

Ein vereinfachtes Verfahren zur Be- rechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung

in Mitteleuropa

Dipl.-Geol. Dr. Johannes Meßner

2013

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	2
1 Einleitung	7
1.1 Begriffsbestimmungen.....	8
1.2 Methoden zur Berechnung	9
1.3 Wasserkreislauf und Wasserhaushalts-Gleichung.....	9
1.3.1 Evapotranspiration	11
1.3.2 Abfluss	12
1.3.3 Vorratsänderung	14
1.3.4 Fehler.....	14
2 Berechnungsverfahren.....	15
2.1 Allgemeines.....	15
2.2 Verwendetes Verfahren.....	18
2.2.1 Verdunstung.....	20
2.2.2 Gesamtabfluss	22
2.2.3 Direktabfluss	22
2.2.4 Grundwasserneubildung	24
3 Eingangsdaten und deren Bedeutung	25
3.1 Niederschlag	25
3.2 Klimatope	27
3.3 Böden.....	31
3.4 Flurabstände	34
3.5 Flächennutzung und Versiegelung	36
3.6 Hangneigung und Exposition.....	45
3.7 Teileinzugsgebiete	47

4 Rechentechnische Umsetzung mit einem Geographischen Informationssystem	49
5 Jahresgang der Grundwasserneubildung	50
6 Verfahrensverifizierung	54
6.1 Vergleich mit anderen Verfahren	54
6.2 Benutzbarkeit der Verfahrens zur Kalibrierung eines Grundwassermodells	57
7 Anwendungsbeispiele	62
7.1 Prognose der Auswirkungen des Klimawandels im Emschergebiet	62
7.2 Auswirkungen der Befestigung auf die Grundwasserneubildung	64
7.3 Regenwasserversickerung	65
7.4 Grundwasserneubildung im Mittelgebirge	66
7.5 Baumberge	68
7.6 Lippe	71
8 Literatur	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schema des Niederschlag-Abfluss-Vorgang, dargestellt an einem Hochwasserereignis	13
Abb. 2: Reale Verdunstung nach Renger & Strebel bei Nadelwald und verschiedenen nutzbaren Feldkapazitäten für Klimastationen in den verschiedenen Naturräumen von NRW im Vergleich zur potenziellen Verdunstung	17
Abb. 3: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasser-Neubildung	19
Abb. 4: Schema zur Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstung nach dem Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (GLUGLA ET AL. 2003)	21
Abb. 5: Direktabflussanteil am Gesamtabfluss in Abhängigkeit vom Flurabstand (Reliefenergie > 10 %, Boden mit geringer nutzbarer Feldkapazität)	23
Abb. 6: Direktabfluss auf Waldstandorten bei hoher Hangneigung	23
Abb. 7: Abhängigkeit der Grundwasserneubildungsrate vom Jahresniederschlag (Beispiel: landwirtschaftliche Nutzfläche bei hohen Flurabständen und für verschiedene Böden)	25
Abb. 8: Flächenanteil der verschiedenen Verdunstungsklassen an der Fläche von NRW	28
Abb. 9: Einfluss der potenziellen Verdunstung auf die reale Verdunstung (nach BAGLUVA) für ausgewählte Nutzungen bei gegebenen Niederschlagsverhältnissen in den einzelnen Zonen unterschiedlicher potenzieller Verdunstung	29
Abb. 10: Klimazonen in NRW	31
Abb. 11: Abhängigkeit der realen Verdunstung vom Flurabstand (berechnet nach BAGLUVA)	35
Abb. 12: Flurabstände nach der BK50 (links) und nach aktuellen Grundwasserstandsmessungen (rechts) an einem Beispielstandort im Ruhrgebiet	36
Abb. 13: Wasserhaushaltsgrößen in Abhängigkeit von der Befestigung bei einem Sandboden mit hohen Flurabständen (> 3 m) und einem Niederschlag von 800 m/a	38
Abb. 14: Beispielhafter Ausschnitt 10 km x 10 km aus verschiedenen digitalen Datensätzen:	41
Abb. 15: Grundwasserkörper und Gewässereinzugsgebiete NRW (Ausschnitt: Einzugsgebiet der Emscher)	48
Abb. 16: Klimatische Bodenwasserbilanz der Wasserwirtschaftsjahre 2002 bis 2004 bei Grünlandnutzung und einer nutzbaren Feldkapazität von 150 mm (Beispiel Raum Bottrop, Ruhrgebiet)	51
Abb. 17: Vergleich der Grundwasserneubildung nach Meßner 1997 (Verdunstung nach BAGLUVA, Direktabfluss nach Meßner) mit dem Basiabfluss nach Wundt (schriftl. Mitteilung von Neumann 2002)	54

Abb. 18: Streudiagramme der Grundwasserneubildung basierend auf der BAGLUVA-Abflusshöhe: LIEBSCHER & KELLER (oben links), DÖRHÖFER & JOSOPAIT (oben rechts), SCHROEDER & WYRWICH (Mitte links), MEßER (Mitte rechts), GROWA 98 (unten links), HAD-GWNeu (unten rechts)	56
Abb. 19: Grundwasserneubildung im Emschergebiet (1961-1990)	63
Abb. 20: Grundwasserneubildungsveränderungen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 (links) und 1961-1990 bis 2071-2100 (rechts) (CLM 2)	63
Abb. 21: Geplante Flächennutzung (links) und Grundwasserneubildung bei Umsetzung der Planung (rechts)	64
Abb. 22: Wasserhaushaltsgrößen im unbebauten Ausgangszustand und bei Bebauung bei Lehmböden (links) und Sandböden (rechts)	65
Abb. 23: Auswirkungen der Befestigung (2,2 ha Einzel- und Doppelhäusern, 0,2 ha Erschließungsstraßen und 0,9 ha Grünanlage) und Regenwasserversickerung auf den Wasserhaushalt eines Baugebietes bei Lehmboden und mittleren Flurabständen	66
Abb. 24: Grundwasserneubildung in einem Beispielgebiet in der Nähe von Winterberg (Sauerland, NRW)	67
Abb. 25: Wasserhaushaltsgrößen im Jahresverlauf (oben) und gemessener grundwasserbürtiger Abfluss nach Natermann (unten) für zwei zugehörige Abflusspegel	68
Abb. 26: Langjähriges Mittel von Verdunstung, Gesamtabfluss und Direktabfluss in den Baumbergen	69
Abb. 27: Langjähriges Mittel der Grundwasserneubildung in den Baumbergen	70
Abb. 28: Langjährig mittlere Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Lippe (Nordrhein-Westfalen)	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klimazonen in NRW abgeleitet aus der realen Verdunstung nach BAGLUVA	29
Tab. 2: Zuordnung der Böden zu den Bodengruppen (B) und ihre Kennzeichen (nFK: nutzbare Feldkapazität, We: Tiefe des effektiven Wurzelraumes)	33
Tab. 3: Seeverdunstung nach DVWK 1996 in Abhängigkeit von den Klimazonen (berechnet aus dem 5jährigen Mittel verschiedener Klimastationen in NRW)	37
Tab. 4: Differenzierung der Flächennutzung	42
Tab. 5: Versickerungsanteile am Niederschlag für verschiedene Belagarten (SIEGERT 1984, KOWALEWSKI et al. 1984, BMRBS 1988 und BOCK et al. 1990)	43

Tab. 6: Differenzierung der Befestigungsarten bei Detailkartierungen nach MEßER 1997	44
Tab. 7: Anteil maßgeblicher Versiegelungsarten einzelner Versiegelungsklassen an der Gesamtfläche (Castroper Hochfläche: MEßER 1997, Speckhorn: COLDEWEY & GEIGER 2001)	45
Tab. 8: Abstufung der Hangneigung	46

Anhang

- 1 Übersicht über die Differenzierung der berücksichtigten Parameter
- 2 Klassifizierung der Böden aus der Bodenkarte 1:50.000 BK50 NRW
- 3 Klassifizierung der Nutzung
 - 3.1 Corine
 - 3.2 Atkis
 - 3.3 RVR
- 4 Berechnungstabellen Verdunstung
 - 4.1 Klimazone 1
 - 4.2 Klimazone 2
 - 4.3 Klimazone 3
 - 4.4 Klimazone 4
- 5 Berechnungstabellen p-Wert
 - 5.1 Reliefenergiestufe 1
 - 5.2 Reliefenergiestufe 2
 - 5.3 Reliefenergiestufe 3
 - 5.4 Reliefenergiestufe 4

1 EINLEITUNG

Angaben zur Grundwasserneubildung werden benötigt, um Eingriffe in den Wasserhaushalt beurteilen zu können bzw. Veränderungen prognostizieren zu können. Im Allgemeinen werden die Eingriffe auf den grundwasserbürtigen Abfluss eines Vorfluters oder das Einzugsgebiet eines wasserwirtschaftlichen Eingriffes bezogen. Beispielhafte Fragestellungen sind die Auswirkungen

- einer Grundwasserentnahme auf das Grundwasserdangebot,
- landschaftlicher Veränderungen (z.B. Anlage von Baggerseen oder Steinbrüche) auf den grundwasserbürtigen Abfluss eines Vorfluters oder
- klimatischer Veränderungen auf den Wasserhaushalt.

Detaillierte flächendifferenzierte Angaben sind bei der Erstellung bzw. Kalibrierung von numerischen Grundwasserströmungsmodellen erforderlich, mit denen umfassende Prüfungen der Auswirkungen von wasserwirtschaftlichen Eingriffen, z.B. im Hinblick auf Flurabstandsveränderungen, durchgeführt werden.

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, werden für die Erstellung von numerischen Grundwassermodellen kleinräumig detaillierte und hoch aufgelöste Daten erforderlich. D.h. bei der Zuverlässigkeit der Ergebnisse kommt es nicht nur auf das zu verwendende Verfahren an, sondern auch auf die Qualität und Auflösung der Eingangsdaten an. Letztlich können die Ergebnisse nicht besser als die Eingangsdaten sein.

Das im Folgenden vorgestellte vereinfachte Berechnungsverfahren wurde im Wesentlichen bei der Erstellung von numerischen Grundwassermodellen verifiziert und die Ergebnisse vielfach mit Abflussdaten an Gewässerpegeln verglichen. Bei der Anwendung sind keine weiteren Regressionsanalysen von Abflussdaten erforderlich. Die Berechnung erfolgt durch eine einfache Verschneidung der Eingangsdaten in einem Geographischen Informationssystem und anschließende Ableitung der Wasserhaushaltsgrößen aus Tabellen bzw. deren Berechnung anhand der Wasserhaushaltsgleichung. Ein wichtiger Vorteil ist damit die einfache Nachvollziehbarkeit der Berechnungen, allerdings erkauft mit einer

Klassenbildung bei den Eingangsdaten. Damit lässt sich jedoch auch eine tatsächliche Flächendifferenzierung, wie sie für numerische Grundwassermodelle erforderlich ist, anstelle der oft üblichen Rasterbearbeitung vornehmen. Die Differenzierung in 6 Klimazonen ermöglicht den Einsatz in weiten Teilen Mitteleuropas außerhalb der Alpen. Das Verfahren ist insbesondere in urbanen Räumen verifiziert, so dass auch Sickerwasserprognosen für Stoffaustragsberechnungen möglich sind. Die Parameter Flurabstand und Boden sind entkoppelt, um auch aktuelle Flurabstände für Nass- und Trockenjahre berücksichtigen und auch Grundwasserneubildungsveränderungen bei wasserwirtschaftlichen Eingriffen prognostizieren zu können. Die Eingangsdaten sind, beispielsweise in NRW, großräumig digital beim Landesvermessungsamt, dem Landesumweltamt und dem Geologischen Dienst verfügbar. Die Ergebnisse sind für alle Wasserhaushaltsgrößen flächendifferenziert darstellbar, so dass die Plausibilitätskontrolle leicht möglich ist.

1.1 Begriffsbestimmungen

Die im folgenden Text verwendeten Fachausdrücke und Begriffe sind in der DIN-Norm 4049-3 (1994) und in der bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) aufgeführt. Durch Überschneidungen ergeben sich z. T. geringfügig unterschiedliche, manchmal auch missverständliche Formulierungen. Unter Grundwasserneubildung wird der Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser zum Grundwasser verstanden (DIN 4049-3 1994). Das Volumen des auf einer bestimmten Fläche infiltrierten Wassers während einer bestimmten Zeitspanne ergibt die Grundwasserneubildungsrate (m^3/s oder l/s). Wie beim Abfluss wird unterschieden zwischen der Grundwasserneubildungshöhe (mm/a) und der Grundwasserneubildungsspende ($\text{l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$). Letztere wird auf eine definierte Fläche, das unterirdische Einzugsgebiet, bezogen (= in der Horizontalprojektion gemessenes Gebiet, aus dem Grundwasser einem bestimmten Ort zufließt. Dieses Gebiet kann durch unterirdische Wasserscheiden abgegrenzt sein). Unterirdisches und oberirdisches Einzugsgebiet fallen nicht immer zusammen. Die Abgrenzung des unterirdischen Einzugsgebietes muss mit besonderer Sorgfalt vorgenommen werden, ggf. sind unterirdischer Zu- oder Abstrom zu berücksichtigen.

1.2 Methoden zur Berechnung

Einen Überblick über die verschiedenen Methoden zur Berechnung der Grundwasserneubildung gibt der ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG (1977). Danach werden folgende Methoden unterschieden:

- direkte punktuelle Erfassung mit Lysimetern,
- Berechnungen aus dem Bodenwasserhaushalt (Wassergehalts- und Wasserspannungsmessungen, Tritium-Markierung, Mathematische Modelle für die Bodenwasserbewegung),
- Berechnungen aus Grundwasserständen und Aquiferdaten (Grundwassermodelle, Wasserwerksbetrieb),
- Ermittlung aus dem Abfluss in Vorflutern,
- Ermittlung aus der Chlorid-Konzentration des Grundwassers und der Niederschläge und
- Ermittlung aus der Wasserhaushalts-Gleichung.

Während Lysimeterdaten und Bodenwasserhaushaltsdaten lediglich punktuelle Informationen über die Verdunstung liefern und aus Abflussdaten sowie Chlorid-Konzentrationen Angaben über Gebietsmittelwerte zu bekommen sind, ermöglicht die Berechnung mittels Wasserhaushalts-Gleichung flächendifferenzierte Angaben über die Grundwasserneubildung. Diese sind beispielsweise zur Kalibrierung von Grundwasserströmungsmodellen erforderlich. Die Auswertung von Abflussdaten wird i.d.R. zur Verifizierung der Berechnungen herangezogen. Im Folgenden wird vor allem auf die flächendifferenzierte Berechnung der Grundwasserneubildung mittels Wasserhaushalts-Gleichung eingegangen.

1.3 Wasserkreislauf und Wasserhaushalts-Gleichung

Wasser durchläuft eine geschlossene Kette von Ereignissen. Dieser Prozess wird als Wasserkreislauf bezeichnet (Abb. 1). Er erfasst die Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre. Das Wasser kann im Wasserkreislauf in gasförmigem (Dampf), flüssigem und festem (Eis und Schnee) Aggregatzustand auftreten. Der Wasserkreislauf schließt den gesamten Erdball ein. Zur Erfassung einzelner Teilbereiche werden Teilwasserkreisläufe festgelegt. Sie können sowohl vertikale als auch horizontale Schnittstellen zu den Nachbarbereichen aufweisen. 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, unterirdischer Abfluss und Vorratsänderung.

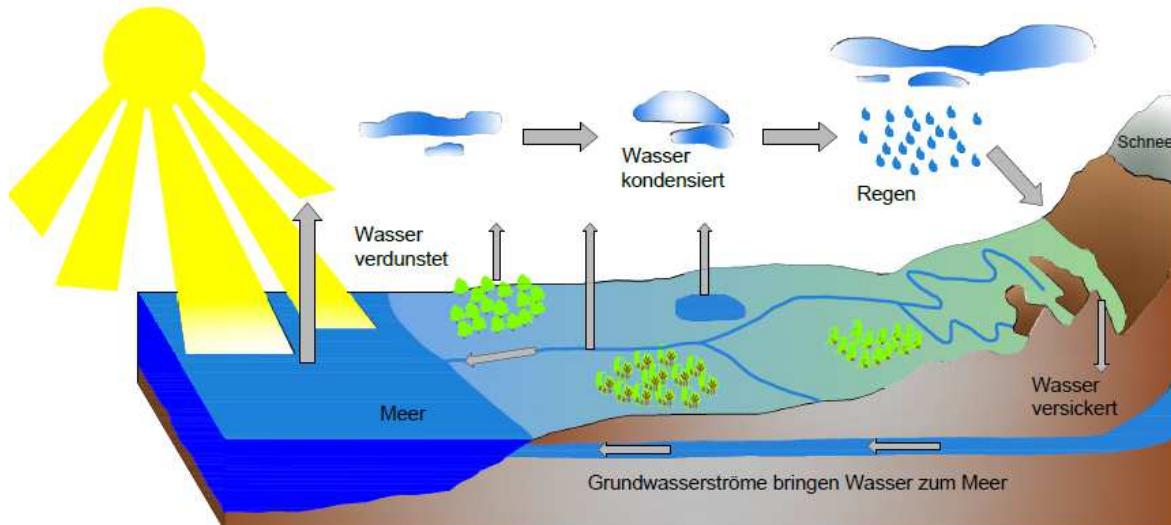


Abb. 1: Wasserkreislauf

Die mit den o. a. Prozessen verbundenen Wasservolumina werden in der Wasserbilanz eines Teilbereichs - Teilwasserkreislauf - erfasst. Die Summe aller Teilvolumina muss gleich Null sein, da aus dem geschlossenen Wasserkreislauf kein Wasser verloren gehen kann. Bei 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}_{Ad} = Direktabfluss (mm/a)

\dot{h}_{AGw}	=	Basisabfluss bzw. grundwasserbürtiger Abfluss bzw. Grundwasserneubildung (mm/a)
\dot{h}_v	=	Evapotranspiration / Verdunstung (mm/a)
\dot{h}_s	=	Speicheränderung (Rücklage / Aufbrauch von Wasser, mm/a)
\dot{h}_z	=	Zuleitung / Entnahme von Wasser (mm/a)

Alle Größen der Wasserhaushalts-Gleichung sind auf eine Zeiteinheit zu beziehen.

Alle Größen der Wasserhaushalts-Gleichung werden auf dieselbe Zeiteinheit bezogen.

Das als Niederschlag aus der Atmosphäre in einen Bilanzraum eingetragene Wasser kann über die Evapotranspiration, den Abfluss und Entnahmen wieder ausgetragen werden. Die Evapotranspiration setzt sich aus der Transpiration (Pflanzenverdunstung), der Evaporation (Boden- und Gewässerverdunstung) und der Interzeption (Verdunstung von Wasser nasser Pflanzenoberflächen) zusammen. Das Wasser, das nicht verdunstet gelangt zum Abfluss.

Einem betrachteten Bilanzraum kann darüber hinaus Wasser zugeführt oder entnommen werden (). 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 Wasserentnahmen, z.B. Brunnenförderung, Dränung.

1.3.1 Evapotranspiration

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-DWK 2002) ist der aktuelle Kenntnisstand zur Berechnung der verschiedenen Verdunstungsgrößen ausführlich dargestellt. Die potenzielle Evapotranspiration unter Standardbedingungen (Gras-Referenzverdunstung) kann nach verschiedenen Verfahren, z.B. nach PENMAN (zitiert in ZMARSLY 2002), TURC (zitiert in GRAY 1970), WENDLING (WENDLING 1995) oder HAUDE (1955) berechnet werden. Die Verfahren erfordern unterschiedliche meteorologische Eingangsdaten, die nicht immer für alle Standorte zur Verfügung stehen. 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) be-

rechnet werden. Die Differenz zwischen potenzieller und realer Evapotranspiration ist abhängig vom Wasserdargebot und damit von den Niederschlägen. Bei hohen Niederschlägen (bzw. geringen Flurabständen) entspricht die potenzielle Verdunstung nach HAUDE (1955) der realen Verdunstung. In einem trockenen Jahr ist im Mittel das Energiedargebot groß und damit die potenzielle Verdunstung, während die reale Verdunstung gering ist, da wenig Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Die reale Verdunstung hängt bei geringeren Niederschlägen von der nutzbaren Feldkapazität des Bodens im effektiven Wurzelraum sowie der Art und dem Entwicklungsstand der Vegetation ab. Bäume haben im Allgemeinen eine größere Schöpftiefe (Kap. 3.4) als krautige Pflanzen. Der Wald ist das ganze Jahr über existent ebenso wie die Gräser auf Grünland. Die Nutzpflanzen auf Ackerstandorten entnehmen dem Boden nur über einen begrenzten Zeitraum im Jahr Wasser. Da die potenzielle Verdunstung für Grünland gilt, kann die reale Verdunstung von Wald auch über dieser liegen.

1.3.2 Abfluss

Das Wasser, was nicht verdunstet gelangt zum Abfluss. Beim Abfluss (auch Gesamtabfluss bezeichnet) unterscheidet man den Direktabfluss und den grundwasserbürtigen Abfluss. Als Direktabfluss wird hier derjenige Abfluss 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 unterschieden in den so genannten Zwischenabfluss (Interflow) in der ungesättigten Zone (wird noch zum Direktabfluss gerechnet) und den Basisabfluss (Base Flow) bzw. grundwasserbürtigen Abfluss in der gesättigten Grundwasserzone (Abb. 2). 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:

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

- \dot{h}_{Ad} = Direktabfluss (mm/a)
- \dot{h}_{Agw} = Basisabfluss bzw. grundwasserbürtige Abfluss (mm/a)
- \dot{h}_{Ai} = Zwischenabfluss / Interflow (mm/a)
- \dot{h}_{Ao} = Oberflächenabfluss (mm/a)

Der Abflussvorgang gliedert sich in eine Benetzungsphase, eine Phase der Muldenauffüllung und eine Ablaufphase. Erst wenn ein gewisser Schwellenwert überschritten ist, gelangt ein Teil der Niederschlagsmengen zum Abfluss. Der Anfangsverlust bis zum Überschreiten des Schwellenwertes beträgt zwischen 1 mm (versiegelte Flächen) und 6 mm (Gras). Der Gesamtabflussbeiwert, also der Anteil des Abflusses am Niederschlag, ist abhängig von der Intensität und der Dauer des Niederschlagsereignisses sowie der Oberflächenrauhigkeit und Neigung des Geländes.

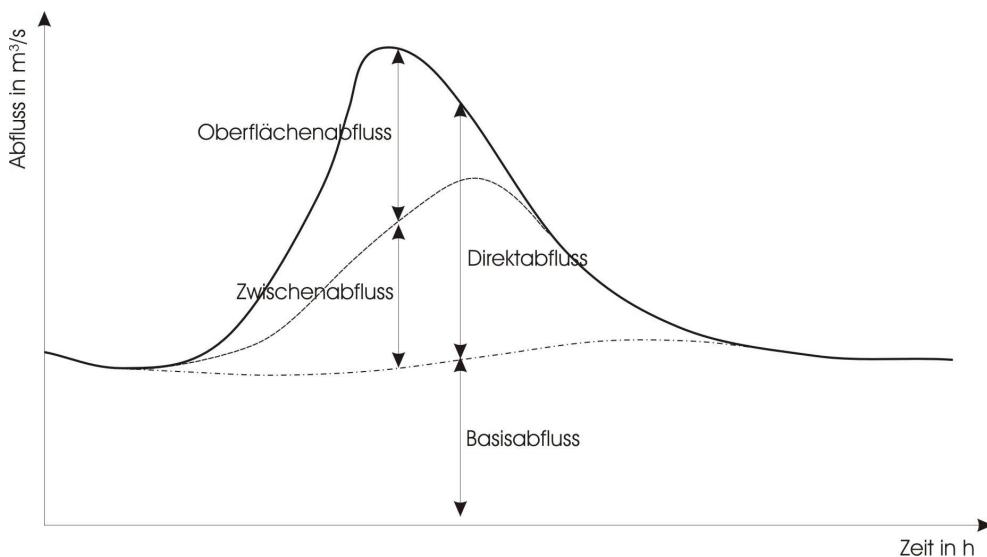


Abb. 2: Schema des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs, dargestellt an einem Hochwasserereignis

Eine Sonderform des Abflusses stellen Dränagen dar, die auf ca. ein 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 ein Teil des hoch anstehenden Grundwassers ab.

1.3.3 Vorratsänderung

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.

Unter natürlichen Bedingungen werden sich im jahreszeitlichen Rhythmus Überschuss und Defizit der Wassereinträge und Wasserausträge des Bilanzraums abwechseln. Bei hinlänglich langen Zeiträumen wird der zeitliche Mittelwert des Speicherterms immer kleiner und geht im Grenzfall gegen Null.

1.3.4 Fehler

Bei aller noch so sorgfältigen und genauen Erfassung der für die Berechnung notwendigen Parameter darf man nicht der Täuschung unterliegen, höchste Genauigkeitsgrade erreichen zu können (MEßER 2012). Dafür sind die geologischen und meteorologischen Inhomogenitäten häufig zu groß und nicht voll erfassbar. Errechnete Werte stellen immer Integrationen über definierte Gebiete dar. Von besonderer Wichtigkeit ist eine zuverlässige Abgrenzung der zu betrachtenden (unterirdischen) Einzugsgebiete. Insbesondere in mächtigen bzw. hoch durchlässigen Porengrundwasserleitern sind die Wechselwirkungen mit den Gewässern (z.B. Unterströmungen und Versickerungen) zu beachten.

