

Anlage 14/1: Modellierung der Grundwasserneubildung – Methodik

Die flächenhafte Grundwasserneubildung aus Niederschlag ist das Ergebnis der Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell GWN-BW (Vers. 3.1) unter anschließender Verrechnung des modellierten Gesamtabflusses mit dem flächenhaften Baseflow-Index (BFI) (Gleichung 1).

Grundwasserneubildung = Gesamtabfluss x BFI

Gleichung 1

GWN-BW ist ein modular aufgebautes, deterministisches und flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge (Gudera & Morhard 2015).

Die Modellierung des Bodenwasserhaushalts erfolgt auf Basis von Einzelflächen (nachfolgend Grundflächen genannt), die aus der Verschneidung der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (ÜBK25) mit der ATKIS-Landnutzungsklassifikation (1:25.000) resultieren.

Die Parametrisierung der resultierenden 152.475 Grundflächen in der Schwerpunktregion Hallertau erfolgt über physiographische Daten, die aus dem Digitalen Geländemodell (DGM, 5m Raster), der Landnutzung (ATKIS, 1:25.000), der Bodenkarte (ÜBK25, 1:25.000) sowie der Flurabstandskarte (GWGL-Pläne 1:100.000) abgeleitet wurden (Kopp et al. 2018). Die gleiche Parameterzuordnung wurde auch für die Schwerpunktgebiete (Osterhofener Platte und Regensburg) angewendet. Für die Schwerpunktgebiete wurde zudem eine aktualisierte Bodendatenbank verwendet, die 2021 von Ref. 103 Landesaufnahme Boden, Bodenschutz bereitgestellt wurde.

Die von der Modellierungssoftware GWN-BW verwendeten physiographischen Landnutzeigenschaften basieren auf parametrisierten Einheiten der Corine-Klassifikation. Unter Verwendung von ATKIS-Landnutzungsdaten in der Modellierung der Schwerpunktgebiete müssen diese daher im Vorfeld der Modellierung mit GWN-BW aufbereitet (Beseitigung von strukturbedingten Überlagerungen und Priorisierung von Einheiten) und in die entsprechenden Corine-Einheiten übersetzt werden.

Die Tageswerte meteorologischer Antriebsdaten für das Bodenwasserhaushaltsmodell wurden von der Klimadatenbank des DWD auf Basis der verfügbaren Wetterstationen entnommen. Tageswerte der Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts für den Modellierungszeitraum 1951-2021 wurden simuliert.

Die Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag erfordert eine, der Bodenwasserhaushaltsmodellierung nachgeschaltete, Reduktion des Gesamtabflusses um die Direktabflussanteile. Als Verlustgröße innerhalb der Wasserbilanz beschreibt der BFI den Direktabfluss, der sich insbesondere durch Oberflächenabfluss und Interflow speist. Er wird durch den Quotienten aus Basis- und Gesamtabfluss gebildet und liegt somit zwischen 0 und 1. Ein BFI von 0 bedeutet, dass 0 % des Gesamtabflusses dem Grundwasser zugeführt werden, während einen BFI Wert von 1 bedeutet, dass 100 % des Gesamtabflusses grundwasserneubildungswirksam werden. Der BFI liegt für Bayern in regionalisierter Form für die gesamte Landesfläche vor. Er ist das Ergebnis multipler linearer Regressionsanalysen von einzugsgebietsspezifischen und somit zeitinvarianten Größen im Maßstab 1:500.000. Die berücksichtigten Eingangsgrößen des bayernweiten BFI sind in Tabelle 1 aufgeführt. (LfU 2009)

Tabelle 1: Eingangsdaten der Regressionsanalysen zur Ermittlung des bayernweiten Baseflow-Index (LfU 2009)

Bezeichnung Eingangsdaten	Parameter
Pegeldaten Stationsdaten	Gesamtabfluss Basisabfluss
Bodendaten BÜK1000	Feldkapazität Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums
Landnutzung CORINE	Nutzungsklassen Grünland, Acker, Wald
Digitales Geländemodell DGM25	Hangneigung Höhe Exposition
GwFlurabstand	Grundwasserflurabstand
Gewässernetz DLM1000W	Gewässernetzdichte
REGNIE	Verhältnis Sommer-/Winterniederschlag
Hydrogeologie HÜK200	Hydraulische Leitfähigkeit Transmissivität

Für die aktuelle, räumlich höher aufgelöste Modellierung in den Schwerpunktregionen kann der bayernweit vorhandene BFI aufgrund seiner veralteten Datengrundlage und unzureichenden räumlichen Auflösung nicht ohne Weiteres angewendet werden. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit einer gebietsspezifischen Anpassung des BFI, der die direktabflussrelevanten Gebietscharakteristika ausreichend wiedergibt.

