

GeoBerichte 10



LANDESAMT FÜR
BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE



Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Ein Vergleich der Methoden
Dörhöfer & Josopait und GROWA06V2



Niedersachsen



GeoBerichte 10

Landesamt für
Bergbau, Energie und Geologie

Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Ein Vergleich der Methoden
Dörhöfer & Josopait und GROWA06V2

DENNIS LEMKE & JÖRG ELBRACHT

Hannover 2008

Impressum

Herausgeber: © Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Stilleweg 2
30655 Hannover
Tel. (0511) 643-0
Fax (0511) 643-2304

Download unter www.lbeg.niedersachsen.de

2. Auflage.

Version: 15.09.2010

Redaktion: Ricarda Nettelmann
e-mail: bodenkundlicheberatung@lbeg.niedersachsen.de

Titelbild: „Hummocky“ – Moräne der jüngeren Dryas-Vereisung, Glen Torridon (Schottland),
Foto: J. Elbracht (LBEG).

ISSN 1864–6891 (Print)

ISSN 1864–7529 (digital)

DOI 10.48476/geober_10_2008

GeoBer.	10	S. 3 – 61	19 Abb.	24 Tab.	Anh.	Hannover 2008
---------	----	-----------	---------	---------	------	---------------

Grundwasserneubildung in Niedersachsen – Ein Vergleich der Methoden Dörhöfer & Josopait und GROWA06V2 –

DENNIS LEMKE & JÖRG ELBRACHT

Kurzfassung

Die Grundwasserneubildung ist als hydrogeologische Kenngröße in vielen Bereichen der Wasserwirtschaft von grundlegender Bedeutung. Zur Bestimmung der regionalen Grundwasserneubildung gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren (HAAS 1987, SCHRÖDER & WYRWICH 1990, OTTO 1992, DÖRHÖFER et al. 2001), deren Ergebnisse z. T. stark voneinander abweichen (BIERSTEDT 1991, GROSSMANN 1997).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Verfahren DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) und GROWA06V2 verglichen und auf der Basis von Pegel- und Lysimeterdaten geprüft. Als Grundlage für die Berechnung der Grundwasserneubildung dient für beide Verfahren die folgende vereinfachte Gleichung (Gl. 1):

$$GW_{\text{neu}} = N - ET_{\text{real}} - A_o \text{ [mm/a]} \quad (\text{Gl. 1})$$

Demnach ergibt sich die Grundwasserneubildung (GW_{neu}) als Restglied aus der Differenz von Niederschlag (N), Verdunstung (ET_{real}) und oberirdischem Abfluss (A_o).

Die verwendeten Lysimeterdaten (SCHÄFER 2007) stammen von sechs in Niedersachsen verteilten Lysimeteranlagen. Für die Standorte der Lysimeter wurden die von den Lysimetern ermittelten mittleren Sickerwasserraten mit den von den geprüften Verfahren berechneten mittleren Grundwasserneubildungsraten verglichen. Da das Ergebnis nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) bzw. nach GROWA06V2 für jeweils drei Standorte am besten mit den gemessenen Sickerwasserraten übereinstimmt, lässt sich hieraus kein Schluss auf die Qualität der Berechnungsverfahren ziehen.

Im Rahmen der Auswertung von Pegeldaten wurden insgesamt zwölf Einzugsgebiete in Niedersachsen betrachtet. Durch Pegelmessungen sind für diese Einzugsgebiete sowohl die mittlere Grundwasserneubildungsrate als auch der mittlere Gesamtabfluss bekannt. Diese ermittelten Größen wurden mit den berechneten Größen verglichen. Der Vergleich zeigt, dass das Modell GROWA06V2 im Lockergestein und DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) im Festgestein die geringsten Abweichungen für die Grundwasserneubildungsraten aufweist.

Die betrachteten Verfahren unterscheiden sich deutlich in Anwendbarkeit sowie Vielfalt, Auflösung und Aktualität der Eingangsdaten. Der direkte Vergleich der Verfahren zeigt, dass es keine systematischen Abweichungen aufgrund von Geologie oder Bodentyp gibt. Da die Verfahren für große Einzugsgebiete ausgelegt sind, müssen die Pegelbetrachtungen als maßgebliches Kriterium für die Qualität der Ergebnisse der Verfahren angesehen werden. Die Tatsache, dass sich die Ergebnisse der Auswertungen der Pegeldaten nicht mit denen der Auswertungen der Lysimeterdaten decken, zeigt, dass Punktwerte, wie sie Lysimeter liefern, nur eingeschränkt für diese Verfahrensbewertung geeignet sind.

Die Ergebnisse nach GROWA06V2 zeigen im Mittel eine Abweichung von ca. +/-20 mm/a von Werten, die auf der Basis von Pegelmessungen ermittelt wurden. Daher ist eine Einteilung der berechneten Grundwasserneubildung in Stufen mit einer Spanne von mindestens 25 mm/a sinnvoll.

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Grundwasserneubildung – Begriffe und Definitionen	5
1.2	Bedeutung der Grundwasserneubildung in der Praxis und Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate.....	6
1.3	Methoden zur flächendeckenden Ermittlung der Grundwasserneubildung in Niedersachsen	7
2	Grundlagen	7
2.1	Grundwasserneubildung in Niedersachsen	7
2.2	Methodenbeschreibung Dörhöfer & Josopait	11
2.2.1	Grundlagen	11
2.2.2	Eingangsdaten	11
2.2.3	Verteilung der A/A_0 -Quotienten.....	13
2.2.4	Berechnung der Grundwasserneubildung	13
2.2.5	Ergänzungen und Änderungen.....	16
2.2.6	Darstellung der mittleren Grundwasserneubildungsrate nach Dörhöfer & Josopait.....	17
2.2.7	Zeitreihe 1961–1990	19
2.3	Methodenbeschreibung GROWA06V2.....	21
2.3.1	Grundlagen	21
2.3.2	Eingangsdaten	21
2.3.3	Verteilung der Basisabflusswerte und Berechnung der Grundwasserneubildungsrate	23
2.3.4	Darstellung der mittleren Grundwasserneubildungsrate nach GROWA06V2	26
3	Methodenvergleich	28
3.1	Benötigte Eingangsdaten und Praktikabilität der Methoden	28
3.1.1	Methode Dörhöfer & Josopait	28
3.1.2	Methode GROWA06V2.....	29
3.2	Unterschiede in den Ergebnissen	29
3.2.1	Geologie	29
3.2.2	Bodentyp	32
3.3	Auswirkung der Änderung von Abflussquotient, Evapotranspiration und Niederschlag auf die berechnete Grundwasserneubildungsrate.....	34
4	Vergleich mit anderen Verfahren	35
4.1	Lysimeter.....	35
4.1.1	Allgemeines und Durchführung.....	35
4.1.2	Methodische Probleme und Unsicherheiten beim Vergleich mit Lysimeterdaten.....	38
4.1.3	Ergebnisse	39
4.1.4	Diskussion.....	39
4.2	Pegeldaten	40
4.2.1	Allgemeines und Durchführung.....	40
4.2.2	Probleme und Unsicherheiten.....	43
4.2.3	Ergebnisse	44
4.2.4	Diskussion.....	46
5	Schlussbetrachtung	48
6	Literaturverzeichnis	49
7	Anhang	53

1 Einleitung

1.1 Grundwasserneubildung – Begriffe und Definitionen

Die Gesamtheit des Wassers, also in fester, flüssiger oder gasförmiger Form, nimmt an dem so genannten hydrologischen Zyklus teil (HÖLTING 1996). Dieser bezeichnet nach DIN 4049-3 (DIN 1994) eine „ständige Folge der Zustands- und Ortsveränderung in Form von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung“, und lässt sich vereinfacht durch folgende Formel (Gl. 2) beschreiben (HÖLTING 1996):

$$N = V + A \text{ [mm/a]} \quad (\text{Gl. 2})$$

Unter Niederschlag (N) versteht man aus der Lufthülle ausgeschiedenes Wasser (HÖLTING 1996). Dieser Niederschlag kann in Form von Regen, Schnee, Hagel oder Nebel die Erdoberfläche erreichen (BALKE et al. 2000). Die Verdunstung (V, Evaporation) bezeichnet den physikalischen Übergang von flüssigem in dampfförmiges Wasser (BALKE et al. 2000), bezogen auf eine unbewachsene Fläche (HÖLTING 1996). Der Abfluss (A) bildet den Teil des Niederschlags, der nach seinem Auftreffen auf die Erdoberfläche nicht verdunstet oder gespeichert wird (MATTHESS & UBELL 2003).

Betrachtet man aber bewachsene Flächen, so ist der Begriff der Evapotranspiration zweckmäßig, da hier zusätzlich zur Evaporation auch die Transpiration der Pflanzen berücksichtigt wird (HÖLTING 1996). Gemäß den unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften kann der Abfluss in die Komponenten „oberirdischer Abfluss“ (A_o , auch Überlandabfluss oder Direktabfluss genannt), „unterirdischer Abfluss“ (A_u , auch Grundwasserabfluss oder grundwasserbürtiger Abfluss genannt) und „Zwischenabfluss“ (auch Interflow genannt) unterteilt werden, wobei zwischen diesen Abflussarten jedoch nicht immer eine eindeutige Trennung möglich ist. Der oberirdische Abfluss bezeichnet den Teil des Abflusses, der an der Erdoberfläche, dem morphologischen Gefälle fol-

gend, einem Wasserlauf zufließt. Unter dem unterirdischen Abfluss versteht man den Teil des Abflusses, der in den Boden infiltriert und das Grundwasser erreicht (BALKE et al. 2000). Der Zwischenabfluss bezeichnet den Teil des Abflusses, der in der ungesättigten Zone meist hangparallel fließt und mit einer zeitlichen Verzögerung in einen Vorfluter austritt (MATTHESS & UBELL 2003). Der Zwischenabfluss kann weiterhin in den unmittelbaren und den verzögerten Zwischenabfluss unterteilt werden, wobei der unmittelbare Anteil dem oberirdischen Abfluss und der verzögerte Anteil dem unterirdischen Abfluss zugeordnet wird (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990). Die Modelle GROWA06V2 und DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) machen keine Angaben über die Zuordnung der Zwischenabflussanteile. Daher wird im Folgenden nicht näher auf den Zwischenabfluss eingegangen.

Die Gleichung 2 kann also wie folgt modifiziert werden (HÖLTING 1996):

$$N = ET + A_o + A_u \text{ [mm/a]} \quad (\text{Gl. 3})$$

Diese Gleichung gilt nur für die Betrachtung von längeren Zeiträumen. Bei kürzeren Zeiträumen müssten die Speicheränderung im Untergrund sowie jährliche Schwankungen des Niederschlags und der Verdunstung berücksichtigt werden (HÖLTING 1996, MATTHESS & UBELL 2003). Alle folgenden Betrachtungen beziehen sich auf längere Zeiträume, so dass Gleichung 3 gültig bleibt.

Nach DIN 4049-3 (DIN 1994) bezeichnet die Grundwasserneubildung den Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser zum Grundwasser. Somit ist der unterirdische Abfluss bei längerfristigen Betrachtungen der Grundwasserneubildung gleichzusetzen (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1979). Als Grundwasser bezeichnet man nach DIN 4049-3 (DIN 1994) „unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird“. Abbildung 1 zeigt eine grafische Darstellung der Zusammenhänge der oben beschriebenen Vorgänge.

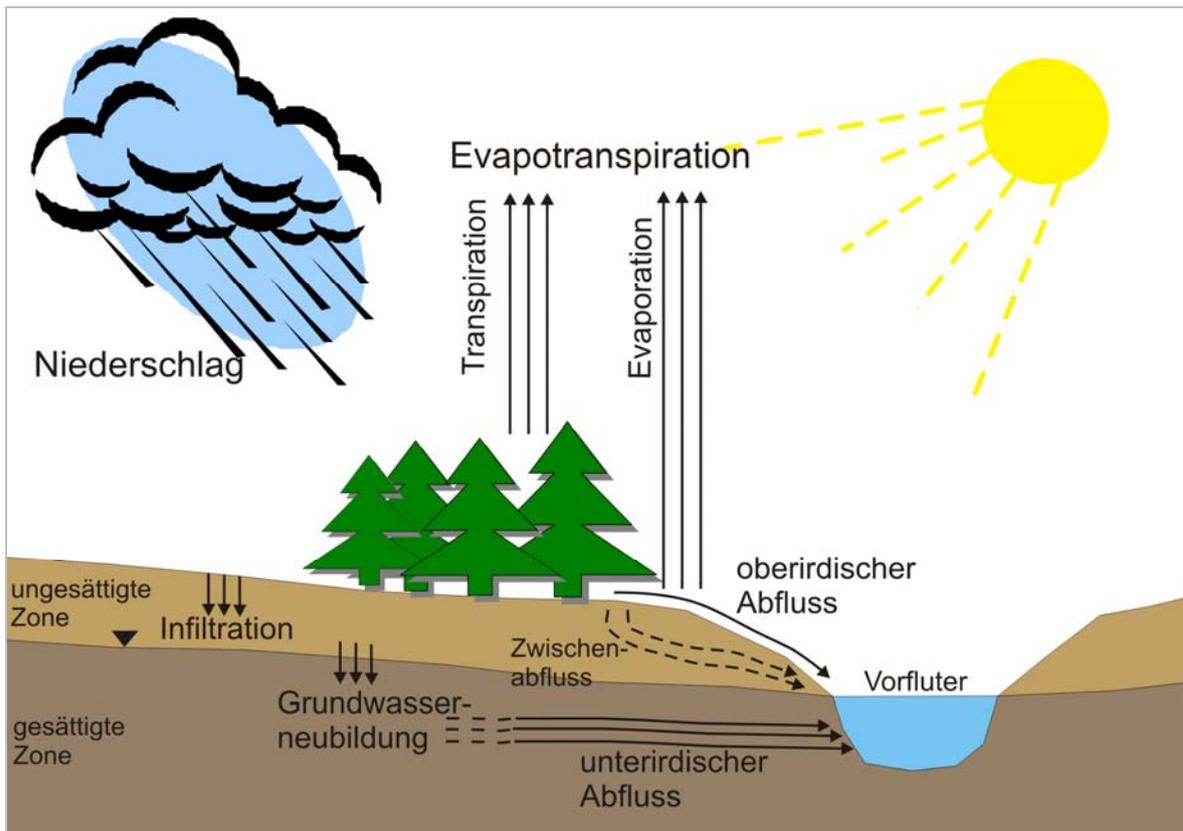


Abb. 1: Wichtige Vorgänge zur Grundwasserneubildung (nach MATTHESS & UBELL 2003, verändert).

Die Grundwasserneubildungsrate wird maßgeblich durch Faktoren wie Boden- bzw. Gesteinsart, Relief und Grundwasserflurabstand beeinflusst (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990). Auch anthropogene Maßnahmen können hier eine Rolle spielen (MATTHESS & UBELL 2003).

1.2 Bedeutung der Grundwasserneubildung in der Praxis und Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate

Die Kenntnis von flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate ist eine wichtige Voraussetzung für

- die Abgrenzung von Grundwasservorranggebieten und Auswahl von Bohrpunkten

zur Grundwassererschließung (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980, BALKE et al. 2000),

- die Auswahl von Deponiestandorten (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980),
- die Ermittlung des Grundwasserdargebots und der möglichen Fördermenge eines Brunnens (BALKE et al. 2000, MATTHESS & UBELL 2003) und
- die Charakterisierung und Steuerung von (Schad-)Stoffbewegungen (BALKE et al. 2000).

Für die Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Durch Auswertung von Saugspannungs- oder Wassergehaltsgradienten kann die Wasserbewegung durch die ungesättigte Bodenzone bestimmt werden (MATTHESS & UBELL 2003). Auch Lysimeter liefern

Sickerwasserraten für ihren jeweiligen Standort (BALKE et al. 2000).

- Ist das Einzugsgebiet eines Pegels bekannt, so kann aus den Pegeldaten durch Abtrennung des unterirdischen Abflusses vom Gesamtabfluss (z. B. nach WUNDT 1958) die mittlere Grundwasserneubildungsrate dieses Einzugsgebietes bestimmt werden (MATTHESS & UBELL 2003).
- Die mittlere Grundwasserneubildungsrate kann indirekt als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung (Gl. 3) ermittelt werden. Dies ist nur möglich, wenn außer dem unterirdischen Abfluss alle übrigen Komponenten bekannt sind (BALKE et al. 2000, MATTHESS & UBELL 2003).
- Sind der Entnahmereich und die Entnahmemenge eines Wasserwerks bekannt, so lässt sich daraus der langfristig nutzbare Anteil der Grundwasserneubildung ableiten (BALKE et al. 2000).
- Bei Kenntnis von Grundwasseroberfläche, Transmissivität, Speicherkoeffizienten, Grundwasserentnahmen und –anreicherungen sowie Rand- und Anfangsbedingungen können Grundwassermodelle durch verschiedene mathematische Berechnungen die Grundwasserneubildungsrate eines Gebietes bestimmen (HÖLTING 1996).

1.3 Methoden zur flächendeckenden Ermittlung der Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Daten zur Grundwasserneubildung wurden am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) bis etwa 2003 ausschließlich mit dem Verfahren nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) ermittelt. Dabei wurden Niederschlagszeitreihen der Jahre 1931–1960 verwendet. Die Darstellung erfolgte graphisch mit handgezeichneten Karten. Grundwasserneubildungsdaten, die mit dem Verfahren nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) unter Verwendung von Niederschlagszeitreihen der Jahre 1961–1990 ermittelt wurden, bietet das LBEG seit 2008 an.

Mit dem GROWA-Modell wurde vom Forschungszentrum Jülich ein GIS-basiertes Modell zur Ermittlung von mittleren Grundwasserneubildungsraten vorgestellt und als GROWA-98 (DÖRHÖFER et al. 2001) für das niedersäch-

sische Gebiet angepasst (DÖRHÖFER et al. 2001). Auf Basis dieses Modells wurde im LBEG das Modell GROWA06 (Version 2) mit differenzierteren Daten entwickelt.

Im Folgenden werden die zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Verfahren Dörhöfer & Josopait und GROWA06V2 miteinander verglichen, und es werden mit Hilfe von Pegel- und Lysimeterdaten Aussagen über die Qualität der Modellergebnisse getroffen.

2 Grundlagen

2.1 Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Niedersachsen umfasst eine Fläche von etwa 47 500 km² und ist damit das zweitgrößte Bundesland Deutschlands. Durch verschiedene geologische Prozesse formte sich hier im Laufe der Zeit eine Landschaft mit zum Teil sehr unterschiedlichen Ausprägungen. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die naturräumlichen Großlandschaften in Niedersachsen. Für die Einteilung dieser Großlandschaften dient die nutzungsdifferenzierte Bodenkundliche Übersichtskarte im Maßstab 1 : 50 000 (BÜK 50, LBEG 2008c) als Vorlage, die auch für das Verfahren GROWA06V2 für verschiedene Parameter als Eingangsdatensatz herangezogen wurde.

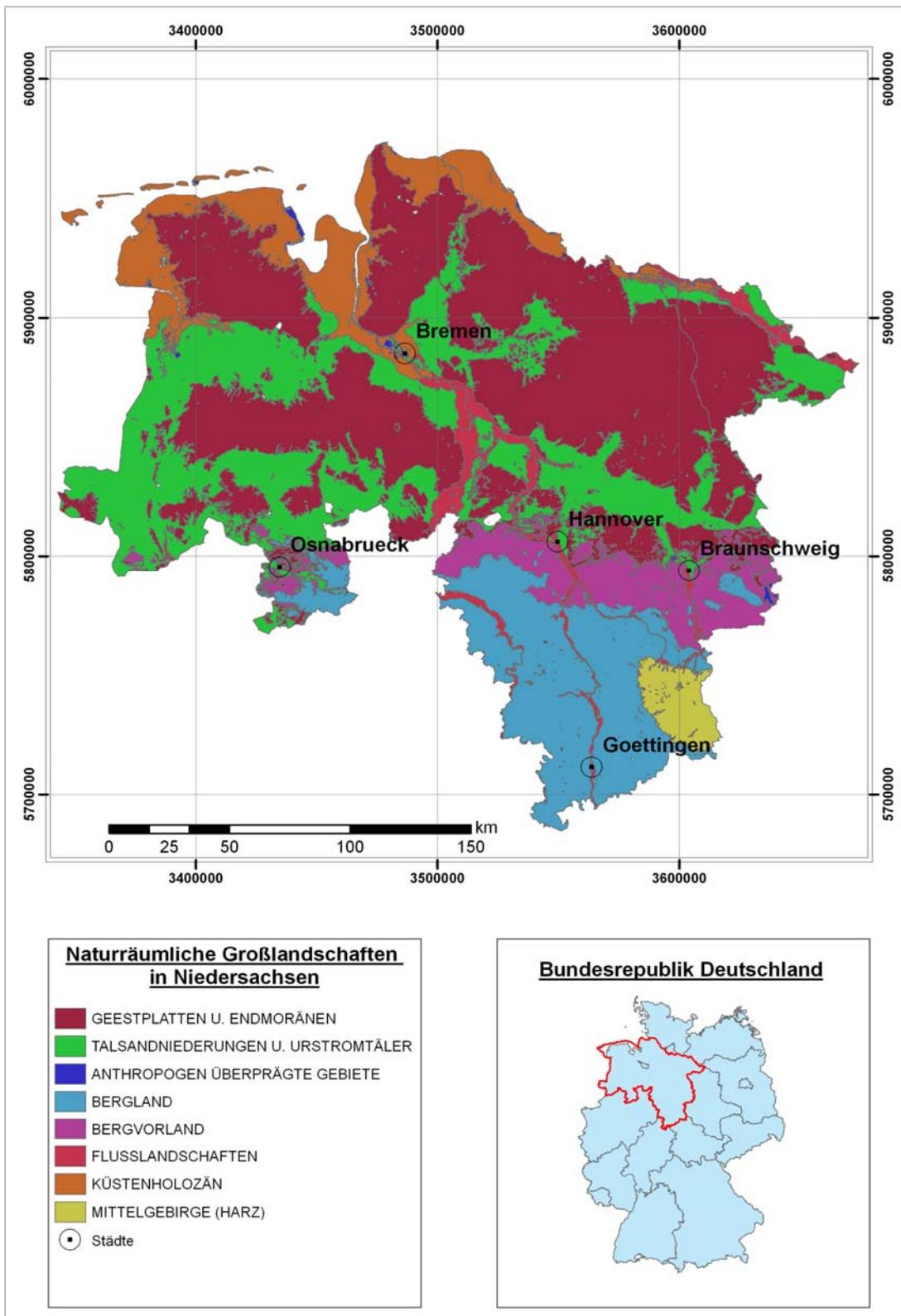


Abb. 2: Darstellung der naturräumlichen Großlandschaften in Niedersachsen, abgeleitet aus der BÜK 50 (LBEG 2008c).

Aufgrund der unterschiedlichen morphologischen und hydrologischen Eigenschaften sind zwischen den einzelnen naturräumlichen Großlandschaften auch unterschiedliche mittlere Grundwasserneubildungsraten zu erwarten. Tabelle 1 gibt Auskunft über Größe, mittleren Niederschlag, mittlere Hangneigung, Bewaldung und mittleren Festgesteinsanteil der naturräumlichen Großlandschaften. Angaben über den mittleren Grundwassertiefstand (aus LBEG 2008c) bis zu einer Tiefe von 1,80 m sind in Abbildung 3 dargestellt.

