



**Geographisch-landeskundlicher
Atlas von Westfalen**

II	
-----------	--

Lieferung 15
Doppelblatt 1

**Begleittext
zum Doppelblatt**

**GRUNDWASSERNEUBILDUNG
UND WASSERHAUSHALT IM
NÖRDLICHEN WESTFALEN**

**aus dem Themenbereich II
LANDESNATUR**

**von
Johannes Meßer**

**Herausgegeben von der
Geographischen Kommission für Westfalen
Landschaftsverband Westfalen-Lippe**



**ASCHENDORFF VERLAG
Münster 2010**





INHALT

1. Einführung	1
2. Wasserkreislauf und Wasserhaushalts-Gleichung	1
3. Berechnungsverfahren	3
4. Eingangsdaten und deren Bedeutung für den Wasserhaushalt	5
5. Jahresgang der Grundwasserneubildung	7
6. Grundwasserneubildung im nördlichen Westfalen	9
7. Wasserhaushalt am Beispiel der Lippe	10
8. Einfluss der Versiegelung auf die Grundwasserneubildung	12
9. Literatur	13



Grundwasserneubildung und Wasserhaushalt im nördlichen Westfalen

VON JOHANNES MEßER

1. EINFÜHRUNG

Westfalen ist von großer wasserwirtschaftlicher Bedeutung. Der hohe Wasserbedarf des Ruhrgebietes wird aus den Einzugsgebieten der Lippe, der Ruhr und dem Rhein, über Grundwasserentnahmen, Fluss- und Talsperrenwasser sowie Uferfiltrat gedeckt. Durch den Export von Wasser über die Einzugsgebietsgrenzen der Flüsse wird der Wasserhaushalt beeinflusst.

Die hydrogeologischen und klimatischen Verhältnisse in Westfalen sind sehr heterogen. Unterschiedlich durchlässige Poren- und Kluftgrundwasserleiter sowie Karstgrundwasserleiter führen zu einem differenzierten Bild des Wasserhaushaltes mit entsprechenden Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse, z. B. die Engmaschigkeit des Gewässernetzes und die Wasserführung der Gewässer. Die Verhältnisse lassen sich nur mit flächendifferenzierten Wasserhaushaltsberechnungen korrekt darstellen. Die Ergebnisse können dann für weitergehende Interpretationen genutzt werden, beispielsweise um den Einfluss wasserwirtschaftlicher Maßnahmen zu beurteilen.

Angaben zur Grundwasserneubildung werden benötigt, um Eingriffe in den Wasserhaushalt beurteilen bzw. Veränderungen prognostizieren zu können. Beispielhafte Fragestellungen sind die Auswirkungen einer Grundwasserentnahme auf das Grundwasserangebot, landschaftlicher Veränderungen (z. B. Anlage von Baggerseen oder Steinbrüchen) auf den grundwasserbürtigen Abfluss eines Vorfluters oder klimatischer Veränderungen auf den Wasserhaushalt.

Um den verschiedenen Ansprüchen gerecht zu werden ist es nötig, ein Berechnungsverfahren für verschiedene Skalenbereiche zur Verfügung zu haben. Zu unterscheiden sind hier makro-, meso- und mikroskalige Bearbeitungen. Während bei makroskaligen Bearbeitungen mittlere Wasserhaushaltsgrößen für ganze Flussgebiete anhand von großräumig verfügbaren und relativ groben Daten erarbeitet werden, sind für die Erstellung von numerischen Grundwassermodel-

len kleinräumig detaillierte und hoch aufgelöste Daten erforderlich. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist nicht nur von dem verwendeten Verfahren, sondern auch von der Qualität und Auflösung der Eingangsdaten abhängig. Letztlich können die Ergebnisse nicht besser als die Eingangsdaten sein.

2. WASSERKREISLAUF UND WASSERHAUSHALTS-GLEICHUNG

Wasser durchläuft eine geschlossene Kette von Prozessen. Dieser Zyklus wird als Wasserkreislauf bezeichnet. Das Wasser kann im Wasserkreislauf in gasförmigem (Dampf), flüssigem und festem (Eis und Schnee) Aggregatzustand auftreten. Innerhalb des Wasserkreislaufs oder der Teilwasserkreisläufe wird Wasser horizontal und vertikal transportiert, wobei die Aggregatzustände wechseln können. Die im Wasserkreislauf ablaufenden Prozesse sind u. a. Niederschlag, Evaporation, Transpiration, Interzeption, Oberflächenabfluss, Infiltration bzw. Versickerung und unterirdischer Abfluss.

Die mit den Prozessen verbundenen Wassermengen werden in der Wasserbilanz erfasst. Die Summe aller Teilmengen muss gleich Null sein, da aus dem geschlossenen Wasserkreislauf kein Wasser verloren gehen kann. Bei der Betrachtung von Einzeljahren ist die Vorratsänderung und bei Betrachtung von Teilbereichen sind die Zuflüsse aus und Abflüsse in Nachbarbereiche zu berücksichtigen. Dem Teilkreislauf zur Nutzung entnommenes Wasser wird ihm oder einem anderen wieder zugeführt.

Der Wasserhaushalt eines Bilanzraumes wird mit der allgemeinen Wasserhaushalts-Gleichung

$$\dot{h}_N = \dot{h}_V + \dot{h}_{Ad} + \dot{h}_{AGW} \pm \dot{h}_Z \pm \dot{h}_S \quad (\text{mm/a}) \quad (1)$$

umschrieben.

Hierbei bedeuten:

\dot{h}_N	=	Niederschlag (mm/a)
\dot{h}_V	=	Evapotranspiration/Verdunstung (mm/a)
\dot{h}_{Ad}	=	Direktabfluss (mm/a)
\dot{h}_{AGW}	=	Basisabfluss bzw. grundwasserbürtiger Abfluss bzw. Grundwasserneubildung (mm/a)
\dot{h}_Z	=	Zuleitung/Entnahme von Wasser (mm/a)
\dot{h}_S	=	Speicheränderung (Rücklage/Aufbrauch von Wasser) (mm/a)

Alle Größen der Wasserhaushalts-Gleichung werden auf dieselbe Zeiteinheit bezogen. Da hier ein hydrologisches Jahr zugrunde gelegt wird, lassen sich die Wasserhaushaltsgrößen als **Jahresraten** bezeichnen.

Das als Niederschlag aus der Atmosphäre in einen Bilanzraum eingetragene Wasser kann über die Evapotranspiration, den Abfluss und Entnahmen wieder ausgetragen werden. Einem betrachteten Bilanzraum kann darüber hinaus Wasser zugeführt oder entnommen werden (\dot{h}_Z). Es kann beispielsweise von außen Wasser zufließen (z. B. in Tal- und Senkenlagen oberirdisch bzw. über Gewässer) oder aus dem Gebiet nach außen abfließen. Hierunter fallen auch (künstlich) zugeführtes Wasser, z. B. durch Beregnung bzw. Regenwasserversickerung, oder künstliche Wassereutnahmen, z. B. Brunnenförderung, Dränung.

Die **Evapotranspiration** setzt sich aus der Transpiration (Pflanzenverdunstung), der Evaporation (Boden- und Gewässerverdunstung) und der Interzeption (Verdunstung von Wasser nasser Pflanzenoberflächen) zusammen. Im Merkblatt M 504 (ATV-DVWK 2002) ist der aktuelle Kenntnisstand zur Berechnung der verschiedenen Verdunstungsgrößen ausführlich dargestellt. Ausgehend von der potenziellen Evapotranspiration kann die reale Evapotranspiration, d. h. die Evapotranspiration bei gegebener Wasserverfügbarkeit und Vegetation, in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte im durchwurzelten Bodenbereich (effektive Durchwurzelungstiefe) berechnet werden. Die Differenz zwischen potenzieller und realer Evapotranspiration ist abhängig vom Wasserdargebot und damit von den Niederschlägen. Bei geringeren Niederschlägen hängt sie von der nutzbaren Feldkapazität des Bodens im effektiven Wurzelraum sowie der Art und dem Ent-

wicklungsstand der Vegetation ab. Bäume haben im Allgemeinen eine größere Schöpftiefe als krautige Pflanzen.