Basierend auf einer statistischen Auswertung des ursprünglichen bayernweiten BFI-Datensatzes anhand der Direktabfluss-bestimmenden Parameter im Schwerpunktgebiet und gestützt durch Literaturangaben, wurden den Grundflächen neue BFI-Werte gemäß ihrer Direktabfluss-bestimmenden Charakteristika zugeschrieben. Im Zuge dessen wurden auch Einflüsse durch Versiegelungsgrad und Drainage einbezogen.

Eine neue Methodik zur Anpassung des hoch aufgelösten BFI wurde bereits für weitere Schwerpunktgebiete entwickelt. Die BFI-Anpassung für das Schwerpunktgebiet Hallertau folgt dieser Methodik, jedoch mit aktualisierten Daten der relevanten Einflussgrößen, wie z.B. Landnutzung, hydrologische Bodentypen, Drainagewirkung und Versiegelungsgrad innerhalb der Region.

Aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage, wurde eine kleinräumige Berücksichtigung der möglichen Wirkung von Entwässerungssysteme in der Region zunächst nicht vorgenommen. Die Drainagewirkung basiert somit auf der bayernweiten Kulisse potentiell drainierter Flächen und Literaturangaben.

Der Anlage 14/2 enthält die Beschreibung der BFI-Anpassungs Methodik und stellt die räumliche Verteilung der relevanten physikalischen Größen (Anlage 14/2.3: Parameterklassen im Schwerpunktgebiet Hallertau) zusammen mit den daraus resultierenden BFI Berechnungen (Anlage 14/2.4: Ergebnisse der BFI-Anpassung) vor.

Anlage 14/2: Anpassung des Baseflow-Index im Schwerpunktgebiet Hallertau

Anlage 14/2.1: Relevanz und Berücksichtigung von Drainagen

Insbesondere der Drainageeinfluss fand in bisherigen Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung in Bayern keine Beachtung. Es ist jedoch anzunehmen, dass Drainagen regional einen erheblichen Einfluss haben können. Laut Agrarzeitung topagrar sei ein Großteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen in Deutschland „nicht zu gebrauchen, wenn unter ihr keine Drainagen vergraben wären. Ohne das kilometerlange unterirdische Netz aus Entwässerungsrohren, die überschüssiges Wasser ableiten, käme es auf den meisten Äckern zu Staunässe“ (www.topagrar.com). Es ist folglich davon auszugehen, dass eine Entwässerung von landwirtschaftlich genutzten Flächen nach wie vor großflächig stattfindet.

Bis zum Ende der 1970er Jahre wurde der Bau von Drainagen in Deutschland finanziell gefördert. Heute besteht jedoch weder eine gesicherte flächendeckende Kenntnis über den Bau von Drainagen nach dieser Zeit, noch über den Zustand und die Funktionalität bestehender Drainagen. Die Verfügbarkeit von Daten hinsichtlich der Existenz, Lage und Auswirkung ist daher sehr unzureichend. Eine prinzipielle Aufzeichnungs- und Meldepflicht von Drainagen besteht nicht und etwaige alte Pläne liegen den bayerischen Behörden nur noch in wenigen Fällen vor.

In anderen Bundesländern (z.B. Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern) wurde aus denselben Gründen auf pauschale Verfahren zurückgegriffen, die einer Abschätzung drainierter Flächen dienen und auf Informationen über Bodenverhältnisse und Flächennutzung basieren. Ein ähnliches Verfahren wurde zur Erarbeitung einer Kulisse potentiell drainierter Flächen vor einigen Jahren auch am LfU umgesetzt (LfU 2014). Dieses basiert auf Bodendaten (ÜBK25) und wird im hiesigen Fall herangezogen. Die Quantifizierung des Drainageeffekts auf den Wasserhaushalt bzw. den BFI erfordert Annahmen, die einer fachlichen Einschätzung unterliegen und zusätzlich durch Literaturangaben abgesichert wurden. Die, basierend auf diesen Annahmen, im Projekt erarbeitete Kulisse wahrscheinlich drainierter Flächen (nur hier wird ein Drainageeffekt berücksichtigt), ist zu 96% Flächenanteil auch von der Karte „Hohe Grundwasserstände in Bayern“ (LfU 2018) erfasst.

