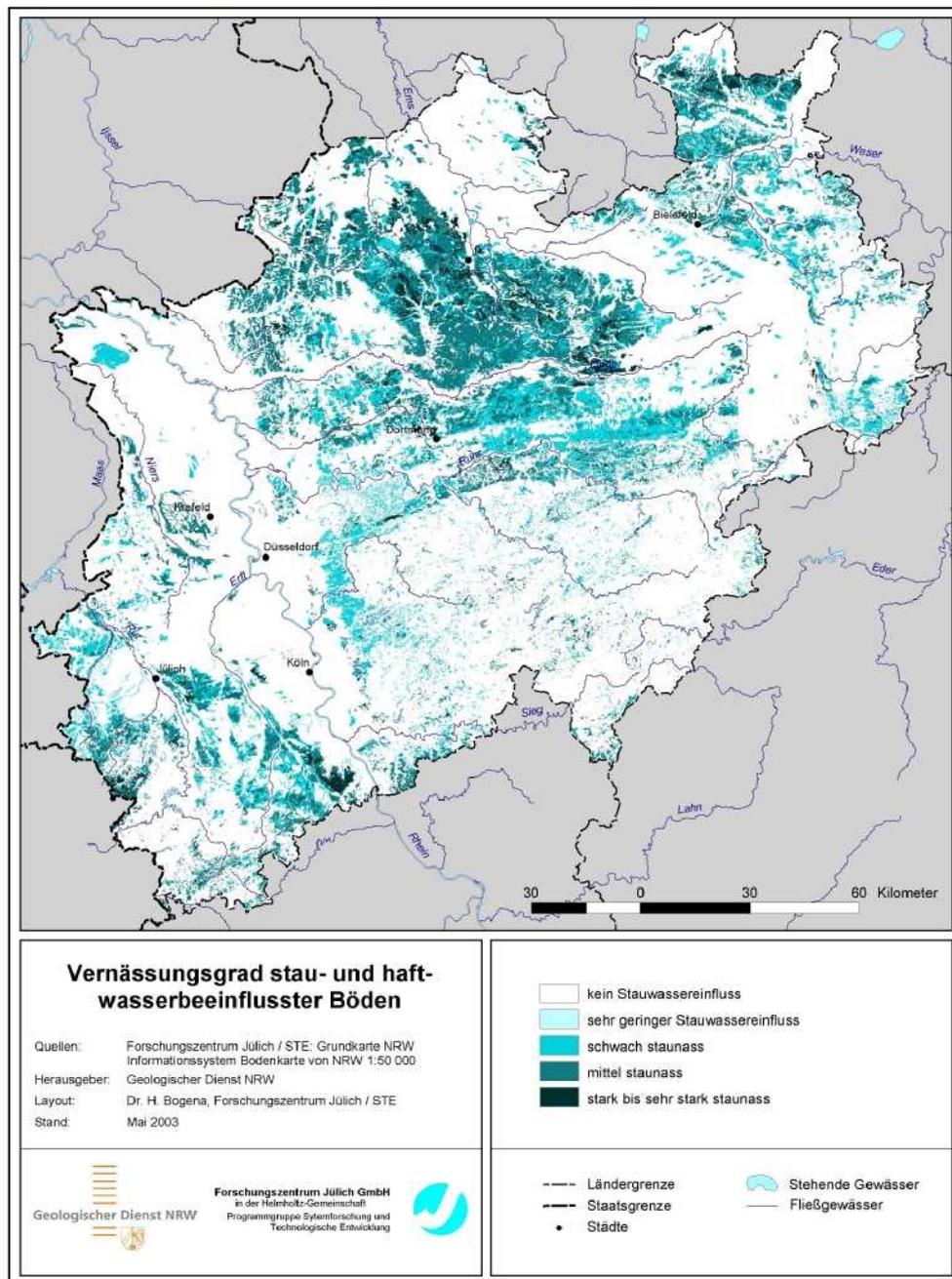
Karte 6 zeigt den mittleren Flurabstand in Dezimetern unter Geländeoberfläche. Die für die Ausgliederung grundwassernaher Standorte relevanten Flächen mit einem Flurabstand von weniger als 4 dm treten in den Flussauen, Moor- und Niederungsgebieten auf. Als Beispiele für gehäuftes Auftreten von diesen Flächen sind die Auenböden im nördlichen Westmünsterland zwischen den Flüssen Vechte und Berkel sowie die Moorböden des Stemmer Moors nördlich des Wiehengebirges zu nennen. Standorte mit einem mittleren bis tiefen Grundwasserflurabstand finden sich verbreitet in den Niederungen von Niers und Issel, im West- und Ostmünsterland sowie vereinzelt im Emscher- und Kernmünsterland und nördlich des Wiehengebirges. In den Mittelgebirgsregionen sind häufig die Böden der Flussauen von Grundwasser beeinflusst. Hingegen sind in der Niederrheinischen Bucht und in den südlichen Hellwegbörden kaum Standorte mit grundwasserbeeinflussten Böden zu finden.

Tab. 16: Kodierung der Art und Höhe des Flurabstands sowie der Grundwasserstufe.

Bezeichnung	sehr flach bis flach	mittel	tief	sehr tief	äußerst tief
Mittlerer Schwankungsbereich dm u. GOF	0 bis 4	4 bis 8	8 bis 13	13 bis 20	über 20
normal schwankend	GW1	GW2	GW3	GW4	nicht belegt
abgesenkt und normal schwankend	nicht belegt	GA2	GA3	GA4	GA5
angestiegen und normal schwankend	GH1	GH2	GH3	GH4	nicht belegt
stark nach oben schwankend	GO1	GO2	GO3	GO4	nicht belegt
stark nach unten schwankend	GU1	GU2	GU3	GU4	nicht belegt
stark nach unten und oben schwankend	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5



Karte 6: Mittlerer Flurabstand des Grundwassers in Nordrhein-Westfalen.



Karte 7: Vernässungsgrad stau- und haftwasserbeeinflusster Böden in Nordrhein-Westfalen.

5.4.3 Staunässe

Die Staunässestufe beschreibt die Art und den Grad der Vernässung stau- und haftwasserbeeinflusster Böden bezogen auf das gesamte Bodenprofil. Stauwasserfreie Böden erhalten die Staunässestufe „0“. In Tab. 17 ist die Kodierung der Staunässestufen aufgelistet.

Tab. 17: Codierung der Art und des Grades der Vernässung.

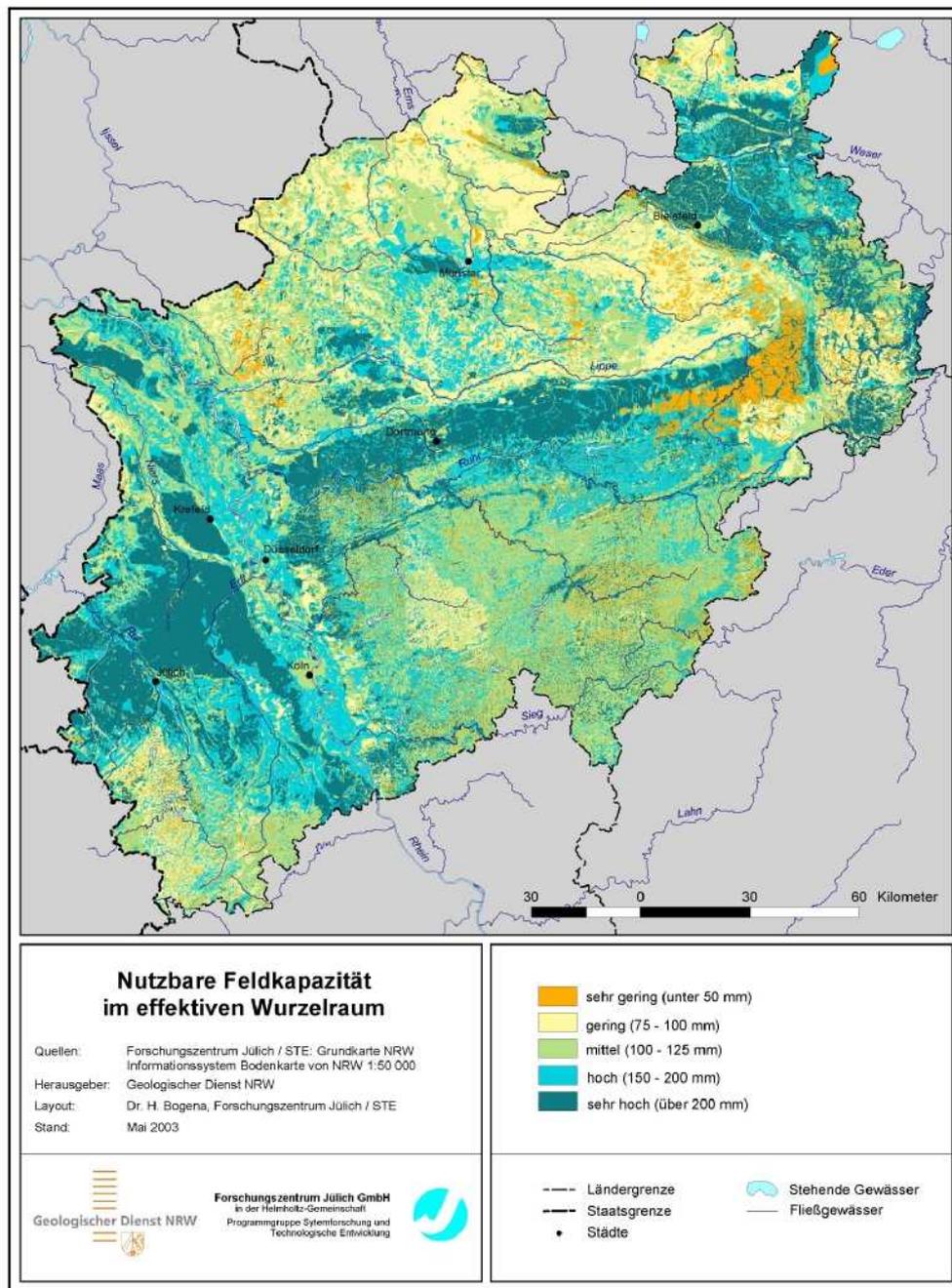
Bezeichnung	sehr schwach	schwach	mittel	stark	sehr stark
Staunässe	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5
Hangstaunässe	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5
Haftnässe	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5

Karte 7 zeigt den Vernässungsgrad der stau- und haftwasserbeeinflussten Böden in Nordrhein-Westfalen. Aus dieser Karte geht hervor, dass mittel bis sehr stark beeinflusste Böden flächenmäßig vor allem im Kernmünsterland und zudem noch in der südlichen Niederrheinischen Bucht, im Westmünster- und Emscherland, in den Hellwegbörden sowie nördlich und im Bereich des Wiehengebirges auftreten. Ansonsten sind Böden mit schwachen bis sehr schwachen Vernässungen im gesamten Gebiet Nordrhein-Westfalens vertreten, mit Ausnahme der Rheinebenen, weiten Teilen des Ostmünsterlands sowie des Sauer- und Siegerlands.

5.4.4 Pflanzenverfügbares Wasser im effektiven Wurzelraum

Das pflanzenverfügbare Bodenwasser entspricht der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (Schrey, 1996), bei grundwassernahen Böden kommt der jährliche kapillare Aufstieg von Grundwasser in den Wurzelraum hinzu.

Die **nutzbare Feldkapazität** ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation erreichbar ist und in den Mittelporen mit Saugspannungen von pF 1,8 bis 4,2 gespeichert wird. Sie errechnet sich je Bodenartenschicht aus dem Anteil der Bodenarten bei mittlerer Lagerungsdichte, korrigiert durch volumenprozentuale Abschläge für den Skelettanteil (ohne nutzbare Feldkapazität) bzw. durch Zuschläge für die Humusgehalte. Aus der Summe der nutzbaren Feldkapazität je Bodenartenschicht über die mittlere effektive Durchwurzelungstiefe ergibt sich die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums.



Karte 8: Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Nordrhein-Westfalen.

Die mittlere effektive Durchwurzelungstiefe ist landnutzungsabhängig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden bei der Berechnung der nutzbaren Feldkapazität die Bodenbedeckungskategorien Ackerland, Grünland und Wald unterschieden. Zur räumlichen Differenzierung der Bodenbedeckung wurde der CORINE Land Cover Datensatz genutzt (siehe Kap. 5.3). Die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität findet getrennt für jede Landnutzungskategorie statt, wobei von einer maximalen Durchwurzelungstiefe bei Ackerland von 11 dm, bei Grünland von 8 dm und bei Wald von 15 dm ausgegangen wird. In den Fällen, bei denen die Durchwurzelung durch die Bodeneigenschaften begrenzt wird (niedriger Grundwasserflurabstand, geringe Bodenmächtigkeit etc.), fällt die Durchwurzelungstiefe entsprechend niedriger aus.

Karte 8 zeigt die nach diesem Verfahren ermittelte nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums. Für Teilbereiche im äußersten Nordosten Nordrhein-Westfalens sowie einzelnen Stadtgebietsflächen (z.B. Köln) wurden die Daten der digitalen Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK1000) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe eingesetzt, da diese Flächen in der BK50 nicht mit Werten belegt waren.

Die Regionen mit Böden hoher nutzbarer Feldkapazität sind in Nordrhein-Westfalen mit dem Vorkommen von Löss verbunden. Löss findet sich verbreitet in der Niederrheinischen Bucht und vereinzelt im Niederrheinischen Tiefland, wobei die Jülicher Börde mit einer mittleren nutzbaren Feldkapazität von über 210 mm deutlich hervorragt. Des Weiteren weisen die Lössgebiete entlang der nördlichen Abdachung des Rheinischen Schiefergebirges (Hellwegbörden, Westenhellweg, Bergisch-Sauerländisches Unterland) sowie die Region nördlich des Teutoburger Waldes (Lübbecker Lößland, Ravensberger Hügelland, Lipper Bergland) sehr hohe Werte auf. Deutlich geringere nutzbare Feldkapazitäten weisen die Mittelgebirgsregionen des Rheinischen Schiefergebirges sowie weite Teile der Westfälischen Bucht auf, wobei das Ostmünsterland mit einer mittleren nutzbaren Feldkapazität von unter 90 mm und lokal unter 30 mm die geringsten Feldkapazitäten aufweist.

Der **Kapillaraufstieg** von Grundwasser in den Wurzelraum hängt vom Abstand zwischen der Untergrenze des Wurzelraums und der zeitlich variierenden Grundwasseroberfläche, vom Wassergehalt im Wurzelraum sowie von den Bodenarten und ihrer Lagerung in diesem Tiefenbereich ab. Bei geringem Abstand bzw. schluffreichen Bodenarten ist der Kapillaraufstieg hoch, bei großem Abstand bzw. sandreichen Bodenarten ist er niedrig. Die mittlere jährliche Wassermenge, die durch kapillaren Aufstieg in den Boden gelangt, wird aus der Aufstiegsrate und der Dauer des kapillaren Aufstiegs berechnet:

$$KA = KR \cdot D$$

Gl. 20

mit	KA	= jährliche kapillare Aufstiegshöhe	(mm/a)
	KR	= jährliche kapillare Aufstiegsrate	(mm/d)
	D	= Dauer des kapillaren Aufstiegs	(d/a)

Werte für die kapillare Aufstiegsrate liegen im digitalen Bodeninformationssystem BK50 vor. Zur Ermittlung der Dauer des kapillaren Aufstiegs werden durch das NIBIS (Niedersächsisches Bodeninformationssystem) (Müller, 1997) Richtwerte für verschiedene Landnutzungen angegeben (Tab. 18). Diese Werte wurden zu der folgenden Gleichung verallgemeinert:

$$D = (a + 0,02(1 - KR)) \cdot nFKWe + KR \cdot b$$

Gl. 21

mit	nFKWe	= nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum	(mm)
	a, b	= nutzungsspezifische Konstanten	(d/mm*a, d ² /mm*a)

Tab. 18: Dauer des kapillaren Aufstiegs in Tagen nach VKR 7.1.14 des NIBIS (Müller, 1997); nFKWe: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in mm.

Nutzung	KR [mm/d]	Beziehung	Dauer des kapillaren Aufstiegs [d/a]			
			nFKWe=0	nFKWe=100	nFKWe=200	nFKWe=300
Getreide	<= 1	0,14 * nFKWe + 14,3	14,3	28,3	42,3	56,3
	2	0,13 * nFKWe + 23,4	23,4	36,4	49,4	62,4
	3	0,10 * nFKWe + 35,0	35,0	45,0	55,0	65,0
	4	0,07 * nFKWe + 44,4	44,4	51,4	58,4	65,4
	>=5	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Mais	<= 1	0,20 * nFKWe + 16,6	16,6	36,6	56,6	76,6
	2	0,18 * nFKWe + 32,8	32,8	50,8	68,8	86,8
	3	0,16 * nFKWe + 45,3	45,3	61,3	77,3	93,3
	4	0,11 * nFKWe + 62,5	62,5	73,5	84,5	95,5
	>=5	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
Intensivweide	<= 1	0,25 * nFKWe + 19,5	19,5	44,5	69,5	94,5
	2	0,23 * nFKWe + 38,7	38,7	61,7	84,7	107,7
	3	0,21 * nFKWe + 59,4	59,4	80,4	101,4	122,4
	4	0,18 * nFKWe + 81,0	81,0	99,0	117,0	135,0
	>=5	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0

In Tab. 19 sind die nutzungsspezifischen Konstanten a und b zur Berechnung der Dauer des kapillaren Aufstiegs aufgelistet:

Tab. 19: Nutzungsspezifische Konstanten zur Berechnung der Dauer des kapillaren Aufstiegs nach Gl. 21.

Nutzung	a	b
Getreide	0,14	12
Mais	0,20	16
Intensivweide	0,25	20

Zur räumlichen Differenzierung der Landnutzung wird der CORINE Land Cover Datensatz genutzt (siehe Kap. 5.3), wobei in die Kategorien Ackerland, Grünland und Wald unterschieden wurde. Aufgrund der fehlenden Differenzierung zwischen Mais und Getreide bei CORINE wurde für die Ackerflächen ein Mittelwert aus den Konstanten von Getreide und Mais gebildet. Für die Kategorien Grünland und Wald wurden die Konstanten für Intensivweide herangezogen.

Bei der Berechnung des kapillaren Aufstiegs muss berücksichtigt werden, dass dieser nur bei Wasserdefizit auftritt. Wasserdefizit ist im Mittel dann gegeben, wenn die Verdunstung im Sommerhalbjahr größer ist als die Niederschlagsmenge dieses Zeitraums. Ein Maß hierfür ist die klimatische Wasserbilanz des Sommerhalbjahrs KWB_{So} werden, welche sich aus der Differenz von mittlerer Niederschlagshöhe im Sommer N_{So} und der potenziellen Verdunstung im Sommer ETp_{So} ergibt:

$$KWB_{So} = N_{So} - ETp_{So} \quad \text{Gl. 22}$$

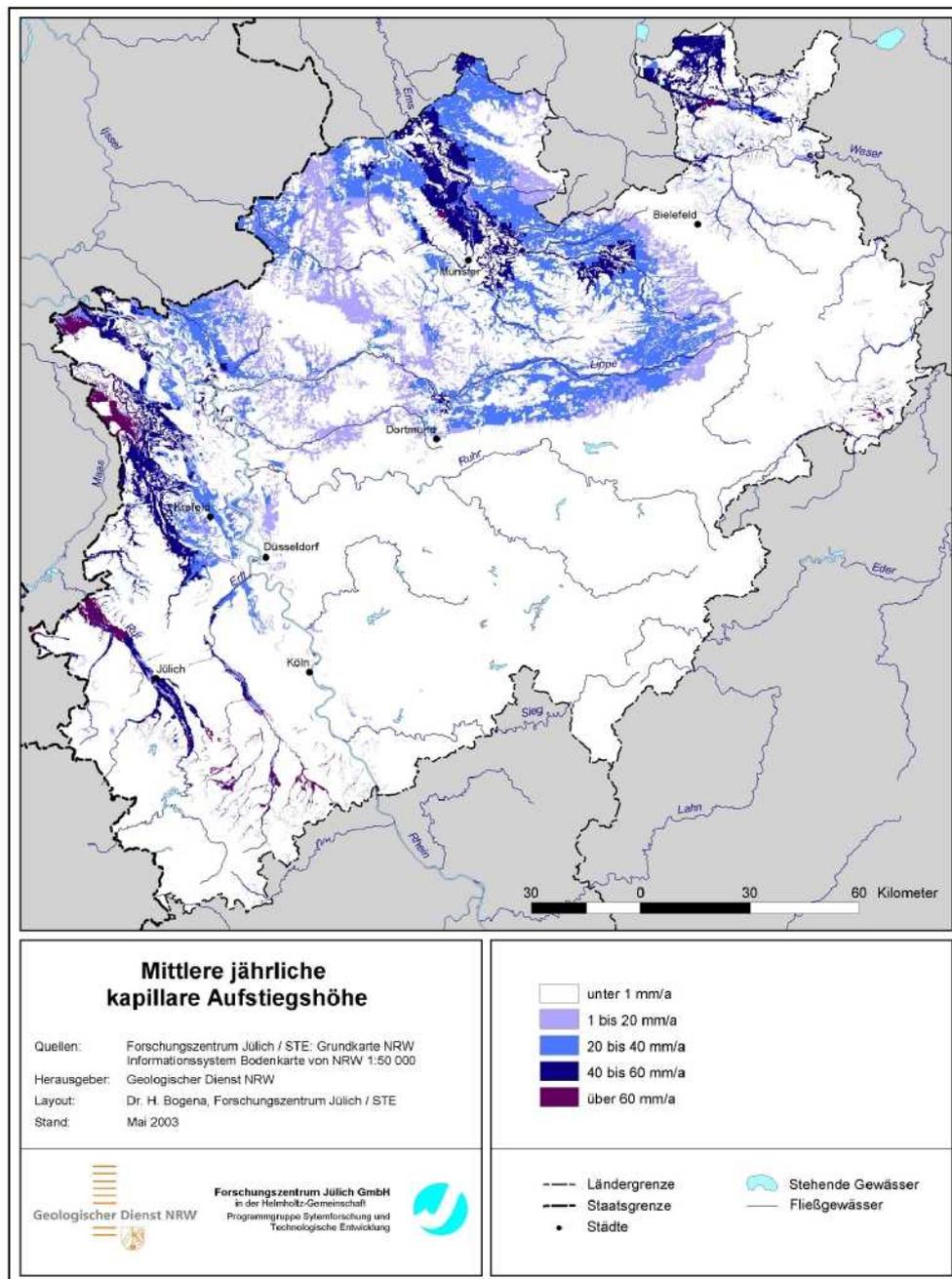
Die mittlere jährliche kapillare Aufstiegshöhe wird somit folgendermaßen berechnet:

$$KA = \begin{cases} 0 & \text{für } KWB_{So} \geq 0 \\ KWB_{So} & \text{für } KWB_{So} < 0 \quad \text{und} \quad KR \cdot D \geq KWB_{So} \\ KR \cdot D & \text{für } KWB_{So} < 0 \quad \text{und} \quad KR \cdot D < KWB_{So} \end{cases} \quad \text{Gl. 23}$$