Wasser, das nicht verdunstet, gelangt zum **Abfluss**. Beim Abfluss (auch als Gesamtabfluss bezeichnet) unterscheidet man zwischen Direktabfluss und grundwasserbürtigem Abfluss. Als Direktabfluss wird hier derjenige Anteil verstanden, der über den Oberflächenabfluss der Fließgewässer den jeweiligen Teilbereich verlässt (DIN 4049-3 1994). Dies kann direkt über Gräben erfolgen oder indirekt über die Kanalisation und über Dränagen. Das Niederschlagswasser, das in den Boden einsickert (Sickerwasser), gelangt unterirdisch zum Abfluss. Dabei wird der so genannte Zwischenabfluss (Interflow) in der ungesättigten Zone (wird noch zum Direktabfluss gerechnet) vom Basisabfluss (Base Flow) bzw. grundwasserbürtigen Abfluss in der gesättigten Grundwasserzone unterschieden. Ohne Entnahme oder Zuleitung von Wasser in einem Teileinzugsgebiet entspricht der grundwasserbürtige Abfluss der Grundwasserneubildung. Wenn das unterirdische Einzugsgebiet bekannt ist, kann die Grundwasserneubildung aus dem Basisabfluss eines Vorfluters bestimmt werden.

$$\dot{h}_A = \dot{h}_{Ad} + \dot{h}_{AGW} \quad (2)$$

$$\dot{h}_{Ad} = \dot{h}_{Ai} + \dot{h}_{Ao} \quad (3)$$

hierbei bedeuten:

$$\dot{h}_A = \text{Gesamtabfluss (mm/a)}$$

$$\dot{h}_{Ad} = \text{Direktabfluss (mm/a)}$$

$$\dot{h}_{AGW} = \text{Basisabfluss bzw. grundwasserbürtiger Abfluss (mm/a)}$$

$$\dot{h}_{Ai} = \text{Zwischenabfluss/Interflow (mm/a)}$$

$$\dot{h}_{Ao} = \text{Oberflächenabfluss (mm/a)}$$

Eine Sonderform des Abflusses stellen Dränagen dar, die auf ca. einem Drittel der landwirtschaftlichen Nutzflächen in Deutschland die Entwässerung regeln. Im Allgemeinen können die so abgeführten Wassermengen dem Zwischenabfluss zugeordnet werden. In vielen Fällen schöpfen sie jedoch vor allem im Winterhalbjahr einen Teil des hoch anstehenden Grundwassers ab.

Im langfristigen Mittel befindet sich der Wasserhaushalt im Gleichgewicht. In diesem Fall muss

die Summe über alle Eintrags- und Austragskomponenten der Wasserhaushalts-Gleichung gleich Null sein. Für Zeiträume, die noch nicht zu einem Gleichgewicht der Ein- und Austräge von Wasser geführt haben, werden Defizit oder Überschuss im Bilanzraum durch die **Vorratsänderung** berücksichtigt, um dem Massenerhaltungsgesetz zu genügen.

3. BERECHNUNGSVERFAHREN

Für die flächendifferenzierte Berechnung der Grundwasserneubildung kommt nur die Ermittlung aus der Wasserhaushalts-Gleichung (Gleichung 1, S. 1) in Betracht. Hierzu wurden in der Vergangenheit verschiedene Berechnungsverfahren publiziert. Zu nennen sind insbesondere die Methoden nach

- BAGROV/GLUGLA,
- RENGER u. WESSOLEK und
- DORHÖFER u. JOSOPAIT.

Bei den Verfahren BAGROV/GLUGLA (BAGROV 1953, GLUGLA et al. 1976, BAMBERG et al. 1980) und RENGER u. WESSOLEK (RENGER u. STREBEL 1980, SPONAGEL et al. 1983, RENGER et al. 1986, RENGER u. WESSOLEK 1990) wird generell nicht die Grundwasserneubildung berechnet, sondern lediglich die reale Verdunstung, die vom Niederschlag subtrahiert den Gesamtabfluss ergibt. Bei DORHÖFER u. JOSOPAIT (DORHÖFER u. JOSOPAIT 1980) schließt sich die Aufteilung des Gesamtabflusses in den Direktabfluss und den grundwasserbürtigen Abfluss an. Letzterer ist nach den Gleichungen 4 und 5 bei fehlender Entnahme der Grundwasserneubildung gleichzusetzen (SCHROEDER u. WYRWICH 1990). Bei verschiedenen weiteren Autoren (BOGENA et al. 2003, HERGESELL u. BERTHOLD 2005 und NEUMANN 2004) erfolgt die Aufteilung des Gesamtabflusses über einen Baseflow-Index (BFI), der aus Auswertungen der Pegeldaten von Gewässern abgeleitet wird. Hier ist allerdings Vorsicht geboten, da wasserwirtschaftliche Einflüsse auf das Abflussgeschehen berücksichtigt werden müssen (z. B. Im- und Export von Wasser über die Wasserscheide, Tal Sperren und andere den Abfluss regulierende Einflüsse). Die Jahresrate der Grundwasserneubildung bzw. der grundwasserbürtige Abfluss wird nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\dot{h}_{AGW} = \dot{h}_N - \dot{h}_V - \dot{h}_{Ad} \quad (4)$$

$$\dot{h}_{Ad} = (\dot{h}_N - \dot{h}_V) \cdot \frac{\rho}{100} \quad (5)$$

\dot{h}_{AGW}	=	Grundwasserbürtiger Abfluss (mm/a)
\dot{h}_N	=	Niederschlag (mm/a)
\dot{h}_V	=	Evapotranspiration (mm/a)
$(\dot{h}_N - \dot{h}_V)$	=	Gesamtabfluss (mm/a)
\dot{h}_{Ad}	=	Direktabfluss (mm/a)
ρ	=	Direktabflussanteil am Gesamtabfluss (%)

Diese drei links genannten grundlegenden Berechnungsverfahren sind vielfach modifiziert und angewandt worden. Das aktuelle Verfahren BAGROV/GLUGLA ist im Merkblatt M 504 (ATV-DVWK 2002) detailliert dargestellt. Weiterentwicklungen des Verfahrens RENGER u. WESSOLEK sind bei BOGENA et al. (2003) und GROSSMANN u. LANGE (1999) zu finden. Das Verfahren von DORHÖFER u. JOSOPAIT wurde abgewandelt und verfeinert von SCHROEDER u. WYRWICH (1990) sowie von MEßER (1997, 2008) für Bearbeitungen im urbanen Raum weiterentwickelt. Für alle genannten Verfahren liegen Programm-Module zur Berechnung in einem Geoinformationssystem (GIS) vor.

Bei mehreren Anwendungen wurden die Berechnungsergebnisse mit Auswertungen von Abflussmessungen nach WUNDT (1958) bzw. KILLE (1970) verglichen und mehr oder weniger gute Übereinstimmungen gefunden. Zur Bearbeitung des Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) wurde ein Vergleich durchgeführt und die Ergebnisse mit Auswertungen von Abflussmessungen verglichen (NEUMANN u. WYCISK 2001, NEUMANN 2004). Im Rahmen der Entwicklung und Anwendung eines makroskaligen Verfahrens kommt NEUMANN (2004) dabei zu dem Schluss: „Auf der Grundlage der betrachteten 106 Einzugsgebiete zeigt der Ansatz von MEßER, bezogen auf Trendverlauf und Korrelation, die beste Anpassung aller genannten Modellversionen, während die Modifikationen nach SCHROEDER u. WYRWICH, GROWA 98 sowie insbesondere die ursprüngliche Version von DORHÖFER u. JOSOPAIT größere Streuungen und systematische Abweichungen zeigen“.

Die Ergebnisse der Verfahren sind grundsätzlich vergleichbar. Bei der jeweiligen Problem-

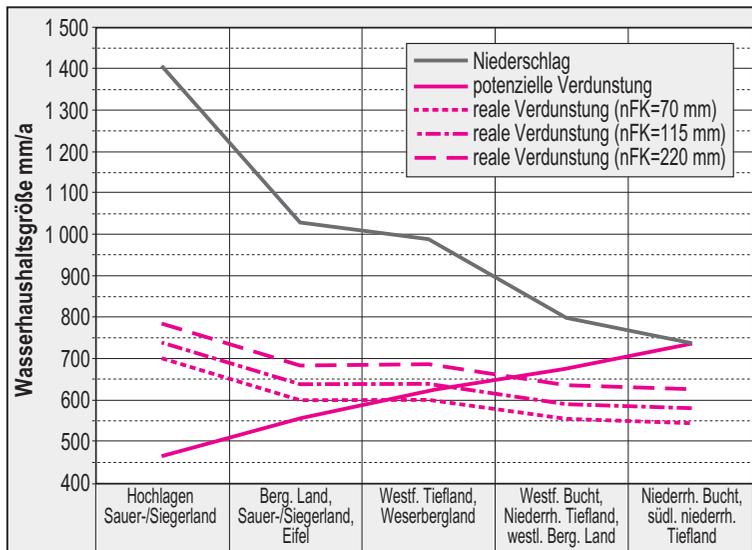


Abb. 1: Niederschlag, potenzielle Verdunstung nach WENDLING (ATV-DVWK 2002) und reale Verdunstung nach RENGER u. WESSOLEK bei Nadelwald und verschiedenen nutzbaren Feldkapazitäten nFK für Klimastationen in den verschiedenen Naturräumen von NRW (Quelle: MEßER 2008)

stellung ist vor der Anwendung immer auch die Verwendbarkeit der Verfahren zu prüfen. Beispielsweise wurde die Methode von RENGER u. WESSOLEK in einem niederschlagsarmen Raum entwickelt. Die Verdunstung ist bei diesem Verfahren sehr stark vom Niederschlag abhängig, so dass in niederschlagsreichen Gebieten zu hohe reale Verdunstungswerte berechnet werden (Abb. 1). Dass die potenzielle Verdunstung von den Höhenlagen zum Flachland zunimmt, während die reale Verdunstung bei gleichen Boden- und Nutzungsbedingungen abnimmt, erscheint unrealistisch, zumal die Länge der Vegetationszeit zunimmt. Die Methode zur Berechnung der realen Verdunstung nach RENGER u. WESSOLEK ist somit wohl kaum in ganz Nordrhein-Westfalen verwendbar. Die Berechnungen mit dem Verfahren GROWA (BOGENA et al. 2003, KUNKEL et al. 2006) für Nordrhein-Westfalen stehen insofern unter einem Vorbehalt.

