Wasserhaushaltsmodellierung: vom Modellvergleich zur Modellauswahl

1 Zielstellung und Hintergrund

Der Wasserhaushalt der sächsischen Bergbau- und Bergbaufolgeregionen ist durch die jahrzehntelange Kohleförderung und die damit verbundenen Eingriffe in den Landschafts- und Wasserhaushalt nachhaltig verändert worden. Auch über den Kohleausstieg im Jahr 2038 hinaus werden die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen des Bergbaus über mehrere Jahrzehnte fortwirken. Zusätzlich steigt aufgrund des Klimawandels die Wahrscheinlichkeit des häufigeren Auftretens ausgeprägter Trockenperioden. Wasserhaushaltsmodellierungen sind ein wesentliches Instrument, um solche anthropogen Einflüsse abbilden, analysieren und bewerten zu können. Sie ermöglichen die Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf die Wasserressourcen zu quantifizieren und wasserwirtschaftliche Planungs- und Entscheidungsprozesse zu unterstützen.

Die derzeit in den sächsischen Bergbaufolgeregionen etablierten Bodenwasserhaushalts- und Grundwasserströmungsmodelle (nachfolgend BWHM bzw. GWSM) sind proprietär, wodurch der Zugang zum Quellcode und damit zur implementierten Modelllogik eingeschränkt ist. Quelloffene Softwarelösungen bieten hingegen die Möglichkeit, Modellberechnungen transparent nachzuvollziehen, Modellierungswerkzeuge individuell an spezifische Anforderungen anzupassen und Lizenzkosten zu reduzieren. Um geeignete quelloffene Alternativen zu etablierter kommerzieller Modellsoftware zu identifizieren, ist eine fundierte Bewertung ihrer Funktionalitäten, Einsatzmöglichkeiten und Grenzen erforderlich.

Ein Modellvergleich und die Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung zur Auswahl geeigneter BWHM und GWSM für ein spezifisches Modellierungsvorhaben sollen einen Beitrag zur Verringerung der behördlichen Abhängigkeit von Anbietern lizenzbasierter Modellsoftware leisten. Im Modellvergleich wurden quelloffene und proprietäre Modelle hinsichtlich ihres Funktionsumfangs gegenübergestellt und somit funktionale Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht. Schwerpunkte der Bewertung waren dabei die Abbildung relevanter physikalischer Prozesse des Wasserhaushalts und anthropogener Eingriffe sowie die Kopplungsfähigkeit der Modelle.

2 Methodik

Eine Literaturrecherche zu BWHM und GWSM und ihren Charakteristika bildete die Grundlage dieser Arbeit. Im weiteren Verlauf wurden Erkenntnisse aus dem Projekt Grundwassermodell Lausitz (GWML) einbezogen. Ziel des GWML ist die Entwicklung eines gekoppelten Modells aus BWHM und GWSM als Steuerungs- und Bewertungsinstrument für das Wassermanagement im Lausitzer Revier. Im Rahmen des Projekts GWML wurden in einem Modellvergleich verschiedene BWHM und GWSM anhand eines

einheitlichen Kriterienkatalogs systematisch verglichen.

Diese Arbeit gliedert sich in drei Teile. In den ersten beiden Teilen wird der bestehende Modellvergleich um zwei Modelle erweitert und eine Neubewertung mit einem modifizierten Kriterienkatalog vorgenommen. Dieser fokussiert fachliche Modellaspekte und berücksichtigt weniger technische Aspekte des Pre- und Postprocessings. Der dritte Teil bezieht sich auf die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungsinstruments zur initialen Modellauswahl für ein konkretes Modellierungsvorhaben. Da sich die Anwendung zur Entscheidungsunterstützung noch in der Entwicklung befindet, wird in Kapitel 2.3 zunächst der konzeptionelle Ansatz vorgestellt.