Anlage 14/2.2: Methodik der BFI-Anpassung

1. BFI-Anpassung zur Berücksichtigung des Versiegelungsgrad

- Der $BFI_{\text{natürlich}}$ wurde aus Regressionen auf Basis von Pegeldaten abgeleitet. Um versiegelte Gebiete besser abbilden zu können, wurde der $BFI_{\text{natürlich}}$ durch ein Korrekturfaktor, nämlich den Versiegelungsgrad, reduziert (siehe Gleichung 2). Hierfür stehen im Rahmen des Copernicus-Programms ein Rasterdatensatz mit europaweiter Abdeckung und hoher Raumauflösung zu Verfügung (<https://land.copernicus.eu/>, 10m).
- Der neue BFI-Wert wird wie folgt geschätzt:

$$BFI_{\text{versiegelt}} = BFI_{\text{natürlich}} \times (1 - \text{Versiegelungsgrad}) \quad \text{Gleichung 2}$$

Nach Gleichung 2 ergibt sich für vollständig versiegelte Grundflächen ein BFI-Wert von null, während für nicht versiegelte Grundflächen der ursprüngliche BFI-Wert unverändert bleibt.

Die weitere Methodik der BFI-Anpassung basiert auf den maßgebenden Kombinationen der wichtigsten zeitinvarianten Einflussgrößen, die auf den Direktabfluss zu spezifischen BFI-Werten führen. Wenn unplausible Werte auftreten, erfolgt eine weitere Neuzuschreibung der BFI-Werte anhand der durch Literaturangaben bekannten Spezifika der relevanten Parameterkombinationen. Darauf aufbauend gestalteten sich die wesentlichen Arbeitsschritte wie folgt:

2. Auswahl und Klassifizierung der wichtigsten zeitinvarianten Einflussgrößen für den Direktabfluss

- Orientierung der Klassifizierung und Parameter an Meßer (1997)
- Hauptflächennutzungsklassen: Acker, Grünland, Forst und Sonstige. Die Sonstige Klasse fasst alle Siedlungsgebiete und Gewässern zusammen.
- Flurabstandklassen: < 1 m, 1-3 m und > 3 m
- Hangneigungsklassen: < 2 %, 2-4 %, 4-10 % und > 10 %
- Hydrologischer Bodentyp (nach DVWK 113) nach Versickerungsvermögen:

- A bspw. tiefe Sand- und Kiesböden
- B bspw. tiefe bis mäßig tiefe Böden mit feiner bis mäßig grober Textur, mitteltiefe Sandböden, Löss, (schwach) lehmiger Sand
- C bspw. Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauender Schicht, flache Sandböden, sandiger Lehm
- D bspw. Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauerhaft hohem GW-Spiegel

3. Datenaufbereitung und statistische Analyse über die Wertverteilung des alten BFI in den Parameterkombinationen

- dabei gesonderte Betrachtung von Hauptflächennutzung „Sonstige“, mit einer differenzierteren Betrachtung nach Corine-Landnutzung, und der Hinzuziehung des bayernweiten Versiegelungsrasters

4. Übersetzung von Literaturangaben zum Direktabfluss in BFI-Werte

5. Ableitung neuer BFI-Werte und Neuzuschreibung des BFI auf Grundflächenbasis anhand der spezifischen Parameterkombination

- Setzen von Annahmen zu Absolut- und Relativwerten auf Basis von 2. und 3.
- Annahmen werden gestützt durch Angaben der Fachliteratur zum Direktabfluss und zu Drainagewirkung auf den Wasserhaushalt