Außer den genannten Einflüssen sind auch Fehler (-bereiche) bei der Datenermittlung zu berücksichtigen (GROSSMANN & LANGE, 1999). So beträgt z. B. die durch Messfehler bedingte Abweichung der Niederschlagshöhe bei freier Stationslage in den Wintermonaten bis über 30 % und geht in den Sommermonaten auf 11 % zurück, während in stark windgeschützten Lagen mit 8 % bis 11 % nur geringe jahreszeitliche Unterschiede auftreten (RICHTER, 1995, Atv-Dvwk M504, 2002). Die Variation der Interzeption beträgt für Laubwald (bzw. Nadelwald) im Sommer im Mittel 25 % (bzw. 34 %), im Winter 19 % (bzw. 33 %) des Niederschlags. Ungenauigkeiten sind auch bei den anderen Eingangsdaten (potentielle/tatsächliche Evapotranspiration, nutzbare Feldkapazität, kapillarer Aufstieg u.a.m.) zu erwarten (MEßER 2012).

2 BERECHNUNGSVERFAHREN

2.1 Allgemeines

Für die flächendifferenzierte Berechnung der Grundwasserneubildung kommt nur die Ermittlung aus der Wasserhaushalts-Gleichung in Betracht. Hierzu wurden in der Vergangenheit verschiedene Berechnungsverfahren publiziert. Zu nennen sind die Verfahren

- BAGROV/GLUGLA (BAGROV 1953, GLUGLA et al. 1976, BAMBERG et al. 1980),
- RENGER & STREBEL (RENGER & STREBEL 1980, SPONAGEL et al. 1983, RENGER et al. 1986, RENGER & WESSOLEK 1990) und
- DORHÖFER & JOSOPAIT (1980).

Bei den Verfahren BAGROV/GLUGLA und RENGER & STREBEL wird generell nicht die Grundwasserneubildung berechnet, sondern lediglich die reale Verdunstung, die vom Niederschlag subtrahiert den Gesamtabfluss ergibt. Bei DORHÖFER & JOSOPAIT 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 & WYRWICH 1990). Bei verschiedenen weiteren Autoren (BOGENA ET AL. 2003, HERGESELL & BERTHOLD 2005 und NEUMANN 2004) erfolgt die Aufteilung des Gesamtabflusses über den 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, Talsperren und andere Abfluss regulierende Einflüsse).

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

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

\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)

p = Direktabflussanteil am Gesamtabfluss (%)

Die drei oben genannten grundlegenden Berechnungsverfahren sind vielfach modifiziert und angewandt worden. Das aktuelle Verfahren von BAGROV und GLUGLA ist im Merkblatt M504 (ATV-DvwK, 2002) detailliert dargestellt. Weiterentwicklungen des Verfahrens RENGER & WESSOLEK (1990) sind bei BOGENA et al. (2003) und GROSSMANN & LANGE (1999) zu finden. Das Verfahren von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) wurde abgewandelt und verfeinert von SCHROEDER & WYRWYCH (1990) und von MEßER (1997, 2010) 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 Verfahrensvergleich durchgeführt und die Ergebnisse mit Auswertungen von Abflussmessungen verglichen (NEUMANN & WYCISK, 2001, NEUMANN, 2004). Im Rahmen der Entwicklung und Anwendung eines makroskaligen Verfahrens kommt NEUMANN (2004) dabei zu dem Schluss, dass der Ansatz von MEßER auf der Grundlage der betrachteten 106 Einzugsgebiete und bezogen auf Trendverlauf und Korrelation, die beste Anpassung aller genannten Modellversionen aufzeigt. Die Modifikationen nach SCHROEDER & WYRWYCH (1990), GROWA 98 sowie insbesondere die ursprüngliche Version von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) zeigen größere Streuungen und systematische Abweichungen.

Bei den einzelnen Berechnungsverfahren werden die Parameter in unterschiedlicher Abstufung berücksichtigt. Bei DÖRHÖFER & JOSOPAIT und SCHROEDER & WYRWICH werden die Böden z.B. in vier bzw. drei Einheiten unterteilt, während sie bei BAGROV/GLUGLA in neun Abstufungen Berücksichtigung finden. Bei RENGER & STREBEL können beliebige Abstufungen der nutzbaren Feldkapazität im Wurzelraum verwendet werden.

Die Berechnung der Verdunstung erfolgt bei DORHÖFER & JOSOPAIT und bei SCHROEDER & WYRWICH auf der Grundlage von festgelegten Verdunstungswerten für jede Kombination aus Bodenbedeckung und Bodengruppe, ermittelt aus langjährigen Ly simeteruntersuchungen. Bei BAGROV/GLUGLA und RENGER & STREBEL wird die po tenzielle Verdunstung nach BAGROV (1953), HAUDE (1955), TURC (zitiert in GRAY 1970) oder WENDLING (1995) ermittelt und daraus die reale Verdunstung berechnet.

Die Ergebnisse der Verfahren sind grundsätzlich vergleichbar. Bei der jeweiligen Prob lemstellung ist vor der Anwendung immer auch die Verwendbarkeit der Verfahren zu prü fen. Beispielsweise wurde das Verfahren von RENGER & STREBEL in einem niederschlagsarmen Raum entwickelt. Die Verdunstung ist bei diesem Verfahren sehr stark vom Niederschlag abhängig, so dass in niederschlagsreichen Gebieten zu hohe reale Eva potranspirationswerte berechnet werden (Abb. 3). Die Methode ist somit bei Jahresnie derschlägen über 750 mm/a nur bedingt anwendbar.

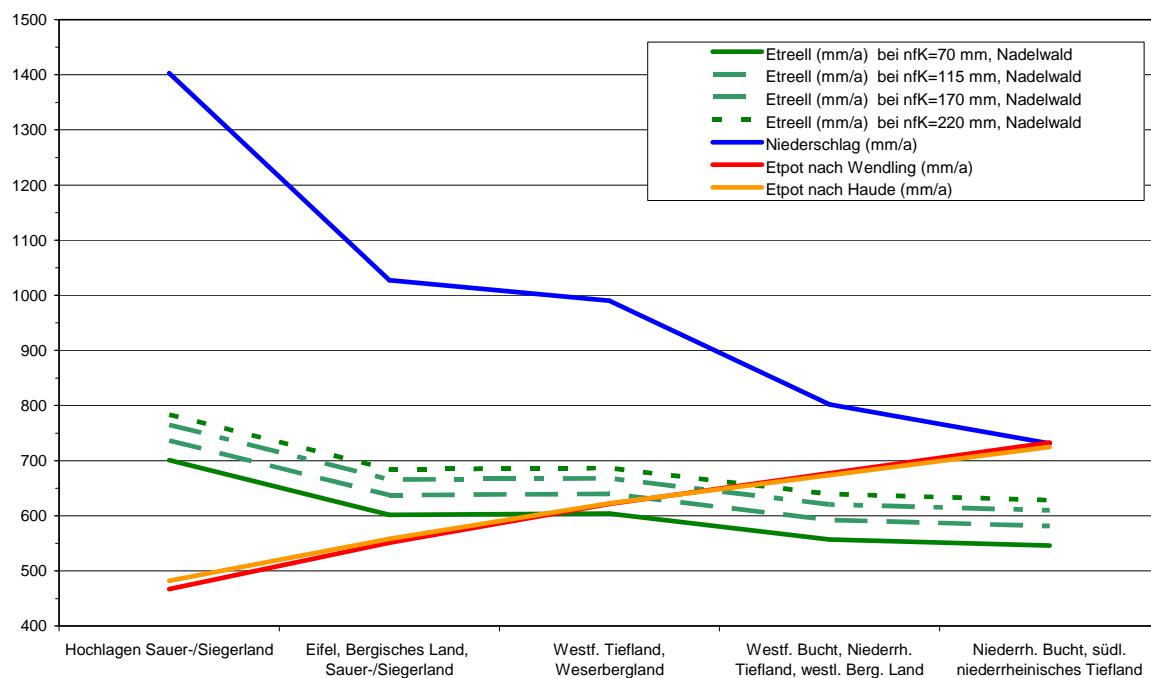


Abb. 3: Reale Verdunstung nach Renger & Streb el und verschiedenen nutzbaren Feldkapazitäten für Klimastationen in den verschiedenen Naturräumen von NRW im Vergleich zur potenziellen Verdunstung

Die Grundwasserneubildung in Extremjahren ist mit Berechnungsverfahren, bei denen die reale Verdunstung über die potenzielle Verdunstung ermittelt wird, zuverlässiger als mit festen realen Verdunstungswerten nach SCHROEDER & WYRWICH. Bei der Auswahl eines Berechnungsverfahrens ist außerdem die Datenverfügbarkeit von Bedeutung. Beispielsweise spielt bei BAGROV/GLUGLA (ATV-DWK 2002) bei den Waldfächern das Umtriebsalter und bei Grünland die Grashöhe eine Rolle. Dies ist zweifellos richtig; großräumig nutzbare digitale Daten hierzu sind jedoch nicht verfügbar.

2.2 Verwendetes Verfahren

Ziel der Bearbeitung ist die flächendifferenzierte Bestimmung der langjährig mittleren Grundwasser-Neubildung. Grundlage der Berechnungen ist die o.g. Wasserhaushalts-Gleichung. Diese wird für jede homogene Teilfläche gelöst. Die Einheit aller Größen ist mm/a. In Abb. 4 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 bzw. ArcView durchgeführt. Für jede in sich homogene Kleinfläche werden die beiden Größen in mm/a berechnet. Die Berechnung gliedert sich gemäß Abb. 4 und Kap. 2.2.1 bis 2.2.4 in 4 Arbeitsschritte:

1. Berechnung der Verdunstung,
2. Berechnung des Gesamtabflusses,
3. Abtrennung des Direktabflusses und
4. Berechnung der Grundwasserneubildung.

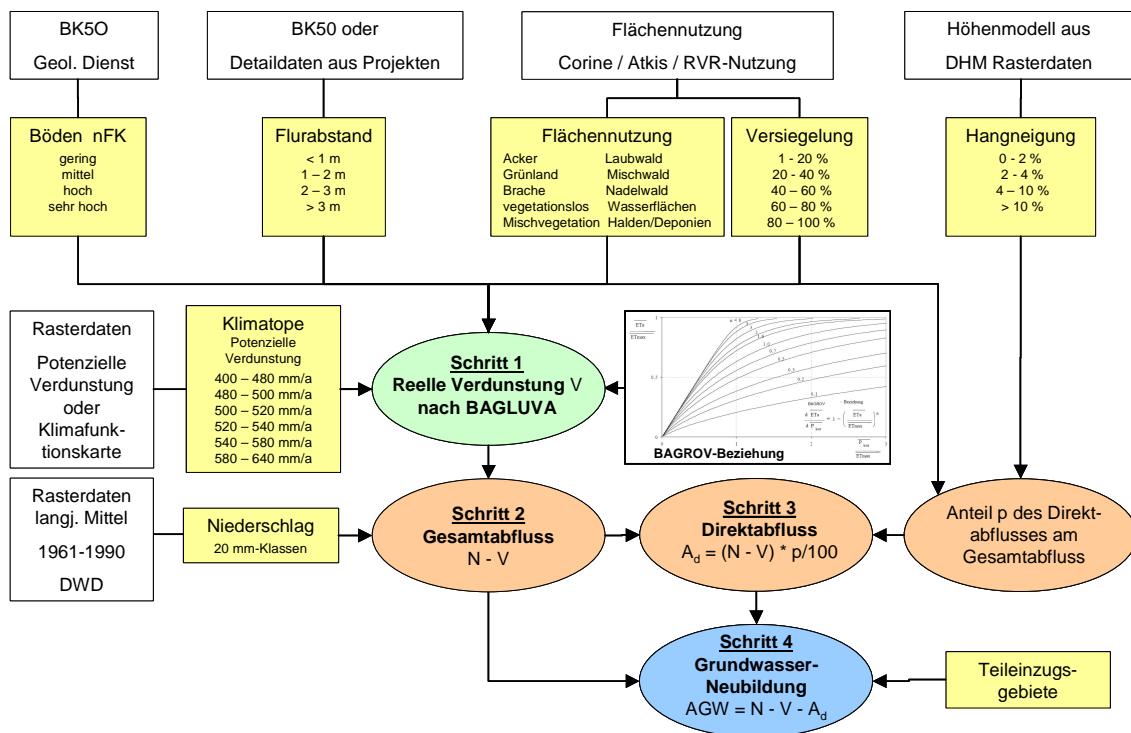


Abb. 4: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasser-Neubildung

Bei der Anwendung zur Berechnung von Einzeljahren ist Vorsicht geboten, da die klimatischen Verhältnisse nicht unbedingt den langjährigen Mittelwerten entsprechen. Insofern sollten bei der Berechnung von Einzeljahren mit ihren jeweiligen Niederschlagsverhältnissen geprüft werden, ob die klimatischen Verhältnisse (vor allem Temperatur und Luftfeuchte) den langjährig mittleren Verhältnissen entsprechen und damit die langjährige Verdunstung repräsentativ ist, ggfs. kann die Zuordnung einer anderen Klimazone sinnvoll sein. In diesem Zusammenhang sind auch eine Speicheränderung für das berechnete Jahr bzw. entsprechende Einflüsse aus den Vorjahren zu berücksichtigen.

Zur vereinfachten Berechnung wurde das Verfahren nach MEßER (1997), das auf der Grundlage des Verfahrens von SCHROEDER & WYRWICH (1990) arbeitet, zugrunde gelegt. Die wesentlichen Veränderungen gegenüber dem 1997 veröffentlichten Verfahren ist die Berücksichtigung der Verdunstung nach „BAGLUVA“ (Verfahren nach BAGROV und GLUGLA zur Bestimmung vieljähriger Mittelwerte von tatsächlicher Verdunstungs- und Abflusshöhe, ATV-DWK 2002, GLUGLA ET AL. 2003), die Berücksichtigung unterschiedlicher Klimazonen und die weitere Aufgliederung der Böden und Flurabstände.

Das Verfahren ist generell für mitteleuropäische Verhältnisse einsetzbar. Modifikationen des Berechnungsverfahrens sind ggf. bei:

- potenziellen Verdunstungswerten von < 400 mm/a bzw. > 640 mm/a,
- bei außergewöhnlich geringen Niederschlägen (< 400 mm/a),
- hohen Schneeanteilen bzw. außergewöhnlich langen Frostperioden oder
- Sonderbiotopen (z. B. Zwergstrauchheiden, großflächige Röhrichte, großflächige Moore)

erforderlich. Dies gilt nicht nur für die Verdunstung, sondern auch für den Direktabfluss, beispielsweise wenn konkrete Angaben über Entwässerungsmaßnahmen (Dränagen, Grabensysteme) vorhanden sind.

2.2.1 Verdunstung

Die Berechnung der Verdunstung erfolgte für die verschiedenen Kombinationen von Klimazone, Boden, Flurabstand und Flächennutzung nach dem Verfahren BAGLUVA (Abb. 5). Die Parameterabstufung ist dem Anhang 1 bzw. dem Kap. 3 zu entnehmen. Die Gras-Referenzverdunstung wurde dabei nach Turc-Wendling (ATV-DWK 2002) berechnet und daraus die maximale Verdunstung ermittelt. Die Verdunstung befestigter Flächen wurde WESSOLEK & FACKLAM (1997) entnommen bzw. nach GLUGLA & KRAHE (1995) bzw. GLUGLA et al. (1999) berechnet. Die Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse für jede sich ergebende Kombination der Eingangsparameter ist den Tabellen im Anhang 4 zu entnehmen.

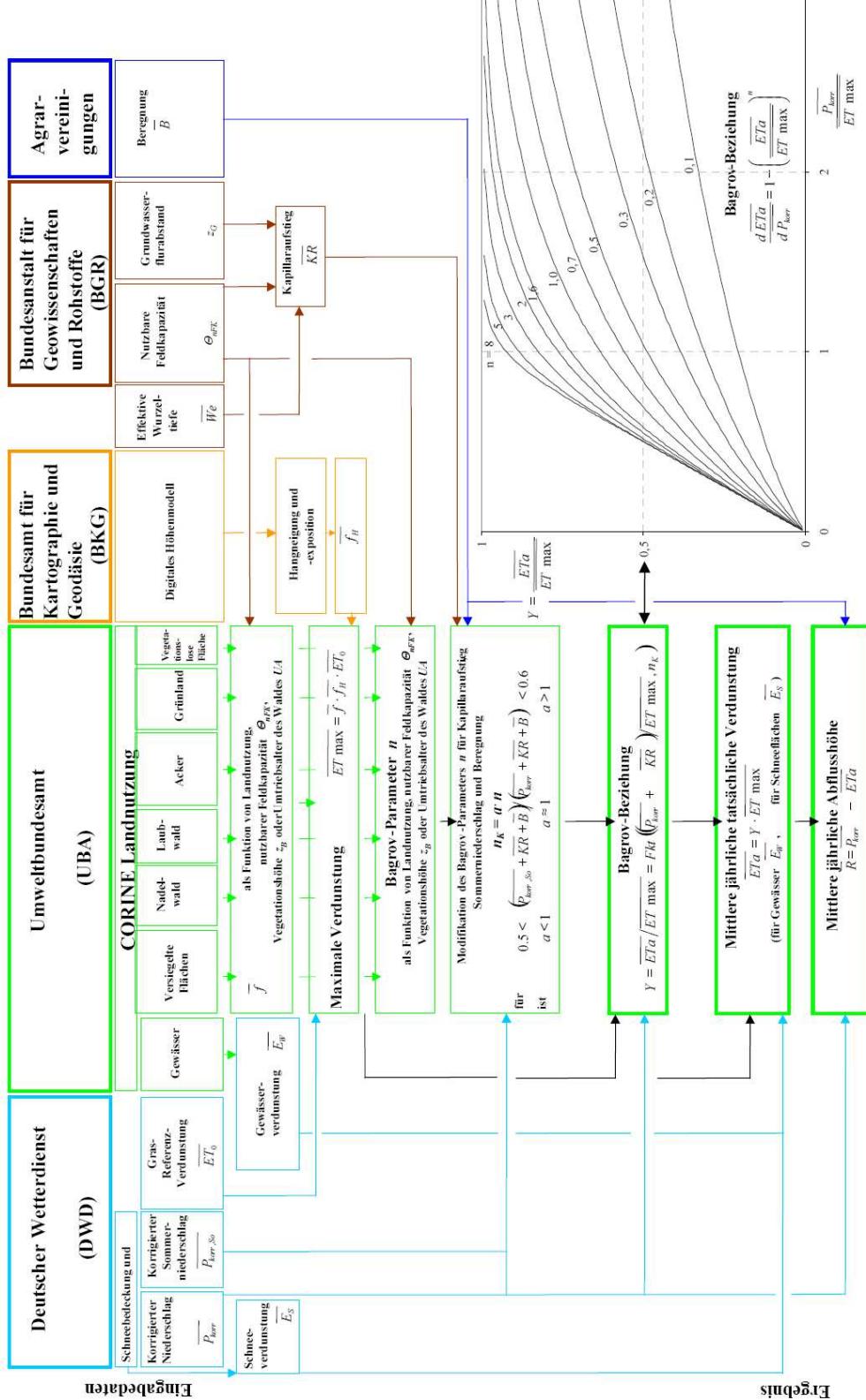


Abb. 5: Schema zur Berechnung der mittleren jährlichen tatsächlichen Verdunstung nach dem Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (GLUGLA ET AL. 2003)

2.2.2 Gesamtabfluss

Der Gesamtabfluss ist die Differenz aus dem Niederschlag und der Verdunstung gemäß Wasserhaushaltsgleichung (Gleichung 1). Auf Grund der hohen Niederschläge und der relativ geringen Verdunstung in den Mittelgebirgen nimmt der Gesamtabfluss vom Tiefland (Klimazonen 5 und 6) zu den höheren Lagen (Klimazonen 1 und 2) deutlich zu.

2.2.3 Direktabfluss

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, also an dem Wasser, das nicht verdunstet.

Die sich je nach Flächennutzung/Versiegelung, Boden, Flurabstand und Hangneigung ergebenden Anteile p des Direktabflusses am Gesamtabfluss können den Tabellen im Anhang 5 entnommen werden. Der Direktabflussanteil nimmt mit steigendem Flurabstand ab und ist bei bindigen Böden deutlich größer als bei nicht bindigen Böden (Abb. 6). 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. 7).

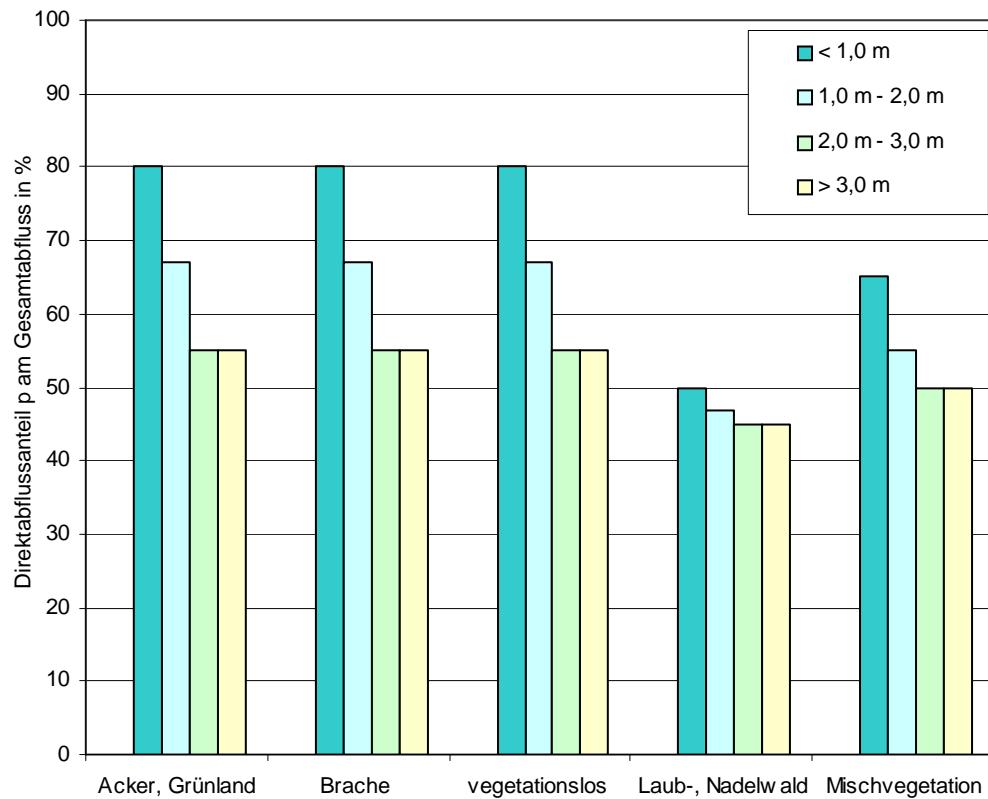


Abb. 6: Direktabflussanteil am Gesamtabfluss in Abhängigkeit vom Flurabstand (Reliefenergie > 10 %, Boden mit geringer nutzbarer Feldkapazität)



Abb. 7: Direktabfluss auf Waldstandorten bei hoher Hangneigung

2.2.4 Grundwasserneubildung

Durch eine weitere Verschneidung der flächendifferenzierten Ergebnisse von Niederschlag, Verdunstung und Direktabfluss erhält man nach der Berechnung mit der Wasserhaushalts-Gleichung 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 können eliminiert werden.

3 EINGANGSDATEN UND DEREN BEDEUTUNG

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

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

Im Folgenden soll deren Bedeutung, der tendenzielle Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Verwendung verfügbarer digitaler Daten mit deren Differenzierung beschrieben werden.

3.1 Niederschlag

Bedeutung

Der Niederschlag ist, abgesehen von der (künstlichen) Zuführung von Wasser, die einzige positive Eingangsgröße in der Wasserhaushalts-Gleichung. Insofern ist die Grundwasserneubildung sehr stark von den Niederschlagsverhältnissen abhängig (Abb. 8).

