

# Auswertung des Niedrigwassermessprogramms 2003 zur Abschätzung des Basisabflusses für die Quantifizierung der Grundwasserneubildung

W4

HANNAH BUDDE, LAURA ECK, ANGELA PREIN

## Einleitung

Zwischen dem 11. August und dem 24. September 2003 begleitete das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ein von den hessischen Regierungspräsidien durchgeführtes, hessenweites Niedrigwassermessprogramm zur Messung von Niedrigwasserabflüssen an Bächen und Flüssen. Die Auswirkungen von Niedrigwasser sind vielfältig. Dazu gehören (HLNUG 2021):

- Einschränkungen im Binnenschiffsverkehr, da bei niedrigen Wasserständen die Beladung der Schiffe reduziert werden muss,
- Gefahr des Fischsterbens wegen hoher Wassertemperaturen und geringem Sauerstoffanteil infolge geringer Wassermengen und langsamer Fließgeschwindigkeiten,
- steigende Schadstoffkonzentrationen im Gewässer wegen fehlendem Verdünnungswasser bei gleichbleibender Einleitung,
- mögliche Einschränkungen bei Wasserentnahmen, die rechtlich an einen Mindestwasserstand gebunden sind, etwa für landwirtschaftliche Bewässerung,
- geringere Stromproduktion durch Wasserkraftwerke, da bei Flusskraftwerken geringere Wassermengen die Turbinen durchfließen, wobei ein Mindestabflussanteil in den Ausleitungsgräben verbleiben muss bzw. bei Wärmekraftwerken weniger Kühlwasser zur Verfügung steht,
- Einschränkungen der Produktion von Betrieben, die auf die Entnahme von Kühl- oder Betriebswasser angewiesen sind.

Niedrigwassermessungen können zur Abschätzung des Basisabflusses und damit näherungsweise der Grundwasserneubildung genutzt werden. Damit können Auswertungen dieser Messungen Hinweise für wasserwirtschaftliche Entscheidungen wie zum Beispiel der möglichen Entnahmemenge aus dem Grundwasser liefern. Der während Perioden mit durchschnittlichem Niederschlag in einem Vorfluter gemessene Abfluss enthält Anteile von Direktabfluss (das heißt regenwassergespeistem Oberflächen- und Zwischenabfluss) sowie von grundwassergespeistem Basisabfluss.

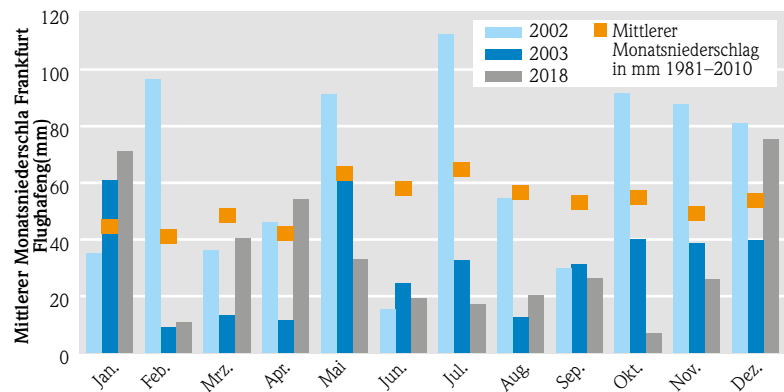
Der Niedrigwasserabfluss bezieht sich hydrologisch gesehen auf den in einem Zeitraum gemessenen niedrigsten Abfluss (NQ). Unter Trockenwetterabfluss wird hydrogeologisch ein Abfluss nach einer längeren Zeitspanne ohne abflusswirksame Niederschläge verstanden. Üblicherweise werden solche Messungen im Spätsommer bzw. Frühherbst durchgeführt. Der Trockenwetterabfluss kann grob näherungsweise als grundwasserbürtiger Abfluss angenommen werden. Niedrigwasserabflüsse können Trockenwasserabflüssen entsprechen.

Mithilfe von Trockenwetterabflussmessungen lassen sich unter günstigen Bedingungen Einzugsgebiete mit unterschiedlichen Grundwasserneubildungsraten voneinander abgrenzen (BECHT et al. 2017).

Der Sommer des Jahres 2003 bot aufgrund außergewöhnlich hoher Temperaturen und langanhaltender Trockenheit eine Gelegenheit für Niedrigwasserabflussmessungen. Relativierend muss angemerkt wer-

den, dass das Vorjahr überdurchschnittlich nass war. Abbildung 1 zeigt den in den Jahren 2002, 2003 und 2018 an der Wetterstation Frankfurt Flughafen gemessenen Niederschlag im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981–2010. Mit Ausnahme von Januar und Mai lag der Niederschlag in sämtlichen Monaten im Jahr 2003 unterhalb des langjährigen Mittels.

Eine weitere Niedrigwasserabflussmessung erfolgte im Jahr 2018, welches ein starkes Niederschlagsdefizit in den Monaten Februar bis Juli aufwies und dem ein trockenes Vorjahr vorausging (LÖNS-HANNA, KREMER & RITTERSHOFER 2019). Im vorliegenden Beitrag sind die Messungen des Jahres 2003 (HLNUG 2006) Gegenstand der Betrachtung.



**Abb. 1:** Mittlerer Monatsniederschlag an der Wetterstation Frankfurt Flughafen in den Jahren 2002, 2003 und 2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981–2010 (Datenquelle: DWD 2021)

In der vorliegenden Arbeit wird der Zusammenhang von geogenen Faktoren auf den Niedrigwasserabfluss bzw. die Abflussspenden der jeweiligen Einzugsgebiete untersucht.

## Methodik

Für die Bearbeitung kam die ArcGIS-Komponente ArcMap 10.7.1 zum Einsatz, um die Positionen der 725 Messstellen innerhalb Hessens zu zeigen und die zugehörigen oberirdischen Einzugsgebiete (EZG) mithilfe der in ArcMap integrierten „Spatial Analyst-Hydrologie“-Werkzeuge abzugrenzen. Den so ermittelten oberirdischen Einzugsgebieten wurden die Attribute der zugehörigen Messstellen inklusive der Niedrigwasserabflussmessungen zugewiesen. Die im Jahr 2003 gemessenen Abflüsse, welche nicht um anthropogene Einflüsse korrigiert sind, wurden sodann in eine auf das zugehörige oberirdische Einzugsgebiet bezogene Abflussspende in  $l/(s \cdot km^2)$  umgerechnet. Negative Abflussspenden werden als Abflussabgaben bezeichnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 graphisch dargestellt.

