

Neue Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkennwerten für Hessen

W3

SEBASTIAN WREDE

1 Hintergrund und Zielsetzung

Mittel- und Niedrigwasserkenngrößen (MQ und MNO) sind aussagekräftige Kenngrößen zur Beschreibung des Wasserhaushaltes und dienen als Parameter zur Festlegung von Bemessungswerten. Sie werden dabei u. a. als Grundlage für Stofffrachtberechnungen, zur Bewertung der Gewässerbelastung im Hinblick auf den Schmutzwasseranteil aus Kläranlagen und zur Quantifizierung von möglichen Wasserentnahmen herangezogen. Darüber hinaus werden sie in der wasserwirtschaftlichen Praxis für Bemessungsaufgaben für den Gewässerbau und Plan- und Genehmigungsverfahren benötigt. MQ- und MNO-Kennwerte können an Pegeln mit langjährigen Abflussmessreihen statistisch ermittelt werden. In der wasserwirtschaftlichen Praxis werden diese Kennwerte allerdings an beliebigen Gewässerstellen benötigt. Hierzu ist die Anwendung eines adäquaten Regionalisierungsverfahrens notwendig, welches möglichst alle Aspekte der Abflussbeeinflussung abbildet.

Die letzte landesweite Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkenngrößen in Hessen erfolgte im Jahr 2002. Aufgrund neuer Anforderungen zur Berücksichtigung der hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahre und verlängerter Zeitreihen wurde eine Fortschreibung der Regionalisierung notwendig.

Methodisch wurde hierzu auf die am Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) vorliegenden Tageswert-basierten LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle für den Zeitraum der hydrologischen Jahre 1981–2010 zurückgegriffen.

Niedrigwasserabflüsse in hessischen Gewässern können in erheblichem Maße durch punktuelle Kläranlagenabflüsse beeinflusst sein. Dabei ist der lokale Einfluss je nach Lage und Einleitmenge der Kläranlagen sehr unterschiedlich. Für eine räumlich differenzierte Betrachtung des Niedrigwassergeschehens ist die Berücksichtigung der jahreszeitlichen Verteilung von punktuellen Kläranlageneinleitungen daher von Vorteil. Die Anwendung der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle ermöglichte erstmals diese Einbindung von Kläranlageneinleitungen mit jahreszeitlicher Verteilung.

Die so angepassten LARSIM-Tageswert-Modelle dienen als Grundlage zur Ermittlung der Kenngrößen MQ und MNO der hydrologischen Jahre sowie der saisonalen Kenngrößen MQ-So, MNO-So im hydrologischen Sommerhalbjahr und MQ-Wi, MNO-Wi im hydrologischen Winterhalbjahr für die einzelnen Teilgebiete des hessischen Flächenverzeichnisses.

2 Auswahl der Regionalisierungsmethode

In der Literatur (u. a. DWA 2009, SMAKHTIN 2001, GUSTARD & DEMUTH 2009) werden unterschiedliche Verfahren zur Regionalisierung von Niedrigwasserkenngrößen unterschieden:

- **Einfache Übertragungsverfahren:**
 - **Abflusspendenübertragung** einer örtlich bekannten Abflusspende auf einen anderen Ort des gleichen oder eines benachbarten Gewässers ähnlicher hydrologisch-geologischer Eigenschaft.
 - **Interpolation von Abflussbändern** einer interessierenden Kenngröße längs eines Gewässers z. B. Niedrigwasser-Abflusspendenprofile.
- **Multiple Regression:** Stellt eine Beziehung zwischen der Zielgröße und einer Anzahl sie bestimmender, möglichst unabhängiger Einflussgrößen her. Regressionskoeffizienten sind für die gesamte Region maßgebend.
- **Index-Verfahren:** Ansatz zur Berechnung und Regionalisierung von Extremwerten mit bestimmter Auftretenswahrscheinlichkeit.

- **Räumliche Interpolation (Kriging):** Ermittlung der Kenngröße an einem unbeobachteten Ort aufgrund der räumlichen Nachbarschaft zu Messstellen mit bekannter Kenngröße.
- **Wasserhaushaltsmodelle:** Anwendung und Kalibrierung eines deterministischen Wasserhaushaltsmodells mit Übertragung der Modellparameter an einen anderen Ort. Aus den generierten Modellabflusszeitreihen können Niedrigwasserkenngrößen mit Hilfe der Abflussstatistik berechnet werden.