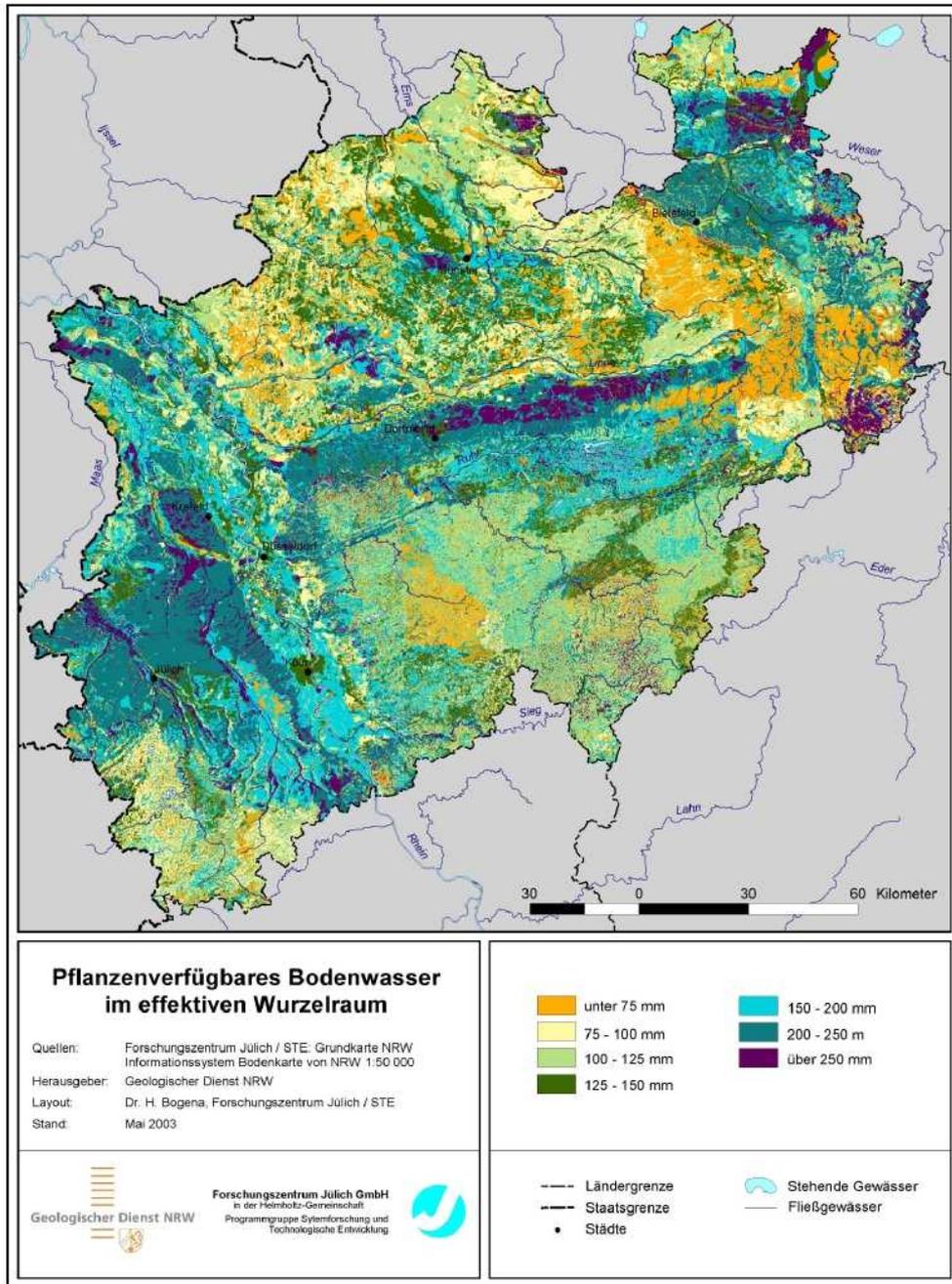
Das Ergebnis der Berechnung ist in Karte 9 dargestellt. Die räumliche Verteilung der vom kapillaren Aufstieg betroffenen Standorte ist nahezu deckungsgleich mit der Verteilung der grundwasserbeeinflussten Standorte (siehe Karte 6), da der kapillare Auf-

stieg an niedrige Flurabstände gebunden ist. Aufgrund besonderer klimatischer und bodenphysikalischer Verhältnisse kann jedoch der direkte Zusammenhang zwischen Grundwasserstand und kapillarer Aufstiegshöhe überprägt sein. Beispielsweise weisen die Auenböden der Rur relativ geringe Grundwasserstände auf (13 bis 20 dm), weswegen mit relativ geringen kapillaren Aufstiegshöhen zu rechnen wäre. Aufgrund der günstigen bodenphysikalischen Verhältnisse der Böden und des relativ hohen Verdunstungsdefizits im Sommerhalbjahr treten dennoch häufig sehr hohe kapillare Aufstiegshöhen von 50 bis 70 mm/a auf. Weiterhin finden sich Standorte, die von kapillarem Aufstieg betroffen sind, verbreitet im Niederrheinischen Tiefland (insbesondere in den Niederungen von Niers und Rhein mit Aufstiegshöhen von bis zu über 70 mm/a), sowie in der Westfälischen Bucht (insbesondere Hellwegbörden, Ost- und Westmünsterland mit bis zu über 50 mm/a) und im Westfälischen Tiefland (Stemmer Moor mit bis zu über 60 mm/a).

Die Summe der nutzbaren Feldkapazität und des Kapillaraufstiegs von Grundwasser über eine kulturartenabhängige mittlere jährliche Anzahl von Tagen mit Grundwasserzehrung ergibt die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge. Diese Größe ist die einzige bodenphysikalische Größe, die in die Berechnung der realen Verdunstungshöhe nach Renger & Wessolek (1996) eingeht (hierzu Kap. 3.1.1). Karte 10 zeigt die Verteilung der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge im effektiven Wurzelraum. Die Regionen Nordrhein-Westfalens, deren Böden vorwiegend aus lößhaltigen Ausgangssubstraten entstanden sind, weisen in der Regel hohe pflanzenverfügbare Bodenwassermengen auf. So werden für einige Regionen im Mittel Werte von über 200 mm/a erreicht (z.B. Ravensberger Hügelland, Kempen-Aldekerker Platten, Jülicher Börde, Lübbecker Lößland, Westenhellweg, Kalenberger Bergland sowie im Holzmindener Wesertal). Im Falle sehr geringer Bodenmächtigkeiten, wie z.B. für die Rendzina-Böden der Region der Paderborner Hochfläche, und für Böden mit sandigem Ausgangssubstrat, wie z.B. in der Region der Niederrheinischen Sandplatten, ergeben sich zum Teil pflanzenverfügbare Bodenwassermengen von unter 100 mm/a.



Karte 9: Mittlere jährliche kapillare Aufstiegshöhe der grundwasserbeeinflussten Böden in Nordrhein-Westfalen.



Karte 10: Das pflanzenverfügbare Bodenwasser im effektiven Wurzelraum (Summe aus der nutzbaren Feldkapazität und dem Kapillaraufstieg) in Nordrhein-Westfalen.

5.5 Hydrogeologische Datengrundlage

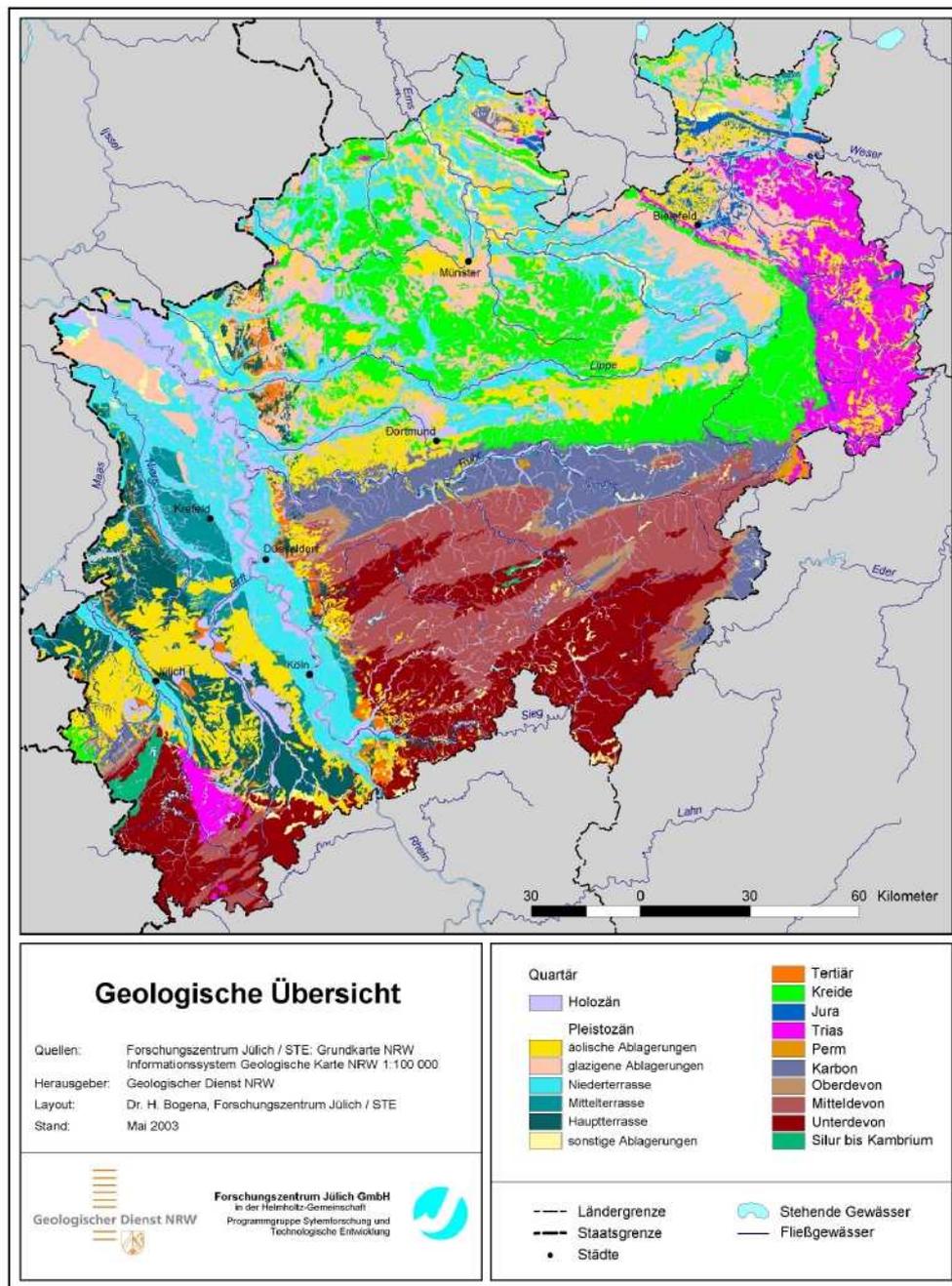
Hydrogeologische Daten geben Aufschluss über die vom Grundwasser durchströmten Gesteine und sind können somit für die raumbezogene Interpretation der relevanten Abflusskomponenten genutzt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bilden die geologischen Einheiten der Festgesteinsbereiche die Grundlage für das Separationsverfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung (siehe Kap. 3.2.2).

Das Fachinformationssystem Hydrogeologische Karte 1:100.000 wurde im Rahmen der Arbeiten zur EU-WRRL (Europäischen Wasserrahmenrichtlinie) vom Geologischen Dienst NRW entwickelt. Es liegt in der ersten Ausbaustufe vor. Hierbei sind die dargestellten Geometrien mit denen der Geologischen Karte 1:100.000 (GK100) identisch (GD NRW, 2003).

5.5.1 Geologischer Überblick

Karte 11 zeigt eine Übersicht über die geologischen Verhältnisse in Nordrhein-Westfalen auf Basis der GK100. Die stratigrafische Gliederung wurde in Abhängigkeit des oberflächennahen Auftretens der Gesteinsformationen vorgenommen.

Die vor allem in den südlichen und östlichen Teilen Nordrhein-Westfalens oberflächlich anstehenden paläozoischen und mesozoischen Festgesteine nehmen landesweit einen Flächenanteil von etwa 42 % ein. Die im Zuge der variszischen Gebirgsbildung entstandenen paläozoischen Festgesteine des Rheinischen Schiefergebirges nehmen hierbei den größten Flächenanteil ein. Vordevonische Festgesteine treten nur vereinzelt zutage, z.B. im Bereich des Hohen Venns sowie im Ebbe- und Remscheider-Sattel im Sauerland in Form von kambrischen und ordovizischen Tonschiefern und Quarziten. Das Rheinische Schiefergebirge ist vorwiegend aus devonischen und karbonischen Sedimentgesteinen aufgebaut, die Mächtigkeiten von mehreren tausend Metern erreichen können. Hierbei handelt es sich um Wechselfolgen von Silt- und Tonsteinen sowie Sandsteinen und Grauwacken mit geringen Hohlraum- und Grundwasserspeichervolumen. Die Wasserführung ist bei diesen Gesteinen vorwiegend an tektonische Verwerfungen und die Klüftung gebunden. Aufgrund ihrer meist starken Verkarstung können die Karbonatgesteine des Mitteldevons und Oberdevons (z.B. als Massenkalk im Sauerland, Bergischen Land und Lahnggebiet) sowie des Karbons (Kohlenkalk) ein hohes Grundwasserspeichervolumen aufweisen.



Karte 11: Geologische Übersicht von Nordrhein-Westfalen.

Mesozoische Festgesteine stehen in der Westfälischen Bucht und im Weserbergland an. Im Weserbergland sind dies vorwiegend Gesteine der Triaszeit. Die meist sandigen Gesteine der Buntsandstein-Stufe werden von Kalksteinen des Muschelkalks abgelagert. Diese werden wiederum von Ton-, Mergel- und Sandsteinen des Keupers abgelagert. Das Münsterländer Becken ist eine schüsselartige geologische Struktur, die aus einem fast 2000 m mächtigen, zur Kreidezeit abgelagertem Sedimentstapel aufgebaut ist. Die Abfolge beginnt mit Ablagerungen aus der Unterkreide, aus denen vor allem Sandsteine hervorgegangen sind (z.B. Osningsandstein), welche überwiegend im östlichen Rand des Beckens zu Tage anstehen. Darüber lagern Kalk- und Mergelsteine der Oberkreide die am Südwestrand des Beckens in Sandsteine übergehen (Essener Grünsand). Ähnliche sandige Einschaltungen kommen auch im Beckeninern vor (Halturner Sande), die eine hohe Grundwasserergiebigkeit aufweisen.

Ungefähr 58 % der oberflächennahen Grundwasserleiter Nordrhein-Westfalens sind aus Lockergesteinen aufgebaut. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um quartäre Ablagerungen. Mächtige tertiäre Lockergesteinsablagerungen befinden sich vor allem in der Niederrheinischen Bucht, werden jedoch zumeist von glazigenen Sedimenten (vorwiegend Sande und Mergel) und äolischen Ablagerungen (Löß, Dünen-sande) überdeckt. Im nördlichen und nordwestlichen Teil der Westfälische Bucht bedecken die glazigenen Ablagerungen der Saalevereisung große Flächen des Münsterländer Kreidebeckens. Im Kernmünsterland sind es vorwiegend tonig-mergelige Sedimente (Grundmoräne, Geschiebemergel), am Fuße des Teutoburger Waldes und des Osnings sowie im Münsterländer Kiessandzug sind es vorwiegend Sande. Während des Pleistozäns wurden schließlich die Kiese und Schotter der Haupt-, Mittel- und Niederterrassen abgelagert, welche für die größeren Flüsse (Rhein, Maas, Lippe, Ems, Weser) bedeutende Ausdehnungen erreichen können.

5.5.2 *Hydraulische Leitfähigkeit der wasserführenden Gesteine*

Gabriel und Ziegler (1988) weisen darauf hin, dass der spezielle lithologische Charakter der Gesteinskomplexe bedeutender für die hydrogeologische Bewertung ist als deren stratigrafische Stellung. Dies gilt insbesondere für die Quantifizierung der Basisabflussanteile im Festgestein (siehe Kap. 3.2.2). Aus diesem Grunde wurden auf Basis der GK100 abgeleitete hydrogeologische Kenngrößen des Fachinformationssystems HK100 für die Ermittlung der Grundwasserneubildung eingesetzt.

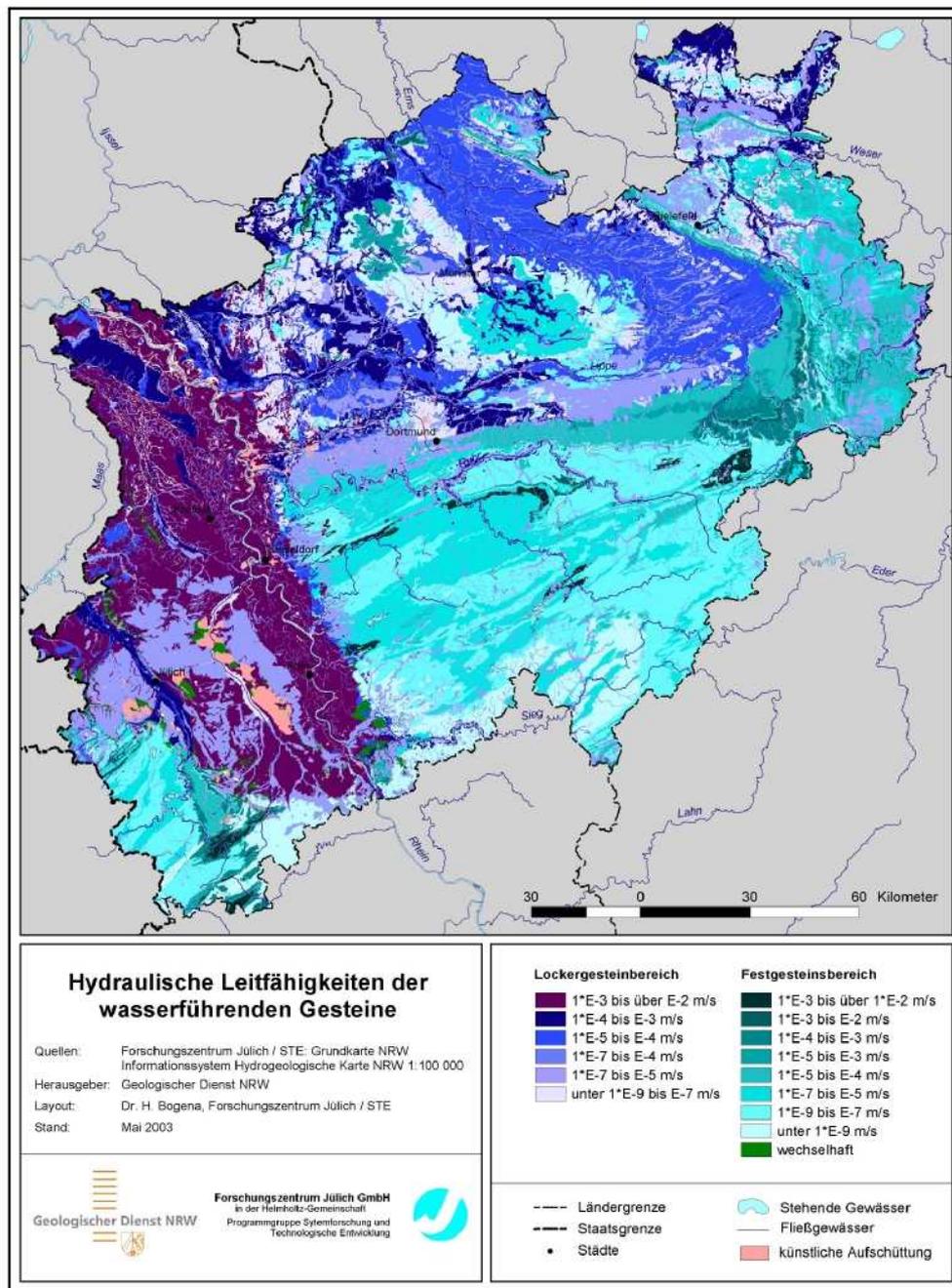
In diesem Zusammenhang sind die oberflächennah anstehenden Gesteine hinsicht-

lich ihrer Durchlässigkeit, der Zugehörigkeit zum geochemischen Gesteinstyp und der Art des Hohlraumvolumens bewertet worden. Soweit es die geologische Kartengrundlage zuließ, wurde auch eine Bewertung der Deckschichten vorgenommen. Da das Informationssystem HK100 eine generalisierte Übersichtsdarstellung ist, liegen der Bewertung der Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeit zunächst Karten, Auswertungen und Darstellungen anderer Maßstäbe zugrunde. Des Weiteren sind auch Regionalkenntnisse und Erfahrungen der bearbeitenden Geologen eingeflossen.

Die eigentliche Datenbasis sind Pumpversuchsauswertungen und bei klastischen Lockergesteinen auch die Auswertung von Siebanalysen. Dabei wird eine Methode angewendet, die auf dem Algorithmus von Beyer (1964) basiert und den Kornverteilungskurven typische Durchlässigkeitsbeiwerte zuordnet. Bei Festgesteinen werden Klüftigkeit bzw. Durchtrennungsgrad abgeschätzt. Dargestellt wird die für wasserwirtschaftliche Bewertungen relevante horizontale Durchlässigkeit. Bei geschichteten Lockergesteinen, besonders wenn gering durchlässige Ton- oder Schluffbänder eingelagert sind, ist die vertikale Durchlässigkeit oft um ein bis zwei Dekaden geringer.

Karte 12 zeigt die hydraulischen Leitfähigkeiten der wasserführenden Gesteinschichten in Nordrhein-Westfalen. Die hydraulischen Leitfähigkeiten der quartären Ablagerungen der Niederrheinischen Bucht liegen, in Abhängigkeit von der lithologischen Ausbildung der Sedimente, häufig zwischen 10^{-4} m/s und 10^{-2} m/s. In den Gebieten, wo der Löss mächtige Deckschichten ausbildet (z.B. Jülicher Börde, Zülpicher Börde), wurden in der Karte im Vergleich zu den pleistozänen Sanden und Kiesen deutlich geringere Leitfähigkeiten (10^{-7} m/s bis 10^{-5} m/s) ausgewiesen. Weiterhin treten in der Niederrheinischen Bucht vielfach ausgedehnte Flächen mit künstlichen Aufschüttungen auf, denen aufgrund der heterogenen Substrate keine Leitfähigkeitsklasse zugewiesen werden kann.

In der Westfälischen Bucht und im Westfälischen Tiefland stehen sowohl quartäre Lockersedimente als auch mesozoische Festgesteine mit einem weiten Spektrum an hydraulischen Leitfähigkeiten an. Im Kernmünsterland treten oberkreidezeitliche Tonmergelsteine und Mergelsteine zutage, die in Abhängigkeit von der Klüftigkeit Wasserleitfähigkeiten von 10^{-9} m/s bis zu 10^{-3} m/s aufweisen. In Ost- und Westmünsterland sind diese Schichten fast vollständig von quartären Lockergesteinen überdeckt. Grundmoränenablagerungen weisen hierbei zum Teil sehr niedrige Leitfähigkeiten auf (10^{-7} m/s bis 10^{-5} m/s) auf, wohingegen die glazigenen und äolischen Sandablagerungen sowie die Flussterrassen deutlich höhere Leitfähigkeiten haben können (zumeist zwischen 10^{-5} m/s bis 10^{-3} m/s).



Karte 12: Die hydraulischen Leitfähigkeiten der wasserführenden Gesteine in Nordrhein-Westfalen.

