

Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI)

W3

MARIO HERGESELL & GEORG BERTHOLD



1 Problemstellung und Veranlassung

Wegen der zunehmenden anthropogenen Einflüsse auf das Grundwasser, das in vielen Ländern die einzige Trinkwasser-Ressource ist, fordert die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) u. a. auch die Bereitstellung von Daten über die Höhe der Grundwasserneubildung. Der Grund für diese Forderung ist, dass die Grundwasserentnahmen die Höhe der Grundwasserneubildung abzüglich des Wasserbedarfs von Ökosystemen nicht überschreiten dürfen. Wegen dieser seit Dezember 2000 für alle EU-Mitgliedsländer verbindlichen Vorgabe der WRRL ist im Hinblick auf die Höhe der Grundwasserneubildung die Schaffung einer landesweit abgestimmten Datenbasis erklärtes Ziel der hessischen Umweltverwaltung.

Unter Grundwasserneubildung wird die Zusickerung von in den Boden infiltriertem Wasser in den Grundwasserraum verstanden. Regional differenzierte Grundwasserneubildungsraten dienen vor allem zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen und sind eine Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen. Regional differenzierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung werden auch für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials des Grundwassers durch den Eintrag von Schadstoffen, wie z.B. infolge Nitratauswaschung, benötigt.

In einem Pilotprojekt zur Ermittlung flächendifferenzierter Grundwasserneubildungsraten wurde das von GROSSMANN (1995, 1997, 1998, 2001) und DOMMERMUTH & TRAMPF (1991) vorgestellte empirische Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) unter Verwendung bereits vorhandener Daten für die Gesamtfläche Hessens mittels GIS umgesetzt (HERGESELL, 2003 a, b). Das BWHM berechnet in Abhängigkeit von Klima, Landnutzung und Bodeneigenschaften zunächst die tatsächliche Evapotranspiration (ET_a) und die gesamte aus einem Bilanzierungsraum abfließende Wassermenge, die als Ge-

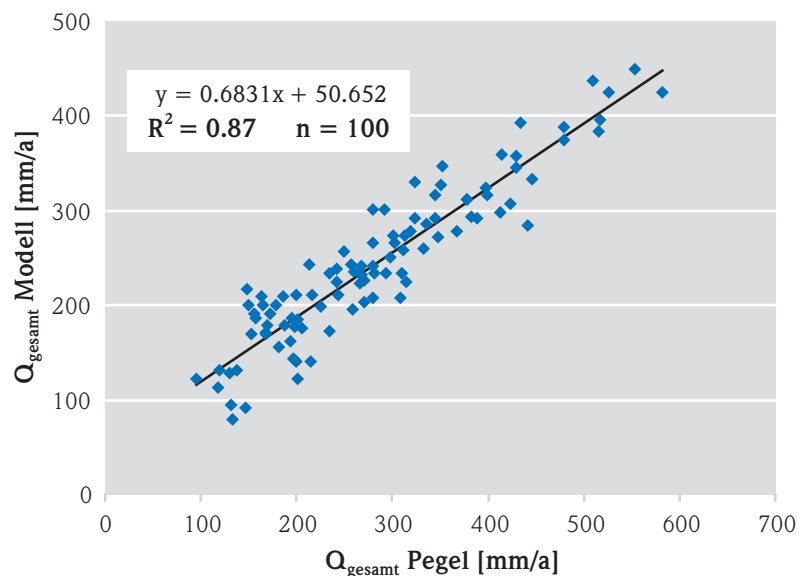


Abb. 1: Vergleich zwischen gemessenem und modelliertem Q_{gesamt} .

samtabfluss (Q_{gesamt}) bezeichnet wird. Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen gemessenen Abflüssen und modellierten Werten (Abb.1) erwies sich das BWHM für die flächendifferenzierte Ermittlung des Gesamtabflusses (Q_{gesamt}) in Hessen als gut geeignet.

In einem zweiten Schritt des Pilotprojektes wurde der Gesamtabfluss (Q_{gesamt}) nach dem Verfahren DÖRHÖFER/JOSOPAIT (1980) in die Abflusskomponenten Direktabfluss (Q_{direkt}) und Grundwasserneubildung (GWN) aufgetrennt.

Bei dem für die Abflussseparation verwendeten Verfahren DÖRHÖFER/JOSOPAIT werden lediglich die Hangneigung bzw. Reliefenergie und der Grundwasserflurabstand berücksichtigt. Der Vergleich zwischen

den durch das Verfahren ermittelten Grundwasserneubildungsraten und Niedrigwasserabflussmessungen zeigte, dass dieser einfache Ansatz für den komplexen und heterogenen Landschaftsraum Hessens, in dem vorherrschend Festgesteine vorkommen, zur Ermittlung der Abflusskomponenten GWN und Q_{direkt} nicht geeignet ist. Mit dem erwähnten Verfahren wird streng genommen nicht die Grundwasserneubildung, sondern die Sickerwasserrate innerhalb der (ungesättigten) Bodenzone ermittelt, die nur die potenzielle Grundwasserneubildung darstellt. Zur Ermittlung der Abflusskomponenten GWN und Q_{direkt} in den Festgesteinsgebieten Hessens ist es daher notwendig, die geologischen Untergrundverhältnisse bzw. hydrogeologische Parameter (z. B. Gewässernetzdichte, hydraulische Leitfähigkeit) als Steuergrößen im Modellkonzept zu berücksichtigen.

2 Zielsetzung

Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung in Hessen ist ein Modellansatz gesucht, mit dem der durch das BWHM berechnete Gesamtabfluss (Q_{gesamt}) in die Komponenten Direktabfluss (Q_{direkt}) und Grundwasserneubildung (GWN) separiert werden kann (Abb.2).

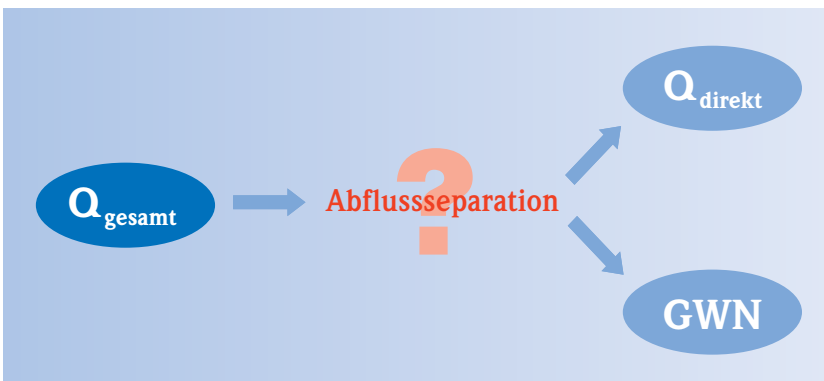


Abb. 2: Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Ermittlung der Abflusskomponenten.

Das Verfahren soll möglichst einfach anwendbar sein und unter Verwendung bereits vorhandener Daten gewährleisten, dass die heterogenen Gebietseigenschaften in Hessen ausreichend gut berücksichtigt werden.

Komplexe **physikalisch basierte (prozessorientierte) Modelle** scheiden aufgrund der fehlenden Datengrundlage zur realitätsnahen Beschreibung der Abflussbildung in der Makroskala aus.

Die derzeit verfügbaren, meist sehr einfachen **empirischen Ansätze** beschreiben den komplexen Zusammenhang zwischen den vielen in Frage kommenden Einflussgrößen und der Abflussbildung häufig nur unzureichend. Teilweise gehen diese empirischen Ansätze von widersprüchlichen Annahmen aus. Die Übertragbarkeit von empirischen Ansätzen in verschieden ausgeprägte Untersuchungsgebiete ist kritisch zu sehen, wie es sich auch in dem Pilotprojekt für Hessen zeigte. Die Anwendung von empirischen Verfahren ist grundsätzlich auf Gebiete beschränkt, deren klimatische und hydro(geo)logische Verhältnisse vergleichbar mit denen sind, unter welchen sie abgeleitet wurden.

Der im Zusammenhang mit dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) durchgeführte Verfah-

rensvergleich – als methodische Grundlage zur Ermittlung der Grundwasserneubildung (NEUMANN & WYCISK 2002) – zeigt, dass in den meisten der gängigen Verfahren die hydraulisch-lithologischen Aquifereigenschaften nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die Gültigkeit vieler Verfahren ist auf Lockergesteinsgebiete beschränkt. Auf die Bedeutung der geologischen Untergrundverhältnisse bei der Quantifizierung der Abflussanteile wird auch in aktuellen Grundwasserneubildungsstudien Niedersachsens (WENDLAND et al. 2001, DÖRHÖFER et al. 2001), Nordrhein-Westfalens (BOGENA et al. 2003) und Baden-Württembergs (ARMBRUSTER 2002) hingewiesen. Deshalb sollte auch bei der Modellwahl für Hessen dem Einfluss der geologischen Untergrundverhältnisse auf die Abflussbildung Rechnung getragen werden.

In Anlehnung an den Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) sowie an die in Baden-Württemberg (Armbruster 2002) und Bayern (Neumann 2004) praktizierten Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung wurde entschieden, ein speziell für Hessen konzipiertes Regressionsmodell zu entwickeln. Bei diesem Vorgehen wird sichergestellt, dass das Modell optimal an die spezifischen Gebietscharakteristika Hessens angepasst ist. Der wesentliche Vorteil liegt darin, dass das zu erstellende Modell mit tatsächlichen gemessenen Abflusswerten kalibriert wird. Das Regressionsmodell basiert also direkt auf realen, innerhalb Hessens ermittelten Messwerten.

3 Beschreibung des Modellkonzeptes

Die Bestimmung der Grundwasserneubildung (GWN) erfolgt indirekt und beruht auf der Separation des Gesamtabflusses in die beiden Abflusskomponenten

Gl. 1
$$Q_{\text{gesamt}} = Q_{\text{basis}} + Q_{\text{direkt}}$$

Basisabfluss (Q_{basis}) und Direktabfluss (Q_{direkt}):
Der Direktabfluss ist die Summe aller schnellen Ab-

flussanteile (Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss bzw. Interflow), die mit nur geringer Zeitverzögerung (Stunden bis eine Woche) nach einem Niederschlagsereignis den Vorfluter erreichen (Abb. 3).

Der Basisabfluss resultiert aus der sog. „langsamen“ Abflusskomponente im Aquifer und ist weitgehend dessen Leerlaufen in Trockenwetterperioden gleichzusetzen. Der Basisabfluss eines oberirdischen Gewässers ist somit in der Regel nichts anderes als re-

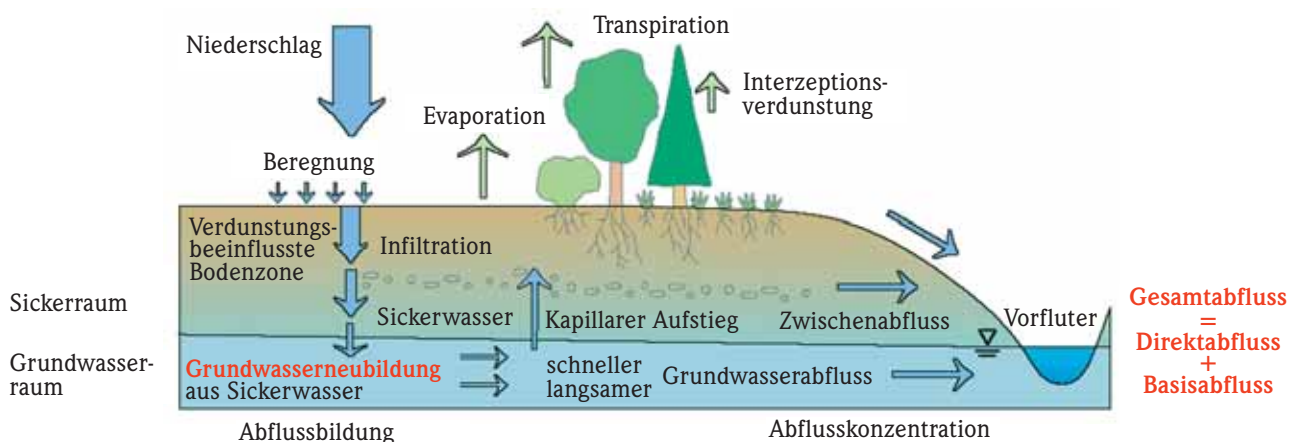


Abb. 3: Abflusskomponenten des terrestrischen Wasserkreislaufs (BMU 2003).

generiertes Grundwasser, das im Aquifer über einen längeren Zeitraum (meistens Wochen oder Monate, z.T. sogar einige Jahre) gespeichert worden ist.