Im nächsten Schritt wurden diejenigen oberirdischen Einzugsgebiete ermittelt, die über mindestens einen gemessenen Zufluss verfügen. Für diese EZG wurde aus der Differenz der Zu- und Abflüsse in  $l/s$  ermittelt, ob eine positive oder eine negative Abflussveränderung vorliegt. Die ermittelte Differenz wurde auf die Fläche des zugehörigen EZG bezogen und somit die Abflussspende oder Abflussabgabe in  $l/(s \cdot km^2)$

für das Gebiet ermittelt. Abbildung 3 zeigt die Einzugsgebiete, für die sich eine Abflussspende oder -abgabe ergibt.

Der Niedrigwasserabfluss bzw. die Abflussspende oder -abgabe eines Einzugsgebietes wird von anthropogenen Faktoren wie zum Beispiel Grundwasserentnahmen aus Brunnen und Quellen oder durch Kiesabbau sowie den Einleitungen von Kläranlagen beeinflusst. Diese Beeinflussungen können näherungsweise durch die Nutzungsdaten, die zu einem großen Teil bekannt sind, berücksichtigt werden. Der Niedrigwasserabfluss ist aber auch von geogenen Faktoren abhängig, von denen hier drei ausgewählt und untersucht wurden:

- die Größe des oberirdischen Einzugsgebietes (EZG),
- die Anzahl von Störungszonen pro Einzugsgebiet sowie
- die an der Geländeoberfläche anstehende lithologische Einheit.

Die drei ausgewählten Faktoren zeichnen sich durch eine sehr geringe Wechselwirkung zwischen anthro-

pogenen und geogenen Einflüssen aus. Für die Geologie wurde als Grundlage die Geologische Karte von Deutschland (BGR 2016) verwendet, um die Komplexität der statistischen Analyse zu begrenzen.

Um den Einfluss der EZG-Größe sowie der Anzahl von Störungszonen pro EZG auf den Niedrigwasserabfluss zu bestimmen, wurde für diese Größen der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman berechnet.

Weiterhin wurden unter Verwendung des feinaufgelösten digitalen Geländemodells (DGM 1 des HVBG) die Polygone der EZG ermittelt, die sich gemäß der Geologischen Karte von Deutschland (BGR 2016) zu mindestens 70 Prozent innerhalb einer lithologischen Einheit befinden. Für diese EZG konnte davon ausgegangen werden, dass die vorherrschende lithologische Einheit den größten Einfluss auf den gemessenen Niedrigwasserabfluss hatte. Anschließend wurden diejenigen EZG ausgewählt, für die eine Abflusspende oder -abgabe aufgrund der Datenlage bestimmbar war.

Es wurden die Abflusspenden für alle lithologischen Einheiten in Hessen verglichen, in denen mindestens fünf EZG liegen, für die es Niedrigwasserabflussmessungen gibt. Waren weniger als fünf EZG vorhanden, wurde die Datenlage für einen Vergleich als nicht ausreichend angesehen.

Anschließend wurden sämtliche Kopfgebiete, also Einzugsgebiete ohne natürlichen Zufluss, ausgewählt, die zu mindestens 70 Prozent in der gleichen lithologischen Einheit liegen. Für alle lithologischen Einheiten, in denen mindestens fünf EZG liegen, wurden die Niedrigwasserabflüsse statistisch ausgewertet.

Weiterhin wurde die Beeinflussung des Niedrigwasserabflusses bzw. der Abflusspende oder -abgabe eines EZG durch anthropogene Faktoren untersucht. Ziel war es, einen Überblick über die Auswirkungen direkt messbarer anthropogener Aktivitäten auf den Niedrigwasserabfluss zu erhalten.

Da hierzu die Nutzungsdaten umfangreich vorliegen müssen und eine Gesamtauswertung für Hessen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich war, wurde die stark durch anthropogene Aktivitäten geprägte Hanau-Seligenstädter Senke, ein känozoisches

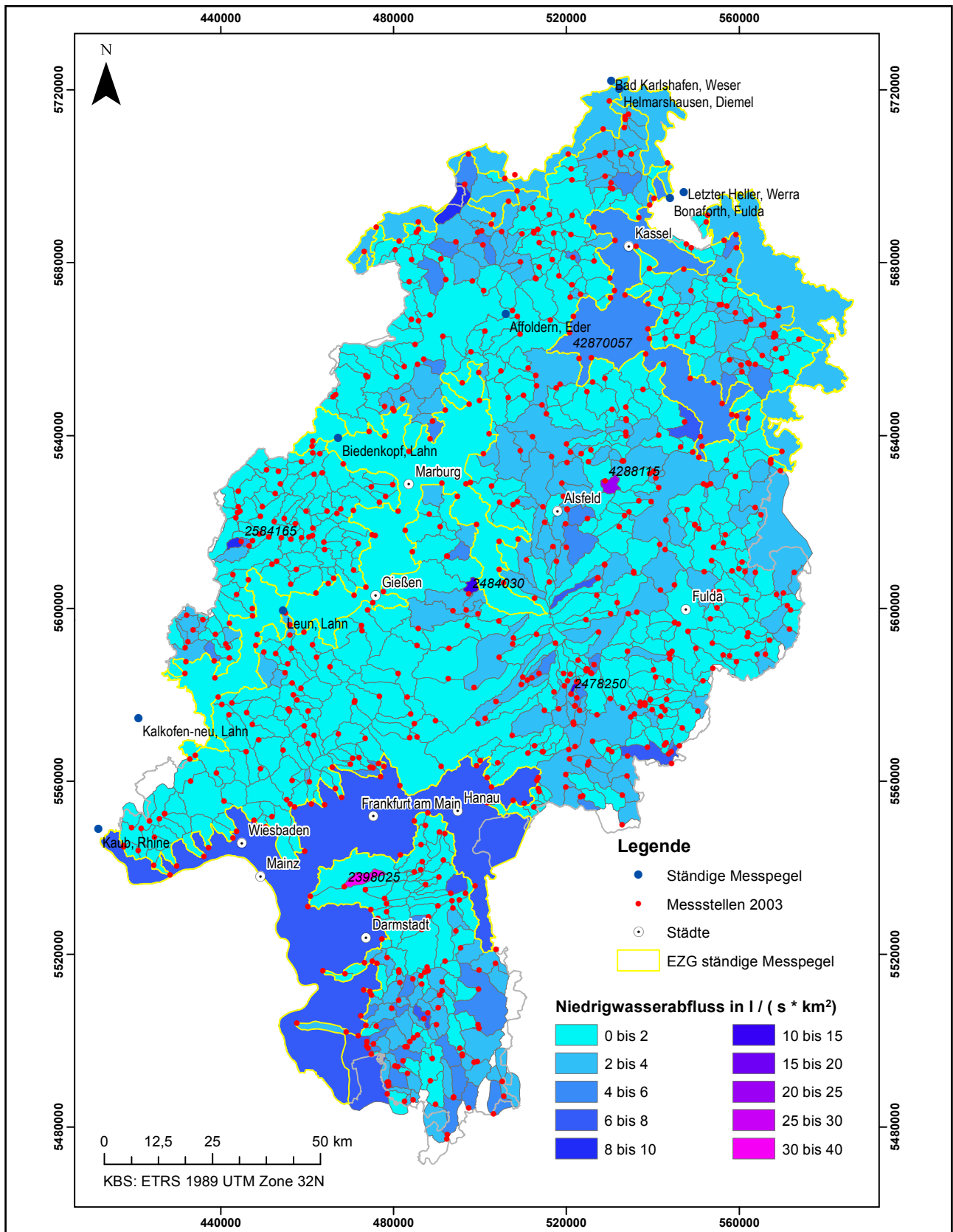
Senkungsgebiet am Rande des Oberrheingrabens (LANG 2007), als Gebietsbeispiel ausgewählt.

