

Nachhaltige Speicherbewirtschaftung durch Integrierte Wasserhaushaltsmodellierung mit MIKE SHE während langjähriger Trockenperioden

Philipp Huttner, Katja Eulitz und Patrick Keilholz

Zusammenfassung

Der fortschreitende Klimawandel erfordert eine angepasste Speicherbewirtschaftung von großen Seenspeichersystemen in Deutschland. Hält eine Niedrigwasserperiode über mehrere Jahre an, wie es in den Jahren 2018 bis 2020 der Fall war, reichen die bestehenden Speichervolumina nicht mehr aus, um ausreichend Wasser aus feuchten Jahren aufzunehmen und dauerhaft die erforderlichen Wasserabgaben zu gewährleisten. Um eine bessere Entscheidungsgrundlage für die Wasserbehörden auf Bundeslandebene zu schaffen, können „integrierte Wasserhaushaltsmodelle“ eingesetzt werden. Da diese Modellansätze alle Kompartimente des Wasserkreislaufs einschließlich des Grundwassers sowie der fließgewässerscharfen Abbildung der Oberflächenabflussprozesse inkl. gesteuerter Querbauwerke simulieren, können vor allem im Hinblick auf die Niedrigwasserproblematik alle notwendigen Ergebnisse ermittelt werden.

1 Fragestellung und Modellgebiet

1.1 Speicherbewirtschaftung und Niedrigwasserproblematik

Die Speicherbewirtschaftung erforderte bereits in der Vergangenheit eine ausreichende Kenntnis aller relevanten Wasserhaushaltsgrößen und vor allem deren Schwankung über mehrere Jahre hinweg. Idealerweise erfolgt die Bemessung des notwendigen Speichervolumens bei der Errichtung bzw. der Planung mittels des sogenannten Folge-Scheitel-Algorithmus, kurz FSA (engl.: „Sequent-Peak-Algorithm“, kurz: SPA). Hier werden alle realen Zuflüssen mit allen realen Abflüssen inkl. geplanter Abgaben aufsummiert. Je größer und komplexer das zu bewirtschaftende Einzugsgebiet, desto schwieriger gestaltete sich die Auswertung. Deshalb mussten oft vereinfachte Annahmen für messtechnisch schwierig zu erfassende Größen wie Verdunstung und Grundwasserzufluss getroffen werden.

Für die kurzfristige Steuerung eines Speichers während Hochwassersituationen reduzieren sich die relevanten Eingangsdaten, da Größen wie Verdunstung und Grundwasserzufluss meist eine zu vernachlässigende Rolle gegenüber dem konzentrierten Direktabfluss in Gewässern, dem Niederschlag und dem lateralen Oberflächenzufluss haben. Für diese Bewirtschaftung reichen deshalb vereinfachte konzeptionelle Wasserhaushaltsmodelle, welche meist GIS-basiert aufgebaut werden und viele Größen des Wasserhaushalts auf Basis simpler Linearspeicher abbilden (z.B. ArcEGMO, mGROWA18, GWN-BW).

Bei (langjährigen) Dürreperioden gewinnen diese auf der hydrologischen Zeitskala langsam fließenden Komponenten aber an Bedeutung für eine langfristig orientierte nachhaltige Seenspeicherbewirtschaftung. Der Basisabfluss muss für jedes Jahr je nach hydrologischen Gegebenheiten exakt berechnet werden. Deshalb sind eine Modellierung des Grundwasserleiters und eine Kalibrierung an Grundwasserständen notwendig. Die Modelleinschränkungen der konzeptionellen Linearspeicher-Modelle können keine zufriedenstellenden Ergebnisse mehr liefern. Durch den Einsatz von „integrierten Wasserhaushaltsmodellen“ können alle realen Komponenten des

Wasserkreislaufs auf Basis physikalischer Ansätze mit beliebiger räumlicher und zeitlicher Auflösung simuliert und bereitgestellt werden. Im Rahmen eines Projektbeispiels im Auftrag des Landesamts für Umwelt Brandenburg W23 (LfU BB) in der westlichen Uckermark ermöglichte der Einsatz des integrierten Wasserhaushaltsmodells MIKE die Quantifizierung der relevanten Prozesse und Bilanzgrößen zur Bewirtschaftung des Seen-Speichersystems „Hardenbecker Haussee, Boitzenburger Küchenteich und Schumellensee“.

1.2 Untersuchungsgebiet

In der westlichen Uckermark an der Grenze zwischen Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern befindet sich der Seenspeicher „Hardenbecker Haussee, Boitzenburger Küchenteich und Schumellensee“ (kurz: „HKS-System“). Das Seen-Speichersystem ist Teil eines komplexen, anthropogen geprägten Seensystems im Einzugsgebiet (EZG) der Ucker im Landkreis Uckermark. Die oberirdische Wasserscheide zwischen den EZG Ucker und Havel verläuft westlich des Hardenbecker Haussees, die gleichzeitig die Hauptwasserscheide zwischen der Ost- und Nordsee bildet. Das Gebiet ist hydrogeologisch sehr komplex und durch eine starke Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässersystem geprägt. Die Wasserabgaben an die beiden konkurrierenden Teileinzugsgebiete erfolgen manuell über zwei Schützenwehre, welche teilweise sowohl ober- als auch unterschlächtig gefahren werden. Neben der Frage nach dem real verfügbarem Wasserdargebot mussten ebenfalls die Wassernutzungen geklärt werden, welche neben kleineren Grundwasserentnahmen auch die Ermittlung der ökologischen Mindestabflüsse sowie die Anforderungen der Fischerei und für touristische Bootsfahrten umfassen. Im Auftrag des LfU Brandenburg wurde ein integriertes Wasserhaushaltsmodell aufgebaut, um die Fragen zum verfügbarem Wasserdargebot und der Optimierung der Speicherbewirtschaftung beantworten zu können (Huttner 2022). Hierfür wurde das Betrachtungsgebiet im ersten Schritt in vier Teileinzugsgebiete (TEZG) unterteilt, um die Zu- und Abflüsse für das HKS-System richtig abbilden zu können (Abb. 1).