Grundlage der hier vorgestellten Berechnungen nach MEßER (2008) ist die Wasserhaushalts-Gleichung (Gleichung 4, S. 3). Ziel der Bearbeitung ist die flächendifferenzierte Bestimmung der langjährig mittleren Grundwasser-Neubildung und der anderen Wasserhaushaltsgrößen. Die Wasserhaushalts-Gleichung wird für jede in sich homogene Teilfläche gelöst. In Abb. 2 sind die

benötigten Eingangsdaten bzw. die verwendeten Grundlagen (eckige Rahmen) und die berechneten Größen (gerundete Rahmen) sowie die Beziehungen zueinander angegeben. Für die Berechnung von Verdunstung und Direktabfluss wird eine Flächenverschneidung der jeweils notwendigen Grundlagenparameter mit dem Programmsystem ArcInfo durchgeführt. Für jede in sich homogene Kleinfläche werden die beiden Größen in mm/a berechnet.

Die Berechnung der **Verdunstung** erfolgt für die verschiedenen Kombinationen von Klimatop, Boden, Flurabstand und Flächennutzung nach dem Verfahren BAGLUVA (Verfahren nach BAGROV und GLUGLA zur Bestimmung vieljähriger Mittelwerte von tatsächlicher Verdunstungs- und Abfluss-

höhe, ATV-DVWK 2002, GLUGLA et al. 2003). Die Gras-Referenzverdunstung wird dabei nach WENDLING (ATV-DVWK 2002) berechnet und daraus die maximale Verdunstung ermittelt. Die Verdunstung befestigter Flächen wird WESSOLEK u. FACKLAM (1997) entnommen bzw. nach GLUGLA u. KRAHE (1995) bzw. GLUGLA et al. (1999) berechnet.

Der **Gesamtabfluss** ist die Differenz aus dem Niederschlag und der Verdunstung gemäß Wasserhaushalts-Gleichung (Gleichung 5, S. 3). Auf Grund der hohen Niederschläge und der relativ geringen Verdunstung in den Mittelgebirgen nimmt der Gesamtabfluss vom Tiefland zu den höheren Lagen deutlich zu.

Vom Gesamtabfluss wird im nächsten Schritt der **Direktabfluss** (vgl. Gleichung 5) abgetrennt. Die Berechnung des Direktabflusses erfolgt über die Bestimmung des Anteils p am Gesamtabfluss. Der Direktabflussanteil nimmt mit steigendem Flurabstand ab und ist bei bindigen Böden deutlich größer als bei nicht bindigen Böden. Es wird ferner davon ausgegangen, dass der Direktabflussanteil p am Gesamtabfluss von Acker- bzw. Grünland über Mischvegetation bis zum Wald abnimmt. Auch auf Waldstandorten ist bei hohen Hangneigungen bzw. gering durchlässigen Böden ein deutlicher Direktabfluss zu verzeichnen.

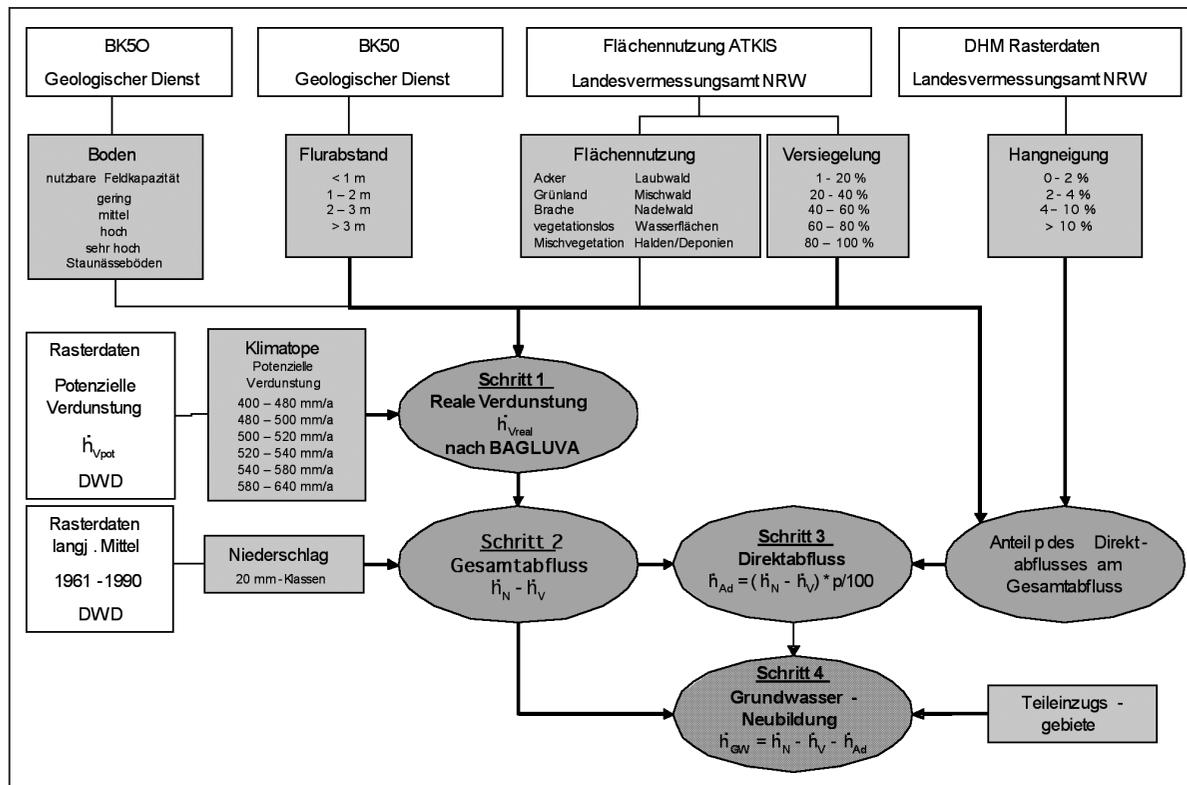


Abb. 2: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasser-Neubildung (Quelle: MEYER 2008)

Durch eine weitere Verschneidung der flächendifferenzierten Ergebnisse von Niederschlag, Verdunstung und Direktabfluss erhält man nach Gleichung 4 die **Grundwasser-Neubildung** für jede in sich homogene Kleinfläche. Durch eine weitere Verschneidung mit z. B. Teileinzugsgebieten kann die berechnete Grundwasser-Neubildung weiterverarbeitet werden. Die bei der Flächenverschneidung zwangsläufig entstehenden Kleinstflächen werden eliminiert.

4. EINGANGSDATEN UND DEREN BEDEUTUNG FÜR DEN WASSERHAUSHALT

Die Grundwasserneubildung ist u. a. von folgenden Faktoren abhängig:

- Niederschlag und andere Klimagrößen,
- Bodeneigenschaften und Flurabstände,
- Bodenbedeckung und Befestigungsgrad sowie
- Geländeneigung und Exposition.

Der **Niederschlag** ist, abgesehen von der (künstlichen) Zuführung von Wasser, die einzige positive Eingangsgröße in der Wasserhaushaltsgleichung. Insofern ist die Grundwasserneubildung sehr stark von den Niederschlagsverhältnissen abhängig. Als Abstufung für die weitere Bearbeitung wird eine Höhenstufung von 20 mm verwendet. Für die Berechnung wird das langjährige Mittel der Niederschläge für den Zeitraum 1961 bis 1990 des Deutschen Wetterdienstes in einem 1 km²-Raster verwendet. Eine Korrektur gemäß RICHTER (1995) erfolgt nicht, da keine Stationsdaten mit Kenntnis der Stationslage, sondern Rasterdaten verwendet werden.