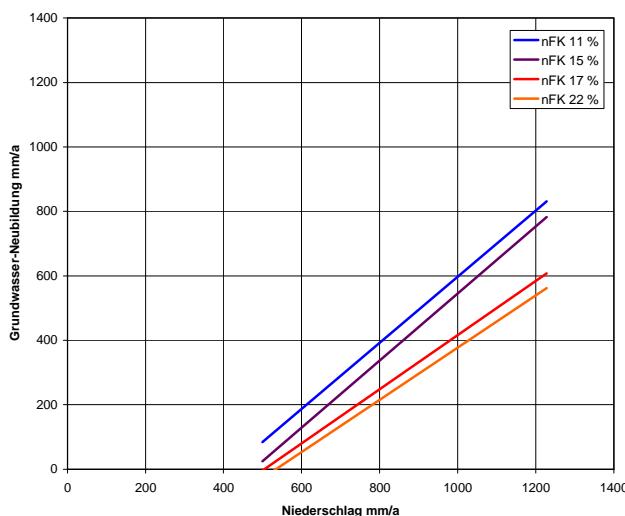


Abb. 8: Abhängigkeit der Grundwasserneubildungsrate vom Jahresniederschlag (Beispiel: landwirtschaftliche Nutzfläche bei hohen Flurabständen und für verschiedene Böden)

Differenzierung

Als Abstufung für die weitere Bearbeitung ist eine Höhenstufung von 20 mm zu empfehlen. Für die Berechnungen sollte die jeweilige Klassenmitte als Eingangswert der Berechnung verwendet werden. In bestimmten Fällen kann die Betrachtung von Einzeljahren sinnvoll sein. Allerdings ist dann zu prüfen, ob die übrigen klimatischen Bedingungen des betrachteten Jahres bzw. des Zeitraumes den mittleren langjährigen Bedingungen insbesondere für die Verdunstung entspricht. Da der Niederschlag der einzige positive Eintrag in der Wasserhaushaltsgleichung ist könnten andernfalls unrealistische Werte bei der Grundwasser-Neubildungsberechnung auftreten.

Verwendung digitaler Daten

Niederschlagsdaten für zahlreiche Messstationen und flächendifferenzierte Auswertungen für ausgewählte Niederschlagsperioden werden vom Deutschen Wetterdienst (www.dwd.de) zur Verfügung gestellt. Zunehmend stehen Niederschlagsdaten auch von privaten Stationen und von den Umweltämtern der Länder zur Verfügung.

Der Niederschlag kann entweder als feste Höhe für ein Bearbeitungsgebiet oder flächendifferenziert in Form von Niederschlagsgleichen (bzw. Flächen gleicher Niederschlagsklasse) berücksichtigt werden. Die Verfahrensweise ist abhängig von der Größe des Untersuchungsgebietes, den vorhandenen Daten und insbesondere der Morphologie, die häufig für inhomogene Niederschläge verantwortlich ist.

Nach RICHTER (1995) ist der Niederschlag um den Niederschlagsmessfehler zu korrigieren. Letzterer ist abhängig von der Stationslage (differenziert nach frei - leicht geschützt - mäßig geschützt - stark geschützt) und dem Gebiet. In der Jahressumme ergeben sich bei nicht bekannter Stationslage beispielsweise Korrekturfaktoren von +11,4 % im westlichen Teil des norddeutschen Tieflandes und +12,4 % für die Mittelgebirge zwischen Eifel und Harz. Im Falle einer Berechnung des Jahresganges der Wasserhaushaltsgrößen ist eine monatsweise Differenzierung des Korrekturfaktors erforderlich.

Generell können die langjährigen Niederschlagsdaten vom Deutschen Wetterdienst in einem 1 km²-Raster sowohl korrigiert als auch unkorrigiert bezogen werden. Die Rasterdaten werden mittels eines Digitalen Höhenmodells in Polygone mit entsprechender Klassenbreite umgesetzt.

3.2 Klimatope

Bedeutung

Der Einfluss des Niederschlags auf die Grundwasserneubildung ist bereits in Kap. 3.1 beschrieben worden. Die Verdunstung ist abhängig von verschiedenen Klimaparametern. In der Rangfolge ihrer Bedeutung sind dies (MULL 1987):

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

Maßgebend sind vor allem die klimatischen Verhältnisse im Sommerhalbjahr, da hier 80 % bis 90 % der 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. In den Stadtzentren ist sie höher als im wenig besiedelten Umland. Eine Temperaturzunahme von 1 °C führt zu einer Verdunstungszunahme um 15 mm/a bis 30 mm/a und die Verringerung der Sonnenscheindauer um 10 Stunden pro Monat um 10 mm/a bis 20 mm/a (Berechnung nach TURC zitiert in GRAY 1970 bzw. WENDLING 1995). Mit steigender Verdunstung nimmt die Grundwasserneubildung entsprechend der Wasserhaushalts-Gleichung ab.

Differenzierung

Die langjährig mittlere potenzielle Verdunstung (nach TURC) beträgt nach Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes in NRW zwischen 400 mm/a und 640 mm/a, wobei Werte zwischen 560 mm/a und 600 mm/a mehr als 50 % der Fläche einnehmen (Abb. 9).

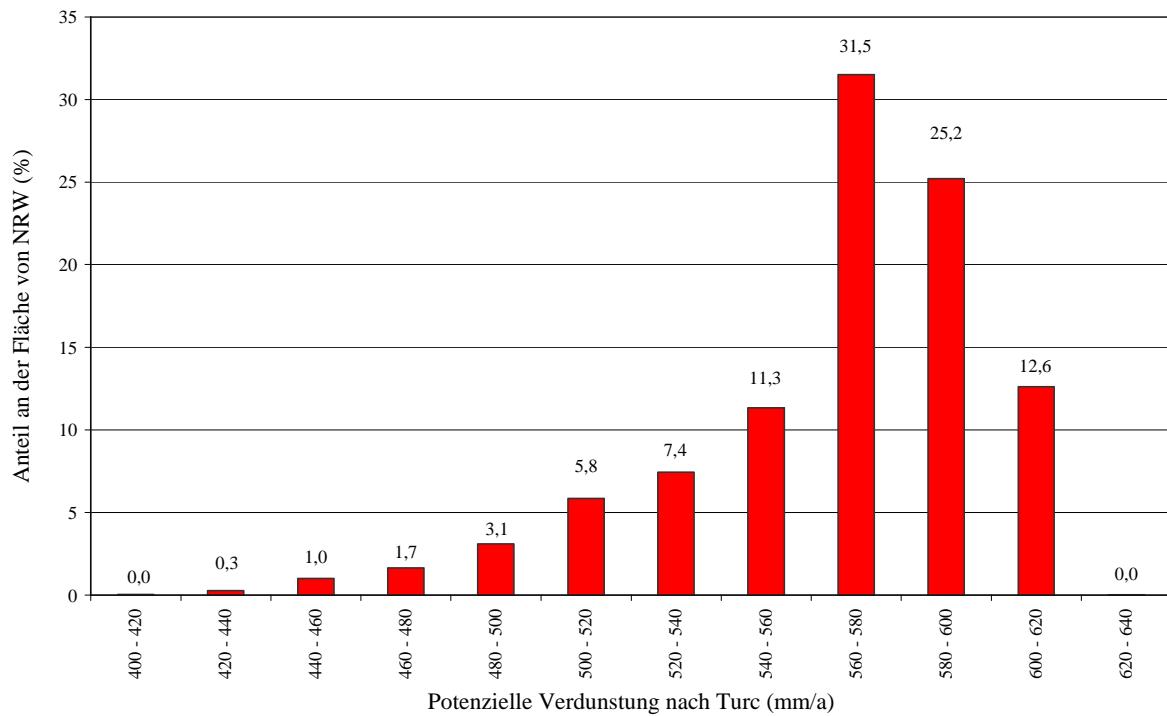


Abb. 9: Flächenanteil der verschiedenen Verdunstungsklassen an der Fläche von NRW

Unter Berücksichtigung des Anteils an der Gesamtfläche NRW's und der Bedeutung für die Berechnung der realen Verdunstung (Abb. 9) ist eine Differenzierung in 6 Klimazonen sinnvoll (

Tab. 1, Abb. 11) sinnvoll. Eine enge Abstufung mit einer Klassenbreite von 20 mm/a wurde dort gewählt, wo die potenzielle Verdunstung einen deutlichen Einfluss auf die reale Verdunstung besitzt (Abb. 10).

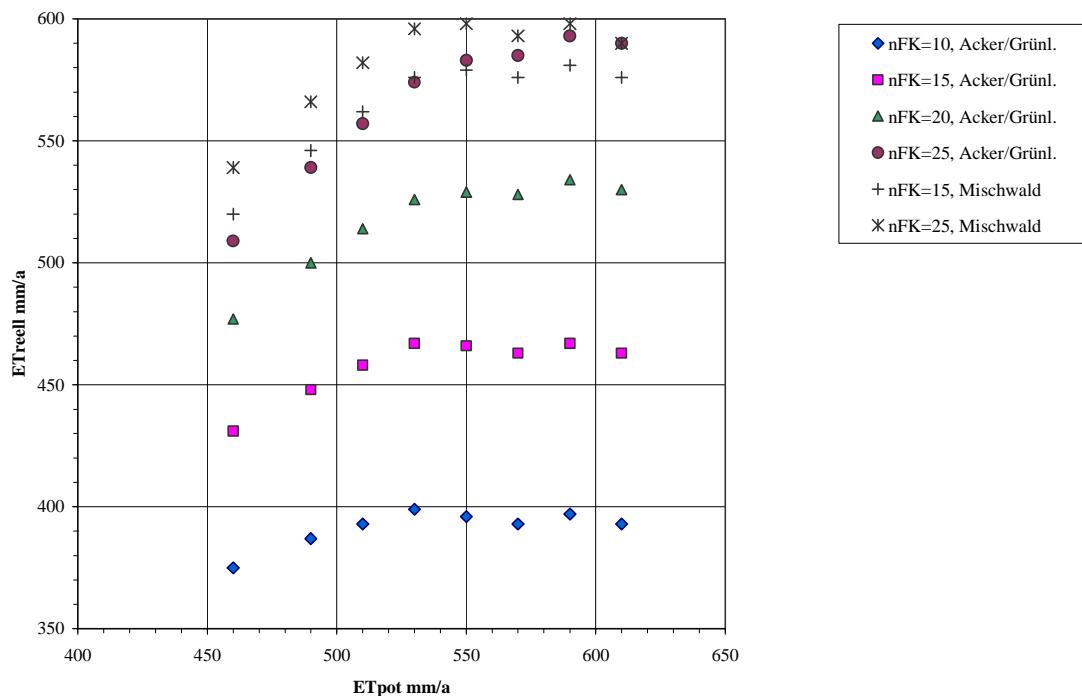


Abb. 10: Einfluss der potenziellen Verdunstung auf die reale Verdunstung (nach BAGLUVA) für ausgewählte Nutzungen bei gegebenen Niederschlagsverhältnissen in den einzelnen Zonen unterschiedlicher potenzieller Verdunstung

Tab. 1: Klimazonen in NRW abgeleitet aus der realen Verdunstung nach BAGLUVA

Zone	Spanne ETpot mm/a	Mittelwert ETpot mm/a	Beispiel ETreal Landwirtschaft, nFK=20 %	Naturraum (Beispiele)
1	400 – 480	460	477	Hochlagen Sauer- und Siegerland
2	480 - 500	490	500	Eifel, Sauer- und Siegerland
3	500 - 520	510	514	Randlagen von Sauer- und Siegerland, Eifel und Bergisches Land
4	520 - 540	530	526	
5	540 – 580	560	529	Westfälische Bucht, Weserbergland, Bergisches Land
6	580 - 640	600	532	Niederrh. Tiefland und Niederrheinische Bucht, südliche Westf. Bucht
Mittel		566	517	

Bei meso- und mikroskaligen Bearbeitungen ist es erforderlich, eine weitere Differenzierung in Abhängigkeit von der Hangrichtung vorzunehmen (Kap. 3.6).

Ebenso bietet sich eine Berücksichtigung stadtclimatischer Zonen im urbanen Raum an. Nach MEßER (1997) ist das Jahresmittel der Lufttemperatur in Innenstädten um 1° C höher und bei Stadt- und Siedlungsklima um 0,5° C höher als im Freiland. In der Vegetationszeit ist der Temperaturunterschied etwa doppelt so hoch wie im Winter. Die relative Luftfeuchte verhält sich spiegelbildlich zur Lufttemperatur und ist im Jahresmittel bei Innenstadtklima um 6 % niedriger als im Freiland. Auch hier ist der Unterschied in der Vegetationsperiode größer als im Winter. Die relative Luftfeuchte bei Stadtklima unterscheidet sich dagegen nicht signifikant von der im Freiland. Demzufolge ergibt sich für die Verdunstung eine Abhängigkeit von den stadtclimatischen Zonen, wie sie beispielsweise von STOCK (1992) für das Ruhrgebiet dargestellt veröffentlicht sind.

Bei den Klimazonen 5 und 6 wirkt der geringe Niederschlag begrenzend auf die Verdunstung einzelner Nutzungsarten (bei geringer nutzbarer Feldkapazität und hohen Flurabständen), so dass die reale Verdunstung z.T. nicht mit steigender potenzieller Verdunstung zunimmt.

Verwendung digitaler Daten

Generell kann die langjährige potenzielle Verdunstung, berechnet nach verschiedenen Autoren, vom Deutschen Wetterdienst in einem 1 km²-Raster bezogen werden. Die Rasterdaten werden mittels eines Digitalen Höhenmodells in Polygone mit entsprechender Klassenbreite umgesetzt (Tab. 1). Ebenso können aus Messdaten der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der Sonnenscheindauer potenzielle Verdunstungswerte berechnet werden. Entsprechende Daten werden vom DWD bzw. den Umweltämtern der Länder zur Verfügung gestellt. Die Verfahrensweise ist abhängig von der Größe bzw. Differenzierung des Untersuchungsgebietes und der Verfügbarkeit vorhandener Daten.

Zur Berücksichtigung regionalclimatischer Effekte, wie beispielsweise stadtclimatischer Einflüsse, sind weitergehende Erkenntnisse zu berücksichtigen. Für das Ruhrgebiet liegt eine synthetische Klimafunktionskarte vor (STOCK 1992). Detaillierte Hangneigungen bzw. Hangrichtungen können aus einem Digitalen Höhenmodell abgeleitet werden.

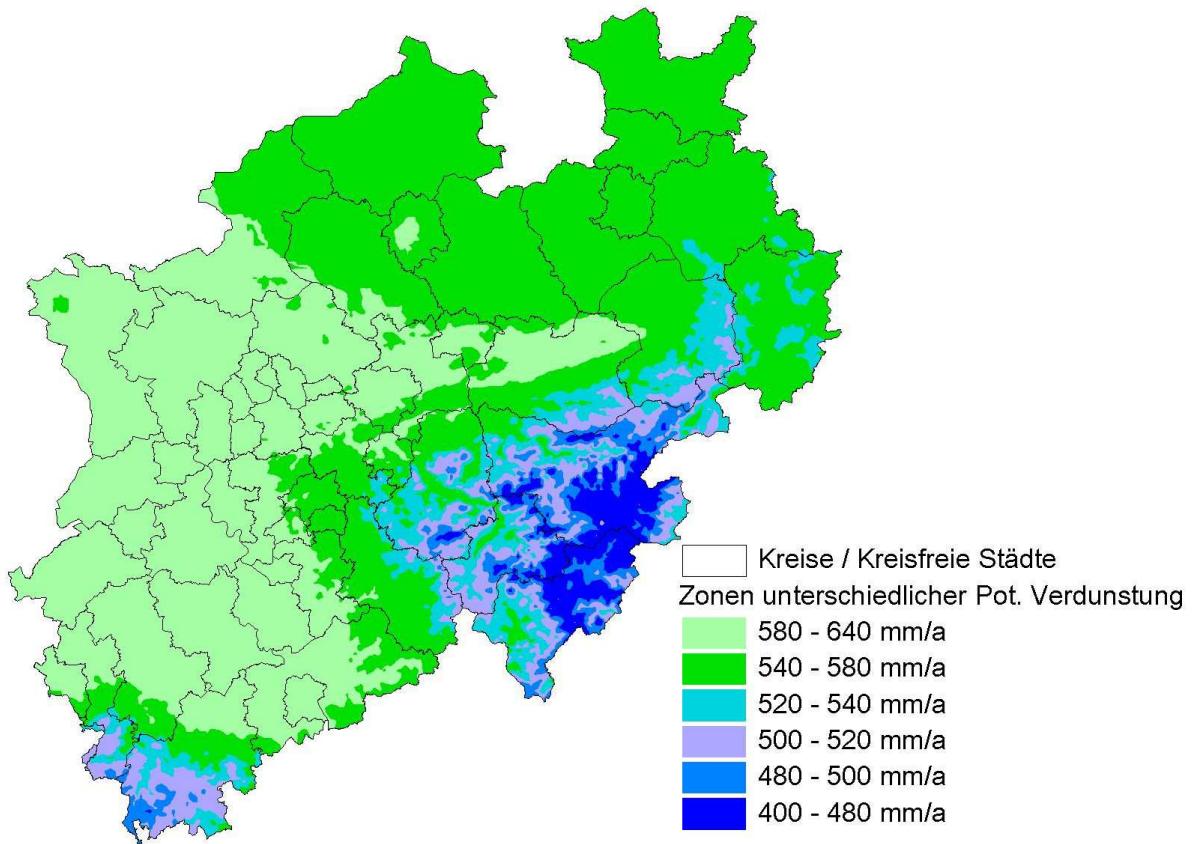


Abb. 11: Klimazonen in NRW

3.3 Böden

Bedeutung

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 Grundwasser-Neubildung bei Sandböden mit geringer nutzbarer Feldkapazität höher als bei gering durchlässigen Böden. Je schwerer - weniger durchlässig - die Böden werden, desto größer ist die Verdunstung und der Direktabfluss. Unter humiden Klimabedingungen, z.B. in Nordwestdeutschland, sind die Böden am Ende des Winters fast immer mit Wasser gesättigt, so dass die nutzbare Feldkapazität erreicht und überschritten wird.

Bei Festgesteinen ist deren Einfluss auf den Wasserhalt von deren Durchlässigkeit und der Mächtigkeit bzw. der nutzbaren 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. Festgesteine mit mächtiger Bodenüberdeckung, beispielsweise Braunerden, besitzen in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität des Bodens Verdunstungs- und Direktabflusswerte, die entsprechenden Lockergesteinen vergleichbar sind.

Differenzierung

Wesentliches Merkmal zur Einstufung der Böden ist die nutzbare Feldkapazität. Daneben spielen die Tiefe des effektiven Wurzelraumes, vorhandene Staunässe und die Durchlässigkeit eine Bedeutung für die Einstufung. Die Vielzahl der Bodentypen wird in Anlehnung an die Einstufung des Geologischen Dienstes NRW in der BK50 zu den in Tab. 2 aufgeführten 5 Bodengruppen zusammengefasst, indem die nutzbare Feldkapazität in % ausgerechnet, um den Einfluss der Grundwasser- bzw. Staunässetiefe auszuklammern, und gemäß Tab. 2 den Bodengruppen zugewiesen wird. Die nutzbare Feldkapazität in mm/a ist hier nicht direkt verwertbar, da darin die Grundwassertiefe berücksichtigt ist, bei der hier vorgestellten Anwendung jedoch die Flurabstände separat einfließen.

Bei staunassen Böden (Pseudogley) und gering durchlässigen Festgesteinen ist bei geringer Bodenmächtigkeit (Tiefe), unabhängig von der tatsächlichen nutzbaren Feldkapazität und dem Flurabstand, mit einem erhöhten Direktabfluss zu rechnen. Zumal landwirtschaftliche Nutzflächen und Forstflächen i.d.R. dränirt sind. Aus diesem Grund werden sie separat betrachtet und Ihnen bezüglich der Verdunstung relativ geringe Werte (Bodengruppe 3) und bezüglich des Direktabflusses sehr hohe Werte zugeordnet. Die Einstufung in die Bodengruppe 5 erfolgt nach Tab. 2.

Tab. 2: Zuordnung der Böden zu den Bodengruppen (B) und ihre Kennzeichen (nFK:
nutzbare Feldkapazität, We: Tiefe des effektiven Wurzelraumes)

B	Bezeichnung	Bodentyp (Beispiel)	Kennzeichen
1	leichte Sandböden und flachgründige skelettreiche Böden	Podsol, Regosol	nFK: sehr gering und gering (<50–90 mm, Ø 73 mm, <13 %, Ø 10,9 %) We: 5-8 dm
2	Sandig-tonige Lehm-böden, lehmiger Ton Hochmoor aus schwach zersetzen Torf	Braunerde, Plaggenesch, Braunerde-Podsol	nFK: mittel (90 – 140 mm, Ø 115 mm, 13-16 %, Ø 14,7 %) We: 9 dm
3	lehmiger Sand, schluffiger Sand und schluffiger Lehm. Niedermoar aus stark zer-setztem Torf	Braunerde, Parabraunerde, Pseudogley-Braunerde, Kolluvium	nFK: hoch (140-200 mm, Ø 160 mm, 16-20 %, Ø 17,3 %) We: 11 dm
4	tiefgründige Lößböden, sandig-lehmiger Schluff	Auenboden, Pseudogley	nFK: sehr hoch und extrem hoch (>200 mm, Ø 229 mm, >20 %, Ø 22,4 %) We: 11 dm
5	Oberflächennahe Staunässe-böden, geringdurchlässige Festgesteine	Pseudogley, Pelosol, Ranker	SH/SW: mittlere bis sehr starke Staunässe (3 bis 5) mit geringer nFK (< 110 mm) We: <7 dm

Die Einstufung von Aufschüttungen ist insofern schwierig, da sie in den digitalen Bodenkarten nicht mit Kenndaten belegt sind. Nach Möglichkeit sollten hier Bohrungen im Hinblick auf die nutzbare Feldkapazität bzw. die Unterscheidung in rollige und bindige Oberböden vorgenommen werden. Insbesondere bei Sickerwasserprognosen zur Gefährdungsabschätzung. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass bei Anschüttungen Staunässe vermieden wird und daher rollige Oberböden mit relativ geringer nutzbarer Feldkapazität verwendet werden. Ohne spezielle Kenntnisse sollten Anschüttungen daher in die Bodengruppen 1 (z.B. Schlacke, Asche, unverwittertes Bergematerial, Bau-schutt), evtl. auch Bodengruppe 2 (z.B. lehmiger Bodenaushub, Bodenaushub-Bauschuttgemisch), eingestuft werden. Eine Ausnahme hiervon bilden Deponien und Hal-den, die i.d.R. mit bindigen Böden abgedeckt werden und daher in die Bodengruppe 3, evtl. auch Bodengruppe 4, einzustufen sind.

Die Kenndaten der Böden und ihre Einstufung in die 5 Bodengruppen sind im Anhang 2 verzeichnet.

Verwendung digitaler Daten

In NRW kann flächendeckend auf die BK50 des Geologischen Dienstes zurückgegriffen werden. Gemäß der o.g. Differenzierung wird zunächst die nutzbare Feldkapazität in % berechnet und die Bodengruppe gemäß Tab. 2 eingestuft. Im Anschluss daran werden die Böden mit mittlerer bis sehr hoher Staunässe selektiert und davon wiederum diejenigen mit geringer nutzbarer Feldkapazität in mm bzw. mit geringer Tiefe (< 7 dm) herausgefiltert und die Bodengruppe 5 zugewiesen. Auch die Ranker und Pelosole werden der Bodengruppe 5 zugewiesen.

3.4 Flurabstände

Bedeutung

Bei geringem Flurabstand steht ein ausreichendes Wasserdargebot für die Verdunstung zur Verfügung (reale Verdunstung entspricht 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. auf 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. Der kapillare Aufstieg als Wasserhaushaltskomponente der ungesättigten Bodenzone hat dann eine Bedeutung, wenn das aufsteigende Wasser die Wurzelzone erreicht. Er ist abhängig von der Korngröße, der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt. Wird die Wurzeltiefe zur maximalen Tiefe addiert, bis zu der 0,2 mm/d an Grundwasser kapillar aufsteigen kann, ergibt sich der maximale Flurabstand (Schöpftiefe), bis zu dem ein Einfluss der Wasserversorgung auf die Vegetation gegeben ist.

Differenzierung

Abb. 12 zeigt die Abhängigkeit der realen Verdunstung vom Flurabstand bei ausgewählter Flächennutzung. Je nach Wurzeltiefe der Vegetation ist ein deutliches Absinken der Verdunstungsleistung der Vegetation zwischen 1,0 m (Acker, sandiger Boden) und 2,0 m (Wald, bindiger Boden) erkennbar.