2.1 Erweiterung des bestehenden Modellvergleichs

Im ersten Teil wurde der bestehende Modellvergleich des GWML um zwei frei verfügbare und quelloffene Modelle erweitert (Auflistung aller verglichenen Modelle in Tabelle 1 und Tabelle 2). Ergänzend bewertet wurden das BWHM Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS). Das BWHM wurde bereits erfolgreich mit dem GWSM MODFLOW 6 gekoppelt (Hughes et al., 2022). Darüber hinaus ist PRMS im Modellsystem GSFLOW mit MODFLOW-2005 gekoppelt (Regan & Nisowonger, 2021). Diese demonstrierten Kopplungen machen PRMS für den vorliegenden Modellvergleich interessant. Weiterhin wurde das physikalisch basierte hydrologische Modell ParFlow als GWSM bewertet. Ausschlaggebend für die Auswahl war insbesondere der integrierte Modellierungsansatz, der eine gekoppelte Simulation von Oberflächen- und Untergrundprozessen ermöglicht. Darüber hinaus erlaubt ParFlow eine physikalisch basierte Beschreibung der Strömung in der ungesättigten Zone mithilfe der Richards-Gleichung.

Die Bewertung erfolgte anhand des Kriterienkatalogs des GWML und umfasste allgemeine und fachspezifische Modelleigenschaften. Bei den BWHM wurden allgemeine Kriterien (z.B. Lizenz, modularer Aufbau, …), Software, Modelldokumentation, Raum-Zeit-Struktur, physikalische Prozessabbildung, anthropogene Komponenten, Datenschnittstellen, Schnittstellen für Kopplungen, Eignung für Langzeitsimulationen und Möglichkeiten zur Kalibrierung bewertet. Bei den GWSM wurden allgemeine Kriterien, Software, Modelldokumentation, Raum-Zeit-Struktur, Prozesse (z.B. wie wird die ungesättigte Zone berücksichtigt), Materialeigenschaften, Rand/Initialbedingungen, Datenschnittstellen, Schnittstellen für Kopplungen , Eignung für Langzeitsimulationen und Möglichkeiten zur Kalibrierung bewertet.

Tabelle 1: Übersicht der bewerteten numerischen Grundwasserströmungsmodelle.

Name GWSM	Quelloffen?
FEFLOW	Nein
HydroGeoSphere (HGS)	Nein
MODFLOW OWHM	Ja
MODFLOW 6	Ja
OpenGeoSys	Ja
ParFlow	Ja
PCGEOFIM	Nein
SPRING	Nein

Tabelle 2: Übersicht der bewerteten Bodenwasserhaushaltsmodelle. Die Spalte Modellansatz beschreibt die Einordnung des Modells als physikalisches oder konzeptionelles Modell sowie die räumliche Diskretisierung.

Name BWHM	Modellansatz	Quelloffen?
APSIM	Physikalisch, konzeptionell; standortbezogen	Nein
ArcEGMO	Konzeptionell; rasterbasiert	Nein
BROOK90R	Physikalisch; standortbezogen	Ja
BROOK90 LWF		
BROOK90R SUBDAILY		
HBV light	Konzeptionell, semi-verteilt	Nein
mGROWA	Konzeptionell, rasterbasiert	Nein
mHM	Konzeptionell, rasterbasiert	Ja
MIKE SHE	Physikalisch; rasterbasiert	Nein
OWHM	Physikalisch; rasterbasiert	Ja
PRMS	Konzeptionell; semi-verteilt	Ja
Raven	Physikalisch, konzeptionell; semi-verteilt, rasterbasiert	Ja
RUBINFLUX	Konzeptionell; rasterbasiert	Nein
SWAT+	Konzeptionell, semi-verteilt	Ja
UZF	Konzeptionell; rasterbasiert	Ja