Die Verdunstung ist in folgender Reihenfolge abhängig von verschiedenen **Klimaparametern** (MULL 1987):

- relative Luftfeuchtigkeit,
- Lufttemperatur bzw. Sättigungsdampfdruck der Luft,
- Strahlungsbilanz (Globalstrahlung und Sonnenscheindauer) sowie
- Windgeschwindigkeit.

Maßgebend sind vor allem die klimatischen Verhältnisse im Sommerhalbjahr, da hier über 80 % der realen Verdunstung stattfinden. Daraus folgt, dass beispielsweise zu erwarten ist, dass die Verdunstung vom Flachland in die Höhenlagen und von Süden nach Norden in Mitteleuropa abnimmt. Eine Temperaturzunahme von 1 °C führt zu einer Verdunstungszunahme um 15 mm/a bis 30 mm/a, und eine Verringerung der Sonnenscheindauer von 10 Stunden pro Monat führt zu einer Verdunstungszunahme um 10 mm/a bis 20 mm/a (Berechnung nach WENDLING 1995). Mit steigender Verdunstung nimmt die Grundwasserneubildung entsprechend der Wasserhaushalts-Gleichung ab.

Die langjährig mittlere potenzielle Verdunstung (nach WENDLING 1995) beträgt im Münsterland zwischen 560 mm/a und 600 mm/a. Als Datengrundlage dienen 1 km²-Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes.

Je durchlässiger ein **Boden** ist, desto schneller sickert das Wasser in tiefere Bereiche ab. Die nutzbare Feldkapazität (Wassergehalt zwischen dem Welkepunkt und demjenigen, den der Boden maximal gegen die Schwerkraft speichern kann) des effektiven Wurzelraumes in durchlässigen Böden (Sandböden) ist gering, so dass relativ wenig Wasser verdunsten kann. Darüber hinaus ist der Direktabfluss gering. Somit ist die Grundwasserneubildung bei Sandböden mit geringer nutzbarer Feldkapazität höher als bei gering durchlässigen Böden. Je geringer durchlässig die Böden sind, desto größer sind die Verdunstung und der Direktabfluss. Bei Festgesteinen ist der Einfluss der Böden auf den Wassergehalt von deren Durchlässigkeit und der Mächtigkeit bzw. der nutzbarer Feldkapazität der Deckschichten abhängig. Während bei der Rendzina auf Kalksteinböden von vergleichsweise geringer Verdunstung und geringem Direktabfluss ausgegangen werden kann, ist bei Rankern aus Silikatgesteinen bei geringer Verdunstung (wegen des fehlenden Bodenspeichers) von einem hohen Direktabfluss auszugehen. Ebenso besitzen Pseudogleye mit geringer Überdeckung hohe Direktabflussanteile.

Die Vielzahl der Bodentypen wurde in Anlehnung an die Einstufung des Geologischen Dienstes NRW in der BK 50 zu den in Abb. 2 aufgeführten fünf Bodengruppen zusammengefasst, indem die nutzbare Feldkapazität in Prozent ausgerechnet wird, um den Einfluss der Grundwasser- bzw. Staunäsetiefe auszuklammern.

Bei geringem **Flurabstand** steht ein ausreichendes Wasserdargebot für die Verdunstung zur Verfügung (reale Verdunstung entspricht hier in etwa der potenziellen Verdunstung). Während Grundwasser kapillar aufwärts in die Wurzelzone steigt, gelangt Sickerwasser abwärts aus den Niederschlägen ins Grundwasser. Die Grundwasserneubildungsrate ist dabei die Differenz aus beiden Komponenten. Bei geringen Niederschlägen und hoher Verdunstung (z. B. bei einem Waldstandort) kann hierbei die Grundwasserneubildung durchaus negativ sein, das heißt, es kommt zu einer Grundwasserzehrung. Bei geringen Flurabständen ist das Gelände vielfach durch Gräben und Dränagen entwässert, so dass auch der Direktabfluss höher ist als bei großen Flurabständen.

Die Abstufung der Flurabstände ist der Abb. 2 zu entnehmen. Staunasse Böden werden dabei wie Böden mit geringen Flurabständen berücksichtigt. Die Angaben zum Flurabstand wurden der BK 50 entnommen.

Neben den Böden besitzt auch die **Flächennutzung** bzw. die Vegetation einen großen Einfluss auf die Verdunstung sowie den Direktabfluss und damit auch auf die Grundwasserneubildung. Maßgebend ist hier vor allem die Transpiration der Pflanzen, die von der Art und dem Alter der Vegetation abhängt. Gehölzbestandene Flächen besitzen eine höhere Evapotranspiration und geringere Direktabflussanteile am Gesamtabfluss (Niederschlag minus Verdunstung) als niedrig wüchsige Vegetation.

Bei gleichen Böden nimmt die Grundwasserneubildung in der folgenden Richtung ab: Acker > Grünland > Mischvegetation > Laubwald > Nadelwald. Die Verdunstung von freien Wasserflächen ist vor allem von den Klimabedingungen, insbesondere auch den Windverhältnissen, abhängig. Daneben spielen Wassertiefe und Größe der Wasserfläche eine wichtige Rolle. Hier werden die Seeverdunstung nach DVWK 1996 berechnet und Mittelwerte für die einzelnen Klimatope gebildet.

Bei befestigten Flächen nimmt die Verdunstung mit steigendem Befestigungsgrad ab und der Direktabfluss zu. Da der Direktabflussanteil deutlich stärker ansteigt, als die Verdunstung abnimmt, verringert sich die Grundwasserneubildung mit zunehmender Befestigung (Abb. 3). Die Abstufung der Flächennutzung ist der Abb. 2 zu entnehmen.

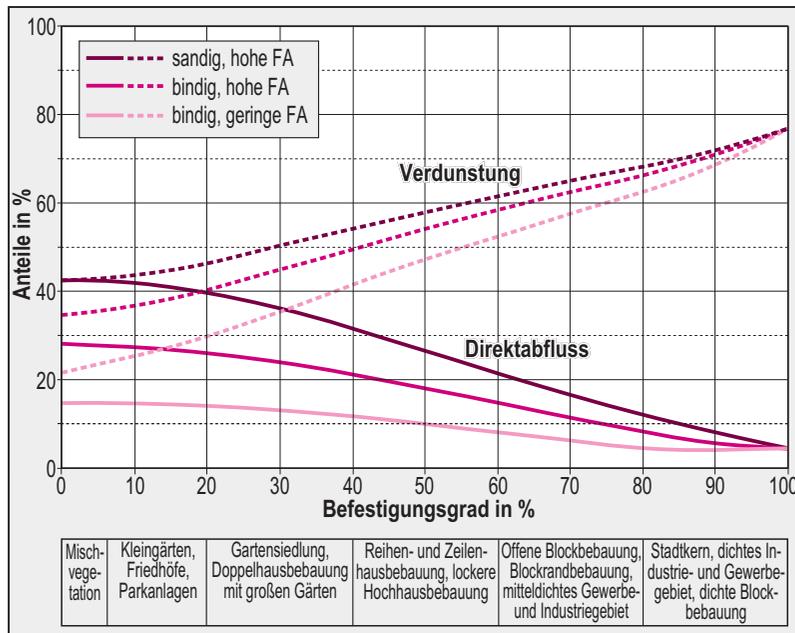


Abb. 3: Wasserhaushaltsgrößen in Abhängigkeit von der Befestigung bei verschiedenen Böden und Flurabständen (FA) (Niederschlag: 800 mm/a) (Quelle: MEBER 2008)

Für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland liegen flächendeckende raumbezogene Informationen über die Flächennutzung von den Landesvermessungsämtern der Bundesländer (Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem ATKIS) vor (Landesvermessungsamt NRW 2004). Die Auflösung der Landnutzung ist mesoskaligen Fragestellungen angemessen. Die Einstufung der Flächennutzungstypen zu den Befestigungsklassen erfolgt nach SENDT et al. (2008).

Mit steigender **Hangneigung** nimmt der Direktabfluss zu und damit die Grundwasserneubildung ab. Beeinflusst wird der Direktabflussanteil am Gesamtabfluss (Niederschlag minus Verdunstung) dabei auch von der Durchlässigkeit der Böden bzw. Gesteine. Nach SCHROEDER u. WYRWICH (1990) beträgt der Direktabflussanteil beispielsweise bei landwirtschaftlicher Nutzung, lehmigen Böden und einer Reliefenergie von 40 m/km^2 66 %. Bei sandigen Böden ist er bei gleicher Reliefenergie mit 33 % deutlich geringer. Durch Hangneigung und Exposition wird auch die Verdunstung beeinflusst. Bei hohen Hangneigungen kann die Verdunstung um 10 % bis 30 % geringer und auf südexponierten Hängen um den gleichen Betrag höher sein als auf

ebenen Flächen (GOLF 1981). In Anlehnung an die ATV A 118 (2002), die DIN 4220 (1998) und SCHROEDER u. WYRWICH (1990) wird die in Abb. 2 dargestellte Abstufung bei der Hangneigung zugrunde gelegt.

Mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells (DHM) wurden mit einem Rasterdatensatz des Landesvermessungsamtes von $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ die Flächen gleicher Hangneigungsklassen berechnet. Auch für die Exposition können mit dem DHM Flächen gleicher Hangausrichtung berechnet werden.

Zur zusammenfassenden Darstellung der Berechnungsergebnisse werden die Grundlagendaten mit den Grundwasserteil-körpern bzw. **Gewässereinzugsgebieten** des Landesamtes für Natur, Umwelt und Ver-

braucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) verschnitten. Ein Grundwasserkörper ist gemäß der EU-WRRL ein abgegrenztes Grundwasservolumen innerhalb eines oder mehrerer Grundwasserleiter. Für alle Grundwasserkörper des Landes NRW liegen entsprechende Beschreibungen des LANUV vor. Es ist zu beachten, dass die Abgrenzungen nicht immer den unterirdischen Einzugsgebieten entsprechen und damit keine geschlossenen Bilanzräume darstellen. Insofern ist beim Vergleich mit dem Trockenwetterabfluss der Gewässer Vorsicht geboten. Bei der Umrechnung von der Grundwasserneubildung zum grundwasserbürtigen Abfluss sind darüber hinaus Grundwasserentnahmen (wenn das Wasser nach dem Gebrauch das Einzugsgebiet auf einem anderen Weg verlässt) bzw. Versickerungen in tiefere Stockwerke zur berücksichtigen.

5. JAHRESGANG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Der zeitliche Verlauf der Grundwasserneubildung innerhalb eines Jahres wird von der Verteilung der Niederschläge im Jahresverlauf, der zeitlichen Verteilung der potenziellen Wasserverfügbarkeit bzw. Verdunstung, dem Grundwasserflurabstand und

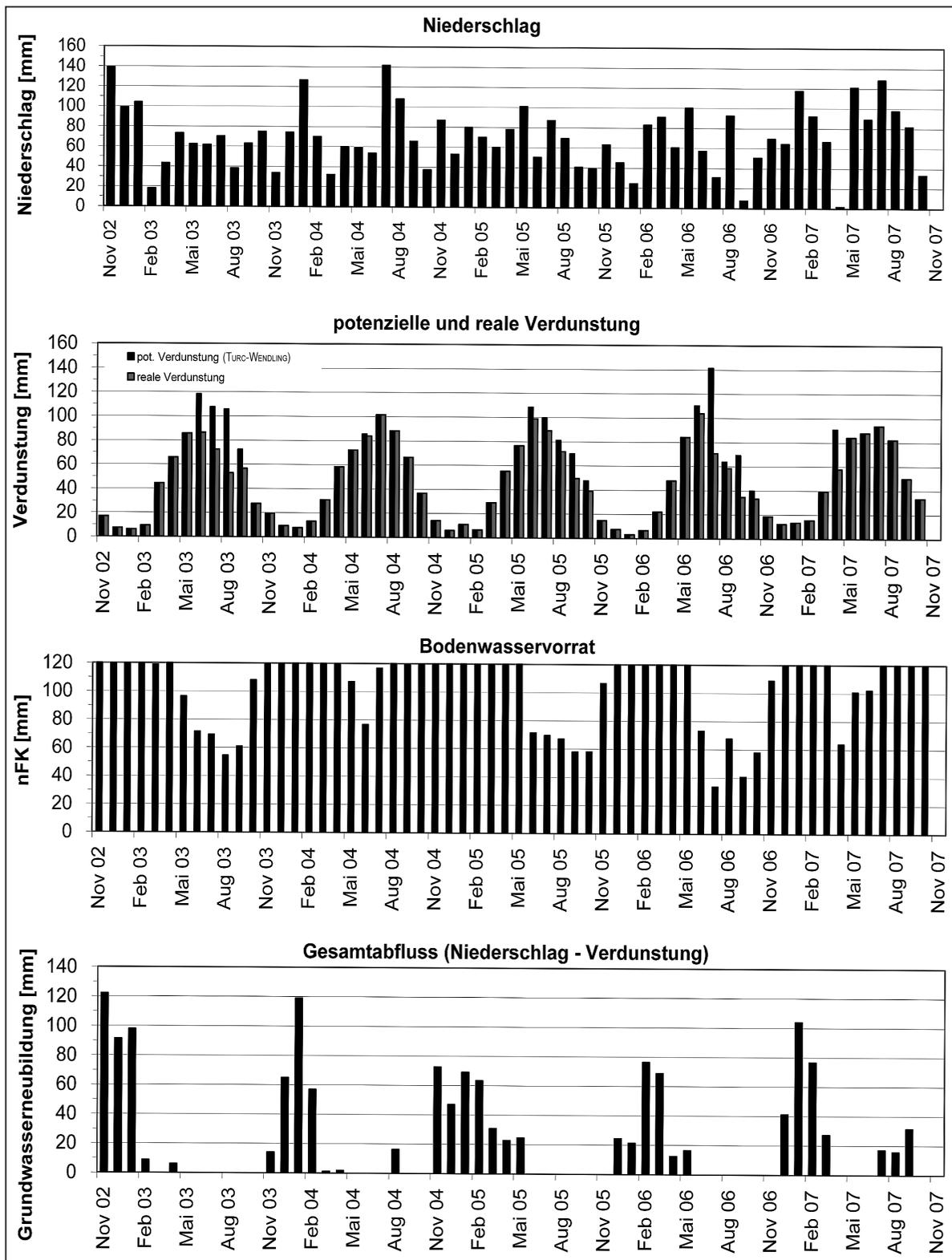


Abb. 4: Monatliche klimatische Bodenwasserbilanz der Wasserwirtschaftsjahre 2003 bis 2007 bei Grünlandnutzung und einer nutzbaren Feldkapazität (nFK) von 120 mm (Beispiel Raum Bottrop, Ruhrgebiet) (Quelle: Eigener Entwurf)

der nutzbaren Feldkapazität nFK bestimmt. In der Vegetationszeit ist im Allgemeinen die potenzielle Verdunstung höher als der Niederschlag. Die Niederschläge dienen in der Vegetationsperiode im Wesentlichen zur Wasserversorgung der Pflanzen und im Winterhalbjahr zur Auffüllung des Bodenwasserspeichers. Erst nach dessen Auffüllung bis zur nutzbaren Feldkapazität (= maximaler Haftwassergehalt der Bodenzone) sickert das Wasser durch die Wurzelzone zum Grundwasser ab. Bei Frost wird das Wasser in Form von Schnee und Eis an der Oberfläche zurückgehalten und sickert erst bei Tauwetter in den Boden ein. Da insbesondere die Niederschlagsverteilung über die Jahre sehr unterschiedlich ist, unterliegt auch die Grundwasserneubildung mehrjährigen Schwankungen. Die Differenz der Grundwasserneubildung zwischen Nass- und Trockenjahren kann erheblich sein, wobei die Verdunstung in der Regel geringeren Schwankungen unterliegt als der Niederschlag (Abb. 4).

Die Grundwasserneubildung im Jahresverlauf kann mit Hilfe der klimatischen Bodenwasserbilanz nach DVWK 1996 berechnet werden. In Abb. 4 sind der Niederschlag, die potenzielle Verdunstung, die reale Verdunstung, der Bodenwassergehalt sowie die Grundwasserneubildung für eine typische Situation im Ruhrgebiet dargestellt. Deutlich erkennbar sind der Jahresgang der Verdunstung und die verhältnismäßig ausgeglichenen Niederschläge. In den Sommermonaten kommt es zu einem Aufbrauch des Bodenwassers, so dass insbesondere im Sommer 2003 die reale Verdunstung geringer ist als die potenzielle Verdunstung. Im Jahr 2004 wird zwar auch der Bodenwasservorrat in Anspruch genommen, aber die potenzielle Verdunstung entspricht in etwa der realen Verdunstung. Ein Gesamtabfluss, der bei fehlendem Direktabfluss der Grundwasserneubildung entspricht, tritt generell im Winterhalbjahr zwischen Oktober und April auf. Lediglich im Sommer 2004 führen die hohen Niederschläge bereits ab Juli zu einer Grundwasserneubildung, nachdem die nutzbare Feldkapazität in diesem Monat erreicht ist.