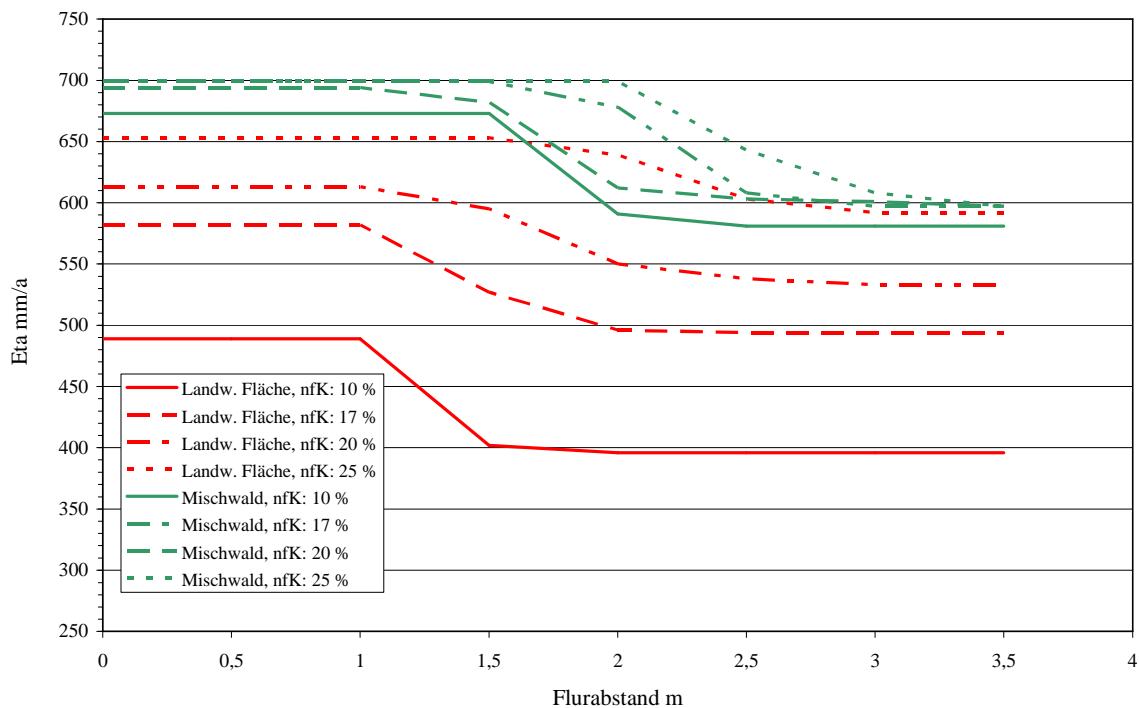


Abb. 12: Abhängigkeit der realen Verdunstung vom Flurabstand (berechnet nach BAGLUVA)

Daraus ergibt sich folgende sinnvolle Abstufung der Flurabstände:

Code	Bezeichnung	Spanne	Mittel
1	Gering	< 1,0 m	0,5 m
2	Mittel	1,0 bis 2,0 m	1,5 m
3	Hoch	2,0 bis 3,0 m	2,5 m
4	Sehr hoch	> 3,0 m	5,0 m

Staunasse Böden sind dabei wie Böden mit geringen Flurabständen zu berücksichtigen.

Verwendung digitaler Daten

Im vorliegenden Berechnungsverfahren werden nicht die Angaben über semiterrestrische Böden aus der BK50 verwendet, auch wenn dies nach wie vor möglich ist, sondern auf

separate Grundlagendaten zurückgegriffen. Dies ermöglicht zum einen anthropogene Veränderungen, die oft wegen des Alters der BK50 in den amtlichen Karten nicht enthalten sind, in den Wasserhaushaltsberechnungen zu berücksichtigen. Beispielsweise entsprechen in weiten Teilen des Ruhrgebietes die in der BK50 dargestellten Flurabstände insbesondere wegen der Bergsenkungen und anderer anthropogener Veränderungen nicht den aktuellen Flurabstandsverhältnissen (Abb. 13). So können aktuell ermittelte Flurabstände einbezogen werden oder auch Grundwasserneubildungsdifferenzen durch wasserwirtschaftlich relevante Eingriffe berechnet werden.

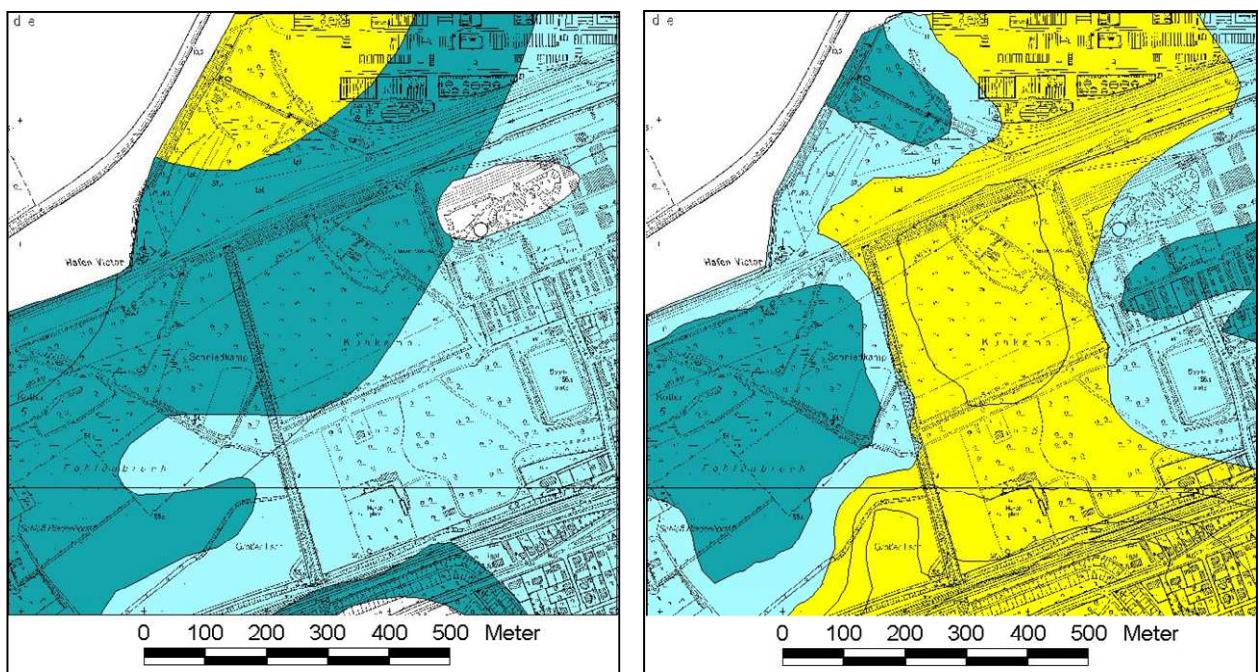


Abb. 13: Flurabstände nach der BK50 (links) und nach aktuellen Grundwasserstandsmessungen (rechts) an einem Beispielstandort im Ruhrgebiet

3.5 Flächennutzung und Versiegelung

Bedeutung

Neben den Böden besitzt auch die Flächennutzung bzw. die Vegetation einen großen Einfluss auf die Verdunstung und 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 deutlich 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. Auch unter Wald kann bei Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität bzw. mit hoher Durchlässigkeit und erhöhten Niederschlägen eine bedeutende Grundwasserneubildung stattfinden.

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. Realistische Verdunstungsraten für den norddeutschen und mitteldeutschen Raum sind Werte zwischen 580 mm/a und 720 mm/a (DVWK 1996). Für das vorliegende Berechnungsverfahren wurde die Seeverdunstung nach DVWK 1996 berechnet und Mittelwerte für die einzelnen Klimazonen gebildet (Tab. 3). Eine Differenzierung nach der Tiefe der Gewässer erscheint dabei nicht notwendig, da die Abweichung vom Mittelwert maximal 11 mm/a beträgt.

Tab. 3: Seeverdunstung nach DVWK 1996 in Abhängigkeit von den Klimazonen (berechnet aus dem 5jährigen Mittel verschiedener Klimastationen in NRW)

Klimazone	Potentielle Verdunstung mm/a	Seeverdunstung mm/a		Mittelwert mm/a
		< 3 m Wassertiefe	> 3 m Wassertiefe	
1	460	423	416	420
2	490	476	465	470
3	510	511	498	504
4	530	546	531	538
5	560	598	580	589
6	600	668	646	657

Die Bodenversiegelung kann im Grundsatz als eine Isolierung der Pedosphäre von der Atmosphäre definiert werden. Durch unterschiedliche Baumaterialien wird der Grad des Isolierungseffektes beeinflusst. Der Übergang von versiegelten über teilversiegelten zu unversiegelten Böden ist fließend. Auch unterhalb der Oberfläche können Bodenversiegelungen vorhanden sein (z.B. U-Bahnen). Insbesondere bei anthropogen umgelagerten Böden ist eine Beurteilung der Versiegelungswirkung problematisch. Heute wird eher die Begrifflichkeit des Befestigungsgrades verwendet. Unter dem Befestigungsgrad wird der Anteil befestigter Flächen verstanden, unabhängig davon, ob diese Flächen an die Kanalisation angeschlossen sind. Befestigte Flächen können undurhlässige (Ziegel-, Metall-,

Glasdächer, Asphaltstraßen) oder unterschiedlich durchlässige Oberflächen (Kieswege, Rasenschotter, Betonverbundsteine) aufweisen (ATV A 198).

Generell nehmen mit steigendem Befestigungsgrad die Verdunstung ab und der Direktabfluss zu. Da der Direktabflussanteil deutlich stärker ansteigt, als die Verdunstung abnimmt, verringert sich die Grundwasserneubildung mit zunehmender Befestigung. Die geringfügige Grundwasserneubildung bei einer Befestigung von 100 % ist ausschließlich der Versickerung teildurchlässiger Bodenbeläge zuzurechnen. Beispielsweise beträgt der Versickerungsanteil am Niederschlag bei Rasengittersteinen und neuem Betonverbundpflaster ca. 60 % und ist damit höher als bei Wald. Insbesondere bei einem Befestigungsgrad unter 20 % sind die befestigten Flächen oft nicht an die Kanalisation angeschlossen, so dass das abfließende Niederschlagswasser über die Bankette versickern kann. Dementsprechend hat die Befestigung bei geringen Befestigungsgraden nur einen geringen Einfluss auf die Wasserhaushaltsgrößen (Abb. 14).

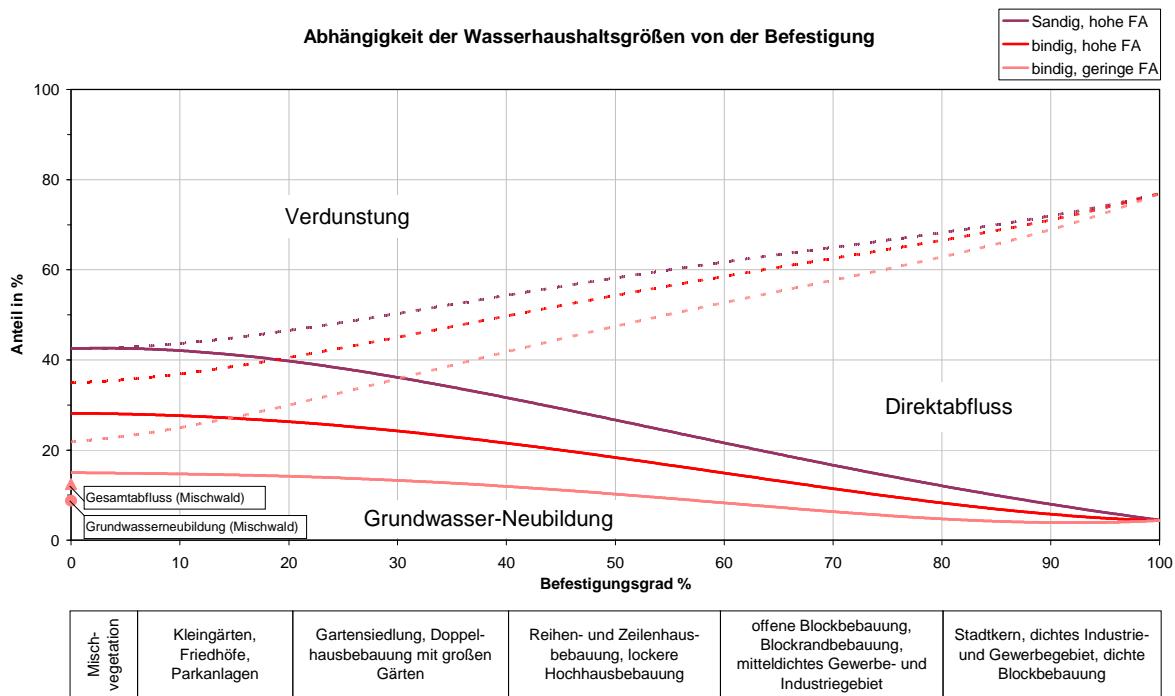


Abb. 14: Wasserhaushaltsgrößen in Abhängigkeit von der Befestigung bei einem Sandboden mit hohen Flurabständen (> 3 m) und einem Niederschlag von 800 m/a

Differenzierung und Verwendung digitaler Daten

Während früher im Wesentlichen auf die zeitintensive Interpretation von topographischen Karten zurückgegriffen wurde (z.B. SCHÖSS 1977, MEßER 1997), liegen heute flächendeckend für die Bundesrepublik Deutschland und damit auch für größere Ballungsräume raumbezogene digitale Nutzungsdaten vor. Die Nutzungsdaten geben in unterschiedlicher Detailliertheit und für verschiedene Maßstabsbereiche Angaben zur Flächennutzung. Bezug auf die Differenzierung der Besiedlungstypen wird in der Regel nach Art der Nutzung unterschieden. Beispielweise werden Wohnbauflächen nicht weiter untergliedert, während bei Industrieanlagen eine sehr weitgehende Aufsplittung nach Branchen vorgenommen wird. Diese Differenzierungen lassen keinen direkten Rückschluss auf den Befestigungsgrad zu, da starke Schwankungsbreiten innerhalb einer Nutzungsklasse möglich sind. Dies betrifft insbesondere die bebauten Bereiche. Beispielsweise kann der Befestigungsgrad bei Wohnbauflächen zwischen 38 % (lockere Zeilenhausbebauung) und 95 % (Stadtzentrum) variieren (MEßER 1997).

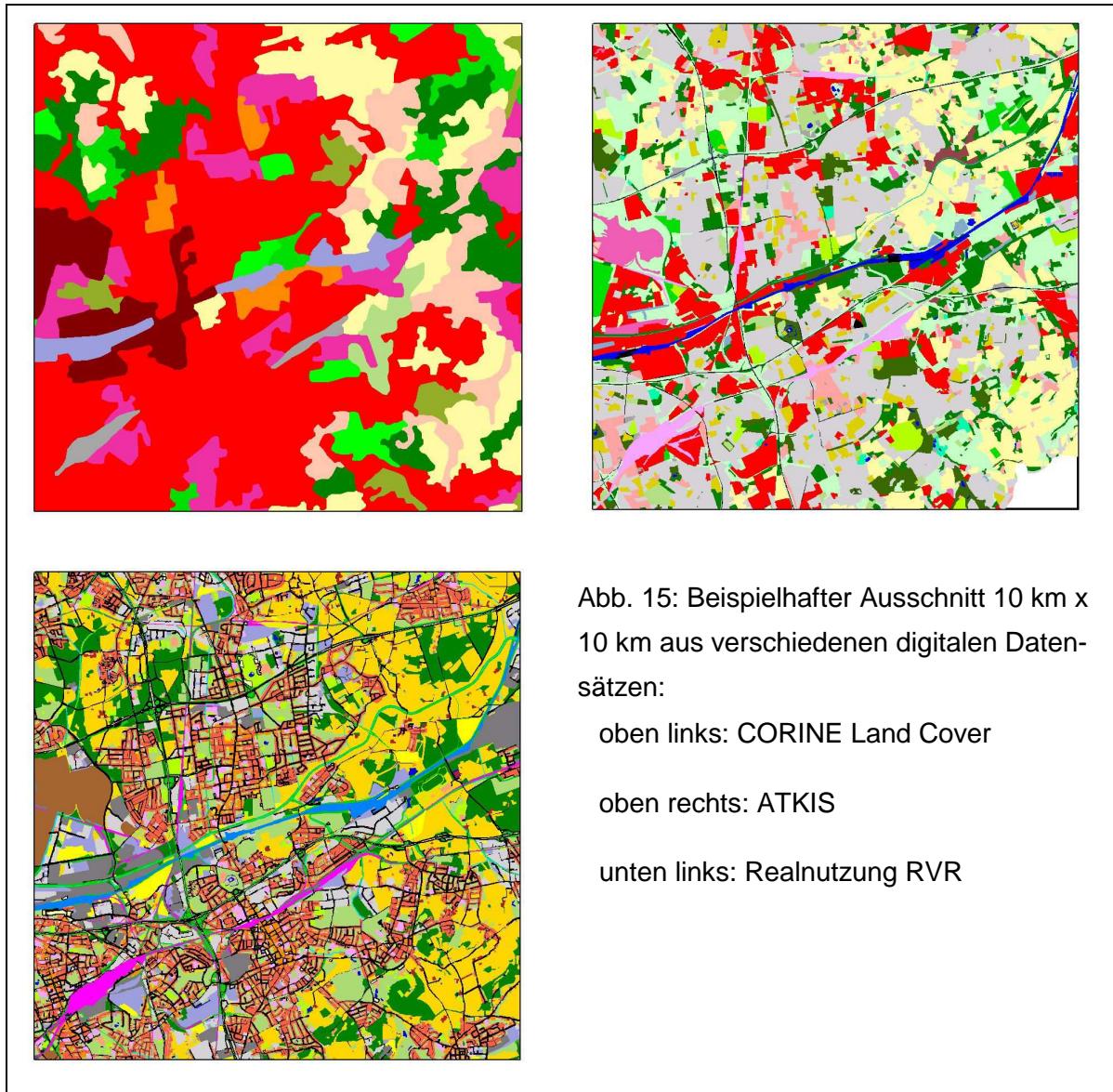
Für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland liegen flächendeckende raumbezogene Informationen über die Flächennutzung vom STATISTISCHEN BUNDESAMT (Daten zur Bodenbedeckung CORINE) sowie von den Landesvermessungsämtern der Bundesländer (Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem ATKIS) vor. Darüber hinaus liegt für das Ruhrgebiet, einschließlich des Kreises Wesel, eine Nutzungskartierung des Regionalverbands Ruhr (RVR) vor. Die drei genannten digitalen Datenbestände unterscheiden sich im Hinblick auf die Differenzierung der Nutzungsarten und die räumliche Auflösung. Ihnen ist gemeinsam, dass die Differenzierung der Nutzungsarten wasserwirtschaftlichen Erfordernissen, insbesondere bei stadthydrologischen Aspekten, nur wenig gerecht wird. Beispielsweise werden versiegelte Flächen nicht nach ihrem Befestigungsgrad differenziert.

Die **CORINE-Daten** enthalten Bodenbedeckungsdaten für die Bundesrepublik Deutschland. Die Daten liegen in verschiedenen Vektor- und Rasterformaten vor. Die Vektordaten sind sowohl als Gesamtdatenbestände in unterschiedlicher geographischer Abdeckung und Projektion als auch, unterteilt in 257 Einzeldatenbestände, im Blattschnitt und Projektion der Topographischen Karte 1:100.000 (TK100) bzw. der Topographischen Karte 1:100.000 Ausgabe Staatlich der ehemaligen DDR vorhanden (STATISTISCHES BUNDESAMT 1997). Der Datenbestand basiert auf der Auswertung von Satellitenbildern. Insgesamt wird zwischen 44 Bodenbedeckungskategorien unterschieden (Anhang 3.1). Die CORINE Land Cover-Daten sind von den berücksichtigten digitalen Nutzungsdaten die am wenigsten differenzierten Daten. In Abb. 15 ist ein beispielhafter Ausschnitt von 10 km x 10 km

Kantenlänge dargestellt. Im Vergleich mit den übrigen Datensätzen ist erkennbar, dass die Darstellung extrem stark generalisiert ist. Er ist in Bezug auf wasserwirtschaftliche Fragestellungen lediglich für makroskalige Bearbeitungen verwendbar.

Das digitale Landschaftsmodell (DLM) des Amtlich-Topographisch-Kartographischen Informationssystems (**ATKIS**) beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft und das Relief der Erdoberfläche im Vektorformat (Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen 2004). In seinem inhaltlichen Umfang ist es am Informationsgehalt der Topographischen Karte 1:25.000 orientiert, weist jedoch eine höhere Lagegenauigkeit auf. Die Erstherstellung, Aktualisierung und Ergänzung erfolgt mit Hilfe der Deutschen Grundkarte 1:5.000 und Orthophotos 1:5.000. Welche Objekte das DLM beinhaltet und wie diese zu bilden sind, ist im ATKIS-Objektartenkatalog festgelegt. Einen Auszug aus dem Objektartenkatalog gibt Anhang 3.2 und in Abb. 15 ist ein beispielhafter Ausschnitt von 10 km x 10 km Kantenlänge dargestellt. Die Auflösung der Landnutzung ist mesoskaligen Fragestellungen angemessen. Ein gewisses Problem stellte in der Vergangenheit die fehlende Redundanzfreiheit der Daten dar, d.h. Flächen grenzen nicht unmittelbar aneinander an sondern können sich überlagern oder Fehlstellen aufweisen.

Für das gesamte Ruhrgebiet, einschließlich des Kreisgebietes Wesel, liegen für ein Gebiet von 4.500 km² reale Flächennutzungsdaten (Vektordaten) des Regionalverbands Ruhrgebiet (RVR 2004) vor. Es werden darin 152 verschiedene Nutzungstypen unterschieden (Anhang 3.3). Die Auswertungen basieren auf der Interpretation von Luftbildern der Deutschen Grundkarte (DGK5) und anderen thematischen Karten. Die geometrische Genauigkeit beträgt 3 m. Im Vergleich zu den ATKIS-Daten sind hier auch kleinere Straßen und kleinere Baublöcke dargestellt (Abb. 15). Der Nutzungsartenkatalog orientiert sich vorwiegend an der Art der Nutzung, z.B. bei den Gemeindebedarfsflächen (Anhang 3.3), bzw. an der Geschoss Höhe (Wohnbauflächen). Die Auflösung der Daten wird damit auch mikroskaligen Berechnungen gerecht, die Differenzierung der Nutzungsarten dagegen ist für wasserwirtschaftliche Fragestellungen wenig geeignet.



Für die Berechnungen wird die in **Tab. 4** aufgeführte Differenzierung der Flächennutzung herangezogen. Die Berechnung der Verdunstung erfolgt nach dem Verfahren BAGLUVA, wobei verschiedene Flächennutzungen Mittelwerte aus anderen Nutzungen entsprechen: Die Verdunstung bei landwirtschaftlicher Nutzung ist beispielsweise ein Mittelwert aus der Verdunstung von Acker- und Grünland und die der Mischvegetation aus Acker, Grünland, Laub- und Nadelwald. Der berücksichtigte Befestigungsgrad entspricht dem Mittel der jeweils genannten Klasse.

Tab. 4: Differenzierung der Flächennutzung

Code	Flächennutzung	Bemerkungen
11	Landwirtschaftliche Nutzung	Wachstumszeit: 95 Tage
12	Ackerland	Wachstumszeit: 70 Tage
13	Grünland	Grashöhe (ZB) 12 cm, Wachstumszeit: 120 Tage
14	Brache, Moor	Grashöhe (ZB) 25 cm, Wachstumszeit: 120 Tage
15	vegetationslos	Wachstumszeit: 60 Tage
21	Laubwald	Umtriebsalter (UA): , Wachstumszeit: 120 Tage
31	Mischwald	Umtriebsalter (UA): Wachstumszeit: 120 Tage
41	Nadelwald	Umtriebsalter (UA): , Wachstumszeit: 120 Tage
51	Mischvegetation	Wachstumszeit: 90 Tage
52	Mischvegetation, Befestigung 1-20 %	
53	Mischvegetation, Befestigung 21-40 %	
54	Mischvegetation, Befestigung 41-60 %	
55	Mischvegetation, Befestigung 61-80 %	
56	Mischvegetation, Befestigung 81-100 %	
61	Wasserflächen, Röhricht	Vorflutteiche mit Abfluss
62	Wasserflächen	Grundwasserblänken ohne Abfluss
71	Halde, Deponie undifferenziert	
72	Deponie in Betrieb (unbewachsen)	nFK gering
73	Deponie rekultiviert (Mischvegetation)	nFK gering
74	Halde in Schüttung (unbewachsen)	nFK gering
75	Halde rekultiviert (Mischvegetation)	nFK gering
76	Schlammteich vegetationslos	nFK hoch

Für das Einzugsgebiet der Emscher liegt von der Emschergenossenschaft flächendeckend eine Kartierung der Befestigungsflächen vor. Anhand dieser Kartierung wurden für die einzelnen Nutzungsarten bzw. Bodenbedeckungsarten der drei genannten Datensätze

(CORINE, ATKIS, Realnutzung RVR) mittlere Befestigungsgrade für das in Abb. 15 dargestellte 10 km x 10 km große Gebiet berechnet und einer Klassifizierung in 20 %-Stufen zugeordnet (SENDT & MEßER 2008). Damit sind die Daten des RVR für wasserwirtschaftliche Fragestellungen, insbesondere in urbanen Räumen, besser nutzbar (siehe Anhang 3.1 bis 3.3).

Für Sickerwasserprognosen von Altlastenverdachtsflächen sind im Allgemeinen höher auflösende Angaben zur Befestigung von Grundstücken erforderlich, die im Gelände erhoben werden müssen. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, ob eine Fläche an die Kanalisation angeschlossen ist. Mit Hilfe von Detailkartierungen können beispielsweise für Industrieflächen entsprechende Sickerwasserprognosen erstellt werden.

Die unterschiedenen Befestigungsarten besitzen unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich ihrer Grundwasser-Neubildung (Tab. 5).