2.2 Bewertung nach angepasstem Kriterienkatalog

Im zweiten Teil wurde der verwendete Kriterienkatalog angepasst und erneut auf alle Modelle angewendet. Ziel war eine stärkere Trennung der fachlichen Charakteristika der Modelle von den implementierten Möglichkeiten der technischen Umsetzung des Pre- und Postprocessings. Da kommerzielle Softwarelösungen im Gegensatz zu quelloffenen Produkten häufig Werkzeuge zur Datenaufbereitung, Kalibrierung und Ergebnisauswertung bereitstellen, können sie durch die ursprüngliche Bewertungssystematik tendenziell begünstigt werden. Daher wurden Kriterien zum Pre- und Postprocessing aus der Bewertung entfernt. Konkret wurden Kriterien zur Interpolation von Eingangsdaten, zur GIS-Anbindung, zur Ergebnisdarstellung sowie zur Verfügbarkeit integrierter Werkzeuge für Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen und Kalibrierroutinen nicht berücksichtigt. Weiterhin wurden Gewichtungen einzelner Kriterien angeglichen. Zusätzlich wurde der Kriterienkatalog um die bergbauspezifischen Aspekte Kippenböden bei BWHM und Dichtwände bei GWSM ergänzt. Ein Ausschnitt aus der Modellbewertung für PRMS ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Exemplarische Bewertung von PRMS. Sind mehrere Werte für ein Unterkriterium zutreffend, sind die jeweils zugehörigen Punktzahlen in Klammern angegeben.

Kriterium	Unterkriterium	Wert	Punkte
Allgemeines …	Softwarelizensierung	Open Source	4
Software …	Programmiersprache	C, Fortran	8 (4+4)
Prozessabbildung Physik …	Interzeptions-verdunstung	Ja	4
Anthropogene Komponenten …	Wassereinleitungen	Statisch, zeitlich variabel	5 (2+3)

2.3 Entscheidungsunterstützung zur Modellauswahl

Im dritten Teil wird ein Werkzeug zur Unterstützung der initialen Modellauswahl entwickelt (Abbildung 1). Hierzu wurden die bislang genutzten Kriterien in wertungsfreie Beschreibungen der Modelleigenschaften überführt. Anschließend wurde ein Fragenkatalog erstellt um Nutzeranforderungen abzufragen. Diese Nutzeranforderungen werden mit den Modellbeschreibungen abgeglichen. Dabei wurde auch die Möglichkeit implementiert, Anforderungen individuell zu gewichten. Für jedes Kriterium wird die Übereinstimmung zwischen Nutzeranforderung und Modellfunktionalität mit einem Wert zwischen 0 und 1 quantifiziert. Wenn für ein Kriterium mehrere Nutzeranforderungen gestellt werden, gibt der Wert an, welchen Anteil davon das Modell erfüllt. Abhängigkeiten zwischen Kriterien, beispielsweise zwischen verfügbaren meteorologischen Eingangsdaten und anwendbaren Verdunstungsansätzen, werden über bedingte Abfragen berücksichtigt. Für jedes Modell wird anschließend die prozentuale Übereinstimmung mit den Nutzeranforderungen berechnet. Im Ergebnis wird dem Nutzer eine Empfehlung für die Modellauswahl mit einer kurzen Übereinstimmungsgegenüberstellung und Begründung gegeben. Das erstellte Konzept dient als Basis für die Entwicklung einer interaktiven Anwendung für die Modellauswahl.