Tab. 1: Wichtige Kenngrößen der naturräumlichen Großlandschaften in Niedersachsen.

Quellen: BÖHNER (2004: mittlerer Niederschlag), LGN (2008a: mittlere Hangneigung), STATISTISCHES BUNDESAMT (1997: Bewaldung), LBEG (2008a: mittlerer Festgesteinsanteil, 2008c: naturräumliche Großlandschaften).

	Größe des Gebietes	mittlerer Niederschlag (1961–1990)	mittlere Hangneigung	Bewaldung	Anteil Festgestein
Bergland	ca. 6 360 km ²	ca. 800 mm/a	ca. 4,5°	23 % Laubwald, 9 % Nadelwald, 5 % Mischwald	57 %
Bergvorland	ca. 3 240 km ²	ca. 650 mm/a	ca. 1°	8 % Laubwald, 2 % Nadelwald, 1 % Mischwald	ca. 23 %
Flusslandschaften	ca. 1 600 km ²	ca. 670 mm/a	<1°	1 % Laubwald, 2 % Nadelwald, 1 % Mischwald	ca. 3,5 %
Geestplatten und Endmoränen	ca. 19 700 km ²	ca. 740 mm/a	<1°	2 % Laubwald, 19 % Nadelwald, 2 % Mischwald	<1 %
Talsandniederungen und Urstromtäler	ca. 11 600 km ²	ca. 720 mm/a	<1°	2 % Laubwald, 10 % Nadelwald, 1 % Mischwald	<1 %
Harz	ca. 830 km ²	ca. 1 180 mm/a	ca. 11°	16 % Laubwald, 60 % Nadelwald, 13 % Mischwald	ca. 93 %
Küstenholozän	ca. 4 200 km ²	ca. 770 mm/a	ca. 1°	<1 % Nadelwald, <1 % Laubwald, <1 % Mischwald	<1 %

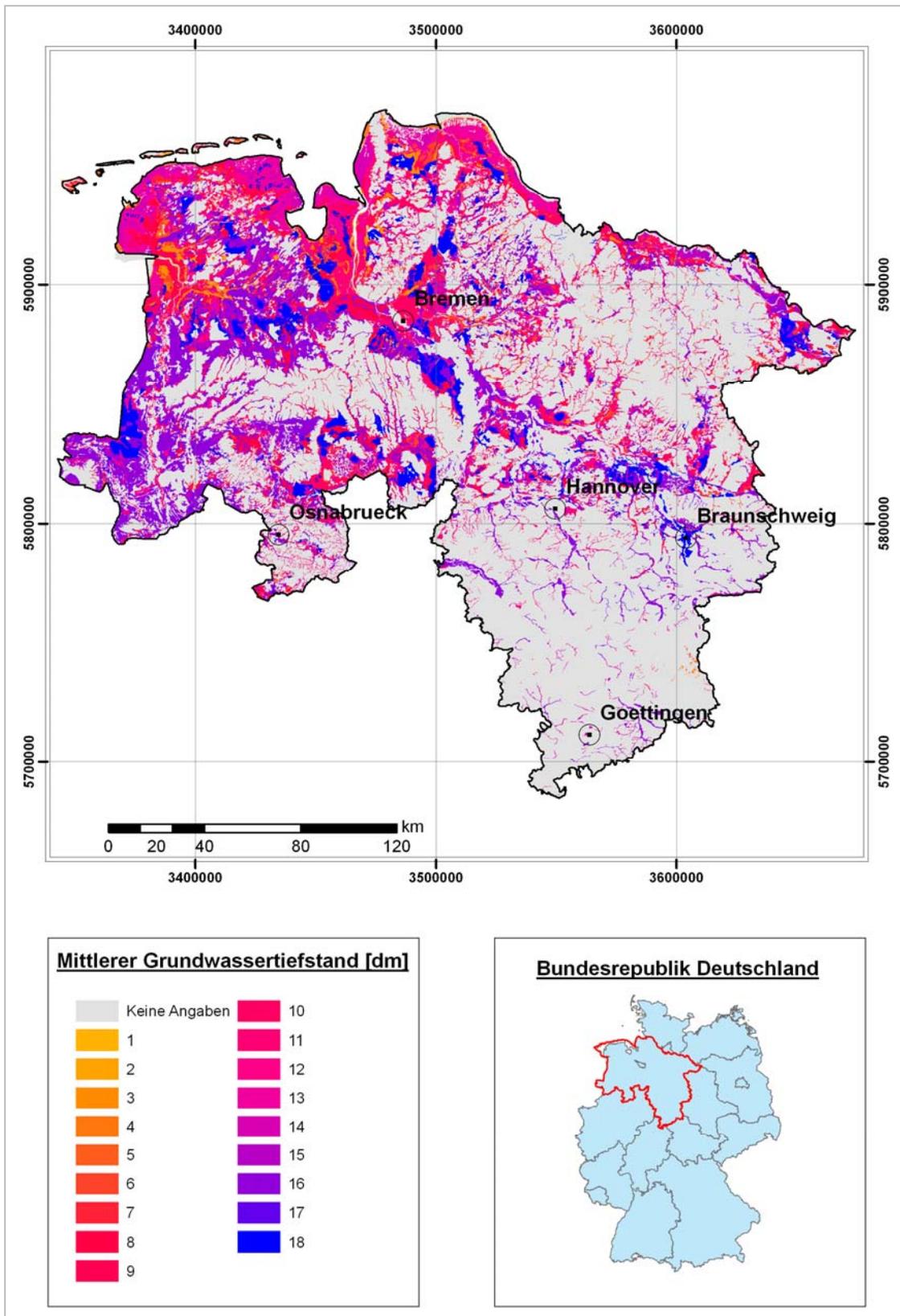


Abb. 3: Mittlerer Grundwassertiefstand in Niedersachsen (aus der BÜK 50, LBEG 2008c).

Hohe Hangneigungen sowie niedrige Grundwasserflurabstände begünstigen den oberirdischen Abfluss, wohingegen im Flachland und bei grundwasserfernen Standorten der größte Teil des Abflusses versickert (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980, BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990, BALKE et al. 2000). Eine dichte Bewaldung erhöht die Evapotranspiration und verringert damit den Abfluss (RENGER & WESSOLEK 1990, RENGER & WESSOLEK 1996). In Festgesteinsgebieten sind vor allem die Eigenschaften des Gesteins (zum Beispiel Schichteinfallen oder Klüftigkeit) bzw. der Gesteinsabfolgen für das Abflussverhalten ausschlaggebend (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990).

Im Harz sowie im übrigen Bergland Niedersachsens ist aufgrund der überwiegend hohen Hangneigungen zu erwarten, dass der oberirdische Abfluss deutlich höher als der unterirdische Abfluss ist, wobei im Harz der sehr hohe mittlere Niederschlag die Grundwasserneubildung gleichzeitig begünstigt. Für die grundwasserfernen Teile der überwiegend flachen Geest und für Bereiche des Berglands mit geringer Hangneigung gilt entsprechend der umgekehrte Fall. Im ebenfalls überwiegend flachen Gebiet des Küstenholozäns ist verstärkter oberirdischer Abfluss nur an grundwassernahen Standorten zu erwarten. Die Flusslandschaften weisen größtenteils niedrige Grundwasserflurabstände auf, so dass auch hier der oberirdische Abfluss begünstigt wird. Allerdings können in Niedersachsen die oben beschriebenen Faktoren selbst innerhalb der naturräumlichen Großlandschaften z. T. auf kleinstem Raum in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen. Daher ist für eine flächendifferenzierte Ausweisung der mittleren Grundwasserneubildungsrate eine Betrachtung in deutlich größerem Maßstab notwendig.

2.2 Methodenbeschreibung Dörhöfer & Josopait

2.2.1 Grundlagen

Dörhöfer und Josopait entwickelten bis 1980 eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung. Die folgende Methodenbeschreibung (Kap. 2.2.1. bis 2.2.4.) ist DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) entnommen. Das Modell wird nachstehend „Dörhöfer & Josopait“ genannt.

Das Verfahren sollte für den Maßstab 1 : 200 000 eine angemessene Genauigkeit erreichen. Das Ziel bestand darin, Informationen zur Lösung hydrogeologischer Fragestellungen bezüglich Brunnen- oder Deponiestandorten, flächenbezogener Grundwasserneubildungsrate oder zur Charakterisierung für Grundwasservorranggebiete zur Verfügung zu stellen.

2.2.2 Eingangsdaten

Als Grundlage der Berechnung der Grundwasserneubildung diente die Bodenkundliche Standortkarte i. M. 1 : 200 000 (BSK 200, LBEG 2008b). Zur Berechnung der Grundwasserneubildung waren die Kenngrößen Verdunstung (Evapotranspiration), Niederschlag, Grundwasserflurabstand und Relief notwendig.

Evapotranspiration

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Verdunstung von der mittleren Korngröße des Bodens wurde auf Lysimeterdaten zurückgegriffen. Dies geschah für die Nutzungsarten „Wald“, „Acker“ bzw. „Grünland“ und „unbewachsen“. Es ergab sich eine lineare Abhängigkeit, wobei die Verdunstung mit zunehmender Korngröße abnimmt (Abb. 4).

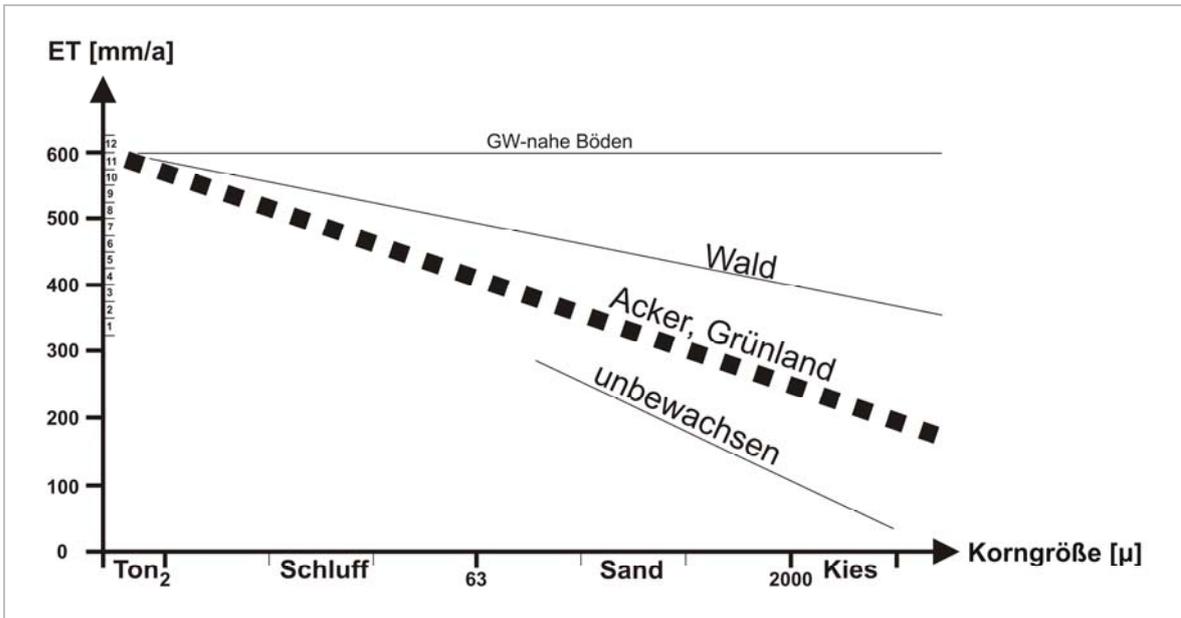


Abb. 4: Diagramm zur Ermittlung der Evapotranspirationsstufe (ET-Stufe) sowie ET-Rate aus Bodenart und Bewuchs (nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980).

Da für unbewachsene Böden nur Werte im Sand- bis Kiesbereich vorlagen, wurde diese Nutzungsart in der Methode nicht berücksichtigt. Wald- und Acker- bzw. Grünlandflächen konnten anhand von topographischen Karten identifiziert werden. Grundwassernahen Böden (Flurabstand von <math><0,8\text{ m}</math>) wurde unabhängig von der Nutzungsart die Verdunstungsrate $600\text{ mm/a}</math> zugeordnet, was in etwa der potenziellen Verdunstung unseres Klimabereiches entspricht.$

Die Verdunstung wurde sowohl im Locker- als auch im Festgesteinsbereich analog berechnet. Es wurde davon ausgegangen, dass sich auch in den Festgesteinsgebieten ein ausreichend mächtiger Verwitterungsboden ausgebildet hat.

Das Verfahren ging aufgrund von Pegel- und Lysimeteruntersuchungen davon aus, dass die Verdunstung weitgehend unabhängig vom Niederschlag ist.

Zur Veranschaulichung sind in Tabelle 2 Beispiele für typische Lockergesteinsarten in Niedersachsen aufgeführt (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1979):

Tab. 2: Verdunstungshöhen einiger typischer Lockergesteinsarten in Niedersachsen.

Bodenart	Verdunstung [mm/a]	
	Acker/Grünland	Wald
Sand	350–375	450–475
Löss	425–450	500–525
Geschiebelehm	450–475	500–525
Ton	575–600	600–625

Niederschlag

Grundsätzlich können mit dem Verfahren nach Dörhöfer & Josopait beliebige Niederschlagswerte verwendet werden, wobei die Verwendung von mittleren Niederschlagshöhen aus mehrjährigen Zeitreihen empfohlen wird.

Grundwasserflurabstand

Da die BSK 200 (LBEG 2008b) Angaben über die Grundwassernähe enthält, wurden damit die grundwassernahen Flächen ermittelt.

Relief

Daten über die Reliefenergie (maximaler Höhenunterschied pro km²) wurden einer Karte von BRÜNING (1961) entnommen.

2.2.3 Verteilung der A/A_u -Quotienten

Nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) war es notwendig, den Gesamtabfluss (A) in Oberflächenabfluss (A_o) und unterirdischen Abfluss (Grundwasserneubildung, A_u) zu unterteilen. Diese beiden Komponenten wurden miteinander durch die Bildung eines Abflussquotienten A/A_u in Beziehung gesetzt. Hierbei ging man allgemein in Fest- und Lockergesteinsgebieten unterschiedlich vor:

Festgestein

Für die Ermittlung des Verhältnisses Gesamtabfluss zu unterirdischem Abfluss wurden im Festgestein die Daten von insgesamt 13 Pegeln ausgewertet. Vom bekannten Gesamtabfluss wurde nach dem Verfahren nach WUNDT (1958) der MMnq (mehrjährig gemittelter monatlicher Niedrigwasserabfluss) abgetrennt, welcher der Grundwasserneubildung entspricht. So konnte dem Einzugsgebiet des Pegels ein mittlerer Abflussquotient zugeordnet werden. Es ergab sich eine deutliche Abhängigkeit des mittleren Abflussquotienten zur mittleren Reliefenergie des Pegelinzugsgebietes, wobei der Abflussquotient mit steigender Reliefenergie generell zunimmt.

Lockergestein

Der Abflussquotient für Gebiete im Lockergestein wurde anhand der Daten von 27 Pegeln ermittelt. Bei der Entwicklung der Methode fiel auf, dass der oberirdische Abflussanteil bei Pegelinzugsgebieten mit überwiegend niedrigem Grundwasserflurabstand generell einen höheren Anteil am Gesamtabfluss einnimmt, als bei Pegelinzugsgebieten mit überwiegend grundwasserfernen Bereichen. Hinzu kam, dass bindige Deckschichten den Direktabfluss begünstigen.

Für die Zuordnung des Abflussquotienten waren jedoch für viele Gebiete nicht ausschließlich Reliefenergie oder Grundwassereinfluss ausschlaggebend, vielmehr mussten diese Zusammenhänge oft gemeinsam betrachtet werden. Damit wurden den Einheiten der BSK 200 (LBEG 2008b) die Abflussquotienten 1,0; 1,5; 1,7; 2,0; 2,3 oder 2,5 zugeordnet (s. DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1979).

2.2.4 Berechnung der Grundwasserneubildung

Zunächst wurde die Evapotranspiration mit Hilfe der Abbildung 4 für jede Einheit der BSK 200 (LBEG 2008b) abgeschätzt und das Ergebnis einer Evapotranspirationsstufe (ET-Stufe) zugeordnet. Insgesamt gibt es zwölf ET-Stufen à 25 mm/a, wobei Stufe 1 einer Evapotranspiration von 225–250 mm/a, Stufe 2 einer Evapotranspiration von 250–275 mm/a usw. entspricht.

Die Ermittlung der Grundwasserneubildung konnte auf zwei Arten erfolgen, graphisch und rechnerisch:

Graphische Ermittlung der Grundwasserneubildung

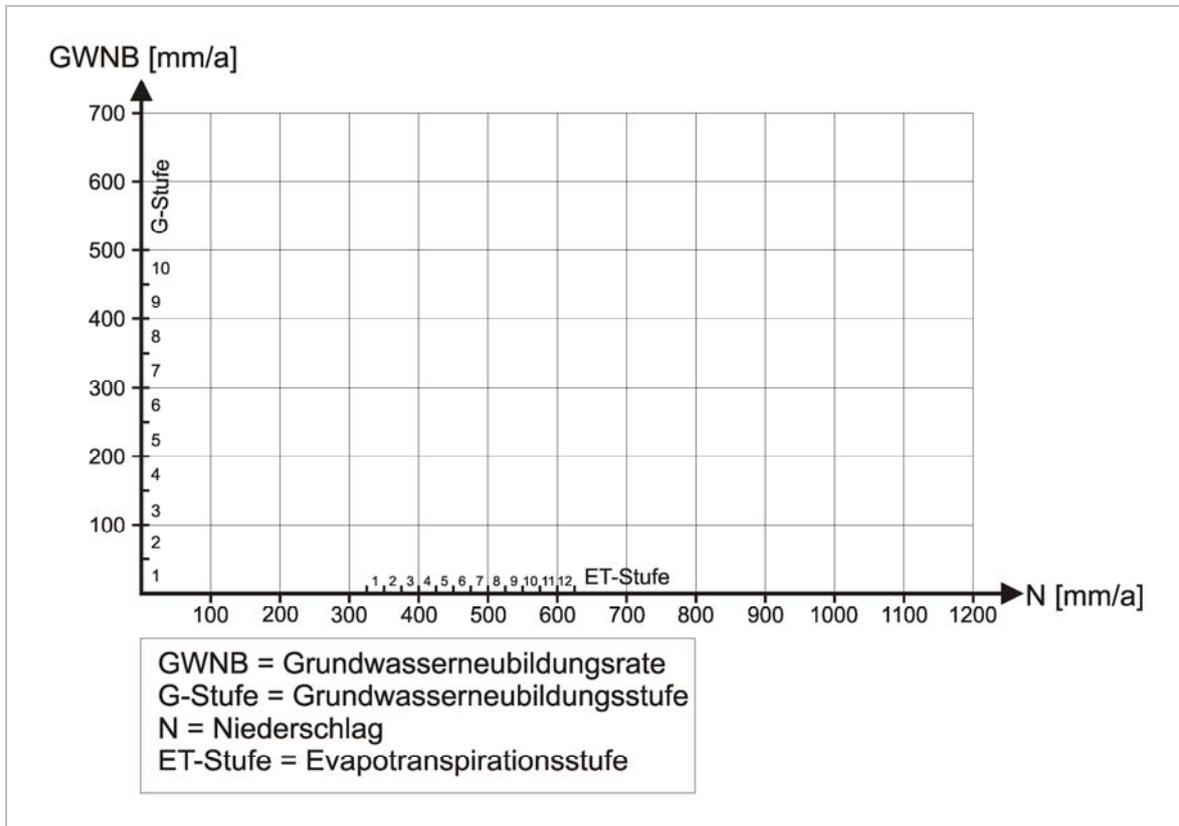


Abb. 5: Unterlage zur graphischen Ermittlung der mittleren Grundwasserneubildungsrate nach Dörhöfer & Josopait.

Die ET-Stufe der zu betrachtenden Fläche wurde auf der Abszisse der Abbildung 5 herausgesucht. Darauf legte man Abbildung 6 (auf Transparentpapier gedruckt), so dass die Abszissen übereinander lagen und der Pfeil in die Mitte der herausgesuchten ET-Stufe zeigte. Dann zog man eine gedachte Linie parallel zur Ordinate an der Stelle des mittleren Niederschlags der betrachteten BSK 200-Fläche (LBEG 2008b). Projizierte man den Schnittpunkt dieser gedachten Linie mit der Linie des entsprechenden A/A_u -Verhältnisses auf die Ordinate, so konnte man die Grundwasserneubildung als Stufe sowie als Rate ablesen.

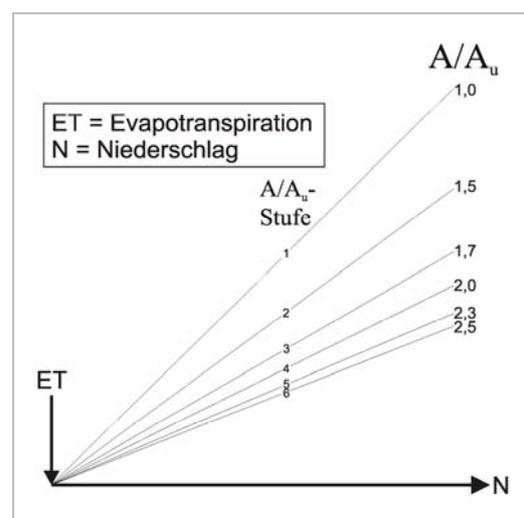


Abb. 6: Auflage zur graphischen Ermittlung der mittleren Grundwasserneubildungsrate nach Dörhöfer & Josopait.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für diese Vorgehensweise. Dargestellt ist die Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate für eine Fläche mit einem mittleren Niederschlag von 700 mm/a, einer Verdunstung von 350–375 mm/a (entspricht ET-Stufe 2) und einem A/A_u -Verhältnis von 1. Aus diesen Parametern resultiert die Grundwasserneubildungsstufe 7 (entspricht einer Grundwasserneubildungsrate von 300–350 mm/a).