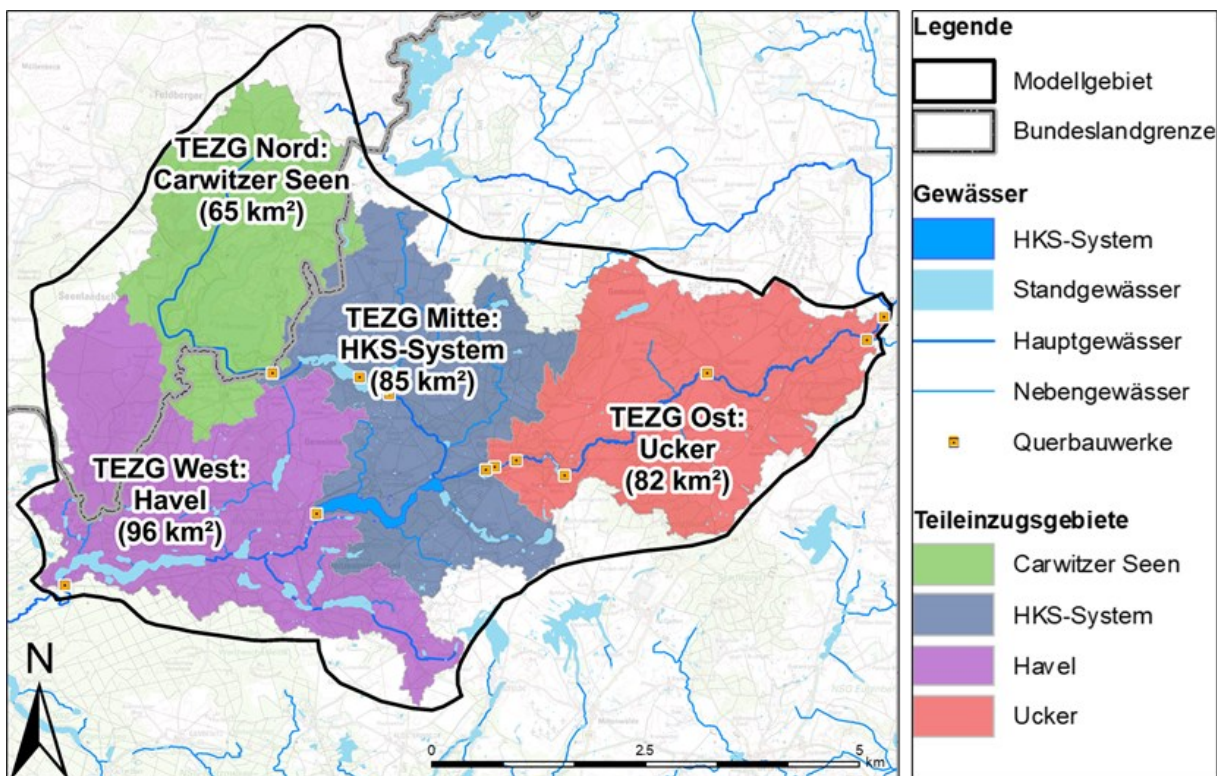


Abb. 1 Lage und Ausdehnung der vier betrachteten Teileinzugsgebiete

2 Verwendetes Integriertes Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE

2.1 Funktionalität

Neben den herkömmlichen konzeptionellen hydrologischen Modellen, welche die letzten Jahrzehnte vorrangig auf Bundeslandebene eingesetzt wurden, ermöglichen integrierte Wasserhaushaltsmodelle deutlich detailliertere und belastbarere Ergebnisse, besonders für Niedrigwasserfragestellungen. Eine der heutzutage zuverlässigsten Methoden der indirekten Ermittlung des Dargebots ist die Simulation mit integrierten Wasserhaushaltsmodellen. Hier werden alle Kompartimente des Wasserkreislaufs vollständig abgebildet und auf Grundlage der physikalischen Gesetze numerisch berechnet. Im Gegensatz zu den bisher gängigen Verfahren, werden die oberflächennahen Abflussprozesse nicht nur auf den Abfluss der Pegelmessstelle des nächstgelegenen Hauptgewässers kalibriert und die Parameter regionalisiert, es erfolgt auch eine stationäre und instationäre Kalibrierung auf Grundwasserstände in räumlich verteilten Grundwassermessstellen. Der Unterschied zwischen physikalisch basierten Modellen und den gängigen konzeptionellen Linearspeicher-Ansätzen besteht vor allem in der Diskretisierung und in der Nachbildung des Direktabflusses und den Prozessen in der ungesättigten und gesättigten Zone.

In den gängigen N-A-Modellen erfolgt ein Direktabschlag von Niederschlag unmittelbar an die Stelle der Pegelmessstelle des nächstgelegenen Hauptgewässers. Der räumliche Fließprozess und die Möglichkeit der Versickerung im Gebiet werden nicht abgebildet. Bei physikalisch basierten Modellen erfolgt ein hydronumerischer Ansatz, sodass nicht nur die echten hydraulischen Fließgesetze berücksichtigt werden (Berücksichtigung von Aufstau und Rückstau), sondern auch in jeder Rechenzelle geprüft wird, ob die maximale Infiltrationskapazität bereits erreicht ist oder ein Teil des diffusen Oberflächenabflusses wieder versickern kann. So kann Wasser aus versiegelten Flächen, bzw. Böden mit geringer Durchlässigkeit, in Bereichen mit Oberböden höherer hydraulischer Leitfähigkeit wiederversickern. Das Wasser kann also auf dem Weg zum Oberflächengewässer wieder versickern und andernorts wieder zur Grundwasserneubildung beitragen. Zusätzlich wird der Effekt der Rückkopplung von aktuellem Grundwasserstand auf die aktuelle Grundwasserneubildung mitberücksichtigt, welche vor allem bei Niedrigwassersituationen einen großen Einfluss hat.