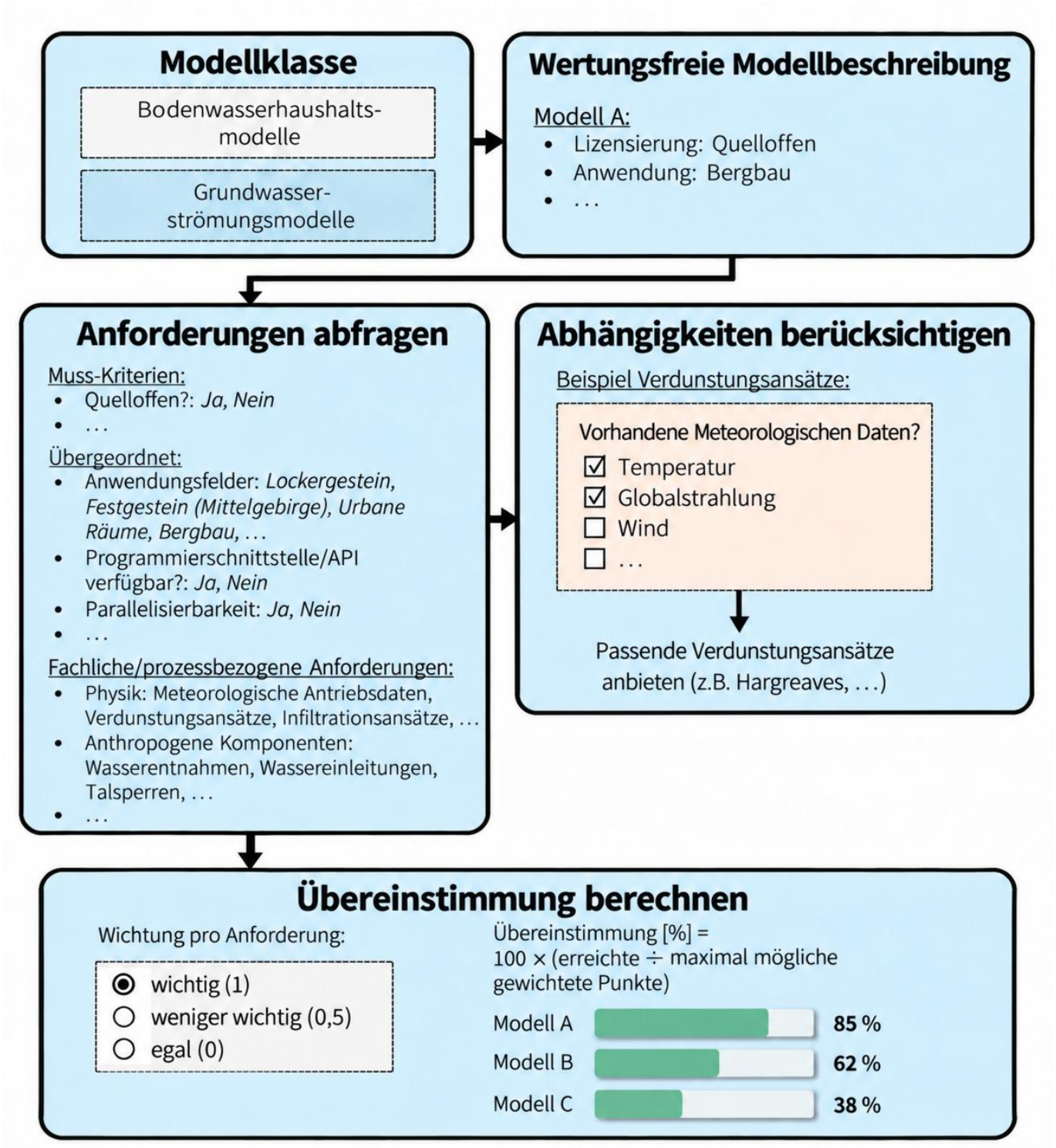


Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung der Entscheidungsunterstützung für die initiale Modellauswahl von Bodenwasserhaushalts -und Grundwasserströmungsmodellen.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des erweiterten Modellvergleichs und der Neubewertung mit angepasstem Kriterienkatalog dargestellt. Im erweiterten Modellvergleich werden die neubewerteten Modelle PRMS und ParFlow in den Fokus gestellt.

3.1 Erweiterter Modellvergleich

Modell PRMS

Insgesamt erreichte PRMS mit Platz 7 von 15 bewerteten BWHM eine gute Bewertung. Besser bewertete quelloffene Modelle waren Raven, SWAT+ und mHM (Abbildung 2 linke Spalte, Tabelle 4). In den nächsten Absätzen werden zunächst Stärken und daraufhin funktionelle Einschränkungen von PRMS vorgestellt.