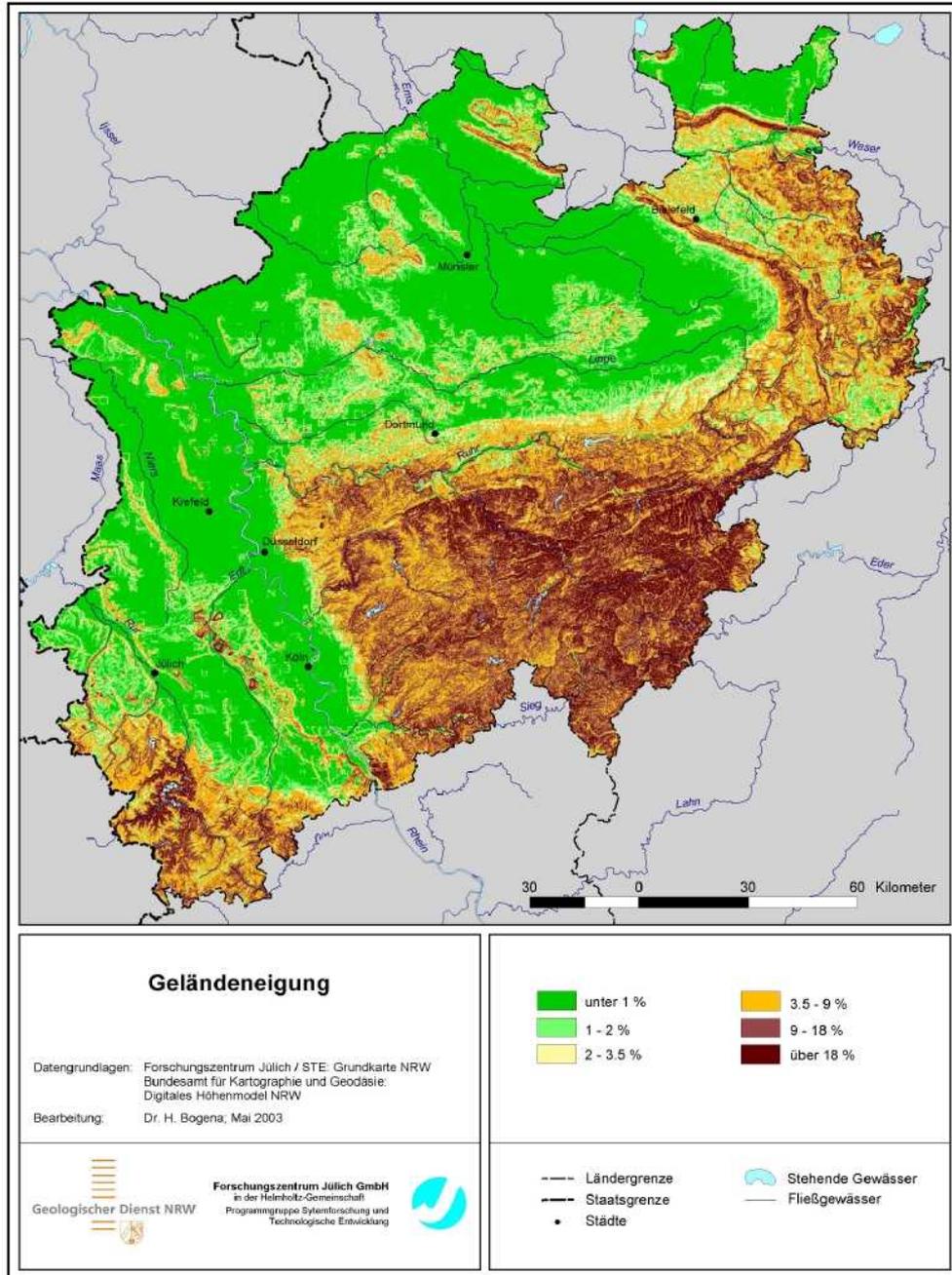
Das Weserbergland wird durch triassische bis kreidezeitliche Festgesteinsfolgen geprägt. Hierbei besitzen die Sandsteine und Quarzite des Keupers häufig Leitfähigkeiten zwischen 10^{-5} m/s und 10^{-4} m/s bzw. 10^{-7} m/s bis 10^{-5} m/s bei Mergel- und Gipssteinen. Die Kalk- und Mergelsteine der Muschelkalkstufe sowie die Sandsteine und Konglomerate der Buntsandsteinstufe weisen zumeist Leitfähigkeiten zwischen 10^{-5} m/s und 10^{-4} m/s auf. Bei Verkarstungen der Kalkstein ist mit weit höheren Leitfähigkeiten zu rechnen (größer als 10^{-2} m/s). Die oftmals verkarsteten kreidezeitlichen Kalksteine weisen ebenfalls sehr hohe hydraulische Leitfähigkeiten auf (10^{-3} m/s bis größer als 10^{-2} m/s).

Die Eifel und das Süderbergland sind überwiegend aus paläozoischen Schluff- und Tongesteinen sowie von Sandsteinen und Grauwacken des Rheinischen Schiefergebirges aufgebaut und besitzen daher zum Teil eine äußerst geringe hydraulische Leitfähigkeiten (weniger als 10^{-9} m/s bis 10^{-5} m/s). Hier ist mit sehr geringen Grundwasserneubildungsraten zu rechnen, wie auch Untersuchungen zum Trockenwetterabfluss gezeigt haben (siehe Kap. 2.3.1). Hingegen weisen die oftmals verkarsteten mittel- bis oberdevonischen Massenkalk (Sauerland, Bergisches Land und Lahngebiet) sowie die ebenfalls zum Teil verkarsteten Kalksteine in den Kalkmulden der Nordeifel sehr hohe Leitfähigkeiten auf (10^{-3} m/s bis größer als 10^{-2} m/s).

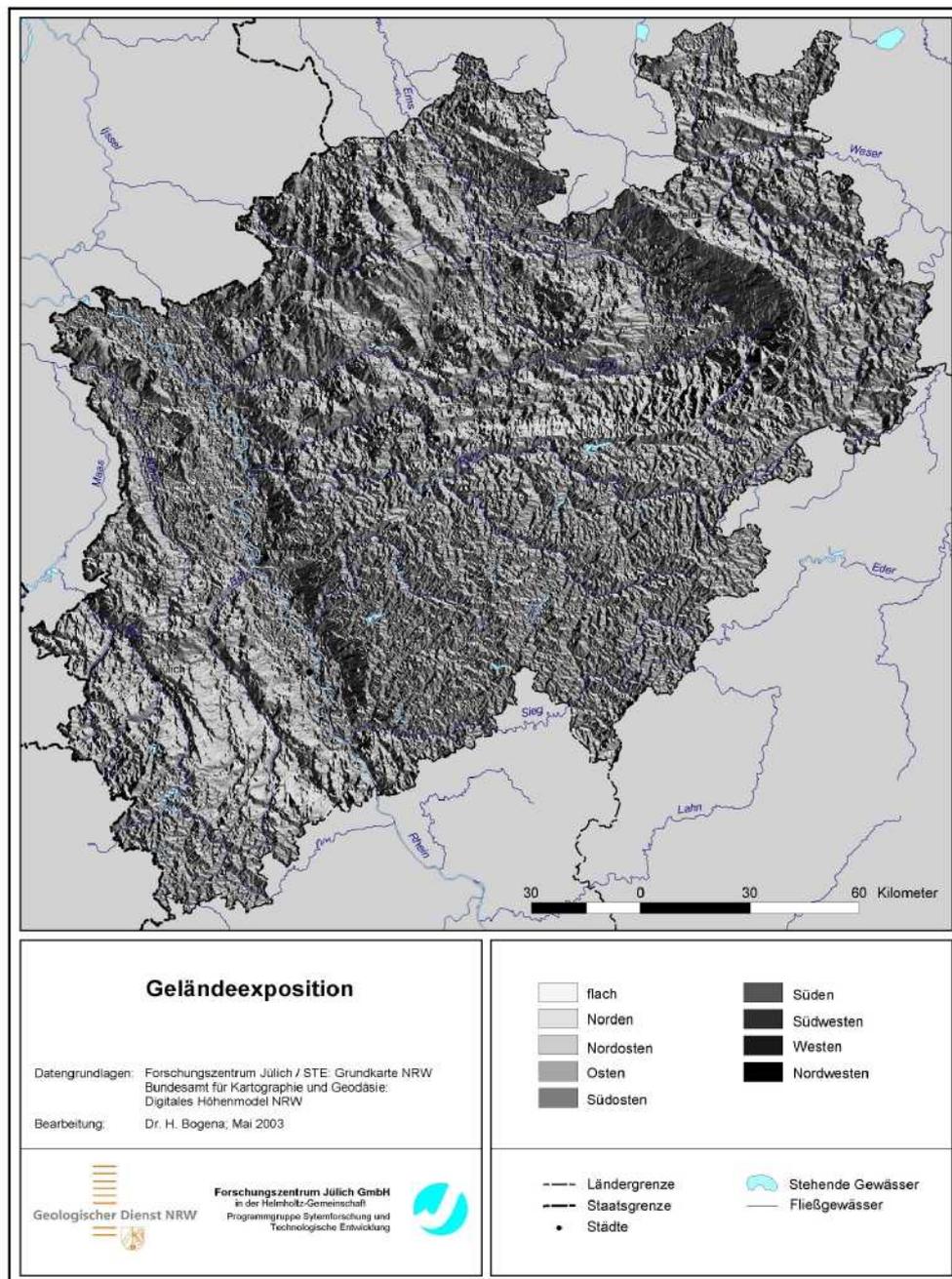
5.6 Topografische Datengrundlage

Die Topografie ist eine wichtige Einflussgröße bei der Betrachtung des Wasserhaushalts. Einerseits beeinflussen Hangneigung und -exposition die Höhe der realen Verdunstung und andererseits dient die Hangneigung als Eingabeparameter zur Bestimmung des Basisabflussanteils am Gesamtabfluss. Dem GD NRW wurde vom Landesvermessungsamt NRW ein flächendeckendes digitales Höhenmodell mit einer Auflösung von 50 m zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieses Höhenmodells wurden vom GD NRW die für das GROWA-Modell benötigte Hangexposition und Hangneigung für das hier verwendete 100 m-Raster flächendeckend für Nordrhein-Westfalen abgeleitet.

Die aus der Topografie berechnete Hangneigung (Karte 13) bildet die geologischen Strukturen in Nordrhein-Westfalen deutlich ab. Besonders flache Regionen mit Hangneigungen von weniger als 0,2 % sind die Niederungen von Rhein, Niers und Issel



Karte 13: Neigung des Geländes in Nordrhein-Westfalen.



Karte 14: Exposition des Geländes in Nordrhein-Westfalen.

sowie weite Gebiete der Niederrheinischen Bucht, der Westfälischen Bucht und des Westfälischen Tieflands. Die höhere Reliefenergie des Weserberglands hebt sich mit Neigungen zwischen 6 und über 9 % deutlich von den umgebenden Tieflandsgebieten ab. Insbesondere die Höhenzüge des Wiehengebirges und des Osnings mit mittleren Hangneigungsbeträgen zwischen 10 und 15 % markieren deutlich den Einfluss der Tektonik auf die Morphologie in dieser Region. Die höchsten Reliefenergien werden in den Gebieten des Rheinischen Schiefergebirges erreicht. Hier spiegelt sich zum Einen die Verteilung der unterschiedlich morphologisch wirksamen Gesteinsschichten und zum Andern das z.T. tief in das Gebirge eingeschnittene Flussnetz deutlich wider. Die höchsten mittleren Hangneigungen (ca. 18 %) werden im Gebiet des Rothaargebirges erreicht, die Maximalbeträge können hier 64 % übersteigen.

In Karte 14 ist die Hangexposition dargestellt, welche ebenfalls die Struktur der Landoberfläche in NRW recht feindifferenziert wiedergibt. Beispielsweise ist die Beckenstruktur der Westfälischen Bucht deutlich erkennbar. Ebenfalls erkennbar sind die geologischen Schollenstrukturen innerhalb der Niederrheinischen Bucht und das hochaufgelöste Flussnetz in den Mittelgebirgslandschaften.

5.7 Pegeldata

Für die Kalibrierung des GROWA-Modells und die abschließende Validierung der Modellergebnisse wurden gemessene Pegelabflusswerte verwendet. Diese sind dem Projektverbund von zahlreichen Institutionen (Wasserverbände, Staatlichen Umweltämter, Bundesanstalt für Gewässerkunde) zur Verfügung gestellt worden (Tab. 20). Für die Datenhaltung und Analyse der Pegeldata wurde eine umfangreiche Datenbank aufgebaut, welche zur Zeit Abflusswerte von 233 Pegel-Messstationen aus den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz in täglicher Auflösung enthält. Auf Basis dieses Datenpools wurde eine Auswahl von für die Modellierung des Wasserhaushalts nutzbaren Pegel-Messstellen getroffen (Tab. 20).

Bei der Auswahl der Pegel wurde zum Einen darauf geachtet, dass möglichst verschiedene Einzugsgebietsgrößen (von 1,3 bis 4783 km²) sowie die große Bandbreite

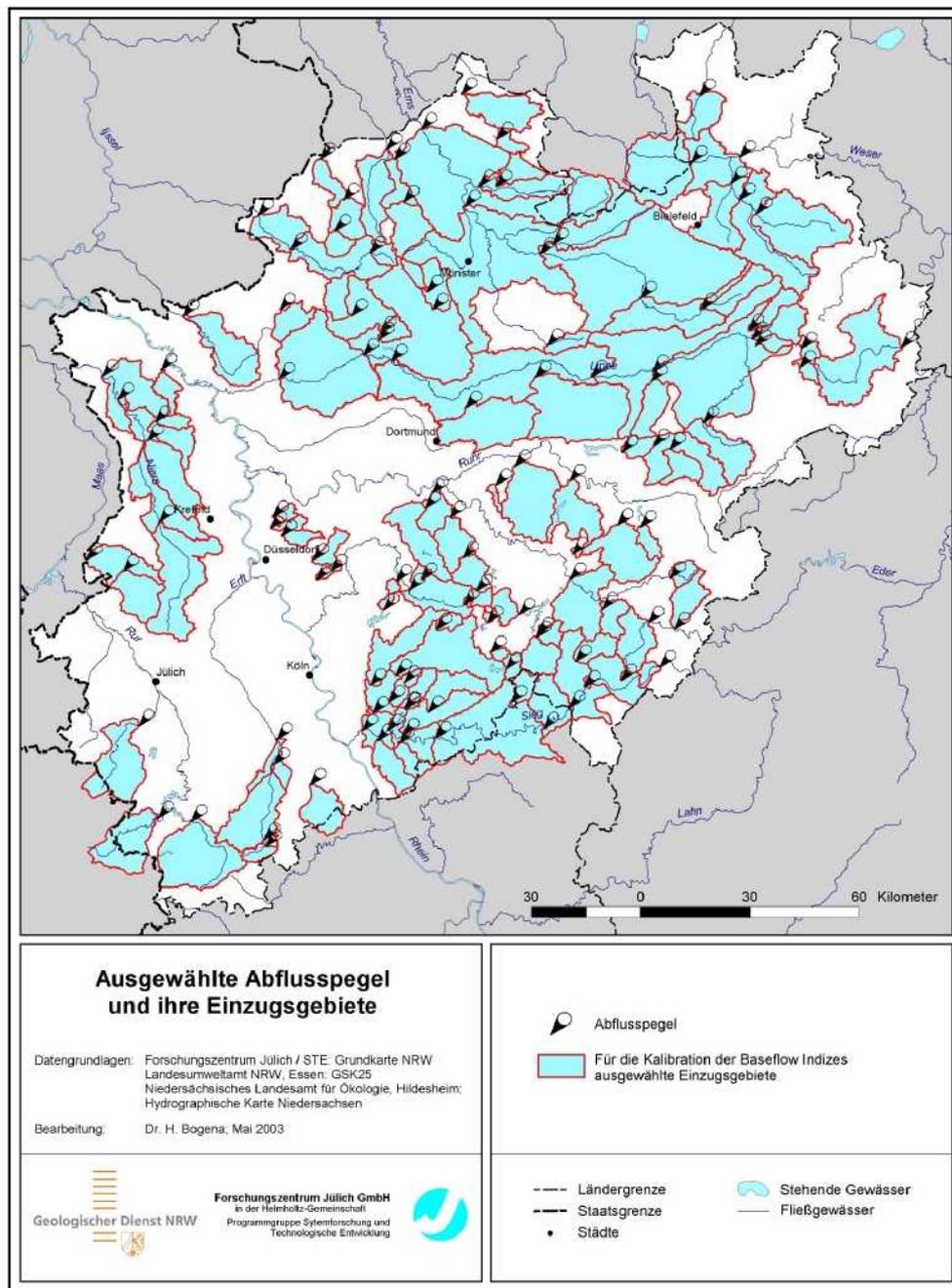
Tab. 20: Institutionen, von denen Pegel­daten zur Modellkalibrierung und -validierung zur Verfügung gestellt wurden.

Lnr.	Name der Institution	Anzahl der zur Verfügung gestellten Pegel	Anzahl der für die Kalibrierung verwendeten Pegel
1	Bundesanstalt für Gewässerkunde	7	1
Wasserverbände NRW			
2	Wasserverband Eifel-Rur	5	2
3	Ertfverband	10	4
4	Wahnbachverband	2	2
5	Aggerverband	8	6
6	Wupperverband	8	5
7	Ruhrverband	10	6
8	Bergisch-Rheinischer Wasserverband	16	4
Staatliche Umweltämter NRW			
9	StUA Aachen	7	1
10	StUA Köln	22	15
11	StUA Siegen	15	9
12	StUA Krefeld	21	7
13	StUA Düsseldorf	10	2
14	StUA Duisburg	5	2
15	StUA Herten	14	12
16	StUA Hagen	9	7
17	StUA Lippstadt	20	10
18	StUA Münster	20	14
19	StUA Bielefeld	14	9
20	StUA Minden	6	6
Rheinland-Pfalz			
21	Wasserwirtschaftsverwaltung RP	2	1
Gesamtanzahl:		233	125

der klimatologischen, geologischen und pedologischen Standort­situationen in Nord­rhein-Westfalen berücksichtigt wurden. Zum Anderen wurde darauf geachtet, nur solche Pegel auszuwählen, für die eine kontinuierliche Erfassung der Messwerte über mindestens zehn Jahre innerhalb des betrachteten Zeitraums von 1979-1999 vorlag.

Des Weiteren wurden Einzugsgebiete nicht weiter betrachtet, bei denen von vorn herein mit signifikanten Beeinflussungen des natürlichen Abflussgeschehens durch anthropogene Einflüsse zu rechnen ist, z.B. durch Talsperren oder Bergbau. Nach umfangreichen Analysen wurden 125 Pegel für Modellkalibrierung ausgewählt (siehe Karte 15 und Tab. 27). Zum Teil mussten einzelne Pegelwerte korrigiert werden:

- Um den Einfluss der Talsperrenbewirtschaftung aus dem Pegel Opladen/Wupper zu eliminieren, wurden die Abflussmengen des sich weiter ober-



Karte 15: Ausgewählte Pegel in Nordrhein-Westfalen und ihre Einzugsgebiete.

halb befindlichen Pegels Glüder/Wupper auf täglicher Basis abgezogen und die effektive Teileinzugsgebietsgröße ermittelt. Diese Korrektur war notwendig, da die Wasserführung dieses Flussabschnitts der Wupper seit 1987 in erheblicher Weise durch die Niedrigwasseraufhöhung der Wupper-Talsperre beeinflusst ist.

- Bei den Pegeln Weeze/Niers und Goch/Niers wurden die Ableitungsmengen in den Nierskanal berücksichtigt. Die Ableitungsmengen lagen ebenfalls in täglicher Auflösung vor.
- Das oberirdische Einzugsgebiet des Pegels Schwaney weicht aufgrund von Karst erheblich vom abflusswirksamen Einzugsgebiet ab. Auf Basis einer Vergleichsbetrachtung mit dem Nachbareinzugsgebiet (Pegel: Altbeken_2) konnte die tatsächliche Einzugsgebietsgröße abgeschätzt werden (17,7 km² statt 29,5 km²).
- Aus den Abflussdaten der Pegel Dedenborn/Rur und Gemünd/Urft wurden die Zuschläge von 15 bzw. 8 %, die der Wasserverband Eifel-Rur zur Berücksichtigung der jeweiligen Talsperrenfläche angesetzt hat, wieder herausgerechnet.

6

Modellergebnisse

Mit dem GROWA-Modell wird neben der Grundwasserneubildung auch die reale Verdunstung sowie der Gesamtabfluss und der Direktabfluss berechnet. Diese Wasserhaushaltsgrößen ergeben sich direkt aus dem Berechnungsverfahren. In den Kapiteln 6.1 bis 6.4 sind diese Wasserhaushaltsgrößen für Nordrhein-Westfalen in Kartenform dargestellt und beschrieben. In den Kapiteln 6.5 bis 6.7 finden sich auf den Abflusskomponenten basierende Auswertungen, die eine vertiefende und weitergehende Beurteilung der Wasserhaushaltssituation in Nordrhein-Westfalen, z.B. im Hinblick auf die Beschreibung des mengenmäßigen Zustandes der Wasserressourcen, erlauben. Diese Größen sind die regional dominante Gebietsentwässerung, die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers und flussgebietsbezogene Wasserhaushaltsbilanzen.

6.1 Reale Verdunstungshöhe

Betrachtet man die Häufigkeitsverteilung der berechneten realen Verdunstungshöhen für Nordrhein-Westfalen (Abb. 14), so stellt man fest, dass etwa 80 % der Werte in einem relativ engen Bereich zwischen 400 und 600 mm/a liegen. Die Häufigkeitsverteilung ist nahezu symmetrisch, der Mittelwert der realen Verdunstungshöhen liegt bei 500 mm/a.