6. Annahmen die den Einfluss der Flächennutzung, Flurabständen und Bodentyp auf den Direktabfluss/BFI charakterisieren

- Insbesondere bei geringen Flurabständen spielen lokale Senken für die Versickerung und den Direktabfluss eine Rolle (Gramlich et al. 2018 nach Acreman und Holden 2013, Lennartz et al. 2011 und Scott et al. 1998).
- Niedrige Flurabstände führen unter Umständen zu frühzeitiger Sättigung des Bodenspeichers und somit zu Oberflächenabfluss (vgl. Gramlich et al. 2018). Dadurch nimmt der BFI im Allgemeinen mit geringerem Flurabstand ab.
- Es wird angenommen, dass der BFI aufgrund der Häufigkeit lokaler Senken und der Intensität von Bewirtschaftungsmaßnahmen prinzipiell in folgender Reihenfolge steigt:

$$\text{BFI Acker} < \text{BFI Grünland} < \text{BFI Forst}$$
- Der BFI reduziert sich mit abnehmendem Infiltrationsvermögen.
- Besonders C und D-Böden ermöglichen vermehrt Oberflächenabfluss aufgrund unzureichender Infiltration oder/und Interflow infolge stauender Horizonte.
- Drainage wird auch bei Staunässe benötigt (DIN 1185 Blatt 1). Staunäseeinfluss ist unabhängig vom Flurabstand. Entsprechend wird Drainage für C und D-Böden in den ausgewiesenen Bereichen potentieller Drainage nach ÜBK25 (LfU Ref. 65), ungeachtet des Flurabstands, angenommen.
- Drainagen werden im Schwerpunktgebiet Hallertau nur für die Hauptflächennutzung Acker und Grünland, nicht jedoch für Wald/Forst, angenommen.
- Drainage von Acker und Grünland führt besonders bei niedrigen Hangneigungsklassen zu niedrigeren BFI-Werten.
- Die Drainagewirkung liegt auf Ackerflächen höher als bei Grünland, da hier bewirtschaftungsbedingt eine höhere Dichte von Drainagen anzunehmen ist.

7. Zusätzliche BFI-Anpassung um den Effekt von Drainagewirkung von potentiell drainierten Flächen zu berücksichtigen

- Eine zusätzliche Anpassung der BFI-Werte wurde nur durchgeführt, sofern die betroffene Grundfläche in der Kulisse potentiell drainierter Flächen (LfU 2014) enthalten ist.
- Für betroffene Grundflächen wurde zuerst der Anteil der Fläche geschätzt, der von dem potentiell drainierten Material bedeckt wird und damit ein neuer BFI-Wert wie folgt geschätzt:

$$\text{BFI}_{\text{neu}} = \text{BFI} \times (1 - \text{Drainierte Fläche} \cdot \text{RelDr})$$

Gleichung 3

In Gleichung 3 bezieht sich RelDr auf einen Reduktionsfaktor, der, je nach Hauptflächennutzung, auf die drainierte Fläche angewendet wird, um starke Reduktionen des endgültigen BFI-Werts zu vermeiden. RelDr stellt eine relative Reduktion, je nach Landnutzung, der Wirkung der drainierten Fläche dar (vgl. Gramlich et al. 2018 und Muma et al. 2016). Muma et al. (2016) modellierten die Drainagewirkung in einem Einzugsgebiet anhand von vier Boden-Szenarien. In Abhängigkeit von der hydraulischen Leitfähigkeit lag der Direktabfluss mit Drainage um 3/4.5 /12.5 /22% über dem Direktabfluss der undrainierten Simulation. Die Werte wurden zur Orientierung in der mittleren Parameterkategorie Hangneigung 2-4%, Grünland und Acker, Flurabstand 1-3 m verwendet.

Die Werte der Parameter RelDr für das Schwerpunktgebiet Hallertau und Landnutzung Acker und Grünland waren jeweils 25 % und 15 %.

- Drainage wird auch bei Staunässe benötigt (DIN 1185 Blatt 1). Staunäseeinfluss ist unabhängig vom Flurabstand. Entsprechend wird Drainage für C und D-Böden in den ausgewiesenen Bereichen potentieller Drainage nach ÜBK25 (LfU Ref. 65), ungeachtet des Flurabstands, angenommen.