Die Ermittlung der Abflusskomponenten bei dem gewählten Verfahren erfolgt durch die Verwendung sogenannter „Baseflow-Indizes“. Der Baseflow-Index (BFI) beschreibt den Anteil des Basisabflusses (Q_{basis}) am Gesamtabfluss (Q_{gesamt}):

Gl. 2
$$\text{BFI} = Q_{\text{basis}} / Q_{\text{gesamt}}$$

Im langjährigen Mittel kann bei anthropogen unbeeinflussten Verhältnissen von einem Gleichgewicht zwischen der aus infiltrierten Niederschlägen dem Grundwasserraum zufließenden (GW-Input) und der aus dem Grundwasserraum in die Vorfluter austretenden Wassermenge (GW-Output) ausgegangen werden. Daher kann die Grundwasserneubildung bei Betrachtung größerer Zeiträume dem Basisabfluss gleichgesetzt werden:

Gl. 3
$$\text{GWN} = Q_{\text{basis}} \text{ (im langjährigen Mittel)}$$

Somit kann die Grundwasserneubildung als relativer Anteil am Gesamtabfluss ausgedrückt werden:

Gl. 4
$$\text{GWN} = \text{BFI} \cdot Q_{\text{gesamt}}$$

Theoretisch kann der BFI Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Für Lockergesteinsgebiete ohne flurnahes Grundwasser, Staunässe oder künstliche Entwässerungssysteme sind hohe Basisabflussanteile bzw. Grundwasserneubildungsraten und niedrige Direktabflussanteile charakteristisch, was durch hohe BFI-Werte zum Ausdruck kommt.

Festgesteinsgebiete (Karstgebiete ausgenommen) mit ähnlichen klimatischen Verhältnissen zeichnen sich durch relativ hohe Direktabflussanteile und niedrige Grundwasserneubildungsraten aus (NEUMANN & WYCSIK 2001). Für Festgesteinsgebiete sind daher in der Regel vergleichsweise niedrige BFI-Werte charakteristisch.

Für eine repräsentative Auswahl von Pegelinzugsgebieten, die das breite Spektrum der klimatologischen, pedologischen, und hydrogeologischen Variabilitäten Hessens abdecken, werden zunächst aus den Pegelraten der Periode 1971–2000 auf das Einzugsgebiet bezogene BFI-Werte (Zielgröße) ermittelt (Abb 4).

Nach dem empirischen Ansatz von KILLE (1970) können die reduzierten mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNO_r) mit dem Basisabfluss (Q_{basis}) gleichgesetzt werden, während das langjährige arithmetische Mittel der Abflüsse (MQ) dem Gesamtabfluss (Q_{gesamt}) entspricht. Dadurch lässt sich der BFI auch durch den Quotient aus MoMNO_r und MQ ausdrücken:

Gl. 5
$$Q_{\text{basis}} = \text{MoMNO}_r \text{ (Pegelraten)}$$

Gl. 6
$$Q_{\text{gesamt}} = \text{MQ (Pegelraten)}$$

Gl. 7
$$\text{BFI} = Q_{\text{basis}} / Q_{\text{gesamt}} = \text{MoMNO}_r / \text{MQ}$$

Für die Pegelinzugsgebiete werden zusätzlich alle verfügbaren Gebietsparameter ermittelt, die einen signifikanten Einfluss auf den BFI haben können. Durch **multiple lineare Regressionsanalyse** kann der statistische Zusammenhang zwischen den auf ein Einzugsgebiet bezogenen BFI-Werten (Zielgröße) und mehreren relevanten unabhängigen Gebietsmerkmalen (Prädiktoren), wie z.B. Bodeneigenschaften, Bodenbedeckung oder geologische Untergrundverhältnisse, in Form einer mathematischen Gleichung (Schätzfunktion) ermittelt werden (Abb. 11):

Gl. 8
$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{m-1}x_{m-1} + b_mx_m + z$$

- mit y = abhängige Variable (Zielgröße = BFI)
- a = Regressionskonstante
- b_i = Regressionskoeffizienten
- x_i = unabhängige Variablen (Prädiktoren)
- z = Zufallsfehler

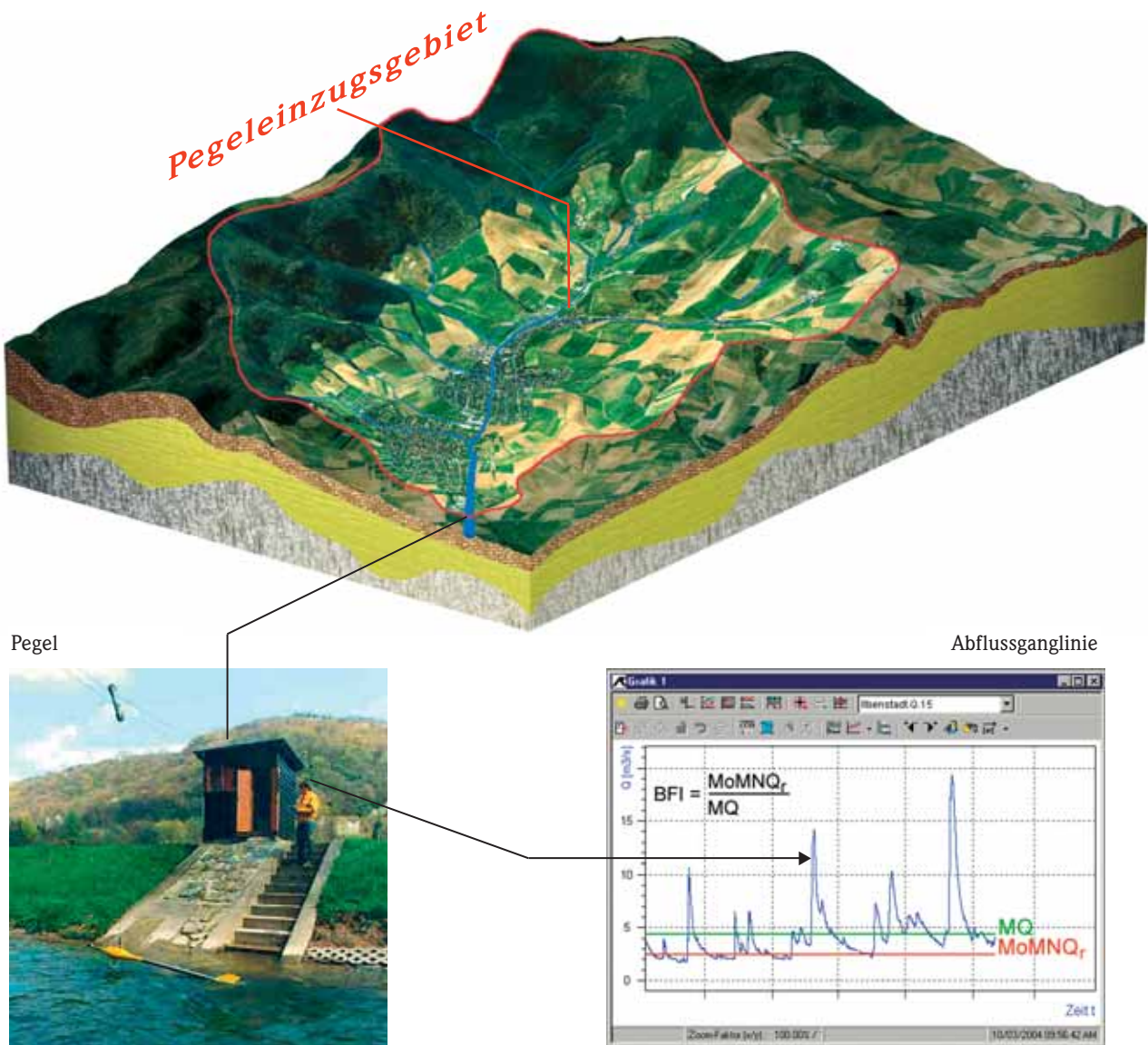


Abb. 4: Ermittlung einzugsgebietsbezogener Baseflow-Indizes.

Mit Hilfe dieser abgeleiteten Übertragungsfunktion können die BFI-Werte für die gesamte Fläche Hessens flächendifferenziert berechnet werden. Durch die Multiplikation der flächendifferenzierten BFI-Werte mit dem durch das Bodenwasserhaushaltsmodell berechneten Gesamtabfluss erhält man im dritten Schritt schließlich die flächendifferenzierten Abflusskomponenten Direktabfluss und Grundwasserneubildung. Der gesamte Verfahrensablauf mit den beiden gekoppelten Teilmodellen und deren Zielgrößen ist schematisch in Abb. 5 dargestellt.

Die **Regionalisierung von BFI-Werten** auf Grundlage gemessener Abflussdaten und einer gebiets-spezifischen Auswahl von Standortmerkmalen stellt ein plausibles und praktikables Verfahren zur flächendifferenzierten Beschreibung der Abflusskomponenten dar. Alternativ zu dem hier beschriebenen Regressionsansatz könnte man auch statt des BFI den aus Pegel-daten ausgewerteten Basisabfluss, der im lang-jährigen Mittel der GWN entspricht, direkt regionalisieren. Analog müsste dann mittels Zusammenhang-analyse zwischen relevanten Gebietskenngrößen

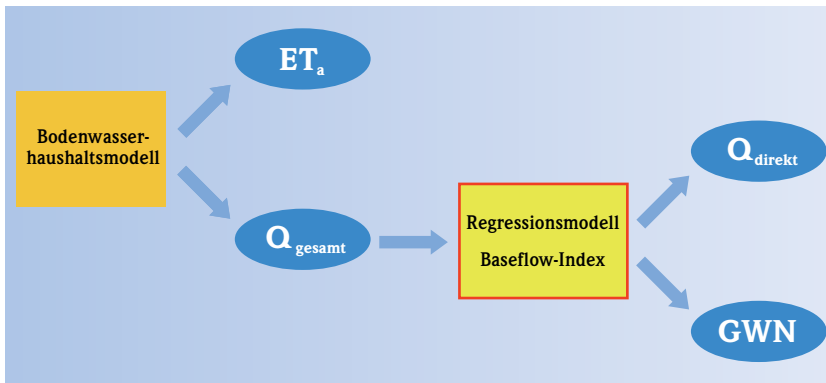


Abb. 5: Schematische Darstellung des Verfahrensablaufs zur Berechnung flächendifferenzierter Abflusskomponenten

Tab. 1: Beispielhafte Anwendungen für die Regionalisierung von BFI-Werten

Modell / Verfahren	Untersuchungsgebiet	Quelle
HAD-GWNeu	Bundesrepublik Deutschland	BMU, 2003 NEUMANN 2005
Weiterentwicklung des HAD-Verfahrens	Bundesland Bayern	NEUMANN 2004
TRAIN-GWN	Bundesland Baden-Württemberg	ARMBRUSTER 2002
GROWA98	Einzugsgebiet der Elbe	KUNKEL & WENDLAND 1998
GROWA98	Bundesland Niedersachsen	WENDLAND et al. 2001, DÖRHÖFER et al. 2001
GROWA98	Bundesland Nordrhein-Westfalen	BOGENA et al. 2003
ARC/EGMO, HBV u.a.	Einzugsgebiet der Elbe	BECKER et al. 2002
ARC/EGMO, HBV	Einzugsgebiet der Elbe	HABERLANDT et al. 2001

und dem Basisabfluss (bzw. GWN) eine Schätzfunktion ermittelt werden. Allerdings hat die Regionalisierung des BFI gegenüber der Regionalisierung des Basisabflusses einige wesentliche Vorteile:

- Durch die Bildung des Quotienten BFI wird der Basisabfluss mit dem Gesamtabfluss normiert. Diese Normierung eliminiert den Einfluss der Einzugsgebietsgröße, d.h. der BFI ist im Gegensatz zum spezifischen Basisabfluss skalunenabhängig. Dies ermöglicht nicht nur einen besseren Vergleich von Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe (BECKER et al. 2002), sondern auch die spä-

tere Übertragung des Regressionsmodells auf Flächeneinheiten (z.B. ein gleichförmiges Raster), die kleiner als die der Regressionsanalyse zu Grunde liegenden Einzugsgebiete sind.