6. GRUNDWASSERNEUBILDUNG IM NÖRDLICHEN WESTFALEN

Die sich aus der Verschneidung der dargestellten Daten und den beschriebenen Berechnungsverfahren ergebende **Grundwasserneubildung** für

das nördliche Westfalen ist in **Karte 1.1** dargestellt. Zur klareren Darstellung wurden die Berechnungsergebnisse vergrößert, d. h. Kleinstflächen wurden mit den angrenzenden größeren Flächen verschmolzen.

Die Karte zeigt hohe Grundwasserneubildungsraten von über 250 mm/a und z. T. bis über 400 mm/a im Gebiet der Paderborner Hochfläche, dem Verbreitungsgebiet der Sennesande, im Teutoburger Wald, Hellweg-Ost und in Teilen der Boker Heide. Hier sind hoch durchlässige Böden verbreitet, die eine geringe Verdunstung und einen geringen Direktabfluss bewirken. Ebenfalls beachtliche Grundwasserneubildungsraten von über 200 mm/a ergeben sich im Kernmünsterland zwischen dem Einzugsgebiet der Werse im Osten, dem Altenberger Höhenzug im Norden und bis zum Verbreitungsgebiet der Halterner Sande im Südwesten. Im Bereich des Niederrheins herrschen Grundwasserneubildungsraten zwischen 100 mm/a und 250 mm/a vor. Im östlich anschließenden Westmünsterland sind die Grundwasserneubildungsraten mit 100 mm/a bis 150 mm/a auffällig gering, da hier die tertiären Tone und Schluffe oberflächennah anstehen und einen hohen Direktabfluss bewirken. Vom mittleren Einzugsgebiet der Emscher über das Einzugsgebiet der Seseke und den Hellweg bis nach Lippstadt erstreckt sich eine Zone geringer Grundwasserneubildungsraten von 50 mm/a bis 150 mm/a. Hier dominieren bindige Böden, kombiniert mit geringen Flurabständen bzw. hohen Befestigungsgraden (im Ruhrgebiet). Ähnlich niedrig ist die Grundwasserneubildungsrate in den Triasgebieten östlich des Eggegebirges und des Teutoburger Waldes. Verantwortlich sind hier die überwiegend hohen Hangneigungen im Bereich von Kluffgrundwasserleitern, die einen hohen Direktabfluss zur Folge haben. Ein weiterer Bereich relativ geringer Grundwasserneubildungsraten von überwiegend 100 mm/a bis 150 mm/a erstreckt sich in Abschnitten der Emsniederung, da hier geringe Flurabstände vorherrschen. Die Verteilung der Grundwasserneubildung im nördlichen Westfalen zeigt also ein nach den hydrogeologischen Verhältnissen und der Niederschlagsverteilung plausibles Bild.

Für die im nördlichen Westfalen befindlichen Flussgebiete ergeben sich die in Tab. 1 aufgeführten mittleren Wasserhaushaltsgrößen. Weser, Diemel und Ruhr wurden dabei nicht aufgenom-

Tab. 1: Wasserhaushaltsgrößen der Flussgebiete im nördlichen Westfalen (Abkürzungen siehe Gleichungen 1 und 2)

Flussgebiet	Wasserhaushaltsgrößen (mm/a)			
	\dot{h}_V	\dot{h}_{Ad}	\dot{h}_{AGW}	\dot{h}_A
Emscher	442	215	166	381
Lippe	506	115	202	316
Ems (NRW)	493	88	194	282
Issel (NRW)	502	96	201	297

men, da die Berechnungen nur in Teilgebieten erfolgte. Im Gegensatz zur Emscher übersteigt die Grundwasserneubildung in den übrigen Flussgebieten den Direktabfluss, was auf Grund des hohen Bebauungsgrades im Emschergebiet zu erklären ist. Die Verdunstung ist aus demselben Grund im Emschergebiet geringer als in den Einzugsgebieten von Ems, Lippe und Issel.

7. WASSERHAUSHALT AM BEISPIEL DER LIPPE

Die **Karten 2.1 bis 2.4** zeigen die Berechnungsergebnisse für das Einzugsgebiet der Lippe als wasserwirtschaftlich wichtigstem Raum im Münsterland. Hier wird im Verbreitungsgebiet der Halterner Sande ein großer Teil des Trinkwassers für das Ruhrgebiet und auch das übrige Münsterland gewonnen (Atlas von Westfalen, Themenbereich VII, Lieferung 13, Doppelblatt 4). Ein Teil des Grund- und Oberflächenwassers wird in angrenzende Flusseinzugsgebiete exportiert.

Bei einem langjährig mittleren Niederschlag (1961 bis 1990) von 823 mm/a ergibt sich bei einer mittleren Verdunstungsrate von 506 mm/a (rd. 61 % des Niederschlags) eine Gesamtabflussrate von 316 mm/a (rd. 39 % des Niederschlags). Die mittlere Direktabflussrate beträgt 115 mm/a (rd. 14 %) und die mittlere Grundwasserneubildungsrate 201 mm/a (rd. 25 %). Bezogen auf die Grundwasserkörper ergeben sich die in Abb. 5 dargestellten Raten für Verdunstung, Direktabfluss und Grundwasserneubildung.

Die Spanne der **Niederschlagsrate (Karte 2.2)** reicht im Einzugsgebiet der Lippe von 750 mm/a im Raum Hamm/Soest/Lippstadt bis über 1 100 mm/a am Ostrand der Paderborner Hochfläche. In weiten Teilen des Lippeeinzugsgebietes herrschen Niederschlagsraten zwischen 800 mm/a und 900 mm/a vor.

Die **Verdunstungsrate** beträgt zwischen 300 und 700 mm/a (**Karte 2.2**). Hohe Raten über 550 mm/a treten im Bereich bindiger Böden, geringer Flurabstände und in Waldgebieten auf. Dies sind unter anderem die Talauen von Lippe, Seseke, Stever und Heubach, die Waldgebiete der Hohen Mark und Haard sowie der Bereich mit oberflächennahem Tonmergel zwischen der Seseke im Westen und Lippstadt im Osten. Die geringsten Verdunstungsraten unter 400 mm/a sind im Bereich der Städte wie Dorsten, Marl, Hamm, Lippstadt und Paderborn zu finden.

Die **Gesamtabflussrate** im Lippegebiet ist in **Karte 2.3** dargestellt. Hohe Raten von über 500 mm/a, die vor allem aus den dort hohen Niederschlagsraten resultieren, treten im Osten von der

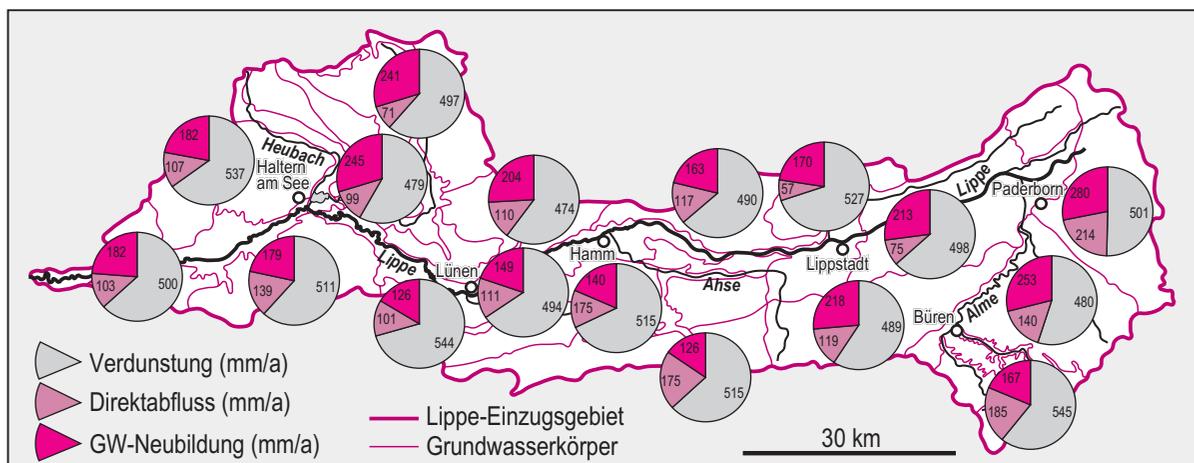


Abb. 5: Wasserhaushaltsgrößen der Grundwasserkörper über 100 km² im Einzugsgebiet der Lippe (Quelle: Eigener Entwurf)

Paderborner Hochfläche bis nach Brilon/Wün-
nenberg auf. Entlang der Lippe im Raum nörd-
lich von Soest/Werl ist die Gesamtabflussrate mit
weniger als 100 mm/a gering, da hier bei middle-
ren Niederschlägen auf den Lössböden hohe Ver-
dunstungsraten vorherrschen. Nördlich und süd-
lich davon sowie im westlichen Einzugsgebiet der
Lippe herrschen mittlere Gesamtabflussraten von
100 mm/a bis 500 mm/a vor.