Es wurde der Einfluss von Grundwasserentnahmen durch Trinkwasser-, Sanierungs-, Beregnungsbrunnen und Wasserverluste durch Kiestagebaue sowie von Einleitungen von in Kläranlagen aufbereitetem Wasser in Vorfluter untersucht. Entnahmen aus den Oberflächengewässern wurden nicht berücksichtigt. Für 17 in der Hanau-Seligenstädter Senke liegende oberirdische EZG wurden so die Niedrigwasserabflüsse aus den beschriebenen Daten nach der bereits oben ausgeführten Methodik berechnet.

Bei der beschriebenen Methodik liegen die oberirdischen Einzugsgebiete jeweils zu mindestens 70 Prozent in jeweils einer lithologischen Einheit. Deshalb wird eine Wahrscheinlichkeit unterstellt, dass es dem unterirdischen EZG nahekommt.

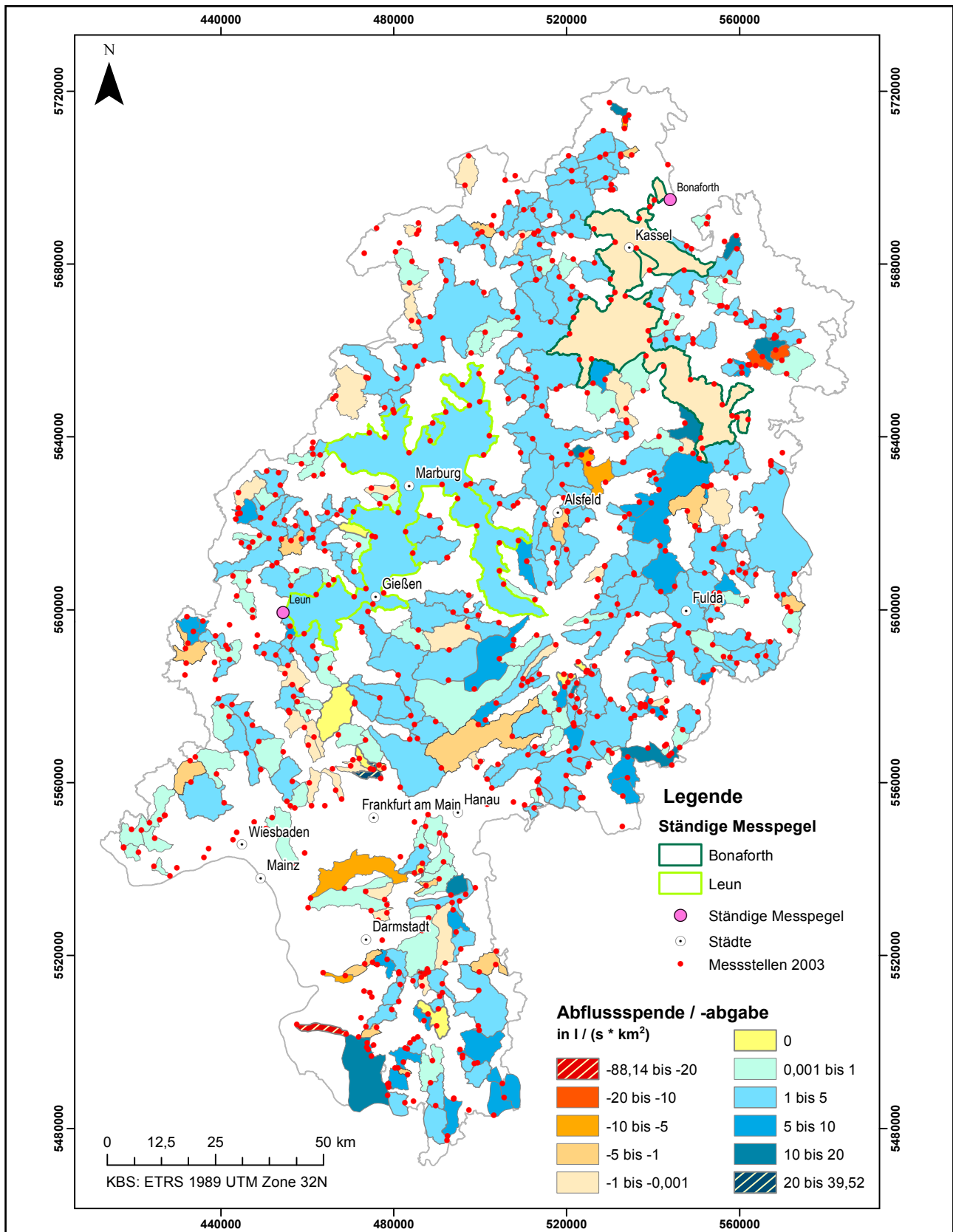
Neben den Niedrigwasserabflussmessungen wurden für einen Vergleich weitere Methoden zur Abschätzung des Basisabflusses bzw. der Grundwasserneubildung herangezogen: Für fünf ständige Messpegel in der Hanau-Seligenstädter Senke wurden langjährige Messreihen nach WUNDT (1958) und DEMUTH (1989) ausgewertet.