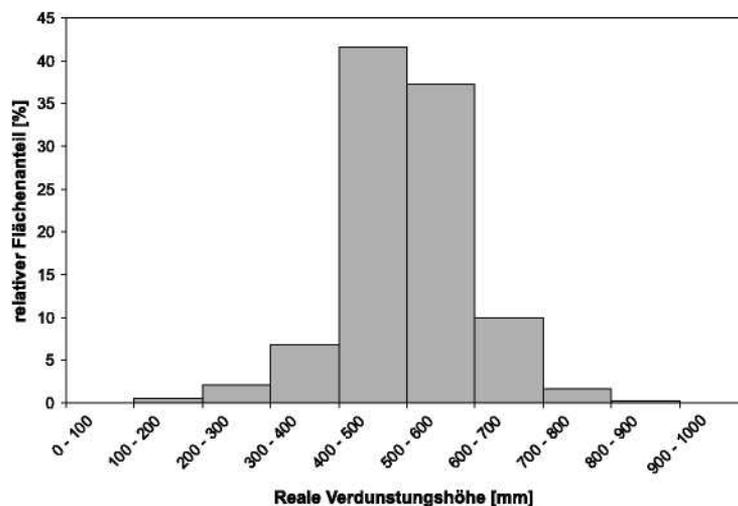


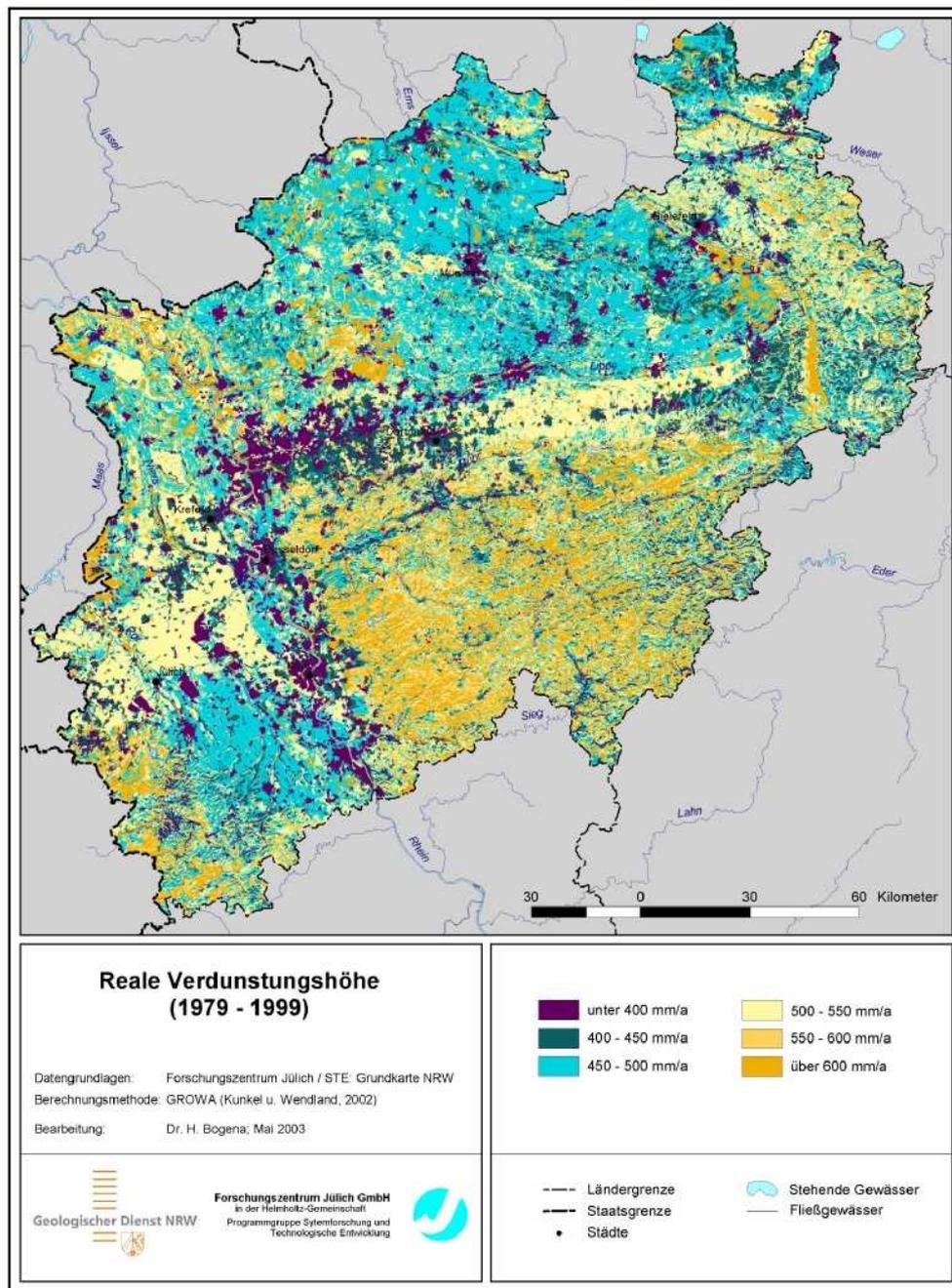
Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der berechneten realen Evapotranspirationshöhen.

In Karte 16 sind die für Nordrhein-Westfalen berechneten realen Verdunstungshöhen des Zeitraums 1979-1999 dargestellt. Reale Verdunstungshöhen von mehr als 550 mm/a treten gehäuft nur in den Mittelgebirgsregionen (Eifel, Bergisches Land, Sauer- und Siegerland) auf. Dies ist auf die hohen Jahresniederschläge und den relativ hohen Waldanteil zurückzuführen. Geringe reale Verdunstungshöhen von unter 400 mm/a wurden für die urban geprägten Gebiete der Köln-Bonner Rheinebene und die städtischen Bereiche des Ruhrgebietes berechnet. Je nach Versiegelungsgrad sinkt die Verdunstung in den Stadtzentren auf Werte bis unter 300 mm/a. Für die Niederrheinische Bucht und das Westfälische Tiefland ergeben sich trotz der hohen potenziellen Verdunstungshöhen von mehr als 575 mm/a vergleichsweise geringe reale Verdunstungshöhen von 450 bis 500 mm/a. Die Ursache hierfür ist die geringe Niederschlagshöhe, so dass nicht genügend Wasser zur Verfügung steht, um die potenzielle Verdunstung auszuschöpfen.

In Tab. 21 sind die für die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens berechneten realen Verdunstungshöhen in Form mittlerer Werte und Streubreiten aufgeführt. Anstatt des üblicherweise verwendeten arithmetischen Mittelwertes wurde hier sowie für die in den Kap. 6.2 bis 6.6 diskutierten Modellergebnisse der Median angegeben. Dieser ist insbesondere bei unsymmetrischen Verteilungen wesentlich unempfindlicher gegenüber extremen Werten und daher zur Charakterisierung der für eine Region typischen Werte besser geeignet. Im Falle der realen Verdunstungshöhen sind das arithmetische Mittel und der Median aufgrund der symmetrischen Verteilung der Werte jedoch nahezu identisch. Die aufgeführte Streubreite gibt hier die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten berechneten Wert wieder.

Tab. 21: Statistische Kennwerte der mit dem GROWA-Modell berechneten realen Verdunstungshöhen (1979-1999), bezogen auf die Großlandschaften in NRW.

Großlandschaft	Streubreite	Median
Westfälische Bucht	781 mm/a	482 mm/a
Weserbergland	826 mm/a	503 mm/a
Bergisches Land	826 mm/a	561 mm/a
Westfälisches Tiefland	739 mm/a	469 mm/a
Niederrheinische Bucht	818 mm/a	485 mm/a
Niederrheinisches Tiefland	767 mm/a	500 mm/a
Sauer- und Siegerland	848 mm/a	539 mm/a
Eifel (mit Siebengebirge)	873 mm/a	510 mm/a
Nordrhein-Westfalen gesamt	889 mm/a	499 mm/a



Karte 16: Mit GROWA berechnete reale Verdunstungshöhen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979-1999.

Tab. 21 zeigt, dass innerhalb der Großlandschaften Nordrhein-Westfalens große Streubreiten der realen Verdunstungshöhen zwischen ca. 740 mm/a im Westfälischen Tiefland und ca. 870 mm/a in der Eifel auftreten. Insbesondere in reliefierten Gebieten kann es zu starken Differenzierungen der Verdunstung in Abhängigkeit von der Hangexposition und Hangneigung kommen. So können im Rheinischen Schiefergebirge bei ansonsten gleicher räumlicher Ausstattung große Unterschiede in der Verdunstung zwischen nord- zu südexponierten Hängen auftreten. Hierbei können bei Nadelwald vereinzelt Verdunstungshöhen von über 900 mm/a erreicht werden. Auch in den Tieflandsregionen erreichen grundwasserbeeinflusste Standorte hohe Werte, da hier zusätzlich zum Speichervermögen des Bodens noch eine Nachlieferung aus dem Grundwasser stattfindet.

6.2 Gesamtabflusshöhe

Abb. 15 zeigt die Häufigkeitsverteilung der berechneten Gesamtabflusshöhen für Nordrhein-Westfalen. Im Gegensatz zu den relativ symmetrisch verteilten Verdunstungshöhen tritt hier eine deutliche Rechtsschiefe auf. Das bedeutet, dass hohe Gesamtabflusshöhen gegenüber niedrigen Gesamtabflusshöhen mit erhöhter Häufigkeit auftreten.

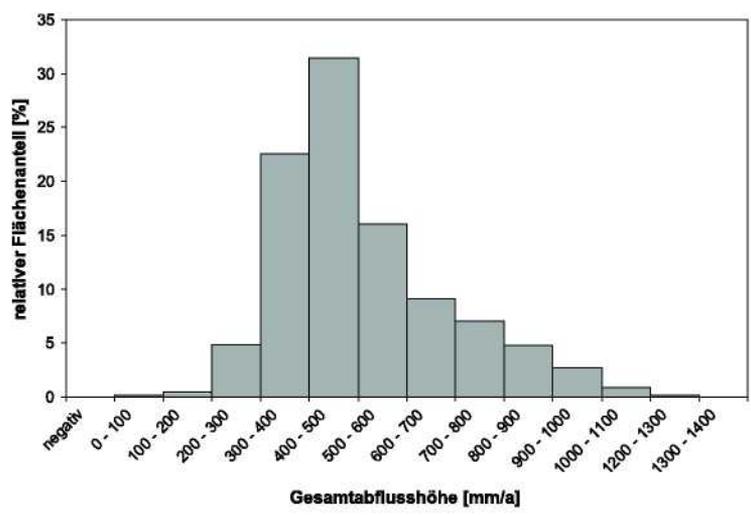
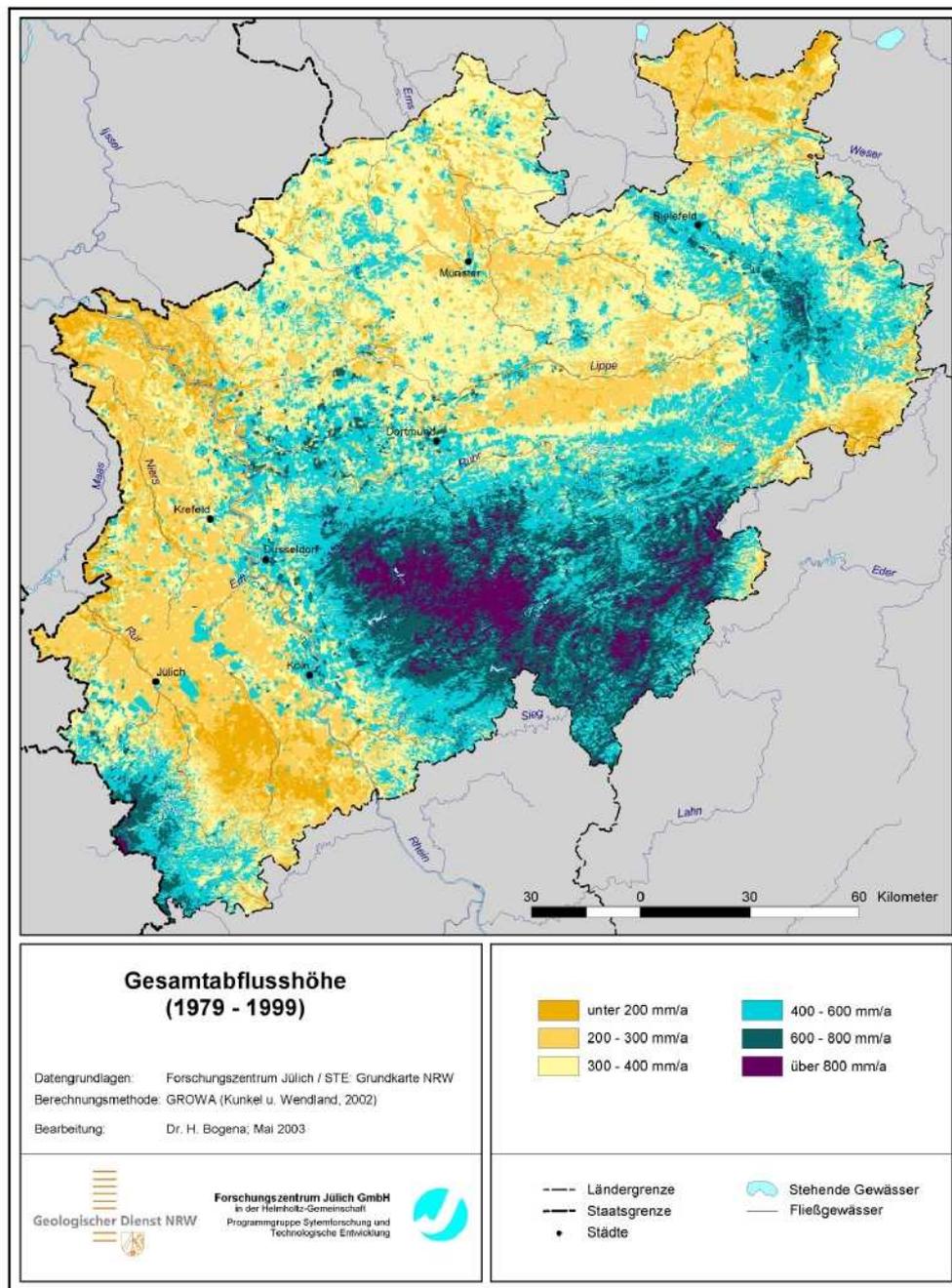


Abb. 15: Häufigkeitsverteilung der berechneten Gesamtabflusshöhe.



Karte 17: Mit GROWA berechnete Gesamtabflusshöhen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979-1999.

ten. So liegt der für ganz Nordrhein-Westfalen berechnete Median der Gesamtabflusshöhen mit 364 mm/a um ca. 50 mm/a niedriger als das arithmetische Mittel. Das Maximum der Verteilung bildet die Klasse von 400 bis 500 mm/a, in der ca. 30 % der Gesamtwerte liegen. Nordrhein-Westfalen ist ein wasserreiches Bundesland, was sich nicht zuletzt daran zeigt, dass mehr als 70% aller Gesamtabflusshöhen oberhalb von 400 mm/a liegen. Geringe Gesamtabflusshöhen unter 200 mm/a wurden nur für etwa 1 % der Fläche Nordrhein-Westfalens berechnet.

Die räumliche Verteilung der Gesamtabflusshöhen ist in Karte 17 dargestellt. Im Gegensatz zu den räumlich sehr heterogen verteilten Verdunstungshöhen ist beim Gesamtabfluss eine ausgeprägte Zweiteilung der Landesfläche erkennbar. In den Tieflandsregionen dominieren Gesamtabflusshöhen von weniger als 400 mm/a. In der Niederrheinischen Bucht treten dabei überwiegend Werte von weniger als 200 mm/a auf, während die Gesamtabflüsse im Niederrheinischen Tiefland und in der Westfälischen Bucht zwischen 200 und 300 mm/a liegen. Im Gegensatz dazu dominieren in den Mittelgebirgsregionen Gesamtabflusshöhen oberhalb von 500 mm/a. Vor allem in den höheren Lagen der Mittelgebirge können großräumig sogar Gesamtabflusshöhen von mehr 800 mm/a erreicht werden. Deutlich erkennbar sind auch die urban geprägten Regionen, die sich durch Gesamtabflusshöhen zwischen 400 und 600 mm/a auszeichnen.

In Tab. 22 sind die statistischen Kennwerte der Verteilung der Gesamtabflusshöhen für die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens und das Gesamtgebiet dargestellt. Die Mediane der Gesamtabflusswerte variieren erwartungsgemäß sehr deutlich. Das Westfälische Tiefland und die Niederrheinische Bucht weisen mit Werten von unter 300 mm/a die geringsten Mediane auf. Im Bergischen Land sowie im Sauer- und Siegerland

Tab. 22: Streubreiten und Mediane der mit dem GROWA-Modell berechneten Gesamtabflusshöhen (1979-1999), bezogen auf die Großlandschaften in NRW.

Großlandschaft	Streubreite	Median
Westfälische Bucht	915 mm/a	341 mm/a
Weserbergland	1013 mm/a	387 mm/a
Bergisches Land	1214 mm/a	601 mm/a
Westfälisches Tiefland	699 mm/a	257 mm/a
Niederrheinische Bucht	1017 mm/a	269 mm/a
Niederrheinisches Tiefland	795 mm/a	289 mm/a
Sauer- und Siegerland	1262 mm/a	626 mm/a
Eifel (mit Siebengebirge)	1034 mm/a	388 mm/a
Nordrhein-Westfalen gesamt	1367 mm/a	364 mm/a

treten die höchsten Werte auf. Die Mediane der Gesamtabflusshöhen betragen hier typischerweise 600 mm/a und mehr.

Die innerhalb der Großlandschaften auftretenden Abflusshöhen weisen eine große Streuung auf. Selbst in den klimatisch und naturräumlich relativ homogenen Tieflandsgebieten können die Differenzen zwischen dem größten und dem kleinsten berechneten Wert 800 mm/a und mehr betragen. Dies ist Ausdruck der oft kleinräumig wechselnden pedologischen und hydrologischen Bedingungen bzw. Bodenbedeckungen, die bei der Modellierung berücksichtigt wurden.

6.3 Grundwasserneubildungshöhe

Abb. 16 zeigt die Häufigkeitsverteilung der für Nordrhein-Westfalen berechneten Grundwasserneubildungshöhen. Auch hier tritt eine deutliche Rechtsschiefe auf. Das Maximum der Verteilung bildet die Klasse von 100-150 mm/a, in der ca. 25 % der Werte liegen. Grundwasserneubildungsraten über 400 mm/a spielen in Nordrhein-Westfalen nur eine untergeordnete Rolle und treten lediglich in verkarsteten Regionen auf.

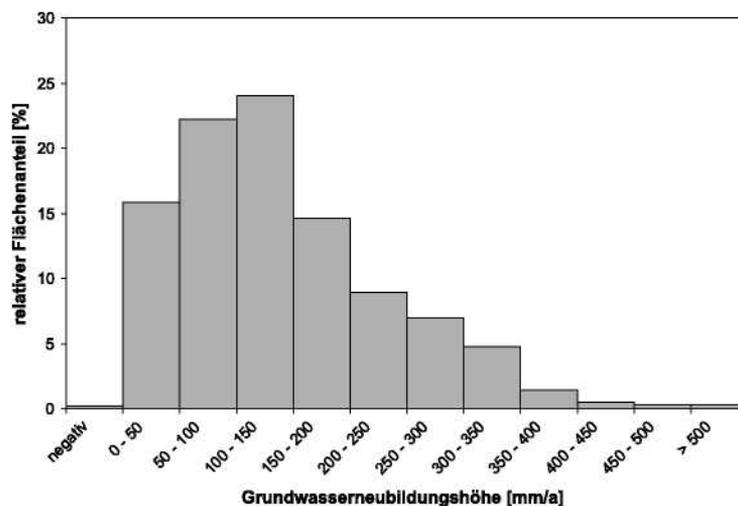


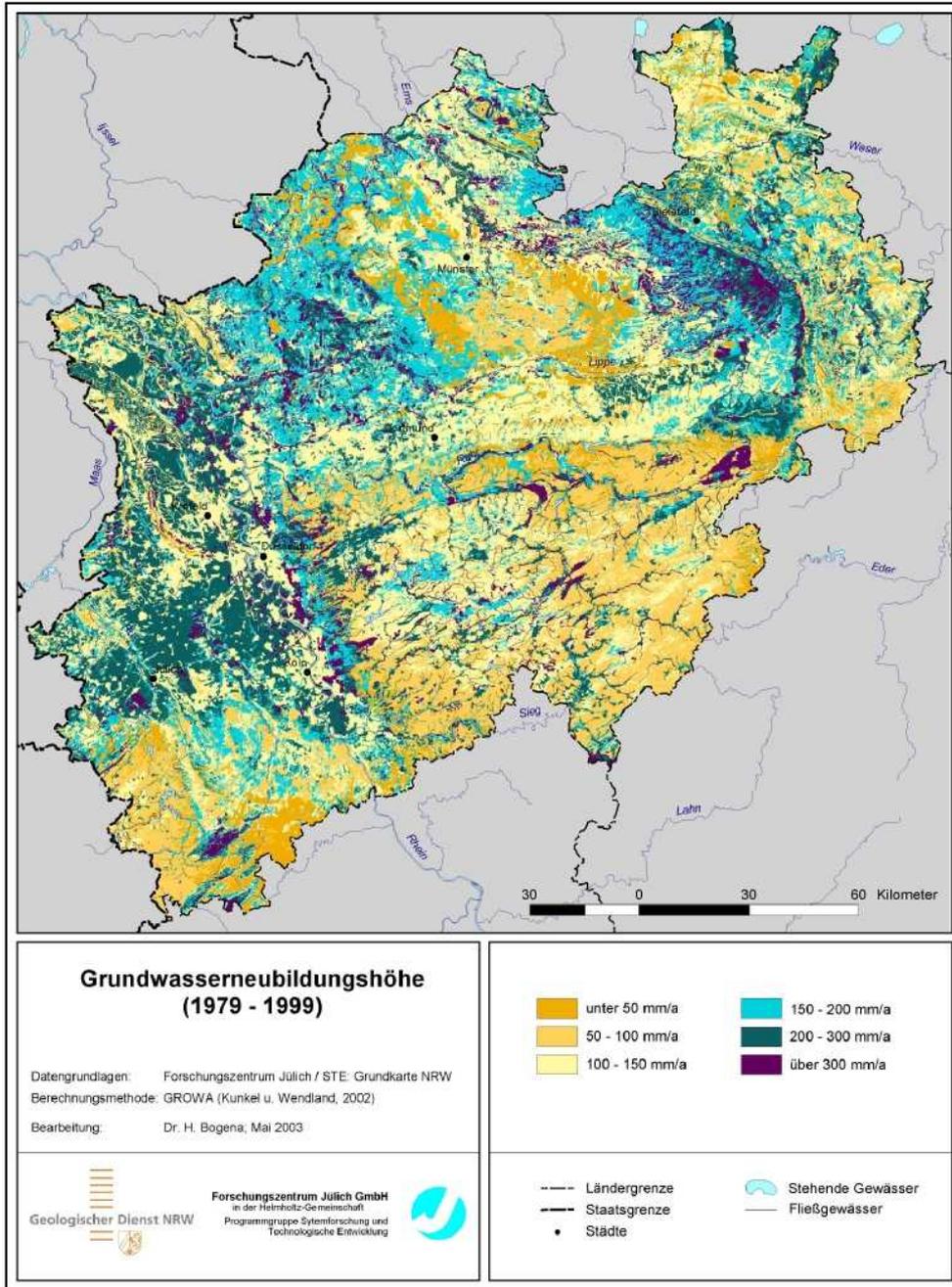
Abb. 16: Häufigkeitsverteilung der berechneten Grundwasserneubildungshöhen.

In Karte 18 ist die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildungshöhen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979-1999 dargestellt. Insgesamt fällt auf, dass die Grundwasserneubildungshöhen in den Lockergesteinsregionen deutlich höher sind als in den Festgesteinsregionen. Bei den Gesamtabflusshöhen wurde ein umgekehrtes Verhalten festgestellt. Im Festgestein wird die Höhe der Grundwasserneubildung, neben den meteorologischen Randbedingungen, in erster Linie durch die hydrogeologischen Eigenschaften der anstehenden Gesteinsschichten bestimmt. So liegen die Grundwasserneubildungshöhen in den wasserundurchlässigen unter- und oberdevonischen Festgesteinen des Rheinischen Schiefergebirges zumeist bei Werten von unter 100 mm/a. Lediglich die verkarsteten Karbonatgesteine der Kreide im Münsterland und des Mitteldevons im Rheinischen Schiefergebirge weisen höhere Grundwasserneubildungshöhen (300 mm/a und mehr) auf. Im Lockergestein treten großräumig die größten Grundwasserneubildungshöhen auf. Im Westfälischen Tiefland und in der Niederrheinischen Bucht beispielsweise betragen die Werte 200 mm/a und mehr.