Tab. 5: Versickerungsanteile am Niederschlag für verschiedene Belagarten (SIEGERT 1984, KOWALEWSKI et al. 1984, BMRBS 1988 und BOCK et al. 1990)

Belagart	Versickerungsanteil am Niederschlag %	
	Literaturangaben	Durchschnitt
Freifläche	51	
Rasenfläche	42	45
wassergebundene Decken (gering verdichtet)	60 - 77	
Rasengittersteine	60	60
Mosaik- bzw. Kleinpflaster (neu)	55	
Mosaik- bzw. Kleinpflaster (alt)	20 - 48	50
Betonverbundpflaster (neu)	60 - 90	
Betonverbundpflaster (alt)	10 - 22	
Kunststeinplatten	16	15
wassergebundene Decken (hoch verdichtet)	10 - 30	
Asphalt, Beton	0	0

Zur Wasserhaushaltsberechnung bietet sich in Abhängigkeit von der Befestigungsart und der Häufigkeit ihres Auftretens (nach MEßER 1997) folgender Kartierschlüssel an:

Tab. 6: Differenzierung der Befestigungsarten bei Detailkartierungen nach MEßER 1997

Code	Befestigungsart	Entwässerung
81	versiegelt (z.B. Asphalt, Dächer)	an die Kanalisation angeschlossen
82	Betonverbund (neu)	
83	Mosaik-/Kleinpflaster	
84	Rasengittersteine	
85	verdichtet	
91	versiegelt (z.B. Asphalt, Dächer)	nicht an die Kanalisation angeschlossen bzw. an Regenwasserversickerungseinrichtungen angeschlossen
92	Betonverbund (neu)	
93	Mosaik-/Kleinpflaster	
94	Rasengittersteine	
95	verdichtet	

Die einzelnen Versiegelungsarten haben bei den Bebauungstypen (Versiegelungsklassen) unterschiedliche Bedeutung (Tab. 7). Verdichtete Flächen besitzen nur in der Versiegelungsklasse bis 20 % einen größerer Anteil. Teildurchlässige Beläge besitzen nur bei Gesamtversiegelungsgrade zwischen 20 % und 60 % Anteile über 10 %. Der Anteil versiegelter Flächen, die nicht an die Kanalisation angeschlossen sind, beträgt durchweg unter 5 %.

Für die Verdunstung von Halden kann auf Lysimeteruntersuchungen von SCHÖPEL (1985) zurückgegriffen werden, der für vegetationslose Waschberge Verdunstungswerte zwischen 220 mm/a und 355 mm/a und für grasbewachsene Waschberge 450 mm/a bis 470 mm/a ermittelte.

Tab. 7: Anteil maßgeblicher Versiegelungsarten einzelner Versiegelungsklassen an der Gesamtfläche (Castroper Hochfläche: MEßER 1997, Speckhorn: COLDEWEY & GEIGER 2001)

Versiegelungsklasse	Untersuchung	versiegelte Fläche %	Anteil an der Gesamtfläche (%)				verdichtet %
			undurchlässig entwässert	nicht entwässert	teildurchlässig entwässert	nicht entwässert	
1-20 %	Speckhorn (n=3)	13	5	2	3	3	25
	Castroper Hochfläche (n=2)	15	7	3	1	4	11
21-40 %	Speckhorn (n=3)	31	14	1	11	2	9
	Castroper Hochfläche (n=2)	35	26	0	8	0	4
41-60 %	Speckhorn (n=8)	51	27	4	15	2	6
	Castroper Hochfläche (n=3)	49	31	3	10	5	1
61-80 %	Speckhorn (n=1)	74	74	0	0	0	2
	Castroper Hochfläche (n=1)	66	62	0	4	0	5

3.6 Hangneigung und Exposition

Bedeutung

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 Tiefgründigkeit und Durchlässigkeit der Böden bzw. Gesteine. Nach SCHROEDER & WYRWICH (1990) beträgt der Direktabflussanteil beispielsweise bei landwirtschaftlicher Nutzung, lehmigen Böden und einer Reliefenergie von 20 m/km² 33 % und bei einer Reliefenergie von 40 m/km² 66 %. Bei sandigen Böden ist er mit 33 % bei einer Reliefenergie von 40 % deutlich geringer. Einen ebenfalls hohen Direktabflussanteil besitzen landwirtschaftliche Nutzflächen mit geringen Flurabständen

(semiterrestrische Böden), da die Flächen i.d.R. über Dränagen und Gräben entwässert werden bzw. das Speichervolumen des Bodens gering ist. Durch die Hangneigung und Exposition wird auch die Verdunstung beeinflusst, insbesondere bei mittleren und hohen Hangneigungen. Während in Mitteleuropa nach GOLF (1981) auf den nordexponierten steilen Hängen mit einer um 2 % bis 8 % (Hangneigung 4 % bis 10 %) bzw. 10 % bis 30 % (Hangneigung > 10 %) geringeren Verdunstung zu rechnen ist, ist sie auf südexponierten Hängen um den gleichen Betrag höher als auf ebenen Flächen.

Differenzierung

In Anlehnung an die ATV A 118 (2002), der DIN 4220 (1998) und SCHROEDER & WYRWICH (1990) wird in Tab. 8 dargestellte Abstufung bei der Hangneigung zugrunde gelegt.

Tab. 8: Abstufung der Hangneigung

Code	Reliefenergie	Gefälle	Grad
1	0 - 20 m/km ²	0 - 2 %	0 – 1,1°
2	20 - 40 m/km ²	2 - 4 %	1,1 – 2,3°
3	40 - 100 m/km ²	4 - 10 %	2,3 – 5,7°
4	> 100 m/km ²	> 10 %	> 5,7°

In Abhängigkeit von der Hangausrichtung und Hangneigung ist bei meso- und mikroskaliger Bearbeitung eine Modifikation der realen Verdunstung erforderlich. Folgende Klassenbildung ist zu empfehlen. Bei einem Gefälle > 4 % (Hangneigungsklasse 3) ist bei Hangausrichtungen nach Norden eine Herabstufung des Klimatops um eine Stufe und nach Süden eine Höherstufung um eine Stufe zu empfehlen. Beträgt das Gefälle > 10 % (Hangneigungsklasse 4) kann die Umstufung zwei Klimatopstufen umfassen. Bei Hangausrichtungen nach Westen und Osten ist nach GOLF (1981) kein signifikanter Einfluss auf die Verdunstung gegeben. Dieser Einfluss beschränkt sich auf die Bereiche mit einer potenziellen Verdunstung unter 540 mm/a (Klimatope 1 bis 4), da in den übrigen Klimatopen 5 und 6 die schlechte Wasserverfügbarkeit einer Verdunstungserhöhung entgegensteht. In Mittelgebirgslagen kann auch der Windeinfluss in exponierten Lagen (Kuppen und Waldränder) eine Erhöhung der Verdunstung bewirken, die bei mikroskaliger Bearbeitung berücksichtigt werden kann.

Verwendung digitaler Daten

Mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells können die Flächen gleicher Hangneigungsklassen berechnet werden. Auch für die Exposition können mit dem Digitalen Geländemodell Flächen gleicher Hangausrichtung berechnet werden. Hier bietet sich beispielsweise das Programmsystem SCOP der Info GmbH an. Je nach geforderter Detailgenauigkeit können unterschiedliche Rasterdatensätze verwendet werden. Bei makroskaliger Bearbeitung reicht ein Rasterdatensatz von 50 m x 50 m aus, während bei mikroskaliger Bearbeitung eine Rasterweite von 5 m x 5 m oder 2 m x 2 m anzuraten ist, um Elemente wie Bahndämme und steile Böschungen adäquat abbilden zu können. Ebenso wichtig wie die Rasterweite sind die mit Sachverstand zu wählenden Interpolationsfunktionen und Glättungsfunktionen bei der Polygonbildung.

3.7 Teileinzugsgebiete

Bedeutung und Differenzierung

Welche Art von Teileinzugsgebieten gewählt wird bzw. wie weit diese differenziert werden, ist von der jeweiligen Fragestellung abhängig. Bei der Berechnung der Grundwasserneubildung als Grundlage zur Kalibrierung eines GrundwassermodeLLs werden Teileinzugsgebiete nicht benötigt, so dass hier einfach die Modellgebietsgrenze herangezogen wird. In der Regel wird man jedoch die Wasserhaushaltsberechnung dafür benutzen, um den grundwasserbürtigen Abfluss von Gewässern zu berechnen. Hier ist darauf zu achten, dass das unterirdische Einzugsgebiet des jeweiligen Gewässers bekannt ist und als Teileinzugsgebiet verwendet wird. Zur Verifizierung sollte möglichst ein Vergleich mit Trockenwetterabflussmessungen erfolgen. Im Idealfall liegen mehrjährige Daten zur Berechnung des grundwasserbürtigen Abflusses nach WUNDT (1958) bzw. KILLE (1970) oder NATERMANN (1951) vor. Oft helfen aber auch quartalsweise Trockenwettermessungen oder Einzelmessungen zur prinzipiellen Plausibilitätskontrolle weiter. Die Teileinzugsgebiete sind dann bezogen auf die Pegel zu differenzieren. Bei der Umrechnung von der Grundwasserneubildung zum grundwasserbürtigen Abfluss sind Grundwasserentnahmen (wenn das Wasser nach dem Gebrauch das Einzugsgebiet auf einem anderen Weg verlässt) bzw. Versickerungen, ggfs. auch Begegnungen zur berücksichtigen.

Verwendung Digitaler Daten

Die im Rahmen der Grundlagenerarbeitung zur Umsetzung der WRRL erstellten Grundwasserkörper sind zur Bilanzierung nur sehr eingeschränkt verwendbar, da sie i.d.R. keine geschlossenen Bilanzräume darstellen (Ausschnitt Abb. 16). Die von den Umweltbehörden zur Verfügung gestellten Einzugsgebiete von Gewässern stellen üblicherweise oberirdische Einzugsgebiete dar. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob diese auch den unterirdischen Einzugsgebieten entsprechen.

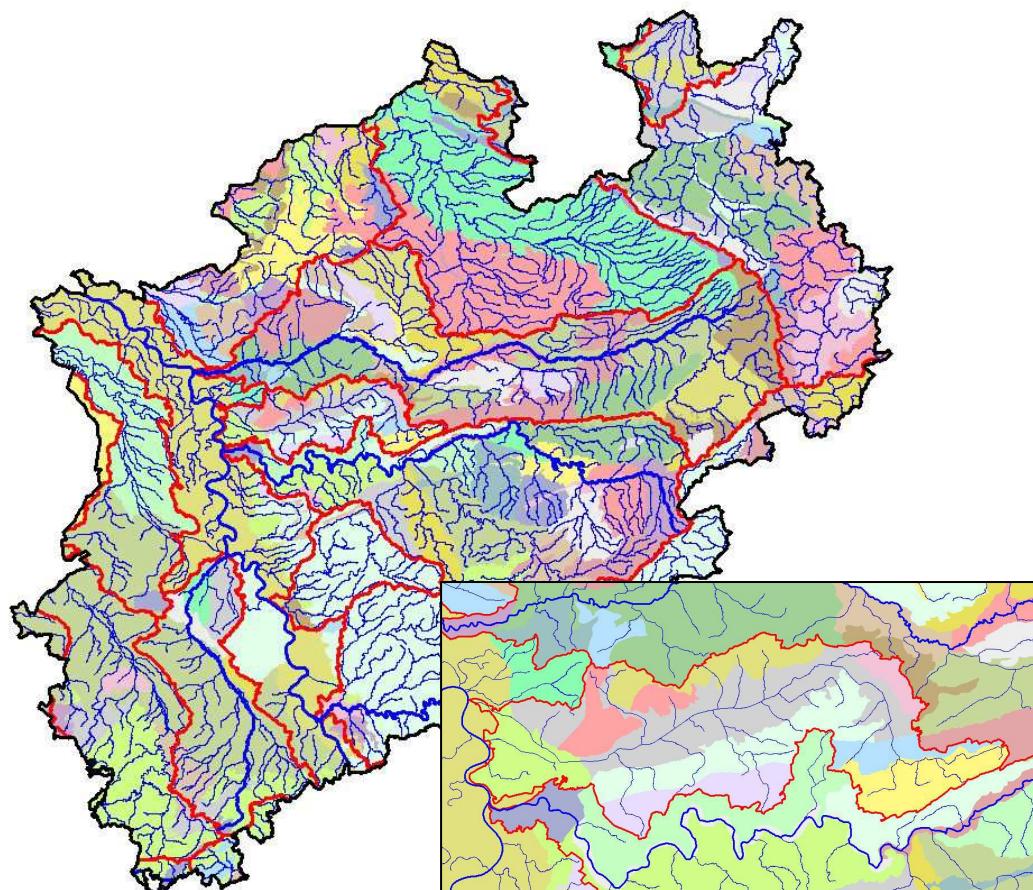


Abb. 16: Grundwasserkörper und Gewässereinzugsgebiete NRW (Ausschnitt: Einzugsgebiet der Emscher)

4 RECHENTECHNISCHE UMSETZUNG MIT EINEM GEOGRAPHISCHEN INFORMATIONSSYSTEM

Die Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen erfolgt praktischerweise mit ArcInfo bzw. ArcGIS. Wenn alle Eingangsgrößen auf ihre Verwendbarkeit geprüft und in ihrer Differenzierung untereinander bzw. auf die Fragestellung abgestimmt sind (makro-, meso- bzw. mikroskalige Bearbeitung) wird jeder Fläche für alle Eingangsgrößen ein Code zugewiesen (Anhang 1). Im Anschluss daran erfolgt eine Flächenverschneidung getrennt zur Berechnung von Verdunstung und Direktabfluss in folgender Reihenfolge.

- Für die Verdunstung: Klima - Boden - Flurabstand - Nutzung - Versiegelung
- Für den Direktabfluss: Hangneigung - Boden - Flurabstand - Nutzung - Versiegelung

Die Codes werden in dieser Reihenfolge hintereinander geschrieben, so dass sich jeweils eine 5-stellige Zahl für jede aus der Flächenverschneidung entstandenen Einzelfläche ergibt. Die Verdunstung kann dann aus einer vorbereiteten Datenbank für jede Einzelfläche abgegriffen werden. Anschließend wird diese vom Niederschlag abgezogen, so dass man den Gesamtabfluss erhält. Ebenso wird der p-Wert für jede Einzelfläche aus einer vorbereiteten Datenbank abgegriffen und gemäß Gleichung 5 der Direktabfluss als Anteil vom Gesamtabfluss bestimmt. Gemäß Abstufung in Anhang 1 ergeben sich 3.264 Kombinationsmöglichkeiten für die Verdunstung und 2.176 Kombinationsmöglichkeiten für den p-Wert. Im Anschluss daran werden die entstandenen Verdunstungs- und Direktabflussdateien miteinander Verschnitten und die Wasserhaushaltsgleichung (Gleichung 4) gelöst. In der Regel entstehen durch die Flächenverschneidung eine Vielzahl von Kleinstflächen, die eliminiert werden müssen. Bis zu welcher Flächengröße Kleinstflächen eliminiert werden, hängt von der Detailliertheit der Eingangsdaten bzw. der Fragestellung ab. Bei der Kleinstflächeneliminierung können diese der jeweils größten Nachbarfläche oder der Nachbarfläche mit der längsten gemeinsamen Grenze zugeschlagen werden.

Zum Schluss kann eine Verschneidung mit dem Teileinzugsgebieten erfolgen, so dass mittlere Werte für alle Wasserhaushaltsgrößen je Teileinzugsgebiet berechnet werden können. Ebenso können auch die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung flächendifferenziert dargestellt werden.

5 JAHRESPROZESS DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Lysimeter-Messungen haben gezeigt, dass die Versickerung von Niederschlagsanteilen zum Grundwasser im Jahresverlauf nicht kontinuierlich erfolgt, was durch Isotopen-Messungen bestätigt wird. Abgesehen von den durch die Niederschlagsverteilung gegebenen Intervallen üben dabei Vegetationsperioden, Witterungseinflüsse, Bodensättigungen u.a. einen wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf der Grundwasserneubildung aus. Generell ist die Grundwasserneubildung abhängig von den klimatischen Gegebenheiten (Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer u.a.), den hydrogeologischen Eigenschaften und Bodeneigenschaften des Untergrundes, der Flächennutzung (Vegetation, Art der Nutzung, Befestigung) und der Orographie (Hangneigung, Hangrichtung).

Die zeitliche Verteilung der Grundwasserneubildung innerhalb eines Jahres wird u.a. von folgenden Faktoren bestimmt:

- Verteilung der Niederschläge im Jahresverlauf,
- zeitliche Verteilung der potenziellen Wasserverfügbarkeit bzw. Verdunstung
- Grundwasserflurabstand und
- nutzbare Feldkapazität, Wasserhaltevermögen des Bodens

In der Vegetationszeit ist im Allgemeinen in der Bundesrepublik Deutschland 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. Darüber hinaus ist im Sommer die Interzeptionsverdunstung von größerer Bedeutung.

Erst nach Auffüllung des Bodenwasserspeichers bis zur nutzbaren Feldkapazität (= maximaler Haftwassergehalt der Bodenzone) sickert das Wasser durch die Wurzelzone zum Grundwasser ab. Die Auffüllung des Grundwassers erfolgt im Allgemeinen erst in den Wintermonaten. 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, da die Verdunstung deutlich geringeren Schwankungen unterliegt (Abb. 17).

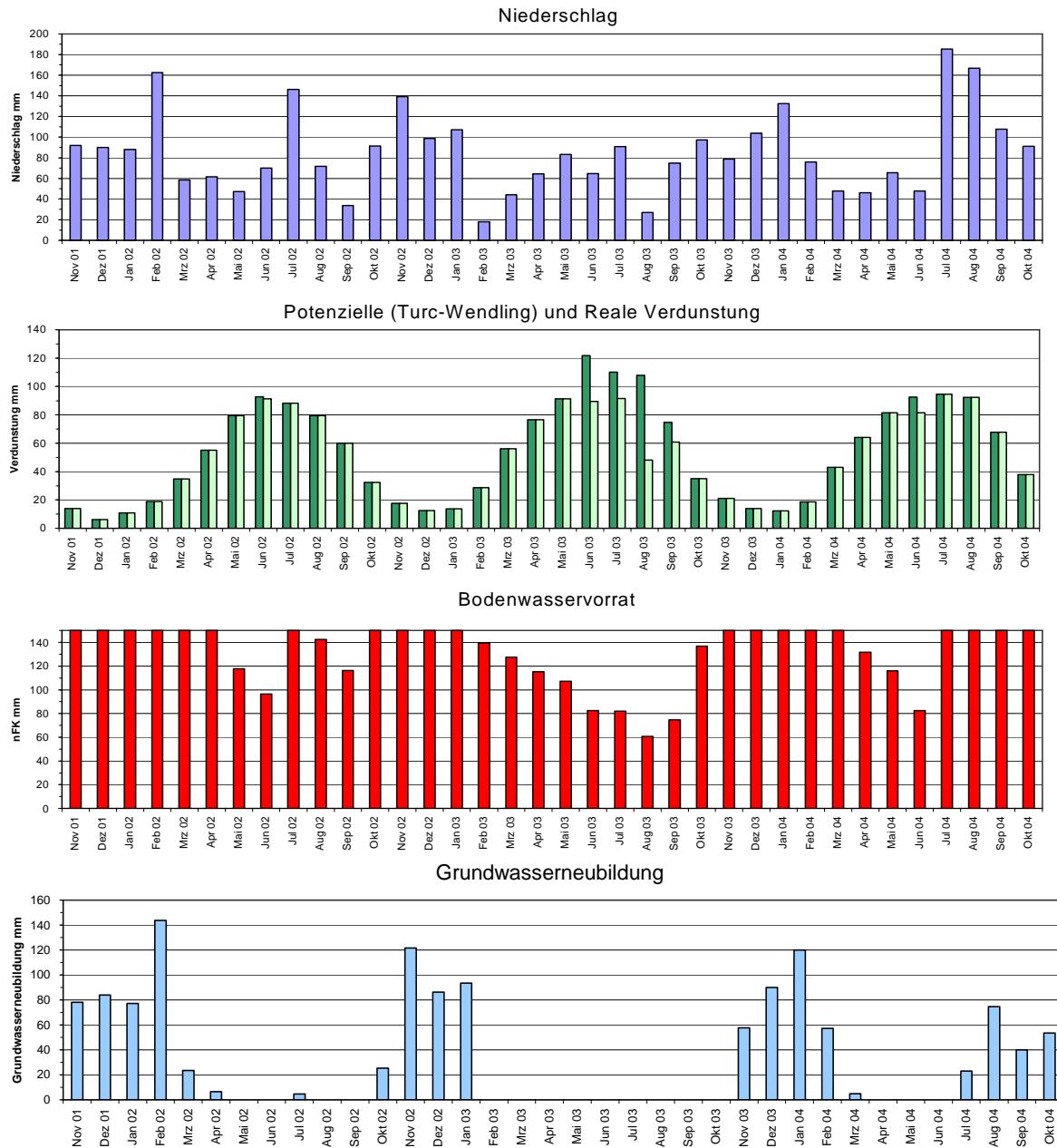


Abb. 17: Klimatische Bodenwasserbilanz der Wasserwirtschaftsjahre 2002 bis 2004 bei Grünlandnutzung und einer nutzbaren Feldkapazität von 150 mm (Beispiel Raum Bottrop, Ruhrgebiet)

Die Grundwasserneubildung im Jahresverlauf kann mit Hilfe der Klimatischen Bodenwasserbilanz nach RENGER et al. (1974) berechnet werden. In möglichst hoch aufgelösten Zeitschritten wird dabei die Klimatische Wasserbilanz berechnet:

In Abb. 17 sind der Niederschlag (oben), die potenzielle Verdunstung (Abb. 17, 2. von oben), die reale Verdunstung (Abb. 17, 2. von oben, helle Balken), der Bodenwassergehalt (Abb. 17, 3. von oben) und die Grundwasserneubildung (Abb. 17, untere Abb.) über 3 Jahre dargestellt. Deutlich erkennbar ist der Jahresgang der Verdunstung und die verhältnismäßig ausgeglichenen Niederschläge. In den Sommermonaten kommt es zu einem Aufbrauch des Bodenwassers, so dass im Jahr 2003 die reale Verdunstung niedriger ist als die potenzielle Verdunstung. In den Jahren 2002 und 2004 wird zwar auch der Bodenwasservorrat in Anspruch genommen, aber die potenzielle Verdunstung entspricht in etwa der realen Verdunstung (der Welkepunkt wird in 2002 und 2004 i.d.R. nicht erreicht). 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.

Um die monatliche Grundwasserneubildung zu berechnen, bietet sich die Aufteilung der Jahressumme anhand der klimatischen Bodenwasserbilanz gemäß ATV-DVWK (2002) an. Für jede Kombination von Eingangsdaten aus Niederschlag, potenzieller Verdunstung, Böden, Flurabstand, Flächennutzung, Befestigung und Hangneigung wird mit der klimatischen Bodenwasserbilanz zunächst die reale Verdunstung und anschließend gemäß der Wasserhaushaltsgleichung der Gesamtabfluss, der Direktabfluss und die Grundwasserneubildung berechnet. In bestimmten Fällen wird dabei auch der Direktabflussanteil im Jahresverlauf variiert. Dies betrifft beispielsweise den Laubwald, da hier die sommerliche Belaubung den Direktabflussanteil am Gesamtabfluss mindert, und landwirtschaftlich genutzte Flächen mit geringen Flurabständen, da durch die Dränierung der Direktabfluss im Winter erhöht ist.

Die aus der Verdunstungsberechnung nach BAGLUVA berechnete jährliche Grundwasserneubildung wird auf dieser Grundlage prozentual auf die Monate aufgeteilt. Einen Sonderfall bilden Flächen mit geringen Flurabständen, da hier eine Zehrung aus dem Grundwasser im Sommer zugelassen werden muss und dies über prozentuale Aufteilungen nicht darstellbar ist. In diesen Fällen wird die prozentuale Verteilung der realen Verdunstung (nicht der Grundwasserneubildung) auf die einzelnen Monate verwendet und die Wasserhaushaltsgleichung für alle betroffenen Flächen neu gelöst. Der resultierende Bi-

Lanzfehler in der Jahressumme wird gewichtet auf die Monate aufgeteilt, beträgt aber insgesamt nur wenige mm/a. In der Abb. 18 sind als Beispiel die Ergebnisse im Jahresverlauf für verschiedene Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung dargestellt. Deutlich erkennbar ist die hohe winterliche Grundwasserneubildung bei geringer nutzbarer Feldkapazität (Sandböden) und hohen Flurabständen, während bei geringen Flurabständen die Grundwasserneubildung im Winter geringer ist und im Sommer eine Zehrung eintritt. Staunässeböden nehmen eine Sonderstellung ein.