Die Methode nach WUNDT sieht vor aus einer mehrjährigen Messreihe den geringsten Niedrigwasserabfluss für jeden Monat auszuwählen und das arithmetische Mittel der zwölf Werte zu berechnen. Für die Methode nach DEMUTH werden die monatlichen Niedrigwasserabflüsse einer mindestens 10-jährigen Messreihe der Größe nach geordnet. Für die unteren fünf Prozent der monatlichen Niedrigwasserabflüsse wird angenommen, sie seien anthropogen beeinflusst, sodass sie von der Analyse ausgeschlossen werden. Die untersten drei der verbleibenden Messwerte werden genutzt, um den Pearson-Korrelationskoeffizienten zu berechnen. Schrittweise wird der jeweils nächsthöhere Wert hinzugenommen und der Korrelationskoeffizient erneut berechnet. Sobald der maximale Korrelationskoeffizient erreicht ist, der in etwa dem Median entspricht, wird die Regressionsgerade berechnet und extrapoliert. Alle oberhalb der Regressionsgeraden liegenden Messwerte werden auf die Gerade reduziert. Der Mittelwert der auf die Gerade projizierten Messwerte wird als repräsentativ für den Basisabfluss angesehen (ARMBRUSTER 2002).



**Abb. 2:** Einzugsgebiete der während des Niedrigwassermessprogramms 2003 gemessenen Messstellen mit gemessenen Niedrigwasserabflusspenden in l/(s\*km<sup>2</sup>)





**Abb. 3:** Einzugsgebiete, für die basierend auf den Ergebnissen des Niedrigwassermessprogramms 2003 eine Abflusspende oder Abflussabgabe ermittelt werden konnte

Zudem erfolgte ein Vergleich mit einem auf der Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW beruhenden Rasterdatensatz für die

Grundwasserneubildungsraten in Hessen für das Jahr 2003 HERGESELL & BERTHOLD (2005).

## Ergebnisse

758 Messwerte von Niedrigwasserabflusspenden, die zwischen dem 11. August und dem 24. September 2003 gemessen wurden, standen zur Verfügung. Davon konnten 725 Messwerte ausgewertet werden. Diese Messwerte beschreiben nicht um anthropogene Einflüsse korrigierte Niedrigwasserabflusspenden. Die Berücksichtigung anthropogener Einflüsse erfolgt im zweiten Teil dieses Abschnittes.

Im ersten Schritt wurden die Messstellen den Einzugsgebieten zugeordnet. Ausgangspunkt war das Gewässerkundliche Flächenverzeichnis im Maßstab 1 : 25 000, welches auf der TK25 basiert (HLNUG 2017). Die Einzugsgebiete wurden unter Verwendung des hochaufgelösten digitalen Geländemodells (DGM 1 des HVBG) überprüft und etwa 220 wurden manuell angepasst (Abbildung 2).

Von den 725 Messstellen waren 53 trockengefallen. In den Einzugsgebieten mit auffallend hohen gemessenen Niedrigwasserabflusspenden waren teilweise anthropogene Einflüsse ursächlich. Es gibt Messstellen, vor allem im Hessischen Ried, die überwiegend von der Einleitung von aufbereitetem Wasser aus nahegelegenen Kläranlagen beeinflusst sind. Der Messstellen unterhalb des Edersee-Staudamms ist durch die Abflusssteuerung des Edersees beeinflusst und wurde nicht berücksichtigt.

Für 316 der 725 ausgewiesenen Einzugsgebiete konnte eine Abflusspende oder -abgabe berechnet werden. Dabei wurden 256 Gebiete mit Abflusspenden und 52 Gebiete mit Abflussabgaben bestimmt; in acht Gebieten entsprach das Volumen des zufließenden Wassers exakt dem Volumen des abfließenden Wassers, sodass die Abflusspende im Gebiet jeweils bei  $0 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$  lag.

Die höchste Abflussabgabe wurde mit  $-88,14 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$  in einem Teileinzugsgebiet der Weschnitz festgestellt. Allerdings wurden die Messungen an Zufluss und Abfluss dieses Teileinzugsgebietes im

Abstand von 2 Tagen durchgeführt. Mit 90 Beregnungsbrunnen, einem nahen Kiestagebau und der Einleitung der Kläranlage Biblis sind umfangreiche anthropogene Einflussfaktoren vorhanden. Die Einleitung der Kläranlage Biblis konnte nicht berücksichtigt werden, da deren Wert für das Jahr 2003 nicht zur Verfügung stand. Der Median für die Jahre 2002 bis 2018, soweit Daten vorliegen, beträgt  $27,9 \text{ l}/\text{s}$ . Die Annahmen zu Entnahmen der Beregnungsbrunnen und die Kiesentnahmen sind mit großen Unsicherheiten behaftet, so dass diese große Abflussabgabe als Hinweis auf die große anthropogene Beeinflussung dieses Einzugsgebietes gewertet wird.

Sowohl für den Niedrigwasserabfluss pro Einzugsgebiet (Spearman  $\rho=0,217$ ,  $p=3,8\text{E}-09$ ) als auch für Abflusspende/-abgabe (Spearman  $\rho=0,115$ ,  $p=0,0411$ ) wurde eine schwache positive Korrelation mit der Größe des zugehörigen Einzugsgebietes ermittelt. Dies deutet darauf hin, dass in größeren Einzugsgebieten während Trockenzeiten tendenziell mehr Basisabfluss entsteht und dass diese tendenziell weniger anfällig sind für Faktoren wie (Grund-)Wasserentnahmen.