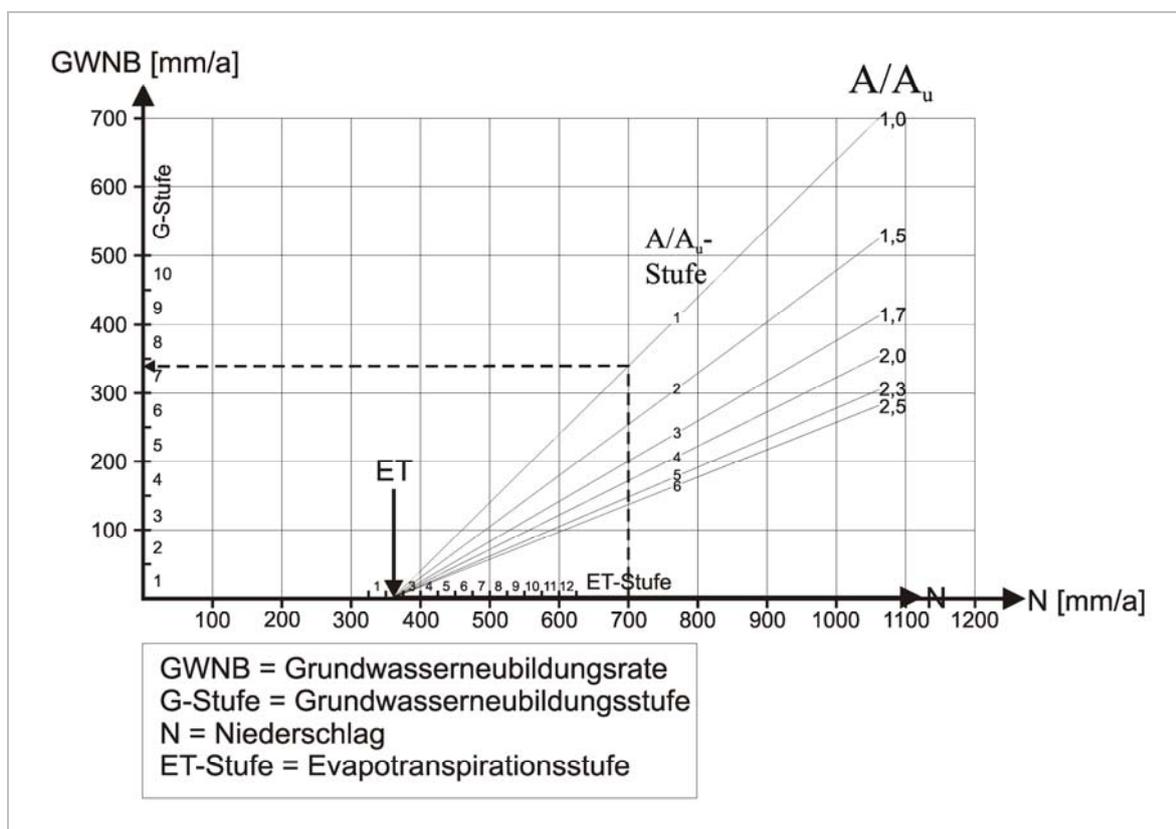


Abb. 7: Beispiel zur graphischen Ermittlung der Grundwasserneubildungsstufe nach Dörhöfer & Josopait.

Rechnerische Ermittlung der Grundwasserneubildung

HAERTLÉ (1983) gibt für die Berechnung der Grundwasserneubildungsstufe folgende Formel an (Gl. 4):

$$G = 1 + \frac{N - 312,5 - (ET \cdot 25)}{\frac{A}{A_u} \cdot 50} \quad [l] \quad (\text{Gl. 4})$$

- G = Stufe der Grundwasserneubildung,
- N = mittlerer jährlicher Niederschlag [mm],
- ET = Stufe der Evapotranspiration,
- A/A_u = Verhältnis von Gesamtabfluss zu Grundwasserabfluss.

Hierbei ist als Ergebnis die Zahl vor dem Komma ausschlaggebend, es wird nicht gerundet.

Bei bebauten Flächen, die an die Kanalisation angeschlossen sind, wurde die Grundwasserneubildungsrate zunächst wie für Acker- bzw. Grünlandstandorte berechnet. Davon wurde allerdings gemäß Tabelle 3 ein dem Grad der Versiegelung entsprechender Prozentsatz abgezogen (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1979):

Tab. 3: Anhaltspunkte für die Korrektur der Grundwasserneubildungsrate von versiegelten Flächen.

Bebauungsart	Versiegelung [%]
Stadtkern	>90
dichtes Wohngebiet	80
normales Wohngebiet	50
gelockertes Wohngebiet	20

2.2.5 Ergänzungen und Änderungen

HAERTLÉ (1983) untersuchte den niedersächsischen Bereich der unteren Elbe und kam hierbei zu dem Ergebnis, dass der Bereich zwischen dem Abflussverhältnis 1,0 und 1,5 zu groß erscheint. Daher wurde nach Absprache mit den Verfahrensentwicklern der Abflussquotient 1,2 hinzugenommen. Im Zuge dessen wurden die Abflussquotienten folgender BSK-Einheiten (LBEG 2008b) verändert (Tab. 4):

Tab. 4: Änderungen der A/A_u-Verhältnisse für die Einheiten der BSK 200 (LBEG 2008b) nach HAERTLÉ (1983).

	neues A/A _u -Verhältnis von 1,0 bzw. 1,2 (je nach Reliefenergie)	neues A/A _u -Verhältnis von 1,2 bzw. 1,5 (je nach Reliefenergie)	neues A/A _u -Verhältnis von 1,7
BSK-Einheiten (LBEG 2008b)	121	123	131
	122	124	231
	221	125	331
	222	223	
	321	224	
	322	225	
		323	
		324	
		325	

2.2.6 Darstellung der mittleren Grundwasserneubildungsrate nach Dörhöfer & Josopait

Im LBEG (ehemals Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung - NLFb) Hannover wurde Mitte der 1980er Jahre die mittlere Grundwasserneubildungsrate mit dem Verfahren DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) mit den Ergänzungen von HAERTLÉ (1983) für die Zeitrei-

he 1931–1960 berechnet und lag ursprünglich in Papierform vor. Die Niederschläge wurden einer Isohyetenkarte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Zeitraum 1931–1960 entnommen (DWD 1977). Die Grundwasserneubildungsstufen wurden graphisch mit Hilfe von Abbildung 5 und Abbildung 6 ermittelt. Abbildung 8 zeigt die so berechneten Grundwasserneubildungsstufen von einem Ausschnitt des Blattes CC 3118 Hamburg-West.



Abb. 8: Ausschnitt der Karte CC 3118 der mittleren Grundwasserneubildungshöhen nach Dörhöfer & Josopait mit der Zeitreihe 1931–1960 (unmaßstäblich).

Die Umsetzung der Methode unter Verwendung der Niederschlagsdaten der Zeitreihe 1931–1960 (DWD 1977) in einem GIS zeigt Abbildung 9. Die Berechnung der versiegelten Flächen und die Ausweisung der Waldflächen wurden wie oben beschrieben durchgeführt.

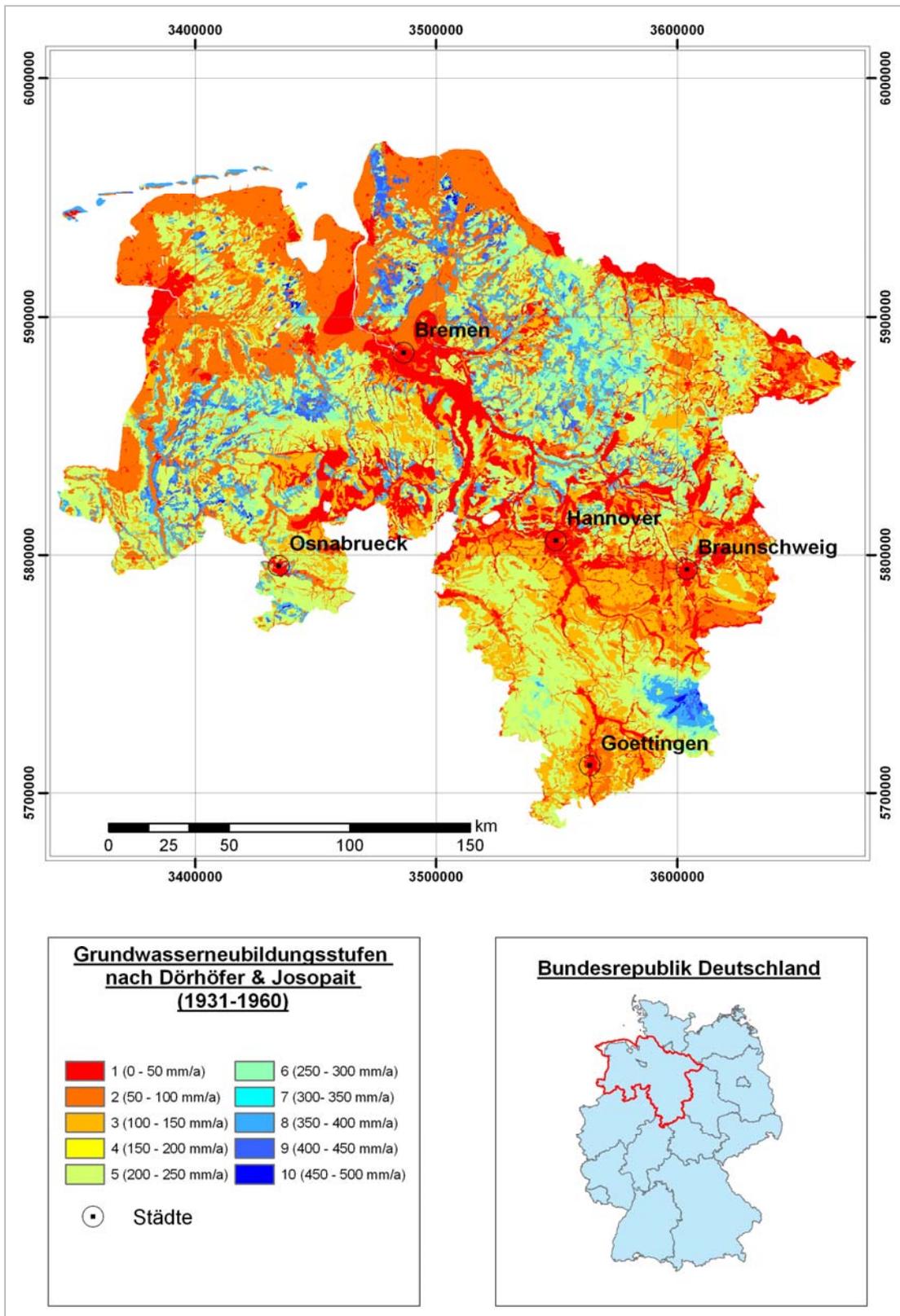


Abb. 9: Mittlere Grundwasserneubildungsraten nach Dörhöfer & Josopait mit den Niederschlagsdaten der Zeitreihe 1931–1960.

2.2.7 Zeitreihe 1961–1990

Zur Ermittlung von Modellergebnissen für die Zeitreihe 1961–1990 wurden Niederschlagsdaten der Arbeit von KÖTHE, BÖHNER & RINGELER (1997) verwendet. Für die Ausweisung der Waldflächen wurde aufgrund des geeigneten Datenformates auf ATKIS®-Daten (LGN 2003) zurückgegriffen. Versiegelte Gebiete wurden anhand von CORINE-Daten (STATISTISCHES

BUNDESAMT 1997) identifiziert. Da die Ableitung des Versiegelungsgrades allein aus topographischen Karten sehr schwierig ist, wurde dieser aus pragmatischen Gründen von der Größe der versiegelten Fläche abhängig gemacht (Tab. 5). Bei der Einteilung der Versiegelungsstufen und der zugehörigen Korrekturfaktoren wurde sich an den Werten von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1979) orientiert.

Tab. 5: Zuordnung der versiegelten Flächen zu Versiegelungsstufen und Korrekturfaktor.

Größe der versiegelten Fläche	Zuordnung zur Versiegelungsstufe	Abgezogener Prozentsatz/ Korrekturfaktor
>2 000 ha	Versiegelungsstufe 1	–80 % / 0,2
150–2 000 ha	Versiegelungsstufe 2	–50 % / 0,5
<150 ha	Versiegelungsstufe 3	–20 % / 0,8

Bei diesen Berechnungen ergaben sich jedoch Schwierigkeiten, da einigen Einheiten der BSK 200 (LBEG 2008b) im ursprünglichen Verfahrensgang (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1979) weder ET-Stufen noch A/A_u -Verhältnisse zugeordnet wurden. Um eine vollständige Berechnung möglich zu machen, wurden diesen

Einheiten zur besseren Vergleichbarkeit der Modelle ET-Stufen und A/A_u -Verhältnisse zugewiesen (Tab. 6). Die Vergabe dieser Werte wurde unter Verwendung der Abbildung 4 und mit Blick auf die übrigen Werte in DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1979) vorgenommen.

Tab. 6: Zuordnung fehlender ET-Stufen und A/A_u -Verhältnisse zu den Einheiten der BSK 200 (LBEG 2008b).

BSK-Fläche	Anzahl der Flächen in Niedersachsen	ET-Stufe Acker/Grünland	ET-Stufe Wald	A/A_u -Verhältnis
13	14	11	12	2,5
15	15	10	11	2,5
31	1	10	11	2,5
333	3	3	7	1,7
424	3	5	8	1,7
513	5	5	8	1,7
514	7	5	8	1,7
552	10	7	9	2

Diese Zuordnung der Werte wurde von Josopait auf Plausibilität geprüft. Lediglich bei der BSK-Flächennummer 31 (LBEG 2008b) schätzte Josopait die ET-Stufe und den Abflussquotienten niedriger ein (JOSOPAIT 2007).

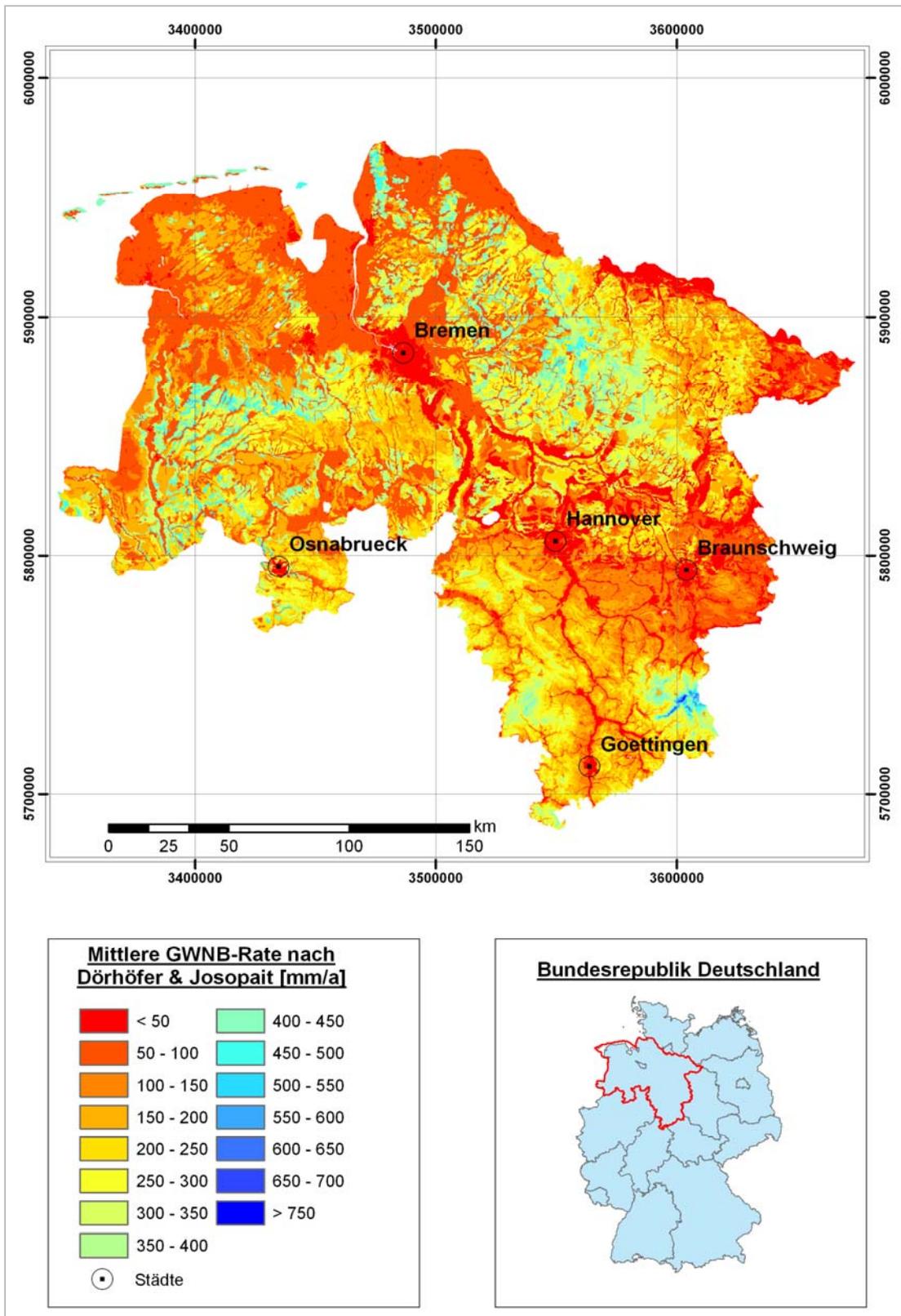


Abb. 10: Mittlere Grundwasserneubildungsraten nach Dörhöfer & Josopait mit den Niederschlagsdaten der Zeitreihe 1961–1990.

Alle folgenden Betrachtungen des Verfahrens Dörhöfer & Josopait beziehen sich auf die mit der Zeitreihe 1961–1990 berechneten Modell-ergebnisse.

2.3 Methodenbeschreibung GROWA06V2

2.3.1 Grundlagen

Am Forschungszentrum Jülich wurde das Modell GROWA (kurz für „Großräumiger Wasserhaushalt“) im Zuge des Forschungsvorhabens „Gebietsumfassende Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwasserumlieu im Flusseinzugsgebiet der Elbe“ im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie)“ (zitiert in: KUNKEL & WENDLAND 1998) entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells konnten unter anderem mittlere Grundwasserneubildungsraten für den deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes flächendifferenziert bestimmt werden. Da das Modell GROWA gute Ergebnisse zeigte, wurde es auch in Niedersachsen in angepasster Form als GROWA98 (DÖRHÖFER et al. 2001) und später auch in Nordrhein-Westfalen (BOGENA et al. 2003) angewendet. Das GROWA-Modell wurde vom LBEG Hannover übernommen und mit eigenen Daten bis zur Version GROWA06 (Version 2) weiterentwickelt.

2.3.2 Eingangsdaten

Als Grundlage der Berechnungen mit GROWA06V2 diente die BÜK 50 (LBEG 2008c). Im Folgenden werden die für die Berechnungen notwendigen Parameter beschrieben. Alle Hinweise zur Methodenentwicklung von GROWA06V2 beruhen auf mündlichen Mitteilungen (MÜLLER 2007, WALDECK 2008, SBRESNY 2008), welche auf MÜLLER (2004) aufbauen.

Niederschlag

Als relevanter Zeitraum galt für dieses Modell die Zeitspanne 1961–1990. Die Niederschlagsdaten wurden den Stationsdaten des DWD entnommen, anschließend vom geographischen Institut in Göttingen regionalisiert und als 50 x 50 m-Raster ausgegeben (BÖHNER 2004). Jeder Fläche der BÜK 50 (LBEG 2008c) wurde mit diesen Daten ein Niederschlagswert zugeordnet.

Verdunstung auf ebenen unversiegelten Flächen

Die reale Verdunstung wurde nach der Formel von RINGER & WESSOLEK (1996) berechnet (Gl. 5), wobei sich die Größen W_{pfl} und ET_{pot} auf die Zeitspanne 1961–1990 bezogen. Die Waldflächen wurden anhand von ATKIS®-Daten (LGN 2003) ausgewiesen. Da die BÜK 50 (LBEG 2008c) nicht in Nadel- und Laubwald unterscheidet, wurden nach vergleichenden Untersuchungen für die Berechnung alle Waldflächen als Nadelwald angesehen. Die landnutzungsspezifischen Regressionskoeffizienten wurden Tabelle 7 entnommen.

$$V_{real} = f_H \cdot [a \cdot N_{So} + b \cdot N_{Wi} + c \cdot \log(W_{pfl}) + d \cdot ET_{pot} + e + (f_v \cdot G)] \text{ [mm/a]} \quad (\text{Gl. 5})$$

- V_{real} = Jahressummen der realen Verdunstung [mm/a],
- f_H = Korrekturfaktor nach GOLF (1981) [/],
- N_{So} = Summe des Sommerniederschlags 01.04.–30.09. [mm/a] (BÖHNER 2004),
- N_{Wi} = Summe des Winterniederschlags 01.10.–31.03. [mm/a] (BÖHNER 2004),
- W_{pfl} = pflanzenverfügbare Bodenwassermenge [mm] (LBEG 2008c),
- ET_{pot} = Jahressumme der potenziellen Evapotranspiration nach WENDLING (1995) [mm/a],
- a, b, c, d, e = landnutzungsspezifische Regressionskoeffizienten [/],
- $(f_v \cdot G)$ = Korrekturterm für Versiegelung [/].

Tab. 7: Regressionskoeffizienten für die Berechnung der Gleichung 5.

Landnutzung	Regressionskoeffizienten				
	a	b	c	d	e
Ackerland	0,39	0,08	153	0,12	-109
Grünland	0,48	0,1	286	0,1	-330
Wald	0,33	0,29	166	0,19	-127

Hangneigung und Exposition

Der Korrekturfaktor f_H für geneigte Flächen wurde anhand der Gleichung 6 nach GOLF (1981) ermittelt. Diese Werte wurden für weitere Berechnungen gemäß Tabelle 8 klassifiziert.

$$f_H = (\alpha, \phi) [1,605 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(\phi - 90) - 2,5 \cdot 10^{-4}] \cdot \alpha + 1 [/] \quad (\text{Gl. 6})$$

α = mittlere Hangneigung [°] (LGN 2008a),

ϕ = Hangexposition gegenüber Nord [°] (LGN 2008a).

Tab. 8: Klassifizierung des Faktors f_H .

Klasse	f_H nach Gleichung 6 [mm/a]	f_H -Wert für die Berechnung der Gleichung 5 [mm/a]
1	<0,93	0,9
2	≥0,93 und <0,965	0,948
3	≥0,965 und <1,02	0,993
4	≥1,02 und <1,08	1,05
5	≥1,08	1,15

Versiegelte Flächen

Anhand der ATKIS®-Daten (LGN 2003) wurde der Versiegelungsgrad einer Fläche ermittelt. Der Summand ($f_v \cdot G$) aus Gleichung 5 wurde nach Gleichung 7 berechnet.

$$f_v \cdot G = \text{Versiegelungsgrad} \cdot (-3,45) [/] \quad (\text{Gl. 7})$$

Grundwasserflurabstand

Für Flächen mit der Grundwasserstufe 1 wurde die ET_{real} der ET_{max} (maximale Evapotranspiration) gleichgesetzt. Hierzu musste die ET_{pot} über einen nutzungsspezifischen Faktor f (Tab. 9) in die ET_{max} umgerechnet werden (Gl. 8).

$$ET_{\text{max}} = ET_{\text{pot}} \cdot f \text{ [mm/a]} \quad (\text{Gl. 8})$$

Bei der Anwendung der obigen Beziehungen ist zu beachten, dass ET_{real} zum einen die ET_{max} und zum anderen die Summe aus Niederschlag und kapillarem Aufstieg nicht überschreiten kann.

Tab. 9: Zuordnung des Faktors f der Gleichung 8.