- Außerdem bewirkt die Verwendung des BFI eine Dämpfung des Einflusses der Klimaparameter (BECKER et al. 2002), insbesondere des Niederschlages, sowie anthropogener Überprägung durch Fremdwasser (ARMBRUSTER 2002). In Bezug auf Fremdwasser ist der BFI relativ wenig sensitiv. Dagegen werden absolute Abflussmessungen, insbesondere Niedrigwasserabflussmessungen, durch Fremdwasseranteile stark verfälscht.
- Auch ist der BFI im Vergleich zum spezifischen Basisabfluss zeitlich invariant. Der BFI ist also im langjährigen Mittel nahezu konstant. Deshalb wirken sich Messlücken in unvollständigen Zeitreihen deutlich weniger auf den BFI als auf den Basisabfluss aus.

Aufgrund dieser Vorteile wird die Regionalisierung von BFI-Werten gegenwärtig sowohl auf Landes- als auch auf Bundesebene als geeignetes Verfahren zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung in der Meso- bis Makroskala eingesetzt (Tab. 1). Derzeit wird parallel zu den Arbeiten im HLUG auch im Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft ein Regressionsmodell für die Ermittlung der Grundwasserneubildung in Bayern entwickelt (NEUMANN 2004). Um Synergieeffekte zu nutzen, werden Erkenntnisse und Informationen, die bei den beiden parallel durchgeführten Projekten gewonnen wurden, regelmäßig ausgetauscht.

4 Datenaufbereitung

4.1 Parameterwahl und Parametrisierung

Auf Grundlage der in der Literatur beschriebenen Zusammenhangsanalysen zwischen BFI und gebietsbeschreibenden Parametern wurde zur Einschränkung der Einflussfaktoren eine Vorauswahl geeigneter Modell-Parameter getroffen. Allerdings wurden in früheren Studien teilweise unterschiedliche Zusammenhänge beobachtet. BECKER et al. (2002) haben gezeigt, dass der langjährige mittlere BFI stark mit topographischen, pedologischen, hydrogeologischen Parametern und mit dem Niederschlag, aber kaum mit der Landnutzung korreliert. ARMBRUSTER (2002) beschreibt in seiner Arbeit, dass Niederschlag und Reliefparameter für den BFI statistisch nicht signifikant sind.

Bei der Parameterwahl ist darauf zu achten, dass zwischen den Prädiktorvariablen keine Multikollinearität vorhanden ist. Das bedeutet, dass bei der Regressionsanalyse nur Parameter berücksichtigt werden dürfen, die nicht untereinander korrelieren bzw. stochastisch unabhängig sind.

Das zu erstellende Regressionsmodell sollte mit möglichst wenigen Parametern auskommen. Bei der Berücksichtigung zu vieler Parameter besteht die Gefahr, dass das Regressionsmodell kaum noch interpretierbar und nur schwierig auf Plausibilität überprüfbar ist.

Bei der Parameterwahl für das Regressionsmodell wurde darauf geachtet, dass alle Kompartimente des terrestrischen Wasserhaushaltes, die bei der Abflussbildung eine Rolle spielen und somit den Baseflow-Index beeinflussen, berücksichtigt werden. Die einzelnen Parameter sind nach Kompartimenten geordnet in Tab. 2 zusammengestellt.

Eine weitere Anforderung an die für die Regressionsanalyse verwendeten Daten ist, dass sowohl die Zielgröße als auch die Prädiktoren

metrisch skaliert sein müssen, da nur metrisch skalierte Daten (z. B. Niederschlag oder Hangneigung) arithmetische Operationen zulassen. Daher müssen nominal (z. B. Landnutzung) und ordinal (z. B. Stau-nässestufen) skalierte Prädiktorvariablen zunächst in metrische Parameter überführt werden. Hierzu werden die Flächenanteile der einzelnen Kategorien bzw. Klassen für alle Pegel-einzugsgebiete bestimmt. Für den nominal skalierten Parameter Landnutzung werden zum Beispiel die Flächenanteile der jeweiligen Kategorien (Grünland, Ackerland, Wald etc.) separat ermittelt. Die einzelnen Kategorien bzw. Klassen der nominal und ordinal skalierten Parameter werden später bei der Regressionsanalyse als einzelne Parameter berücksichtigt. Für alle metrischen Parameter werden die Gebietsmittelwerte der Pegel-einzugsgebiete bestimmt. Zusätzlich werden auch die metrischen Parameter klassifiziert und die Flächenanteile der verschiedenen Klassen bestimmt. Bei diesem Vorgehen wird dem Umstand Rechnung getragen, dass viele Prozesse in der Hydrologie nicht linear von ihren Einflussgrößen abhängen. Auf diese

Tab. 2: Überblick der verwendeten Parameter

Kompartiment	Parameter	Skalenniveau
Atmosphäre	Niederschlag	metrisch
	Sommer-/Winterniederschlag	metrisch
Landschaftsoberfläche	Gebietshöhe	metrisch
	Hangneigung	metrisch
	Landnutzung bzw. Bodenbedeckung	nominal
	Oberflächengewässer (MQ, MoMNO ₃)	metrisch
	Gewässernetzdichte	metrisch
Boden	nFK100	metrisch
	nFKdb	metrisch
	kf-Wert der Böden	metrisch (klassifiziert) bzw. ordinal
	Grundnässe	metrisch (klassifiziert) bzw. ordinal
	Stau-nässe	ordinal
	bindige Deckschicht	nominal
Grundwasserraum (oberer Aquifer)	kf-Wert	metrisch (klassifiziert) bzw. ordinal
	Verfestigung	nominal
	Porenraum	nominal

Weise wird somit gewährleistet, dass bestimmte Wertebereiche eines Parameters gesondert berücksichtigt werden können. Das Regressionsmodell kann zusätzlich linearisiert werden, indem Parameter, die einen sehr großen Wertebereich abdecken oder nicht normal verteilt sind, logarithmisch transformiert werden.

Die unterschiedlichen Skalenniveaus der verschiedenen Modellparameter sind der Tab. 2 zu entnehmen.

4.2 Kalibrierungsdatensatz (Pegeldaten)

Die Güte und Übertragbarkeit des zu erstellenden Regressionsmodells hängt in erster Linie von der Auswahl und Qualität der Abflussmessungen ab.

Eine möglichst große Anzahl unterschiedlich ausgeprägter Pegel Einzugsgebiete ist Voraussetzung dafür, dass das Regressionsmodell möglichst alle in Hessen vorkommenden naturräumlichen Gegebenheiten bzw. Parameterkombinationen abdeckt.

Grundlage für die Ermittlung gebietsbezogener BFI-Werte sind die monatlichen Mittel- (MoMQ) und Niedrigwasserabflüsse (MoNQ) der Referenzperiode 1971–2000. Von den ursprünglich 108 verfügbaren Pegeln konnten nur 52 Pegel für die Modellbildung berücksichtigt werden. Weggelassen wurden stark anthropogen beeinflusste Pegel (z. B. durch Wasserentnahme, Abwassereinleitung und Stauung) und Pegel, die in den Sommermonaten trocken fallen. Um Parameterredundanzen zu vermeiden, wurde auch auf verschachtelte Pegel Einzugsgebiete verzichtet. Die Verteilung der verbliebenen 52 Kopfgebiete ist in Abb. 9 dargestellt.

Da für mehrere Pegel keine vollständigen Messreihen vorlagen, wurden die Messlücken durch lineare Regressionsanalyse zwischen benachbarten Pegeln ergänzt. In Abb. 6 wurde eine fast 6-jährige Messlücke des Pegels Angenrod unter Verwendung der Messreihe des Nachbarpegels Alsfeld ergänzt. Die rote Kurve im unteren Teil der Abbildung ist der durch lineare Regression ergänzte Teil der Messreihe des Pegels Angenrod. In den meisten Fällen konnte eine sehr gute Korrelation zwischen den benachbarten Pegeln beobachtet werden, was in einem mittleren Korrelationskoeffizienten (R) von 0,96 bzw. ei-

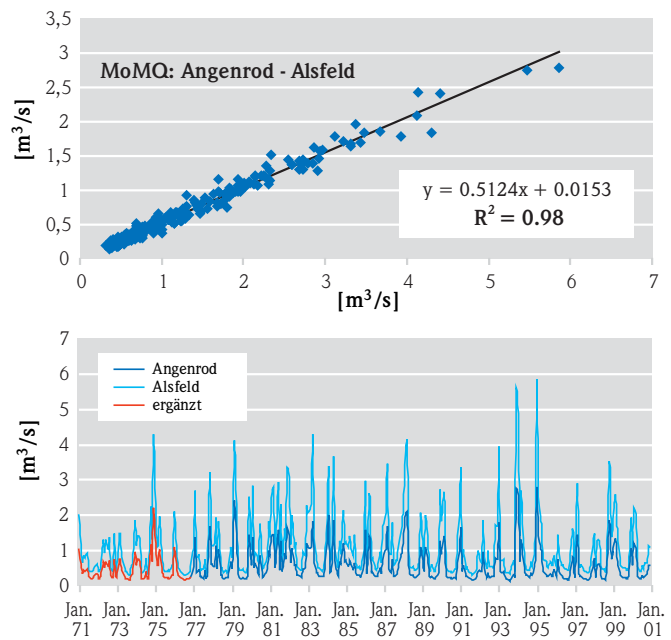


Abb. 6: Ergänzung unvollständiger Abflusszeitreihen mittels linearer Regression.

nem mittleren Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0,93 Ausdruck findet.

Nach der Ergänzung der Messreihen wurde aus den monatlichen Mittelwasserabflüssen (MoMQ) das arithmetische Mittel MoMMQ gebildet, was dem langjährigen mittleren Abfluss MQ bzw. dem Gesamtabfluss (Q_{gesamt}) entspricht.

$$Gl. 9 \quad MoMMQ = MQ = \frac{\sum MoMQ}{n_{Mo}} = Q_{gesamt}$$

Nach WUNDT (1958) entspricht der Mittelwert der monatlichen Niedrigwasserabflüsse in einem mehrjährigen Betrachtungszeitraum (n_{Mo}) annähernd dem Basisabfluss (Q_{basis}):

$$Gl. 10 \quad MoMQ_{(WUNDT)} = \frac{\sum MoNQ}{n_{Mo}} = Q_{basis}$$

Die so ermittelten MoMNQ-Werte enthalten jedoch noch Direktabflusskomponenten. Deshalb wird das von KILLE (1970) weiterentwickelte MoMNQ_r-Verfahren angewendet, bei dem die Direktabflussantei-

le abgetrennt werden. Hierzu werden die MoNQ-Werte in aufsteigender Größe angeordnet und eine Ausgleichsgerade durch den unteren (quasi-)linearen Abschnitt der Kurve gelegt (Abb. 7). Die MoNQ-Werte oberhalb der Ausgleichsgeraden werden dem Direktabfluss zugeschrieben. Der um den Direktabfluss reduzierte MoMNO-Wert (MoMNO_r) entspricht der Mittelordinate der Ausgleichsgeraden.