In Tab. 23 sind die Streubreiten und Mediane der Verteilung der Grundwasserneubildungshöhen für die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens dargestellt. Die höchsten Mediane von etwa 200 mm/a werden in der Niederrheinischen Bucht und dem Niederrheinischen Tiefland erreicht. In der Westfälischen Bucht und dem Westfälischen Tiefland, die ebenfalls zum großen Teil aus Lockergesteinen aufgebaut sind und zum Teil auch sehr ergiebige Grundwasserleiter aufweisen (z.B. Halterner Sande), sind die Mediane mit Werten um 150 mm/a etwas geringer. Der Grund hierfür ist der relativ hohe Anteil grundwasser- und staunässebeeinflusster Böden in diesen Regionen, die zu einer Erhöhung des Direktabflussanteils führen (vgl. Kap. 6.4). Die geringste mittlere Grundwasserneubildungshöhe wird in der Eifel (Median: 81 mm/a) erreicht. Die Eifel ist, wie das Süderbergland, überwiegend aus undurchlässigen devonischen Festge-

Tab. 23: Streubreiten und Mediane der mit dem GROWA-Modell berechneten Grundwasserneubildungshöhen (1979-1999), bezogen auf die Großlandschaften in NRW.

Großlandschaft	Streubreite	Median
Westfälische Bucht	775 mm/a	157 mm/a
Weserbergland	756 mm/a	150 mm/a
Bergisches Land	901 mm/a	109 mm/a
Westfälisches Tiefland	552 mm/a	143 mm/a
Niederrheinische Bucht	767 mm/a	200 mm/a
Niederrheinisches Tiefland	717 mm/a	200 mm/a
Sauer- und Siegerland	939 mm/a	92 mm/a
Eifel (mit Siebengebirge)	807 mm/a	81 mm/a
Nordrhein-Westfalen gesamt	1044 mm/a	149 mm/a



Karte 18: Mit GROWA berechnete Grundwasserneubildungshöhen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979-1999.

steinen aufgebaut. Das geringe Porenvolumen und die damit verbundene geringe Wasserleitfähigkeit dieser Gesteine führen dazu, dass nur ein relativ geringer Anteil des Abflusses zur Grundwasserneubildung beiträgt (Kap. 2.3.1). Hinzu kommt, dass die Jahresniederschläge in der Eifel geringer sind als im Bergischen Land bzw. im Sauer- und Siegerland.

6.4 Direktabflusshöhe

Abb. 17 zeigt die Häufigkeitsverteilung der für Nordrhein-Westfalen berechneten Direktabflusshöhen. Auch hier tritt eine deutliche Rechtsschiefe auf. Das Maximum der Verteilung bildet die Klasse 100 bis 200 mm/a, in der ca. 27 % der Werte liegen. Etwa die Hälfte aller Direktabflusshöhen liegt über 200 mm/a. Die Maximalwerte können 800 mm/a übersteigen.

Die räumliche Verteilung der berechneten Direktabflusshöhen ist in Karte 19 dargestellt. Auch bei den Direktabflusshöhen ist eine ähnlich ausgeprägte Zweiteilung der Landesfläche erkennbar, wie sie auch schon bei der Gesamtabflusshöhe zu beobachten war. In der Niederrheinischen Bucht und im Niederrheinischen Tiefland treten überwiegend Werte von unter 100 mm/a auf, während die Werte in der Westfälischen

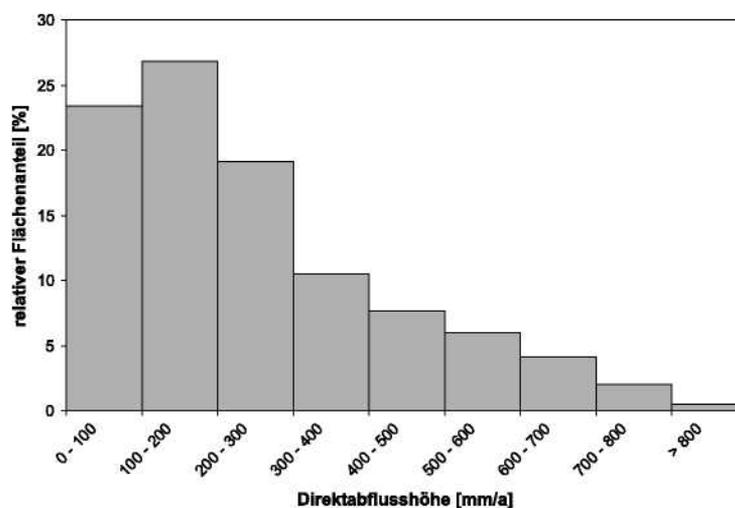
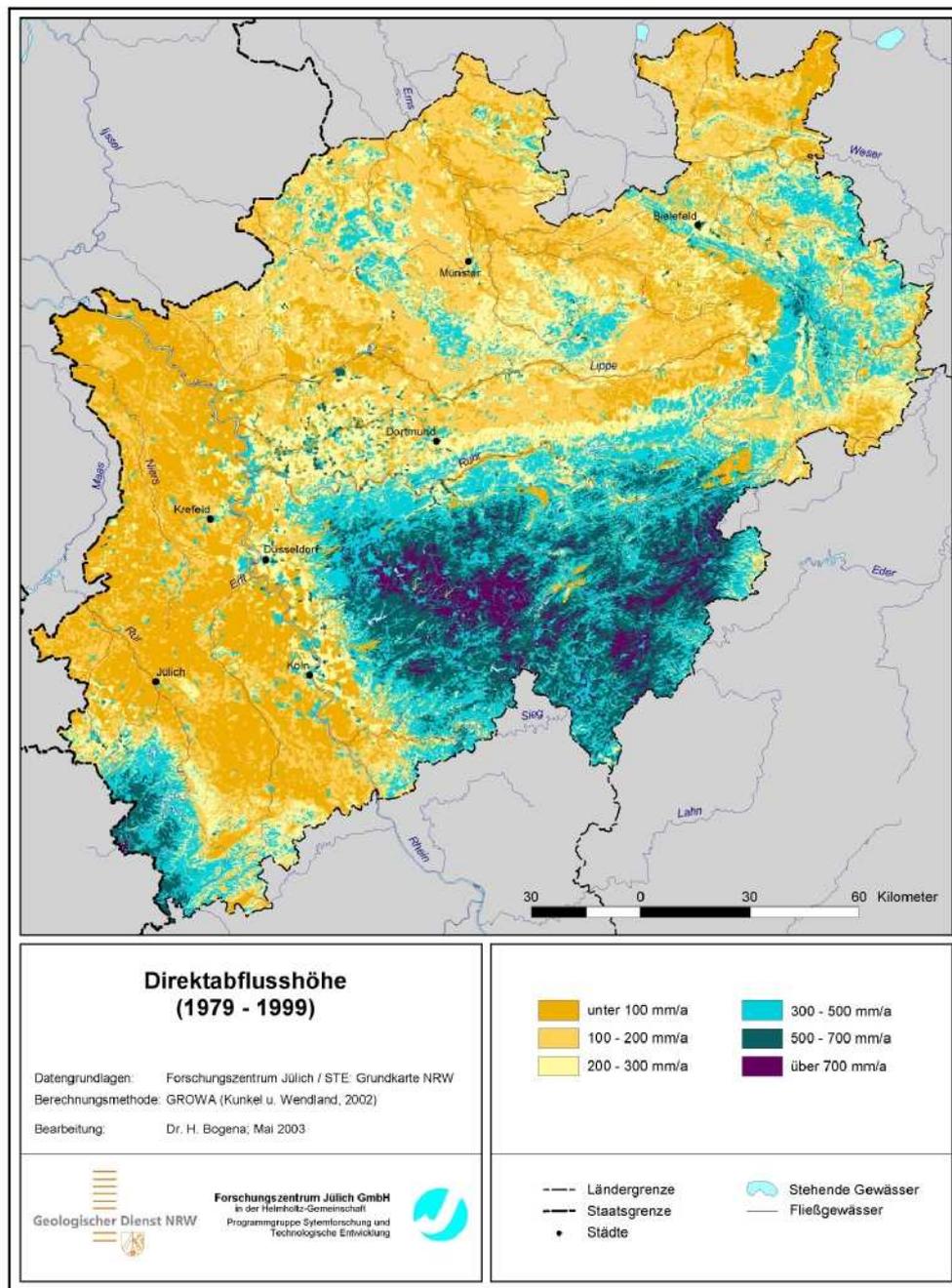


Abb. 17: Häufigkeitsverteilung der berechneten Direktabflusshöhen.



Karte 19: Mit GROWA berechnete Direktabflusshöhen in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979-1999.

Tab. 24: Streubreiten und Mediane der mit dem GROWA-Modell berechneten Direktabflusshöhen (1979-1999), bezogen auf die Großlandschaften in NRW.

Großlandschaft	Streubreite	Median
Westfälische Bucht	688 mm/a	181 mm/a
Weserbergland	798 mm/a	226 mm/a
Bergisches Land	1010 mm/a	447 mm/a
Westfälisches Tiefland	508 mm/a	126 mm/a
Niederrheinische Bucht	724 mm/a	49 mm/a
Niederrheinisches Tiefland	584 mm/a	64 mm/a
Sauer- und Siegerland	1098 mm/a	498 mm/a
Eifel (mit Siebengebirge)	840 mm/a	274 mm/a
Nordrhein-Westfalen gesamt	1098 mm/a	200 mm/a

Bucht großräumig zwischen 100 und 200 mm/a liegen. Im Gegensatz dazu dominieren in den Mittelgebirgsregionen Direktabflusshöhen von mehr als 500 mm/a. Vor allem in den höheren Lagen der Mittelgebirge können sogar Spitzenwerte von mehr als 800 mm/a erreicht werden. Neben den hohen Jahresniederschlägen liegt die Ursache hierfür vor allem in der geringen Wasserleitfähigkeit des Untergrundes.

In Tab. 24 sind die statistischen Werte der Verteilung der berechneten Direktabflusshöhen für die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens und das Gesamtgebiet dargestellt. Die Mediane der Direktabflusswerte variieren sehr deutlich. Das Niederrheinische Tiefland und die Niederrheinische Bucht weisen mit Werten unter 70 mm/a die geringsten Mediane auf. Im Bergischen Land sowie im Sauer- und Siegerland treten mit 450 mm/a und mehr die höchsten Werte auf.

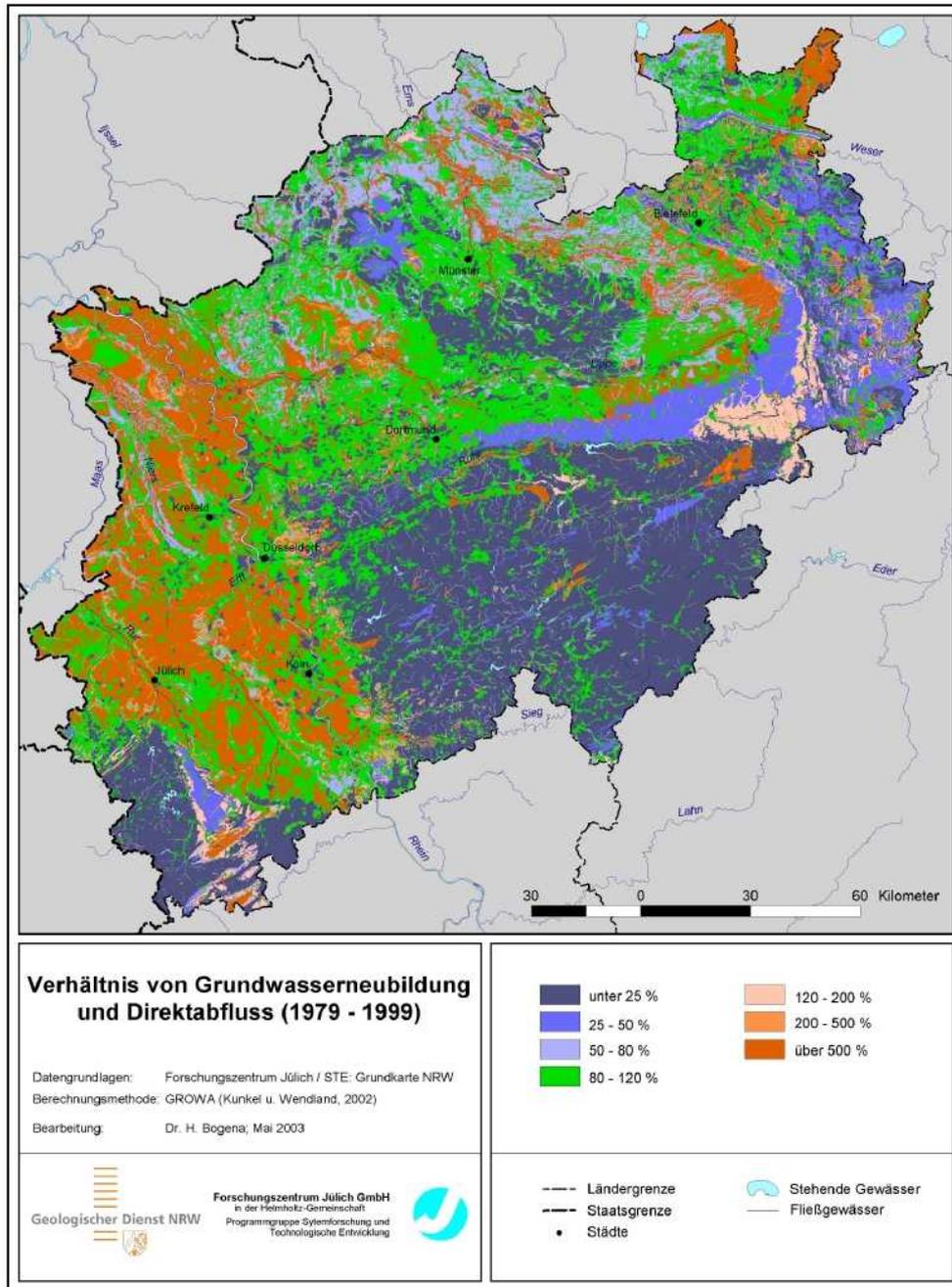
Die innerhalb der Großlandschaften auftretenden Abflusshöhen weisen eine große Streuung auf. In den klimatisch und naturräumlich relativ homogenen Tieflandsgebieten liegen die Differenzen zwischen dem größten und dem kleinsten berechneten Wert bei weniger als 600 mm/a, während in den Mittelgebirgsregionen typischerweise Differenzen von mehr als 800 mm/a auftreten können.

6.4 Dominante Abflusskomponenten

Auf Basis der flächendifferenziert ermittelten Direktabfluss- und Grundwasserneubildungshöhen können für jede Flächeneinheit die dominanten Abflusskomponenten identifiziert werden. Bezogen auf die Landschaftseinheiten Nordrhein-Westfalens lassen sich hieraus Aussagen über die regional dominante Gebietsentwässerung ableiten. Ein Maß hierfür ist das Verhältnis von Grundwasserneubildungshöhe zu Direktabflusshöhe (GD-Verhältnis). Ist das Verhältnis größer als 100 %, so überwiegt die Grundwasserneubildung. Ist dies nicht der Fall, wird der überwiegende Anteil des Gesamtabflusses über den Direktabfluss in die Vorfluter transportiert.

Aussagen zu den dominanten Abflusskomponenten sind vor allem dann wichtig, wenn Stoffströme betrachtet werden, bei denen der Transport in die Vorfluter direkt an die Abflusskomponenten gekoppelt ist. Ein Beispiel hierfür sind diffuse Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft. In einer Landschaft, die überwiegend über den Direktabfluss entwässert wird, werden die Nährstoffe im allgemeinen innerhalb kurzer Zeiträume (Wochen) über die Bodenoberfläche oder über die ungesättigte Bodenzone in die Oberflächengewässer gelangen. Dominiert die Grundwasserneubildung, so kann es unter Umständen mehrere Jahrzehnte dauern, bis diese Nährstoffe über den Grundwasserabfluss ein Oberflächengewässer erreichen (Kunkel & Wendland, 2000).

In Karte 20 sind die aus den berechneten Grundwasserneubildungs- und Direktabflusshöhen (Kap. 6.2 und 6.3) ermittelten GD-Verhältnisse in Nordrhein-Westfalen dargestellt. In den grundwasserfernen, ebenen Lockergesteinsregionen der Niederrheinischen Bucht und des Niederrheinischen Tieflands ergeben sich GD-Verhältnisse, die deutlich größer als 500 % sind. Der überwiegende Teil des Abflusses gelangt dort also über den Grundwasserpfad in die Oberflächengewässer. In den grundwasser- und stau-nässebeeinflussten Lockergesteinsregionen der Westfälischen Bucht hingegen ist der Anteil der Grundwasserneubildung geringer (80 bis 120 %). Etwa die Hälfte des Gesamtabflusses wird dort als Direktabfluss abgeführt. In den Festgesteinsregionen Nordrhein-Westfalens liegen andere Abflussverhältnisse vor. Das GD-Verhältnis ist dort generell kleiner als 100 %. Der überwiegende Teil des Abflusses gelangt dort als schnell abfließende Direktabflusskomponente in die Oberflächengewässer. In Gebieten, in denen paläozoische nichtkarbonatische Gesteine im Untergrund anstehen (Eifel, Bergisches Land, Sauer- und Siegerland) ist der Direktabfluss mehr als viermal größer als die Grundwasserneubildung (GD-Verhältnis unter 25 %).



Karte 20: Das Verhältnis von Grundwasserneubildung und Direktabfluss für die Periode 1979 bis 1999 in Nordrhein-Westfalen.

6.5 Austauschhäufigkeit des Bodenwasser

Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers beschreibt, wie oft die Bodenlösung in der Wurzelzone im Verlauf eines Jahres ausgetauscht wird (DIN 19732, 1997). Sie ist daher auch ein wichtiges Maß für die Wahrscheinlichkeit der Auswaschung wasserlöslicher, nicht mit der Bodenmatrix wechselwirkender Stoffe wie z.B. Nitrat. Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers kann nach Hennings (2000) aus der Sickerwasserhöhe und der Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (vgl. Kap. 5.4) ermittelt werden.

Die Sickerwasserrate ergibt sich in guter Näherung aus der Differenz von Gesamtabfluss und Oberflächenabfluss. Letzterer spielt insbesondere in stark reliefierten Mittelgebirgsregionen eine Rolle. Die Höhe des Oberflächenabflusses wurde auf Basis eines einfachen Ansatzes abgeschätzt (Hennings, 2000):

$$Q_o = Q_{\text{gesamt}} \cdot 2 \cdot 10^{-6} (N_{\text{jahr}} - 500)^{1,65} \quad \text{Gl. 24}$$

mit: Q_o = mittlere jährliche Oberflächenabflusshöhe (mm/a)
 N_{jahr} = mittlere jährliche Niederschlagshöhe (mm/a)
 Q_{gesamt} = mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe (mm/a)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Sickerwasserhöhe nicht mit der Grundwasserneubildungshöhe gleichzusetzen ist, da Teile des Sickerwassers auch als Zwischenabfluss in die Vorfluter gelangen können. Für Berechnung der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers wird davon ausgegangen, dass die gesamte Sickerwassermenge die durchwurzelte Bodenzone passiert. Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers ergibt sich dann zu:

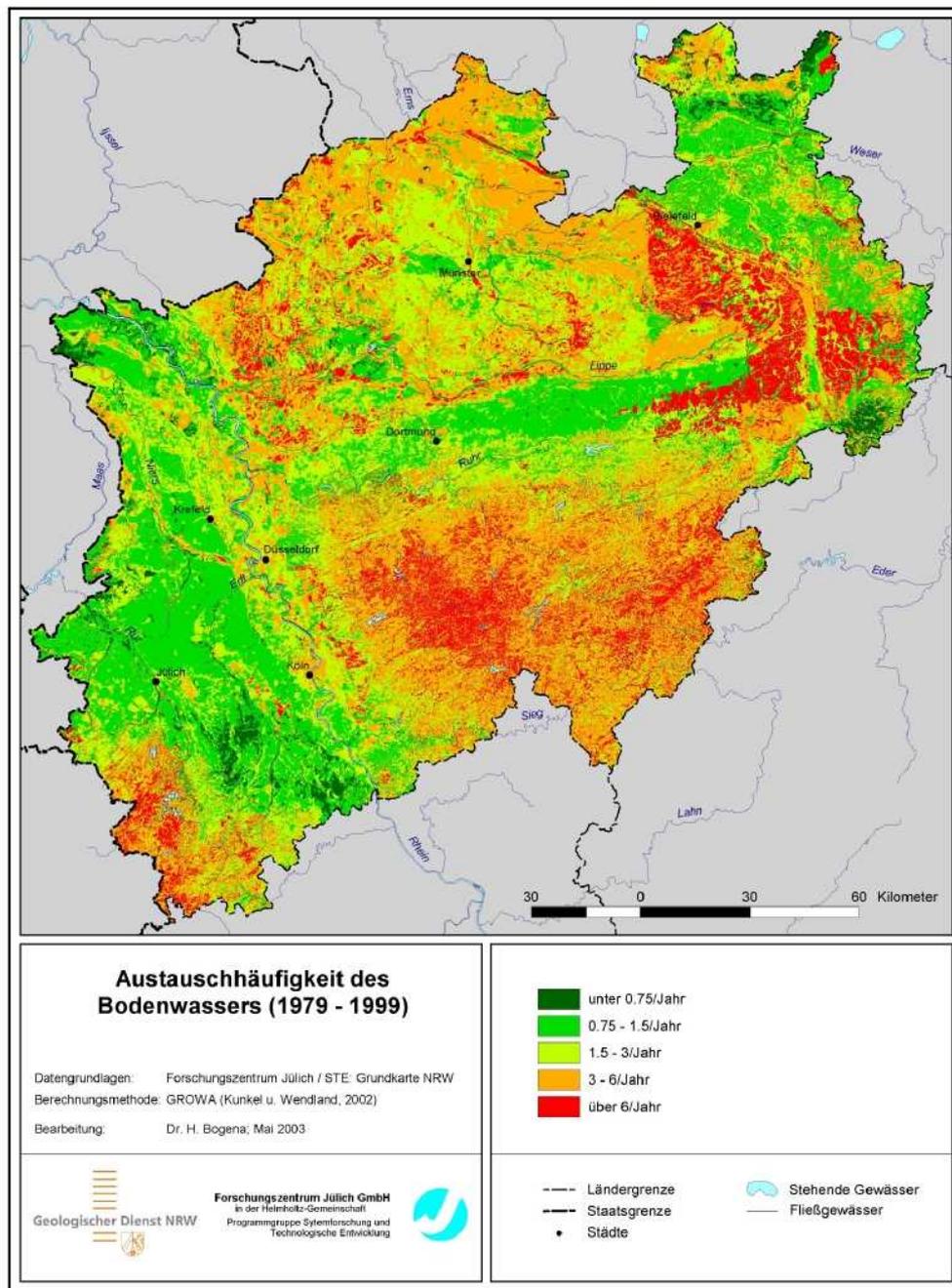
$$f_A = \frac{Q_{\text{gesamt}} - Q_o}{FKWe} \quad \text{Gl. 25}$$

mit: f_A = Austauschhäufigkeit des Bodenwassers (1/a)
 $FKWe$ = Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (mm)

Eine Austauschhäufigkeit von 1 a^{-1} bedeutet, dass das Wasser im durchwurzelten Bodenraum im Mittel einmal pro Jahr ausgetauscht wird. Liegen die Werte unter 1 a^{-1} , so wird im Mittel pro Jahr nur ein Teil des Bodenwassers ausgetauscht. Ist die Austauschhäufigkeit größer als 1 a^{-1} , so wird die Bodenlösung im Jahresverlauf mehrfach ausgetauscht.