Landnutzung		Faktor f	
1	versiegelte Fläche (Versiegelungsgrad >10 %)	f = 0,8	
2	vegetationslose Fläche	nFK _{gew} ≤ 8,5 Vol.-%	f = 0,8
		nFK _{gew} > 8,5 Vol.-%	f = 0,0186 · nFK _{gew} + 0,6419
3	Grünland/Gras (Grashöhe Ø 12 cm)	nFK _{gew} ≤ 11 Vol.-%	f = 0,0125 · nFK _{gew} + 0,7108
		nFK _{gew} > 11 Vol.-%	f = 0,2866 · ln(nFK _{gew}) + 0,1614
4	Acker	bei BOTYP *T*:	f = 0,734 · ln(nFK _{gew}) – 1,101
		bei allen anderen BOTYP:	f = 0,221 · ln(nFK _{gew}) + 0,431
5	Laubwald UA: Umtriebsalter/Bestandesalter (Jahre)	bei BOART SS:	
		UA ≤ 90	f = 0,84 + 0,25 · 10 ⁻² · UA + 0,508 · 10 ⁻³ · UA ² – 0,233 · 10 ⁻⁴ · UA ³ + 0,422 · 10 ⁻⁶ · UA ⁴ – 0,3494 · 10 ⁻⁸ · UA ⁵ + 0,10946 · 10 ⁻¹⁰ · UA ⁶ = f _{SL1}
		UA > 90	f = 1,038 + 0,49 · 10 ⁻³ · UA – 0,155 · 10 ⁻⁵ · UA ² + 0,1686 · 10 ⁻⁸ · UA ³ = f _{SL2}
		bei allen anderen BOART:	
	UA ≤ 100	f = f _{SL1} · 1,05	
	UA > 100	f = f _{SL2} · 1,05	
6	Nadelwald	bei BOART SS:	
		UA ≤ 130	f = 0,8 + 0,2694 · 10 ⁻¹ · UA – 0,63924 · 10 ⁻³ · UA ² + 0,8052 · 10 ⁻⁵ · UA ³ – 0,5785 · 10 ⁻⁷ · UA ⁴ + 0,223 · 10 ⁻⁹ · UA ⁵ – 0,356 · 10 ⁻¹² · UA ⁶ = f _{SN1}
		UA > 130	f = 1,35 – 0,108 · 10 ⁻² · UA + 0,178 · 10 ⁻⁵ · UA ² = f _{SN2}
		bei allen anderen BOART:	
	UA ≤ 130	f = f _{SN1} · 1,03	
	UA > 130	f = f _{SN2} · 1,03	

Die FK_{gew} (Volumenanteil des Wassers im Boden in % bei nutzbarer Feldkapazität) wurde jeweils bis zur effektiven Durchwurzelungstiefe (We) ermittelt (Gl. 9).

$$FK_{\text{gew}} = \frac{\sum_{i=1}^n nFK_i}{We} \quad [\text{Vol}\%] \quad (\text{Gl. 9})$$

i = Anzahl der Schichten,
nFK = nutzbare Feldkapazität.

Hydrogeologische Gesteinseinheit

Anhand der nutzungsdifferenzierten BÜK 50 (LBEG 2008c) wurden die Festgesteinsgebiete in Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften unterteilt.

2.3.3 Verteilung der Basisabflusswerte und Berechnung der Grundwasserneubildungsrate

Lockergestein

Im Lockergestein war meist der Grundwasser-einfluss (Tab. 10) der ausschlaggebende Faktor für das Gesamtabfluss-/Grundwasserabflussverhältnis (A/A_u). War der Grundwasser-einfluss jedoch nicht relevant, so wurde der Staunässe-einfluss (Tab. 11) zum bestimmen den Faktor. Bei Flächen ohne Grundwasser- oder Staunässe-einfluss wurde der Abflussquotient anhand der Hangneigung (Tab. 12) ermittelt. Bei gleichzeitigem Einfluss von Grundwasser und Staunässe wurde der Abflussquotient anhand von Tabelle 10 ermittelt (MÜLLER

2004). Die Daten zu Grundwasser- bzw. Stau-
nässeeinfluss wurden der BÜK 50 (LBEG
2008c) entnommen.

Tab. 10: Ermittlung des Abflussquotienten aus der Grundwasserstufe.

Abflussquotient	Grundwasserstufe				
	1	2	3	4	5
A/A _u	2,5		2,3	2	1

Tab. 11: Ermittlung des Abflussquotienten aus der Stau-
nässestufe.

Abflussquotient	Stau- nässestufe				
	1	2	3	4	5
A/A _u	1	2	2,3		2,5

Tab. 12: Ermittlung des Abflussquotienten aus der Hang-
neigung.

Abflussquotient	Hang- neigung [%]					
	<3	3–7	7–10	10–13	13–15	>5
A/A _u	1	1,5	1,7	2	2,3	2,5

Festgestein

Die Gesteine wurden anhand der in der
nutzungsspezifischen BÜK 50 (LBEG 2008c) aus-
gewiesenen Profile hydrogeologischen Ge-
steinseinheiten zugeordnet, welchen wiederum
r_B-Werte (Verhältnis Grundwasserabfluss/
Gesamtabfluss) zugeordnet wurden (Tab. 13).
War in den Profilen der BÜK 50 (LBEG 2008c)
bis 2 m kein Festgestein beschrieben, so wur-
den diese Flächen für weitere Berechnungen
als Lockergestein eingestuft. Die hydrogeologi-
schen Einheiten wurden anhand des Aus-
gangsgesteins (SKEL) klassifiziert (Tab. 14).

Tab. 13: Zuordnung der r_B-Werte zu den hydrogeolo-
gischen Gesteinseinheiten bei GROWA06V2.

Hydrogeologische Einheit	r _B -Wert [l]
1. Tonstein-Wechselfolgen	0,05
2. Paläozoische Schiefergesteine	0,2
3. Mergelstein	0,25
4. Sandsteine, Schluffsteine	0,4
5. Kalkstein	0,7
6. Kalkstein verkarstet	1,0
7. Sandstein-Schluffstein- Wechselfolgen	0,3
8. Kalkstein-Mergelstein- Wechselfolgen	0,35
9. Kristallingestein	0,1
10. Schluffstein	0,15

Tab. 14: Zuordnung der Bodenausgangsgesteine zu den hydrogeologischen Einheiten bei GROWA06V2 (SKEL-Kürzel nach PREUSS & VINKEN 1991).

SKEL	Nr.	SKEL	Nr.
*Gne	9	*Cqc	7
*Gnec	7	*Gnoc	7
*Q	9	*T	2
*Qc	7	*Tc	7
+G	9	+D	9
+Gb	9	+Dc	7
^brh	1	+Dr	9
^brhc	1	+G	9
^d	5	+Gbc	7
^dc,l	7	+Gc	7
^g	4	^d	5
^k	5	^dc	7
^kc	7	^fec	7
^m	3	^fs	7
^mc	7	^fsc	7
^mk	8	^g	4
^mkc	7	^gc	7
^mt	3	^k	5
^mtc	7	^kc	6
^s	4	^kc,l	8
^sc	7	^kc,t	8
^sk	5	^kc,u	8
^skc	7	^kooc	7
^t	1	^m	3
^tc	1	^m,t	10
^tm	1	^mc	7
^u	10	^mc,t	1
^uc	7	^s	4
^y	5	^sc	7
^yc	6	^sc,l	7
		^sc,t	7
		^sk	5
		^skc	7
		^skc,l	7
		^t	1
		^t,l	1
		^tc	1
		^tm	10
		^tmc	7
		^tsf	2
		^tsfc	7
		^u	10
		^uc	7
		^uc,l	10
		^uc,t	10
		^y	5
		^yc	6

Sonderflächen

Versiegelte Flächen

Für überwiegend städtisch oder industriell geprägte Flächen wurde der r_B -Wert ausschließlich aus dem Anteil der versiegelten Fläche, abgeleitet aus ATKIS®-Daten (LGN 2003), ermittelt (Gl. 10).

$$r_B = 1 - \frac{D_V}{100} \quad [l] \quad (\text{Gl. 10})$$

D_V = Versiegelungsgrad [%].

Drainierte Flächen

Drainierte Gebiete wurden durch die in der BÜK 50 (LBEG 2008c) enthaltenen Profile identifiziert. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass bestimmte Kombinationen von Bodentyp und Nutzung immer gedränt sind. Anhand des Bodentyps und der Nutzung wurden den Flächen r_B -Werte zugeordnet (Tab. 15).

Tab. 15: Zuordnung der r_B -Werte zu gedränten Flächen.

Bodentyp	Nutzung	weitere Kriterien	r_B [/]
MC*, MN*, MH*, MD*, MK*, MO*	A ²⁾ , G ³⁾		0,1
HN*	A, G		0,3
Hauptbodentyp Gley: G1, G2	A, G		0,3
Hauptbodentyp Gley: G3	A		0,3
A	A, G		0,3
Hauptbodentyp *S1, *S2, *S3	A		0,4
Hauptbodentyp *S1, *S2, *S3	G		0,6
E*/G*	A		0,3
G*-E*	A	MNGW ⁴⁾ < 8 dm	0,3
YD/H*	A		0,3
*YF	A		0,3
YT	A, G		0,3
YUab	A		0,3
YUg*	A		0,3
YUg-P	A, G		0
YUhh	A		0,8
YUhn	A		0,3
YUm*	A		0,1
HH* (SMK) ¹⁾	A		0,8
HH*	G		0,3

1) SMK = Sandmischkultur

2) G = Grünland

3) A = Acker

4) MNGW = Mittlerer Grundwassertiefstand

Waren alle Eingangsdaten und der r_B -Wert bekannt, so errechnete das Modell GROWA06V2 die Grundwasserneubildungsrate nach Gleichung 11.

$$\text{GWNB - Rate} = (N - V_{\text{real}}) \cdot r_B \text{ [mm/a]} \quad (\text{Gl. 11})$$

2.3.4 Darstellung der mittleren Grundwasserneubildungsrate nach GROWA06V2

Abbildung 11 zeigt die mit GROWA06V2 berechnete mittlere Grundwasserneubildungsrate in Niedersachsen.

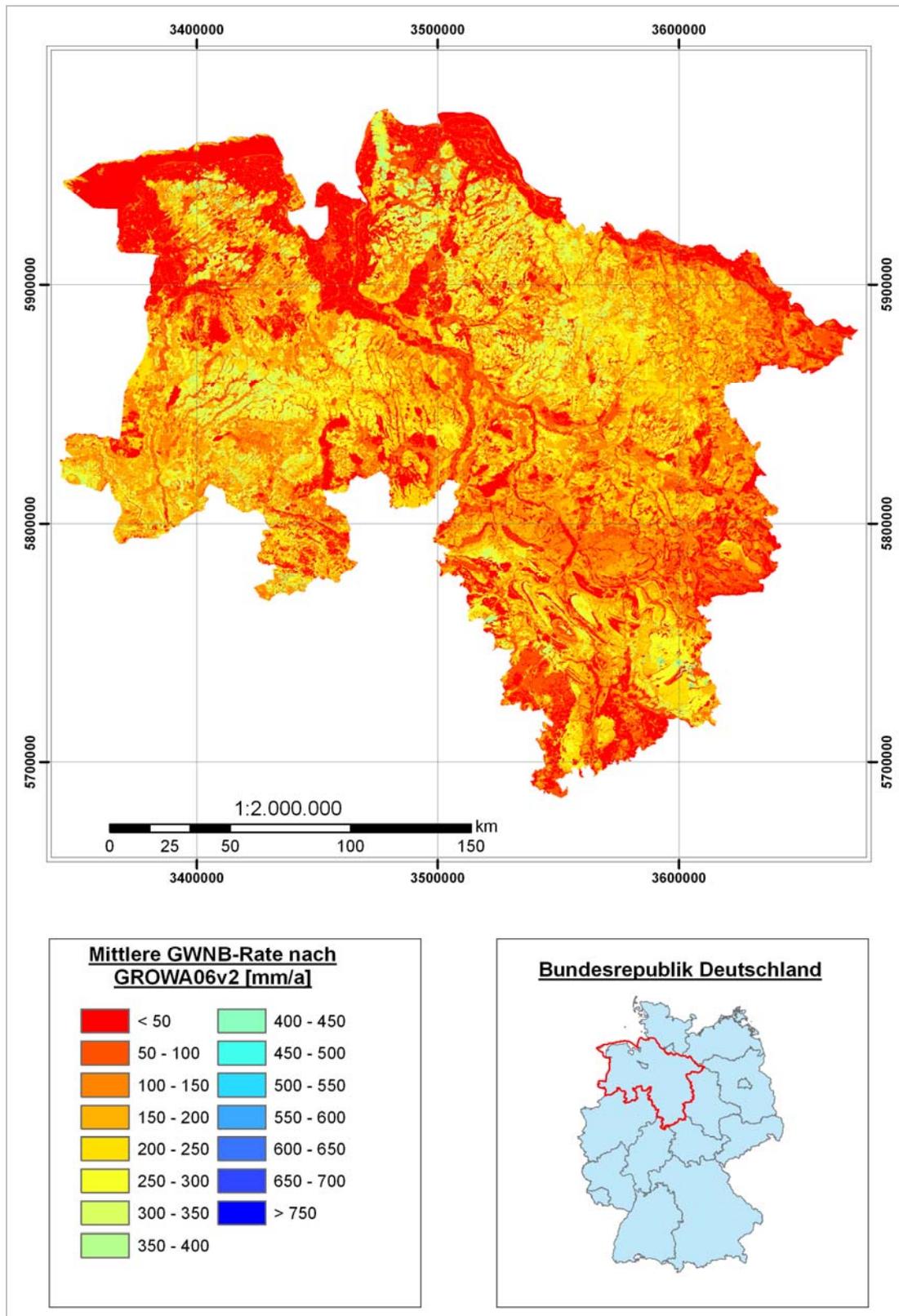


Abb. 11: Karte der mittleren Grundwasserneubildungsraten nach GROWA06V2.

3 Methodenvergleich

Wie in Kapitel 2.2.4. beschrieben, berechnet das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait die Grundwasserneubildungsraten als Stufen mit einer Spanne von jeweils 50 mm/a. Das Verfahren GROWA06V2 hingegen liefert absolute Grundwasserneubildungsraten. Für die folgenden Berechnungen wurde daher der Mittelwert der jeweiligen Stufe als feste Zahl verwendet, so dass ein direkter Vergleich der Grundwasserneubildungsraten möglich wird. Aus diesem Grund haben alle folgenden Berechnungen der Ergebnisse des Verfahrens nach Dörhöfer & Josopait bezüglich der Grundwasserneubildungsrate einen Gültigkeitsbereich von ± 25 mm/a. Ebenso wurde mit den Ergebnissen bezüglich der Evapotranspiration verfahren, mit dem Unterschied, dass diese Berechnungen einen Gültigkeitsbereich von $\pm 12,5$ mm/a aufweisen. Eine Umrechnung der Grundwasserneubildungsraten nach GROWA06V2 in Stufen hätte den entscheidenden Nachteil, dass die Exaktheit der Modellergebnisse und damit deren räumliche Differenzierung deutlich herabgesetzt würde.

Für die Quantifizierung des Anteils des grundwasserbürtigen Abflusses am Gesamtabfluss verwendet das Modell Dörhöfer & Josopait das A/A_u -Verhältnis. Das Modell GROWA06V2 arbeitet hingegen unter anderem mit dem r_B -Wert, welcher dem Kehrwert des A/A_u -Verhältnisses entspricht. Der Einfachheit halber wird nachstehend zur Beschreibung der Abflussanteile nur noch das A/A_u -Verhältnis, im Folgenden Abflussquotient genannt, verwendet. Demnach kann die Berechnung der Grundwasserneubildungsrate beider Modelle mit der Gleichung 12 ausgedrückt werden:

$$\text{GWNB} = \frac{(N - ET_{\text{real}})}{A/A_u} \quad [\text{mm/a}] \quad (\text{Gl. 12})$$

- GWNB = Grundwasserneubildungsrate [mm/a],
- N = Niederschlag [mm/a],
- ET_{real} = reale Evapotranspiration [mm/a],
- A/A_u = Abflussquotient [].

3.1 Benötigte Eingangsdaten und Praktikabilität der Methoden

3.1.1 Methode Dörhöfer & Josopait

Die Berechnung der Grundwasserneubildung nach Dörhöfer & Josopait ist ohne den Einsatz von EDV möglich. Für das gesamte niedersächsische Gebiet sind Verdunstungswerte und Abflussquotienten verfügbar (vgl. DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1979). BASTIAN & SCHREIBER (1994) beschreiben, wie man auch in anderen Gebieten bei Kenntnis der in Kapitel 2.2.2. beschriebenen Parameter ohne viel Aufwand die Grundwasserneubildung ermitteln kann (vgl. GERBER 2002). Die Annahme, dass weder die Verdunstung noch der Abflussquotient vom Niederschlag abhängig ist, lässt zudem Berechnungen mit beliebigen Niederschlagswerten zu. Das Verfahren soll für Locker- wie für Festgesteinsgebiete verlässliche Angaben liefern, wobei sogar eine Verwendung für den Maßstab 1 : 50 000 möglich sein soll (RÖDER 1992).

Die Ermittlung von Verdunstung und Versiegelung entspricht jedoch nicht mehr dem Stand der heutigen Kenntnis. Arbeiten von PROKSCH (1990) und RENGER & WESSOLEK (1996) zeigen, dass die reale Evapotranspiration sehr wohl von der Niederschlagsmenge sowie vom Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlag abhängt. Die BSK 200 (LBEG 2008b) unterscheidet Forststandorte nicht in Laub-, Nadel- oder Mischwald. Dies stellt eine erhebliche Verallgemeinerung dar, da unterschiedliche Vegetationsarten die Evapotranspiration auf unterschiedliche Weise beeinflussen (PROKSCH 1990, GROSSMANN 1997). Ein weiterer Nachteil ist, dass gedränte Gebiete unberücksichtigt bleiben. Zudem ist die Ableitung des Versiegelungsgrades allein aus den topographischen Karten in vielen Fällen nicht möglich.

Trotz dieser Einschränkungen ist das Verfahren allgemein anerkannt und wurde z. B. bei der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung angewendet (HAAS 1987).

3.1.2 Methode GROWA06V2

GROWA06V2 arbeitet mit einer deutlich differenzierteren und aktuelleren Datengrundlage als das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait. Neue Aspekte wie

- Einfluss von Hangneigung, Exposition, nutzungsbedingter potenzieller Verdunstung, pflanzenverfügbarer Wassermenge sowie das Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlägen auf die reale Evapotranspiration,
- Regionalisierung von Niederschlagsdaten,
- Einteilung von Festgesteinen mit hydrogeologisch ähnlichen Eigenschaften in Einheiten,
- Berücksichtigung von gedrähten Gebieten,
- genaue Erfassung von versiegelten Gebieten mit dem entsprechenden Versiegelungsgrad

fließen bei diesem Modell in die Berechnungen mit ein und lassen allgemein eine höhere Genauigkeit gegenüber den mit dem Modell Dörhöfer & Josopait ermittelten Werten erwarten. Die Eingangsdaten lassen die Darstellung der Grundwasserneubildungsraten im Maßstab 1 : 50 000 zu.

Auch bei dem Modell GROWA06V2 werden Waldflächen nicht in Nadel-, Laub- oder Mischwald unterschieden, stattdessen werden alle Forstflächen als Nadelwald angesehen. Festgesteinsgebiete werden anhand der BÜK 50 (LBEG 2008c) ausgewiesen, wobei Gebiete, für die bis zu einer Tiefe von 2 m kein Festgestein beschrieben wird, wie Lockergesteinsgebiete behandelt werden. GROWA06V2 ist ein GIS-gestütztes Vektorverfahren. Die Berechnung der mittleren Grundwasserneubildungsraten nach diesem Modell ist daher ohne EDV nicht möglich. Durch die Vielzahl von Eingangsparametern sowie die Formatierung dieser Daten ist eine Berechnung der Grundwasserneubildung nach GROWA06V2 auch mit EDV relativ aufwendig.

3.2 Unterschiede in den Ergebnissen

3.2.1 Geologie

Im Folgenden wird die Vorgehensweise beschrieben, wie der Zusammenhang zwischen den Unterschieden der Modellergebnisse und der dazugehörigen Geologie geprüft wurde.

Zunächst wurde aus den Karten der mittleren Grundwasserneubildungsraten eine Differenzkarte berechnet, wobei den Werten nach Dörhöfer & Josopait die Werte der Karte nach GROWA06V2 abgezogen wurden (Abb. 12). Diese Differenzkarte wurde im Rasterformat berechnet, wobei jede Rasterzelle einer Fläche von 100 x 100 m entspricht. Jeder dieser Rasterzellen ist hierbei ein Wert zugeordnet, welcher der Differenz der Ergebnisse der beiden gegenübergestellten Methoden entspricht.

Positive Ergebnisse dieser Differenzen bedeuten, dass der Subtraktor (Werte nach Dörhöfer & Josopait) größer ist, als der Subtrahend (Werte nach GROWA06V2). Bei negativen Differenzen ist es entsprechend umgekehrt. Auf Grundlage dieser Differenzkarte und der GÜK 200 (LBEG 2008a) wurde nun mit Hilfe des Programms ArcMap 9.2 (ESRI 2008) untersucht, inwiefern die Abweichungen zwischen den beiden Methoden auf die Geologie zurückzuführen sind. Hierfür addiert das Programm alle Werte des Rasters innerhalb der verschiedenen geologischen Systeme und teilt das Ergebnis durch die Anzahl der Rasterzellen. Die so erzielten Mittelwerte für die Differenzen sind mit den Standardabweichungen in Abbildung 13 dargestellt.

Stichprobenartige Untersuchungen zeigten, dass auch bei der Betrachtung von kleineren stratigraphischen Einheiten (Serien) keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können. Dies gilt sowohl für den Festgesteinsbereich als auch für das in Niedersachsen flächenmäßig am weitesten verbreitete Quartär. Daher wurden lediglich Systeme und teilweise deren Übergänge betrachtet.