Für die landesweite Regionalisierung der Mittel- und Niedrigwasserkenngrößen in Hessen wurde die Anwendung der bereits am HLNUG verfügbaren Tageswert-basierten LARSIM-Modelle favorisiert. Dem Nachteil des im Vergleich zu statistischen Methoden vergleichsweise hohe Aufwands für die Modellkalibrierung und -validierung, stehen die Vorteile der räumlich differenzierten Einbindung von Kläranlageneinleitungen sowie der relativ einfachen Durchführung von Szenarienbetrachtungen gegenüber. Die bestehenden Daten- und Modellunsicherheiten sind, wie bei den anderen Verfahren, entsprechend zu berücksichtigen.

3 Aktualisierung der LARSIM-Teilmodelle

3.1 Modellaufbau der Tageswert-basierten LARSIM-Modelle

Die Regionalisierung erfolgte unter Anwendung des konzeptionellen, physikalisch basierten und semi-distribuierten LARSIM-Modells (Large-Area-Runoff-Simulation-Model) (BREMICKER 2000, BREMICKER et al. 2013). Die für Hessen aufgestellten Wasserhaushaltsmodelle umfassen etwa 4500 Modellteilgebiete mit einer durchschnittlichen Größe von 5 km² und liegen in drei Teilmodellen für Nordhessen, Südhessen und das Lahneinzugsgebiet vor. In der LARSIM-Modellstruktur werden durch entsprechende

Modellroutinen die Prozesse der Abflussbildung, Abflusskonzentration und des Abflussverlaufs abgebildet. In den drei Teilmodellen wird, soweit vorhanden, der mögliche Einfluss von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren auf den Niedrigwasserabfluss über separate Speicherbausteine entsprechend der Bauwerksdimensionen und der jeweiligen Steuerregel berücksichtigt. Insgesamt sind 44 Hochwasserrückhalteanlagen in den Modellen abgebildet.

3.2 Eingangsdaten für die LARSIM-Modellierung

Grundlage für die Fortschreibung der Regionalisierung waren Zeitreihen der täglichen Abflüsse an 89 Pegeln in Hessen, die den Gesamtzeitraum der Abflussjahre 1981–2010 abdecken. Als Eingangsdaten wurde für die LARSIM-Modellierung Tageswerte von Stationsdaten für die Parameter Lufttemperatur, Globalstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Luftdruck für den Betrachtungszeitraum verwendet. Niederschlagsdaten basieren auf den REGNIE-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und umfassen für den gleichen Zeitraum regionalisierte tägliche, unkorrigierte Niederschlagshöhen auf 1 km²-Rasterbasis (RAUTHE et. al. 2013).

Da der Schwerpunkt der Modellanwendung auf einer verbesserten Modellanpassung der Mittel- und insbesondere der Niedrigwasserabflüsse lag, wurden im LARSIM-Bodenmodul Anpassungen zur realistischeren Abbildung der bodenphysikalischen Tiefenversickerung vorgenommen. So wurde zum einen die relative vertikale Durchlässigkeit (VDB) als hydrogeologisches Hintergrundfeld aus höher aufgelösten hydrogeologischen Daten (Klassifizierung von GW-Leitertypen und BFI-Rasterdaten) neu berechnet, um eine räumlich differenziertere Darstellung der Grundwasserneubildung zu erreichen. Zum anderen wurde mit der Annahme einer exponentiellen Tiefenversickerung ein zusätzlicher Kalibrierparameter aufgenommen, um eine verstärkte Tiefenversickerung im Grobporenbereich besser abbilden zu können.

3.3 Einbindung von Kläranlageneinleitungen

Für die jahreszeitliche Verteilung von ca. 700 Kläranlagen in Hessen im Rahmen der Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkenngrößen wurde der einfache und robuste Modellansatz von LIEBERT et. al. (2016) für die hessische Anwendungssituation angepasst. Der modifizierte Ansatz wurde anhand von vorliegenden mehrjährigen Zeitreihen der täglichen Abwassereinleitungen von Kläranlagen parametrisiert und überprüft. Die gemittelten Jahresschmutzwassermengen (JSM) der hessischen Kläranlagen (mit Fremdwasseranteil ohne Niederschlag) können mit folgender Beziehung jahreszeitlich verteilt werden:

$$Q_{TW}(t) = a \times \sin\left(\frac{2\pi}{366} \times (t + c)\right) + \frac{JSM}{366}$$

Q_{TW} Tageswert des Trockenwetterabflusses in [m³/d]

t laufender Tag im Jahr (1 ... 366)

a kläranlagenspezifische Amplitude der Jahresschwingung in [m³/d]

c allgemeingültige Phasenverschiebung der Jahresschwingung in [d]