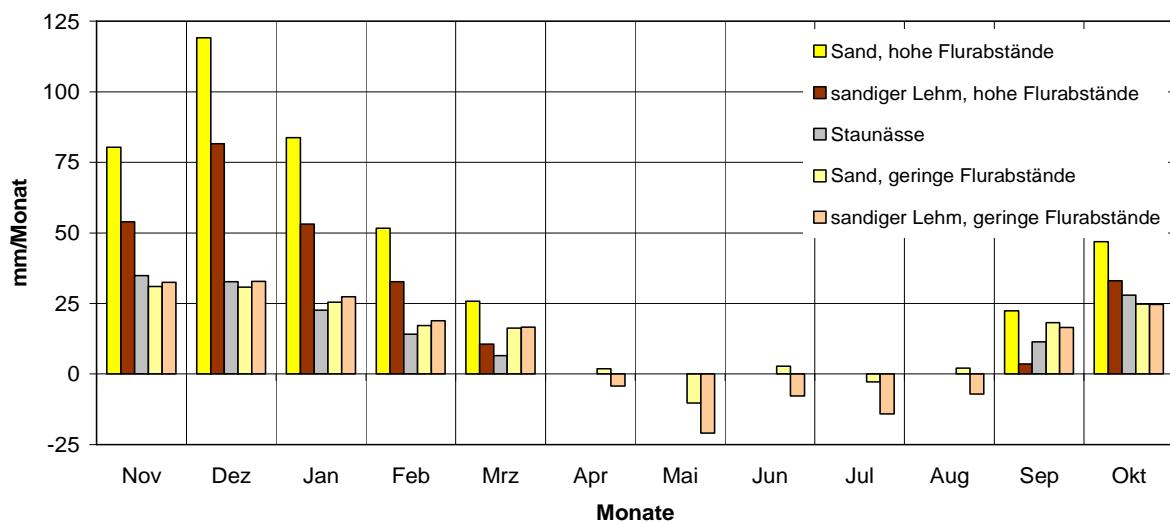


Abb. 18: Monatliche Grundwasserneubildung unterschiedlicher Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung

6 VERFAHRENSVERIFIZIERUNG

6.1 Vergleich mit anderen Verfahren

Im Zusammenhang mit der Erstellung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungskarte für den Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) wurde ein Verfahrensvergleich durchgeführt (NEUMANN & WYCISK 2001, NEUMANN 2004). Hierbei wurden die Verfahren DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980), LIEBSCHER & KELLER, SCHROEDER & WYRWICH, GROWA 98 und MEßER miteinander verglichen. Die Verdunstungsberechnung basiert dabei auf dem Verfahren BAGLUVA. Im Ergebnis (Abb. 19) zeigt sich bei dem Verfahren von MEßER eine bessere Übereinstimmung zwischen dem Basisabfluss nach Wundt und der berechneten Grundwasserneubildung, als nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT, allerdings ist die Streuung der Ergebnisse größer als bei DÖRHÖFER & JOSOPAIT (NEUMANN & WYCISK 2001).

Validierung: Grundwasserneubildung

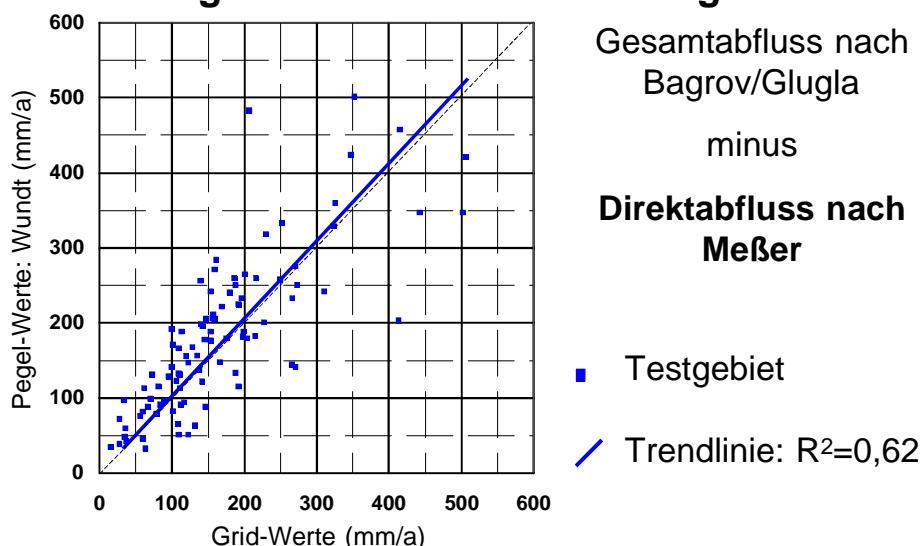


Abb. 19: Vergleich der Grundwasserneubildung nach Meßer 1997 (Verdunstung nach BAGLUVA, Direktabfluss nach Meßer) mit dem Basisabfluss nach Wundt (schriftl. Mitteilung von Neumann 2002)

Im Rahmen der Entwicklung und Anwendung eines makroskaligen Verfahrens für den HAD kommt NEUMANN (2004) zu dem Schluss: Auf der Grundlage der betrachteten 106

Einzuflusgebiete zeigt der Ansatz von Meßer, bezogen auf Trendverlauf und Korrelation, die beste Anpassung aller genannten Modellversionen, während die Modifikationen nach Schroeder & Wyrwich, GROWA 98 sowie insbesondere die ursprüngliche Version von Dörhöfer & Josopait größere Streuungen und systematische Abweichungen zeigen. Die geringste Streuung zeigt dabei das Verfahren HAD-GWNeu, dass für makroskalige Bearbeitungen entwickelt wurde (Abb. 20).

An dieser Stelle ist generell darauf hinzuweisen, dass der Basisabfluss nach Wundt, d.h. der monatliche mittlere Niedrigwasserabfluss nicht unbedingt der Grundwasserneubildung im Einzuflusgebiet entsprechen muss. Insbesondere bei wasserwirtschaftlichen Eingriffen in das Abflussverhalten eines Fließgewässers können die Abflussmessungen wenig repräsentativ sein. Dies betrifft beispielsweise das Vorhandensein von Stauanlagen, wie sie z.B. in Form von Fischteichen an kleineren Gewässern die Regel sind, oder von Staumämmen. Derartige Anlagen führen zu einer Kappung der Hochwasserspitzen und zu einer Erhöhung des Basisabflusses. Auch Grundwasserentnahmen beeinflussen den Basisabfluss, insbesondere, wenn das entnommene Wasser nicht im Einzuflusgebiet wieder zum Abfluss kommt.

Mit den Berechnungen von NEUMANN (2004) ist dargelegt, dass das Berechnungsverfahren von MEßER (1997) bei Verwendung der Verdunstung nach BAGLUVA gute Ergebnisse liefert. In den vorangegangenen Kapiteln ist die Weiterentwicklung des Verfahrens, insbesondere durch eine detailliertere Berücksichtigung der Böden und Flurabstände, beschrieben, um auch bei meso- bis mikroskaliger Bearbeitung plausibel nutzbare Werte zu erhalten. Diese sind insbesondere bei der Grundwassermodellierung und der Prognose des grundwasserbürtigen Abflusses von Fließgewässern erforderlich. Im Folgenden wird eine Verifizierung der Berechnungsergebnisse im Rahmen der Kalibrierung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells vorgenommen und Berechnungsergebnisse mit Ergebnissen einer hydraulischen Modellierung (NASIM) verglichen.

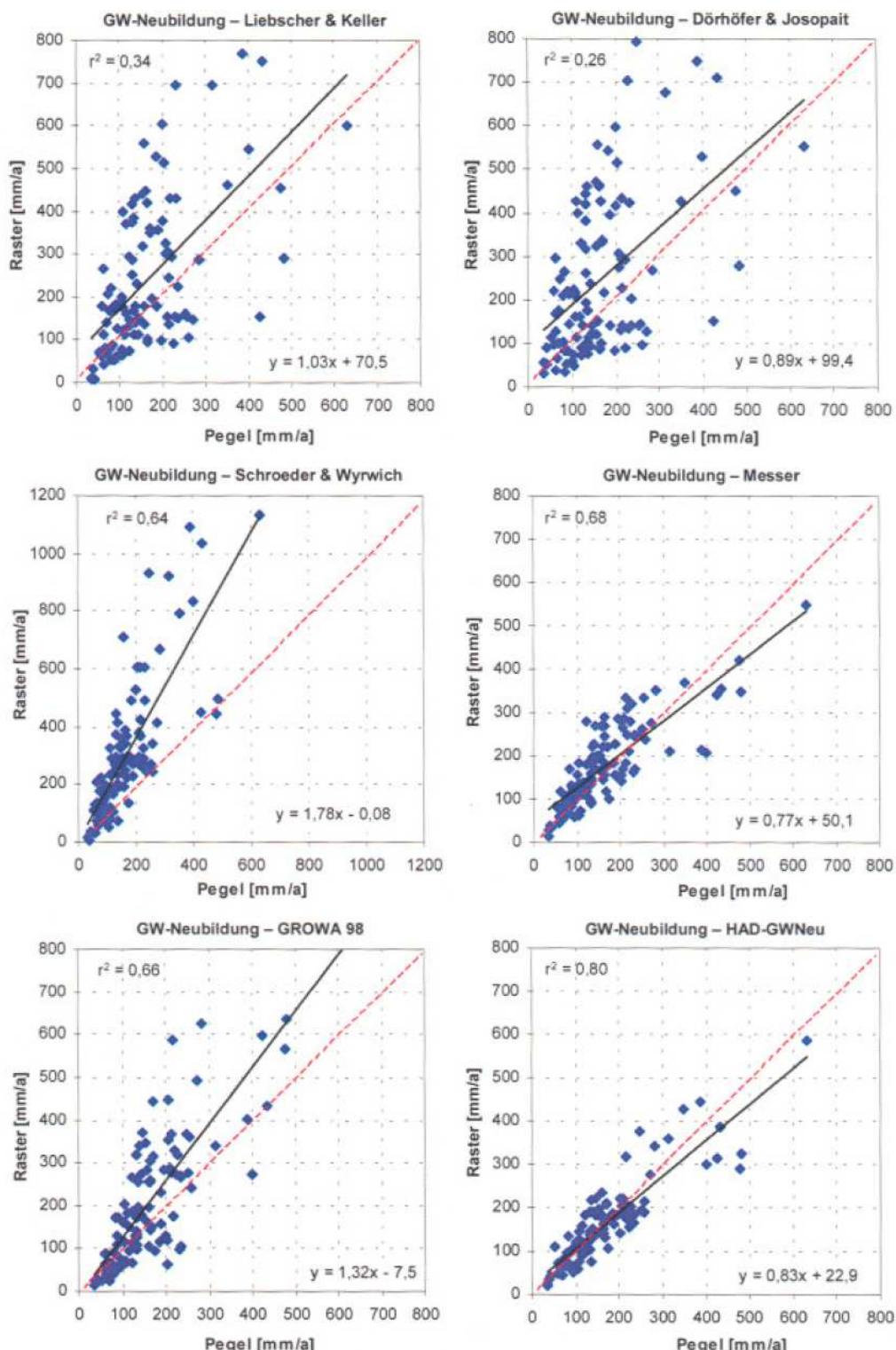


Abb. 20: Streudiagramme der Grundwasserneubildung basierend auf der BAGLUVA-Abflusshöhe: LIEBSCHER & KELLER (oben links), DÖRHÖFER & JOSOPAIT (oben rechts), SCHROEDER & WYRWICH (Mitte links), MEßER (Mitte rechts), GROWA 98 (unten links), HAD-GWNeu (unten rechts)

6.2 Benutzbarkeit der Verfahrens zur Kalibrierung eines GrundwassermodeLLs

Die Grundwasserneubildung ist einer der Eingangsdaten zur Erstellung eines numerischen GrundwassermodeLLs. Üblich sind heute finite Elemente Modelle (FEM), beispielsweise die Programmsysteme SPRING und FEFLOW. Im Rahmen der Kalibrierung werden die Eingangsdaten aufeinander abgestimmt. Dabei wird i.d.R. der Durchlässigkeitsbeiwert, der oft am wenigsten genau bekannt ist, so variiert, dass eine brauchbare Anpassung der Grundwasserstände an die Messwerte erfolgt.

Das Verfahren von MEßER (1997) wurde seit der Veröffentlichung bei mehr als 20 GrundwassermodeLLen und einem Gesamtgebiet von über 400 km² eingesetzt. Es handelt sich dabei sowohl um hoch auflösende Detailmodelle von weniger als 2 km² Größe, als auch um großräumige GrundwassermodeLLe mit 50 km² bis 100 km² Fläche. Darüber hinaus wurde das Verfahren mit der Verdunstungsberechnung nach BAGLUVA in der Elbaue bei Magdeburg eingesetzt (Modellgebiet: ca. 600 km²). In allen Fällen konnten die GrundwassermodeLLe plausibel kalibriert werden.

Bei hohen Durchlässigkeitsbeiwerten und Modellen mit offenen Rändern (Potenzialränder) ist die Grundwasserneubildung vergleichsweise unsensibel. Demgegenüber sind die Anforderungen an die Grundwasserneubildung bei geringeren Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters und geschlossenen Bilanzräumen sehr hoch. Partiell ist die Grundwasserneubildung dann auch im Rahmen der Kalibrierung zu modifizieren.

Bei größeren Mächtigkeiten und höheren Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters reagieren die mittleren Grundwasserstände nur geringfügig auf eine veränderte Grundwasserneubildung. Bei einem GrundwassermodeLL in der Niederterrasse des Rheins bei Duisburg/Dinslaken (Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters: $5 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, Mächtigkeit: 10 m bis > 20 m) zeigte sich bei der Anwendung verschiedener Grundwasserneubildungsberechnungen und Abweichungen von 10 % zwischen den verschiedenen Verfahren keine signifikante Reaktion der Grundwasserstände. Dies hängt sicher auch damit zusammen, dass ein Großteil der Grundwasserneubildung über den Rhein das Modellgebiet verlässt und damit kein geschlossener Bilanzraum vorliegt. Um das Berechnungsverfahren zu verifizieren, ist damit ein Modellgebiet mit geringen Durchlässigkeitsbewerten und mit geschlossenen Bilanzräumen erforderlich.

7 SPANNBREITEN DER WASSERHAUSHALTSGRÖßen

Je nach klimatischen Verhältnissen schwankt die Grundwasserneubildung in einem weiten Bereich, da sie im Sinne der Wasserhaushaltsgleichung eine „Restgröße“ nach Abzug von Verdunstung und Direktabfluss ist. Berechnet man die monatliche Grundwasserneubildung über einen längeren Zeitraum, kann die Spannbreite der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen in der Jahressumme dargestellt werden. Da der Wasserhaushalt maßgeblich vom Niederschlag sowie von den Böden, Flurabständen und Flächennutzung abhängig ist, ergeben sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. In Abb. 21 und Abb. 22 sind die Medianwerte und Perzentile für die reale Verdunstung und die Grundwasserneubildung bei entsprechender Variation der Parameter dargestellt. Es wurden drei verschiedene Klimastationen herangezogen, die sich nicht nur in Bezug auf den Niederschlag unterscheiden, sondern auch im Hinblick auf die potenzielle Verdunstung. Stationen mit hohen Niederschlägen (im Beispiel 760-1.700 mm/a) finden sich in Mitteleuropa i.d.R. in höheren Lagen der Mittelgebirge, so dass diese oft mit einer relativ geringen potenziellen Verdunstung gekoppelt sind (langjähriges Mittel 535 mm/a). Bereiche mit geringen Niederschlägen (im Beispiel 300-640 mm/a) sind in Westdeutschland oft verbunden mit einer hohen potenziellen Verdunstung (langjähriges Mittel 669 mm/a). Stationen mit mittleren Niederschlägen (im Beispiel 500-1.140 mm/a) nehmen dabei eine Mittelstellung ein (langjähriges Mittel 603 mm/a).

Die reale Verdunstung nimmt bei geringen Flurabständen mit steigendem Niederschlag ab. Bei hohen Flurabständen ist sie bei mittleren Niederschlägen am höchsten. Gegenüber hohen Niederschlägen ist hierfür maßgeblich die höhere potenzielle Verdunstung verantwortlich. Bei geringen Niederschlägen und hohen Flurabständen steht im Sommer nicht genügend Wasser für die Pflanzen zur Verfügung, so dass die reale Verdunstung hinter der bei mittleren Niederschlägen zurück bleibt. Die reale Verdunstung nimmt von Grünland über mittlere Bebauung zu dichter Bebauung ab. Insbesondere bei dichter Bebauung ist die Verdunstung wegen der fehlenden Vegetationsbestände deutlich geringer als bei lockerer Bebauung. Demgegenüber ist der Unterschied zwischen lockerer Bebauung und Grünland deutlich geringer. Beim Direktabfluss nimmt die Spanne von Grünland über lockere Bebauung bis hin zu dichter Bebauung deutlich zu. Sie ist bei hohen Niederschlägen wiederum deutlich größer als bei mittleren und geringen Niederschlägen.

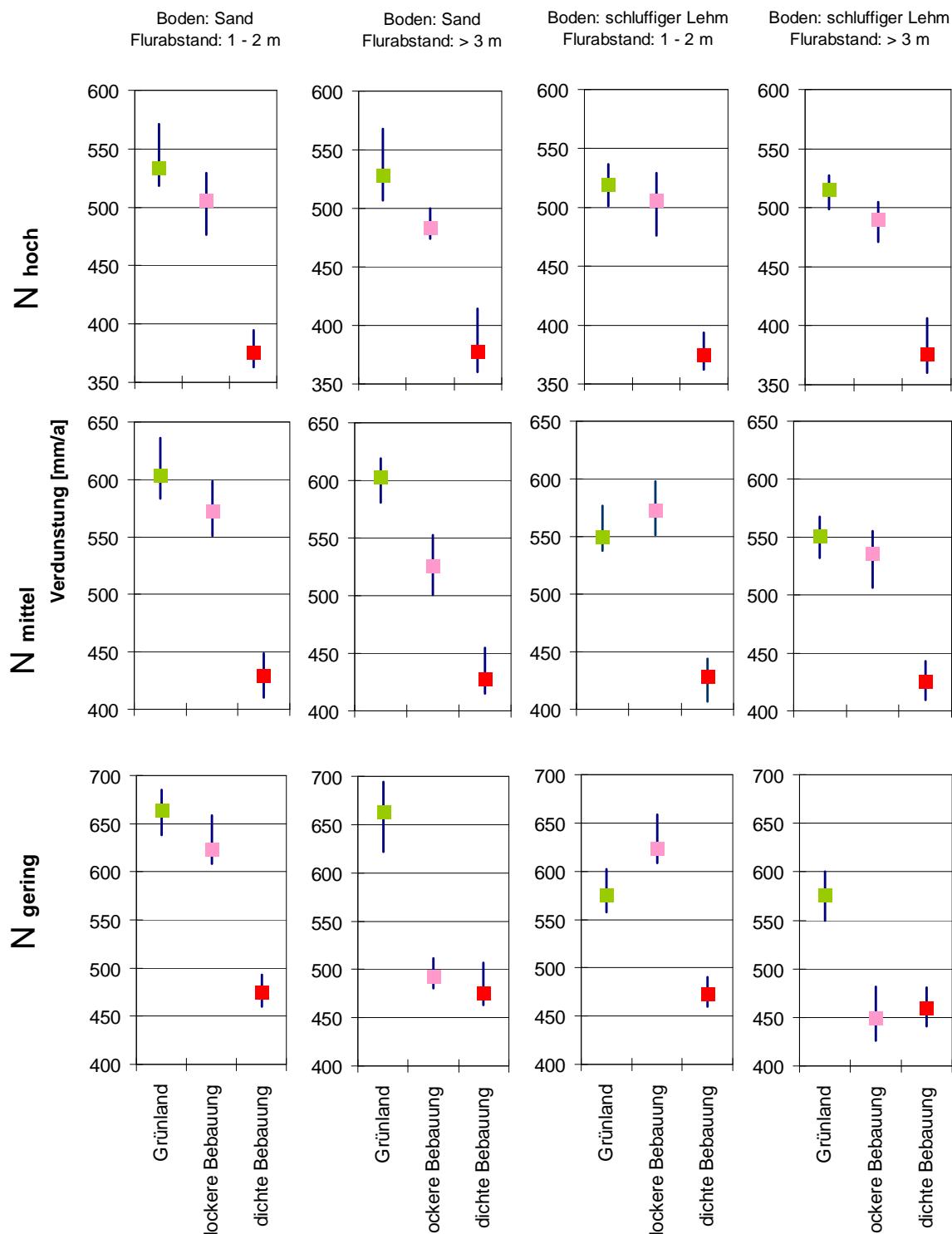


Abb. 21: Median und 25/75-Perzentile der realen Evapotranspiration in Abhängigkeit von Boden, Flurabstand und Nutzung bei unterschiedlichen Niederschlägen (monatliche Berechnung über den Zeitraum von 1961-1990): oben: Jahresniederschläge 760-1.700 mm/a, Mitte: Jahresniederschläge 500 – 1.150 mm/a, unten: Jahresniederschläge 300 – 640 mm/a

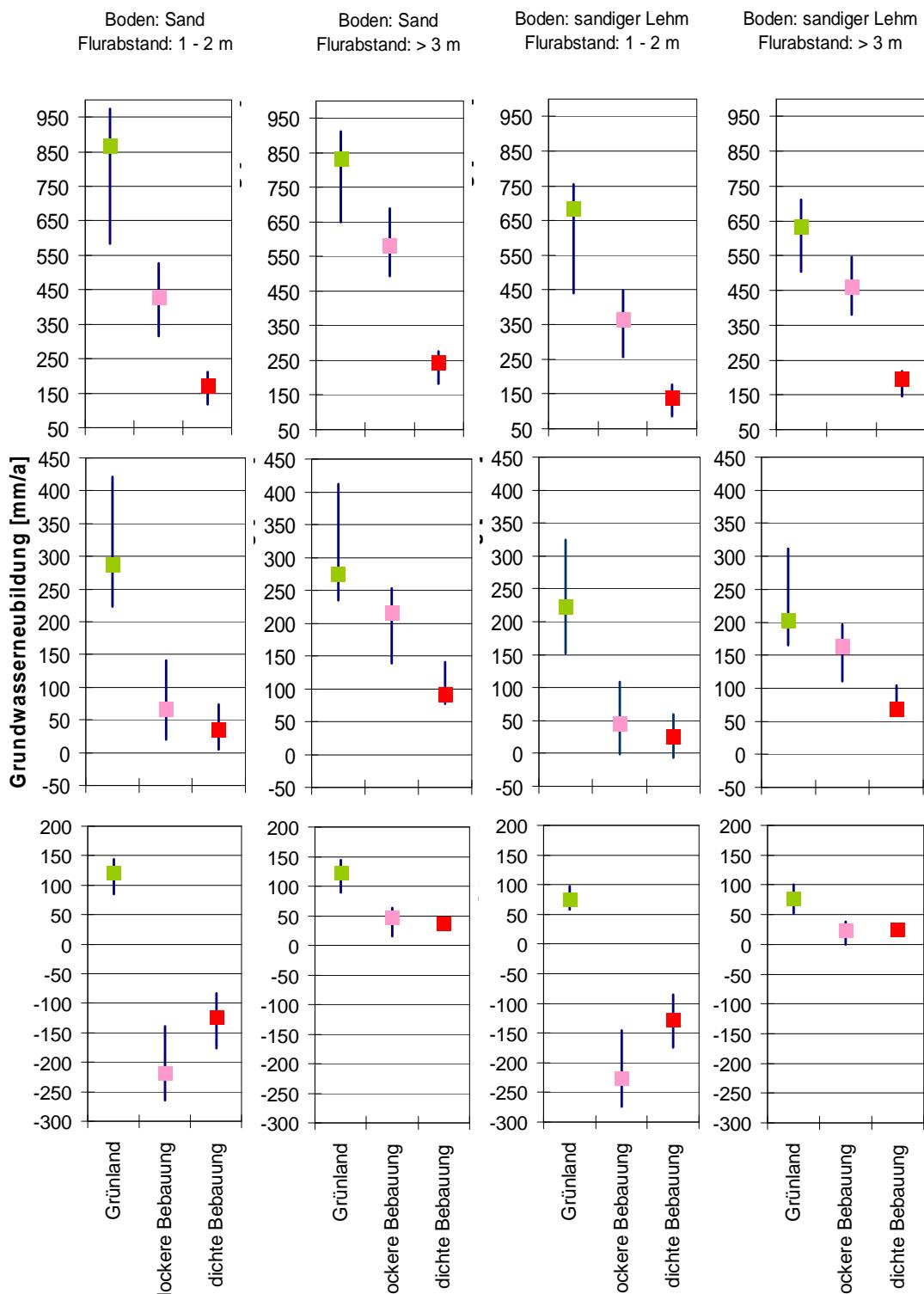


Abb. 22: Median und 25/75-Perzentile der realen Verdunstung in Abhängigkeit von Boden, Flurabstand und Nutzung bei unterschiedlichen Niederschlägen (monatliche Berechnung über den Zeitraum von 1961-1990): oben: Jahresniederschläge 760-1.700 mm/a, Mitte: Jahresniederschläge 500 – 1.150 mm/a, unten: Jahresniederschläge 300 – 640 mm/a

Die Grundwasserneubildung und die Spanne nimmt mit steigenden Niederschlägen deutlich zu (Abb. 22). Sie ist bei geringen Flurabständen niedriger als bei hohen und auch bei Sandböden höher als bei sandigem Lehmboden. Mit zunehmendem Befestigungsgrad nimmt die Grundwasserneubildung deutlich ab. Bei mittleren Niederschlägen ist die Grundwasserneubildung befestigter Flächen gering. Bei geringen Niederschlägen und geringen Flurabständen kommt es zu Zehrungen aus dem Grundwasser, die hier als negative Grundwasserneubildung dargestellt sind. Wegen der fehlenden Vegetationsbestände ist die Zehrung bei dichter Bebauung geringer als bei lockerer Bebauung. Bei hohen Flurabständen ist die Grundwasserneubildung bei geringen Niederschlägen mit unter 50 mm/a äußerst gering, da kaum Überschusswasser zur Verfügung steht.