Gl. 11
$$\text{MoMNO}_{r(KILLE)} = Q_{\text{basis}}$$

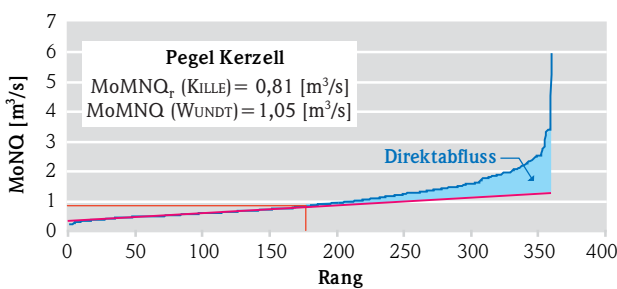


Abb. 7: Abtrennung des Direktabflusses nach KILLE (1970).

Abschließend wurden aus den beiden Abflussparametern Q_{gesamt} und Q_{basis} die BFI-Werte der 52 Pegel-einzugsgebiete berechnet.

Gl. 12
$$\text{BFI}_{\text{pegel}} = Q_{\text{basis}} / Q_{\text{gesamt}}$$

Die Häufigkeitsverteilung der ermittelten BFI-Werte ist in Abb. 8 dargestellt. Das Spektrum der einzugsgebietsbezogenen BFI-Werte reicht von 0,15 bis 0,63. Der Mittelwert des BFI für Hessen beträgt 0,38.

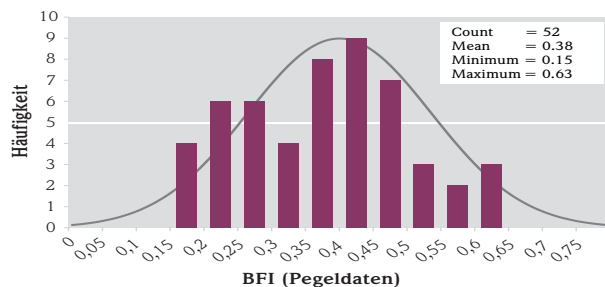


Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der BFI-Werte.

Abb. 9 zeigt die Verteilung der 52 Pegel-einzugsgebiete mit ihren entsprechenden BFI-Werten.

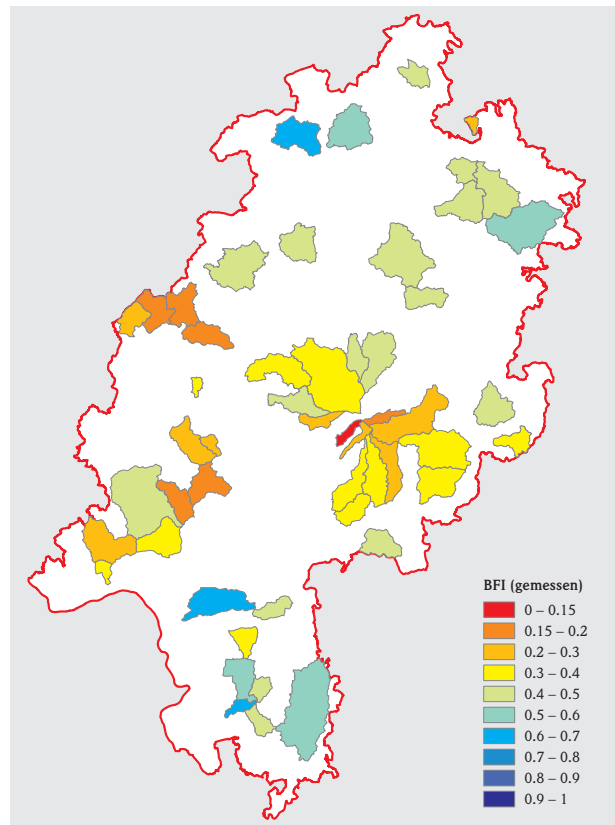


Abb. 9: Räumliche Verteilung der BFI-Werte.

4.3 Prädiktorvariablen

Da die Regressionsanalyse rasterbasiert durchgeführt wird und das Modell später flächendifferenziert übertragen werden soll, müssen alle potenziellen Prädiktorvariablen als Rasterdaten vorliegen. Die Auflösung von 100 m wurde von dem bereits bestehenden Bodenwasserhaushaltsmodell übernommen.

Niederschlag

Mittlere korrigierte Niederschlagshöhe (1971–2000): Der Niederschlag als wichtigstes positives Bilanzglied der Wasserhaushaltsgleichung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Abflussbildung und speziell auf die Grundwasserneubildung. Über den Einfluss des Niederschlags auf den Baseflow-Index wurden in der Literatur sehr unterschiedliche Aussagen gemacht. Deshalb sollte der Niederschlag bei der Regressionsanalyse testweise berücksichtigt werden.

In den bisherigen Modell-Läufen des Bodenwasserhaushaltsmodells kamen unkorrigierte bzw. gemess-

sene Niederschlagsdaten zum Einsatz. Die Messung der Niederschlagshöhe ist allerdings mit gerätespezifischen und aufstellungsabhängigen Messfehlern behaftet. Aufgrund von Windverwehung, Benetzungs- und Verdunstungsverlusten fallen die gemessenen Niederschlagshöhen im Mittel ca. 10 % zu niedrig aus. Der Niederschlagsmessfehler nimmt mit zunehmender freier Lage der Messstation deutlich zu, wobei diese Zunahme im Winter (durch Schneeverwehung) erheblich größer ist als im Sommer. Im Januar/Februar können die Messfehler bis über 30 % ausmachen. Da die Grundwasserneubildung fast ausschließlich in den Wintermonaten stattfindet und der Niederschlag die wichtigste Einflussgröße für die Grundwasserneubildung darstellt, ist eine Niederschlagskorrektur für die Ermittlung der Grundwasserneubildung unerlässlich. In den bisherigen Modellanwendungen wurden der Gesamtabfluss und die Grundwasserneubildung auf Grund des systematischen Messfehlers unterschätzt. Deshalb wurden zwischenzeitlich die mittleren korrigierten Niederschlagshöhen der Periode 1971–2000 vom DWD als Rasterdaten zur Verfügung gestellt. Die Korrektur der Niederschlagsdaten erfolgte nach dem Verfahren für den Niederschlagsmesser nach Hellmann (RICHTER 1995), welches auch für den Hydrologischen Atlas von Deutschland verwendet wurde.

Für die Regressionsanalyse wurden aus den mittleren korrigierten Niederschlägen sowie aus dem Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlag die Mittelwerte für die Einzugsgebiete berechnet.

Reliefparameter

Die Reliefparameter Gebietshöhe und Hangneigung haben einen großen Einfluss auf die Abflussbildung. Mit zunehmender Höhe nimmt der Niederschlag zu, während die Temperatur und die Verdunstung abnehmen; d. h. mit zunehmender Höhe nimmt der Anteil der Abflusskomponenten bei sonst gleichen Gebietsmerkmalen zu. Die Hangneigung wirkt sich stark auf die lateralen Abflussprozesse Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss (Interflow) aus, die als Direktabfluss zusammengefasst werden. Mit zunehmender Hangneigung nimmt der Direktabfluss zu und der Basisabfluss bzw. die Grundwasserneubildung ab. In der Literatur wird der Einfluss der Reliefparameter auf den Baseflow-Index sehr unterschiedlich diskutiert. Für beide Reliefparameter wurden

auf die jeweiligen Einzugsgebiete bezogene Mittelwerte und zusätzlich Flächenanteile von Hangneigungsklassen ermittelt. Als Datengrundlage diente das korrigierte digitale Höhenmodell DHM40.

Landnutzung

Die Landnutzung wirkt sich maßgeblich auf die Verdunstungsprozesse (Evapotranspiration und Interzeption) und somit auch auf den Gesamtabfluss aus. Sie beeinflusst aber auch die oberflächennahen lateralen Abflussprozesse und hat somit einen Einfluss auf die Separation des Gesamtabflusses in die verschiedenen Abflusskomponenten. Ein Extremfall stellen die versiegelten Siedlungsflächen dar, wo ein Großteil des abflusswirksamen Niederschlags nicht infiltriert, sondern durch Kanalisation direkt wieder in die Vorfluter gelangt. Bezüglich des Baseflow-Index wurde in früheren Studien nur ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Landnutzungs-kategorie Wald und dem BFI festgestellt. Für die Regressionsanalyse wurde auf Grundlage der ATKIS-Daten (DLM25) zwischen den Landnutzungs-kategorien Siedlung, Grünland, Ackerland und Wald unterschieden. Für alle Landnutzungs-kategorien wurden die auf die Einzugsgebiete bezogenen Flächenanteile berechnet.

Gewässernetzdichte

Die Gewässernetzdichte ist ein summarischer bzw. integraler gebietsspezifischer Parameter, der primär die Durchlässigkeit des Untergrundes und das hydrogeologische Abflussverhalten einer Region widerspiegelt. Faktoren, die Einfluss auf die Gewässernetzdichte haben, sind neben den Niederschlags- und geologischen Untergrundverhältnissen Relief, Landnutzung, Bodeneigenschaften und Grundwasserflurabstände. Gebiete mit hoher Gewässernetzdichte sind in der Regel durch geringdurchlässige Untergrundverhältnisse, hohe Abflussbereitschaft und geringe Grundwasserneubildung charakterisiert. Geringe Flussdichten lassen dagegen auf gute Durchlässigkeiten des Untergrundes, geringen Oberflächenabfluss und hohe Infiltration bzw. Grundwasserneubildung schließen. Berechnen lässt sich die Gewässernetzdichte aus der Gesamtlänge der fließenden Gewässer bezogen auf die Fläche des Einzugsgebietes. Als Grundlage für die Ermittlung der mittleren Gewässernetzdichten der 52 Einzugs-

gebiete diente das vektorisierte Gewässernetz der ATKIS-Daten (DLM25), das in Anlehnung an den HAD mittels Kernschätzer-Methode in Rasterdaten umgewandelt wurde.

Bodendaten

Da der Boden als Umsatzraum für die Abflussbildung bei der Aufteilung des Niederschlags in die verschiedenen Bilanzgrößen eine zentrale Rolle spielt, sollten bei den statistischen Zusammenhangsanalysen flächenhaft vorhandene Bodenparameter berücksichtigt werden, die das Retentions- und Versickerungsvermögen der Böden beschreiben. Als Datengrundlage dienten die Digitalen Bodenflächendaten 1:50 000 von Hessen (BFD50).

Für folgende Parameter, die bei der Regressionsanalyse berücksichtigt werden sollen, wurden die Gebietsmittelwerte und Flächenanteile verschiedener Klassen für die 52 Pegelinzugsgebiete aufbereitet:

Nutzbare Feldkapazität: Die nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraums (nFK-DB) ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation verfügbar ist. Die nFK-DB ist eine wichtige Steuergröße für die Verdunstung und den kapillaren Aufstieg. Sie hat einen großen Einfluss auf die Verweildauer des Sickerwassers im Boden und somit auf die Grundwasserneubildung. Die nFK-DB ist sowohl von der Bodenart (Substrat) als auch von der Bodenbedeckung (Vegetation) abhängig. Zusätzlich wurde die nutzbare Feldkapazität bezogen auf 1 m Tiefe (nFK-100) aufbereitet, da hierdurch unterschiedliche Standorte besser vergleichbar sind.