Von den 725 Einzugsgebieten gibt es nach den verfügbaren geologischen Kartenblättern keines ohne Störungzonen. Eine Analyse zum Zusammenhang zwischen der Anzahl der Störungen in einem Einzugsgebiet und den Abflusspenden und -abgaben konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Störungzonen (Sprunghöhe, Kluffüllung, hydrogeologische Eigenschaften der gegeneinander versetzten Gesteine etc.) bieten sich hier Untersuchungen im Rahmen von Detailstudien an.

Im Folgenden wird ein Vergleich der Abflusspenden von Einzugsgebieten mit Abflusspende/-abgabe für lithologische Einheiten vorgenommen. Die Betrachtung von Kopfgebieten erfolgt nachfolgend separat.

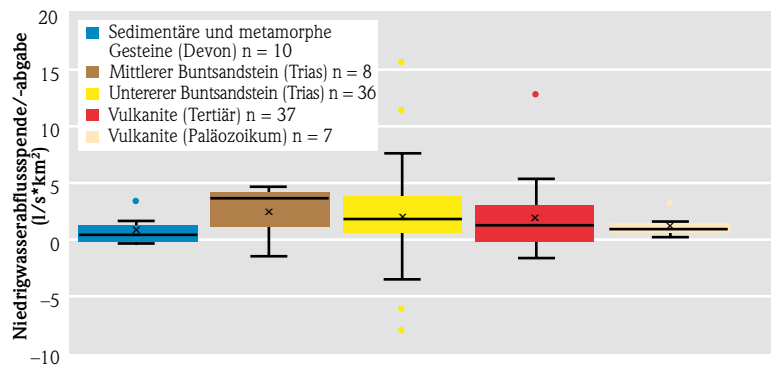
Von 316 Einzugsgebieten, die eine Abflussspende/-abgabe aufweisen, lässt sich für 120 Einzugsgebiete mindestens 70 Prozent der Fläche jeweils einer lithologischen Einheit zuordnen. Es wurden im Weiteren die lithologischen Einheiten untersucht, in denen mindestens fünf Einzugsgebiete zu mindestens 70 Prozent liegen. Das sind

- Einheit 1: sedimentäre und metamorphe Gesteine im Unterdevon (Devon)
- Einheit 2: Sandsteine des mittleren Buntsandsteins (Trias)
- Einheit 3: Ton- und Sandsteine des unteren Buntsandsteins (Trias)
- Einheit 4: Vulkanite (Basalt) im Tertiär
- Einheit 5: Metavulkanite im Devon/Karbon (Paläozoikum)

Für diese lithologischen Einheiten konnte ein Vergleich der Abflussspenden durchgeführt werden (Abb. 4).

Einheit 1: Die sedimentären und metamorphen Gesteine im Unterdevon (Devon) liegen im geologischen Strukturraum des Rheinischen Schiefergebirges. Sie weisen den niedrigsten Mittelwert und Median der Abflussspenden aller in dieser Studie betrachteten fünf Einheiten auf. Die paläozoischen Gesteine des Rheinischen Schiefergebirges wurden während der Gebirgsbildung im Karbon gefaltet, geschiefert und an langanhaltenden Überschiebungsbahnen gegeneinander versetzt. Sie besitzen oft nur wenig bis gering ergiebige Grundwasservorkommen und weisen aufgrund des geringen Speichervermögens der Gesteine sehr niedrige Abflüsse während der Sommerzeit auf (MÜLLER 1984).

Einheiten 2 und 3: Insbesondere die Einzugsgebiete der Sandsteine des mittleren Buntsandsteins (Trias) und Ton- und Sandsteine des unteren Buntsandsteins (Trias) zeichnen sich durch einen hohen Mittelwert und einen hohen Median der Abflussspenden aus. Buntsandsteingrundwasserleiter stellen zum Beispiel in der Niederhessischen Senke und der Osthessischen Buntsandstein Scholle ergiebige Kluffgrundwasserleiter dar (FRITSCHKE et al. 2003, 2021), wodurch sie



**Abb. 4:** Vergleich der Abflussspenden/-abgaben für Einzugsgebiete in den lithologischen Einheiten 1) sedimentäre und metamorphe Gesteine im Unterdevon; 2) Sandsteine des mittleren Buntsandsteins; 3) Ton- und Sandsteine des unteren Buntsandsteins; 4) Vulkanite (Basalt) im Tertiär; 5) Metavulkanite im Devon/Karbon (Boxplot)

gegebenenfalls einen höheren Basisabfluss erzeugen können als weniger durchlässige Gesteine. Andererseits wurden für die Buntsandstein-Einzugsgebiete auch Abflussabgaben von bis  $-7,7 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$  ermittelt. Hierfür können geogene Gründe wie ein Grundwasserstockwerksbau (Brinkmann et al. 2014), aber auch Grundwasserentnahmen ursächlich sein. Im Gebiet des Fulda-Werra-Berglands werden der Untere und der Mittlere Buntsandstein intensiv für die örtliche Trinkwassergewinnung in Osthessen genutzt. Ebenso repräsentieren Unterer und Mittlerer Buntsandstein westlich der Niederhessischen Senke (hydrogeologischer Teilraum 05202) im Bereich der geologischen Strukturräume der Waldecker und der Frankenberger Scholle einen für die regionale Wasserversorgung bedeutsamen ergiebigen Kluffgrundwasserleiter (FRITSCHKE et al. 2003, 2021).

Einheit 4 und 5: Der Vergleich zeigt, dass die erdgeschichtlich jüngeren Vulkanite (Basalt) im Tertiär mit  $2,16 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$  einen höheren Mittelwert der Abflussspenden aufweisen als die Metavulkanite im Devon/Karbon (Paläozoikum) mit  $1,45 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$ . Der große Interquartilsabstand der tertiären Vulkanite ist vermutlich auf die Spannweite an sehr ergiebigen Grundwasserleitern und im Sommer regelmäßig trockenfallenden schwebenden Grundwasserleitern zurückzuführen, aber auch auf die in diesen Bereich oftmals hohen Jahresniederschlagsraten.