Anlage 14/2.3: Parameterklassen im Schwerpunktgebiet Hallertau

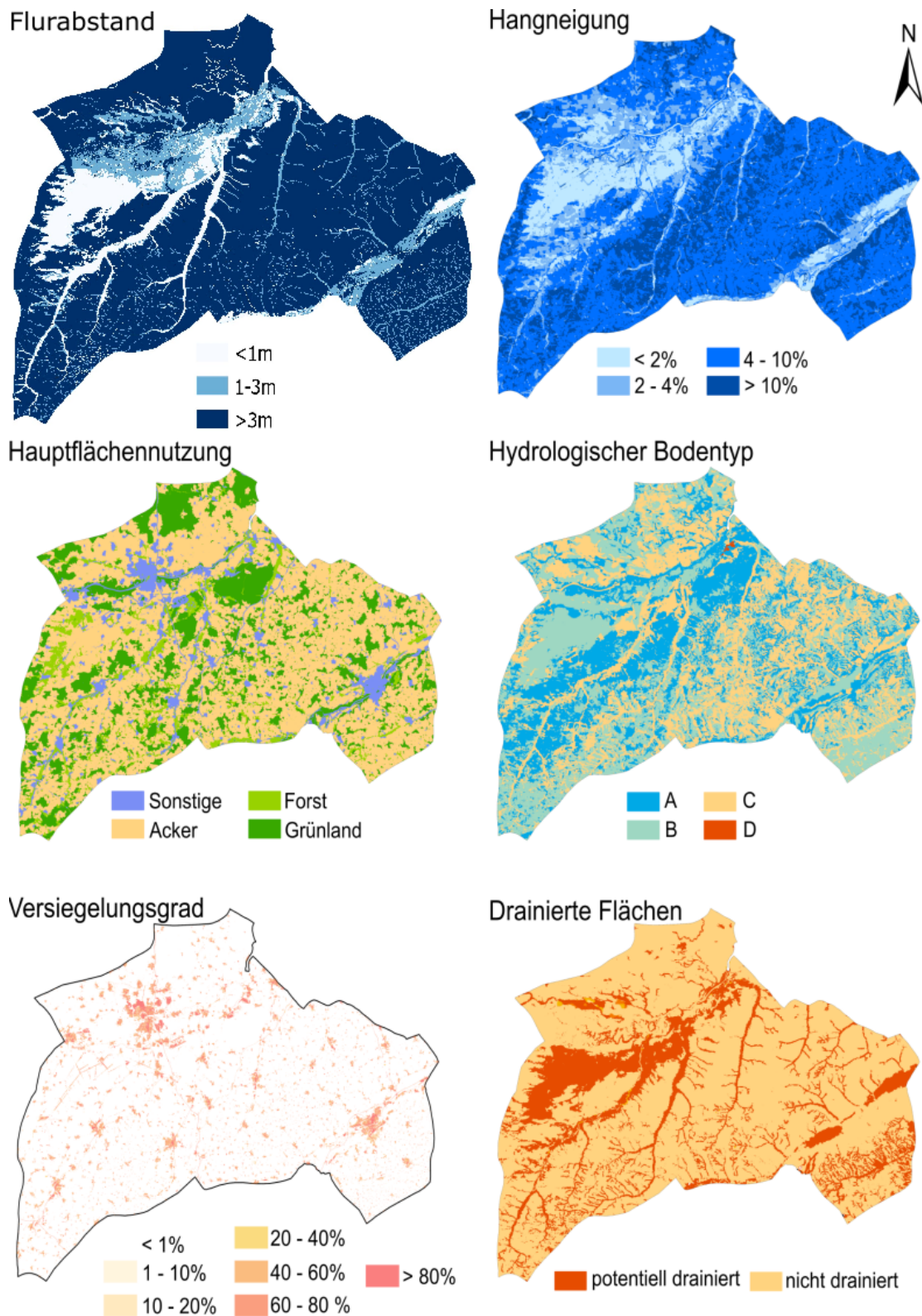


Abbildung 1: Parameterklassen zur statistischen Auswertung und Anpassung des BFI und deren Verteilung im Schwerpunktgebiet Hallertau