Eine weitere Stärke der physikalisch basierten Modelle bezieht sich auf den Prozess der sättigungsabhängigen Leitfähigkeit in der ungesättigten Bodenzone. Im integrierten Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE (Graham und Butts 2005) wird die 1D-Richards-Gleichung berechnet, sodass die Saugspannungskurve für jeden Bodentyp abgebildet wird. So können im Sommer die Bodensäulen austrocknen und damit die Infiltrationsfähigkeit hemmen sowie die Bildung von Direktabfluss erhöhen.

Folgende Prozesse werden vollständig diskretisiert für die definierte Rasterzellauflösung simuliert:

- Niederschlag, Evaporation und Transpiration auf der Oberfläche (Kristensen und Jensen 1975),
- sättigungsabhängige Infiltration und Kapillaraufstieg innerhalb der schichtenbasierten ungesättigten Bodenzone auf Basis des 1D-Richards-Ansatzes inkl. Abbildung der Bodensättigungskurve,
- lateraler 2D-Oberflächenabfluss,

- fließgewässerscharfe 1D-Abflusskonzentration im integrierten Fließgewässermodell MIKE Hydro River und Interaktion Gewässer/Grundwasser,
- 3D-Grundwasserfluss auf Basis der vollständigen Darcy-Gleichung inkl. punktueller Brunnenentnahmen und Gewässer-Grundwasseraustausch für jede einzelne Modellzelle.

2.2 Aufbau

Integrierte Wasserhaushaltsmodelle werden idealerweise an der Umhüllenden von ober- und unterirdischem Einzugsgebiet abgegrenzt, sodass möglichst wenige seitliche Zuflussrandbedingungen angenommen werden müssen und ein geschlossenes System entsteht (Abb. 2). Im Idealfall sollten dabei Niederschlag und potentielle Verdunstung die einzigen Randbedingungen sein. Neben den Eingangsdaten zur Modellierung des Wasserhaushalts wird zusätzlich ein fließgewässerscharfes 1D-Hydraulikmodell im integrierten Modul MIKE Hydro River auf Basis von Fließquerschnitten und linearen Gewässertrassen aufgesetzt. Für die Abflussprozesse in der gesättigten Bodenzone wird ein vollständig diskretisiertes 3D-Grundwassermodell aufgebaut, anhand der vorliegenden Stratigraphie in Schichten unterteilt und mit Parametern für die hydraulische Leitfähigkeit und Speicherkoeffizienten versehen (Abb. 2).

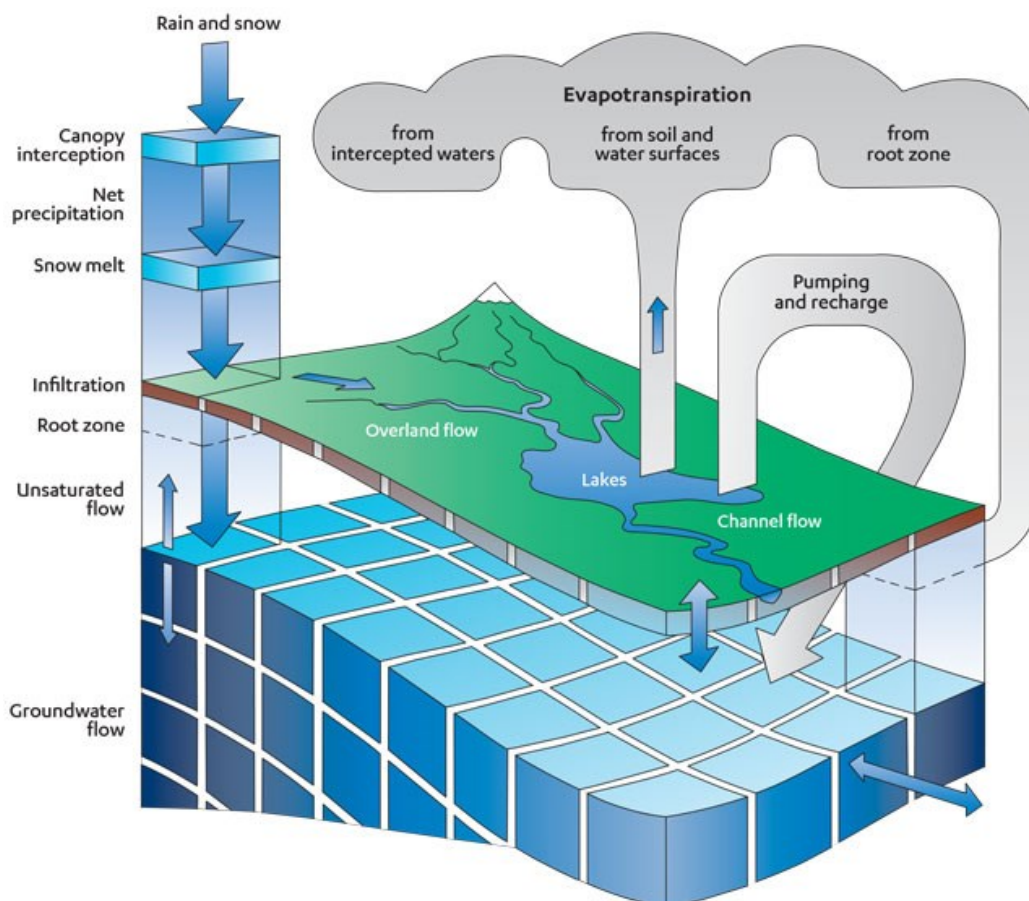


Abb. 2 Modellsystem MIKE SHE inkl. der berechenbaren Wasserhaushaltskomponenten

2.3 Kalibrierung

Im ersten Schritt wurde das Modell auf eine gemeinsam mit dem LfU Brandenburg durchgeführte großräumige Stichtagsmessung (inkl. Wasserstands-/Abflussmessungen und Grundwasserstandsmessungen) bei stabilen Niedrigwasserverhältnissen stationär kalibriert. Anschließend erfolgte mit dem integrierten Wasserhaushaltsmodell eine instationäre Kalibrierung für den Zeitraum Wasserwirtschaftsjahre 2006 bis 2020. Hierbei konnten sowohl Abflüsse an verfügbaren

Pegelmessstellen des Oberflächengewässersystems (Abb. 3) als auch die absoluten Höhen und steigenden sowie fallenden Trends der Ganglinien an mehreren Grundwassermessstellen abgebildet werden (Abb. 4). Somit wurden alle realen Prozesse des Wasserkreislaufs korrekt wiedergegeben und die ober-/unterirdischen Wasserdarangebote können bestimmt werden.