Die nach Gl. 23 berechnete Austauschhäufigkeit des Bodenwassers ist in Karte 21 abgebildet. Die Bördelandschaften (Jülicher Börde, Zülpicher Börde, Hellwegböden) weisen im allgemeinen niedrige Austauschhäufigkeiten auf. Hier kommt es im Jahresgang aufgrund der geringen Niederschlagshöhen verbreitet zu einem unvollständigen Bodenwasseraustausch (unter 1 a^{-1}). Für den Gesamtbereich der Niederrheinischen Bucht ergibt sich eine mittlere Austauschhäufigkeit von etwa $1,8 \text{ a}^{-1}$.

Die größten Austauschhäufigkeiten sind in den Podsol-Bodengesellschaften der Westfälischen Bucht (im Mittel etwa $3,5 \text{ a}^{-1}$), insbesondere des Ostmünsterlands (im Mittel etwa $4,6 \text{ a}^{-1}$), sowie in den Rendzina-Bodengesellschaften des Weserberglands zu finden. Bei den Podsol-Böden ergeben sich große Austauschhäufigkeiten aufgrund der geringen nutzbaren Feldkapazität des dort vorherrschenden sandigen Substrats. Bei den Rendzina-Böden werden die großen Austauschhäufigkeiten durch die meist geringen Mächtigkeiten des Solums verursacht. Hinzu kommt noch das Auftreten von relativ hohen Gesamtabflusshöhen im Weserbergland. Auf diese Weise ergibt sich beispielsweise für die Paderborner Hochfläche im Mittel eine Austauschhäufigkeit von etwa $7,3 \text{ a}^{-1}$. Des Weiteren sind hohe Austauschhäufigkeiten in den Höhenlagen der Mittelgebirge zu finden, was dort in erster Linie auf die vergleichsweise großen Gesamtabflusshöhen bei zum Teil geringen Bodenmächtigkeiten zurückzuführen ist. So ergeben sich im Mittel für den nordrhein-westfälischen Teil der Eifel Austauschhäufigkeiten von etwa $4,2 \text{ a}^{-1}$, für das Bergische Land von etwa $4,9 \text{ a}^{-1}$ und für das Sauer- und Siegerland von etwa $5,3 \text{ a}^{-1}$.



Karte 21: Berechnete Austauschhäufigkeit des Bodenwassers in Nordrhein-Westfalen für die Periode 1979 bis 1999.

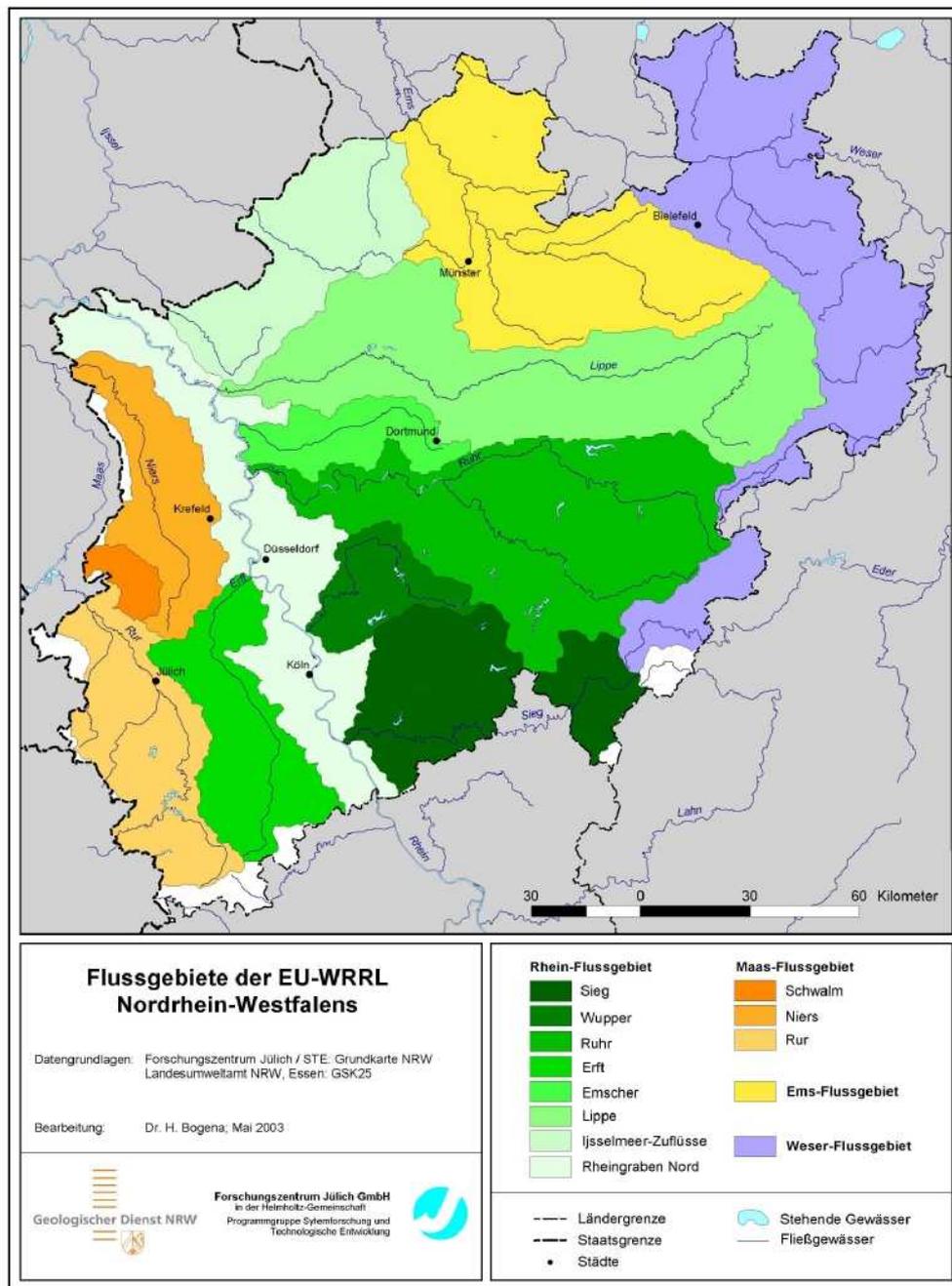
6.6 Flussgebietsbezogene Analysen

In den Kap. 6.1 bis 6.5 wurden die Modellergebnisse neben einer flächendifferenzier- ten Darstellung auch bezogen auf die Großlandschaften Nordrhein-Westfalens ausge- wertet. In diesem Kapitel erfolgt eine flussgebietsbezogene Analyse. Hintergrund hierfür ist die EU Wasserrahmenrichtlinie, für deren Umsetzung von den hierfür zuständigen Behörden 13 Flussgebietseinheiten (Arbeitsgebiete der EU-WRRL) in Nordrhein-West- falen ausgewiesen wurden. Diese sind in Karte 22 dargestellt. In Tab. 25 sind für diese 13 Flussgebietseinheiten auf Grundlage der in Kap. 6.2 bis Kap. 6.5 beschriebenen Wasserbilanzgrößen sowie der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers flussgebiets- bezogene Analysen erstellt worden.

Wie aus den Medianen in Tab. 25 hervorgeht, ergeben sich zum Teil für die Wasser- haushaltsgrößen zwischen den Flusseinzugsgebieten große Unterschiede. Für deren Interpretation ist es wichtig, die naturräumliche Ausstattung der Einzugsgebiete zu diskutieren. Vor allem den klimatischen und den geologischen Bedingungen kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Einige Flüsse, wie z.B. die Wupper und die Sieg, entwässern niederschlagsreiche Einzugsgebiete, die fast ausschließlich aus Festgesteinen bestehen (Festgesteinsanteile von 80 % und mehr). Andere Flüsse

Tab. 25: Auf die Arbeitsgebiete der EU-WRRL in NRW bezogene Betrachtungen von Wasser- haushaltsgrößen (angeordnet nach dem Festgesteinsanteil im Einzugsgebiet).

Arbeitsgebiete der EU-WRRL in NRW	Festgesteinsan- teil im Einzugs- gebiet [%]	Einzugsgebietsbezogene Medianwerte			
		Gesamtabfluss [mm/a]	GW-Neubildung [mm/a]	Direktabfluss [mm/a]	Austauschhäu- figkeit [a ⁻¹]
Ruhr	85	590	101	457	3,9
Wupper	79,8	736	142	532	5,3
Sieg	79,6	618	95	486	4,4
Weser / Teilgebiet NRW	49,4	346	134	197	2,1
Rur	46,2	348	137	189	2,2
Lippe	36,4	350	161	183	2,6
Ertf	20,4	248	160	88	1,3
Ems / Teilgebiet NRW	20,4	328	151	174	3,8
Ijsselmeer-Zuflüsse	19,7	353	163	184	3,6
Emscher	12	431	215	218	2,4
Rheingraben Nord	7,7	310	208	71	1,9
Schwalm	0	276	226	30	1,4
Niers	0	275	218	42	1,5



Karte 22: Die Flussgebiete bzw. Arbeitsgebiete der EU-WRRL in Nordrhein-Westfalen.

haben ihre Einzugsgebiete ausschließlich in der Lockergesteinsregion (z.B. Schwalm und Niers), in der überwiegend geringe Niederschlagshöhen auftreten. Das Zusammenwirken dieser, aber auch anderer in Kap. 5 diskutierten Einflussgrößen bestimmt die in Tab. 25 angegebenen einzugsgebietsbezogenen Wasserhaushaltsgrößen.

Beim Gesamtabfluss werden die höchsten Mediane in den von Festgestein dominierten Einzugsgebieten erreicht (z.B. über 736 mm/a im Flussgebiet der Wupper). Hiervon wird der überwiegende Anteil jedoch über den Direktabfluss entwässert (rund 80 %), so dass die Grundwasserneubildungshöhen in diesen Flussgebieten relativ gering sind. Aufgrund der häufig geringen nutzbaren Feldkapazitäten der durchwurzelter Zone und der hohen Sickerwasserraten werden in den durch Festgesteine dominierten Flussgebieten auch hohe Austauschhäufigkeiten des Bodenwassers von 4 a^{-1} bis mehr als 5 a^{-1} erreicht.

Durchwegs geringe Gesamtabflusshöhen ergeben sich für die Einzugsgebiete, die von Lockergesteinen dominiert werden, z.B. für die Flussgebiete von Schwalm und Niers mit Gesamtabflusshöhen von typischerweise unter 300 mm/a. Dort wird der Gesamtabfluss jedoch größtenteils über die Grundwasserneubildung in Form von Grundwasserabfluss in die Vorfluter abtransportiert, so dass sich hier die höchsten einzugsgebietsbezogenen Grundwasserneubildungshöhen ergeben. Flussgebiete in Lockergesteinsregionen mit hohen Anteilen an sandigen und grundwasser- bzw. staunässebeeinflussten Böden, z.B. Ijsselmeer-Zuflüsse und Ems, weisen ein ausgeglichenes GD-Verhältnis, jedoch mit Werten von 3 a^{-1} und mehr relativ hohe Austauschraten des Bodenwassers auf.

Flusseinzugsgebiete, die sowohl bedeutende Anteile an Festgesteinen als auch an Lockergesteinen aufweisen, können durch flussgebietsbezogene Mittelwerte nur ungenügend charakterisiert werden. Keineswegs dürfen die für diese Einzugsgebiete ausgewiesenen Mittel als repräsentativ für das gesamte Einzugsgebiet verstanden werden. So liegt beispielsweise die mediane Grundwasserneubildungshöhe im Einzugsgebiet der Rur bei ungefähr 140 mm/a. Zu beachten ist jedoch, dass die berechneten Werte in den Lockergesteinsregionen des Einzugsgebietes ungefähr doppelt so hoch sind wie die in den Festgesteinsbereichen. Gleiches gilt für die ermittelten Austauschhäufigkeiten des Bodenwassers. Für Flusseinzugsgebiete, die ein nahezu ausgeglichenes Fest/Lockergesteinsverhältnis aufweisen, charakterisieren die Gebietsmittelwerte daher weder die Situation der Lockergesteins- noch die der Festgesteinsregionen zutreffend.



Modellvalidierung

Um Aussagen darüber treffen zu können, inwiefern die landesweit berechneten Wasserhaushaltsgrößen den tatsächlich vorliegenden Abflussverhältnissen entsprechen, wurde eine Validitätsüberprüfung durchgeführt. Hierzu kommen grundsätzlich verschiedene Verfahren in Frage. Die zuverlässigste Art der Validierung besteht in einem Vergleich der Modellergebnisse an möglichst vielen über Lysimeterversuche ermittelten Sickerwasserraten. Für die großräumige Betrachtung ist diese Art der Validierung jedoch nicht praktikabel, da in der Regel nicht genügend Lysimeterstationen zur Verfügung stehen, um statistisch abgesicherte Aussagen für das gesamte Bundesland bzw. die auftretenden Standortkombinationen treffen zu können.

Aus diesem Grunde wurde die Zuverlässigkeit der berechneten Abflusshöhen durch einen Vergleich mit den an Pegeln gemessenen Abflüssen überprüft. Der hierzu angewandte Verfahrensgang ist in Abb. 18 schematisch dargestellt. Zunächst wird eine Verschneidung der pegelbezogenen Einzugsgebiete mit den vom GROWA-Modell flächendifferenziert berechneten Gesamtabflusshöhen vorgenommen. Die einzelnen Werte der Rasterzellen werden dann über die jeweiligen Einzugsgebiete integriert und mit den gemessenen Abflusshöhen verglichen. Hierbei ist darauf zu achten, dass sowohl bei der Berechnung als auch bei den Pegeldurchflusswerten der gleiche Bezugszeitraum zugrundegelegt wird. Wenn sich für eine hinreichend große Anzahl von Einzugsgebieten eine befriedigende Übereinstimmung ergibt, kann man davon ausgehen, dass mit dem zugrundeliegenden Modell repräsentative Aussagen erzielt wurden.

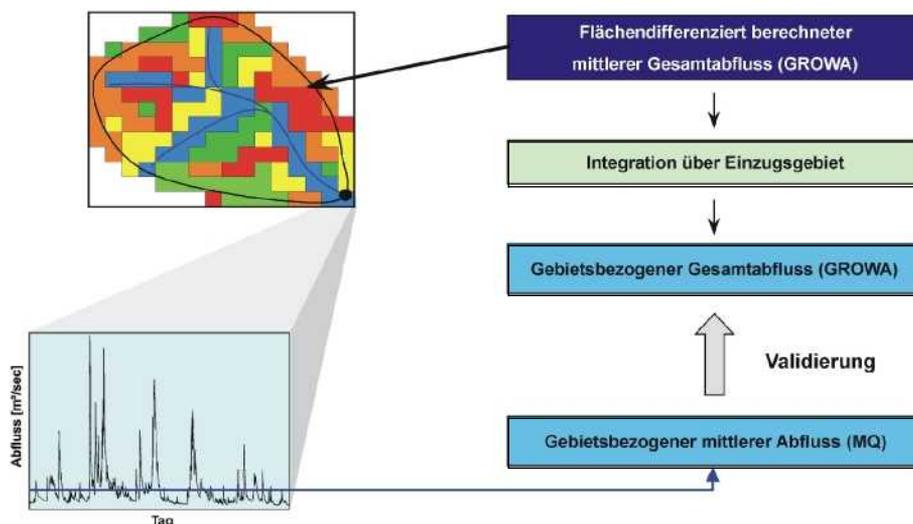


Abb. 18: Schematische Darstellung des Verfahrensgangs zur Validierung der berechneten Wasserhaushaltsgrößen, dargestellt am Beispiel des Gesamtabflusses.

Die Validierung der Modellergebnisse wurde für 125 Einzugsgebiete durchgeführt (siehe Karte 15, Tab. 20 und Tab. 27). Um die Eignung des Modells für unterschiedliche Landschaftsräume nachzuweisen, wurde bei der Auswahl der betrachteten Einzugsgebiete eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Landnutzungen sowie verschiedener klimatischer, pedologischer und topographischer Verhältnisse angestrebt. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass nur Pegelmesswerte von weitestgehend wasserwirtschaftlich bzw. bergbaulich unbeeinflussten Einzugsgebieten Nordrhein-Westfalens herangezogen wurden. Die Validierung wurde bei verschachtelten Einzugsgebieten immer bezogen auf das Gesamtgebiet des jeweiligen Pegels durchgeführt.

Die für die Zeitreihe 1979-1999 berechneten Gesamtabflusshöhen wurden mit den Mittelwerten der mittleren Tagesabflüsse (MQ) der gleichen Zeitreihe verglichen. Abb. 19 zeigt diesen Vergleich für alle 125 Einzugsgebiete. Die mittlere Abweichung beträgt 12,7 %. Für 85 Teileinzugsgebiete liegen die Differenzen von berechneten und gemessenen Werten bei weniger als 15 %. Dies stellt im Rahmen der zur Verfügung stehenden Daten sowie der Größe und Heterogenität des betrachteten Untersuchungsgebiets eine sehr befriedigende Übereinstimmung dar. Dies gilt im besonderen Maße, wenn man berücksichtigt, dass die berechneten Gesamtabflusshöhen nicht kalibriert wurden. Bei den Einzugsgebieten, bei denen größere Abweichungen zwischen be-

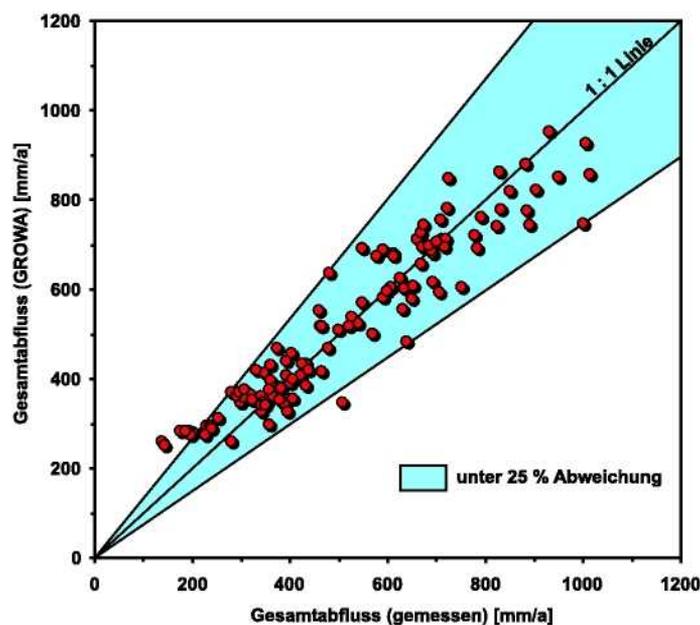


Abb. 19: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Gesamtabflusshöhen.

rechneten und gemessenen Abflusswerten auftreten, muss im Rahmen von Detailstudien untersucht werden, ob die Ursachen hierfür auf durch das Modell nicht erfasste einzugsgebietsbezogene Besonderheiten oder auf wasserwirtschaftliche Eingriffe zurückzuführen sind.

Bei der Validierung der berechneten Grundwasserneubildungshöhen ist zu beachten, dass die Grundwasserneubildung nur im Idealfall dem Grundwasserabfluss, also der Wassermenge, die in einem Flusseinzugsgebiet als Quellschüttung bzw. als Basisabfluss die Vorfluter speist, entspricht. Dies ist nicht immer der Fall, da, wie Abb. 20 zeigt, eine Vielzahl natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren dazu führen können, dass die Grundwasserneubildung und der resultierende Grundwasserabfluss voneinander abweichen.

Ein wichtiger natürlicher Einflussfaktor auf den Grundwasserabfluss ist die hydrodynamische Situation im Einzugsgebiet. Glugla & Müller (1997) berichten beispielsweise von einem Gebiet nordöstlich von Berlin, bei dem etwa 40 % der Grundwasserneubildung mit dem Grundwasserabstrom aus einem Einzugsgebiet in ein benachbartes transportiert wird. Die Grundwasserentnahme für die öffentliche und industrielle Wasserversorgung, für die landwirtschaftliche Bewässerung sowie für bergbauliche Maßnahmen stellt einen wichtigen anthropogenen Einflussfaktor dar. Beispielsweise gibt Struckmeier (1990) für die Einzugsgebiete der oberen Ems und der oberen Lippe eine

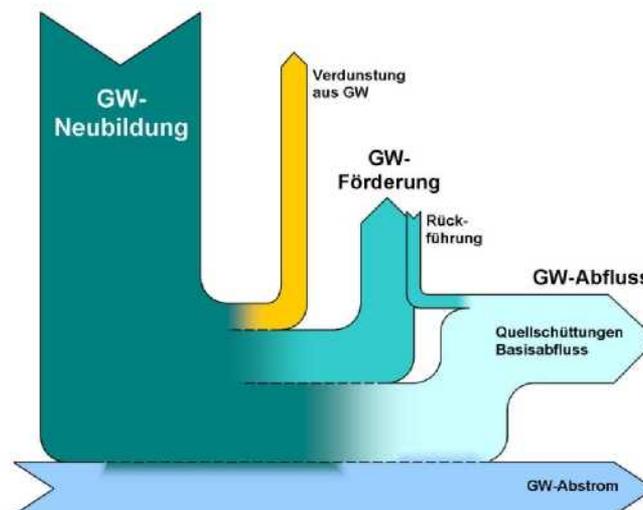


Abb. 20: Beziehung zwischen Grundwasserneubildung, Grundwasserförderung und Grundwasserabfluss (nach Struckmeier, 1997). Die Breite der Balken entspricht näherungsweise den Volumenanteilen der jeweiligen Komponenten.

jährliche Entnahmemenge von 60 Mio. m³ an, was etwa 5 % der jährlichen Grundwasserneubildung entspricht. In diesem Zusammenhang spielt auch die Grundwasserrückführung, z.B. durch Bewässerungsmaßnahmen, eine Rolle. Hierbei gelangt ein Teil des entnommenen Grundwassers wieder in den Grundwasserkörper. Oftmals wird jedoch entnommenes Grundwasser in andere Regionen exportiert, so dass es der Bilanzierung entzogen ist.

Ein Großteil des für die öffentliche Wasserversorgung entnommenen Grundwassers wird indirekt durch Einleitungen aus Kläranlagen in die Fließgewässer zurückgeführt. Auf diese Weise wird die Wasserführung eines Vorfluters durch einen permanenten Beitrag erhöht und der Niedrigwasserabfluss entspricht nicht mehr oder nur eingeschränkt dem natürlichen Grundwasserabfluss. Nach Christoffels (2002) werden einige Bäche im Einzugsgebiet der Erft in Trockenperioden nur noch durch Klärwasser gespeist.