Die **Direktabflussrate (Karte 2.4)** beträgt in
weiten Teilen des Lippeeinzugsgebietes weniger
als 100 mm/a. Hohe Direktabflussraten treten vor
allem bei geringen Flurabständen, z. B. entlang
der Gewässer und bei hoher Hangneigung im Be-
reich der Kluftgrundwasserleiter, auf. Dies ist ins-
besondere im Osten bzw. im Süden des Lippe-
einzugsgebietes, aber auch in Teilgebieten im
Westen, mit Werten bis zu 500 mm/a der Fall.

Die **Grundwasserneubildungsrate** in **Karte
1.1** zeigt sehr hohe Werte im Osten des Lippe-
einzugsgebietes (Raum Paderborn/Brilon) mit 250
mm/a bis über 400 mm/a. Vergleichbar hohe Wer-
te herrschen östlich von Dülmen, nördlich von
Lippstadt und westlich von Büren vor. Ursache
hierfür sind die hohen Niederschläge (im Osten)
bzw. die hoch durchlässigen Böden bei hohen
Flurabständen auf landwirtschaftlichen Flächen.
Die geringsten Grundwasserneubildungsraten mit
weniger als 100 mm/a treten in einem Streifen
südlich der Lippe von der Seseke im Westen bis
zum Geseker Bach im Osten auf. Hier besitzen
die bindigen Böden sehr hohe nutzbare Feldka-
pazitäten, so dass Verdunstung und Direktabfluss
sehr hoch sind. In den übrigen Bereichen sind die
Grundwasserneubildungsraten kleinräumig wech-
selnd und betragen überwiegend zwischen 50
mm/a und 300 mm/a. Bezogen auf die Grund-
wasserkörper (Abb. 5) ergeben sich überdurch-
schnittliche Werte von im Mittel über 200 mm/a
in den Grundwasserkörpern Dülmener Schichten
(Kluftgrundwasserleiter), Paderborner Hochfläche
(Karstgrundwasserleiter), in der Boker Heide (Po-
rengrundwasserleiter) und in den Oberkreide-
Schichten des Hellweg-Ost (Kluftgrundwasser-
leiter).

Mit den Berechnungen von NEUMANN (2004)
ist dargelegt, dass das Berechnungsverfahren von
MEBER bei Verwendung der Verdunstung nach
BAGLUVA gute Ergebnisse liefert. Ein Vergleich
der ermittelten Grundwasserneubildung mit dem
grundwasserbürtigen Abfluss der Lippe ist durch

eine Vielzahl von wasserwirtschaftlichen Ein-
griffen erschwert. Im Einzugsgebiet der Lippe
werden über 178 Mio. m³/a (ca. 5,7 m³/s) an
Grundwasser, Fluss- und Talsperrenwasser und
Uferfiltrat gewonnen (Atlas von Westfalen, The-
menbereich VII, Lieferung 13, Doppelblatt 4).
Ein großer Teil dieser Wassermengen, insbeson-
dere im Kreis Recklinghausen (Halterner und
Hullerner Stausee), werden in das Einzugsgebiet
der Emscher exportiert und gelangen dort zum
Abfluss. Darüber hinaus wird die Lippe bei Nie-
drigwasser vom Datteln-Hamm-Kanal gespeist,
so dass insbesondere der mittlere Niedrigwas-
serabfluss davon beeinflusst wird. Verfahren, die
mit dem „Baseflow-Index“, d. h. der Abtrennung
des grundwasserbürtigen Abflusses aus den
MoMNQ-Werten (monatlicher mittlerer Niedrig-
wasserabfluss) der Oberflächengewässer, arbei-
ten, müssen in einem solchen Einzugsgebiet schei-
tern. Neben den Einzugsgebieten von Lippe (Ex-
port großer Wassermengen zur Emscher) und Em-
scher (Import von Wasser aus dem Lippegebiet
und deutliche Abweichung zwischen ober- und
unterirdischem Einzugsgebiet) ist dies in Nord-
rhein-Westfalen auch die Ruhr (Talsperrenbe-
wirtschaftung, bei der ein großer Teil des Direkt-
abflusses zurück gehalten wird). Möglicherwei-
se sind die anthropogenen Einflüsse der Grund-
für die unplausibel hoch erscheinende Grund-
wasserneubildungsrate im Einzugsgebiet der Em-
scher (215 mm/a) bzw. für den zu gering er-
scheinenden Wert im Einzugsgebiet der Lippe
(161 mm/a) bei den Berechnungen mit GROWA
(BOGENA et al. 2003). Die hydrogeologischen Ver-
hältnisse und der Bebauungsgrad lassen es nicht
plausibel erscheinen, dass die Grundwasserneu-
bildung im Emschergebiet deutlich höher ist als
im Einzugsgebiet der Lippe.

Auf Grund der anthropogenen Überprägung ist
ein Vergleich des gemessenen Basisabflusses mit
der berechneten Grundwasserneubildung kein hin-
reichender Nachweis der Berechnungen. Der
langjährige MoMNQ am Lippepegel in Kruden-
burg, etwa 15 km vor der Mündung in den Rhein,
beträgt 26,8 m³/s (entspricht 175 mm/a), die be-
rechnete Grundwasserneubildung bis zu diesem
Pegel 31,1 m³/s (201 mm/a), was in Anbetracht
des Wasserexportes in das Einzugsgebiet der Em-
scher plausibel erscheint. Im Vergleich zu der hier
vorgelegten Berechnung ist die Grundwasser-
neubildungsrate nach GROWA 20 % niedriger und

damit geringer als der MoMnQ. Einschränkend ist hier jedoch darauf hinzuweisen, dass es sich zwar bei allen Werten um langjährige Mittelwerte handelt, aber die Zeiträume der Auswertungen nicht identisch sind. Im Vergleich zu GROWA und den hier vorgestellten Berechnungen weist STRUCKMEIER (1990) eine noch höhere Grundwasserneubildungsrate von 240 mm/a für das gesamte Einzugsgebiet der Lippe aus.

8. EINFLUSS DER VERSIEGELUNG AUF DIE GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Die Versiegelung von Flächen hat einen bedeutenden Einfluss auf den Wasserhaushalt (Abb. 3). Um dies an einem Beispiel deutlich zu machen, wurde für einen Bereich nördlich von Recklinghausen eine fiktive Bebauung auf landwirtschaftlichen Flächen angenommen. Karte 1.2 zeigt die flächendifferenzierte Grundwasserneubildung im Ausgangszustand. Hier herrschen Grundwasserneubildungsraten von 200 mm/a bis 250 mm/a, in Teilbereichen von über 350 mm/a, vor. Karte 1.3 zeigt die Grundwasserneubildungsrate für den identischen Detailausschnitt im Falle einer Bebauung (Versiegelungsgrad 40% bis 60%). Die Grundwasserneubildungsrate fällt in allen betroffenen Teilgebieten ab. Geringe Unterschiede treten bei Flächen auf, die bereits im Ausgangszustand geringe Grundwasserneubildungsraten aufweisen, z.B. wegen geringer Flurabstände. Maximale Unterschiede sind dort feststellbar, wo im Ausgangszustand sehr hohe Grundwasserneubildungsraten bestehen, z.B. bei sandigen Böden mit hohen Flurabständen und Ackernutzung. Die meisten Flächen im fiktiven Bebauungsgebiet besitzen Lehmböden mit sehr hoher nutzbarer Feldkapazität, die demzufolge eine hohe Verdunstung besitzen. In Folge der Versiegelung nimmt die Verdunstung sehr stark ab und der Direktabfluss deutlich zu, so dass die Grundwasserneubildungsrate von 220 mm/a auf 190 mm/a um lediglich 30 mm/a abnimmt. Da hierdurch eine Farbklassengrenze überschritten wird, tritt die relativ geringfügige Reduktion der Grundwasserneubildung großflächig in Erscheinung.