JSM kläranlagenspezifische Jahresschmutzwassermenge in [m³/a]

Berechnet wird die Jahresganglinie des Trockenwetterabflusses einer Kläranlage Q_{TW}(t) in Abhängigkeit einer kläranlagenspezifischen Amplitude a, einer allgemeingültigen Phasenverschiebung c und der gemittelten Jahresschmutzwassermenge JSM der Kläranlage. Analog zum Modell von LIEBERT et. al. (2016) entspricht der einfache Modellansatz einer Sinusschwingung, die den mittleren Jahresgang beschreibt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Anpassung der Jahresganglinie des Trockenwetterabflusses an die gemessenen Einleitmengen einer Kläranlage.

Die räumliche Berücksichtigung der Kläranlageneinleitungen in den LARSIM-Modellen erfolgt dabei auf der Ebene der Modellteilzugsgebiete. In 41 LARSIM-Teilgebieten gibt es mehrere Kläranlagen im Modelleinzugsgebiet. In diesen Gebieten wurden die Zuflüsse der Kläranlagen jeweils aufsummiert und zu einer Zuflussganglinie vereint, um sie im LARSIM-Modell berücksichtigen zu können.

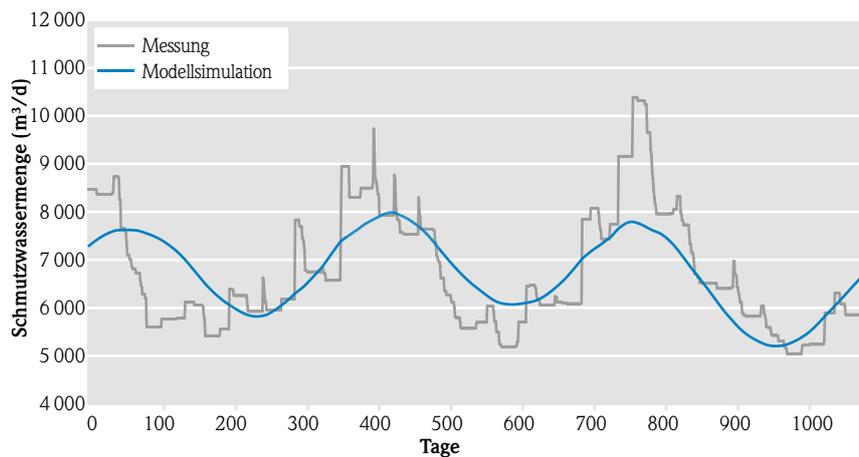


Abb. 1: Beispielhafter Jahresgang des Trockenwetterabflussmodells im Vergleich zu gemessenen Daten

4 Anwendung der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle

4.1 Modelleinstellungen und Kalibrierung

Die vorliegenden LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle für Nord- und Südhessen und die Lahn wurden für den Zeitraum der Abflussjahre 1981–2010 mit den im Abschnitt 3.2 aufgeführten Eingangsdaten aufgesetzt und angepasst. Ein sogenannter Modell-Warmup zur Erstellung einer Zustandsdatei für die initialen Modellrandbedingungen fand für die Periode 1971–1980 statt. Da die drei LARSIM-Modelle bereits für einen anderen Bezugszeitraum vorkalibriert vorlagen, musste durch die Erweiterung auf den 30-jährigen Bezugszeitraum sowie die nun hinzuge-

kommenen Kläranlageneinleitungsdaten eine Anpassung der Wasserbilanz an fast allen Pegeln vorgenommen werden. Darüber hinaus wurde an 31 Pegeln eine Nachkalibrierung, vor allem der den Basisabfluss steuernden Parameter, und in Einzelfällen der den Zwischen- und Direktabfluss sowie den Abflussverlauf steuernden Parameter durchgeführt. 15 Pegel wurden grundsätzlich neu kalibriert, wobei Ausgangspunkte die jeweiligen Unterliegerpegel waren. Eine Übersicht der kalibrierten Pegel findet sich in Abbildung 2.