Im nächsten Schritt wurden nur die Kopfgebiete betrachtet, also Einzugsgebiete, in denen noch kein Zufluss durch weitere Gewässer besteht. Für 170 Kopfgebiete lassen sich mindestens 70 Prozent der

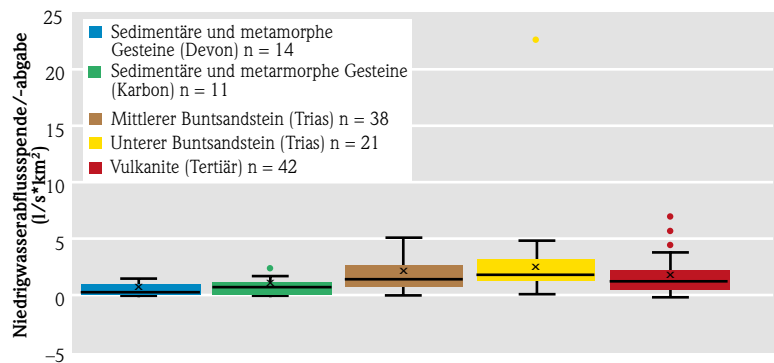
Fläche jeweils einer lithologischen Einheit zuordnen (Abb. 5). Wieder wurden die lithologischen Einheiten untersucht, in den mindestens fünf Einzugsgebiete zu mindestens 70 Prozent liegen. Das sind

- Einheit 1: Sedimentäre und metamorphe Gesteine (Devon)
- Einheit 2: Sedimentäre und metamorphe Gesteine (Karbon)
- Einheit 3: Mittlerer Buntsandstein (Trias)
- Einheit 4: Unterer Buntsandstein (Trias)
- Einheit 5: Vulkanite (Tertiär)

Für die so ausgewählten Kopfgebiete wurden die ermittelten Niedrigwasserabflüsse verglichen. Auch hier wurde für die Einheiten 3 und 4 Unterer und Mittlerer Buntsandstein mit 2,08 bzw. 2,22 l/(s\*km<sup>2</sup>) die höchsten Mittelwerte ermittelt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Buntsandstein-Grundwasserleiter während Trockenzeiten einen hohen Basisabfluss aufrechterhalten. Diese Mittelwerte sind jedoch deutlich geringer als die für einige hessische Buntsandstein-Grundwasserleiter angegebenen mittleren Grundwasserneubildungsraten, zum Beispiel für die Kuppenrhön mit 3,3 l/(s\*km<sup>2</sup>) (Fritsche et al. 2003). Für Gebiete des Buntsandsteins in Südhessen wurde festgestellt, dass Niedrigwasserabflussmessungen im Allgemeinen unterhalb der langjährigen, mittels Bodenwasserhaushaltsmodell ermittelten Grundwasserneubildung liegen (BECHT et al. 2017).

Für die tertiären Vulkanite (Einheit 5), die sich vor allem im Vogelsberg befinden, wurde ein mittlerer Basisabfluss von 1,57 l/(s\*km<sup>2</sup>) berechnet. Dieser liegt deutlich unterhalb der mittleren Grundwasserneubildungsrates von 4,5 l/(s\*km<sup>2</sup>) aus (LEBMANN et al. 2001). Das ist darauf zurückzuführen, dass viele durch schwebende Grundwasserleiter gespeiste Quellen naturgemäß während des hydrologischen Sommerhalbjahres trockenfallen, während des Messprogramms waren es neun der 42 gemessenen Vorfluter.

Die Beschränkung dieser Auswertung auf die Kopfgebiete zeigt, dass Kopfgebiete eine geringere Spende



**Abb. 5:** Vergleich der Abflussspenden/-abgaben für Kopfgebiete in den lithologischen Einheiten 1) Sedimentäre und metamorphe Gesteine (Devon); 2) Sedimentäre und metamorphe Gesteine (Karbon); 3) Mittlerer Buntsandstein (Trias); 4) Unterer Buntsandstein (Trias); 5) Vulkanite (Tertiär) (Boxplot)

und eine kleine Spannweite bei den Abflüssen aufweisen. Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Kopfgebieten, wie zum Beispiel im Bereich des Vogelsbergs, sind dementsprechend geprägt. Aussagen über den quantitativen Wasserhaushalt des Gesamteinzugsgebiets lassen sich hieraus jedoch nicht ableiten, da neben den Abflussspenden in den Kopfgebieten vor allem die Anzahl und die Flächen der Einzugsgebiete eine Rolle spielen.

Die verbleibenden Einheiten 1 und 2 mit metamorph überprägten unterkarbonischen sowie unterdevonischen Sedimentgesteinen wiesen mit jeweils 0,60 und 0,34 l/(s\*km<sup>2</sup>) die niedrigsten Mittelwerte der Abflussspenden auf. Sie liegen noch unterhalb der mittleren Grundwasserneubildungsrates von 1,2 l/(s\*km<sup>2</sup>) (FRITSCHKE et al. 2003, 2021). Die Einheiten 1 und 2 gehören zu den paläozoischen Gesteinen des Rheinischen Schiefergebirges, die als Grundwassermangelgebiet beschrieben werden (FRITSCHKE et al. 2003, 2021) und einen niedrigen Basisabfluss generieren. Dies wird unterstrichen durch die geringe Streuung der untersuchten Daten.

Im vorigen Abschnitt wurden in den Auswertungen keine anthropogenen Einflüsse berücksichtigt. Im Folgenden werden Grundwasserentnahmen zur Trinkwasserversorgung oder Grundwassersanierung, Einleitungen in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und die Folgen von Kiesentnahmen berücksichtigt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit beschränkt sich dies im Rahmen dieser Arbeit auf das Teilgebiet der Hanau-Seligenstädter Senke. Es wurden sechs EZG im Rodagebiet und sechs EZG im Gersprenz-



gebiet betrachtet. Die EZG sind ausnahmslos anthropogen beeinflusst. Nur in zwei EZG gibt es keine (bekannten) Entnahmen, dafür aber Kläranlageneinleitungen. Diese führen dazu, dass die gemessene Abflussspende nach unten korrigiert werden muss. Grundwasserentnahmen bedingen eine Korrektur nach oben. Je nach Umständen ergibt die Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse Korrekturen von  $-21$  bis zu  $+9 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$ .