Anlage 14/2.4: Ergebnisse der BFI-Anpassung

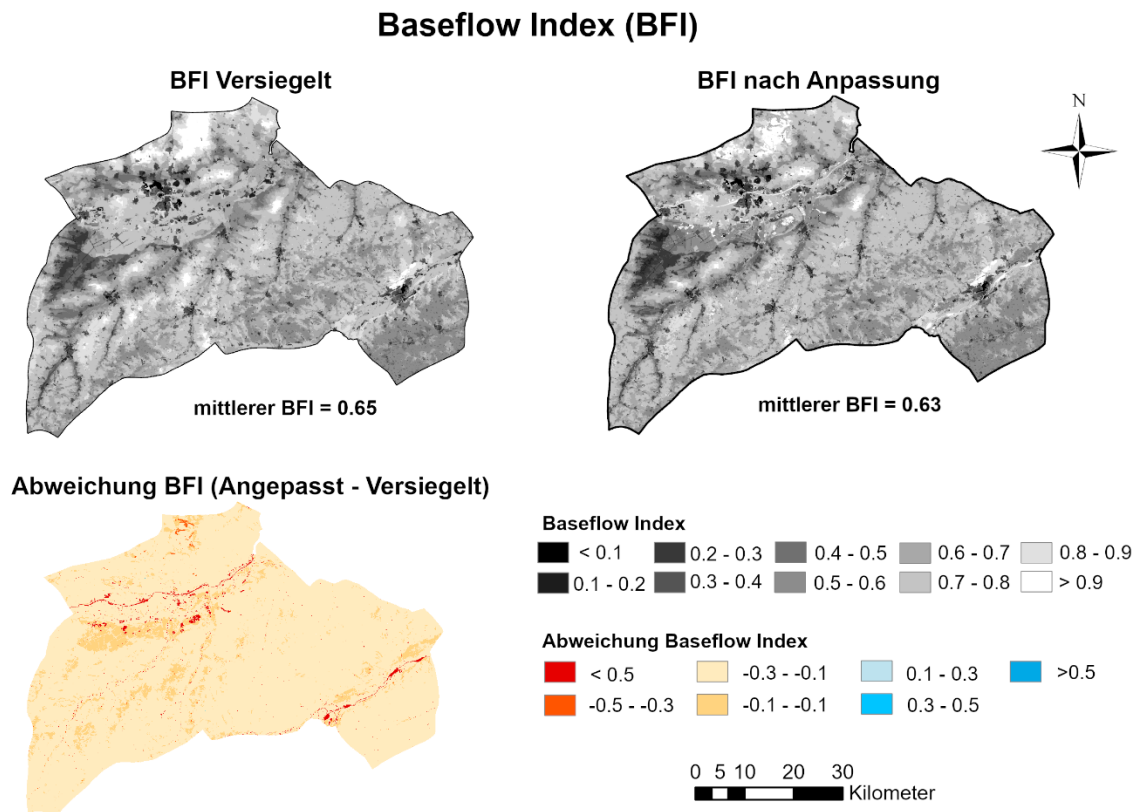


Abbildung 2: Vergleich des BFI vor und nach der Anpassung

Anlage 14/3: Methodik Anpassung Flurabstand

Die kapillaren Aufstiegsraten werden anhand der bodenkundlichen Kartieranleitung und Flurabstandskarte abgeschätzt, wobei der Flurabstand als zeitlich konstanter Mittelwert angegeben wird. Wenn die Wurzeltiefe zu flach ausfällt oder wenn der Flurabstand größer 3 m beträgt, dann erreicht der Grundwasserstand nicht die Wurzeln und somit findet kein kapillarer Aufstieg statt. Als einschichtiges Modell, weist GWN-BW jeder einzelnen Fläche die Bodenart zu, die in der ÜBK25 als „Unterer Bodenhorizont“ gegeben ist.

Deswegen können keine Inhomogenitäten z. B. Kies- oder Schotterlinsen innerhalb der Bodenschicht abgebildet werden. Somit ist es möglich, dass das Modell kapillaren Aufstieg berechnet (falls die Bodeneinheit auf Basis der ÜBK25 als grundwasserbeeinflusster Boden ausgewiesen ist), obwohl in Realität dieser aufgrund der Kies- oder Schotterlinsen unterbrochen wird. Dies hat zur Folge, dass hier die Grundwassererneubildung aus Niederschlag z.T. drastisch verringert wird. Deshalb wird in den quartären Gebieten, in denen Bohrungsdaten vorliegen, der Grundwasserflurabstand angepasst, falls eine kapillarhemmende Schicht, wie z.B. Kies oder Schotter vorliegt.

Anlage 14/3: Potentielle Unsicherheiten in der Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell GWN-BW

Die Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW werden sowohl von den Modellansätzen als auch von der Qualität und räumlichen Auflösung der Eingabedaten beeinflusst.