8 ANWENDUNGSBEISPIELE

8.1 Prognose der Auswirkungen des Klimawandels im Emschergebiet

Im Rahmen des dynaklim-Projektes wurde ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der monatlichen Grundwasserneubildung auf der Basis des Verfahrens GWneu entwickelt (MEßER et al. 2011). Ziel ist die Erarbeitung von Anpassungsstrategien für die Siedlungsentwässerung mit Hilfe von numerischen Grundwassermodellen. Die Ergebnisse der Grundwasserneubildungsberechnung für den Ausgangszustand (1961-1990) (Abb. 23), die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) gehen als Eingangsdaten in die Grundwassermodellierung ein. Grundlage sind die Realisationsergebnisse des regionalen Klimamodells COSMO-CLM.

Zur Prognose der Veränderungen des Wasserhaushaltes durch den Klimawandel wurden die Eingangsdaten für den Zeitraum 1960 bis 2100 für die beiden Realisationen (COSMO-CLM 1 und -CLM 2) ausgewertet. Der Jahresniederschlag erhöht sich bis zum Zeitraum 2021-2050 um 9 % (CLM 2) und fällt anschließend bis 2100 wieder auf das Niveau der Periode 1960-1990 ab, dabei werden die Sommer trockener und die Winter nasser. Die Grasreferenzverdunstung nimmt bis zum Jahr 2100 um 8,5 % zu. Im Sommer ist die Zunahme dabei überdurchschnittlich. Im Vergleich zu anderen Klimasimulationen (REMO, WETTREG) zeigen die Ergebnisse von Cosmo CLM 2 A1B im Hinblick auf die Grundwasserneubildung für die nahe Zukunft einen Worst-case-Fall und für die ferne Zukunft eine repräsentative Größenordnung im Ensemble.

Bis 2021-2050 (CLM 2) erhöht sich die Grundwasserneubildungsrate im Mittel für das Emschergebiet um 33 mm/a bzw. + 23 %. Bis 2071-2100 (CLM 2) verringern sich die Jahresniederschläge wieder auf das heutige Niveau, während sich die potenzielle Verdunstung signifikant erhöht, woraus eine Verringerung der Grundwasserneubildungsrate um 4 mm/a bzw. um 3 % gegenüber 1961-1990 resultiert.

In der nahen Zukunft ist die Grundwasserneubildungsrate im Winter- und Sommerhalbjahr in der Mehrzahl der Monate erkennbar höher (Abb. 24). In der fernen Zukunft ist im Winterhalbjahr mit einer vergleichbaren Grundwasserneubildung wie heute zu rechnen. In

allen Monaten im Sommerhalbjahr ist die Grundwasserneubildungsrate geringer als heute.

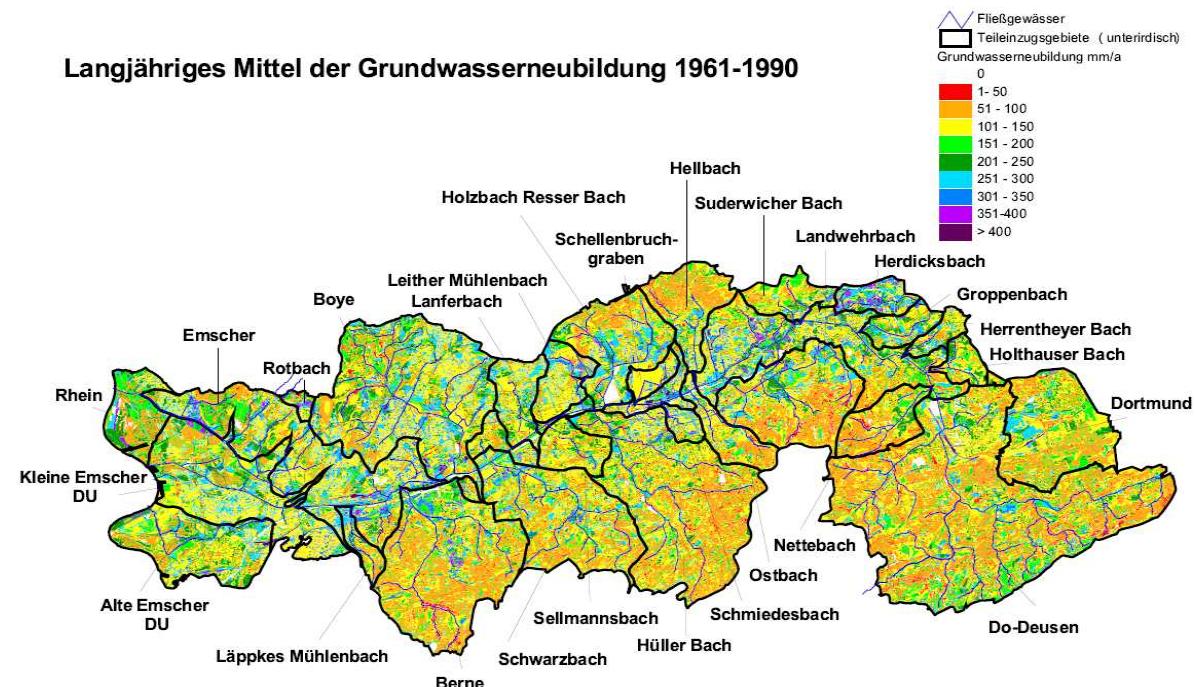


Abb. 23: Grundwasserneubildung im Emschergebiet (1961-1990)

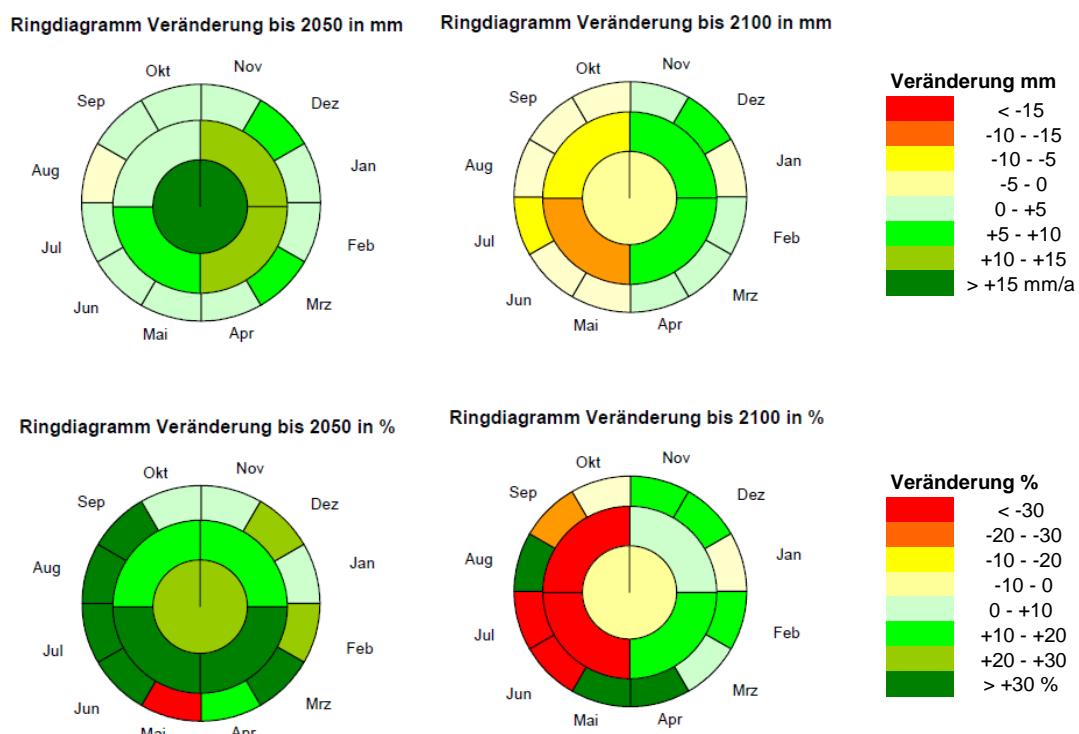


Abb. 24: Grundwasserneubildungsveränderungen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 (links) und 1961-1990 bis 2071-2100 (rechts) (CLM 2)

8.2 Auswirkungen der Befestigung auf die Grundwasserneubildung

Die Bebauung eines Gebietes führt im Allgemeinen zu einer Verringerung der Grundwasserneubildung. Das Ausmaß dieser Verringerung ist vor allem von der Flächennutzung im Ausgangszustand, den vorhandenen Böden (nutzbare Feldkapazität) und dem Flurabstand abhängig. Zur Demonstration der Unterschiede wurde für ein Baugebiet mit Acker Nutzung der Wasserhaushalt bei Umsetzung des Bebauungsplans mit dem Verfahren GWneu berechnet. Im dargestellten Beispiel werden 46 % des Gebietes bebaut. Der Befestigungsgrad bezogen auf das Gesamtgebiet beträgt dabei 27 %. Tatsächlich versiegeln werden 19 % des Gesamtgebietes. Die Abb. 25 zeigt die sich bei einem Niederschlag von 800 mm/a ergebende Verteilung der Grundwasserneubildung. Erkennbar sind die teil-durchlässigen Flächen mit einer mittleren Grundwasserneubildung (Wohnstraßen). Bei Zugrundelegung von Sandböden verringert sich die Grundwasserneubildung um 45 %, bei Lehmböden um 31 % und bei Staunässeböden lediglich um 15 % (Abb. 26). Theoretisch denkbar ist auch eine Erhöhung der Grundwasserneubildung in Folge der Bebauung, wenn ein Bruchwaldstandort aufgeschüttet und bebaut wird.

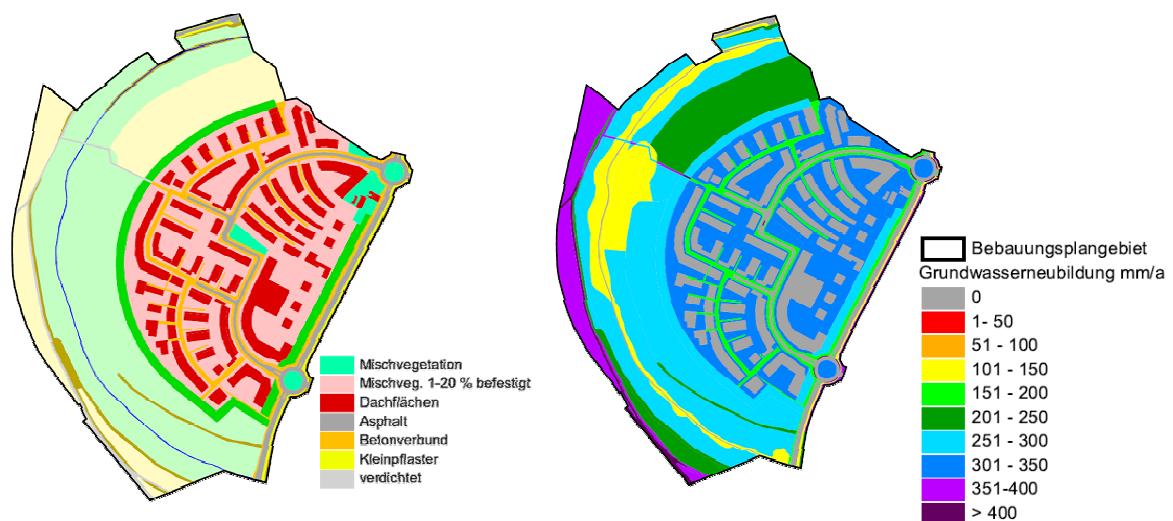


Abb. 25: Geplante Flächennutzung (links) und Grundwasserneubildung bei Umsetzung der Planung (rechts)

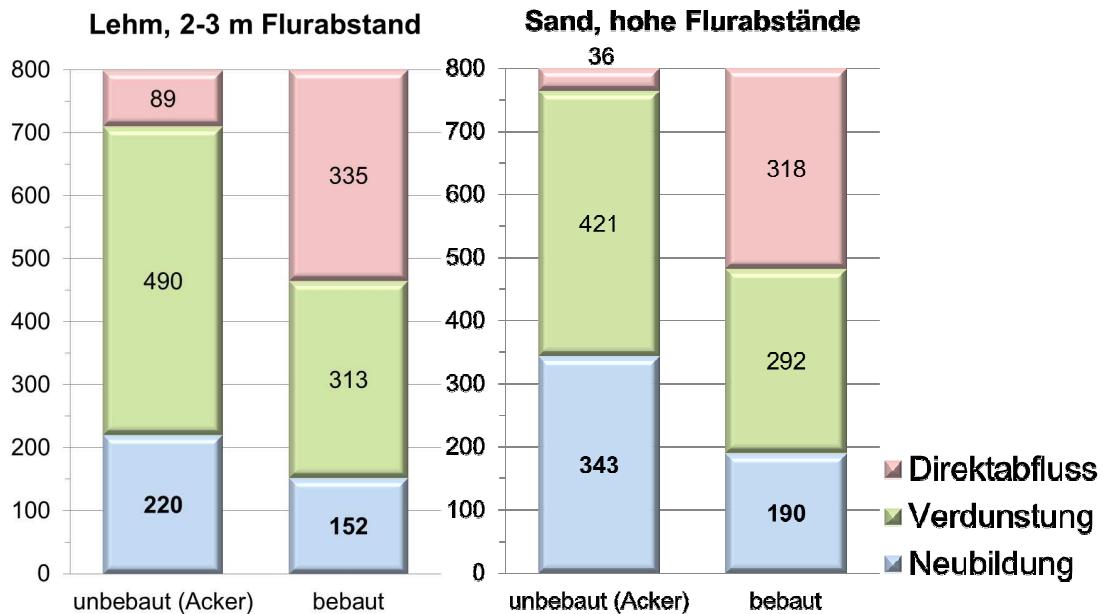


Abb. 26: Wasserhaushaltsgrößen im unbebauten Ausgangszustand und bei Bebauung bei Lehmböden (links) und Sandböden (rechts)

8.3 Regenwasserversickerung

Die Befestigung von Flächen führt i.d.R. zu einer Verringerung von Verdunstung und Grundwasserneubildung während der Direktabfluss stark zunimmt. Werden alle Dachflächen von der Kanalisation abgekoppelt und einer dezentralen Regenwasserversickerung zugeführt, erhöht sich die Grundwasserneubildung mitunter sehr deutlich. Die Verdunstung bleibt in einem solchen Fall nahezu unverändert. Im Beispiel erhöht sich die Grundwasserneubildung von 252 mm/a auf 381 mm/a (Abb. 27). Insbesondere bei relativ gering durchlässigen Böden und sensiblen Flurabständen im näheren Umfeld der geplanten Bebauung, kann dies zu einer signifikanten Erhöhung der Grundwasserstände führen. Um lediglich die durch die Befestigung erfolgte Verringerung der Grundwasserneubildung zu kompensieren, kann der Anteil der notwendigen Dachflächenabkopplung berechnet werden. Im Beispieldfall wären lediglich 40 % der angeschlossenen Dachflächen abzukoppeln, um den Eingriff auszugleichen. Für die Kompensationsberechnung stehen einfache Berechnungstools zur Verfügung.

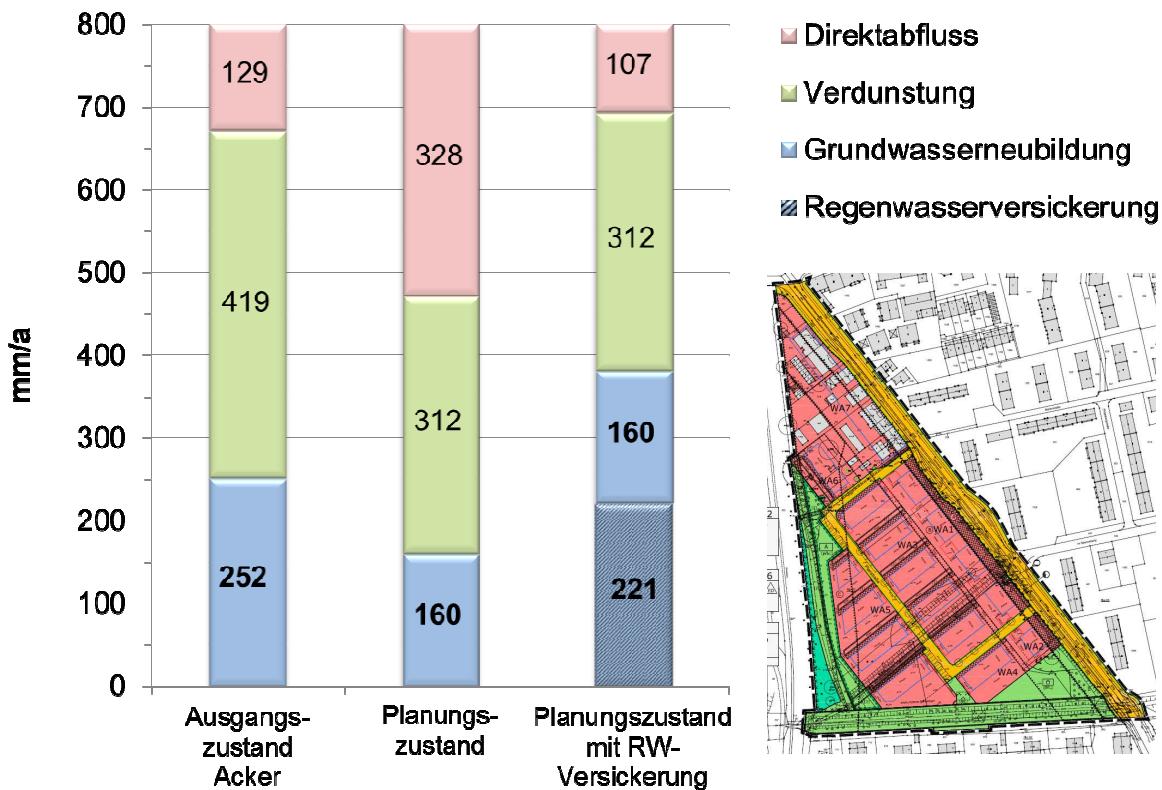


Abb. 27: Auswirkungen der Befestigung (2,2 ha Einzel- und Doppelhäusern, 0,2 ha Erschließungsstraßen und 0,9 ha Grünanlage) und Regenwasserversickerung auf den Wasserhaushalt eines Baugebiets bei Lehmboden und mittleren Flurabständen

8.4 Grundwasserneubildung im Mittelgebirge

Die Mittelgebirge sind häufig charakterisiert durch relativ hohe Niederschlagsraten, geringe potenzielle Verdunstungsraten und gering durchlässige Festgesteine. Dementsprechend ist bei gleicher Flächennutzung die reale Verdunstung relativ gering und der Direktabfluss außerordentlich hoch. Auch die Grundwasserneubildungsrate ist mit häufig über 250 mm/a recht hoch (Abb. 28). Da der Grundwasserleiter über dem Festgestein (Auflockerungszone mit geringmächtiger Quartärüberdeckung) sehr geringmächtig ist und die Hänge steil sind, strömt das Grundwasser in relativ kurzer Zeit in die Vorfluter. Der Grundwasserleiter fällt daher im Sommer insbesondere im Bereich der Kuppenlagen trocken. Im Beispiel ergeben sich für das 5,6 km² große Einzugsgebiet mit überwiegender Waldnutzung folgende Wasserhaushaltsgrößen:

Niederschlagsrate:	1.306 mm/a
Pot. Verdunstungsrate:	446 mm/a
Reale Verdunstungsrate:	502 mm/a
Gesamtabflussrate:	804 mm/a
Direktabflussrate:	560 mm/a
Grundwasserneubildungsrate:	244 mm/a

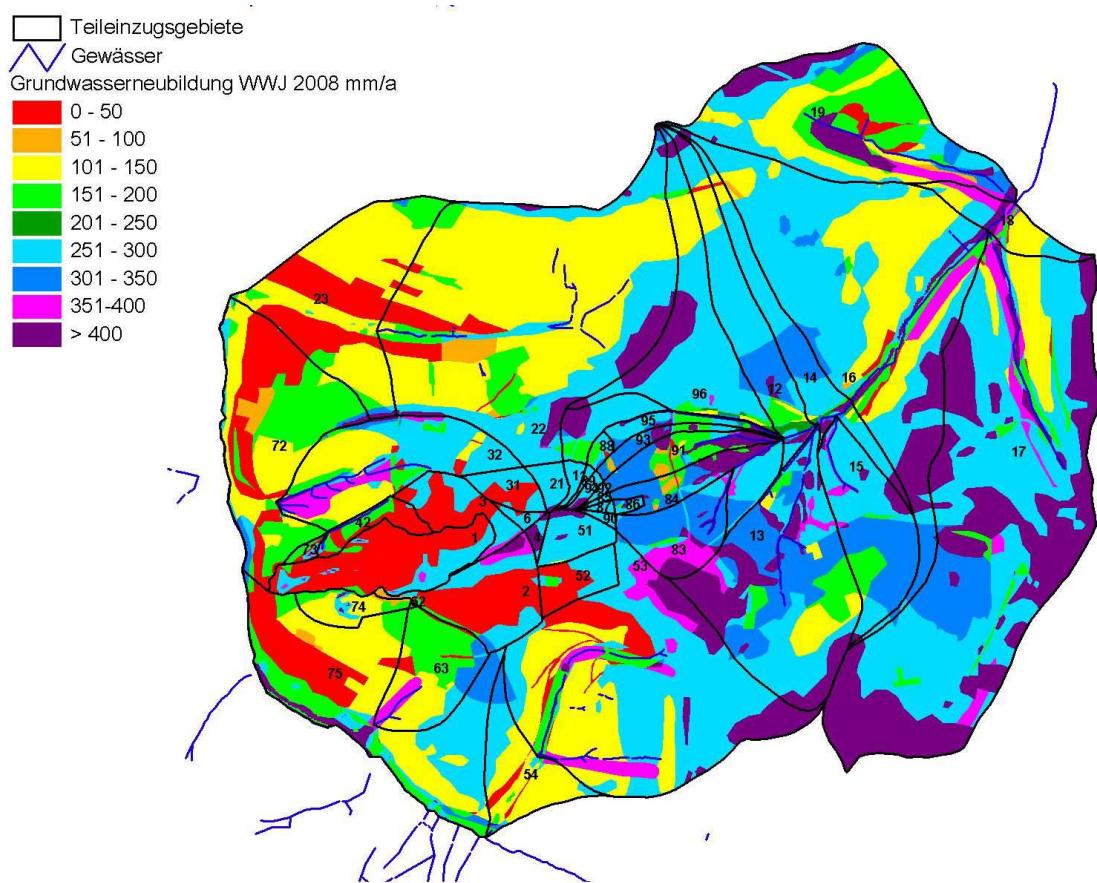


Abb. 28: Grundwasserneubildung in einem Beispielgebiet in der Nähe von Winterberg (Sauerland, NRW)

Aufgrund der beschriebenen hydrogeologischen Situation beschränkt sich die Grundwasserneubildung auf die Monate September bis April und der Grundwasserleiter fällt nach erfolgter Grundwasserneubildung sehr schnell trocken (Abb. 29).