4.2 Modellvalidierung

Die Ergebnisse der LARSIM-Modellläufe wurden nachfolgend an 89 Pegelstandorten, an denen geprüften Daten im Betrachtungszeitraum der Abflussjahre 1981–2010 vorlagen, anhand von statistischen Gütemaßen validiert. Bei den zur Validierung betrachteten Gütemaßen handelt es sich im Wesentlichen um die Modellbilanz, die Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) und die Nash-Sutcliffe-Efficiency der logarithmierten Abflüsse (Log NSE). Zudem wurden auch die Abweichungen zwischen den aus Messdaten und den aus Modelldaten ermittelten MQ- und MNO-Kennwerten betrachtet, die für die Regionalisierung am bedeutendsten sind. Im Wesentlichen konnten dabei für

alle kalibrierten Pegel die Gütemaße im Vergleich zu dem Zustand vor der Modellerweiterung und Nachkalibrierung verbessert werden. Dennoch sind auch typische Probleme der Modellanpassung erkennbar. So lassen sich niedrige Abflüsse über 30 Jahre häufig nicht gut mit nur einer Parametrisierung für den Basisabfluss abbilden. Hier fällt auf, dass die niedrigsten Abflüsse (NQ) vor allem in den 80er Jahren noch deutlich höher waren als in den aktuelleren Jahren. Auch sind starke, plötzliche Abnahmen im Niedrigwasserbereich schlecht über eine Parametrisierung des Basisabflusses, der mit Fokus auf den Gesamtzeitraum optimiert und angepasst wurde,

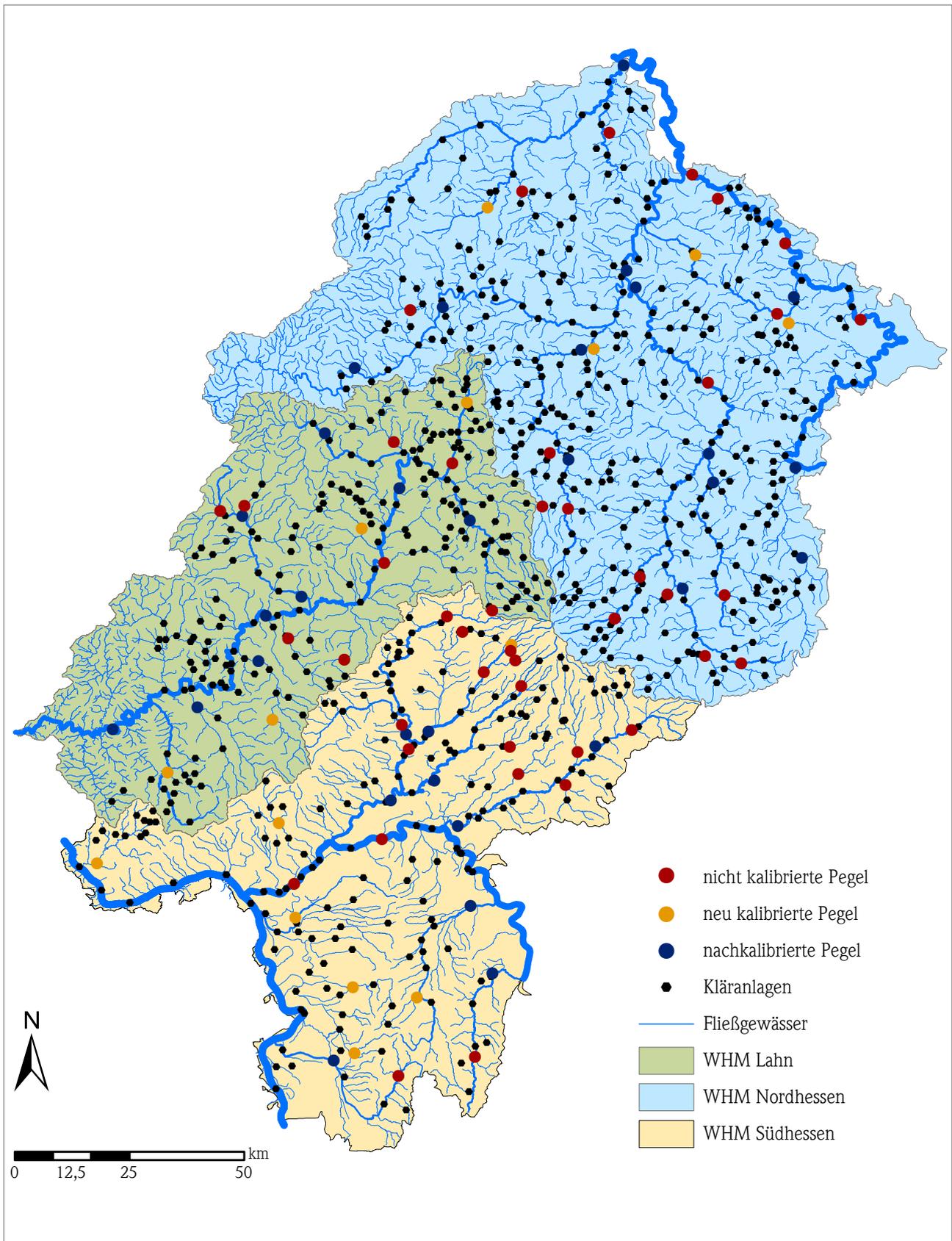


Abb. 2: Übersichtskarte der in der Kalibrierung berücksichtigten Pegel in den drei hessischen LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen

abzubilden. Auffällig ist auch, dass in sehr kleinen Einzugsgebieten zum Teil die verwendeten Gebietsniederschlagsdaten in der räumlichen Auflösung unzureichend sind, da in einigen Fällen gemessene Niederschlags-Abfluss-Ereignisse nicht adäquat durch den Eingangsdatensatz abgebildet werden.

werten zurückzuführen sind (Abbildung 3a). Auch die gedämpften Abflussspitzen sowie der Grundwasserleitertyp im Gebiet weisen darauf hin, dass hier eine große Wassermenge in den Boden infiltrieren und gespeichert werden kann. Im Pegelkontrollbereich befinden sich zusätzlich drei Kläranlagen (Dreieich,

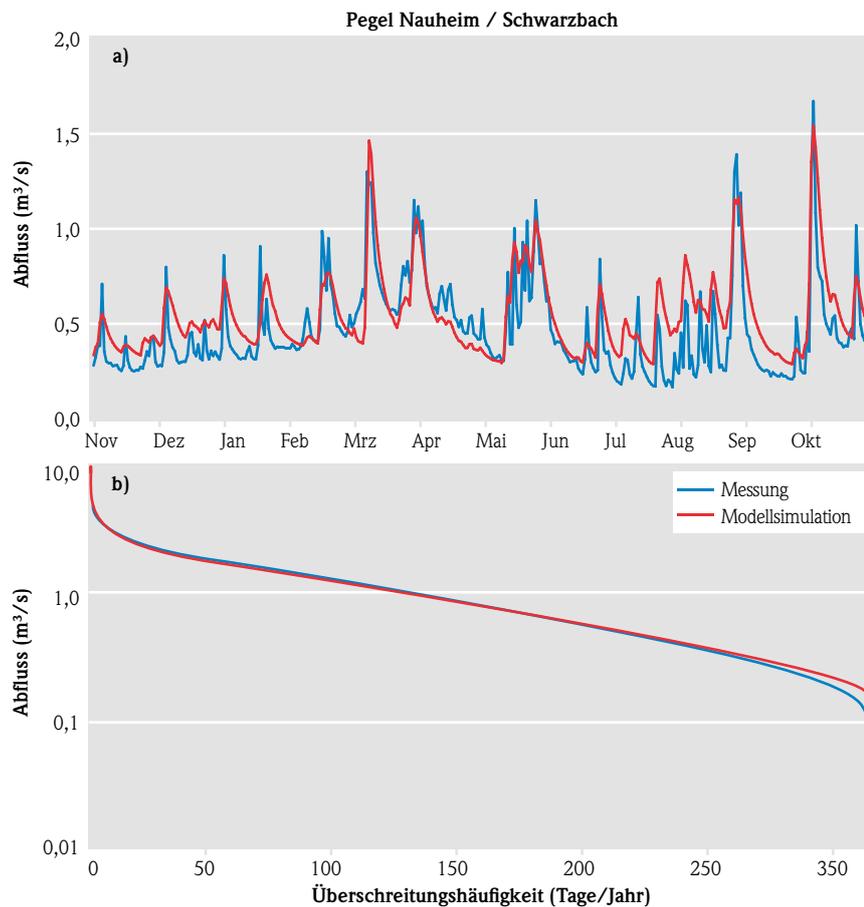


Abb. 3: a) Gemessene (blau) und simulierte (rot) Abflüsse am Pegel Nauheim/Schwarzbach für das Abflussjahr 2006 und (b) gemessene und simulierte Abflussdauerlinien für die Abflussjahre 1981–2010

Exemplarisch lässt sich dies anhand der Validierungsergebnisse der Pegel Nauheim/Schwarzbach (Beispiel für eine eher mäßige Modellanpassung) und Etzelmühle/Salzböde (Beispiel für eine gute Modellanpassung) veranschaulichen.