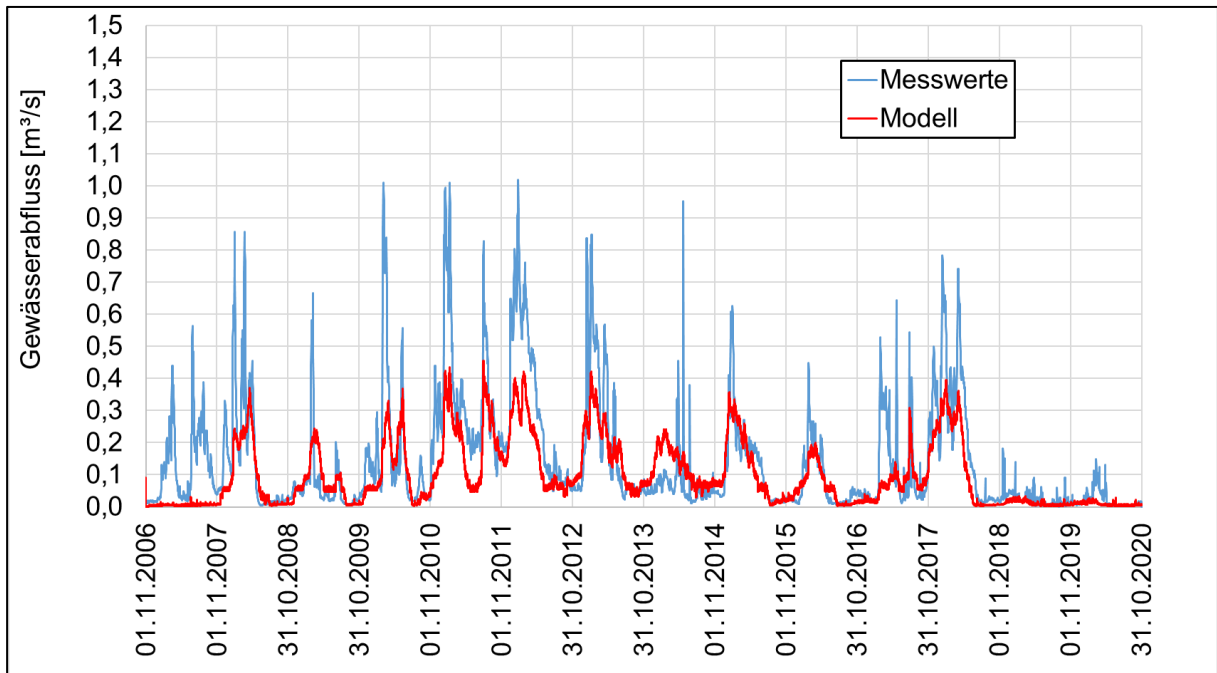


Abb. 3 Gemessene und simulierte Abflüsse eines nahegelegenen Gewässerpegels

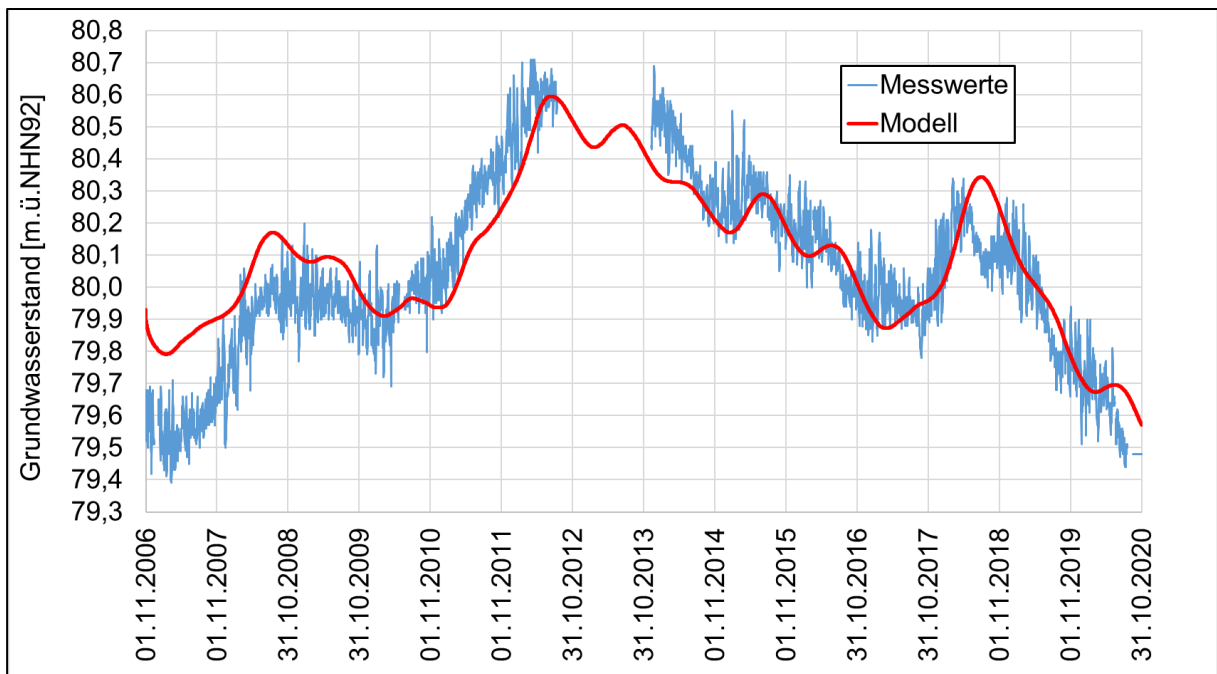


Abb. 4 Gemessene und simulierte Grundwasserstände einer nahe gelegenen Messstelle