Durchlässigkeit der Bodeneinheiten (kf-Werte der ungesättigten Zone): Da die Infiltration und Perkolation entscheidend von der Durchlässigkeit des Bodens abhängen, werden auch die kf-Werte der Böden für die Einzugsgebiete aggregiert und bei der statistischen Zusammenhangsanalyse berücksichtigt.

Da die kf-Werte als Horizontdaten und nicht als standortbeschreibende Daten vorlagen, wurde für jede nutzungsspezifische Bodeneinheit der kf-Wert des jeweils undurchlässigsten Horizontes aus der Bodendatenbank selektiert. Bei dieser pragmatischen Methode wird davon ausgegangen, dass nicht der mittlere kf-Wert aller Horizonte, sondern der des un-

durchlässigsten Horizontes (Flaschenhalprinzip) die Durchlässigkeit des Standortes am ehesten beschreibt.

Stauwassereinfluss bzw. Stauässestufen (S0–S6): Die Stauässestufen geben die Einstufung der Intensität der Vernässung eines Standortes durch Stauwasser wieder. Bei der Stauässe handelt es sich um einen integralen Bodenparameter. Das Ausmaß des Stauwassereinflusses wird bestimmt durch die Höhe und Verteilung der Niederschläge, das Relief, die Tiefenlage, Mächtigkeit, Durchlässigkeit und Durchwurzelbarkeit der Stauwasserohle sowie der Luft- bzw. Wasserspeicherkapazität des sogenannten Stauwasserleiters. Der Grad der Vernässung eines Standortes ist also als summarischer Ausdruck vieler Einzelfaktoren zu verstehen.

Grundnässestufen (G0 bis G6): Die Grundnässestufen beschreiben die Intensität des Grundwassereinflusses in Abhängigkeit von der Tiefenlage der Obergrenze des Gr-Horizontes. Dieser Bodenparameter wird anstelle von Grundwasserflurabständen, die für die Gesamtfläche Hessens nicht vorhanden sind, verwendet. Eine flächenhafte Darstellung der Grundwasserflurabstände liegt nur für die Porengrundwasserleiter des südhessischen Bereichs vor. Der Grundwasserflurabstand kann regional einen maßgeblichen Einfluss auf die Abflussbildung haben. In Gebieten mit niedrigen Flurabständen findet verstärkt Direktabfluss (Sättigungsflächenabfluss) statt, wodurch die Grundwasserneubildung reduziert wird.

Der Grundwasserflurabstand ist eine entscheidende Steuergröße für den **kapillaren Aufstieg**, der die Höhe des Verdunstungsprozesses beeinflusst. Für die Berechnung des kapillaren Aufstiegs mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell wurde ursprünglich ein stark vereinfachter Ansatz gewählt. Zur Ausweisung der Zonen, in denen kapillarer Aufstieg stattfinden kann, wurde nur zwischen **grundwassernahen** („hydromorphen“) und **grundwasserfernen** (terrestrischen) **Böden** unterschieden. Bisher wurde für die Ausweisung der „hydromorphen“ Böden die Grundwasserbeeinflussungsstufen entsprechend der Methode 18 „Standorttypisierung für die Biotopentwicklung“ der Methodenbank FIS Boden/Bodenschutz des HLUg verwendet. Durch Berechnung des voll wirksamen kapillaren Aufstiegs für alle hydromorphen Böden wird der Prozess des kapillaren

Aufstiegs allerdings deutlich überschätzt. Auch die flächenhafte Verbreitung grundwasserbeeinflusster Böden fällt größer aus als die Regionen, in denen kapillarer Aufstieg eine Rolle spielen könnte. Dies resultiert schließlich in zu hohen Verdunstungswerten und zu geringen Modellergebnissen für den Gesamtabfluss. Deshalb erfolgt nun im BWHM die Berechnung des kapillaren Aufstiegs unter Verwendung der Grundnässestufen, wodurch sich der kapillare Aufstieg differenzierter ermitteln lässt. Hierzu wurden zunächst die für das Hessische Ried flächendifferenziert vorliegenden Grundwasserflurabstände, die auf realen Grundwasserspiegelmessungen basieren, herangezogen, um die Bereiche mit kapillarem Aufstieg zu identifizieren. Diese Regionen wurden dann mit der räumlichen Verteilung der Grundnässestufen verglichen. Auf diese Weise konnte festgestellt werden, dass sich grundwasserbeeinflusste Standorte mit potenziellem kapillarem Aufstieg für die Gesamtfläche Hessens durch die Grundnässestufen G4 bis G6 am besten abgrenzen lassen.

Hydrogeologische Parameter

Auf die Notwendigkeit, hydraulisch-lithologische Aquifereigenschaften bei der Abflussseparation zu berücksichtigen, wurde bereits in den Abschnitten 1 und 2 hingewiesen. Die Durchlässigkeit und die Speichereigenschaften der grundwasserführenden

Gesteine können maßgeblichen Einfluss auf die Grundwasserneubildung haben und bestimmen das Auslaufverhalten des Aquifers. Die Aquifereigenschaften haben eine besondere wasserwirtschaftliche Bedeutung, da sie Hinweise auf die Grundwassererergiebigkeit geben. Der Zusammenhang zwischen dem BFI und den Aquifereigenschaften ist in Abschnitt 3 beschrieben.

Als Datengrundlage für die hydrogeologischen Parameter diente die Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland (HÜK 200). Die Karte „Oberer Grundwasserleiter“ beinhaltet die wichtigsten hydrogeologischen Attribute (HANNAPPEL et al. 2003). Für die Regressionsanalyse wurden die Themen „bindige Deckschicht“, „Durchlässigkeit“, „Verfestigung“ und „Art des Hohlraums“ für die jeweiligen Pegelinzugsgebiete ausgewertet.

Nach Abschluss der Datenaufbereitung stehen insgesamt 102 gebietsbeschreibende Einzelparameter zur Verfügung, die bei der anschließenden Zusammenhangsanalyse berücksichtigt werden können. Das Gesamtdatenkollektiv, bestehend aus den einzugsgebietsbezogenen Abflusswerten MQ und MoMNO_p, den ermittelten BFI-Werten (Zielgröße) und den 102 Prädiktorvariablen, wird in einer Parameterdatenbank verwaltet (Abb. 10).

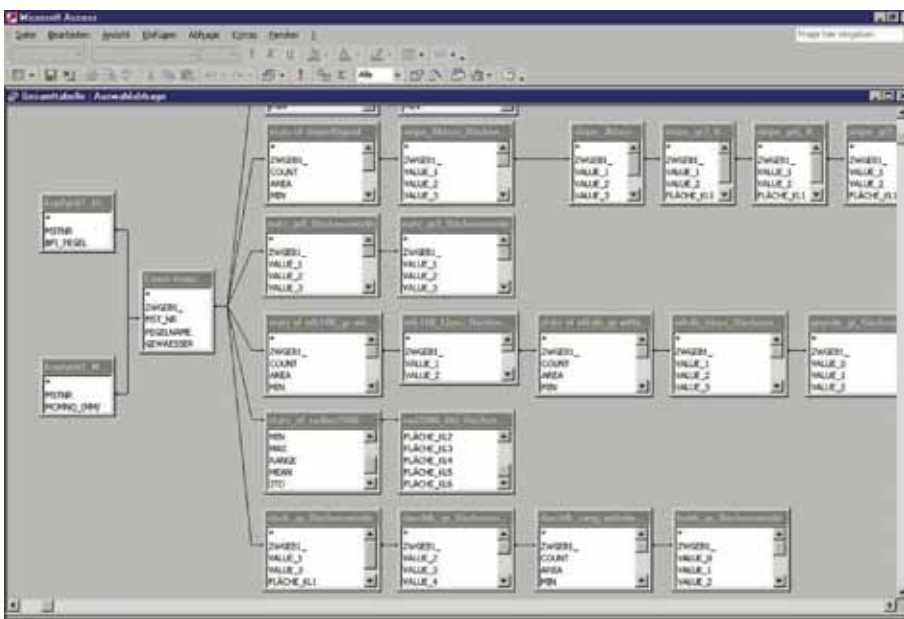


Abb. 10: Parameterdatenbank.

5 Modellbildung

Mit dem vorliegenden Datenkollektiv kann nun der statistische Zusammenhang zwischen den auf Abflussmessungen beruhenden BFI-Werten (Zielgröße) und signifikanten Einflussgrößen (Prädiktorvariablen) mittels schrittweiser linearer Regression ermittelt werden (Abb. 11).

Die Regressionsanalysen werden iterativ mit verschiedenen Parameterkombinationen durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Prädiktoren des jeweils verwendeten Datenkollektivs untereinander statistisch unabhängig sind. Es darf also keine Multikollinearität unter den Prädiktorvariablen vorhanden sein. Für die Untersuchung der Zusammenhänge

zwischen den BFI-Werten und den in Frage kommenden Gebietsparametern (Prädiktoren) und zur Prüfung auf Multikollinearität ist es hilfreich, eine kombinierte Korrelations- und Streudiagramm-Matrix zu erstellen, wie sie in Abb. 12 dargestellt ist.

Bei der schrittweisen multiplen Regressionsanalyse erfolgt die Auswahl signifikanter Prädiktorvariablen durch ein automatisiertes, schrittweises Verfahren. Bei jedem Schritt wird jeweils die Prädiktorvariable mit der höchsten Signifikanz in das Modell aufgenommen. Nach jeder Neuaufnahme werden alle bereits aufgenommenen Variablen neu überprüft. Es kann also vorkommen, dass bereits aufgenommene

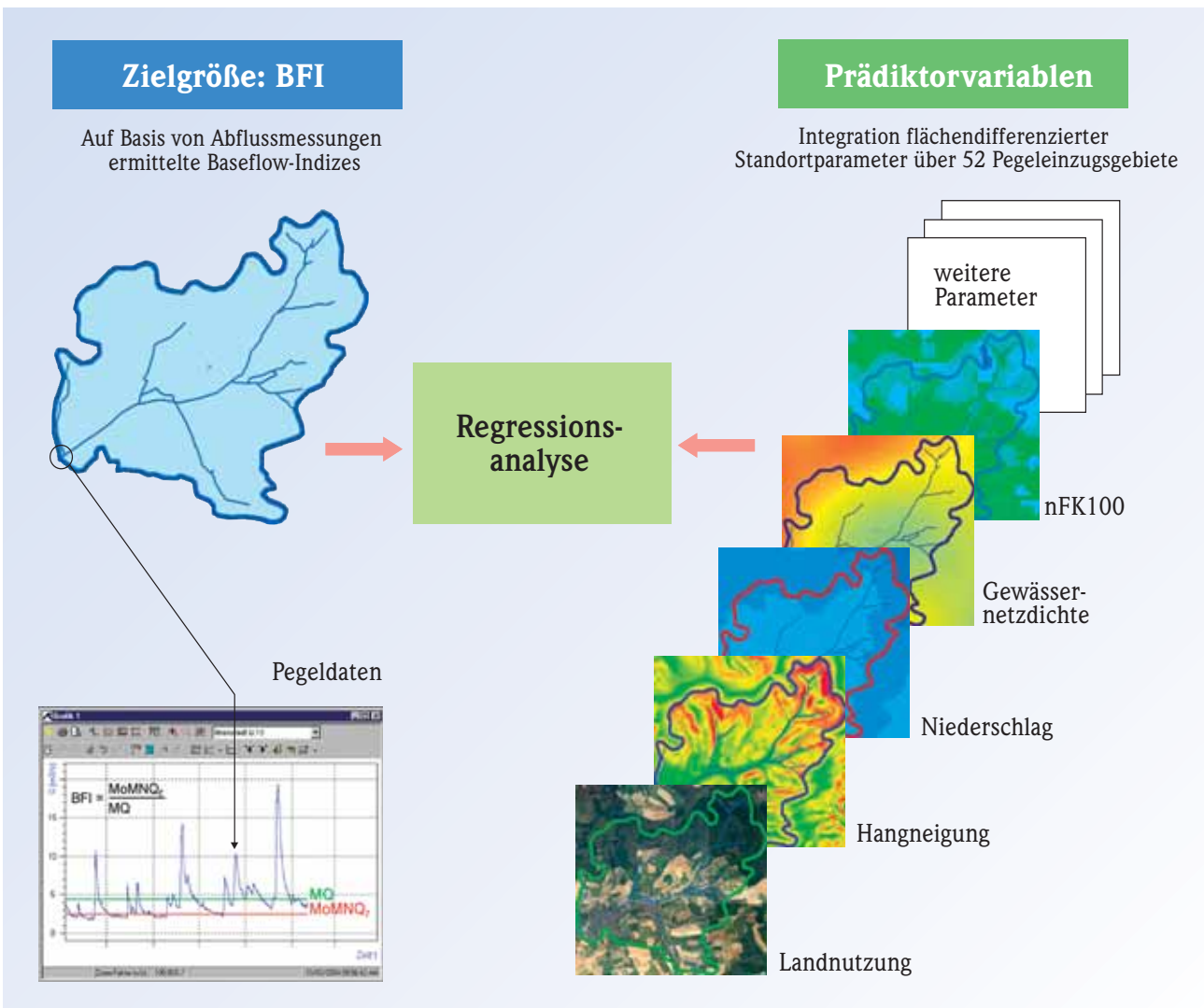


Abb.11: Verfahrensgang zur regressionsanalytischen Modellbildung.