Der Pegel Nauheim (Einzugsgebietsgröße: ca. 135 km^2) befindet sich in der Rheinebene und ist durch gedämpfte Abflussspitzen gekennzeichnet, die u. a. auf Böden und Porengrundwasserleiter im Einzugsgebiet mit hohen vertikalen Durlässigkeitsbei-

Langen und Mörfelden-Walldorf), deren Einleitungen bereits zu einer relativ hohen Abflussspende im Niedrigwasserbereich führen. Daraus resultiert, dass das Modell das Abflussniveau in Zeiträumen mit geringeren gemessenen Abflüssen überschätzt und die Rezession der Abflussganglinie nach Abflussereignissen teilweise nicht adäquat durch das Modell abgebildet werden kann. Auch die Abflussdauerlinie zeigt, dass die berechneten Abflüsse im Niedrigwasserbereich deutlich überschätzt werden (Abbildung 3b). Bei den Abflussdauerlinien ist zu beachten, dass die y-Achse

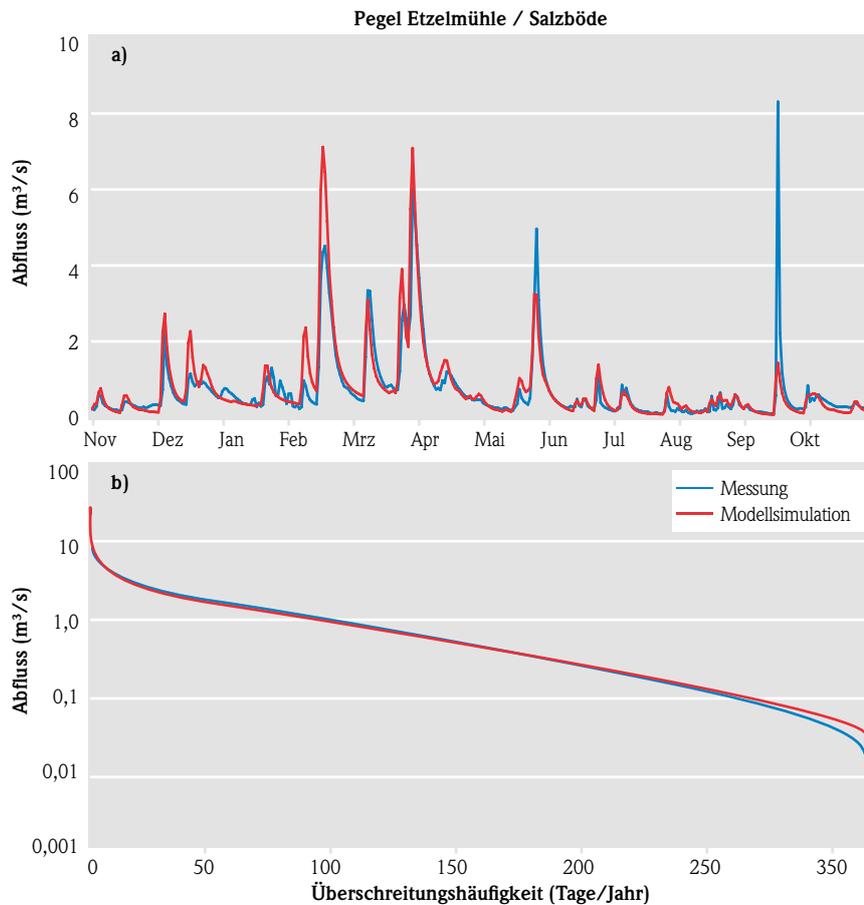


Abb. 4: (a) Gemessene (blau) und simulierte (rot) Abflüsse am Pegel Etzelmühle/Salzböde für das Abflussjahr 2006 und (b) gemessene und simulierte Abflussdauerlinien für die Abflussjahre 1981–2010

logarithmisch dargestellt wird, weshalb die Abweichungen im Bereich der niedrigen Abflüsse stärker zu Tage treten als im Bereich der hohen Abflüsse. Das erhöhte Abflussniveau im Modell könnte auch zusätzlich durch unbekannte und nicht im Modell berücksichtigte Wasserentnahmen in diesem stark anthropogen geprägten Einzugsgebiet verstärkt werden. Insgesamt kann aus genannten Gründe der Abfluss im Pegelinzugsgebiet nur mäßig gut simuliert werden (NSE: 0,61 und Log NSE: 0,65). Mit der gewählten Parametrisierung wird der MQ gut getroffen, während der MNOQ um ca. ein Drittel überschätzt wird.