Die Grundwasserneubildung kann aus beobachteten Abflusswerten nur indirekt abgeleitet werden (siehe Kap. 3.2). Im Lockergestein und im Festgestein wurde dies auf der Grundlage unterschiedlicher Verfahren durchgeführt. In den Festgesteinsbereichen wurde, um den Einfluss des Zwischenabflusses weitgehend zu eliminieren (siehe Kap. 3.2.1), der MoMNQ-Wert nach Kille (1970) verwendet. Für die Lockergesteinsregionen wurde der MoMNQ-Wert nach Wundt (1958) zugrundegelegt, da sich für die Lockergesteinsregionen des Elbe-Einzugsgebiets (Kunkel & Wendland, 1998) und das Bundesland Niedersachsen (Dörhöfer et al., 2001) gezeigt hat, dass dieser Wert ein gutes Maß für die Grundwasserneubildung ist.

Abb. 21 und Abb. 22 zeigen den Vergleich der gemessenen und berechneten gebietsbezogenen Direktabfluss- bzw. Grundwasserneubildungshöhen für alle 125 betrachteten Einzugsgebiete. In den meisten Fällen stellt man, wie schon bei den Gesamtabflüssen, eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten fest. Die hierbei auftretenden Abweichungen sind allerdings, verglichen mit denen des Gesamtabflusses, erhöht, weil sich bei der Direktabfluss- und der Grundwasserneubildungshöhe die Streubeiträge von zwei Teilmodellen (Gesamtabflussmodellierung, Separation der Abflusskomponenten) überlagern. Dementsprechend betragen die mittleren Abweichungen über alle verwendeten Pegel für den Direktabfluss 15,0 % und für die Grundwasserneubildungshöhen 19,3 %.

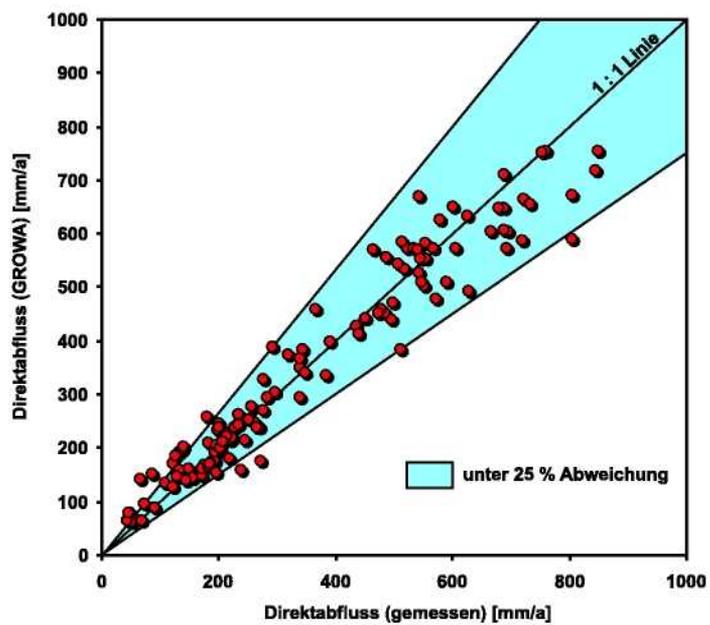


Abb. 21: Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Direktabflusshöhen.

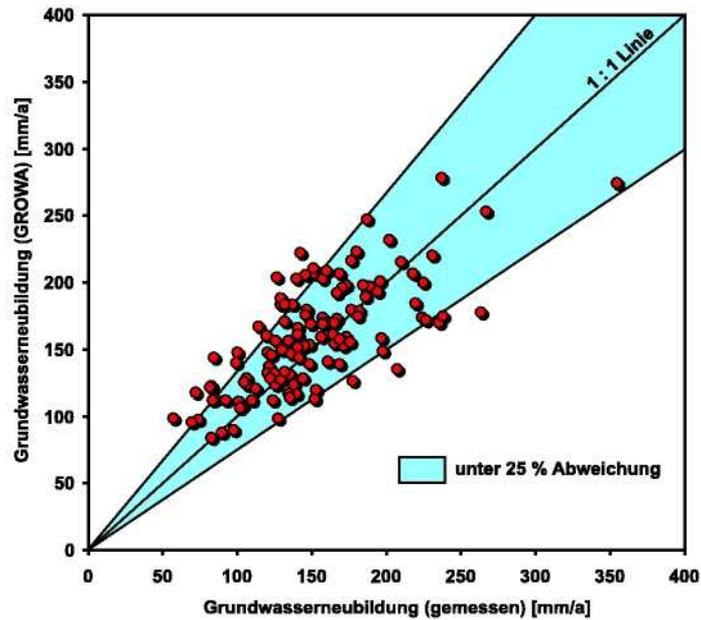


Abb. 22: Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Grundwasserneubildungshöhen.

8

Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen einer selbsttragenden Forschungsk Kooperation des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen (GD NRW) und der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) des Forschungszentrums Jülich wurde der Landschaftswasserhaushalt in NRW analysiert. Auf der Basis umfangreicher, räumlich hochaufgelöster digitaler Datengrundlagen wurde die räumliche Variabilität der Wasserhaushaltsgrößen, insbesondere der Grundwasserneubildungshöhe, für Nordrhein-Westfalen berechnet. Hierzu wurde das Wasserhaushaltsmodell GROWA des FZ Jülich eingesetzt und vor allem im Hinblick auf die Berechnung der Grundwasserneubildung in Festgesteinsregionen weiterentwickelt. Alle Datengrundlagen und abgeleiteten Größen wurden hinsichtlich ihrer Qualität überprüft, diskutiert und in Form von Übersichtskarten dargestellt.

Für die Modellierung wurden digitale Datengrundlagen verwendet, die überwiegend vom GD NRW zur Verfügung gestellt wurden. Hierzu zählen insbesondere die BK50 und die HK100 sowie die topografischen Daten. Darüber hinaus wurden Niederschlags- und Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes für die Periode 1979-1999 und der CORINE-Landcover Datensatz zur Bodenbedeckung des Statistischen Bundesamtes verwendet. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurden Pegeldata verwendet, die von Staatlichen Umweltämtern und Wasserverbänden zur Verfügung gestellt wurden. Für diese Unterstützung möchten sich die Autoren an dieser Stelle ausdrücklich bedanken.

Zur Modellierung wurden die Datengrundlagen auf ein Raster mit einer für die Modellierung optimalen Zellengröße von 100 m transformiert. Aus dieser räumlichen Diskretisierung ergeben sich für die Landesfläche Nordrhein-Westfalens ca. 3,4 Mio. Rasterzellen, für welche die Wasserhaushaltsgrößen separat berechnet wurden. Mit einer solch hohen Flächendifferenzierung wurde bislang noch keine flächendeckende Bestimmung der Wasserhaushaltsgrößen in Nordrhein-Westfalen durchgeführt.

Zur Berechnung der Gesamtabflusshöhen kombiniert das GROWA-Modell auf konzeptionelle Weise meteorologische Flächendaten (Winter-, Sommerniederschlag und potenzielle Evapotranspiration) mit Standorteigenschaften (Landnutzung, Bodeneigenschaften, Neigung, Exposition, mittlerer Flurabstand). Die Grundwasserneubildungsrate wird über einen konstanten Anteil am Gesamtabfluss (BFI-Wert) beschrieben. Die BFI-Werte werden für jede Rasterzelle durch einen hierarchischen Ansatz in Abhängigkeit von u.a. hydrogeologischen, topografischen, bodenphysikalischen Kenngrößen bestimmt.

Die für die Modellierung verwendeten BFI-Werte wurden an Basisabflussanteilen kalibriert, die auf der Basis von beobachteten Pegeldurchflusswerten ermittelt werden. In den bisherigen Anwendungen des GROWA-Modells wurden hierzu die mittels des Wundt-Verfahrens aus den Pegeldaten ermittelten Niedrigwasserabflüsse verwendet. In den Lockergesteinsbereichen geben diese die Grundwasserneubildungshöhen sehr gut wieder. In den Festgesteinsbereichen beinhalten jedoch die Wundt'schen Niedrigwasserabflüsse vor allem in den Wintermonaten einen Großteil des Zwischenabflusses, was zu einer Überschätzung der BFI-Werte führt. Aus diesem Grunde wurde für die Festgesteinsbereiche in Anlehnung an das Kille-Verfahren ein Verfahren entwickelt, das den Einfluss des Zwischenabflusses bei der Abflussseparation berücksichtigt und die Ableitung realistischer Grundwasserneubildungshöhen erlaubt. Um die Anwendbarkeit dieses Verfahrens zu testen, standen für das Bundesland Nordrhein-Westfalen die Abflussdaten von 125 Pegelstationen zur Verfügung.

Die Modellergebnisse liegen in Form mittlerer Jahressummen der Periode 1979-1999 vor. Es wurden keine Modellierungen für Einzeljahre (z.B. Nass-/Trockenjahre), innerjährliche Bezugszeiträume (z.B. Winterhalbjahr), oder Extremereignisse (Hochwasser) durchgeführt. Für diese besonderen Bedingungen ergeben sich Abflusswerte, die in der Regel von den hier in Kartenform dargestellten mittleren Gesamtabfluss-, Grundwasserneubildungs- und Direktabflusshöhen abweichen werden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Karten als großräumige Übersichten konzipiert wurden, so dass die Aussagekraft für kleinräumige Fragestellungen eingeschränkt ist.

Die **Validierung** der Modellergebnisse wurde für 125 Einzugsgebiete durchgeführt. Für die meisten Pegel wurde eine sehr befriedigende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten festgestellt, wobei die Abweichung sowohl für den Gesamtabfluss als auch für den Direktabfluss und die Grundwasserneubildung für die große Mehrheit der 125 Einzugsgebiete unter 15 % liegt. Angesichts dieser insgesamt guten Übereinstimmungen kann man davon ausgehen, dass die mit dem GROWA-Modell abgeleiteten Wasserhaushaltsgrößen die tatsächlich vorliegenden Verhältnisse gut widerspiegeln.

In den Tieflandsregionen dominieren **Gesamtabflusshöhen** von unter 400 mm/a. In der Niederrheinischen Bucht treten überwiegend Werte von unter 200 mm/a auf, während die Gesamtabflüsse im Niederrheinischen Tiefland und in der Westfälischen Bucht zwischen 200 und 300 mm/a liegen. Im Gegensatz dazu treten in den Mittelgebirgsregionen Gesamtabflusshöhen von typischerweise mehr als 500 mm/a auf. Vor allem in den höheren Lagen der Mittelgebirge können großräumig sogar Gesamtabflusshöhen von mehr als 800 mm/a erreicht werden.

Im Gegensatz dazu sind die **Grundwasserneubildungshöhen** in den Lockergesteinsregionen deutlich höher als in den Festgesteinsregionen Nordrhein-Westfalens. Im Festgestein wird die Höhe der Grundwasserneubildung neben den meteorologischen Randbedingungen in erster Linie durch die hydrogeologischen Eigenschaften der anstehenden Gesteinsschichten bestimmt. So werden für die zumeist gering wasserwegsameren unter- und oberdevonischen Festgesteine des Rheinischen Schiefergebirges im Mittel Grundwasserneubildungshöhen von weniger als 100 mm/a erreicht. In den Lockergesteinsregionen treten großräumig die größten Grundwasserneubildungshöhen auf. In der Niederrheinischen Bucht beispielsweise betragen die Werte 200 mm/a und mehr.

Bei den **Direktabflusshöhen** ist eine ausgeprägte Zweiteilung der Landesfläche erkennbar. In den Mittelgebirgsregionen dominieren Direktabflusshöhen oberhalb von 500 mm/a. Vor allem in den höheren Lagen der Mittelgebirge können sogar Direktabflusshöhen von 800 mm/a und mehr erreicht werden. Im Gegensatz dazu treten in der Niederrheinischen Bucht und im Niederrheinischen Tiefland überwiegend Werte unter 100 mm/a auf. In der Westfälischen Bucht liegen die Direktabflusshöhen im Bereich zwischen 100 und 200 mm/a.

Auf Basis der berechneten Abflusskomponenten wurden Auswertungen vorgenommen, die eine vertiefende und weitergehende Beurteilung der Wasserhaushaltssituation in Nordrhein-Westfalen, z.B. im Hinblick auf die Beschreibung des mengenmäßigen Zustandes der Wasserressourcen, erlauben. Dies sind die regional dominante Gebietsentwässerung und die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers sowie flussgebietsbezogene Wasserhaushaltsbilanzen auf Grundlage der in der EU Wasserrahmenrichtlinie ausgewiesenen Flussgebiete Nordrhein-Westfalens.

Die großräumige, flächendifferenzierte Modellierung der Wasserhaushaltsgrößen ist eine unerlässliche Basis für die Quantifizierung von Stoffeinträgen in die Flüsse. Sie ist damit auch die Grundlage für die Entwicklung flächenbezogener Strategien für eine eintragspfadbezogene Reduzierung der Stoffeinträge. Es ist geplant, die Forschungskooperation zwischen dem Geologischen Dienst NRW und der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung des Forschungszentrums Jülich unter Einbeziehung der Forschungsanstalt für Agrarpolitik und Agrarsoziologie e.V. (FAA) in Bonn im Hinblick auf eine landesweite Bestimmung der diffusen Nährstoffeinträge in die Oberflächengewässer Nordrhein-Westfalens fortzuführen.



Literaturverzeichnis

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M.** (2000): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements.- FAO Irrigation and drainage paper, 56, 290 S.; Rome.
- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S. & Perrier, A** (1994): An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration.- ICID Bulletin, 43 (2): 35-93.
- AG Boden** (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage.- Bundesanstalt Geowissenschaften. u. Rohstoffe, 392 S.; Hannover.
- ATV-DVWK** (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.- Merkblatt ATV-DVWK M 504, 144 S.; Hennef.
- Bach, M.** (1987): Die potentielle Nitratbelastung des Sickerwassers durch die Landwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland.- Göttinger Bodenkdl. Berichte, 93: 1-186.
- Bagrov, N. A.** (1953): Über den vieljährigen Verdunstungsdurchschnitt von der Oberfläche des Festlandes (in russ.).- Meteorologia i Gidrologia, 10: 20-25; Leningrad.
- Baumgartner, A. & Liebscher, H.-J.** (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1: Allgemeine Hydrologie, 673 S.; Stuttgart.
- Beyer, W.** (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 14 (6): 165-168.
- BLR, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.)** (1959-78): Geographische Landesaufnahme 1 : 200.000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands; Bonn-Bad Godesberg.
- Braun, P., Molnar, T. & Kleeberg, H.-B.** (1996): Das Skalenproblem bei der rasterorientierten Modellierung hydrologischer Prozesse.- Dtsch. gewässerkd. Mitt., 40 (2): 83-90.
- BRBS, Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau** (1980): Grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 67 S.; Braunschweig.
- Burwick, P., Ferdian, H.-J., Guenther, I. & Hamacher, R.** (1982): Abfluss am Pegel Pannemühle/Schwalm. In: Arbeitskreis „Grundwasserneubildung“ (Hrsg.): Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate für den nördlichen Teil des Rheinischen Braunkohlenreviers. Interner Bericht: 203-243.
- Christoffels, E.** (2002): mündliche Mitteilung.
- Demuth, S.** (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa.- Freiburger Schriften zur Hydrologie, 1, 205 S.; Freiburg i. Breisgau.

Deutloff, O. (1974): Die Hydrogeologie des nordwestlichen Weserberglandes in der Umgebung von Bad Salzuflen und Bad Oeynhausens.- Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 20: 111-194; Krefeld.

DIN, Deutsches Institut für Normung E.V. (1994): DIN 4049-3 Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.- Beuth-Verlag; Berlin.

DIN, Deutsches Institut für Normung E.V. (1997): DIN 19732. Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nicht sorbierbaren Stoffen.- Beuth-Verlag; Berlin.

DIN, Deutsches Institut für Normung E.V. (1998): DIN 19687. Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden.- Beuth-Verlag; Berlin.

Dinter, W. (1998): Naturräumliche Gliederung Nordrhein-Westfalens. In: Rote Liste der gefährdeten Pflanzen und Tiere in Nordrhein-Westfalen.- Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten, Schriftenreihe Bd. 17; Recklinghausen.

Dörhöfer, G. & Josopait, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate.- Geol. Jb., 27: 45-65.

Dörhöfer, G., Kunkel, R., Tetzlaff, B. & Wendland, F. (2001): Der natürliche Grundwasserhaushalt von Niedersachsen.- Arbeitshefte Wasser, 2001/1: 109-167; Hannover.

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.- DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 238: 135 S.; Bonn.

Gabriel, B. & Ziegler, G. (1989): Lithofaziesseinheiten - ein neues Konzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Festgesteinsbereich.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 39 (7): 163-165.

Gabriel, B., Ziegler, G. und Jacobs, H. (1986): Das Festgesteinsmodell GEOFEMLAW als Grundlage für die neue Methodik der Grundwasserneubildungsberechnung im Festgesteinsbereich.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 36 (2): 33-36.

Gabriel, B., Jacobs, H. und Ziegler, G. (1993): Zur Grundwasserneubildungsberechnung für Festgesteinsgrundwasserleiter auf der Grundlage des Modells GEOFEMLAW und seiner Weiterentwicklungen (GEOFEM). In: HGN Hydrogeologie GmbH: Vorträge Kolloquium Hydrogeologie: 38-56.

GD NRW, Geologischer Dienst NRW (2003): Informationssystem Hydrogeologische Karte von NRW 1:100 000: Erläuterung der Datenfelder; Krefeld.

Glugla, G., Enderlein, R., Eyrich, A. (1976): Das Programm RASTER - ein effektives Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Lockergestein.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 26 (11): 377-382.

Glugla, G., Eyrich, A. und König, B. (1986): Wasserhaushaltsuntersuchungen - Bedeutung für die wasserwirtschaftliche Praxis.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 38 (8): 177-180.

Glugla, G. & König, B. (1989): Der mikrorechnergestützte Arbeitsplatz Grundwasserdarangebot.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 39 (8): 178-181.

Glugla, G. & Müller, E. (1993): Grundwasserneubildung als Komponente der Abflussbildung.- Freiburger Schriften zur Hydrologie, 1: 205 S.; Freiburg i. Breisgau.

Glugla, G. & Fürtig, G. (1997): Dokumentation zur Anwendung des Rechenprogrammes ABIMO.- Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, 19 S.

Glugla, G., Müller, E., Jankiewicz, P., Rachimow, C. & Lojek, K. (1999): Entwicklung von Verfahren zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der flächendifferenzierten Abflussbildung. Abschlussbericht zum DFG-Projekt GI 242/1-2 "Wasserhaushaltsverfahren", BfG-Außenstelle Berlin.

Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G. & Krahe, P. (2002) Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses.- BfG-Bericht 1342, Bundesanstalt für Gewässerkunde; Berlin/Koblenz.

Golf, W. (1981): Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge.- Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 31: 93-95.

Grossmann, J. (1997): Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung für große Einzugsgebiete.- Wasser/Abwasser, 138 (6): 296-303.

HAD, Hydrologischer Atlas Deutschland (1998): Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Hydrologischer Atlas von Deutschland.

HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evapotranspiration.- Mitt. dt. Wetterdienst, 8: 1-24.

Hellekes, R. & Guenther, I. (1982): Abfluss für das Nierseinzugsgebiet bis Pegel Trabrennbahn. In: Arbeitskreis „Grundwasserneubildung“ (Hrsg.): Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate für den nördlichen Teil des Rheinischen Braunkohlenreviers. Interner Bericht: 261-266.

Hennings, V. (Hrsg.) (2000): Methodendokumentation Bodenkunde. - Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geologisches Jahrbuch, Reihe F; Hannover.

Hilden, H. D. & Kamp, H. v. (1974): Erschließung von Grundwasser durch Bohrbrunnen im rechtsrheinischen Schiefergebirge des Landes Nordrhein-Westfalen.- Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 20: 237-258; Krefeld.

- Hoffmann, M.** (1995): Basisplan III zur Sicherung der Wasserversorgung im Bereich des Erftverbands.- Erftverband, Ausschuss für Hydrologie und Wasserversorgung, 200 S.; Bergheim.
- Jordan, H. & Weder, H.J. (Hrsg.)** (1995): Hydrogeologie - Grundlagen und Methoden; Regionale Hydrogeologie, 603 S., Enke-Verlag; Stuttgart.
- Kille, K.** (1970): Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse.- Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem: 89-95.
- Kunkel, R. & Wendland, F.** (1997): WEKU - a GIS-supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifers for the supraregional groundwater management.- Env. Geol., 30 (1/2): 1-9.
- Kunkel, R. & Wendland, F.** (1998): Der Landschaftswasserhaushalt im Flusseinzugsgebiet der Elbe - Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen.- Schr. d. FZJ, Reihe Umwelt, Bd. 12; Jülich.
- Kunkel R. & Wendland, F.** (2000): Verweilzeit und Denitrifikation – Schlüsselfaktoren bei den Nährstoffeinträgen über das Grundwasser – eine Elbefallstudie (deutscher Teil).- UBA-Texte, 29/00: 74 –93.
- Kunkel, R. & Wendland, F.** (2002): The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins - the river Elbe case study.- J. Hydrol., 259: 152-162.
- Lahmer, W., Dannowski, R., Steidl, J. & Pfützner, B.** (2000): Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg. Studien und Tagungsberichte, Bd. 27, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg; Potsdam.
- MUNLV, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW** (2000): Berichte über die Grundwassersituation in Nordrhein-Westfalen: Grundwasserbericht 2000 NRW.- Reihe "Umweltgüteberichte Nordrhein-Westfalen". 269 S.; Düsseldorf.
- Matheron, G.** (1963): Principles of geostatistic.- Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 58: 1246-1266.
- MLNU, Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt Thüringen** (1996): Grundwasser in Thüringen.- Bericht zu Menge und Beschaffenheit. Ministerium für Landwirtschaft Thüringen, Naturschutz und Umwelt (Hrsg.); Erfurt.
- Mückenhausen, E.** (1962): Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland.- DLG-Verlag. 300 S.; Frankfurt am Main.
- Müller, U.** (1997): Dokumentation zur Methodenbank des Fachinformationssystems Bodenkunde (FIS BODEN).- Technische Berichte zum NIBIS, 2. Aufl. unter Mitarbeit von Malessa, V., Bergmann, A.: Niedersächs. Landesamt f. Bodenforschung. E.; Stuttgart.

Müller-Westermeier, G. (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten.- Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 193; Offenbach am Main.

Peschke, G. (1997): Der komplexe Prozess der Grundwasserneubildung und Methoden zu ihrer Bestimmung. In: Leibundgut, C. & Demuth, S.: Freiburger Schriften zur Hydrologie, 5: 1-13; Freiburg.

Pfützner, B. (2001): Bestimmung der Grundwasserneubildung für das Land Sachsen-Anhalt auf Grundlage des Verfahrens Bagrov/Glugla.- unveröff. Gutachten im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 61 S.; Berlin.

Proksch, W. (1990): Lysimeterauswertungen zur flächendifferenzierten Ermittlung mittlerer Grundwasserneubildungsraten.- Bes. Mitt. dt. gewässerkd. Jb., 55: 74 S.; Koblenz.

Renger, M. & Strebel, O. (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften.- Wasser u. Boden, 32 (8): 362-366.

Renger, M. & Strebel, O. (1983): Einfluß des Grundwasserflurabstandes auf Grundwasserneubildung.- Z. dt. geol. Ges., 116: 167-203.

Renger, M. & Wessolek, G. (1996): Berechnung der Verdunstungs-Jahressummen einzelner Jahre. In: DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 238: 47; Bonn.

Renger, M., Strebel, O., Münnich, K.O. & Sonntag, C. (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate.- Geol. Jb., C19, Hannover.