3 Projektbezogene Leistungen

3.1 Ermittlung der Wasserbedarfe

Für eine fundierte Speicherbewirtschaftung müssen neben den geplanten bzw. möglichen Soll-Abgaben ebenfalls die erforderlichen Wasserbedarfe ermittelt werden. Hierfür wurden alle bekannten Entnahmen aus den Oberflächenwässern und dem Grundwasser recherchiert. Ergänzend wurden Stichtagsmessungen durchgeführt und in Kombination mit dem kalibrierten Modell ökologische Mindestabflüsse gemäß der Handlungsempfehlung nach LAWA ermittelt. Zusätzlich wurden anhand der mit MIKE SHE erstellten Bilanzen der Einzugsgebiete die erforderlichen Abgaben in die beiden unterstromigen Teileinzugsgebiete nach Osten und Westen plausibilisiert und mit Hilfe der projektbegleitenden Arbeitsgruppe abgestimmt.

3.2 Ermittlung des Dargebots

Gegenüber dem Wasserbedarf steht das tatsächlich verfügbare Wasserdargebot. Für die Speicherbewirtschaftung des HKS-System ist das verfügbare Dargebot an Oberflächenwasser maßgebend. Durch die sehr starke Anbindung des Seen-Speicher-Systems an das Grundwasser ist allerdings auch die im Einzugsgebiet angesetzte Grundwasserneubildung bzw. das Dargebot an Grundwasser von besonderer Bedeutung. Der unterirdische Grundwasserzufluss nimmt ca. 50% des verfügbaren Gesamtdargebots ein.

Die mit dem Landesmodell ArcEGMO ermittelten Grundwasserneubildungsraten ergeben für das betrachtete Untersuchungsgebiet allerdings einen langjährigen Mittelwert von -4 [mm/Jahr] und sind somit physikalisch nicht verwertbar. Folglich konnten die Grundwasserneubildungsraten von ArcEGMO nicht für eine Grundwassermodellierung verwendet werden.

Das integrierte Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE simuliert die Grundwasserneubildung als internen Fluss infolge aller realen Einflussgrößen. Dieser integrierte Ansatz liefert plausible und belastbare Ergebnisse, da hier auch die Reaktionen der Grundwasserstände auf die berechnete Grundwasserneubildung mit instationär kalibriert werden. Abb. 5 zeigt beispielhaft die räumlich hohe Auflösung für langjährige Mittelwerte im 100 m Raster.

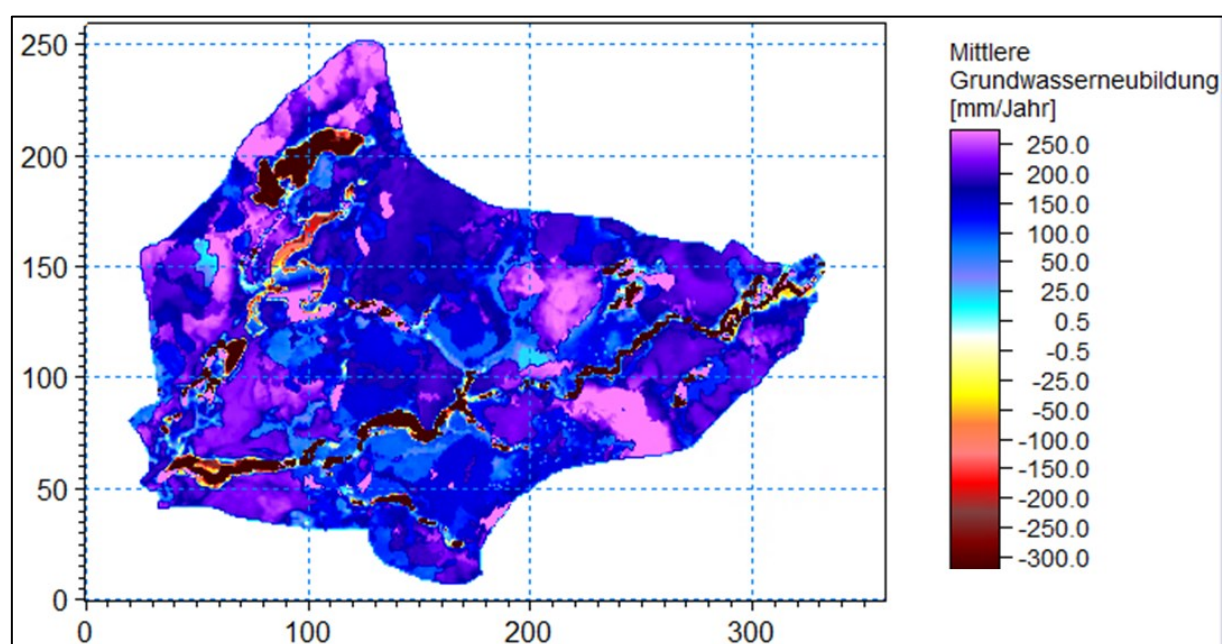


Abb. 5 Räumlich hoch-aufgelöste mittlere Grundwasserneubildungsraten in [mm/Jahr]

Durch die integrierte Kopplung zwischen 1D-Hydraulik Modell und 3D-Grundwassermodell kann für jeden beliebigen Flussabschnitt in jeder 100 x 100 m Rasterzelle und für jeden Zeitschritt der Austausch zwischen Gewässer und Grundwasser ermittelt werden (Abb. 6).