Am Pegel Etzelmühle (Einzugsgebietsgröße: ca. 81 km²) werden gute Simulationsergebnisse erzielt (NSE: 0,84 und Log NSE: 0,85). Die Dynamik der Ereignisse wird gut wiedergegeben, teilweise stimmt allerdings das Ereignisvolumen nicht

vollständig mit dem gemessenen Abflussvolumen eines Ereignisses überein (siehe Abbildung 4a). Dies könnte in dem recht kleinen Einzugsgebiet auf Unterschiede zwischen den realen Gebietsniederschlägen und den ins Modell eingehenden Gebietsniederschlägen zurückzuführen sein. Die Kennwerte der Abflusssimulation sind denen der Abflussmessungen sehr ähnlich. An den Abflussdauerlinien (siehe Abbildung 4b) lässt sich erkennen, dass nur wenige, sehr niedrige gemessene Abflüsse von der Simulation nicht wiedergegeben werden können. Ansonsten passen die Dauerlinien gut zueinander.

Insgesamt zeigt die Validierung bei den meisten Pegeln zufriedenstellende bis gute Ergebnisse und lässt daher eine belastbare Verwendung der Modelldaten für die Regionalisierung der Mittel- und Niedrigwasserkennwerte zu.

4.3 Ermittlung und Korrektur der modellgenerierten Abflusskennwerte

Nach der Kalibrierung der Pegel wurde für jedes der LARSIM-Modelle ein Modelllauf durchgeführt, bei dem für jedes vorkommende Modellteilgebiet eine Abflussganglinie für die Abflussjahre 1981–2010 erstellt wurde. Aus diesen simulierten Abflussganglinien wurden für jedes Modellteilgebiet die Kennwerte MNO und MQ, jeweils für ein hydrologisches Jahr sowie für ein hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai–Oktober) und ein hydrologisches Winterhalbjahr (November–April), berechnet.

Die aus den simulierten Abflussganglinien über den Zeitraum 1981–2010 für jedes Modellteilgebiet berechneten Kennwerte wurden schließlich noch mit einem Korrekturfaktor beaufschlagt. Dieser Faktor wurde an jedem Pegel (kalibriert und nicht kalibriert) aus der Abweichung der Kennwerte des simulierten Abflusses von den Kennwerten des gemessenen Ab-

flusses ermittelt bzw. aus regionalen Untersuchungen und Erkenntnissen abgeleitet. Die Korrekturen der MQ-Kennwerte fallen dabei generell kleiner als die der MNO-Kennwerte aus. Die so ermittelten Mittel- und Niedrigwasserkenngrößen repräsentieren damit die Verhältnisse an den für die Regionalisierung verwendeten Referenzpegeln und schließen damit die durch die Pegel erfasste anthropogene Überprägung der hydrologischen Verhältnisse (z. B. durch Wassereinleitungen und -entnahmen) mit ein.

Die Kennwerte für die Flusslängsschnitte der nicht explizit im LARSIM-Modell berücksichtigten großen Flussläufe Rhein, Main, Werra und Weser wurden durch die Interpolation von Pegeldaten im gleichen Betrachtungszeitraum ermittelt und ergänzt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch für die Abflussspende MQ die mit der Modellsimulation ermittelten Kennwerte.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durch die Wasserhaushaltsmodellierung mit den Tageswert-basierten hessischen LARSIM-Modellen ermittelten Mittel- und Niedrigwasserkennwerte liegen flächendeckend für die Modellteilgebiete vor. Da die LARSIM-Modellabdeckung jedoch nicht vollständig mit dem zwischenzeitlich fortgeschriebenen hessischen Flächenverzeichnis übereinstimmt und einige wenige hessische Einzugsgebiete nicht vom LARSIM-Modell erfasst werden, ist derzeit noch eine Überfüh-

rung und Ergänzung von fehlenden Kennwerten auf das aktualisierte hessische Flächenverzeichnis mittels Übertragungsfunktionen erforderlich. Danach erfolgt eine abschließende Validierung der Kennwerte mit ergänzenden unabhängigen Messdaten aus dem hessischen Niedrigwassermessnetz, bevor die Kennwerte im Fachinformationssystem Hessische Abwasseranlagen veröffentlicht werden können.