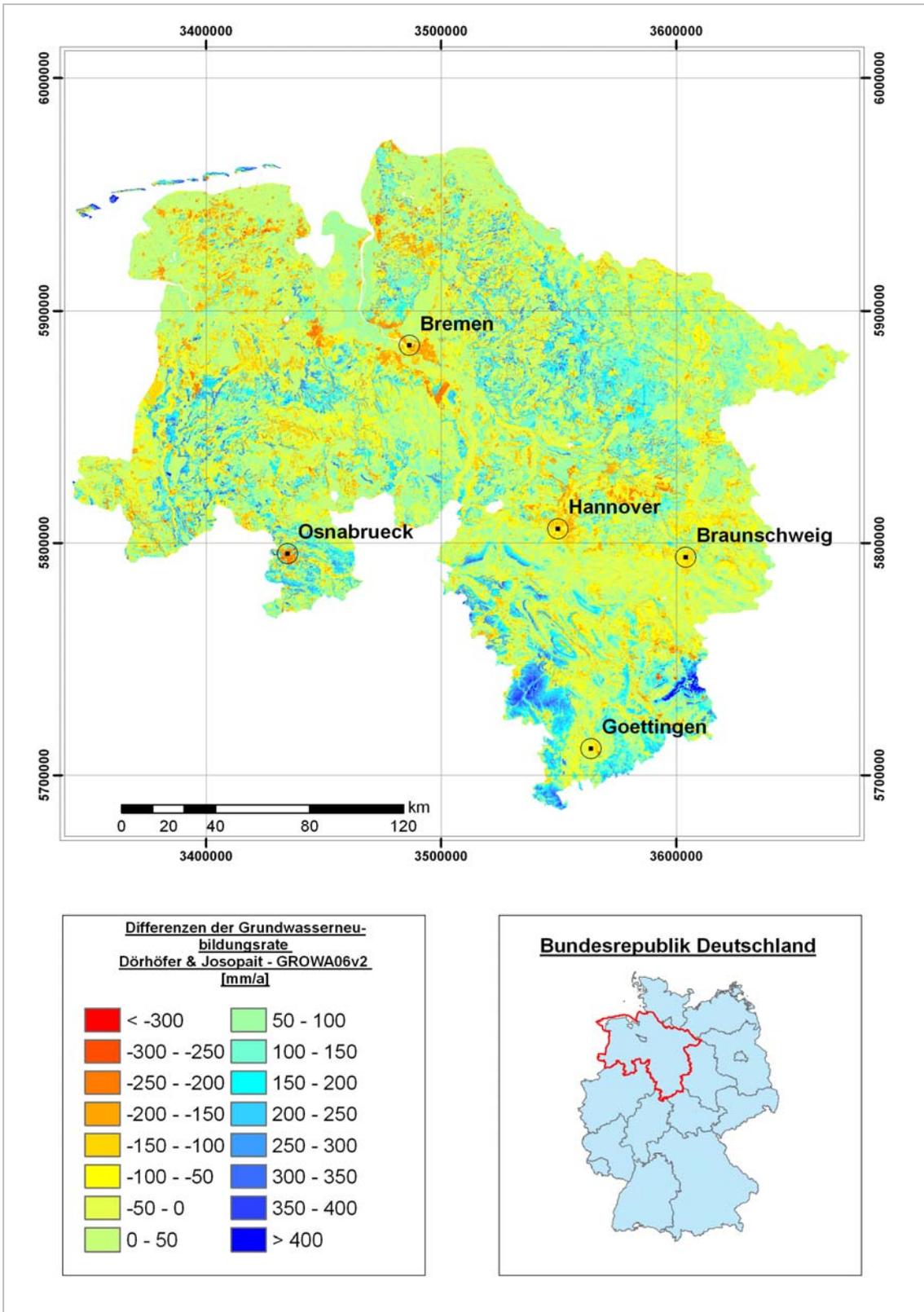


Abb. 12: Darstellung der Differenzen der berechneten mittleren Grundwasserneubildungsrate nach Dörhöfer & Josopait – GROWA06V2.

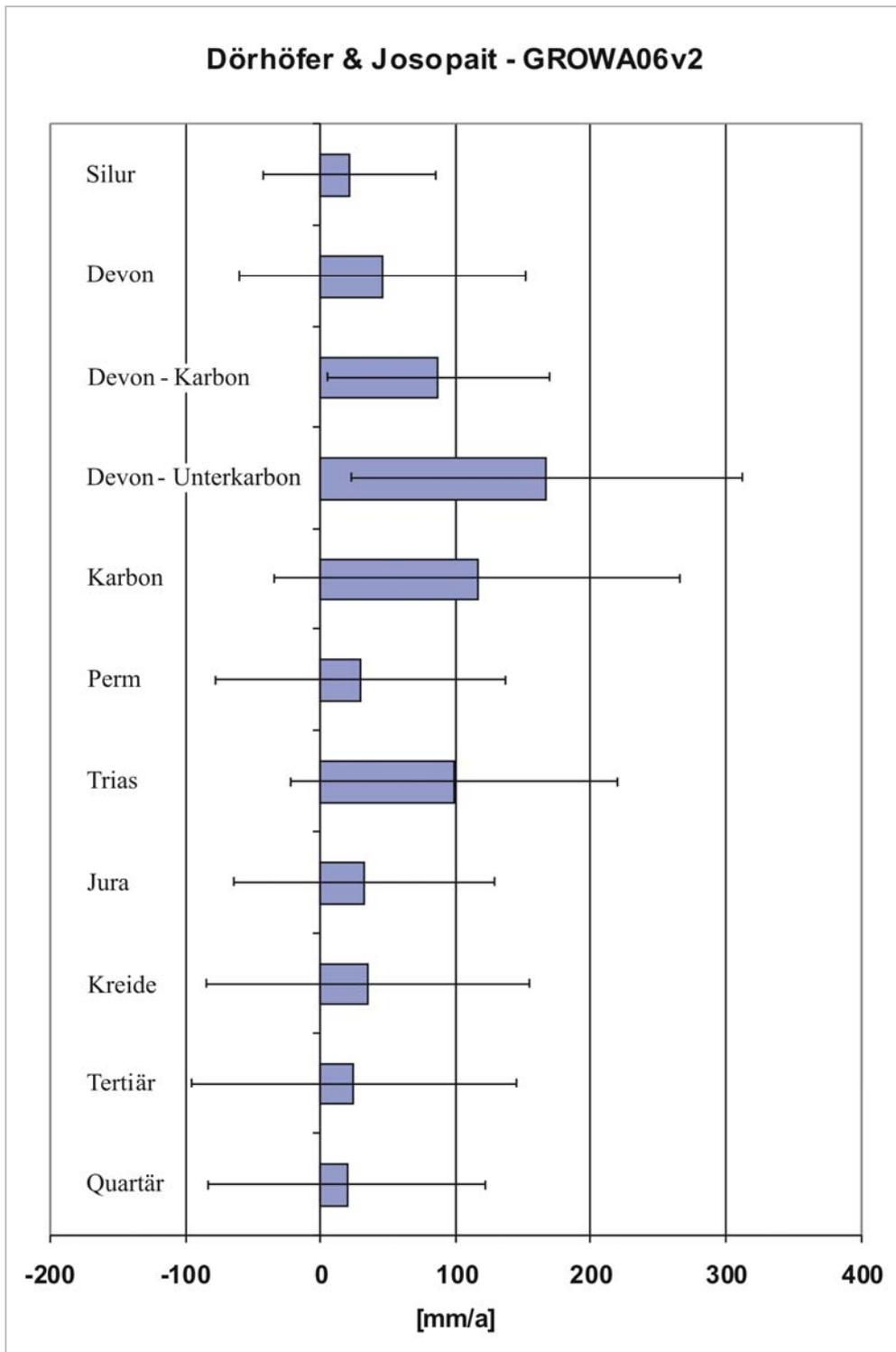


Abb. 13: Darstellung der mittleren Differenzen der Methoden auf Basis der geologischen Systeme. Positive Werte bedeuten hierbei, dass das Modell GROWA06V2 im Mittel eine geringere Grundwasserneubildungsrate berechnet, als das Modell Dörhöfer & Josopait. Die Balken stellen die Streuung der Differenzen innerhalb der geologischen Systeme dar (Standardabweichungen).

Der Vergleich zwischen den Verfahren in Bezug auf die geologischen Systeme zeigt, dass Dörhöfer & Josopait für alle Systeme im Mittel eine höhere Grundwasserneubildungsrate berechnen, als das Verfahren GROWA06V2. Hierbei bestimmt tendenziell die Geologie, wie hoch der Betrag dieser Differenz ist. Daher ist eine pauschale Umrechnung der Ergebnisse der Methoden für alle Systeme durch einen Korrelationsfaktor nicht möglich. Aufgrund der hohen mittleren Standardabweichung von 110 mm/a ist dies für die einzelnen geologischen Systeme ebenfalls nicht durchführbar.

In Lockergesteinsgebieten fallen die Differenzen weniger gravierend aus, als bei den meisten Festgesteinsgebieten (Tab. 16). Da aber auch hier die Standardabweichung sehr hoch ist, kann man davon ausgehen, dass die Differenzen der berechneten Grundwasserneubildungsraten innerhalb dieses Gebietes signifikant sein können. Die hohen Standardabweichungen kommen durch die unterschiedlichen methodischen Ansätze sowie durch die unterschiedlichen Maßstäbe der Datengrundlagen der Methoden zustande.

Tab. 16: Relativer Flächenanteil der betrachteten Systeme und Systemübergänge am niedersächsischen Gebiet.

System	Flächenanteil
Devon	0,39 %
Devon – Karbon	0,05 %
Devon – Unterkarbon	0,08 %
Jura	1,48 %
Karbon	1,06 %
Kreide	1,78 %
Perm	0,17 %
Quartär	88,23 %
Silur	0,00 %
Tertiär	0,29 %
Trias	5,79 %
andere	0,67 %

3.2.2 Bodentyp

Gerade in Lockergesteinsgebieten kommt dem Bodentyp in Bezug auf die Versickerung eine entscheidende Rolle zu (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990). Bei der Entwicklung des GROWA06V2-Modells wurde das Abflussverhalten bestimmter Standorte aufgrund des Bodentyps verändert und weiter differenziert. Eine Abhängigkeit der Abweichungen der beiden Verfahren vom Bodentyp erscheint, zumindest bei einigen Bodentypen, denkbar.

Für die Untersuchung auf systematische Abweichungen aufgrund des Bodentyps wurde analog zu den Untersuchungen auf die Abhängigkeit von der Geologie vorgegangen. Als Basis wurde hier die BÜK 50 (LBEG 2008c) verwendet.

Für die Prüfung möglicher systematischer Unterschiede aufgrund des Bodentyps wurden zunächst jene 15 Bodentypen von den laut BÜK 50 (LBEG 2008c) insgesamt mehr als 100 Bodentypen ausgewählt, die zusammengekommen an der Fläche Niedersachsens den größten Anteil (>70 %) ausmachen.

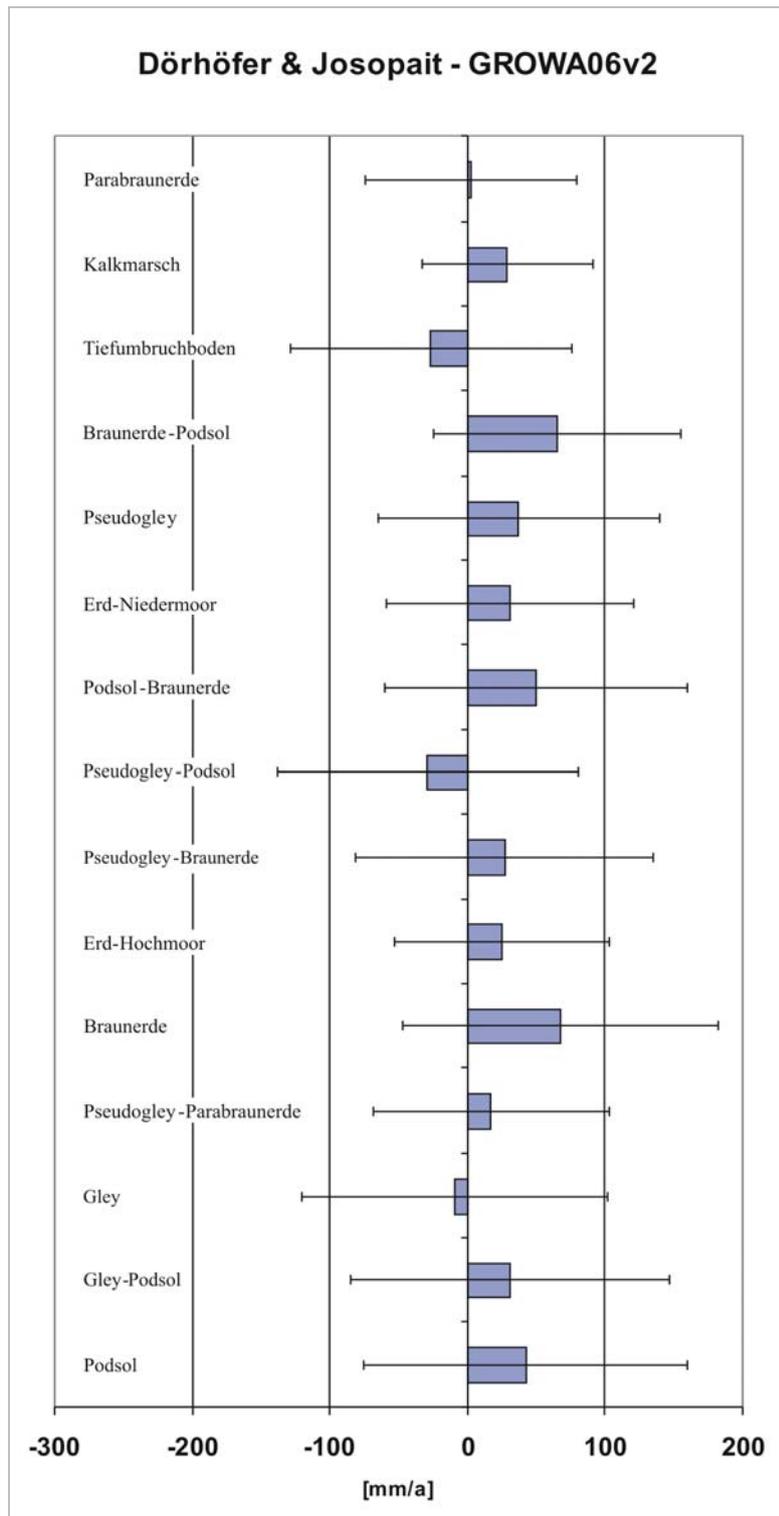


Abb. 14: Darstellung der mittleren Differenzen der Methoden auf Basis der Bodentypen. Positive Werte bedeuten hierbei, dass das Modell GROWA06V2 im Mittel eine geringere Grundwasserneubildungsrate berechnet, als das Modell Dörhöfer & Josopait. Die Balken stellen die Streuung der Differenzen innerhalb der Bodentypen dar (Standardabweichungen).

In Abbildung 14 sind die mittleren Differenzen der Modelle (inklusive Standardabweichung) auf Basis der Bodentypen dargestellt. Die Bodentypen sind hierbei nach ihrer Flächengröße (zunehmend von oben nach unten) geordnet. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Betrachtung der Geologie. Das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait berechnet bis auf wenige Ausnahmen eine höhere mittlere Grundwasserneubildungsrate als GROWA06V2. Die mittleren Differenzen der Methoden sind je nach Bodentyp verschieden. Sie geben zwar einen groben Trend vor; aufgrund der hohen mittleren Standardabweichung von 98 mm/a ist jedoch, wie bei der Betrachtung der Geologie, weder eine pauschale noch eine bodentypspezifische Umrechnung der Ergebnisse der Modelle mittels eines Korrelationskoeffizienten möglich.

3.3 Auswirkung der Änderung von Abflussquotient, Evapotranspiration und Niederschlag auf die berechnete Grundwasserneubildungsrate

Anhand eines Beispiels soll im Folgenden gezeigt werden, wie stark sich eine Änderung des Abflussquotienten im Vergleich zu einer Änderung der Evapotranspiration oder des Niederschlags auf die resultierende Grundwasserneubildungsrate auswirkt. Betrachtet wird ein Standort mit einem mittleren Niederschlag von 800 mm/a, einem Abflussquotienten von 1,7 und einer mittleren Evapotranspirationsrate von 400 mm/a (Abb. 15). Diese Bedingungen sind typisch für viele Gebiete in Niedersachsen.

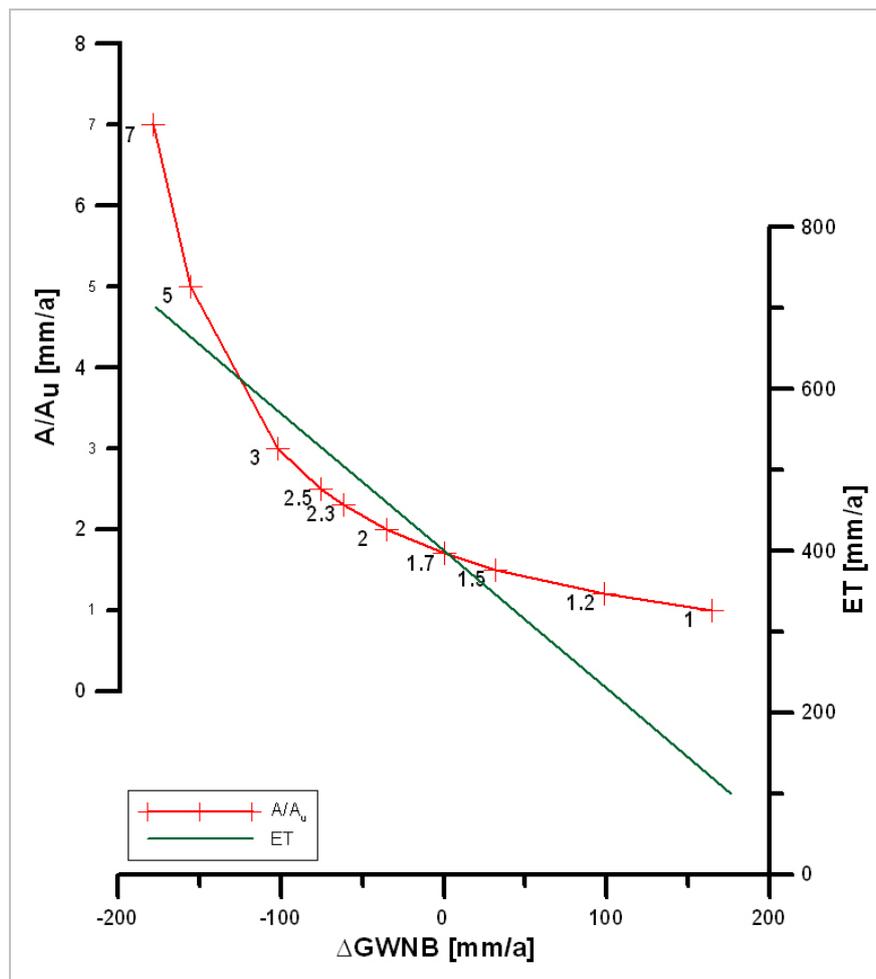


Abb. 15: Darstellung des Einflusses der Parameter Niederschlag und Evapotranspiration auf die resultierende Grundwasserneubildungsrate (ET = Evapotranspiration, GWNB = Grundwasserneubildungsrate).

Mit den oben angegebenen Parametern ergibt sich nach Gleichung 12 eine Grundwasserneubildungsrate von 235 mm/a. In Abbildung 15 sind reale Evapotranspiration (rechte Ordinate) und Abflussquotient (linke Ordinate) dargestellt. Auf der Abszisse ist die Änderung der Grundwasserneubildungsrate als Folge einer Änderung der ET_{real} oder des Abflussquotienten abgebildet.

Man erkennt, dass sich eine Änderung der Evapotranspiration linear auf die resultierende Grundwasserneubildungsrate auswirkt. Ebenso verhält es sich mit einer Änderung des Niederschlags (nicht in der Abbildung dargestellt). Eine Erhöhung des mittleren Niederschlags bzw. eine Herabsetzung der mittleren realen Evapotranspiration um 100 mm/a bewirkt eine Zunahme der mittleren Grundwasserneubildungsrate um etwa 60 mm/a.

Eine Änderung des Abflussquotienten hingegen wirkt sich nichtlinear auf die Grundwasserneubildungsrate aus; der Einfluss wird hierbei umso stärker, je kleiner der Abflussquotient ist. Eine Änderung des Abflussquotienten von beispielsweise 5,0 auf 7,0 setzt die Grundwasserneubildungsrate lediglich um etwa 20 mm/a herab. Verringert man jedoch den Abflussquotienten von beispielsweise 1,7 auf 1,2, so hat dies zur Folge, dass sich die Grundwasserneubildungsrate um fast 100 mm/a erhöht. Für die gleiche Erhöhung müsste die reale Evapotranspiration um fast 200 mm/a herabgesetzt werden.

Abflussquotienten von mehr als 3,0 werden in Niedersachsen, außer in den Küstengebieten, selten erreicht. Für die genaue Berechnung der Grundwasserneubildung ist also der Abflussquotient für die meisten Gebiete von entscheidender Bedeutung.

4 Vergleich mit anderen Verfahren

4.1 Lysimeter

4.1.1 Allgemeines und Durchführung

Ein Lysimeter ist ein Behälter, der ein Boden- oder Erdvolumen zwischen der Bodenoberfläche und einer angegebenen Tiefe isoliert und an seinem unteren Ende eine Vorrichtung zur Sickerwassersammlung aufweist (LANTHALER 2006). Hiermit sind In-situ-Untersuchungen von Evapotranspiration, Versickerung, Grundwasserneubildungsrate, Wasservorratsänderung, kapillarem Aufstieg und Transport sowie dem Austrag gelöster Stoffe möglich (SCHROEDER 1976, DVWK 1980, ATV-DVWK 2002). Die folgenden Informationen stammen aus mündlichen Mitteilungen von GROH (2007).

Das LBEG unterhält sechs in Niedersachsen verteilte Lysimeterstationen (Abb. 16). Hierbei handelt es sich um Lysimeter des Typs Friedrich-Franzen. Dieser Typ ist für Standorte mit landwirtschaftlicher Nutzung gut geeignet (SCHROEDER 1976). Da bei diesem Lysimeter-typ der Inhalt des Monolithen nicht gewogen werden kann (sog. nicht wägbares Lysimeter), sind Wasserbilanzen für kürzere Zeiträume nicht möglich (SCHROEDER 1976). An jeder Lysimeterstation ist auch ein Regenmesser nach Hellmann (HÖLTING 1996) installiert, wodurch die Niederschläge punktgenau an den jeweiligen Lysimeterstandorten gemessen werden können. Die Ränder der Lysimetergefäße ragen etwas über die Geländeoberkante hinaus, um die Lysimetergefäße vor möglichen oberirdischen Abflüssen zu schützen. Diese Ränder beeinflussen jedoch nicht die Winddynamik. In den Lysimeterkellern der Stationen sind jeweils zwei Lysimeter installiert. Hierdurch wird zum einen eine mögliche Fehlfunktion eines der beiden Lysimeter im laufenden Betrieb erkennbar, zum anderen erhält man eine gewisse Ausfallsicherheit. Die Lysimeter sind im gleichen Lysimeterkeller in einem Abstand von etwa einem halben Meter voneinander installiert. Die Grundwasserflurabstände sind an allen Standorten größer als 2 m. Nur am Standort Achim-Uesen kann Stauwasser auftreten. Eine Übersicht über wichtige Kenngrößen der Lysimeterstationen sind in Tabelle 17 aufgeführt. Die angegebenen Niederschläge wurden nach DVWK (1996) korrigiert.