In fünf EZG führte die Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse zu höheren Abflussspenden, in drei Einzugsgebieten an Gersprenz, Richerbach und Bieber zu teilweise deutlich niedrigeren Abflussspenden als aus der Messung bekannt. In vier Einzugsgebieten ist die Differenz zur Messung sehr gering, teilweise weil sich

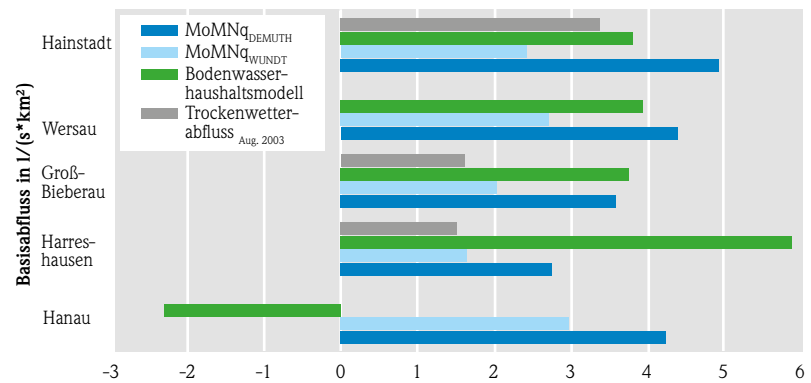


Abb. 6: Vergleich von vier Methoden zur Bestimmung des Basisabflusses an fünf ständigen Messpegeln in der Hanau-Seligenstädter Senke

die anthropogenen Einflüsse aufheben. Dabei war in einem EZG der Rodau der Vorfluter zum Zeitpunkt der Messung trockengefallen. In das zugehörige EZG leitet eine Kläranlage ein, was auf eine dort bekannte Versickerungstrecke des Vorfluters in das Grundwasser hinweist.

## Vergleich mit den Ergebnissen eines mit einem Regressionsmodell gekoppelten Bodenwasserhaushaltsmodells

Im Vergleich mit den Ergebnissen eines mit einem Regressionsmodell gekoppelten Bodenwasserhaushaltsmodells (HERGESELL & BERTHOLD 2005) sowie der graphischen Auswertung von langjährigen Abflussmessungen an fünf ständigen Messpegeln in der Hanau-Seligenstädter Senke zeigte sich, dass die Auswertung nach WUNDT (1958) in zwei von drei Fällen leicht oberhalb des 2003 gemessenen Basisabflusses lag. Die Methode nach DEMUTH (1989) lieferte Basisabflusswerte, die in allen drei Fällen über dem gemessenen Niedrigwasserabfluss lagen. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der vier Methoden zur Bestimmung des Basisabflusses.

Drei der fünf ständigen Messpegel in der Hanau-Seligenstädter Senke wurden 2003 während des Niedrigwassermessprogramms gemessen. In allen drei Fällen war der gemessene Basisabfluss geringer als die an der Messstelle nach dem Bodenwasserhaushaltsmodell für das Jahr 2003 ermittelte Grundwasserneubildung. Anthropogene Einflüsse sind allerdings hier für die gemessenen Daten nicht berücksichtigt. Für einen in 2003 nicht gemessenen Messpegel war eine negative Grundwasserneubildung (Grundwasserzehrung) angegeben, die in dieser Form von den anderen drei angewandten Methoden nicht ermittelt werden kann.

## Fazit und Ausblick

Die Auswertung von Niedrigwasserabflussmessungen ermöglicht es, zwischen Gebieten mit hohem oder niedrigem Basisabfluss zu differenzieren. Die erstellte digitale Niedrigwasserabfluss-Karte sowie die darauf basierende Karte der Abflussspenden und -abgaben pro Einzugsgebiet vermitteln einen Überblick über die gemessenen Niedrigwasserab-

flüsse im Jahr 2003 in Hessen. Eine Auswertung von Einzugsgebieten, die zu über 70 Prozent durch eine einzige lithologische Einheit gebildet werden, zeigt, dass Niedrigwasserabflüsse tendenziell deren Grundwasserneubildung widerspiegeln: In Buntsandsteingebieten wurden höhere Niedrigwasserabflüsse assoziiert als in devonischen/karbonischen

Gesteinen des Rheinischen Schiefergebirges, die als Grundwassermangelgebiet charakterisiert sind. Für den überwiegenden Teil der lithologischen Einheiten Hessens liegen jedoch nicht genügend eindeutig durch die lithologischen Einheiten geprägte Einzugsgebiete vor, um einen umfassenden Vergleich durchzuführen.

Die gemessenen Niedrigwasserabflüsse können auch durch anthropogene Wasserentnahmen oder -einleitungen oder auch durch die Bewirtschaftung von Talsperrren beeinflusst sein. In der Hanau-Seligenstädter Senke etwa wären die gemessenen Niedrigwasserabflüsse ohne menschliche Einflüsse in drei Einzugsgebieten niedriger und in fünf Einzugsgebieten höher ausgefallen.

Auf die Probleme bei der Bestimmung der Grundwasserneubildung durch Abflussmessungen weist bereits LEBMANN (2001) hin, da die Abflüsse der Vorfluter häufig anthropogen beeinflusst sind.

Gemessene Niedrigwasserabflüsse sind eine Annäherung an den Basisabfluss. Die Differenz zu den Basisabflüssen, die mittels langjähriger Abfluss-Messreihen bestimmt wurden, könnte durch eine Analyse der vorhergehenden Jahresverläufe der klimatischen Parameter und die Berücksichtigung anthropogener Einflüsse genauer begründet werden.

Eine weitere Einschränkung der Niedrigwasserabflussdaten liegt darin begründet, dass sie keine Gebiete mit Grundwasserzehrung erkennen. Eine genauere Untersuchung von während des Messprogramms trockengefallenen Messstellen könnte Klarheit darüber

bringen, ob dort Grundwasserzehrung vorliegt. Hier können hydraulische Wechselwirkungen zwischen Vorfluter und Grundwasserleiter aufgrund hydrogeologischer Verhältnisse oder zum Beispiel Quellschnitzungen zur Trinkwassergewinnung oder auch aufgrund kapillaren Aufstiegs aufgrund geringer Grundwasserflurabstände vorliegen.