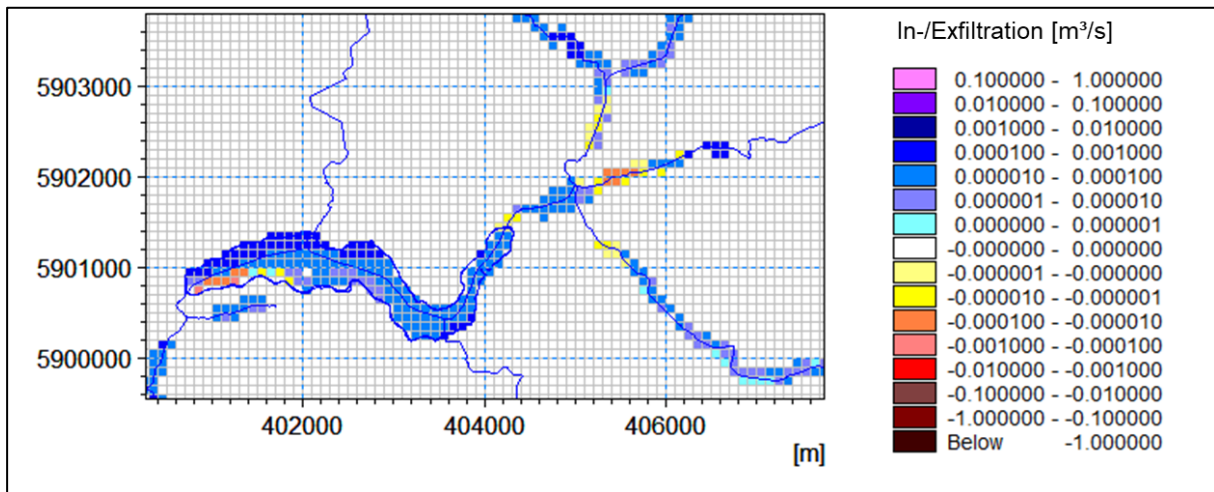


Abb. 6 Ermittlung des Gewässer-Grundwasseraustauschs rasterbasiert für jede einzelne Modellzelle [m^3/s] (gelb-rot = Exfiltration von Gewässer in Grundwasser / blau-lila = Infiltration von Grundwasser in Gewässer)

Somit können nicht nur das Oberflächenwasserdargebot belastbar ermittelt werden, sondern auch geschlossene Bilanzen für die jeweils betrachteten Teileinzugsgebiete erstellt werden. Die Bilanzflüsse werden zuerst je Zeitschritt hochaufgelöst ausgewertet und anschließend zu Monats- bzw. Wasserwirtschaftsjahressummen zusammengefasst. Diese können dann je Komponente aufsummiert werden, um Defizite und Überschüsse zu identifizieren (Abb. 7). Hierdurch wird ein vertieftes hydrologisches Verständnis der Gebietsprozesse geschaffen, um die Handlungsempfehlungen entsprechend anpassen zu können.

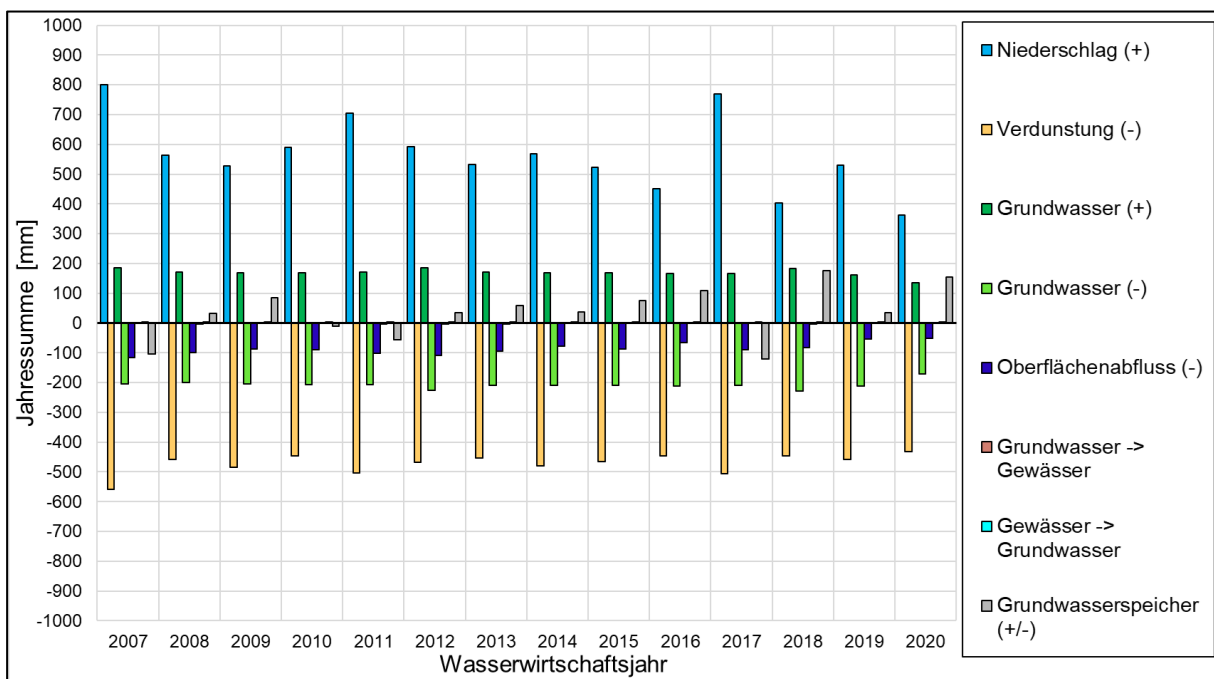


Abb. 7 Summen aller Bilanzkomponenten für das TEZG Mitte des HKS-Systems in [mm/a]

3.3 Empfehlungen zur Speicherbewirtschaftung und Prognoseszenarien

Die modelltechnisch erzeugten Zeitreihen wurden mit Hilfe des Folge-Scheitel-Algorithmus analysiert, um einen Mindestwasserabfluss zu ermitteln, welcher auch in langen Trockenperioden dauerhaft zur Verfügung gestellt werden kann. Die somit geschaffene Datengrundlage stellte die Basis für die finalen Handlungsempfehlungen dar, um eine belastbare und nachhaltige Steuerung des HKS-Seenspeichers zu gewährleisten. Mit Hilfe dieses Ansatzes konnten die in Tab. 1 aufgelisteten Empfehlungen zur Speicherbewirtschaftung gegeben werden.