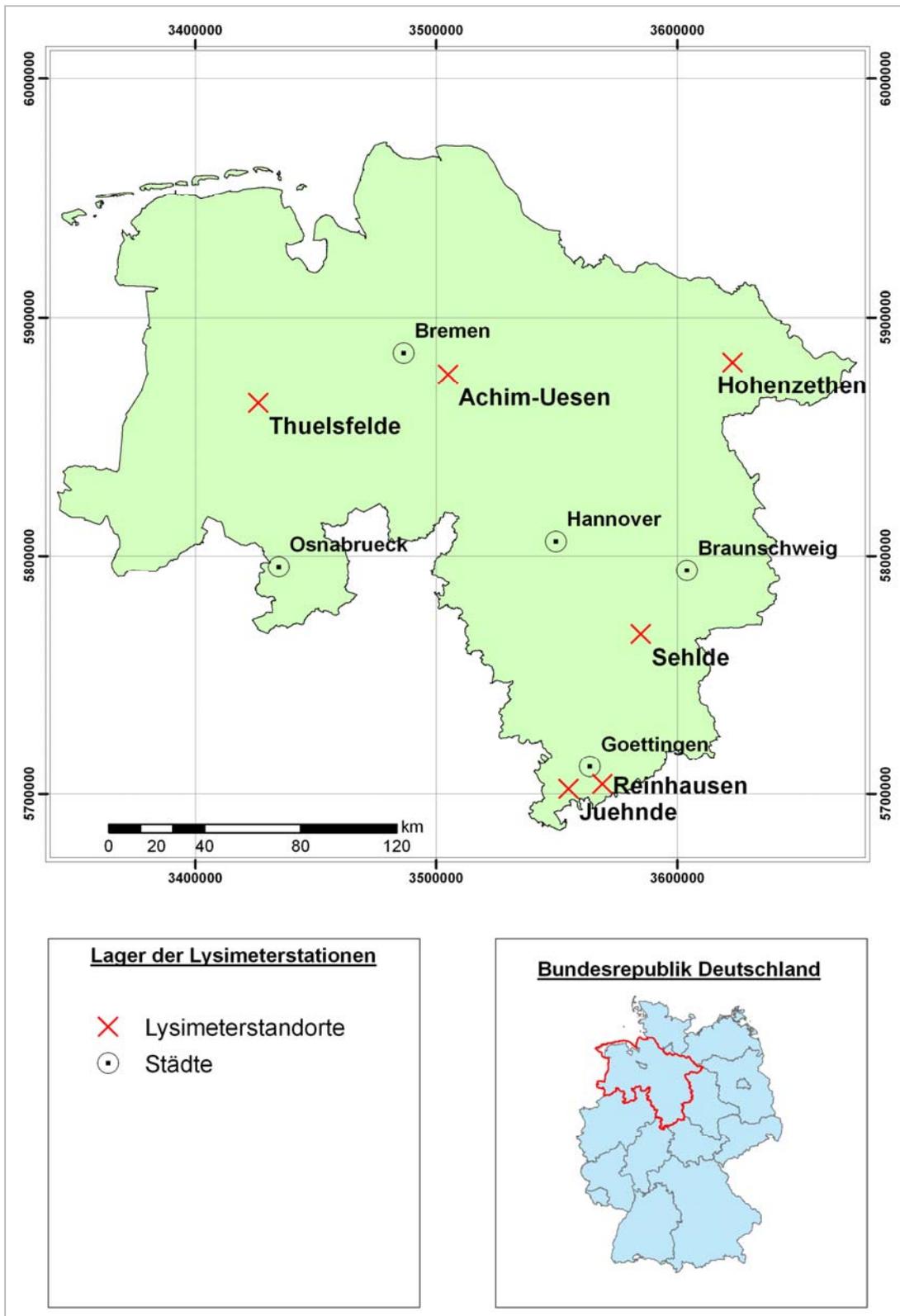


Abb. 16: Lage der Lysimeterstationen in Niedersachsen.

Tab. 17: Wichtige Kenngrößen der Lysimeterstationen.

Lysimeterstation	Tiefe [m]	Fläche [m ²]	Laufzeit ab	Bodentyp nach Kartierung	mittlerer Niederschlag während der Laufzeit [mm/a]
Thülsfelde	2	1	Jan. 01	mittlerer Podsol mit fester Orterde	842
Achim-Uesen	2	1	Feb. 02	mittlerer Pseudogley-Podsol mit Orterde	846
Hohenzethen	2	1	Feb. 01	mittlere Braunerde	803*
Sehlde	1	1	Feb. 03	flache Braunerde	k. A.
Reinhausen	1,5	1	Okt. 02	mittlerer Pelosol	614
Jühnde	1	1	Aug. 02	flache Rendzina mit geringer nutzbarer Feldkapazität	776

* Dieser Wert setzt sich zusammen aus 743 mm/a Niederschlag und 60 mm/a Beregnung.

k. A. = kein Wert vorhanden.

Aufgrund der räumlichen Verteilung unterscheiden sich die Lysimeterstandorte u. a. im Bodentyp und mittleren jährlichen Niederschlag.

Für die sechs Lysimeterstationen wurden in unterschiedlichen Zeitabständen (meist mehrmals pro Monat) die Sickerwassermengen bestimmt (s. Anhang 1–6). Für die Bestimmung der mittleren Sickerwasserrate in der Einheit mm/a wurde jeweils der erste April als Jahresanfang verwendet. Dies hat den Vorteil, dass man zum einen davon ausgehen kann, dass der Bodenwasserspeicher aufgefüllt ist, und zum anderen, dass keine durch Frost verzögerte Versickerung mehr auftritt (PROKSCH 1990, DVWK 1980). Die Lysimeteranlagen befinden sich allesamt auf ebenen Standorten ohne Schichten mit herabgesetzter Leitfähigkeit, so dass keine nennenswerten lateralen Wasserflüsse zu erwarten sind. Daher ist bei den hier betrachteten Lysimeterstationen die gemessene Sickerwasserrate der Grundwasserneubildungsrate gleichzusetzen (DVWK 1980, PROKSCH 1990, ZAHNOW 1995).

Im ersten Betriebsjahr eines Lysimeters kann es zu Fehlern, bedingt durch Änderungen im Stau- und Kapillarebereich, kommen (DVWK 1980). Aber auch andere, nicht systematische Fehler sind gerade in der Anlaufphase möglich (PROKSCH 1990). Tatsächlich weichen die gemessenen Sickerwasserraten der sechs hier betrachteten Anlagen im ersten Betriebsjahr deutlich von den übrigen Messjahren ab. Daher wurde trotz der ohnehin schon geringen Anzahl an Messjahren (s. Tab. 17) der Emp-

fehlung von PROKSCH (1990) gefolgt, nach der in die Berechnung zur Bestimmung der mittleren Grundwasserneubildungsrate das erste Betriebsjahr nicht mit einbezogen werden sollte.

Für die Bestimmung der mittleren Grundwasserneubildungsrate eines Lysimeterstandortes wurden zunächst die Sickerwassermengen der einzelnen Jahre addiert und durch die Anzahl der Jahre dividiert. Mit dem zweiten Lysimeter des Standortes wurde analog verfahren. Der Mittelwert dieser beiden Ergebnisse ergibt die mittlere Grundwasserneubildungsrate, bezogen auf die Betriebsdauer.

Eine Prüfung auf Veränderungen bzw. Inhomogenitäten der Lysimeter mittels Trendanalyse oder Doppelsummenkurve (DVWK 1980) ist bei den betrachteten Anlagen nicht möglich, da zum einen aufgrund der kurzen Messzeit keine ausreichende Datengrundlage besteht und zum anderen die Niederschlagswerte nicht in ausreichender Auflösung vorliegen. Die Sickerwassermengen der beiden Lysimeter eines Standortes zeigen jedoch im Allgemeinen keine großen Unterschiede.

Die von den Lysimeteranlagen ermittelten Grundwasserneubildungsraten wurden mit den von den Verfahren berechneten Werten verglichen.

4.1.2 Methodische Probleme und Unsicherheiten beim Vergleich mit Lysimeterdaten

Die Modelle für die Berechnung der Grundwasserneubildung sind für große Einzugsgebiete ausgelegt. Lysimeter liefern jedoch lediglich Punktwerte. Die Übertragung von Punktwerten auf größere Flächen ist generell nur dann möglich, wenn diese Flächen in allen relevanten Eigenschaften wie z. B. Bewuchs, Niederschlag, Hangneigung, mittlere Korngröße etc. homogen sind (DVWK 1980, ATV-DVWK 2002). Ist dies nicht der Fall, kann die Übertragung der Werte bei gravierenden Unterschieden dieser Eigenschaften unter Umständen problematisch sein (BALKE et al. 2000).

Maßstabsbedingt ist keines der betrachteten Modelle für die Bestimmung von punktgenauer Grundwasserneubildung geeignet. Dies liegt u. a. daran, dass nicht alle Eingangsparameter der Modelle eine ausreichende Auflösung aufweisen.

Die mittleren Niederschläge der Lysimeterstandorte, bezogen auf die Betriebsdauer, unterscheiden sich von den Niederschlagsdaten, die von den Modellen für die Berechnung verwendet werden. Aus diesem Grund ist ein direkter Vergleich von gemessener Sickerwasserrate und berechneter Grundwasserneubildungsrate problematisch.

Da der Betriebszeitraum der Lysimeterstationen lediglich drei bis fünf Jahre beträgt, sind Fehler durch die Bodenwasservorratsänderung trotz geeigneter Wahl des Beginnes des Lysimeterjahres nicht auszuschließen (ARMBRUSTER & KROHM 1976). Erst bei einer Betriebsdauer von mehr als zehn Jahren ist dieser Fehler vernachlässigbar (DVWK 1980).

Unterscheidet sich der Lysimeterinhalt in irgendeiner Form von der unmittelbaren Umgebung, so kann es dazu kommen, dass sich bestimmte Prozesse innerhalb des Monolithen vom umgebenden Boden unterscheiden. Dieser so genannte „Oaseneffekt“ (DVWK 1980, ATV-DVWK 2002) ist zu vermeiden. Nach BÖHM et al. (2002) kann es in einem Lysimeter, dessen Monolith bis zur Erdoberfläche reicht, zu erhöhter Verdunstung durch Strahlungsgewinn am Lysimeterrand sowie Beeinflussung des Bodenwärmestroms kommen.

Mindesttiefe von Lysimetern

Für die Mindesttiefe eines Lysimeters werden verschiedene Werte angegeben:

- die Mindesttiefe entspricht der Summe aus der Höhe des Kapillarbereichs, der Durchwurzelungstiefe und einer dazwischen liegenden, nicht durchwurzelten, immer feuchten Haftwasserzone (DVWK 1980),
- mindestens 1,5 m unter GOK (FRIEDRICH 1954, FRIEDRICH 1961, PROKSCH 1990),
- der Lysimeterboden muss mindestens 50 cm unterhalb der Wurzelgrenze liegen (ROTH, GÜNTHER & KNOBLAUCH 1994).

Die Lysimeteranlagen Jühnde und Sehle sind mit einem Meter Höhe sehr flachgründig, so dass sie keine der oben angegebenen Mindesttiefen erreichen. Da es sich bei den Mindesttiefen jedoch lediglich um Empfehlungen handelt, werden diese Stationen im Folgenden weiterhin berücksichtigt. Es können allerdings folgende Probleme auftreten:

- Am Boden des Lysimeters kann sich ein zeitweise ausgebildeter Sickerwasserstaubereich ausbilden. Reichen die Wurzeln der Vegetation an diese Zone heran, so können diese Pflanzen einen Teil ihres Wasserbedarfs daraus decken, was zu einer Unterschätzung der Sickerwasserrate führt (FRIEDRICH 1954, FRIEDRICH 1961, LÜTZKE 1964, DVWK 1980, KATZUR 1986). Dies kann auch, in abgeschwächter Form, in den übrigen Lysimetern eine Rolle spielen, da der Abstand zwischen Lysimeterboden und Pflanzenwurzeln laut bodenkundlicher Profilaufnahme an den Lysimeterstandorten oft deutlich weniger als 50 cm beträgt.
- Der Wasservorrat ist früher ausgeschöpft, als in höheren Bodensäulen (KATZUR 1986).
- Das Pflanzenwachstum kann wegen des verminderten Platzangebotes beeinträchtigt sein (FRIEDRICH 1954).

4.1.3 Ergebnisse

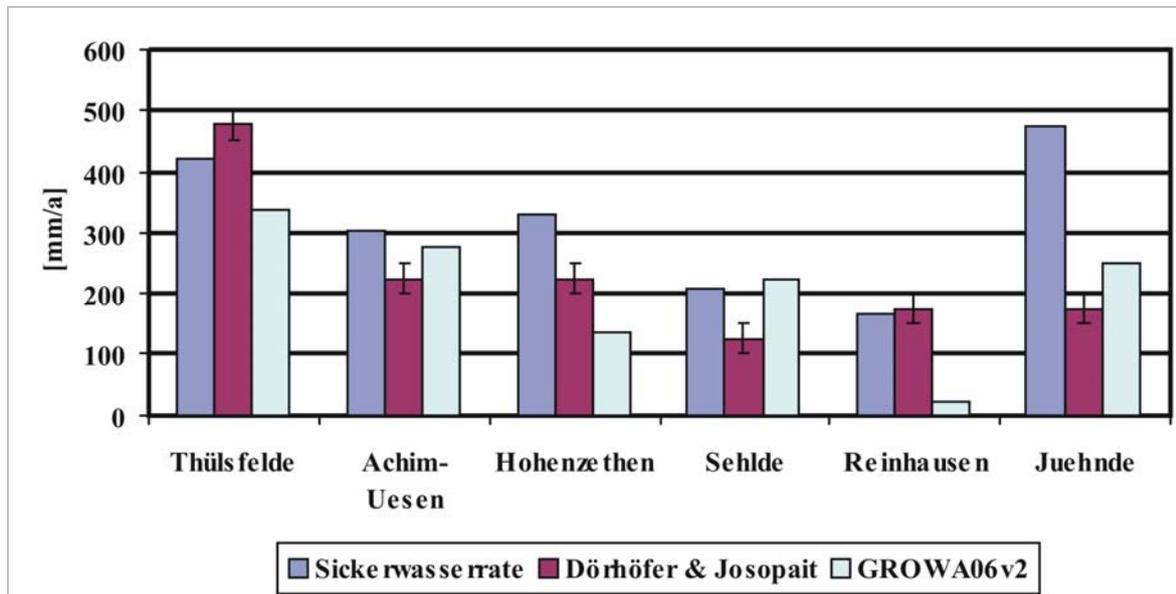


Abb. 17: Darstellung der Ergebnisse der Lysimeteruntersuchungen im Vergleich zu den berechneten Grundwasserneubildungsraten.

Abbildung 17 zeigt, dass die gemessenen Sickerwasserraten der Lysimeteranlagen Achim-Uesen, Sehlde und Juehnde am ehesten den mit GROWA06V2 berechneten Grundwasserneubildungsraten entsprechen. Für die Standorte Thülsfelde, Hohenzethen und Reinhausen zeigen die mit dem Verfahren nach Dörhöfer & Josopait berechneten Grundwasserneubildungsraten die besten Übereinstimmungen mit den Sickerwasserraten.

Tabelle 18 zeigt einen Vergleich der mittleren Abweichungen der berechneten Grundwasserneubildungsraten mit den gemessenen Sickerwasserraten. Der erste Wert gibt hierbei den Mittelwert der Differenzen an, der Wert in Klammern zeigt den Mittelwert des Betrages der Differenzen an. Man sieht, dass das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait im Mittel die geringeren Abweichungen zeigt.

Tab. 18: Mittlere Abweichungen der Modellergebnisse von den gemessenen Sickerwasserraten.

Modell	mittlere Abweichung [mm/a]
Dörhöfer & Josopait	83 (104)
GROWA06V2	109 (113)

4.1.4 Diskussion

Die drei Standorte Achim-Uesen, Sehlde und Juehnde unterscheiden sich untereinander maßgeblich in den in Tabelle 17 dargestellten Faktoren, so dass keine Schlüsse für die prinzipielle Eignung von GROWA06V2 für bestimmte Faktoren gezogen werden können. Auch die übrigen Standorte weisen Unterschiede in Bezug auf Bodentyp, Niederschlag, Laufzeit und Lysimetertiefe auf, so dass dort das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait ebenfalls nicht grundsätzlich für bestimmte Faktoren das zweckmäßigste Modell ist.

Aus den in Kapitel 4.1.2. beschriebenen Gründen ist eine Beurteilung der Modellergebnisse allein anhand von Lysimeterdaten problematisch. Für eine belastbare Aussage wäre die Auswertung von zusätzlichen Lysimetern erforderlich.

4.2 Pegeldaten

4.2.1 Allgemeines und Durchführung

In Niedersachsen gibt es ein engmaschiges Netz von Pegelmessstellen, die von den zuständigen Betriebsstellen des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) betrieben und regelmäßig ausgewertet werden. Der Großteil der Pegel des niedersächsischen Gebietes wird jährlich im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Teilband Weser- und Emsgebiet (z. B. NLÖ 1995) veröffentlicht. Aus diesen Daten gehen für die meisten Pegel unter anderem der mittlere monatliche Niedrigwasserabfluss (MoMNQ) und der Gesamtabfluss (A) hervor.

Der Vergleich der aus Pegelmessungen abgeleiteten Größen „Gesamtabfluss“, „unterirdischer Abfluss“ und „Abflussquotient“ mit den von den Modellen berechneten Werten soll zeigen, inwiefern die Ergebnisse der Modelle den realen Verhältnissen entsprechen.

Bei der Auswahl der hier benutzten Pegel wurden nur solche Pegel verwendet, die

- für die Validierung des Modells GROWA98 in DÖRHÖFER et al. (2001) bei gleichzeitiger Kenntnis der Größen „mittlerer Gesamtabfluss“ und „mittlerer unterirdischer Abfluss“ verwendet wurden,
- bei der Bestimmung des Abflussquotienten im Fest- sowie Lockergestein beim Modell Dörhöfer & Josopait Anwendung fanden, und
- möglichst von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) auf Deckungsgleichheit des oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebietes geprüft wurden.

Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass keines der Modelle durch die Auswahl der verwendeten Pegel bevorzugt wird. Die oben beschriebenen Kriterien trafen auf insgesamt zwölf Pegel zu, wobei die Einzugsgebiete von drei Pegeln überwiegend im Festgestein und von den übrigen neun Pegeln überwiegend im Lockergestein liegen. Die Lage und die Namen dieser Pegel sind in Abbildung 18 dargestellt.

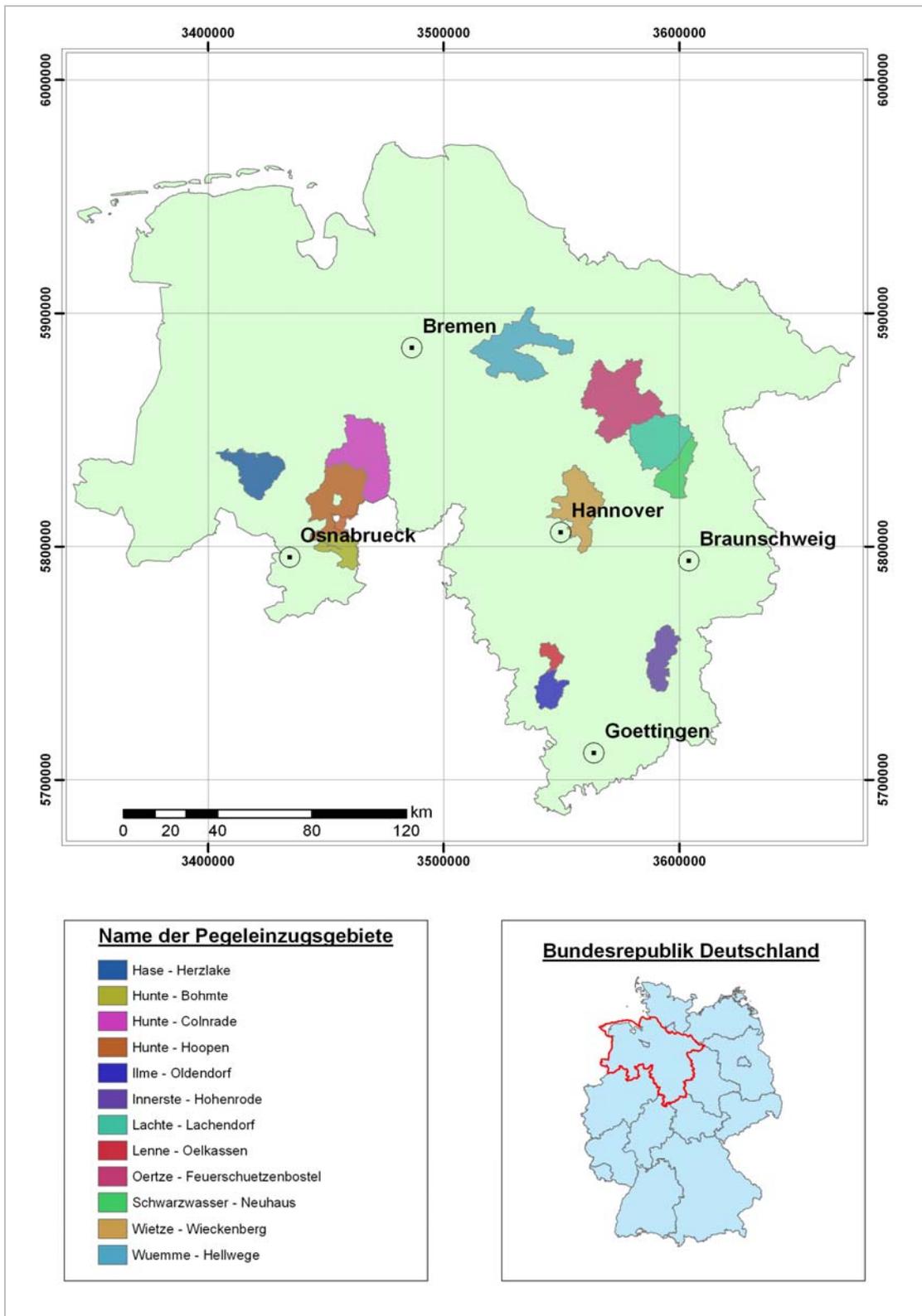


Abb. 18: Name und Lage der verwendeten Pegeleinzugsgebiete.

Die den Pegeln zugehörigen Einzugsgebiete wurden anhand der vom NLWKN bereitgestellten Hydrographischen Karte (NLWKN 2005) in ArcGis 9.1 (ESRI 2007) konstruiert. Zur Überprüfung der Gebiete wurde eine Abbildung der in DÖRHÖFER et al. (2001) verwendeten Einzugsgebiete digitalisiert und mit den für diese Arbeit konstruierten Einzugsgebieten verglichen. Die Abweichungen der Einzugsgebietsgrößen (Tab. 19) betragen hierbei im Mittel etwa 5 %. Diese geringe Abweichung ist vermutlich zum einen durch unvermeidliche Fehler bei der Digitalisierung und zum anderen durch die unterschiedliche Datenlage zu erklären. Die Lage der Einzugsgebiete in DÖRHÖFER et al. (2001) stimmt gut mit den hier konstruierten Einzugsgebieten überein.

Tab. 19: Unterschiede der in DÖRHÖFER et al. (2001) dargestellten und der in dieser Arbeit konstruierten Einzugsgebietsgrößen.

	Pegelname	A_{Einzugsgebiet} DÖRHÖFER et al. (2001) [km²]	A_{Einzugsgebiet} eigen [km²]	Differenz [%]
Festgestein	Innerste – Hohenrode	212	237	11,8
	Lenne – Oelkassen	65	71	9,2
	Ilme – Oldendorf	149	149	0,0
Lockergestein	Hunte – Bohmte	179	171	4,5
	Hase – Herzlake	323	317	1,9
	Wümme – Hellwege (Schleuse)	908	957	5,4
	Wietze – Wieckenberg	399	471	18,0
	Schwarzwasser – Neuhaus	210	211	0,5
	Hunte – Hoopen	772	726	6,0
	Hunte – Colnrade	1 318	1 274	3,3
	Lachte – Lachendorf	433	433	0,0
	Örtze – Feuerschützenbostel	738	741	0,4

Die Einzugsgebiete unterscheiden sich untereinander z. T. deutlich in Größe, mittlerem Niederschlag (BÖHNER 2004), mittlerer Hangneigung (LGN 2008b) und mittlerem Festgesteinsanteil (LBEG 2008c und Tab. 20). Dem Festgesteinsanteil kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, da sich Fest- und Lockergesteinsregionen bezüglich der Grundwasserneubildung deutlich unterscheiden (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980, DÖRHÖFER et al. 2001).