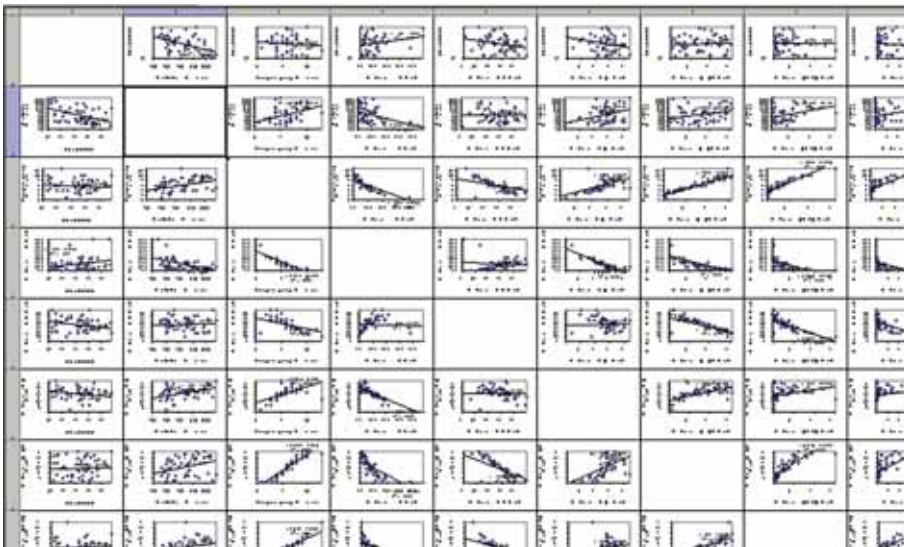


Abb. 12: Ausschnitt aus der Korrelations- und Streudiagramm-Matrix aller Parameter.

Variablen durch den Einfluss neu hinzugefügter Variablen wieder aus dem Modell entfernt werden. Das Verfahren wird solange wiederholt, bis keine Variablen mehr aufgenommen oder entfernt werden können, oder bis die maximale Anzahl von Variablen erreicht ist. Am Ende des Verfahrens erhält man eine Regressionsgleichung, durch die sich der BFI auf Grundlage der ausgewählten Parameter flächendifferenziert berechnen lässt. Zuvor muss allerdings das Regressionsmodell auf seine Eignung überprüft werden.

Eine wichtige Maßzahl zur Beurteilung der Güte des Regressionsansatzes ist das Bestimmtheitsmaß R^2 . Das Bestimmtheitsmaß liegt zwischen 0 und 1. Je kleiner (größer) R^2 ist, desto kleiner (größer) ist die Erklärungskraft des Modells. Allerdings stellt ein hohes R^2 nicht zwangsweise ein gutes Modell dar. Erschwerend kommt hinzu, dass es meist eine Vielzahl statistisch gleichwertiger Modelle gibt, die auf sehr unterschiedlichen Parameterkombinationen beruhen können. Da die Auswahl der Prädiktoren ausschließlich nach Signifikanz- und Kollinearitätskriterien erfolgt, ist eine fachlich-inhaltliche Überprüfung zwingend erforderlich.

Zum Zeitpunkt, als dieser Beitrag geschrieben wurde, waren die Modellrechnungen noch nicht vollständig abgeschlossen, so dass noch keine endgültige Regressionsgleichung angegeben werden kann. Dennoch können hier bereits generelle Aussagen über die Signifikanz der einzelnen Parameter gemacht werden:

- Bei den meisten statistisch signifikanten Modellen haben die Parameter „Durchlässigkeit der Böden“ und „Niederschlag“ bzw. „Verhältnis Sommer- zu Winterniederschlag“ den höchsten Erklärungsanteil in den Modellen.
- Als einziger Parameter der Landnutzung erweist sich die der „Waldnutzung“ in einer Vielzahl von Modellen als signifikant.
- Weitere signifikante Parameter sind „nFK100“, „Durchlässigkeit des oberen Grundwasserleiters“ und „Gewässernetzdichte“.
- Nur mäßig signifikant zeigen sich die Bodenparameter „Stau- und Grundnässe“, die nur bei bestimmten Parameterkombinationen eine Rolle spielen.
- Die Reliefparameter „Gebietshöhe“ und „Hangneigung“ sowie die hydrogeologischen Parameter „Verfestigung“ und „Porenraum“ erweisen sich bisher als nicht signifikant.

6 Regionalisierung und Validierung

Durch die ermittelte Regressionsgleichung lässt sich nun der BFI für die Gesamtfläche Hessens berechnen. Die ermittelte Schätzfunktion kann theoretisch auf beliebige Flächeneinheiten angewendet werden. Bei der flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg wurde das ermittelte Regressionsmodell auf die Basisflächen des Flächenverzeichnisses übertragen (ARMBRUSTER 2002). Im Einzugsgebiet der Elbe wurden Baseflow-Indizes bezogen auf hydrologisch homogene Teilflächen, sogenannte Hydrotope, regionalisiert (HABERLANDT et al. 2001). Alternativ kann das Regressionsmodell auch auf ein regelmäßiges Raster angewendet werden, wie es im Hydrologischen Atlas von Deutschland (NEUMANN & WYCSIK 2001) praktiziert wurde.

Bei der Regionalisierung des BFI sollte das Regressionsmodell auf möglichst kleine Flächeneinheiten umgesetzt werden. Im Rahmen dieses Projektes soll das Regressionsmodell auf das 100 m Raster des Bodenwasserhaushaltsmodells übertragen werden, indem die Regressionsgleichung auf die Rasterdatensätze der selektierten Gebietsparameter angewendet wird.

Auch wenn der BFI skalunenabhängig ist, können bei der Übertragung der Regressionsgleichung auf kleine Flächen extreme Bedingungen für die Abflussbildung vorherrschen, die außerhalb des Wertebereichs des Regressionsmodells liegen. In Abb. 13 sind die Überschreitungen des gültigen Wertebereichs des BFI ($0 < \text{BFI} < 1$) als Ergebnis der flächenhaften Anwendung eines statistisch geeigneten Regressionsmodells graphisch dargestellt. Im aufgeführten Beispiel liegen über 98 % aller Werte innerhalb des zulässigen Wertebereichs (grün dargestellt). Zu niedrige BFI-Werte (< 0) sind blau, zu hohe (> 1) sind rot dargestellt. Bei dieser Darstellungsart erfasst man nicht nur das Ausmaß und den Raumbezug der Überschreitungen des gültigen Wertebereichs sehr schnell, sondern man kann direkt Ursachenforschung betreiben und klären, auf welche Parametereinflüsse die Überschreitungen zurückzuführen sind.

Auch die Häufigkeitsverteilung des regionalisierten BFI in Form eines Histogramms dient als Plausibilitätstest und gibt Aufschluss über die Eignung des

Regressionsmodells. Die bimodale Verteilung des BFI in Abb. 14 spiegelt das sehr unterschiedliche Abflussverhalten zwischen Fest- und Lockergesteinsbereichen wider.

Abb. 15 zeigt den räumlich differenzierten BFI als Ergebnis der regressionsanalytisch basierten Regionalisierung unter Verwendung eines statistisch signifikanten ($R^2 = 0.8$) Testmodells. Die flächendifferenzierte Darstellung des BFI ermöglicht die fachlich-inhaltliche Überprüfung des Regressionsmodells, wofür hydro(geo)logischer Sachverstand erforderlich ist. Diese Überprüfung sollte das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Eignung eines Regressionsmodells darstellen.

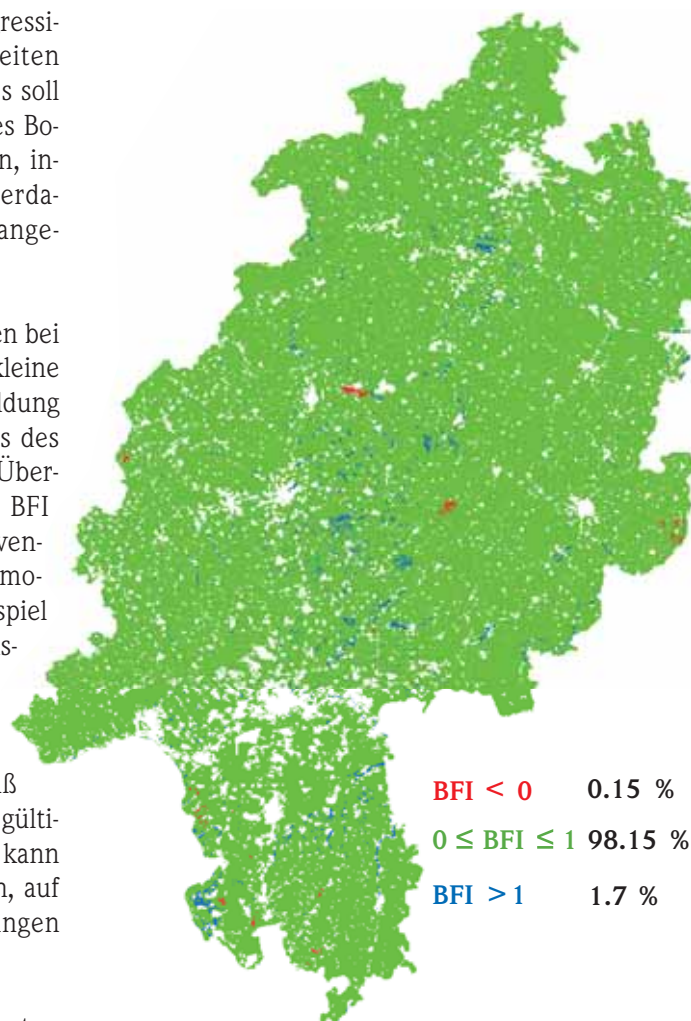


Abb. 13: Überschreitung des Wertebereichs des regionalisierten BFI.