Stärken von PRMS liegen u.a. in der Abbildung anthropogener Eingriffe, z. B. bergbaubedingt, in den Wasserhaushalt. Talsperren und Seen können über das Modul *muskingum_lake* abgebildet werden, wobei sich die Öffnungshöhen der Schütze über externe Zeitreihen vorgeben lassen. Das Modul *water_use_read* ermöglicht zudem die Berücksichtigung zeitlich variabler Wasserentnahmen, -einleitungen und -überleitungen. Einzelne Studien in kohlebergbaulich geprägten Gebieten der USA wurden in den 1980er-Jahren mit PRMS durchgeführt (Bower 1985; Puente & Atkins, 1989). Für Langzeitsimulationen verfügt PRMS aufgrund seiner Entwicklung seit den frühen 1980er-Jahren über eine breite Grundlage dokumentierter Anwendungen und wissenschaftlicher Studien. Viele davon untersuchen mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt verschiedener Regionen der USA. Beispiele sind Langfristsimulationen in 14 hydroklimatisch unterschiedlichen Einzugsgebieten der USA (2001–2099), für das Upper Rio Grande Basin (1981–2099), Puerto Rico (1962–2099) oder das Trinity River Basin (2018–2099) (Hay et al., 2011; Moeser et al., 2021; Milmo et al. , 2023; Van Beusekom et al., 2016). Als weitere Stärke von PRMS kann die dokumentierte Kopplung mit dem GWSM MODFLOW gesehen werden. Diese wurde sowohl für MODFLOW-2005 im Modellsystem GSFLOW als auch für MODFLOW 6 umgesetzt. Beide Kopplungen wurden vom USGS entwickelt. Für die Kopplung mit MODFLOW 6 wurde PRMS um das *Basic Model Interface* (BMI) erweitert (Hughes et al., 2022). Diese standardisierte Schnittstelle umfasst definierte Funktionen, die in numerische Modellcodes integriert werden können und deren Steuerung sowie Kopplung mit anderen Modellen erleichtern.

Funktionelle Einschränkungen weist PRMS hinsichtlich der Raum-Zeit-Struktur auf. Die Modellierung ist auf eine tägliche zeitliche Auflösung und die räumliche Diskretisierung auf Hydrological Response Units (HRUs) beschränkt. Bei der physikalischen Prozessabbildung wird die ungesättigte Bodenzone lediglich konzeptionell und ohne vertikale Schichtung berücksichtigt. Eine detailliertere Abbildung ist jedoch durch die Kopplung mit MODFLOW-UZF möglich. Im Bereich Schnittstellen und Daten ist PRMS auf Textdateien als Eingabeformat beschränkt. Daher müssen sämtliche Eingabedaten, einschließlich komplexer mehrdimensionaler Klimadaten (z. B. im NetCDF-Format), vorprozessiert werden. Mit dem Pythonmodul *pyGSFLOW*, das auch den eigenständigen Betrieb von PRMS ermöglicht, können Teile dieser Datenaufbereitung programmatisch vorgenommen werden. Für die Kalibrierung sowie Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen fehlen integrierte Komponenten, sodass externe Werkzeuge erforderlich sind. Für die Kalibrierung wurde unter anderem die quelloffene Software LUCA (*Let Us CAlibrate*) entwickelt.

Tabelle 4: Modellbewertung von PRMS nach Einzelkriterien. Gegenübergestellt ist die Bewertung von Raven, dem bestbewerteten BWHM des GWM Lausitz.

Kriterium	Bewertung PRMS	Bewertung Raven
Allgemeines	23.5	32.5
Software	14.5	15
Modelldokumentation	16	21
Raum-Zeit-Struktur	2.5	14.5
Prozessabbildung Physik	48.1	89
Anthropogene Komponenten	18	26
Schnittstellen Daten	27.5	55
Schnittstellen Kopplung	9	13
Langzeit Simulation	13	13
Kalibrierung Sensitivität	0	12
Σ	172.1	291

Modell ParFlow

ParFlow erzielte unter den untersuchten GWSM die niedrigste Gesamtbewertung (Abbildung 2 Linke Spalte, Tabelle 5). FEFLOW und MODFLOW 6 sind die mit Abstand bestbewerteten Modelle. In den nächsten Absätzen werden zunächst Stärken und daraufhin funktionelle Einschränkungen von ParFlow vorgestellt.

Eine wesentliche Stärke von ParFlow ist die physikalisch basierte, gekoppelte Simulation von Oberflächen- und Untergrundströmung. Die dreidimensionale Untergrundströmung wird mithilfe der Richards-Gleichung simuliert, während der Oberflächenabfluss über einen auf den Flachwassergleichungen basierenden Ansatz berechnet wird. Damit verfolgt ParFlow einen vergleichbaren integrierten Modellierungsansatz wie HydroGeoSphere (HGS), ist im Gegensatz zu HGS jedoch quelloffen. Im Bereich der Modellkopplung verfügt ParFlow über dokumentierte Kopplungen mit verschiedenen Landoberflächen- und Atmosphärenmodellen. Dazu zählen unter anderem das Landoberflächenmodell *Common Land Model* (CoLM), das den Wasser- und Energieaustausch zwischen Vegetation, Boden und Atmosphäre abbildet, sowie das Atmosphärenmodell COSMO (*Consortium for Small-scale Modeling*). Neben der direkten Integration von Modellen als Unterprogramme wird beispielsweise im Modellsystem TerrSysMP die standardisierte Kopplungsbibliothek OASIS3-MCT (*Ocean Atmosphere Sea Ice Soil – Model Coupling Toolkit*) eingesetzt (Yang et al., 2026; Shrestha et al., 2014).