Tab. 1 Empfehlungen zur Speicherbewirtschaftung des HKS-Systems in Abhängigkeit vom aktuellen Wasserstand im Speichersystem.

Wasserstand [mü.NHN92]	Speicherlamelle [cm]	Situation	Gesamtabfluss [l/s]
≥ 68,43	≥ 80	Hochwasser	situationsabhängig
68,28 bis 68,43	65 bis 80	Mittelwasser	220
≤ 68,28	≤ 65	Niedrigwasser	155

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Entwicklung des Speichervolumens in m³ in rot (linke Achse) und die geplanten Abflüsse in m³/s in blau (rechte Achse). Es ist erkennbar, dass die Gesamtabgabe so geregelt wurde, dass der Mindestabfluss immer ermöglicht wird und das Speichersystem nicht leerläuft. In den trockenen Jahren 2018, 2019 und 2020 sinkt das Speichervolumen allerdings auf einen sehr niedrigen Wert, wobei das Mindeststauziel nicht unterschritten wird.

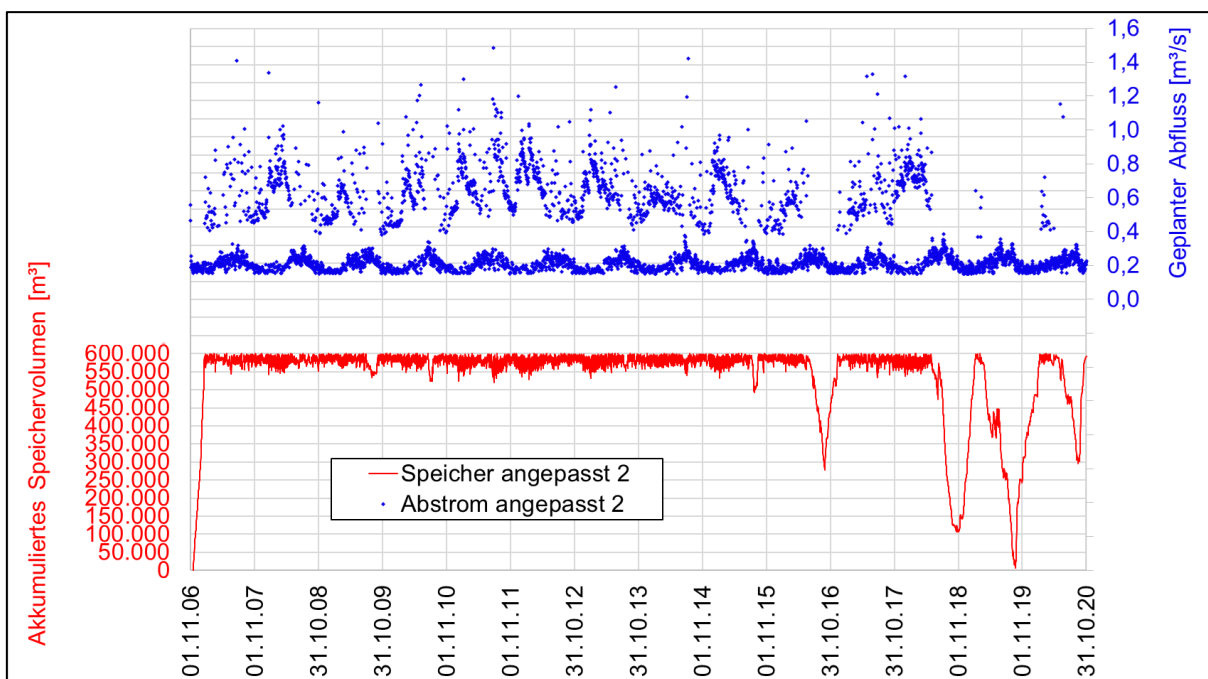


Abb. 8 Optimierte zeitliche Entwicklung des Speichervolumens und möglicher Abfluss für den Niedrigwasserzustand

Da die Wasserabgaben nach Westen in das TEZG Havel von besonderer Bedeutung waren wurden zusätzliche Prognoseszenarien gerechnet, wie sich die Abflüsse und Wasserstände im TEZG Havel ohne Überleitung in das westliche Einzugsgebiet entwickeln würden. In der nachfolgenden Abbildung 9 ist zu erkennen, dass in den Sommerhalbjahren 2018 und 2019 die Niedrigwasserabflüsse auch ohne Überleitung durch die grundwasserbürtigen Zuflüsse ausreichend gestützt werden könnten.