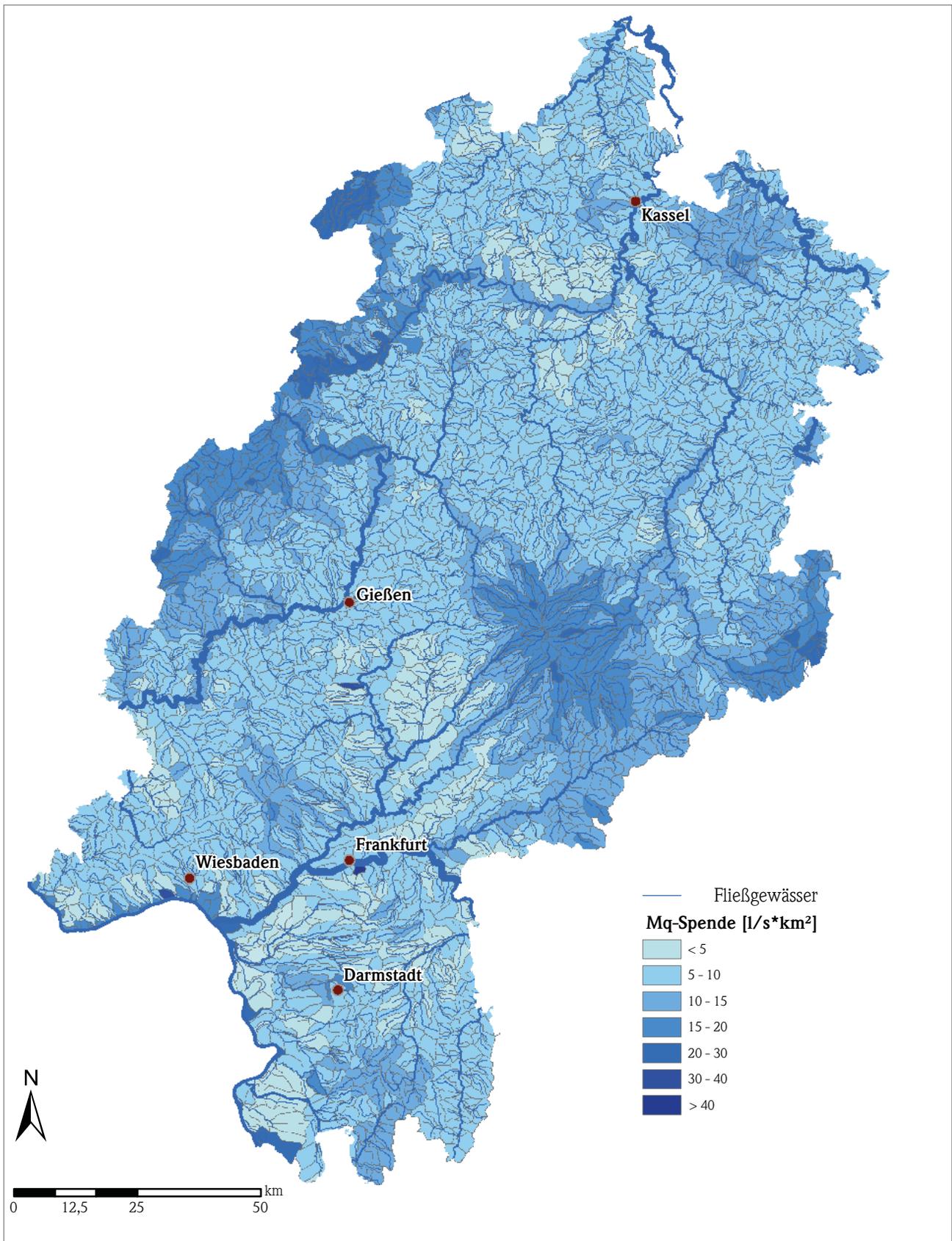


Abb. 5: Übersichtskarte der mit den drei hessischen LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen ermittelten Mq-Spenden

6 Literaturverzeichnis

- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie 11: 119 S., Freiburg.
- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K. und HAAG, I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (9), S. 509–519.
- DWA (2009): Regionalisierung von Niedrigwasserkenngrößen. DWA-Themen HW-3.1. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hef. 6.
- GUSTARD, A. & DEMUTH, S. (2009): Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50, WMO-No. 1029.
- LIEBERT, J., IHRINGER, J., PREUB, P. & HAAG, I. (2016): Berücksichtigung von Kläranlageneinflüssen bei der Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasser-Kennwerten für Baden-Württemberg. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 37.16 „Wasserressourcen – Wissen in Flussgebieten vernetzen“, DOI:10.14617/for.hydrol.wasbew.37.16.
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A. and GRATZKI, A. 2013: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a highresolution gridded daily data set (HYRAS), Vol. 22(3), p 235–256, DOI:10.1127/09412948/2013/0436.
- SMAKHTIN, V.U. (2001): Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240, 147–186.