Als nächster Schritt bietet sich ein Vergleich mit Ergebnissen des Niedrigwassermessprogramms 2018 an. Die Niedrigwasserabflussmessungen von 2018 sind insofern interessant, als die vorausgehende Trockenperiode länger war, als dies im Jahr 2003 der Fall war. Trotz der außergewöhnlichen Trockenheit im Jahre 2003 ist es wahrscheinlich, dass der Effekt des trockenen und heißen Sommers auf die Grundwasservorräte durch das überdurchschnittlich nasse Jahr 2002 abgemildert wurde. Zudem zeichnete sich der Mai 2003 durch überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen aus. Im Jahr 2018 hingegen herrschte in Deutschland von Februar bis Juli ein hohes Niederschlagsdefizit (LÖNS-HANNA, KREMER & RITTERSHOFER 2019). Daher ist zu erwarten, dass die Menge an in den Grundwasserleitern gespeichertem Wasser nach mehreren vorangegangenen trockenen Monaten niedriger war als 2003.

Für sämtliche Messstellen, die während der beiden Niedrigwassermessprogramme gemessen wurden, ließe sich feststellen, ob der Basisabfluss des Jahre 2018 gegenüber dem Jahr 2003 verringert oder erhöht war. Mittels Interpolation könnte eine Karte erstellt werden, welche anzeigt, wie sich das Grundwasserdargebot in Hessen in diesen beiden Trockenjahren unterschieden hat.

## Literatur

- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17; Freiburg.
- BECHT, A., DIEL, M., FRIEDRICH, R. & FRITSCHÉ, J.-G. (2017): Hydrogeologie von Hessen – Odenwald und Sprendlinger Horst. – In: KÄMMERER, D., PREIN, A. & SENNER, R. (Hg.): Grundwasser in Hessen, Heft 2; Wiesbaden.
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2016): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, 1 : 1 000 000. –; Hannover.
- BRINKMANN, P. J., LEBMANN, B. & MATZER, S. (2014): Eine „typische“ Systembeschreibung für den Buntsandstein. – Grundwasser, 19, 3, S. 181–188; Springer Berlin Heidelberg.
- DEMUTH, S. (1989): The application of the West German IHP recommendations for the analysis of data from small research basins. – In: ROALD, L., NORDSETH, K. & HASSEL, K.A. (Hg.): FRIENDS in Hydrology. – IAHS Publication, 187: 47–60; Bolkesjo.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2021): Klimadaten Deutschland – Monats- und Tageswerte (Archiv). –URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchiv-tagmonat.html?nn=16102>. Zugriff am 04. August 2021; Offenbach.
- DIN 4049-3: 1994-10 (1994): Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.
- ECK, L.K. (2021): Analysis of low flow measurements in river basins, Hesse, Germany, using state-wide reference date measurements and GIS tools. Master Thesis. – TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften; Darmstadt (unveröff.).
- ESRI (2021): URL: <https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content::gk1000-flaechen?geometry=-22.985Prozent2C46.244Prozent2C43.856Prozent2C55.866>
- FRITSCHÉ, H.G., HEMFLER, M., KÄMMERER, D., LEBMANN, B., MITTELBACH, G., PETERS, A., PÖSCHL, W., RUMOHR, S. & SCHLÖSSER-KLUGER, I. (2003): Beschreibung der hydrogeologischen Teilräume von Hessen gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Geologisches Jahrbuch Hessen, 130: 5–19; Wiesbaden.
- HERGESELL, M. & BERTHOLD, G. (2005): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – In: Jahresbericht des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie 2004: 47–66; Wiesbaden.
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) (2006): Hydrologie in Hessen. – Heft 2. Niedrigwasser-Messprogramm. Zusammenstellung aller Messungen von 1959 bis 2003 (interne Ausgabe); Wiesbaden.
- HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2007): Geologische Übersichtskarte von Hessen, 1 : 300 000; Wiesbaden.
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) (2017): Gewässerkundliches Flächenverzeichnis 1 : 25 000 der Kleinst-Einzugsgebiete aller hessischen Gewässer mit Bezeichnungen; Wiesbaden.
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie). (2021) Niedrigwasser. URL: <https://www.hlnug.de/themen/wasser/niedrigwasser>, Zugriff am 04. September 2021; Wiesbaden.
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie). (2021) Geologie von Hessen, S. 526–549. – Schweizerbart, Stuttgart.
- HVBG (Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation): Digitales Geländemodell DGM 1; Wiesbaden.
- LANG, S. (2007): Die geologische Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke (Hessen, Bayern). – Dissertation, Technische Universität Darmstadt; Darmstadt.
- LEBMANN, B. (2001): Die anthropogene Beeinflussung des grundwasserbürtigen Abflusses und die daraus folgenden Konsequenzen für die Bestimmung der mittleren Grundwasserneubildungsrate durch Abflussmessungen. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, Band 47, Heft 1, S. 55–65; Hannover.

- LEBMAN, B, WIEGAND, K. & SCHARPFF, H.-J. (2001): Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges. – Geol. Abh. Hessen, Bd. 108, 144 S., 665 Abb., 13 Tab.; Wiesbaden.
- LÖNS-HANNA, C., KREMER, M. & RITTERSHOFER, B. (2019): Niedrigwasser und Trockenheit 2018. – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hsg.); Wiesbaden.
- MÜLLER, K.H. (1984): Geographische Grundlagen Hessens. – Hessisches Landesamt für geschichtliche Landeskunde Marburg/Lahn: Geschichtlicher Atlas von Hessen: Text- und Erläuterungsband: 1–19; Marburg.
- WOLFF, E., & VAN VLIET, M.T. (2021): Impact of the 2018 drought on pharmaceutical concentrations and general water quality of the Rhine and Meuse rivers. – Science of The Total Environment, 778, 146182; Bedfordshire.
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – In: GRAHAM, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. – Forschung zur deutschen Landeskunde, 104: 47–54; Elsevier.
- ZARATE, E., HOBLEY, D., MAC DONALD, A.M., SWIFT, R.T., CHAMBERS, J., KASHAIGILI, J.J. (2021): The role of superficial geology in controlling groundwater recharge in the weathered crystalline basement of semi-arid Tanzania. – Journal of Hydrology: Regional Studies, 36, 100833; Amsterdam.