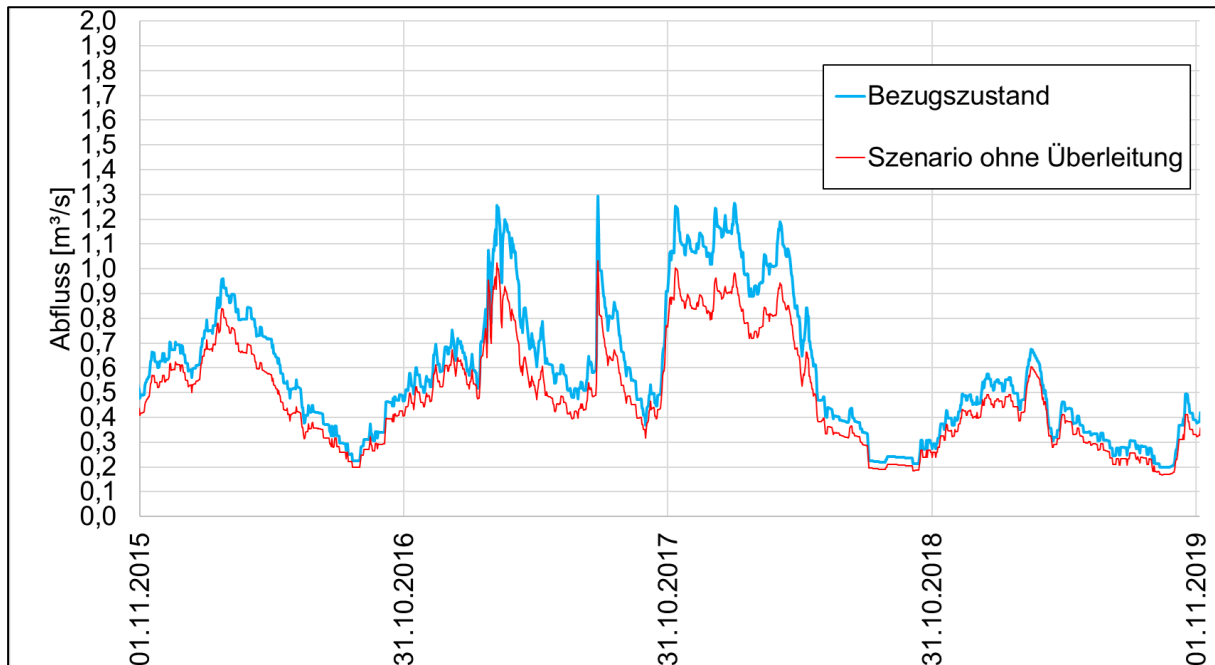


Abb. 9 Berechnete Gewässerabflüsse am Gebietsauslass des westlichen TEZG Havel

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Anwendung eines integrierten Wasserhaushaltsmodells wie MIKE SHE konnten die messtechnisch nur schwierig zu erfassenden Größen Grundwasserneubildung und Grundwasser-/Gewässeraustauschrate berechnet werden. Auf Grundlage der verfügbaren Daten und der Modellergebnisse konnten geschlossene Wasserbilanzen für die vier betrachteten Teileinzugsgebiete und das Seenspeichersystem erstellt werden. Der integrierte Ansatz der gekoppelten Modellierung ermöglicht im Vergleich zu den herkömmlichen Wasserhaushaltsmodellierungen nicht nur die Differenzierung innerhalb eines Einzugsgebiets in beliebig hohe zeitliche und räumliche Auflösung, sondern gewährleistet auch eine deutlich höhere Zuverlässigkeit der berechneten Grundwasserneubildung, da Verdunstung und Grundwasserneubildung separat berechnet werden. Alle Kompartimente können in beliebige Teilflächen unterteilt und bilanziert werden. Dieser Modellansatz ermöglicht deutlich belastbarere Werte für die Grundwasserneubildung und das verfügbare Wasserdargebot, sodass die Behörden z.B. dazu befähigt werden, langfristige nachhaltige Entscheidungen bei der Vergabe neuer Wasserrechte zu treffen. Besonders für Einzugsgebiete mit komplexer Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktion, stellt die integrierte Wasserhaushaltsmodellierung für die Behörden und Akteure ein wichtiges Werkzeug da, um in Zukunft belastbare Entscheidungen zu treffen und ein nachhaltiges Wassermanagement zu garantieren. Diese wäre im Einklang mit dem vom DVGW geforderten modellgestützten Entscheidungssystemen. In der Forderung des DVGW (DVGW 2020) wird u.a. beschrieben, dass bei der Entwicklung und Umsetzung langfristiger Zukunftskonzepte digitale Lösungen eine erhebliche

Unterstützung sein werden. Dabei werden auch Prognose- und Managementmodelle für ganze Einzugsgebiete vorgeschlagen.

Integrierte Wasserhaushaltsmodelle können als dauerhafte Bewirtschaftungsmodelle betrieben werden. Hierfür können die Modelle bspw. alle 5 Jahre fortgeschrieben und verbessert werden. Im Rahmen der kontinuierlichen Fortschreibung kann eine Nachkalibrierung und Erfassung baulicher Veränderungen oder Steuermechanismen erfolgen.

Durch den vollständig diskretisierten Ansatz ist das MIKE SHE Modell ebenfalls in der Lage, auf Basis von Niederschlagsdaten, Starkregenszenarien zu rechnen, und somit Ergebnisse für maximale Wassertiefen, Überschwemmungsflächen und die Steuerung des Seenspeichers während eines Hochwasserfalls zu liefern.

Literatur

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2020), Zukunftsbilder 2030 bis 2100, DVGW Wasser-Impuls, DVGW.

Graham, D.N. und Butts, M. B. (2005). Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE, Watershed Models, Eds. V.P. Singh & D.K. Frevert, CRC Press, S. 245-272.

Huttner, P., (2022). Untersuchungen zur Wasserbereitstellung für die Einzugsgebiete Ucker und Havel aus dem Seenspeichersystem Hardenbecker Haussee, Boitzenburger Kuchenteich und Schumellensee (im Auftrag des LfU Brandenburg, W23).

Kristensen, K., und Jensen, S. (1975). A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration, Nordic Hydrology 6, S. 170-188.

Anschrift der Verfasser

Philipp Huttner
DHI WASY GmbH
Dingolfingerstrasse 15, D-81673 München
phhu@dhigroup.com

Katja Eulitz
DHI WASY GmbH
Volmerstraße 8, D-12489 Berlin
keu@dhigroup.com

Prof. Patrick Keilholz
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon
Keßlerplatz 12, D-90489 Nürnberg
patrick.keilholz@th-nuernberg.de