Rijtema, P. E. (1968). On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for supply plants.- Techn. Bull. Inst., Land and Water Management Research, 58; Wageningen.

Schrey, H. P. (1993): Simulation des Bodenwasserhaushaltes auf der Grundlage der digitalen Bodenkarte 1 : 50.000 von NRW. In: Grundwasserneubildung aus Niederschlag, LfU-Schriften, Reihe Grundwasserüberwachungsprogramm, Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg, Abt. IV - Wasser; Karlsruhe.

Schrey, H. P. (1994): Die großmaßstäbige Bodenkartierung in Nordrhein-Westfalen als Weg vom Bohrpunkt zur Fläche; 2. Teil: Die quantifizierende Codierung als Grundlage EDV-gestützter Auswertungen.- Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges., 74: 225 - 228.

Schrey, H. P. (1996): Schätzrahmen für die effektive Durchwurzelungstiefe mehrschichtiger Böden.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 159: 453-457.

Schlichting, E. (1970): Bodenklassifikation nach Genese oder Effekt.- Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges., 10: 13-16.

Schroeder, M. (1983): Neue Werte zur Grundwasserneubildung unter Wald für das Münsterland.- Dtsch. gewässerkd. Mitt., 27 (4): 121-124.

- Schroeder, M. & Wyrwich, D.** (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung.- Dtsch. gewässerkd. Mitt., 34 (1/2): 12-16.
- Schwarze, R., Herrmann, A., Münch, A., Grünwald, U. und Schöne, M.** (1991): Rechnergestützte Analyse von Abflußkomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten.- Acta hydrophys., 35(2): 143-184.
- Spelter, M. & Trumpff, H.** (1982): Abfluss für das Nierseinzugsgebiet bis Pegel Wickrathberg. In: Arbeitskreis „Grundwasserneubildung“ (Hrsg.): Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate für den nördlichen Teil des Rheinischen Braunkohlenreviers.- Interner Bericht: 243-260.
- Statistisches Bundesamt** (1997): Informationsblatt zur CD-ROM „Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland“; Wiesbaden.
- Struckmeier, W.** (1990): Wasserhaushalt und Hydrologische Systemanalyse des Münsterländer Beckens.- LWA Schriftenreihe des Landesamtes für Wasser und Abfall NRW, Bd. 45: 72 S.; Düsseldorf.
- Tetzlaff, B., Wendland, F. & Kunkel, R.** (2002): GIS-gestützte Ermittlung der Grundwasserneubildung in der Metropolregion Hamburg.- Endbericht zum Forschungsprojekt, 36 S.; Jülich.
- Turc, L.** (1961): Evaluation des besoins en eau d'irrigation.- Evapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 12 (1): 13-49.
- Wendland, F.** (1992): Die Nitratbelastung in den Grundwasserlandschaften "alten" Bundesländer (BRD).- Berichte aus der Ökologischen Forschung, 8: 150 S.; Jülich.
- Wendling, U.** (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung.- Wasserwirtschaft, 85 (12): 602-604.
- Wessolek, G. & Facklam, M.** (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen.- Z. Pflanzenemähr. Bodenk., 160: 41-46.
- Weyer, K. U.** (1972): Ermittlung der Grundwassermengen in den Festgesteinen der Mittelgebirge aus Messungen der Trockenwetterabflüsse.- Geol. Jb, C 3: 19-114.
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., & Sokollek, V.** (1992): Landschaftswasserhaushalt, 352 S.; Hamburg/Berlin.
- Wundt, W.** (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: Grahmann, R.: Die Grundwässer in Deutschland und ihre Nutzung.- Forsch. Deut. Landeskunde, 104: 47-54.

Anhang

Tab. 26: Gesamtfläche und Flächenanteile der CORINE-Landnutzungskategorien in Nordrhein-Westfalen.

Nr.	Landnutzungskategorie	Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]
1.1.1	durchgängig städtischer Prägung	31,1	0,09
1.1.2	nicht durchgängig städtischer Prägung	3787,5	11,11
1.2.1	Industrie- u. Gewerbeflächen	558,3	1,64
1.2.2	Straßen- u. Eisenbahnnetze	34,5	0,10
1.2.3	Hafengebiete	22,9	0,07
1.2.4	Flughäfen	55,1	0,16
1.3.1	Abbauflächen	199,7	0,59
1.3.2	Deponien u. Abraumhalden	57,9	0,17
1.3.3	Baustellen	8,7	0,03
1.4.1	Städtische Grünflächen	109,8	0,32
1.4.2	Sport- u. Freizeitanlagen	103,2	0,30
2.1.1	nicht bewässertes Ackerland	14522,6	42,61
2.2.2	Obstbestände	11,3	0,03
2.3.1	Wiesen u. Weiden	3520,2	10,33
2.4.2	Komplexe Parzellenstrukturen	1933,8	5,67
2.4.3	Landwirtschaftliche Flächen mit natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	866,2	2,54
3.1.1	Laubwälder	2666,6	7,82
3.1.2	Nadelwälder	2861,9	8,40
3.1.3	Mischwälder	2384,7	7,00
3.2.1	Natürliches Grünland	100,0	0,29
3.2.2	Heiden und Moorheiden	28,9	0,08
3.2.4	Wald-Strauch-Übergangsstadien	10,5	0,03
3.3.1	Strände, Dünen, Sandflächen	2,1	0,01
3.3.3	Flächen mit spärlicher Vegetation	7,7	0,02
4.1.1	Sümpfe	2,8	0,01
4.1.2	Torfmoore	17,7	0,05
5.1.1	Gewässerläufe	79,5	0,23
5.1.2	Wasserflächen	100,2	0,29

Tab. 27: Für die Kalibrierung der Baseflow Indizes verwendete Pegelstationen.

ID	Messstelle	Gewässer	Zeitraum	Betreiber	AEO
1	Ahlen	Werse	1976-2000	StUA Münster	46,62
2	Ahmsen	Werre	1964-2001	StUA Minden	593
3	Ammeloe	Berkel	1960-1999	StUA Herten	351,1
4	Appelhülsen	Steuer	1973-2000	StUA Münster	28,02
5	Bamenohl	Lenne	1973-2001	Ruhrverband	453,09
6	Belecke 1	Möhne	1965-2000	StUA Lippstadt	251,6
7	Betzdorf	Sieg	1952-2001	WWV Rheinland Pfalz	753,9
8	Bilk	Vechte	1960-2000	StUA Münster	177,94
9	Bliesheim	Ertf	1966-2001	StUA Köln	604
10	Börlinghausen	Lister	1961-2001	Ruhrverband	47,98
11	Borken-Stadt	Borkener Aa	1960-1999	StUA Herten	70,02
12	Bröl	Bröl	1970-2001	StUA Köln	216,29
13	Bröleck	Bröl	1971-2001	StUA Köln	101
14	Dedenborn	Rur	1961-2001	WVER	199,1
15	Eibacher Hammer	Leppe	1971-1999	Aggerverband	25,7
16	Eicherscheid	Ertf	1977-2001	Ertverband	42,71
17	Eigen	Düssel	1960-2001	StUA Düsseldorf	42,81
18	Einen	Ems	1960-2000	StUA Münster	1485,77
19	Eitorf	Sieg	1971-2001	StUA Köln	1468
20	Eschweiler	Inde	1971-2000	StUA Aachen	232,15
21	Feudingen	Lahn	1960-2000	StUA Siegen	25,4
22	Fiestel	Grosse Aue	1971-2001	StUA Minden	102,24
23	Friesheim	Rotbach	1960-2001	StUA Köln	191
24	Geisbach	Hanfbach	1976-2001	StUA Köln	49,28
25	Geldern	Gelderner Fleuth	1971-2001	StUA Krefeld	167,84
26	Gemünd	Urtf	1960-2001	WVER	344,55
27	Glinge	Glingebach	1971-2000	StUA Siegen	5,47
28	Goch	Niers	1980-2001	StUA Krefeld	1203,21
29	Greven	Ems	1960-2000	StUA Münster	2842,1
30	Gronau	Dinkel	1969-1999	StUA Herten	183,17
31	Hagen-Ambrock	Volme	1961-2000	StUA Hagen	197
32	Hagen-Eckesey	Volme	1961-1999	StUA Hagen	425
33	Hagen-Haspe	Ennepe	1961-1999	StUA Hagen	156
34	Haltem	Lippe	1960-1999	StUA Herten	4273,16
35	Hangerbergmühle	Dörpe	1989-2001	Wupperverband	11,7
36	Hausweiler	Ertf	1984-2001	Ertverband	259,95
37	Heek	Dinkel	1976-1999	StUA Herten	122,9
38	Hembram	Schmittwasser	1965-2000	StUA Bielefeld	25,07
39	Herford	Werre	1960-2001	StUA Minden	871,01
40	Hemtrop	Hundem	1977-2000	StUA Siegen	60,7
41	Hoffnungsthal	Sülz	1960-2001	StUA Köln	219
42	Hopsten	Hopstener Aa	1973-2000	StUA Münster	152,8
43	Hückeswagen	Wupper	1989-2001	Wupperverband	163
44	Iserlohn	Baarbach (Lögerbach)	1974-1994	StUA Hagen	12,7
45	Isselburg	Issel (Ijssel)	1985-1999	StUA Herten	258,16
46	Itterbach	Itterbach	1982-2001	BRW	6,26
47	Kapellen	Issumer Fleuth	1988-2001	StUA Krefeld	75,86
48	Kesseler 3	Lippe	1983-2000	StUA Lippstadt	2002,97
49	Kierspe	Volme	1975-2000	StUA Hagen	23,3
50	Klauserhof	Naaf	1983-2001	Aggerverband	12,9
51	Koverstein	Agger	1979-2001	Aggerverband	8,3
52	Kreuznaaf	Naaf	1988-2001	Aggerverband	42,76
53	Kreuztal	Ferndorf	1960-2000	StUA Siegen	63,4
54	Kuckesberg	Itterbach	1989-2001	BRW	16,82
55	Ladbergen	Aabach	1984-1999	StUA Münster	64,16
56	Landesgrenze	Schwalm	1986-2001	StUA Krefeld	252,75
57	Legden Bhf	Dinkel	1968-1999	StUA Herten	41,43
58	Lehen 2	Ibbenbürener Aa	1978-2000	StUA Münster	34,12
59	Leven	Lippe	1960-1999	StUA Herten	3324,61
60	Lindemannsheide	Bega	1960-2001	StUA Minden	316,67

Tab. 28 (Fortsetzung): Für die Kalibrierung der Baseflow Indizes verwendete Pegelstationen.

ID	Messstelle	Gewässer	Zeitraum	Betreiber	AEO
61	Lintorf	Dickelsbach	1989-2001	BRW	17,2
62	Lippstadt 2	Lippe	1961-1994	StUA Lippstadt	1395,56
63	Löhne	Werre	1983-2001	StUA Minden	1335,11
64	Lohmar	Agger	1960-2001	StUA Köln	785
65	Lutum	Berkel	1960-2000	StUA Münster	38,11
66	Marienbaum	Hohe Ley	1961-2001	STUA Duisburg	48,2
67	Menden	Hönne	1974-1999	StUA Hagen	254
68	Menden 1	Sieg	1965-2001	StUA Köln	2825
69	Merfeld	Heubach	1969-1999	StUA Herten	67,95
70	Mitte	Hessel	1970-2000	StUA Münster	204,87
71	Mödrath	Ertf	1985-2001	Ertverband	1158,2
72	Morenhoven	Swistbach	1970-2001	StUA Köln	109
73	Morsbach 2	Wisser Bach	1960-2001	StUA Köln	43,3
74	Müllensiepen	Bever	1966-2001	Wupperverband	4,72
75	Müschede	Röhr	1961-2000	StUA Lippstadt	195
76	Müsse	Eder	1960-2000	StUA Siegen	125
77	Nauholz 2	Nauholzbach	1985-2000	StUA Siegen	3,41
78	Nespen	Wiehl	1976-2001	Aggerverband	29,4
79	Neuhaus 1	Lippe	1972-1999	StUA Bielefeld	107,3
80	Neuhaus 3	Thune	1970-1999	StUA Bielefeld	58,52
81	Nichtinghausen	Henne	1961-2001	Ruhrverband	37,17
82	Niederaden	Seseke	1965-2000	StUA Lippstadt	265
83	Niederpleis	Pleisbach	1975-2001	StUA Köln	87,2
84	Niederschedden 2	Sieg	1990-2000	StUA Siegen	431
85	Oberagger	Steinagger	1960-2001	StUA Köln	12,5
86	Oberahle	Else	1976-2001	StUA Minden	284,56
87	Oberkirchen	Lenne	1961-2000	StUA Lippstadt	37,6
88	Oedt	Niers	1960-2001	StUA Krefeld	333,08
89	Olpe	Olpe	1967-2001	Ruhrverband	34,61
90	Ottbergen	Nethe	1978-2000	StUA Bielefeld	431
91	Overath	Agger	1984-2001	Aggerverband	454
92	Overhagen	Gieseler	1989-2000	StUA Lippstadt	153,6
93	Paderborn 2	Rotebach	1959-1999	StUA Bielefeld	27,3
94	Pannermühle	Schwalm	1960-2001	StUA Krefeld	130,19
95	Ratingen	Angerbach	1960-2001	StUA Düsseldorf	63,23
96	Ratingen/Schwarzbach	Schwarzbach	1989-1998	BRW	32,78
97	Raumland	Odebom	1960-2000	StUA Siegen	84,7
98	Rheda	Ems	1960-2000	StUA Bielefeld	342,62
99	Rheine	Ems	1961-2000	BAFG	3696
100	Rüblinghausen	Bigge	1967-2001	Ruhrverband	86
101	Rüthen 1	Glenne	1960-1999	StUA Lippstadt	66
102	Schembeck 1	Lippe	1965-2001	STUA Duisburg	4783,01
103	Schönau	Ertf	1972-2001	Ertverband	31,76
104	Schwaney	Ellerbach	1964-1999	StUA Bielefeld	17,7
105	Senden-Schölling	Stever	1976-2000	StUA Münster	114,78
106	Siegburg Kall	Sieg	1960-2001	StUA Köln	1885
107	Stadtlahn	Berkel	1960-1999	StUA Herten	231,34
108	Steinhorst	Ems	1975-1992	StUA Bielefeld	98,7
109	Stephansohl	Volme	1971-1997	StUA Hagen	95,6
110	Stöcken	Lingese	1984-2001	Wupperverband	4,63
111	Sythen 1	Halteimer-Mühlenbach	1960-1999	StUA Herten	236,42
112	Sythen 2	Sandbach	1960-1999	StUA Herten	39,52
113	Temmingsmühle	Steinfurter Aa	1960-2000	StUA Münster	115,8
114	Unterpilghausen	Kleine Dhünn	1988-2001	Wupperverband	10,63
115	Völlinghausen	Möhne	1961-2001	Ruhrverband	293,46
116	Wahnbach	Wahnbach	1981-1997	WTV	44,7
117	Weeze	Niers	1980-2001	StUA Krefeld	1005,05
118	Weidenau	Sieg	1960-2000	StUA Siegen	134
119	Weilerswist	Swistbach	1972-2001	StUA Köln	285
120	Weine	Alme	1951-2000	StUA Bielefeld	143,8

Tab. 28 (Fortsetzung): Für die Kalibrierung der Baseflow Indizes verwendete Pegelstationen.

ID	Messstelle	Gewässer	Zeitraum	Betreiber	AEO
121	Wendbach	Wendbach	1981-1997	WTV	8,27
122	Wenholthausen	Wenne	1984-1999	StUA Lippstadt	184
123	Westladbergen	Glane (Mühlenbach)	1984-2000	StUA Münster	181,14
124	Westtünnen	Ahse	1966-2000	StUA Lippstadt	415,2
125	Wettringen B70	Steinfurter Aa	1976-2000	StUA Münster	175,07

1. Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung

IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996
herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten
ISBN 3-89336-205-3

2. Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft

Ein Beitrag zum Klimaschutz
Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze (1997), 138 Seiten
ISBN 3-89336-206-1

3. Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien

IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997
herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten
ISBN 3-89336-207-X

4. IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken

IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“
H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten
ISBN 3-89336-214-2

5. Politikszenerarien für den Klimaschutz

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten
ISBN 3-89336-215-0

6. Politikszenerarien für den Klimaschutz

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten
ISBN 3-89336-216-9

7. Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien

IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 1 „Modelle“
P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen, M. Walbeck, J.-Fr. Hake (1998), VI, 276 Seiten
ISBN 3-89336-220-7

8. Politikszenerarien für den Klimaschutz

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 3. Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur
Emissionsminderung
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1998), VIII, 95 Seiten
ISBN 3-89336-222-3

9. Horizonte 2000

6. Wolfgang-Ostwald-Kolloquium der Kolloid-Gesellschaft
3. Nachwuchstage der Kolloid- und Grenzflächenforschung
Kurzfassungen der Vorträge und Poster
zusammengestellt von F.-H. Haegel, H. Lewandowski, B. Krahl-Urban (1998), 150 S.
ISBN 3-89336-223-1

10. Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung

von M. Kleemann, F. van Erp, R. Kehrbaum (1998), 59 Seiten
ISBN 3-89336-224-X

11. Policy Scenarios for Climate Protection

Study on Behalf of the Federal Environmental Agency
Volume 4. Methodological Guideline for Assessing the Impact of Measures for
Emission Mitigation
edited by G. Stein, B. Strobel (1998), 103 pages
ISBN 3-89336-232-0

12. Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe

Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 1.
von R. Kunkel, F. Wendland (1998), 110 Seiten
ISBN 3-89336-233-9

13. Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes

Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 2.
von F. Wendland, R. Kunkel (1999), 166 Seiten
ISBN 3-89336-236-3

**14. Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und inter-
nationalen Verpflichtungen**

IKARUS-Workshop am 27.05.1998, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad Godesberg.
Proceedings
herausgegeben von E. Läge, P. Schaumann, U. Fahl (1999), ii, VI, 146 Seiten
ISBN 3-89336-237-1

- 15. Satellitenbildauswertung mit künstlichen Neuronalen Netzen zur Umweltüberwachung**
Vergleichende Bewertung konventioneller und Neuronaler Netzwerkalgorithmen und Entwicklung eines integrierten Verfahrens
von D. Klaus, M. J. Canty, A. Poth, M. Voß, I. Niemeyer und G. Stein (1999), VI, 160 Seiten
ISBN 3-89336-242-8
- 16. Volatile Organic Compounds in the Troposphere**
Proceedings of the Workshop on Volatile Organic Compounds in the Troposphere held in Jülich (Germany) from 27 - 31 October 1997
edited by R. Koppmann, D. H. Ehhalt (1999), 208 pages
ISBN 3-89336-243-6
- 17. CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das CO₂-Minderungsprogramm der KfW**
Eine modellgestützte Wirkungsanalyse
von M. Kleemann, W. Kuckshinrichs, R. Heckler (1999), 29 Seiten
ISBN 3-89336-244-4
- 18. Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben**
Symposium und Podiumsdiskussion, Izmir, Türkei, 28.-30.05.1998.
Konferenzbericht
herausgegeben von A. Özdamar, H.-G. Groehn, K. Ülgen (1999), IX, 245 Seiten
ISBN 3-89336-247-9
- 19. Das Weg-, Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 3.
von R. Kunkel, F. Wendland (1999), 122 Seiten
ISBN 3-89336-249-5
- 20. Politikszenerarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1999), XII, 201 Seiten
ISBN 3-89336-251-7
- 21. Klimaschutz durch energetische Sanierung von Gebäuden. Band 1**
von J.-F. Hake, M. Kleemann, G. Kolb (1999), 216 Seiten
ISBN 3-89336-252-2

22. Electroanalysis

Abstracts of the 8th International Conference held from 11 to 15 June 2000 at the University of Bonn, Germany
edited by H. Emons, P. Ostapczuk (2000), ca. 300 pages
ISBN 3-89336-261-4

23. Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050

von M. Kleemann, R. Heckler, G. Kolb, M. Hille (2000), II, 94 Seiten
ISBN 3-89336-262-2

24. Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums

von H.-G. Schwarz (2000), XIV, 127 Seiten
ISBN 3-89336-264-9

25. Klimawirkungsforschung auf dem Prüfstand

Beiträge zur Formulierung eines Förderprogramms des BMBF
Tagungsband des Workshop „Klimaforschung“, Jülich, vom 02. bis 03.12.1999
von J.-Fr. Hake, W. Fischer (2000), 150 Seiten
ISBN 3-89336-270-3

26. Energiezukunft 2030

Schlüsseltechnologien und Techniklinien
Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000 am 2./3. Mai 2000
herausgegeben von U. Wagner, G. Stein (2000), 201 Seiten
ISBN 3-89336-271-1

27. Der globale Wasserkreislauf und seine Beeinflussung durch den Menschen

Möglichkeiten zur Fernerkundungs-Detektion und -Verifikation
von D. Klaus und G. Stein (2000), 183 Seiten
ISBN 3-89336-274-6

28. Satelliten und nukleare Kontrolle

Änderungsdetektion und objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation von Multispektralaufnahmen zur Unterstützung der nuklearen Verifikation
von I. Niemeyer (2001), XIV, 206 Seiten
ISBN 3-89336-281-9

29. Das hydrologische Modellsystem J2000

Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten
von P. Krause (2001), XIV, 247 Seiten
ISBN 3-89336-283-5

- 30. Aufwands- und ergebnisrelevante Probleme der Sachbilanzierung**
von G. Fleischer, J.-Fr. Hake (2002), IV, 64 Blatt
ISBN 3-89336-293-2
- 31. Nachhaltiges Management metallischer Stoffströme**
Indikatoren und deren Anwendung
Workshop, 27.-28.06.2001 im Congresszentrum Rolduc, Kerkrade (NL)
herausgegeben von W. Kuckshinrichs, K.-L. Hüttner (2001), 216 Seiten
ISBN 3-89336-296-7
- 32. Ansätze zur Kopplung von Energie- und Wirtschaftsmodellen zur Bewertung zukünftiger Strategien**
IKARUS-Workshop am 28. Februar 2002, BMWi, Bonn. Proceedings
herausgegeben von S. Briem, U. Fahl (2003), IV, 184 Seiten
ISBN 3-89336-321-1
- 33. TRACE. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**
Volume 1: Proceedings of the Dendrosymposium 2002,
April 11th - 13th 2002, Bonn/Jülich, Germany
edited by G. Schleser, M. Winiger, A. Bräuning et al., (2003), 135 pages, many partly coloured illustrations
ISBN: 3-89336-323-8
- 34. Klimaschutz und Beschäftigung durch das KfW-Programm zur CO₂-Minderung und das KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramm**
von M. Kleemann, R. Heckler, A. Kraft u. a., (2003), 53 Seiten
ISBN: 3-89336-326-2
- 35. Klimaschutz und Klimapolitik: Chancen und Herausforderungen**
Beiträge aus der Forschung
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. L. Hüttner (2003), III, 231 Seiten
ISBN: 3-89336-327-0
- 36. Umweltschutz und Arbeitsplätze, angestoßen durch die Tätigkeiten des Schornsteinfegerhandwerks**
Auswertung von Schornsteinfeger-Daten
von M. Kleemann, R. Heckler, B. Krüger (2003), VII, 66 Seiten
ISBN: 3-89336-328-9
- 37. Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen**
von H. Bogena, R. Kunkel, T. Schöbel, H. P. Schrey, F. Wendland (2003), 148 Seiten
ISBN: 3-89336-329-7