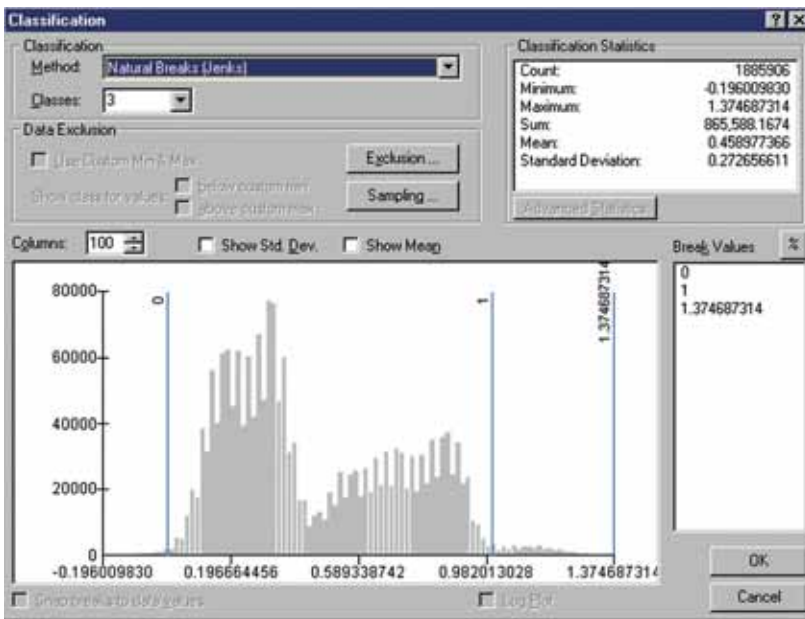
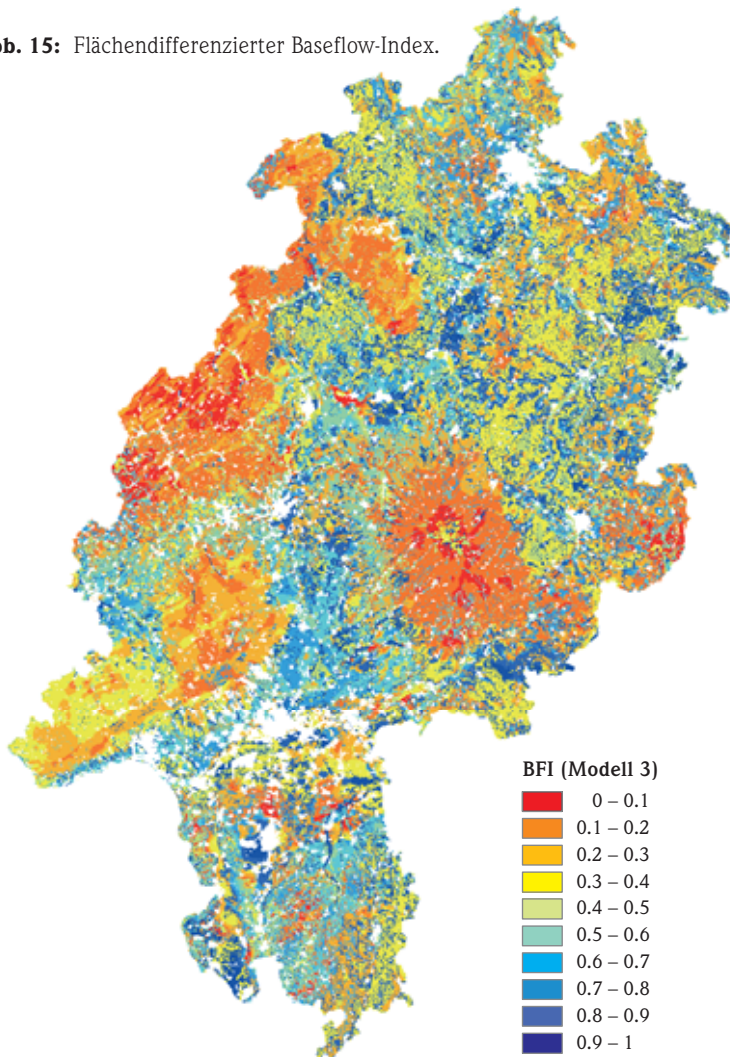


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung des regionalisierten BFI.

Abb. 15: Flächendifferenzierter Baseflow-Index.



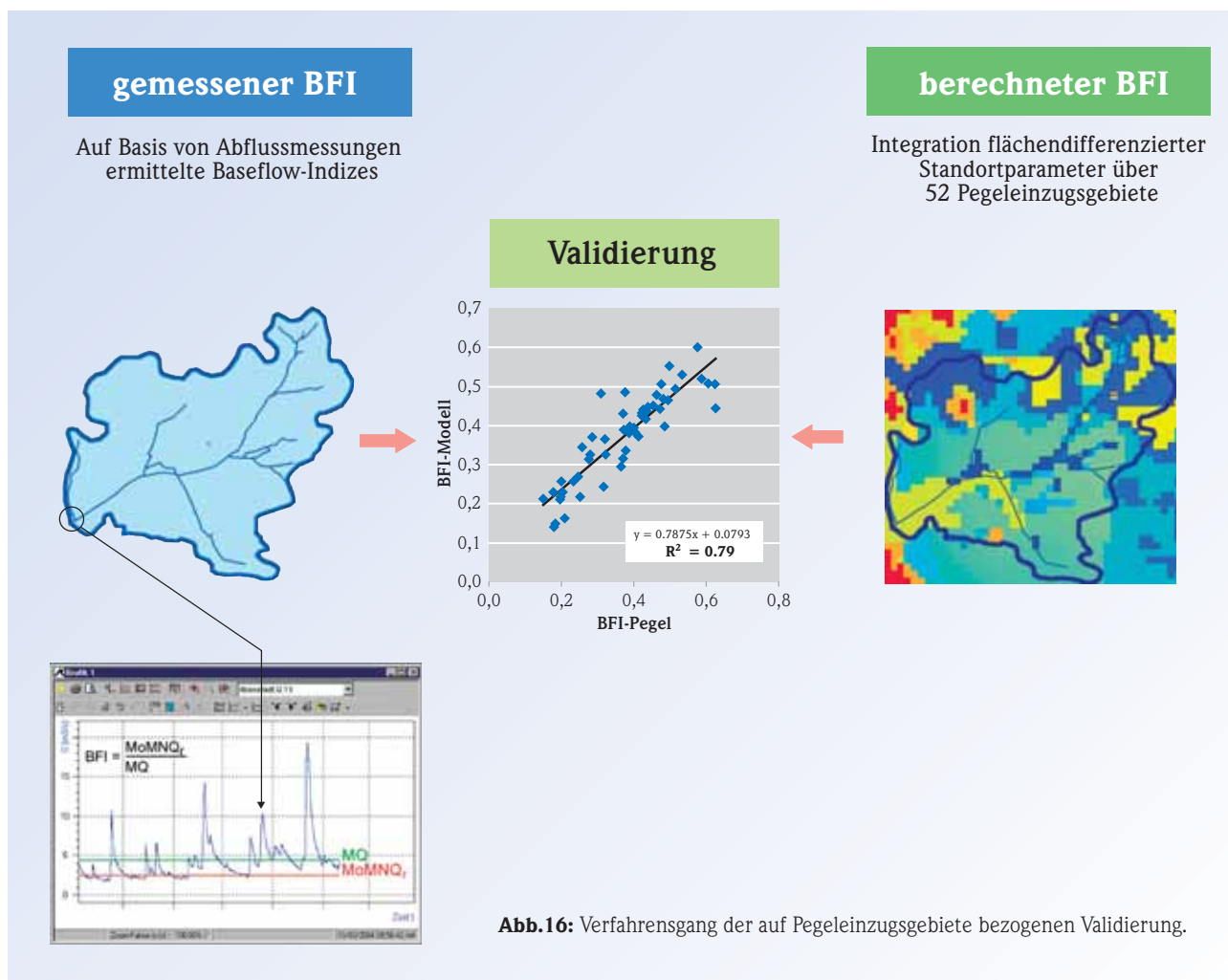
Zur Validierung der Modellergebnisse und zur weiteren Beurteilung der Güte des Modells werden die vom Regressionsmodell berechneten flächendifferenzierten BFI-Werte einzugsgebietsbezogen integriert und mit den auf Basis von Abflussmessungen ermittelten BFI-Werten verglichen. In Abb. 16 ist der Verfahrensgang der einzugsgebietsbezogenen Validierung dargestellt.

Das Ergebnis der Validierung des verwendeten Testmodells ist in Form eines xy-Plots in Abb. 16 dargestellt. Ein Bestimmtheitsmaß (R^2) in der Höhe von 0.79, wie in dem xy-Plot zu sehen ist, kann im Vergleich zu den Regressionsansätzen im HAD ($R^2 = 0.71$) und in anderen Bundesländern bereits als sehr zufriedenstellend angesehen werden.

7 Aussichten

Nach dem Abschluss der Regressionsanalysen wird das am besten geeignete Modell mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell gekoppelt (s. Abschnitt 3). Durch Multiplikation des flächendifferenzierten BFI mit dem Gesamtabfluss des Bodenwasserhaushaltsmodells (BWHM) werden abschließend die Grundwasserneubildung und der Direktabfluss bestimmt.

Das fertige Gesamtmodell (BWHM + Regressionsmodell) soll in Zukunft auch für Vorhersagezwecke eingesetzt werden. Insbesondere sollen mit dem Modell die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Wasserhaushaltsgrößen und deren Wechselwirkung mit der Umwelt prognostiziert werden. Auf einige in Hessen zu erwartende Auswirkungen, die infolge von Klimaver-



änderungen eintreten können, wird nachstehend näher eingegangen.

Klimaschwankungen beeinflussen in extremer Weise das gesamte Leben auf der Erde. Veränderungen im Klima hat es schon immer gegeben. Während in der Vergangenheit die Variationen des Klimageschehens auf natürliche Ursachen zurückzuführen waren, wird heute anthropogenen Einflüssen auf das Klimageschehen eine besondere Bedeutung geschenkt.

Es gibt immer mehr Wissenschaftler, die davon ausgehen, dass durch allgegenwärtige Treibhausgasemissionen eine Erhöhung der globalen Temperatur stattgefunden hat bzw. weiterhin stattfindet. Da eine enge Kopplung von Klima und Wasserkreislauf besteht, werden sich Klimaveränderungen immer auch

auf alle Komponenten des Wasserkreislaufes auswirken. Diese Schwankungen können jedoch räumlich und zeitlich starke Variationen aufweisen. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des Projektes INKLIM2012 eine Studie in Auftrag gegeben, die aus den Ergebnissen von globalen Klimamodellen die entsprechenden Klimadaten für Hessen in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung generiert.

Als Ausgangsbasis wurde die Zeitspanne von Jahr 1981 bis 2000 gewählt. In den Modellläufen, die den Zeitraum von 2000 bis 2050 abdecken, erhält man **für Hessen eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur zwischen +1,2 und 1,8 °C**, wobei die Wintermonate besonders hohe Temperaturzunahmen aufweisen. Für den **Niederschlag wird ein leichter Anstieg des Jahresniederschlags berechnet**.

Hinsichtlich der Niederschlagsverteilung wird eine deutliche Verlagerung der Niederschläge in die Wintermonate (Dezember, Januar und Februar) erwartet, während für die Sommermonate mit einem Rückgang der Niederschlagssummen zu rechnen ist (BRAHMER 2005). Gleichfalls wird durch das Klimamodell eine markante Abnahme von Eis- und Frosttagen sowie eine merkliche Zunahme von Sommertagen prognostiziert. Diese prognostizierten Veränderungen des Wasserhaushaltes werden mit hoher Wahrscheinlichkeit deutliche Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung von Hessen haben. Mit der in diesem Beitrag beschriebenen Modellkopplung (BWHM + Regressionsmodell) und unter Verwendung der vom Klimamodell generierten Klimadaten ist es möglich, diese Veränderungen der Grundwasserneubildung auf regionaler Ebene darzustellen und auszuwerten. Dies ist von großer Bedeutung, da die Grundwasserneubildung das Grundwasser in quantitativer und qualitativer Hinsicht entscheidend beeinflusst und somit auch erhebliche Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft hat.