Tab. 20: Mittlere Hangneigung, mittlerer Niederschlag und mittlerer Festgesteinsanteil der betrachteten Pegel Einzugsgebiete.

	Pegelname	Fläche [km ²]	mittlere Hangneigung [°]	mittlerer Niederschlag [mm/a]	mittlerer Festgesteinsanteil [%]
Festgestein	Innerste – Hohenrode	236	4,5	1 016	71
	Lenne – Oelkassen	71	4,5	896	62
	Ilme – Oldendorf	149	3,8	948	71
Lockergestein	Hunte – Bohmte	171	1,5	749	7
	Hase – Herzlake	317	0,4	778	0
	Wümmme – Hellwege (Schleuse)	572	0,4	751	0
	Wietze – Wieckenberg	417	0,2	669	8
	Schwarzwasser – Neuhaus	211	0,3	689	0
	Hunte – Hoopen	501	0,4	706	2
	Hunte – Colnrade	550	0,2	693	0
	Lachte – Lachendorf	433	0,5	731	0
	Örtze – Feuerschützenbostel	693	0,5	759	0

Für alle zwölf Einzugsgebiete wurden die Größen „mittlerer grundwasserbürtiger Abfluss“, „mittlerer Gesamtabfluss“ und „mittlerer Abflussquotient“ mit Dörhöfer & Josopait und GROWA06V2 berechnet. Hierfür wurde das Programm ArcMap in den Versionen 9.1 (ESRI 2007) und 9.2 (ESRI 2008) benutzt.

Die aus den Pegelmessungen abgeleiteten mittleren Werte für Gesamtabfluss und unterirdischen Abfluss für die Zeitreihe 1961–1990 wurden DÖRHÖFER et al. (2001) entnommen. Aus diesen beiden Größen wurde zudem der Abflussquotient gebildet.

Diese Werte wurden mit den von den Modellen berechneten Werten verglichen. Hierfür wurde zweckgemäß jeweils der Betrag der Differenz zwischen den berechneten und den aus den Pegelmessungen abgeleiteten Werten verwendet.

4.2.2 Probleme und Unsicherheiten

Die aus den Pegeluntersuchungen abgeleiteten Größen können mit Fehlern behaftet sein. Ein großes Problem ist, dass sich das oberirdische Einzugsgebiet vom unterirdischen Einzugsgebiet unterscheiden kann, so dass beträchtliche Wassermengen am Pegel vorbei-

fließen können (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990, HÖLTING 1996). Da die in dieser Arbeit verwendeten Pegel jedoch von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) auf diesen Sachverhalt geprüft wurden, ist dies hier nicht zu erwarten. Lediglich bei dem Pegel Ilme-Oldendorf war dieses Problem bekannt, wurde aber nicht weiter konkretisiert, und die Werte wurden trotzdem bei der Modellentwicklung von Dörhöfer & Josopait verwendet (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980). Eventuell durch Verkrautungen oder häufige Änderungen in der Gerinnehydraulik entstandene Messfehler wurden laut Auskunft der zuständigen Betriebsstellen des NLWKN bei allen Pegeln durch das η -Verfahren (PEGELVORSCHRIFT 1991) eliminiert. Hinzu kommt, dass auch die Abgrenzung der oberirdischen Einzugsgebiete fehlerbehaftet sein kann. Stichprobenartige Berechnungen zeigten allerdings, dass sich eine geringfügige Änderung der Einzugsgebietsgröße im Normalfall nicht signifikant auf das Ergebnis der Berechnungen auswirkt.

Wie schon in DÖRHÖFER et al. (2001) erläutert, sind die oben beschriebenen Berechnungen nur gültig, wenn sämtlicher Abfluss des Einzugsgebietes das Gerinne am Pegel passiert und die aus den Pegeln abgeleiteten Größen korrekt sind.

4.2.3 Ergebnisse

Gesamtabfluss

Die mittleren Abweichungen des Gesamtabflusses liegen bei beiden Verfahren in etwa im gleichen Bereich (Tab. 21), wobei die Abweichungen in Festgesteinsgebieten deutlich größer sind, als in Lockergesteinsgebieten.

Tab. 21: Differenzen der berechneten und der aus Pegeldata abgeleiteten mittleren Gesamtabflüsse der betrachteten Pegelzugsgebiete.

	Differenz Gesamtabfluss [mm/a]	Dörhöfer & Josopait	GROWA06V2
Festgestein	Innerste – Hohenrode	108,73 ± 12,5	97,1
	Lenne – Oelkassen	67,22 ± 12,5	57,09
	Ilme – Oldendorf	73,26 ± 12,5	71,08
	Mittelwert	83,07 ± 12,5	75,09
	Standardabweichung	18,31	16,58
Lockergestein	Hunte – Bohmte	58,03 ± 12,5	31,92
	Hase – Herzlake	1,81 ± 12,5	65,66
	Wümme – Hellwege (Schleuse)	25,47 ± 12,5	85,94
	Wietze – Wieckenberg	4,49 ± 12,5	20,31
	Schwarzwasser – Neuhaus	7,59 ± 12,5	1,96
	Hunte – Hoopen	18,28 ± 12,5	39,46
	Hunte – Colnrade	5,71 ± 12,5	37,23
	Lachte – Lachendorf	71,78 ± 12,5	3,3
	Örtze – Feuerschützenbostel	57,55 ± 12,5	25,59
	Mittelwert	27,86 ± 12,5	34,6
	Standardabweichung	25,7	25,75

Abflussquotient

Die mittleren Abweichungen des Abflussquotienten sind bei dem Modell Dörhöfer & Josopait deutlich geringer, als bei GROWA06V2 (Tab. 22). Das gilt sowohl für Festgesteins- als auch für Lockergesteinsgebiete. Auch hier sind die Abweichungen der Einzugsgebiete im Festgestein deutlich höher, als bei den Einzugsgebieten im Lockergestein.

Tab. 22: Differenzen der berechneten und der aus Pegeldata abgeleiteten mittleren Abflussquotienten der betrachteten Pegelinzugsgebiete.

	Differenz Abflussquotient [mm/a]	Dörhöfer & Josopait	GROWA06V2
Festgestein	Innerste – Hohenrode	0,31	0,38
	Lenne – Oelkassen	0,23	0,16
	Ilme – Oldendorf	0,12	1,62
	Mittelwert	0,22	0,72
	Standardabweichung	0,08	0,64
Lockergestein	Hunte – Bohmte	0,03	0,01
	Hase – Herzlake	0,02	0,11
	Wümme – Hellwege (Schleuse)	0,17	0,34
	Wietze – Wieckenberg	0,11	0,25
	Schwarzwasser – Neuhaus	0,22	0,54
	Hunte – Hoopen	0,37	0,24
	Hunte – Colnrade	0,32	0,07
	Lachte – Lachendorf	0,23	0,37
	Örtze – Feuerschützenbostel	0,1	0,17
	Mittelwert	0,17	0,23
	Standardabweichung	0,11	0,19

Grundwasserneubildungsrate

Betrachtet man die Grundwasserneubildung, so zeigt sich, dass das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait im Festgestein die geringsten Abweichungen zu den aus Pegeldaten abgeleiteten Werten aufweist (Tab. 23). In den Lockergesteinsgebieten zeigt hingegen das Modell GROWA06V2 die geringsten Abweichungen.

Tab. 23: Differenzen der berechneten und der aus Pegeldaten abgeleiteten mittleren Grundwasserneubildungsraten der betrachteten Pegelinzugsgebiete.

	Differenz mittlere Grundwasserneubildungsrate [mm/a]	Dörhöfer & Josopait	GROWA06V2
Festgestein	Innerste – Hohenrode	11,05 ± 25	6,85
	Lenne – Oelkassen	59,48 ± 25	39,17
	Ilme – Oldendorf	23,57 ± 25	137,94
	Mittelwert	31,37 ± 25	61,32
	Standardabweichung	20,53	55,76
Lockergestein	Hunte – Bohnte	42,03 ± 25	15,66
	Hase – Herzlake	17,04 ± 25	26,52
	Wümme – Hellwege (Schleuse)	54,01 ± 25	4,36
	Wietze – Wieckenberg	5,26 ± 25	32,76
	Schwarzwasser – Neuhaus	71,42 ± 25	53,7
	Hunte – Hoopen	1,06 ± 25	26,1
	Hunte – Colnrade	10,29 ± 25	10,02
	Lachte – Lachendorf	111,35 ± 25	44,66
	Örtze – Feuerschützenbostel	104,03 ± 25	10,69
	Mittelwert	46,28 ± 25	24,94
	Standardabweichung	38,41	17,53

4.2.4 Diskussion

Die Abweichungen der berechneten Gesamtabflüsse von den aus den Pegeldaten abgeleiteten Werten fallen bei beiden Modellen etwa gleich aus. Die differenziertere und aktuellere Datengrundlage des Modells GROWA06V2 für die Berechnung der Niederschlagsraten und der realen Evapotranspirationsraten bringt also für die hier untersuchten Gebiete keinen deutlichen Vorteil bezüglich der Berechnung der Gesamtabflussrate im Vergleich zu den von dem Modell Dörhöfer & Josopait berechneten Werten.

Tabelle 21 und 22 zeigen die Mittelwerte der Beträge der Abweichungen der von den Modellen berechneten Werte gegenüber den aus den

Pegeldaten abgeleiteten Werten. Dies dient dazu, die Spannweite dieser Abweichungen aufzuzeigen. Der Nachteil ist allerdings, dass man diese Tabellen nicht zur Bewertung der berechneten mittleren Grundwasserneubildungsrate heranziehen kann, da sich negative und positive Abweichungen der einzelnen Glieder der Gleichung 12 gegenseitig aufheben können.

Die Tatsache, dass das Modell Dörhöfer & Josopait im Festgestein die geringeren Abweichungen für die mittlere Grundwasserneubildungsrate zeigt, lässt sich durch die genaueren Abflussquotienten in diesen Gebieten erklären. Warum aber das Modell GROWA06V2 im Lockergestein die besseren Werte zeigt, ist nicht direkt erkennbar, da die von den Modellen be-

rechneten Werte für die Abflussquotienten und die mittleren Gesamtabflussraten in etwa im gleichen Bereich liegen. Schaut man sich die absoluten Abweichungen der berechneten Werte im Vergleich zu den aus den Pegeldaten abgeleiteten Daten an, so sieht man, dass sich die Fehler bei GROWA06V2 tatsächlich gegenseitig aufheben, so dass in der Summe die Abweichungen von den abgeleiteten Werten geringer ausfallen, als bei dem Modell Dörhöfer & Josopait.

Zur Veranschaulichung werden in Abbildung 19 die von den Modellen berechneten und die aus den Pegeldaten abgeleiteten Grundwasserneubildungsraten für jedes be-

trachtete Pegelinzugsgebiet graphisch gegenübergestellt. Zudem sind die Regressionsgeraden der Punktwerte für jedes Modell dargestellt. Die Abweichungen bei dem Modell GROWA06V2 sind unregelmäßig um die Identitätslinie angeordnet. Die Ergebnisse nach Dörhöfer & Josopait sind ausnahmslos höher als die aus den Pegeldaten abgeleiteten Werte. Die Regressionsgerade für die Wertepaare des Modells Dörhöfer & Josopait und die aus den Pegeldaten abgeleiteten Werte verläuft als einzige weitgehend parallel zur Identitätslinie, so dass eine pauschale Umrechnung der Ergebnisse möglich erscheint. Da das Bestimmtheitsmaß r^2 lediglich bei 0,518 liegt (Tab. 24), ist dies jedoch nicht sinnvoll.

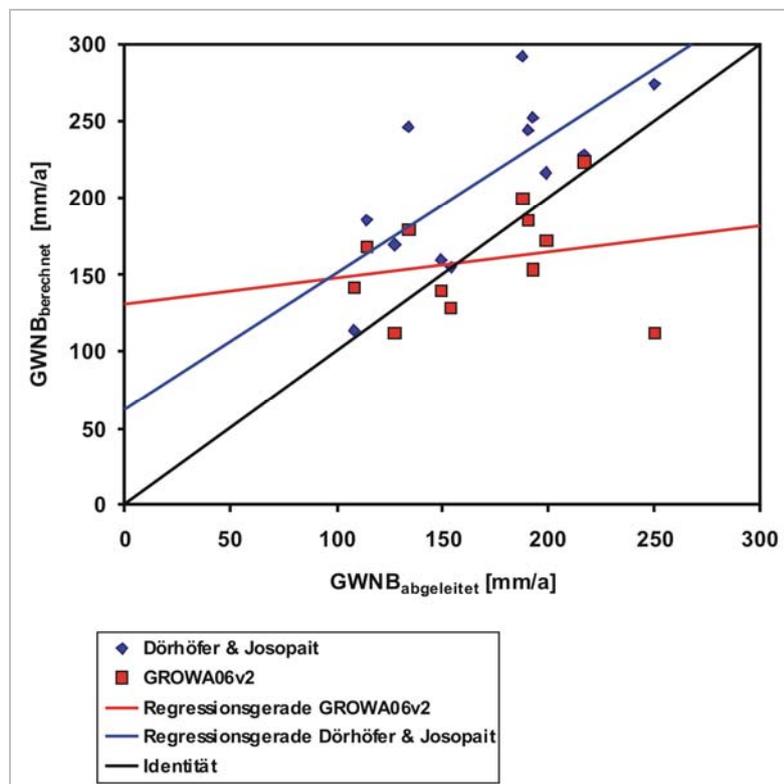


Abb. 19: Gegenüberstellung der von den Modellen berechneten mit den aus den Pegeldaten abgeleiteten mittleren Grundwasserneubildungsraten (mit Regressionsgeraden).

Tab. 24: Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden.

aus Pegeldaten abgeleitete Werte, verglichen mit den Werten des Modells	Regressionsgerade r^2
Dörhöfer & Josopait	0,518
GROWA06V2	0,046

5 Schlussbetrachtung

Der Vergleich der Methoden untereinander hat gezeigt, dass die Unterschiede der berechneten Grundwasserneubildungsraten nicht allein auf Geologie oder Bodentyp zurückzuführen sind. Vor allem aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen der Eingangsdaten schwanken die Unterschiede der Modellergebnisse auf den verschiedenen Bodentypen und geologischen Systemen erheblich (vgl. Kap. 3.2.1. und 3.2.2.). Daher ergibt auch eine pauschale sowie bodentyp- bzw. systemspezifische Umrechnung der Modellergebnisse durch Koeffizienten keine besseren Werte.

Der Vergleich der Modellergebnisse mit den Daten der sechs Lysimeterstationen zeigt, dass das Modell GROWA06V2 für die Lysimeterstandorte Achim-Uesen, Sehlde und Juehnde die besten Übereinstimmungen aufweist. Für die übrigen drei Standorte stimmt die mit dem Verfahren nach Dörhöfer & Josopait berechnete Grundwasserneubildungsrate am besten mit den gemessenen Sickerwasserraten überein. Insgesamt lassen die Vergleiche der Methodenergebnisse mit den Auswertungen der Lysimeterergebnisse keine Aussagen zur Güte der berechneten Grundwasserneubildungsdaten zu.

Die Auswertung der Pegeldaten zeigt, dass das Verfahren nach Dörhöfer & Josopait im Festgestein für die mittlere Grundwasserneubildungsrate im Mittel die geringsten Abweichungen von den aus den Pegeldaten abgeleiteten Werten zeigt. Das Modell gibt für diese Bereiche somit, unter Einhaltung der unter Kapitel 4.2.2. genannten Bedingung, die natürlichen Verhältnisse in Bezug auf die Grundwasserneubildung am besten wieder. Für die Lockergesteinsgebiete hingegen liefert das Modell GROWA06V2 die besseren Ergebnisse. Aufgrund der guten Ausgangsdatenlänge und der Tatsache, dass die Betrachtung der Pegelzugsgebiete den Maßstabsvorgaben der Modelle entspricht, ist der Vergleich der berechneten Werte mit den aus den Pegeldaten abgeleiteten Werten zweckmäßig und aussagekräftig.

Die in dieser Arbeit herausgearbeiteten Ergebnisse geben allerdings Anlass zu einer Anpassung der Darstellung der Ergebnisse des Modells GROWA06V2. So erscheint die auf die Einerstelle genaue Angabe der Grundwasser-

neubildungsrate angesichts der vielen Unsicherheiten problematisch. Die in Tabelle 23 angegebenen Mittelwerte legen eine Aufteilung der Grundwasserneubildungsraten in Stufen, wie es bei dem Verfahren nach Dörhöfer & Josopait bereits der Fall ist, nahe. Die Spanne sollte hierbei mindestens 25 mm/a betragen. Alternativ ist eine Ausweisung der mittleren Grundwasserneubildungsrate in einem kleineren Maßstab denkbar, da so kleinräumige Detailprobleme vermieden werden können.

Darüber hinaus werden anthropogene Beeinflussungen, wie zum Beispiel Wasserwerke, bei GROWA06V2 nicht berücksichtigt. Da größere Grundwasserentnahmen bzw. -einleitungen die hydrologischen Verhältnisse sehr stark beeinflussen können (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990), ist im Bedarfsfall unter Berücksichtigung dieser Einflüsse eine Anpassung der Werte aus dem Modells GROWA06V2 zu empfehlen.

Beide Modelle arbeiten mit Eingangsdaten der Zeitreihe 1961–1990. Bei der Anwendung der Ergebnisse sind Änderungen in der klimatischen Wasserbilanz zu berücksichtigen.

6 Literaturverzeichnis

- ARMBRUSTER, J. & KOHM, J. (1976): Auswertung von Lysimetermessungen zur Ermittlung der Grundwasserneubildung in der badischen Oberrheinebene. – *Wasser u. Boden* **11**: 302–306, 5 Abb., 3 Tab.; Berlin (Parey).
- ATV-DVWK-REGELWERK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. – Merkblatt ATV-DVWK **M 504**: 144 S., 33 Abb., 51 Tab.; Rheinbach (Moser).
- BALKE, K. D., BEIMS, U., HEERS, F. W., HÖLTING, B., HOMRIGHAUSEN, R. & MATTHESS, G. (2000): Grundwassererschließung. – in: Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht: 740 S., 398 Abb., 81 Tab.; Stuttgart (Borntraeger).
- BASTIAN, O. & SCHREIBER, K. F. (1994): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. – 502 S., 94 Abb., 130 Tab.; Stuttgart (Gustav Fischer).
- BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.-J. (Hrsg.) (1990): Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. – Lehrbuch der Hydrologie **1**: 673 S., 336 Abb., 127 Tab.; Berlin (Borntraeger).
- BIERSTEDT, W. (1991): Vergleich von Berechnungsverfahren zur Grundwasserneubildung. – *Wasserwirtschaft - Wassertechnik* **3**: 102–103, 114, 2 Abb.; München (Huss Medien).
- BÖHM, K. E., CEPUDER, P., EDER, G., FANK, J., FEICHTINGER, F., FÜHR, F., GAUDLITZ, H., GERZABEK, M. H., HINREINER, G., HOLZMANN, H., KLOTZ, D., KNAPPE, S., KRENN, A., LEIS, A., MEISSNER, R., MITTELSTAEDT, W., NACHTNEBEL, H. P., PÜTZ, TH., RIESING, J., RUPP, H., SEEGER, J., UNOLD, G. & VERECKEN, H. (2002): Lysimeter - Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte. – *Beitr. zur Hydrogeol.* **53**: 115–232, 53 Abb., 27 Tab.; Graz (CLASSIC).
- BÖHNER, J. (2004): Regionalisierung bodenrelevanter Klimaparameter für das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). – *Arb.-H. Boden* **2004/4**: 17–66, 23 Abb., 4 Tab.; Hannover (BGR & NLfB).
- BOGENA, H., KUNKEL, R., SCHÖBEL, T., SCHREY, H.-P. & WENDLAND, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. – *Schr. d. FZJ, Reihe Umwelt/Environment* **37**: 148 S., 22 Abb., 28. Tab., 22 Kt.; Jülich (Forschungszentrum Jülich).
- BRÜNING, K. (1961): Reliefenergie in Niedersachsen. – *N. Arch. Niedersachsen* **10** (15): Heft 1: 1–16; Hannover (Hinck).
- DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1994): DIN 4049-3, Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. – 80 S.; Berlin (Beuth).
- DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1979): Verfahrensgang zur flächendifferenzierten Kartendarstellung der Grundwasserneubildungsrate in Locker- und Festgesteinsgebieten im Maßstab 1 : 200 000. – *Ber. Arch. Niedersächs. L.-Amt Bodenforsch.* **0085645**; Hannover [Unveröff.].
- DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. – *Geol. Jb.* **C 27**: 45–65, 13 Abb., 1 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- DÖRHÖFER, G., KUNKEL, R., TETZLAFF, B. & WENDLAND, F. (2001): Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen. – *Arb.-H. Wasser* **2001/1**: 109–167, 11 Abb., 16 Tab., 15 Kt.; Hannover (NLfB).
- DVWK - DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern. – *DVWK-Regeln zur Wasserwirtsch.* **114**: 52 S., 32 Abb., 3 Tab.; Hamburg (Parey).
- DVWK - DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. – *DVWK-Merkblätter* **238**: 135 S., 40 Abb., 64 Tab., 1 Kt.; Bonn (Gas und Wasser).
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (1977): Mittlere Niederschlagshöhen [mm], Jahr, Periode 1931–1960. – Offenbach.
- ELSHOLZ, M. & BERGER, H. (1998): Hydrologische Landschaften im Raum Niedersachsen. – *Oberirdische Gewässer* **6**: 26 S., 8 Abb., 5 Tab.; Hannover.