Wichtige Modellansätze sind die konzeptionelle Beschreibung von Verdunstungs- und Sickerwasserbildungsprozessen, die bei der numerischen Umsetzung zu verschiedenen Modellunsicherheiten führen können. So entstehen Unsicherheiten zum Beispiel durch die Parametrisierung der Penman-Monteith-Gleichung, welche die nichtlinearen Prozesse der

Verdunstung beschreibt. Unsicherheiten resultieren hier v.a. aus der Parametrisierung der Bodeneigenschaften und Eigenschaften der Vegetation und der Verwendung der Modellalgorithmen des Niederschlag-Abfluss-Modells HBV (BENGTTSSON 1997). Innerhalb von GWN-BW beschreibt der HBV-Ansatz die Auffüllung und Entleerung des Bodenspeichers und hängt hauptsächlich von der nutzbaren Feldkapazität des Bodens ab.

Weitere Modellunsicherheiten entstehen dadurch, dass das Modell GWN-BW keine lateralen Abflüsse, d.h. weder Oberflächenabfluss noch Interflow, berücksichtigt. Daher erfordert die Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag eine, der Bodenwasserhaushaltsmodellierung nachgeschaltete, Reduktion des Gesamtabflusses um die Direktabflussanteile durch den Baseflow-Index (BFI). Die regressionsbasierte Ableitung des BFI im Einzugsgebietsmaßstab kann räumliche Unschärfen bei kleinräumiger Anwendung zur Folge haben.

Neben den meteorologischen Eingangsdaten, die vom DWD bereitgestellt werden, erfordert das Modell GWN-BW flächenhafte Informationen hauptsächlich aus drei verschiedenen, räumlich unterschiedlich hoch aufgelösten Quellen: Bodendaten aus der ÜBK25 (1:25.000), Landnutzungsdaten aus dem Amtlichen Topographisch Kartographischen Informationssystem (ATKIS), und Grundwasserstände (Flurabstände) aus der HK100 (1:100.000).

Die benötigten meteorologischen Eingangsdaten sind Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Lufttemperatur. Alle diese meteorologischen Daten werden an Wetterstationen gemessen und regionalisiert, um die untersuchten Regionen abzudecken. Unsicherheiten ergeben sich sowohl aus Fehlern der Messung, als auch aus Artefakten, die durch die Regionalisierung, bzw. die zu Grunde liegende Stationsverteilung verursacht werden. Am stärksten sensitiv sind Niederschlag und Luftfeuchtigkeit. Letztere kann aber sehr viel zuverlässiger gemessen und regionalisiert werden. Daher können insbesondere die Messfehler bzw. Unsicherheiten des Niederschlags erhebliche Auswirkungen auf die Aussagegenauigkeit der Grundwasserneubildung haben. Die Lufttemperatur ist demgegenüber nur mäßig sensitiv und zudem sehr genau messbar und leicht zu regionalisieren. Die Sonnenscheindauer hat vergleichsweise wenig Einfluss auf die Modellergebnisse.

Die Bodendaten aus der ÜBK25 dienen primär zur Übersicht der räumlichen Verteilung der Bodeneinheiten und bieten in der Regel keine ausreichenden Informationen über sehr lokale und kleinräumige Eigenschaften bzw. Strukturen. Bei den Landnutzungsdaten und Flurabständen aus ATKIS und der HK100 kommt neben den maßstabsbedingten Unsicherheiten hinzu, dass es sich hierbei um statische Daten ohne zeitliche Dynamik handelt.

Aufgrund der verschiedenen, oben beschriebenen Unsicherheiten kann nicht ausgeschlossen werden, dass Abweichungen zwischen Modellergebnissen und tatsächlichen Standortbedingungen auftreten. In solchen Fällen sind örtliche Fachexpertise und Kenntnis der lokalen Gegebenheiten besonders wichtig, um die Modellergebnisse zu plausibilisieren.

Im Hinblick auf das tatsächliche Wasserdargebot eines Betrachtungsraums muss außerdem berücksichtigt werden, dass neben der Grundwasserneubildung aus Niederschlag weitere wichtige Bilanzgrößen relevant sein können. In vielen Fällen entspricht die Grundwasserneubildung aus Niederschlag näherungsweise dem Grundwasserdargebot. Insbesondere in ergiebigen Talaquiferen müssen jedoch weitere wichtige Bilanzgrößen, wie z.B. ein möglicher lateraler Zustrom zum Aquifer oder Uferfiltrat, berücksichtigt werden.