Grundwasserstände

Die prognostizierte Zunahme der Winterniederschläge hat insbesondere in Festgesteinsgebieten einen schnellen und starken Anstieg der Grundwasserstände zur Folge. Das gilt aber auch für das an Sande und Kiese gebundene Grundwasser im Hessischen Ried, wenn der Grundwasserflurabstand bereits jetzt schon gering ist. Dies könnte zu einer Ausweitung der bereits bestehenden Vernässungsflächen führen.

Wasserversorgungsstruktur

Für die dezentrale Wasserversorgung von Gemeinden könnte der vorausgesagte Rückgang der Sommerniederschläge bzw. die Häufung von Starkregenereignissen negative Auswirkungen haben. Insbesondere Quellen, die zur Trinkwasserversorgung herangezogen werden, könnten während der Sommermonate in ihrer Schüttung stark nachlassen, so dass die Trinkwassergewinnung erheblich beeinträchtigt wäre. Weiterhin würde die Nutzung von

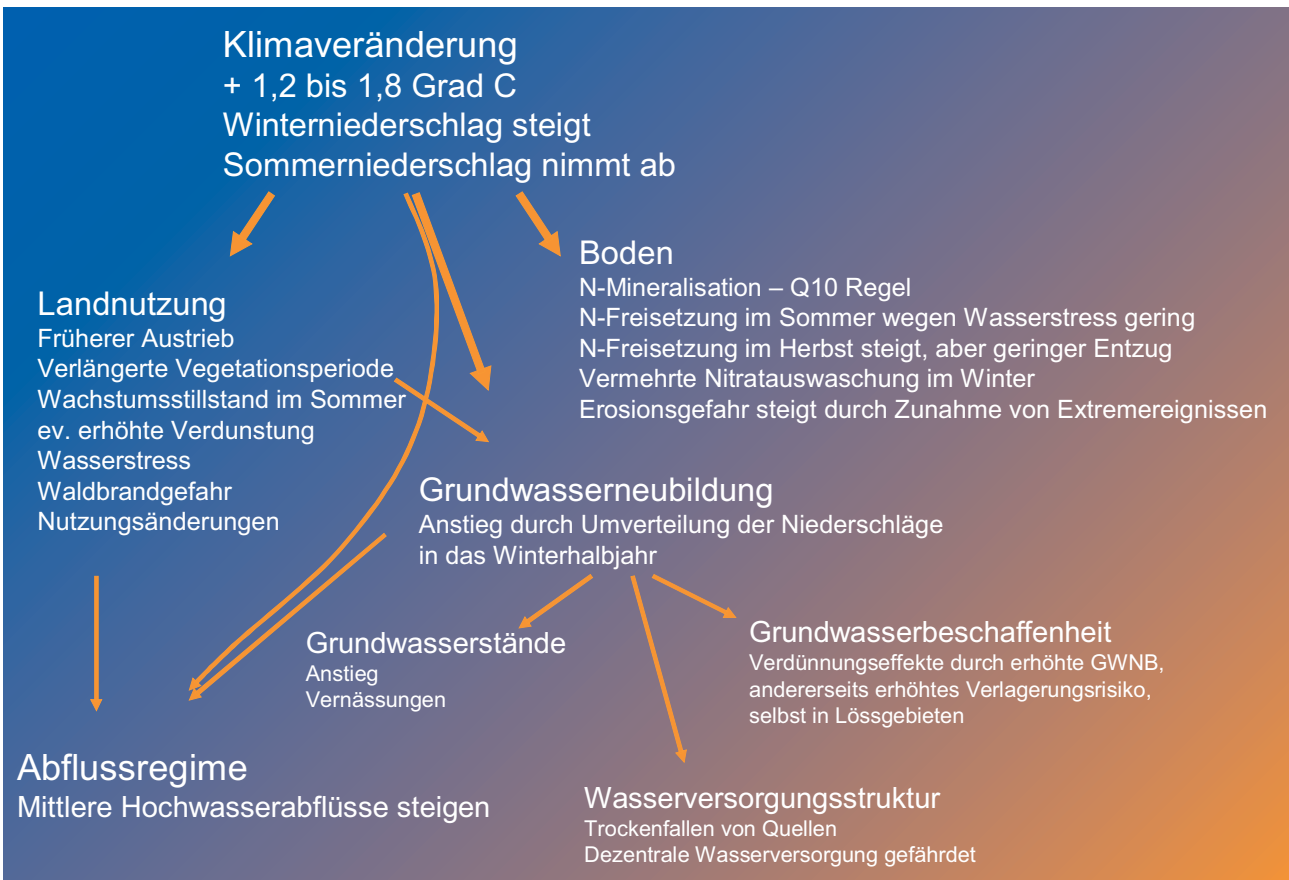


Abb.17: Auswirkungen des Klimawandels auf Landnutzung, Boden und Wasserhaushaltsgrößen.

Quellwässern zur Trinkwassergewinnung durch Verunreinigungen infolge von Starkregenereignissen häufiger gefährdet werden.

Grundwasserbeschaffenheit

Flächenhaft-diffuse Schadstoffeinträge in das Grundwasser werden heute als ein größeres Problem angesehen als von Punktquellen (z. B. Altlasten) ausgehende Grundwasserbelastungen. In diesem Zusammenhang muss auch das Vorkommen von hohen Nitratkonzentrationen im Grundwasser gesehen werden, das im Wesentlichen aus der ackerbaulichen Flächennutzung resultiert (N-Düngung). Sandböden mit einer geringen Wasserspeicherkapazität werden stärker und schneller ausgewaschen als Lehm-, Löss- oder Tonböden, die eine höhere Wasserspeicherkapazität aufweisen. Daneben wird der Nitratreintrag vor allem durch die Höhe der Grundwasserneubildung, das landwirtschaftliche Management (z. B. Höhe und Zeitpunkt der Stickstoffdüngung, Bedeckungsdauer bzw. N-Entzug des Pflanzenbestandes, Zwischenfruchtanbau) und das

natürliche Stickstoffnachlieferungsvermögen (Menge an abbaubarer organischer Substanz) bestimmt.

Es kann vermutet werden, dass zukünftig sogar Böden mit hoher Wasserspeicherkapazität (z. B. Lössböden), die ansonsten das Grundwasser vor negativen Einflüssen relativ gut schützen, bei rascherem Wasseraustausch infolge erhöhter Grundwasserneubildung diese Schutzfunktion nicht mehr voll gewährleisten können.

Da die Grundwasserbeschaffenheit auch stark von der Art der Landnutzung abhängt, sind bei klimatisch bedingter Veränderung der Flächennutzung – abgesehen von Intensivlandwirtschaft – ebenfalls Auswirkungen auf den qualitativen Status des Grundwassers zu erwarten.

In Abb. 18 werden die Wechselbeziehungen, die sich zwischen den Kompartimenten Klima, Landnutzung, Boden und Wasserhaushaltsgrößen ergeben, nochmals im Zusammenhang dargestellt.

Literatur

- ARMBRUSTER, V.: Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg.- Freiburger Schriften zur Hydrologie **17**: 141 S.; Freiburg/Brsg. 2002.
- BECKER, A., BEHRENDT, H., HABERLANDT, U., KLÖCKING, B., KKYSSANOVA, V. & LAHMER W.: Auswirkungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes.- Forschungsbericht, PIK Potsdam, 65 S.; Potsdam 2002.
- BOGENA, H., KUNKEL, R., SCHÖBEL, T., SCHREY, H.P. & WENDLAND, F.: Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen.- Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Umwelt/Environment **37**: 148 S.; Jülich 2003.
- BRAHMER, G.: Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern.- Jahresbericht 2004 des Hess. Landesamtes für Umwelt und Geologie, 31–42; Wiesbaden 2005.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU (Hrsg.): Hydrologischer Atlas von Deutschland. - 3. Lieferung, Kartentafel 5.5 „Mittlere jährliche Grundwasserneubildung“, Berlin 2003.
- DOMMERMUTH, H. & TRAMPF, W.: Die Verdunstung in der Bundesrepublik 1951 bis 1980 – Teil 1, 2 und 3.- Deutscher Wetterdienst; Offenbach 1991 (Eigenverlag).
- DÖRHÖFER G. & JOSOPAIT V.: Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate.- Geol. Jb. **C 27**: 45–65; Hannover 1980.
- DÖRHÖFER, G., KUNKEL, R., TETZLAFF, B. & WENDLAND, F.: Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen.- In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – NLFb (Hrsg.): Aufbruch nach Europa, Hydrogeologie vor neuen Aufgaben.- Arbeitshefte Wasser **1**: 109–167; Hannover 2001.
- Grossmann, J.: Umsetzung eines Modells zur flächendifferenzierten Bestimmung der Grundwasserneubildung mit einem Geo-Informationssystem.- Fachliche Berichte HWW **95/1**: 3–15; Hamburg 1995.
- Grossmann, J.: Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung für große Einzugsgebiete.- gfw-Wasser/Abwasser **138**: 296–303; München 1997.

- GROSSMANN, J.: Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für große Einzugsgebiete.- *gfw-Wasser/Abwasser* **139**: 14–23; München 1998.
- GROSSMANN, J.: Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag, Beschreibung eines Verfahrens. Dokumentation der Basisdaten und Parameter.- unveröffentlicht, 33 S.; Hamburg 2001 (Hamburger Wasserwerke GmbH).
- HABERLANDT, U., KLÖCKING, B., KRYSANOVA, V. & BECKER, A.: Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components – a case study in the Elbe River Basin.- *J. Hydrol.* **248**: 35–53; Amsterdam 2001.
- HANNAPPEL, S., FRITSCH, J.-G. & LESSMANN, B.: Die Erstellung der Hydrogeologischen Übersichtskarte (HÜK 200) in Hessen.- *Hessischer Umwelt-Monitor* **03/4**: 3–10; Wiesbaden 2003.
- HERGESELL, M.: GIS-gestützte Modellierung der Grundwasserneubildung in Hessen.- *Jahresbericht 2002 des Hess. Landesamtes für Umwelt und Geologie*: 37–44; Wiesbaden 2003 a.
- HERGESELL, M.: GIS-based modelling of regional groundwater recharge in Hesse, Germany.- *Hydrologie in Hessen* **1**: 102 S.; Wiesbaden 2003 b.
- KILLE, K.: Das Verfahren MoMNOQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse.– *Z. deutsch. Geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrochem.*, S. 89-95; Hannover 1970.
- KUNKEL, R. & WENDLANDT, F.: Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe – Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen. *Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Umwelt/Environment* **12**: 107 S.; Jülich 1998.
- NEUMANN, J.: Persönliche Mitteilung.- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft; München 2004.
- NEUMANN, J.: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland – Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GW-Neu. – Diss. Uni Halle: 133 S.; Halle/S. 2005.
- NEUMANN, J. & WYCSIK, P.: Verfahrensvergleich als methodische Grundlage zur Ermittlung der Grundwasserneubildung im Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD). In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – NLFb (Hrsg.): *Aufbruch nach Europa, Hydrogeologie vor neuen Aufgaben. Arbeitshefte Wasser* **1**: 43-46; Hannover 2001.
- RICHTER, D.: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **194**: 93 S.; Offenbach 1995.
- WENDLANDT, F., TETZLAFF, B., KUNKEL, R. & DÖRHÖFER, G.: GIS-basierte Grundwasserneubildung von Niedersachsen.– In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – NLFb (Hrsg.): *Aufbruch nach Europa, Hydrogeologie vor neuen Aufgaben. Arbeitshefte Wasser* **1**: 37-42; Hannover 2001.
- WUNDT, W.: Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: GRAHAM, R.: *Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung.- Forsch. Dtsch. Landeskunde* **104**: 47–54; Remagen/Rh. 1958.