- ESRI (2007): ArcGis 9.1. – Computerprogramm; Redlands.
- ESRI (2008): ArcGis 9.2. – Computerprogramm; Redlands.
- FRIEDRICH, W. (1954): Lysimetermessungen und andere gewässerkundliche Verfahren zur Ermittlung der Grundwassererneuerung. – Z. dt. Geol. Ges. **106**: 41–48, 4 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart).
- FRIEDRICH, W. (1961): Neue Werte für die Grundwassererneuerung (nach Lysimetermessungen). – Z. dt. Geol. Ges. **113**: 12–21, 3 Abb., 3 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GERBER, S. (2002): Entwicklung einer Methodik zur kleinmaßstäbigen Analyse und Bewertung von Versauerungspotentialen am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Saale. – Diplomarbeit, Geographisches Institut der Technischen Universität Dresden [Unveröff.].
- GOLF, W. (1981): Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge. – WWT **36**, Heft 3: 93–95, 5 Abb., 2 Tab.; Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).
- GROH, H. (2007): mündliche Mitteilung.
- GROSSMANN, J. (1997): Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung für große Einzugsgebiete. – Das Gas- und Wasserfach - Ausgabe Wasser/Abwasser **138** (6): 296–303, 4 Abb., 3 Tab.; München (Oldenbourg Industrieverlag).
- HAAS, D. (1987): Ermittlung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate - Erläutert an einem Beispiel aus dem ostwestfälischen Bergland. – Lippische Mitt. Gesch. u. Landeskd. **56**: 199–213, 6 Abb., 2 Tab.; Detmold (Meyersche Hofbuchhandlung).
- HAERTLÉ, T. (1983): Geologisch-hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im niedersächsischen Bereich der Unteren Elbe. – 91 S., 16 Abb., 1 Tab., Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg [Unveröff.].
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 5. Aufl.: 439 S., 114 Abb., 46 Tab.; Stuttgart (Enke).
- JOSOPAIT, V. (2007): mündliche Mitteilung.
- KATZUR, J. (1986): Einfluss der Tiefe grundwasserfreier Lysimeter ohne Unterdruck auf Sickerwasserablauf und Verdunstung. – Arch. f. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd. **30** (4): 227–233, 3 Abb., 2 Tab.; Berlin (Akademie).
- KÖTHE, R., BÖHNER, J. & RINGELER, A. (1997): Weiterentwicklung des Programmsystems SARA und SADO zur Regionalisierung bodenkundlich relevanter Geofaktoren. – zitiert in: DÖRHÖFER et al. [Hrsg.] (2001): Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen. – Arb.-H. Wasser 2001/1: 109–167, 11 Abb., 16 Tab., 15 Kt.; Hannover.
- KUNKEL, R. & WENDLAND, F. (1998): Der Landschaftswasserhaushalt im Flusseinzugsgebiet der Elbe - Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen. – Schr. d. FZJ, Reihe Umwelt/Environment **12**: 107 S., 12 Abb., 8 Tab., 14 Kt.; Jülich (Forschungszentrum Jülich).
- LANTHALER, C. (2006): Lysimeter in Europa: Übersicht über Ziele und Aufgaben. – Möglichkeiten und Grenzen der Sickerwasserbeprobung: FH-DGG-Tagung Indikatoren im Grundwasser, 24. Mai 2006 in Cottbus.
- LBEG - LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (2008a): GÜK 200 - Geologische Übersichtskarte 1 : 200 000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.
- LBEG - LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (2008b): BSK 200 - Bodenkundliche Standortkarte 1 : 200 000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.
- LBEG - LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (2008c): BÜK 50 – nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Niedersachsen 1 : 50 000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.
- LGN - LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN (Hrsg.) (2003): ATKIS® - Amtliches topographisches Karteninformationssystem - DLM 25.2. – Hannover.
- LGN - LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN (2008a): DGM 50 – Digitales Geländemodell (Auflösung 50 m). – Hannover.

- LGN - LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATIONEN NIEDERSACHSEN (2008b): DGM 250 – Digitales Geländemodell (Auflösung 250 m). – Hannover.
- LÜTZKE, R. (1964): Über die Tauglichkeit der Lysimetermethode für Wasserhaushaltsuntersuchungen und Vergleichsmessungen mit Groß- und Kleinlysimetern. – Besondere Mitt. zum Gewässerkundl. Jb. der Dt. Demokratischen Republik: 43 S., 7 Abb., 2 Tab.; Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).
- MATTHESS, G. & UBELL, K. (2003): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 1: 2. Aufl., XII, 575 S., 249 Abb., 83 Tab.; Berlin (Borntraeger).
- MÜLLER, U. (2004): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – 7. erw. und erg. Aufl., Arb.-H. Boden 2004/2: 409 S. 3 Abb., 405 Tab.; Hannover (NLFb).
- MÜLLER, U. (2007): mündliche Mitteilung.
- NLÖ - NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (Hrsg.) (1995): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet 1990. – Hildesheim.
- NLWKN - NIEDERSÄCHSISCHES LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2005): Hydrographische Karte, Niedersachsen. – Stand 2005; Hildesheim.
- OTTO, R. (1992): Ein Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate unter Berücksichtigung ihrer örtlichen Verteilung. – Z. dt. Geol. Ges. **143**: 411–420, 3 Abb., 10 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- PEGELVORSCHRIFT (1991): Anlage D - Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. – 108 S., 41 Abb., 8 Tab.; Hamburg (Parey).
- PREUSS, H. & VINKEN, R. (1991): Symbolschlüssel Geologie. Symbole für die Dokumentation und Automatische Datenverarbeitung geologischer Feld- und Aufschlußdaten. – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): 3. Aufl., 328 S., 21 Tab.; Hannover.
- PROKSCH, W. (1990): Lysimeterauswertungen zur flächendifferenzierten Ermittlung mittlerer Grundwasserneubildungsraten. – Besondere Mitt. zum Dt. Gewässerkundl. Jb. **55**: 74 S., 19 Abb., 7 Tab., Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.); Koblenz.
- RENGER, M. & WESSOLEK, G. (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. – Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München (Hrsg): Folgen anthropogener Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbewirtschaftung, 5. wissenschaftl. Tagung „Hydrologie und Wasserwirtschaft“, 2.–4. April 1990 in Neubiberg bei München: 295–305, 1 Tab.; München.
- RENGER, M. & WESSOLEK, G. (1996): Berechnung der Verdunstungsjahresnummern einzelner Jahre. – DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtsch. **238**: 47; Bonn (Gas und Wasser).
- RÖDER, M. (1992): Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate für Planungen im Maßstab 1 : 50 000 - Beispiel des Landschaftsrahmenplanes „Sächsische Schweiz“. – Naturschutz u. Landschaftsplanung **24**, Heft 2: 54–57, 5 Tab.; Stuttgart (Ulmer).
- ROTH, D., GÜNTHER, R. & KNOBLAUCH, S. (1994): Technische Anforderungen an Lysimeteranlagen als Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. – Z. Bewässerungswirtschaft **2**: 194–216, 9 Abb., 6 Tab.; Frankfurt a. M. (DLG).
- SBRESNY, J. (2008): mündliche Mitteilung.
- SCHÄFER, W. (2007): schriftliche Mitteilung.
- SCHROEDER, M. (1976): Grundsätzliches zum Einsatz von Lysimetern - Erfahrungen aus Nordrhein-Westfalen. – Dt. Gewässerkundl. Mitt. **20** (1): 8–13, 5 Abb.; Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.); Koblenz.
- SCHRÖDER, M. & WYRWICH, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Methode zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. – Dt. Gewässerkundl. Mitt. **34** (1–2): 12–16, 2 Tab.; Koblenz.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.) (1997): CORINE - Coordinated Information on the European Environment - Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland. – Wiesbaden.
- WALDECK, A. (2008): mündliche Mitteilung.

- WENDLING, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO-Penman-Monteith-Beziehung. – *Wasserwirtsch.* **85** (12): 602–604, 3 Tab.; Wiesbaden (Vieweg).
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – in: GRAHAM, R. (Hrsg.): *Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung.* – *Forsch. dt. Landeskd.* **104**: 47–54, 5 Abb.; Remagen.
- ZAHNOW, V. (1995): Bodenwasserhaushalt, dargestellt an Bodenfeuchte- und Lysimeter-Messwerten. – *Grundwasser-Monitoring: Vorträge des Fortbildungslehrgangs der Hessischen Landesanstalt für Umwelt*, 20. April 1994 in Lollar: 1–9, 9 Abb.; Wiesbaden.

7 Anhang

Anhang 1: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Achim-Uesen.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
08.02.2002	40	37
01.03.2002	11	6
15.03.2002	32	23
26.03.2002	14	13
12.04.2002	7,5	10
25.04.2002	7	11
10.05.2002	23	22
28.06.2002	6,5	8
12.08.2002	45,5	43,5
02.09.2002	40	39
26.09.2002	8	6
18.10.2002	14	11
01.11.2002	37	30
15.11.2002	40	41
29.11.2002	40	40
18.12.2002	20	22
17.01.2003	113	112
11.02.2003	75	75
25.02.2003	14	12
14.03.2003	21	26
25.03.2003		
22.05.2003	12	15
12.01.2004	22	23,5
06.02.2004	70	70
20.02.2004	25	22
05.03.2004	12	18
19.03.2004	5	9
01.04.2004	5	9
23.04.2004	8,5	9
19.05.2004	34	33
16.07.2004	6	7
24.09.2004	0	0
01.10.2004	40,5	39,5
15.10.2004	17	21
27.10.2004	8	11
12.11.2004	17	17
26.11.2004	56	56
03.12.2004	24	20
16.12.2004	17	21
05.01.2005	38	37

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
10.01.2005	12	11
24.01.2005	23	24
08.02.2005	34	30
24.02.2005	42	35
11.03.2005	19	21
01.04.2005	43	43
15.04.2005	12	12,5
04.05.2005	6,5	8
09.06.2005	26	19
02.09.2005	0	0
22.09.2005	10	9
07.10.2005	16,5	14,5
04.11.2005	9	9
01.12.2005	40	34
16.12.2005	24	24
23.12.2005	31	29
06.01.2006	41	41
20.01.2006	12	9,5
03.02.2006	14,5	14,5
27.02.2006	39	32
16.03.2006	15,5	18,5
31.03.2006	24	22
13.04.2006	32	28
27.04.2006	17	19,5
08.09.2006	35	39
03.11.2006	7,0	6,0
16.11.2006	18,0	17,0
01.12.2006	38,0	34,0
15.12.2006	24,0	24,0
12.01.2007	40,0	40,0
29.01.2007	85,0	85,0
09.02.2007	28,0	28,0
23.02.2007	35,0	36,0
08.03.2007	65,0	65,0
23.03.2007	22,0	25,0
13.04.2007	12,0	16,0
27.04.2007	4,0	3,0
29.05.2007	21,0	9,0
23.07.2007	8,0	16,0

Anhang 2a: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Hohenzethen.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
01.02.2001	24	25
14.02.2001	27	29
26.02.2001	26	29
08.03.2001	13	13
27.03.2001	29	31
02.04.2001	16	16,5
24.04.2001	9,5	10,5
08.05.2001	17	21
22.05.2001	13	13
13.06.2001	49	44
28.06.2001	24	31
09.07.2001	19	13,5
07.08.2001	19,5	11,5
29.08.2001	2,7	1,2
12.09.2001	3	0,25
26.09.2001	68	101
11.10.2001	62	57
23.10.2001	0	0
07.11.2001	12	9,5
22.11.2001	18	13
05.12.2001	22	15
19.12.2001	43	34
16.01.2002	62	59
31.01.2002	69	58
13.02.2002	38	35
14.03.2002	80	73
22.03.2002	17	16
18.04.2002	29	27
15.05.2002	29	14
29.05.2002	10	7
11.07.2002	1,35	1,65
08.08.2002	91	82
14.08.2002	33	34
03.09.2002	41	40
25.09.2002	7	4
06.11.2002	41	30
26.11.2002	76	68
11.12.2002	26	24
19.02.2003	300	300*
13.03.2003	12	11
02.04.2003	29	24,5

* Die 300 l wurden im Schacht gemessen, daher sind die Werte für die Auswertung unrealistisch.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
14.04.2003	3,5	3,5
21.04.2003	4	3,5
29.04.2003	3,5	3,5
05.05.2003	2	1,5
12.05.2003	1,5	1,5
26.05.2003	3	2,5
30.06.2003	3	2
14.07.2003	3,5	1,5
28.07.2003	2	0,5
11.08.2003	1	0
25.11.2003	4,5	0
09.12.2003	7	0
24.12.2003	18	2,5
05.01.2004	14,5	12,5
12.01.2004	9	8
27.01.2004	25	25
03.02.2004	10	10
11.02.2004	45	42
18.02.2004	25	23
25.02.2004	11	10
23.03.2004	14	13
05.04.2004	17	16
19.04.2004	13	12
03.05.2004	10	9
17.05.2004	10,5	10
31.05.2004	9	8
14.06.2004	8	7
28.06.2004	3,5	2,5
13.09.2004	2	0
27.09.2004	2	0
12.10.2004	8	0
26.10.2004	7,5	3,5
09.11.2004	9	8
23.11.2004	20	22
08.12.2004	31	34
22.12.2004	9	9
04.01.2005	16	16
17.01.2005	37	36
01.02.2005	51,5	41
15.02.2005	27,5	31,5
28.02.2005	25	26
14.03.2005	22	17
28.03.2005	29	30

Anhang 2a (Fortsetzung).

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
12.04.2005	10,5	11
26.04.2005	5,5	5
12.05.2005	3,5	3
01.06.2005	2	1
05.07.2005		
25.09.2005	16	0
14.10.2005	16	11
01.11.2005	11	9
13.11.2005	8	7,5
23.11.2005	7,5	7,5
07.12.2005	23	24
23.12.2005	21	21
02.01.2006	15	16
16.01.2006	19	19

Anhang 2b: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Hohenzethen.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
30.01.2006	11	11
14.02.2006	13	10
28.02.2006	27	30
06.03.2006	13	15
20.03.2006	14	14
03.04.2006	29	32
17.04.2006	40	38
01.05.2006	11	11
15.05.2006	14	16
29.05.2006	16	14
05.06.2006	10,5	8
03.07.2006	21	22
17.07.2006	15	12,5
31.07.2006	0	0
14.08.2006	8	4
28.08.2006	0	0
10.09.2006	1,5	0,5
25.09.2006	0	0
09.10.2006	0	0
23.10.2006	0	0
06.11.2006	0	0
27.11.2006	0	0
03.12.2006	0	0
17.12.2006	8	9

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
02.01.2007	10	10
15.01.2007	18	20
29.01.2007	24	34
12.02.2007	35	42
26.02.2007	27	32
12.03.2007	36	34
26.03.2007	34	35
04.04.2007	28	28
18.04.2007	16	15
02.05.2007	7	6
23.05.2007	7	5
11.06.2007	22	22,5
26.06.2007	20	15
09.07.2007	7	6
23.07.2007	20	10

Anhang 3: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Juehnde.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
28.08.2002	17	13
17.09.2002	12	12
15.10.2002	36	43
14.11.2002	182,5	182,5
27.11.2002	12	14
20.12.2002	30	35
05.01.2003	61	61
21.01.2003	10	11
11.02.2003	44	44
12.03.2003	30	35
27.03.2003	7	9
09.04.2003	3	3
24.04.2003	7	3
07.05.2003	1,4	0,8
14.05.2003	0	0
21.05.2003	0	0
28.07.2003	7	6
21.10.2003	32,8	29
21.11.2003	32,3	31,8
19.12.2003	60	60
08.01.2004	20	22
22.01.2004	60	60
05.02.2004	30,4	43,5
19.02.2004	38	49
05.03.2004	3	3
22.03.2004	18	18,5
02.04.2004	10	11
26.04.2004	21	19
11.05.2004	51,5	50
25.05.2004	1	1,2
23.06.2004	0	0
19.07.2004	2	1,5
20.08.2004	7,5	3,5
16.09.2004	37	40
07.10.2004	39,5	38,5
01.11.2004	19,5	20,5
19.11.2004	60	60
03.12.2004	36	38,5
22.12.2004	20	16
06.01.2005	36	38
25.01.2005	60	60
07.02.2005	30	28,5
28.02.2005	53,5	49
16.03.2005	36,5	47

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
31.03.2005	20	26,5
21.04.2005	9,5	10
11.05.2005	40,5	42,4
25.05.2005	24,5	21,5
14.06.2005	21	21
06.07.2005	2,6	3
17.08.2005	0	6
01.09.2005	36	60
28.09.2005	0	0
20.10.2005	0	0
16.11.2005	5,5	9,1
08.12.2005	40	46
27.12.2005	59	63
09.01.2006	9,5	16
25.01.2006	20	22,5
06.02.2006	0	0
18.02.2006	33	40
07.03.2006	16	13
27.03.2006	48	59
12.04.2006	23	28
27.04.2006	19,5	25
24.05.2006	2,5	3
14.06.2006	33	40
18.07.2006	0	0
24.08.2006	0	0
19.09.2006	33	24
18.10.2006	18	12
06.11.2006	10	10,5
20.11.2006	38	40
01.12.2006	14,5	15,5
18.12.2006	25	26
02.01.2007	9	9,5
15.01.2007	49	49,5
28.01.2007	55	56
13.02.2007	65	64
27.02.2007	43,5	42,5
12.03.2007	58,5	60
28.03.2007	43	44
10.05.2007	0	0
31.05.2007	60	59,5
29.06.2007	14	8
18.07.2007	32	37
01.08.2007	60	60

Anhang 4: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Reinhausen.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
01.10.2002	0	0
07.11.2002	25	58
21.11.2002	46	45
03.12.2002	17	27
20.12.2002	12	5
06.01.2003	80	80
20.01.2003	10	11
11.02.2003	31	29
12.03.2003	22	19
27.03.2003	5	5,5
09.04.2003	0,75	0,75
24.04.2003	0,3	0,7
07.05.2003	1,1	1,6
21.05.2003	0	0
04.06.2003	0	0
24.06.2003	0,3	0
28.07.2003	0	0
22.08.2003	0	0
07.11.2003	0	0
18.11.2003	0	0
19.12.2003	0	0
08.01.2004	0	0
22.01.2004	5,5	0
05.02.2004	9,5	8
19.02.2004	22	26
05.03.2004	1,3	2,5
22.03.2004	4	5
02.04.2004	4	7
26.04.2004	0,85	0,65
11.05.2004	4,5	14
25.05.2004	0	0
13.07.2004	0	0
29.07.2004	0	0
18.08.2004	0	0
07.10.2004	6	6,5
01.11.2004	7	5,5
19.11.2004	13,5	14,5
03.12.2004	37	46,5
06.01.2005	30	30
25.01.2005	14,5	35,5
07.02.2005	28,5	30,5
28.02.2005	24,8	29
16.03.2005	6,5	10
31.03.2005	9	9
21.04.2005	3	5

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
10.05.2005	1,2	3,4
25.05.2005	0,5	2,5
14.06.2005	0	0
05.09.2005	0	0
28.09.2005	0	0
20.10.2005	0	0
22.11.2005	0	0
15.12.2005	0	0
27.12.2005	26	32
09.01.2006	18,5	8,5
25.01.2006	5,5	8
06.02.2006	0	0
18.02.2006	7	20
07.03.2006	23	18
27.03.2006	32	26
12.04.2006	16	13
27.04.2006	7,5	12,5
24.05.2006	3	4,5
14.06.2006	0	0
18.07.2006	0	0
24.08.2006	0	0
19.09.2006	0	0
18.10.2006	0	0
26.10.2006	0	0
14.11.2006	0	0
20.11.2006	0	0
01.12.2006	0	0
18.12.2006	0	0
02.01.2007	0	0
15.01.2007	0	0
30.01.2007	0	0
13.02.2007	4	3
27.02.2007	19	24
12.03.2007	19,5	25
26.03.2007	8,5	21
10.05.2007	0	0
31.05.2007	2,2	4
29.06.2007	0	0
18.07.2007	0	0
01.08.2007	13	15

Anhang 5: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Sehlde.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
20.02.2003	50	50
20.03.2003	22	24
08.07.2003	0,5	7
22.10.2003	46	47
05.11.2003	12	14
10.12.2003	18	20
22.01.2004	156	156
10.02.2004	75	76
24.02.2004	18	20
11.03.2004	2	3
24.03.2004	18,5	20
28.04.2004	21	23
11.05.2004	51	52
09.06.2004	14	13,5
14.07.2004	6	5
27.01.2005	43	51
15.02.2005	45	44
16.03.2005	27	26
12.04.2005	8	11

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
09.11.2005	24	23
23.11.2005	24	24
07.12.2005	3	4
21.12.2005	44	46
11.01.2006	24	24
26.01.2006	14	15
22.02.2006	36	36
09.03.2006	6	6
22.03.2006	22	22
05.04.2006	49	52
19.04.2006	6	7,5
03.05.2006	1,5	1,5
23.01.2007	53	53
06.02.2007	19,5	20
19.02.2007	31	32
06.03.2007	26	29
11.04.2007	48	49
16.07.2007	0	0
02.08.2007	24	21

Anhang 6a: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Thülsfelde.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
10.01.2001	0	2
12.01.2001	15	55
15.01.2001	3,5	6,5
26.01.2001	14	15
30.01.2001	6	4,5
12.02.2001	50	59
28.02.2001	37	38
13.03.2001	18	19
20.03.2001	15	15
02.04.2001	41	51
03.04.2001	2,5	3
21.04.2001	29	35
03.05.2001	22	28
17.05.2001	19	22
28.05.2001	7	7
12.06.2001	6	6
04.07.2001	5	4,5
16.07.2001	1,5	1,5
30.08.2001	10,5	2,3

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
19.09.2001	58	55
04.10.2001	67	76
24.10.2001	33	36
06.11.2001	8,5	7,5
21.11.2001	11,5	11,5
06.12.2001	39,5	41
20.12.2001	39	44
17.01.2002	97	108
30.01.2002	33	39
20.02.2002	63	76
05.03.2002	74	92
19.03.2002	24	28
27.03.2002		
23.04.2002	26	28
14.05.2002	19	25
28.05.2002		
01.07.2002	29	31
01.08.2002	22	26
26.08.2002	11	13

Anhang 6a (Fortsetzung).

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
20.11.2002	63	63
05.12.2002	28	33
22.01.2003	140	140
14.02.2003	56	62
27.02.2003	19	23
10.03.2003	8	8
03.04.2003	23	25
17.04.2003	6	7
29.04.2003	7	6
27.05.2003	21	34
10.06.2003	13	20
01.07.2003	7	10
16.09.2003	0	0
09.12.2003	27	36
14.01.2004	91	97
03.02.2004	96	96
09.02.2004	0	0
17.02.2004	90	99
04.03.2004	22	26
11.03.2004	6	6
31.03.2004	15	14
22.04.2004	17	16
03.05.2004	7	6,5
10.06.2004	10	10
07.07.2004	0	0
22.07.2004	0	0
26.07.2004	11	8,5
02.08.2004	11	9
26.08.2004	20	19
06.09.2004	14	12
21.09.2004	16,5	16,5
04.10.2004	40	40
18.10.2004	18,5	22
11.11.2004	22	23
24.11.2004	27	29
08.12.2004	36	42
21.12.2004	14	16
05.01.2005	23	21
19.01.2005	20	24
03.02.2005	33	32
17.02.2005	43	44
08.03.2005	35	41
14.03.2005	0	0
29.03.2005	36	33

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
13.04.2005	16	18
26.04.2005	9	9
11.05.2005	7,5	7
26.05.2005	25	22
07.06.2005	15	17
21.06.2005	14,5	14
04.07.2005	10	8,5
19.07.2005	6	5,5
30.08.2005	0	0
21.09.2005	9	6
01.11.2005	0	0
17.11.2005	12	4
29.11.2005	19	10
13.12.2005	30	29
22.12.2005	29	24
03.01.2006	41	33,5

Anhang 6b: Sickerwassermengen der Lysimeterstation Thülsfelde.

Datum	SW gem. [mm]	SW gem. [mm]
19.01.2006	22	22,5
07.02.2006	16,5	17
23.02.2006	38	30
08.03.2006	16	19
21.03.2006	14	13
04.04.2006	28	19
18.04.2006	28	28,5
02.05.2006	14	13
16.05.2006	9	8
07.06.2006	7	6
22.06.2006	0	0
25.08.2006	0	0
12.09.2006	45	30
28.09.2006	16	14
25.10.2006	14	12
23.11.2006	40	39
05.12.2006	36	36,5
20.12.2006	27	28
11.01.2007	56	53
24.01.2007	89	92
07.02.2007	36	39
22.02.2007	38	36
05.03.2007	43	38,5
22.03.2007	47	50
24.04.2007	34	35
11.05.2007	6,5	5,5
26.07.2007	13	13

Autoren

- Dipl.-Geowiss. Dennis Lemke

Universität Hannover,
Institut für Geologie,
Callinstr. 30,
30167 Hannover.

- Dr. Jörg Elbracht

Landesamt für Bergbau,
Energie und Geologie,
Referat L 3.6 „Hydrogeologie“,
Stilleweg 2,
30655 Hannover.

ISSN 1864 – 7529