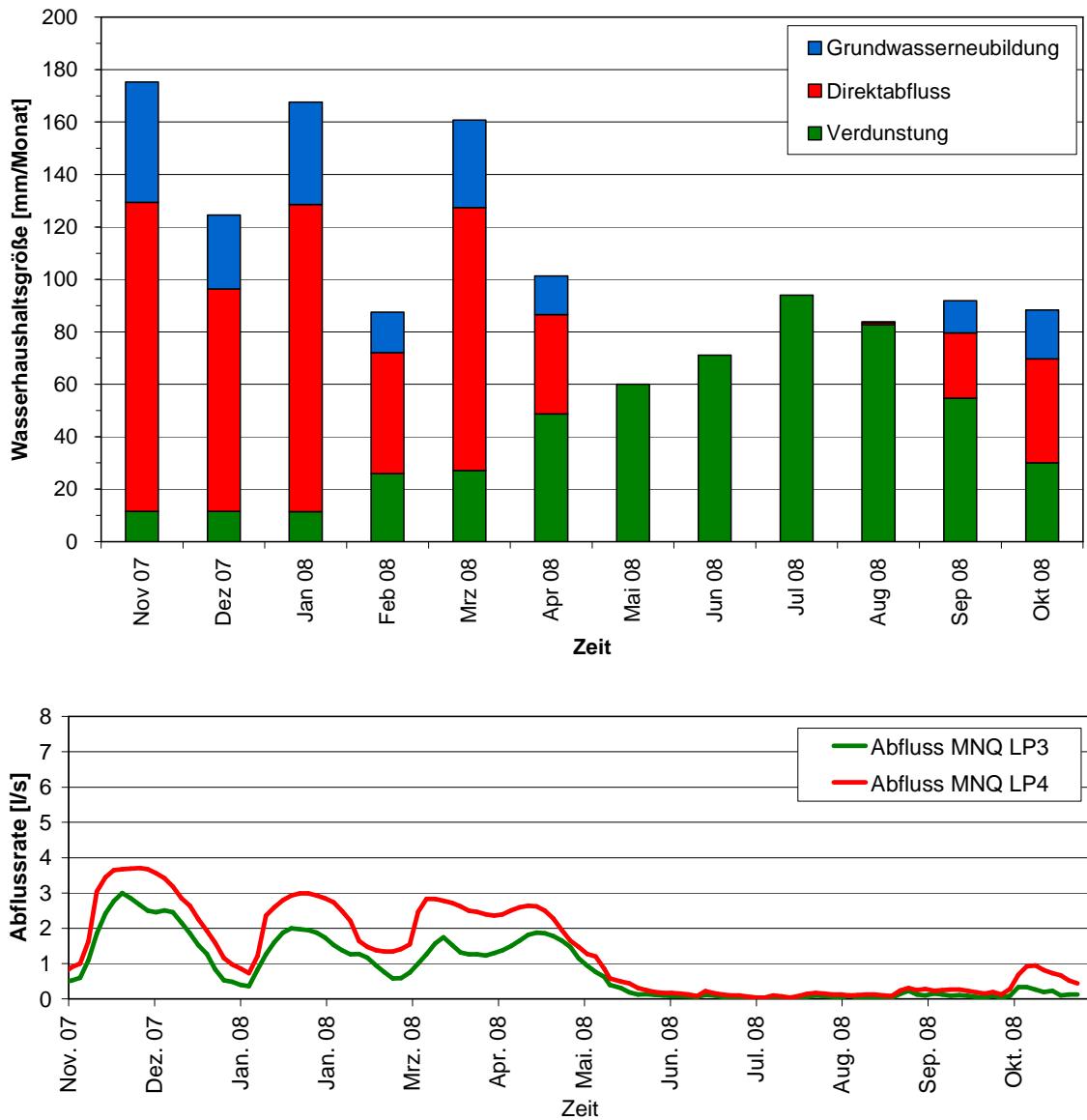


Abb. 29: Wasserhaushaltsgrößen im Jahresverlauf (oben) und gemessener grundwasserbürtiger Abfluss nach Natermann (unten) für zwei zugehörige Abflusspegel

8.5 Baumberge

In den Baumbergen (Münsterland) lassen genaue Kenntnisse über die Höhe der Grundwasserneubildung und den Abfluss in den Quellbächen Aussagen über die Fließrichtungen im Grundwasser und somit über das hydrogeologische System zu. Geologisch überlagern in den Baumbergen gut durchlässige Kalk-Sandsteine (Baumberge-Schichten) weniger gut durchlässige Kalk-Mergelsteine (Coesfeld-Schichten). Die Gesteinsschichten

bilden eine tektonisch bedingte Muldenstruktur, in der sich Grundwasser sammelt. Steigen die Grundwasserstände in der Mulde an, läuft die geologische „Schüssel“ an den zahlreichen Quellen entlang der Ausstrichgrenze der Baumberge-Schichten in etwa +120 mNN über. Die Baumberge übernehmen so die Funktion eines „Naturlysimeters“. Sie werden als hydrographischer Knoten bezeichnet, da sich hier die Wasserscheiden von fünf Flusseinzugsgebieten treffen: Münstersche Aa (Ems), Stever (Lippe), Steinfurter Aa, Berkel und Vechte (Issel).

Die flächendifferenzierte Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen (DÜSPOHL & MEßER 2010) zeigt die Verteilungsmuster der Verdunstung, des Gesamt- und Direktabflusses wie auch des grundwasserbürtigen Abflusses bzw. der Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet Baumberge (Abb. 30 und Abb. 31).

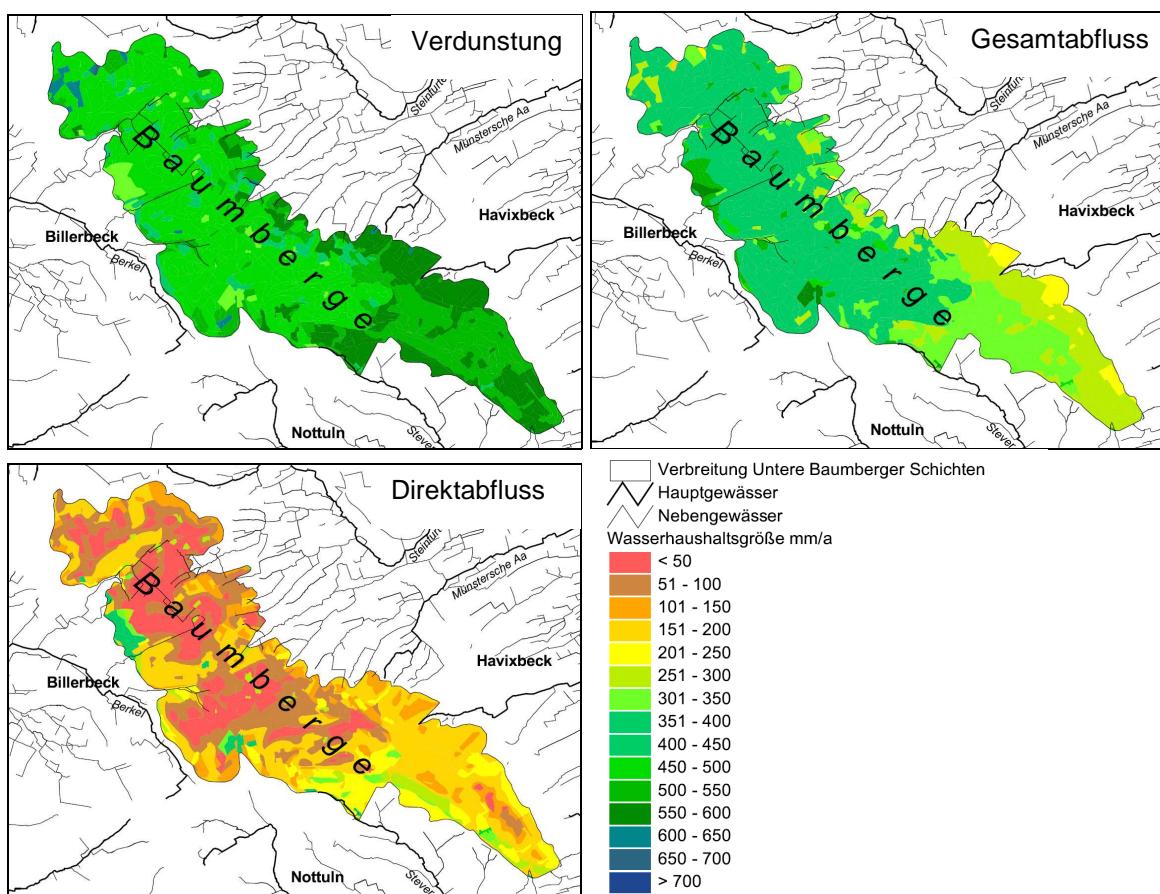


Abb. 30: Langjähriges Mittel von Verdunstung, Gesamtabfluss und Direktabfluss in den Baumbergen

Es wird deutlich, dass die Grundwasserneubildung als wichtige Wasserhaushaltsgröße in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie dem Niederschlag, den Bodenverhältnissen

nissen, dem Klima, der Flächennutzung und der Hangneigung variiert. In den Baumbergen besitzen die Flächennutzung und die Hangneigung den größten Einfluss auf die Verteilung der Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet.

Die Wasserhaushaltsbilanzierung wurde für das Wasserwirtschaftsjahr 2008 und ein langjähriges Mittel durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit Abflussmessungen verglichen und die Plausibilität des Einzugsgebietes geprüft (ENGEL & MEßER 2010). Dabei konnte kein Einfluss aufsteigender Tiefenwässer belegt, aber die hydraulische Wirksamkeit der Nottuln-Havixbecker-Aufschiebung nachvollzogen werden, da die unterirdischen Einzugsgebiete deutlich von den oberirdischen Wasserscheiden abweichen.

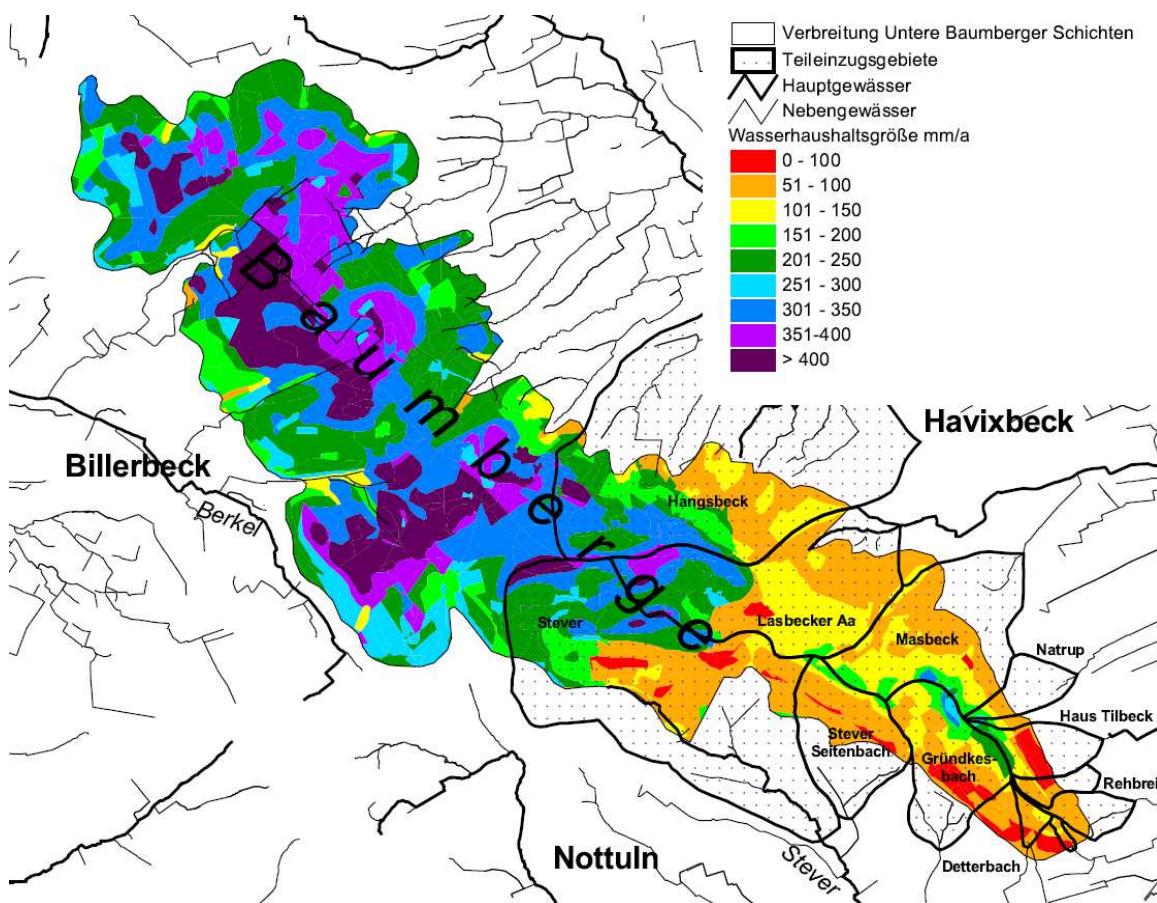


Abb. 31: Langjähriges Mittel der Grundwasserneubildung in den Baumbergen

8.6 Lippe

Für den Geographisch-landeskundlichen Atlas von Westfalen wurden Wasserhaushaltsberechnungen für das Einzugsgebiet der Lippe, als wasserwirtschaftlich wichtigsten Raum im Münsterland, durchgeführt (MEßER 2010). Hier wird im Verbreitungsgebiet der Halterner Sande ein großer Teil des Trinkwassers für das Ruhrgebiet und auch das übrige Münsterland gewonnen. Ein Teil des Grund- und Oberflächenwassers wird in angrenzende Flusseinzugsgebiete exportiert.

Bei einer langjährig mittleren Niederschlagsrate (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 %).

Die Grundwasserneubildungsrate (Abb. 32) ist z.B. im Osten des Lippeeinzugsgebietes (Raum Paderborn, Brilon) mit 250 mm/a bis über 400 mm/a sehr hoch. Die geringsten Grundwasserneubildungsraten mit weniger als 100 mm/a treten in einem Streifen südlich der Lippe von der Seseke im Westen bis zum Gescherbach im Osten auf. Hier besitzen die bindigen Böden sehr hohe nutzbare Feldkapazitäten, so dass Verdunstung und Direktabfluss sehr hoch sind. In den übrigen Bereichen sind die Grundwasserneubildungsraten kleinräumig wechselnd und betragen überwiegend zwischen 50 mm/a und 300 mm/a.

Ein Vergleich der ermittelten Grundwasserneubildung mit dem grundwasserbürtigen Abfluss der Lippe ist durch eine Vielzahl von wasserwirtschaftlichen Eingriffen erschwert. Im Einzugsgebiet der Lippe werden über 178 Mio. m³/a (ca. 5,7 m³/s) an Grundwasser, Fluss- und Talsperrenwasser und Uferfiltrat gewonnen. Ein großer Teil dieser Wassermengen, insbesondere 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 Niedrigwasser vom Datteln-Hamm-Kanal gespeist, so dass insbesondere der mittlere Niedrigwasserabfluss davon beeinflusst wird. Verfahren, die mit dem „Baseflow-Index“, d.h. der Abtrennung des grundwasserbürtigen Abflusses aus den MoMNQ-Werten (monatlicher mittlerer Niedrigwasserabfluss) der Oberflächengewässer, arbeiten, müssen in einem solchen Einzugsgebiet scheitern. Neben den Einzugsgebieten von Lippe (Export großer Wassermengen zur Emscher) und Emscher (Import von Wasser aus dem Lippegebiet und deutliche Abweichung zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet) ist dies in Nordrhein-Westfalen auch die Ruhr (Talsperrenbewirtschaftung, bei

der ein großer Teil des Direktabflusses zurück gehalten wird). Möglicherweise sind die anthropogenen Einflüsse der Grund für die unplausibel hoch erscheinende Grundwasserneubildungsrate im Einzugsgebiet der Emscher (215 mm/a) bzw. der zu gering erscheinende Wert im Einzugsgebiet der Lippe (161 mm/a) bei den Berechnungen mit GROWA (BOGENA ET AL. 2003). Die hydrogeologischen Verhältnisse und der Bebauungsgrad lassen es nicht plausibel erscheinen, dass die Grundwasserneubildung 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 hinreichender Nachweis der Berechnungen. Der langjährige MoMNQ (monatliche mittlere Niedrigwasserabflussrate) am Lippepegel in Krudenburg, etwa 15 km vor der Mündung in den Rhein, beträgt 26,8 m³/s (entspricht 175 mm/a), die berechnete Grundwasserneubildung bis zu diesem Pegel 31,1 m³/s (201 mm/a), was in Anbetracht des Wasslexportes in das Einzugsgebiet der Emscher plausibel erscheint.

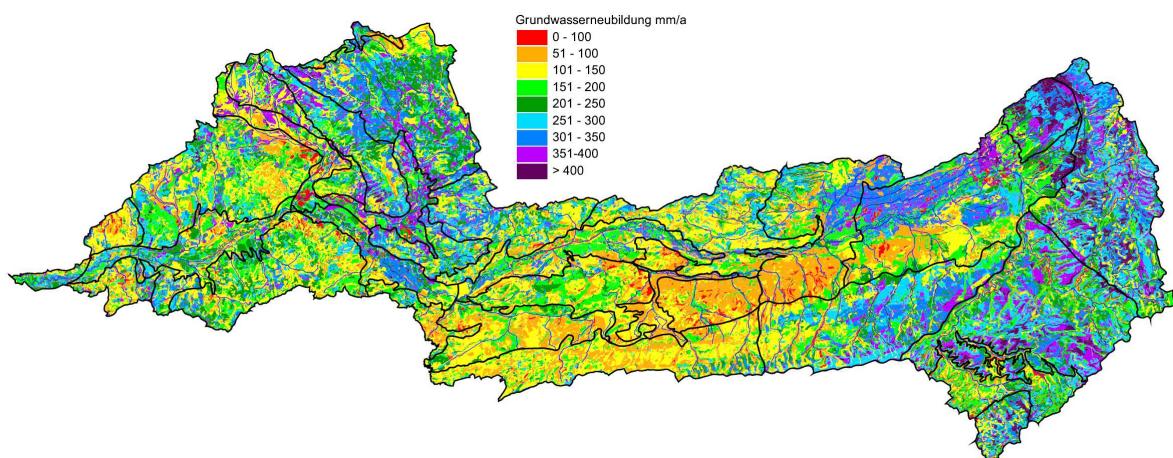


Abb. 32: Langjährig mittlere Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Lippe (Nordrhein-Westfalen)

9 LITERATUR

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. - 5. Aufl., 438 S., 41 Abb., 103 Tab.; Hannover.

ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. - Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft (FH-DGG), Geol. Jb., **C 19**: 3-98, 30 Abb., 9 Tab.; Hannover.

ATV-DWK (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. & ZIEGERL, G. (1980): KdT-Empfehlung zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. - WTI-Sonderheft 5/81, 87 S., 23 Abb., 3 Tab., 3 Anl.; Nordhausen.

BMRBS (1988): Städtebauliche Lösungsansätze zur Verminderung der Bodenversiegelung als Beitrag zum Bodenschutz. - Schriftenreihe „Forschung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Heft **456**; Bonn.

BOCK, M; FAHRENHORST, C.; FELLMER, B.; GARZ, B.; GOEDECKE, M.; KRÜGER, C.; STORCH, H.; SYDOW, M. & WELSCH, J. (1990): Ökologisches Planungsinstrument Berlin Naturhaushalt/Umwelt. - Umweltbundesamt und Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Abschlußbericht des F+E-Vorhabens 109 02 030; 183 S., 52 Abb., 30 Tab., 37 Karten; Berlin.

BOGENA, H., KUNKEL, R., SCHÖBEL, T., SCHREY, H. P. & WENDLAND, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. – Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band **37**; Jülich.

COLDEWEY, W.G., 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).

DIN 4220 (1998): Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten. – Berlin (Beuth).

DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. - Geol. Jb., **C 27**: 45-65, 13 Abb., 1 Tab.; Hannover.

DÜSPOHL, M. & MEßER, J. (2010): Wasserhaushaltsbilanzierung und grundwasserbürtiger Abfluss in den Baumbergen (Kreis Coesfeld, Nordrhein-Westfalen). - Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde, **72** (3/4): 17-26; Münster.

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. – DVWK-Merkblatt 238/1996, 135 S.; Bonn (Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser).

ENGEL, M. & MEßER, J. (2010): Abflussuntersuchungen in den Baumbergen (Kreis Coesfeld, Nordrhein-Westfalen). - Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde, **72** (3/4): 27-36; Münster.

GLUGLA, G., ENDERLEIN, R .& 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. & FÜRTIG, G. (1999): Langjährige Abflussbildung und Wasserhaushalt im urbanen Gebiet Berlin. – Wasserwirtschaft 89: 34-42.

GLUGLA, G. & KRAHE, P. (1995): Abflussbildung in urbanen Gebieten. – Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft 14, Ruhr-Universität Bochum, S. 140-160.

GLUGLA, G., JANKIEEICZ, P., RACHIMOW, C., LOJEK, K., RICHTER, K., FÜRTIG, G. & 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.

GRAY, D.M. (1970): Handbook on the Principles od Hydrology. – Secretariat Canadian Nat. Com. for the Internat. Hydrological Decade; Ottawa.

- GROSSMANN, J. (2005): Anwendung des TUB-BGR-Verfahrens zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Großraum Hamburg. (Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, in Vorbereitung).
- GROSSMANN, J. & LANGE, F. (1999): Eine Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. – Grundwasser, 4(1): 11-17, 2 Abb., 3 Tab.; Berlin (Springer).
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. – Mitt. Deutsch. Wetterdienst.
- HERGESELL, M. & 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.
- KOWALEWSKI, P.; NOBIS-WICHERDING, H.; SIEGERT, G. & KAMBACH, S. (1984): Entwicklung von Methoden zur Aufrechterhaltung der natürlichen Versickerung von Wasser. - Berliner Wasserwerke, Forschungsbericht BMFT-FB-T 184-274, Bundesminister für Forschung und Entwicklung, 143 S., 29 Abb.; Bonn.
- LANDESVERMESSUNGSAKT NORDRHEIN-WESTFALEN (2004): ATKIS Digitale Modelle der Erdoberfläche. – www.lverma.nrw.de.
- LIEBSCHER, H.J. & KELLER, R. (1979): Abfluss. – In: DFG: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland: 90 – 159.
- MEßER, J. (1997): Auswirkungen der Urbanisierung auf die Grundwasser-Neubildung im Ruhrgebiet unter besonderer Berücksichtigung der Castropener Hochfläche und des Stadtgebietes Herne. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Heft 58; Bochum.
- MEßER, J. (2010): Begleittext zum Doppelblatt Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung von Westfalen– In: Geographisch-landeskundlicher Atlas von Westfalen, Themenbereich II LANDESNATUR, Hrsg.: Geographische Kommission für Westfalen, Landschaftsverband Westfalen-Lippe; Münster.

- MEßER, J., GETTA, M. & OHLENBUSCH, R. (2011): Entwicklung eines instationären Werkzeugs zur Berechnung der Klimawandelwirkungen auf die Grundwasserneubildung. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2011 (4) Nr. 11: 608-616.
- MEßER, J. (2012): Bestimmung der Grundwasserneubildung; In: Hölting & Coldewey (Hrsg.): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8. Auflage. - 242-249; Berlin-Heidelberg.
- MULL, R. (1987): Anthropogene Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt. - DFG, Dt. Forschungsgemeinschaft, 110 S., 53 Abb., 13 Tab.; Weinheim.
- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (A_uL) und die Trockenwetter-Abflußlinie (TWL). – Wasserwirtschaft 1951, Tagung in München 1950, S. 12ff.; Stuttgart.
- 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. & WYCISK (2001): Verfahrensvergleich als methodische Grundlage zur Errichtung der Grundwasserneubildung im Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD). – Arb.-H. Wasser 2001/1: 43-46; Hannover.
- REGIONALVERBAND RUHRGEBIET (2004): Digitale Flächennutzungsdaten im Verbandsgebiet des RVR. – www.rvr.de.
- RENGER, M. & 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. & GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mittels klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. - 4. Grundwasserneubildung. Z. f. Kulturtechn. u. Flurberein. **15**: 353-366, 3 Abb., 3 Tab.; Berlin, Hamburg.
- RENGER, M., STREBEL, O., WESOLEK, G. & DUYNISVELD, W.H.M. (1986): Evapotranspiration and Groundwater Recharge - A case study for different climate, crop patterns, soil properties and groundwater depth conditions. - Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. **149**: 371-381, 9 Abb., 1 Tab.; Weinheim.

- RENGER, M. & 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.
- SCHÖPEL, M. (1985): Die Abgänge des Steinkohlenbergaus, Verwitterungs- und Lösungsvorgänge im Bergematerial, dargestellt an Lysimeterversuchen. - Diss. TU Clausthal, 148 S., 27 Abb., 57 Tab., 15 Anlagen.
- SCHOSS, H.D. (1977): Die Bestimmung des Versiegelungsfaktors nach Meßtischblatt-Signaturen. - Wasser und Boden, **29** (5): 138-140, 3 Taf.; Hamburg, Berlin.
- SCHROEDER, M. & WYRWICH, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode der flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. - DGM, **34**: 12-16, 2 Tab.; Koblenz.
- SENDT, A. & MEßER, J. (2008): Interpretation digitaler Nutzungsdaten zur Quantifizierung/Abschätzung der Befestigung bei stadthydrologischen Fragestellungen. – KA Korrespondenz Abwasser, Abfall: **55** (4): 346-357, 4 Tab., 2 Abb.
- SIEGERT, G. (1984): Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Berechnung der Versickerung von Regenwasser durch teildurchlässige Flächen bei Verwendung einer „Feuchte-Tiefensonde“ (Neutronensonde). - Diss. TU Berlin, FB 21, 71 S.; Berlin.
- SPONAGEL, H., STREBEL, O. & 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.
- STOCK, P. (1992): Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet. - Kommunalverband Ruhrgebiet, 68 S., 43 Abb., 6 Tab., 7 Karten; Essen.
- STUA MINDEN (1990): Anleitung zur graphischen Ermittlung der Grundwasser-Neubildung und deren flächendifferenzierte Kartendarstellung. – Entwurf unveröffentlicht.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1997): Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland. – CORINE Land Cover. – CD-ROM. – Wiesbaden.

WENDLING, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. – Wasserwirtschaft, **85**: 602-604.

WESSOLEK, G. & 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.