Im Ergebnis führt eine Bebauung zu einer Verringerung von Verdunstung und Grundwasserneubildung sowie einer Erhöhung des Direktabflusses. Wird der Direktabfluss über die Kanali-

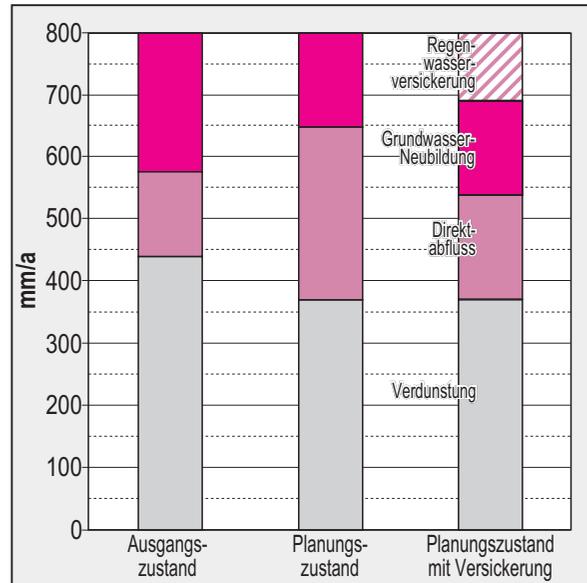


Abb. 6: Mittlere Wasserhaushaltsgrößen für eine Variante mit dichter Bebauung (Variante 3) nördlich von Recklinghausen (aus GÖBEL et al. 2004)

sation zum Gewässer abgeleitet, kommt es zu entsprechenden Hochwasserabflüssen. Um dies zu vermeiden, wird der Abfluss von befestigten Flächen nach Möglichkeit ortsnah versickert. Je nach hydrogeologischen und hydrologischen Gegebenheiten ist dadurch ein Anstieg des Grundwasserstandes möglich. Die vollständige Versickerung der auf den befestigten Flächen anfallenden Niederschlagswässer würde zu einer höheren Grundwasserneubildungsrate führen als im unbebauten Ausgangszustand (Abb. 6) (COLDEWEY u. GEIGER 2001, GÖBEL et al. 2007). Insofern ist bei der Planung von Versickerungsanlagen darauf zu achten, dass lediglich der Eingriff in den Wasserhaushalt kompensiert wird, um negative Auswirkungen, wie z. B. Kellervernässungen oder die Erhöhung des Stoffaustrages aus Altlasten, auszuschließen. Das vorliegende Berechnungsverfahren bietet hierzu die Möglichkeit.

9. LITERATUR

- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. – Merkblatt M 504, 144 S.; Hennef
- BAGROV, N.A. (1953): Über den vieljährigen Durchschnittswert der Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes. – Met. i. Gidrol., 10: 20 – 25 (russisch)
- BAMBERG, H.F., BUSSE, W., GINZEL, G., GLUGLA, G., SCHLINKER, K. u. ZIEGERL, G. (1980): KdT-Empfehlung zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. – WTI-Sonderheft 5/81, 87 S., 23 Abb., 3 Tab., 3 Anl.; Nordhausen
- BOGENA, H., KUNKEL, R., SCHÖBEL, T., SCHREY, H. P. u. WENDLAND, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. – Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 37; Jülich
- COLDEWEY, W.G. u. GEIGER, W.F. (2001): Pilotstudie zum Einfluss der Versickerung auf den Wasserhaushalt eines Stadtteils – 176 S.; Münster
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie; Grundbegriffe. – Berlin (Beuth)
- DÖRHÖFER, G. u. JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. – Geol. Jb., C 27: 45 – 65, 13 Abb., 1 Tab.; Hannover
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. – DVWK-Merkblatt 238/1996, 135 S.; Bonn (Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser)
- GLUGLA, G., ENDERLEIN, R. u. EYRICH, A. (1976): Das Programm RASTER – ein effektives Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Lockergestein. – Wasserwirtsch. Wassertechn., 26: 377 – 382, 3 Abb., 4 Tab.; Berlin
- GLUGLA, G., GOEDECKE, M., WESSOLEK, G. u. FÜRTIG, G. (1999): Langjährige Abflussbildung und Wasserhaushalt im urbanen Gebiet Berlin. – Wasserwirtschaft 89: 34 – 42
- GLUGLA, G. u. KRAHE, P. (1995): Abflussbildung in urbanen Gebieten. – Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft 14, Ruhr-Universität Bochum, S. 140 – 160; Bochum
- GLUGLA, G., JANKIEICZ, P., RACHIMOW, C., LOJEK, K., RICHTER, K., FÜRTIG, G. u. KRAHE, P. (2003): BAGLUVA – Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. – Bundesanstalt für Gewässerkunde: BfG-Bericht Nr. 1342: 102 S. – Koblenz
- GOLF, W. (1981): Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge. – Wasserwirtschaft – Wassertechnik 31:93 – 95
- GÖBEL P., DIERKES, C., KORIES, H., MEßER, J., MEIßNER, E. u. COLDEWEY, W.G. (2007): Einfluss von Gründächern und Regenwassernutzungen auf Wasserhaushalt und Grundwasserstand in Siedlungen. – Grundwasser, 12: 189 – 200; Heidelberg
- GROSSMANN, J. u. LANGE, F. (1999): Eine Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. – Grundwasser, 4(1): 11 – 17, 2 Abb., 3 Tab.; Berlin (Springer)
- HERGESELL, M. u. BERTHOLD, G. (2005): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 4 – 66; Wiesbaden
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem.: 89-95.
- KUNKEL, R., BOGENA, HEYE, TETZLAFF, BJÖRN u. WENDLAND, F. (2006): Digitale Grundwasserneubildungskarte von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg und Bremen – Erstellung und Auswertungsbeispiele. – HW50 (5): 211 – 219
- LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (2004): ATKIS Digitale Modelle der Erdoberfläche. – www.lverma.nrw.de
- MEßER, J. (1997): Auswirkungen der Urbanisierung auf die Grundwasser-Neubildung im Ruhrgebiet unter besonderer Berücksichtigung der Castroper Hochfläche und des Stadtgebietes Herne. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Heft 58. – Bochum
- MEßER, J. (2008): Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. – Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH, 61 S., www.gwneu.de; Essen
- MULL, R. (1987): Anthropogene Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt. – DFG, Dt. Forschungsgemeinschaft, 110 S., 53 Abb., 13 Tab.; Weinheim
- NEUMANN, J. (2004): Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland – Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu. – Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 137 S.; Halle
- NEUMANN, J. u. WYCISK, P. (2001): Verfahrensvergleich als methodische Grundlage zur Ermittlung der Grundwasserneubildung im Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD). – Arb.-H. Wasser 2001/1: 43 – 46; Hannover
- RENGER, M. u. STREBEL, O. (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. – Wasser und Boden, 32 (8): 362 – 366, 4 Abb., 3 Tab.; Hamburg

- RENGER, M., STREBEL, O., WESSOLEK, G. u. DUYNISVELD, W.H.M. (1986): Evapotranspiration and Groundwater Recharge – A case study for different climate, crop patterns, soil properties and groundwater depth conditions. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149: 371 – 381, 9 Abb., 1 Tab.; Weinheim
- RENGER, M. u. WESSOLEK, G. (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. – Mitt. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, 386: 295 – 307; München
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 194, 93 S.; Offenbach a.M
- SCHROEDER, M. u. WYRWICH, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode der flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. – DGM, 34: 12-16, 2 Tab.; Koblenz
- SENDT, A., MEBER, J. u. SCHEER, H. (2008): Interpretation digitaler Nutzungsdaten zur Quantifizierung/Abschätzung der Befestigung bei stadthydrologischen Fragestellungen. – KA Korrespondenz Abwasser, Abfall: 55 (4): 346 – 357, 4 Tab., 2 Abb.
- SPONAGEL, H., STREBEL, O. u. RENGER, M. (1983): Ermittlung von boden- und nutzungsspezifischen Jahreswerten der Grundwasserneubildung mit Hilfe von Boden- und Klimadaten und deren flächenhafte Darstellung. – Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 38: 147 – 152, 4 Abb.; Göttingen
- STRUCKMEIER, W. (1990): Wasserhaushalt und Hydrologische Systemanalyse des Münsterländer Beckens. – LWA-Schriftenreihe, Heft 45. – Düsseldorf
- WENDLING, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. – Wasserwirtschaft, 85: 602 – 604
- WESSOLEK, G. u. FACKLAM, M. (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 160: 41 – 46; Weinheim
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – In: GRAHMANN, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung, Forsch. Dtsch. Landeskunde, 104: 47 – 54, 2 Abb.; Remagen
- Anschrift des Verfassers: Dr. JOHANNES MEBER, Emscher und Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH, Hohenzollernstraße 50, 45128 Essen
- Für die Aufbereitung der Grundlagendaten danke ich insbesondere Herrn MSc. Geowissenschaften PHILIP ZEH und Frau Dipl.-Landschaftsökologin MEIKE DÜSPOHL von der Abteilung Angewandte Geologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (Prof. Dr. W. G. COLDEWEY).



Verlag: Aschendorff Verlag GmbH & Co. KG, Münster

© 2010 Landschaftsverband Westfalen-Lippe,
Geographische Kommission für Westfalen

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2, UrhG, werden durch die Verwertungsgesellschaft Wort wahrgenommen.

Druck: Aschendorff Verlag GmbH & Co. KG, Münster, 2010

Fünfzehnte Lieferung insgesamt
ISBN 978-3-402-14108-3

Doppelblatt: Grundwasserneubildung und Wasserhaushalt
ISBN 978-3-402-14109-0





ASCENDORFF VERLAG