Tabelle 5: Modellbewertung von ParFlow nach Einzelkriterien. Gegenübergestellt ist die Bewertung von MODFLOW 6, dem bestbewerteten GWSM des GWM Lausitz.

Kriterium	Bewertung ParFlow	Bewertung MODFLOW 6
Allgemeines	36,9	42,6
Software	12	16
Modelldokumentation	10,5	20,5
Raum-Zeit-Struktur	80	92
Prozesse	17	28
Materialeigenschaften	6	15
Rand-/Initialbedingungen	50,5	69,6
Schnittstellen Daten	39,7	70,6
Schnittstellen Kopplung	9	12,5
Langzeit Simulation	12	20,5
Kalibrierung Sensitivität	0	4
Σ	270,5	391,3

ParFlow bietet zudem umfangreiche Parallelisierungsmöglichkeiten durch die Verteilung von Berechnungen auf mehrere Prozessoren mittels *Message Passing Interface* (MPI) sowie die Nutzung von Grafikprozessoren (GPUs) zur Beschleunigung rechenintensiver Operationen. Über das Ressourcenverwaltungssystem Slurm können außerdem Simulationen auf Hochleistungsrechnern ausgeführt und verwaltet werden. Diese Möglichkeiten begünstigen insbesondere großräumige und rechenintensive Anwendungen. Mehrere großskalige hydrologische Studien wurden mit ParFlow durchgeführt. Hierzu gehören die US-amerikanischen CONUS-Modellierungen welche die gesamten zusammenhängenden USA (ca. 7,85 Mio. km²) mit einer horizontalen Auflösung von 1 km und zehn vertikalen Schichten variabler Mächtigkeit bis in 392 m Tiefe abbilden (Yang et al., 2023). Ein weiteres Beispiel ist CONCN 1.0, welches das gesamte chinesische Festland abdeckt (Yang et al., 2025). ParFlow wurde jedoch auch für kleinere Einzugsgebiete eingesetzt, u.a. auch in Deutschland (Schalge et al., 2019; Soltani et al., 2026).

Einschränkungen bestehen insbesondere im Bereich Schnittstellen und Daten, da ParFlow vergleichsweise wenig integrierte Funktionen zur Datenaufbereitung, Ergebnisauswertung und -visualisierung bietet. Insbesondere fehlt eine integrierte grafische Umgebung für das Pre- und Postprocessing. In diesem Kriterienbereich zeigt sich die größte Bewertungsdifferenz gegenüber den übrigen GWSM. Hinsichtlich der Raum-Zeit-Struktur ist die räumliche Diskretisierung auf strukturierte Rechengitter beschränkt. Neben orthogonalen Gittern unterstützt ParFlow geländefolgende Gitter sowie variable vertikale Schichtmächtigkeiten. Vollständig unstrukturierte Rechengitter, die eine flexible Anpassung an komplexe geologische Schichtgeometrien ermöglichen, stehen hingegen nicht zur Verfügung. Außerdem bestehen bei der dynamischen Anpassung hydrogeologischer Parameter Einschränkungen. Änderungen von Parameterwerten und Materialzugehörigkeiten einzelner Modellzellen während der Simulation sind nicht als Funktionalität vorhanden. Dies erschwert die Abbildung dynamischer anthropogener Eingriffe, etwa eines fortschreitenden Tagebaus mit räumlich und zeitlich veränderlichen hydrogeologischen Eigenschaften. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten keine veröffentlichten ParFlow-Anwendungen identifiziert werden, die bergbaubedingte Auswirkungen auf die Grundwasserströmung explizit untersuchen.

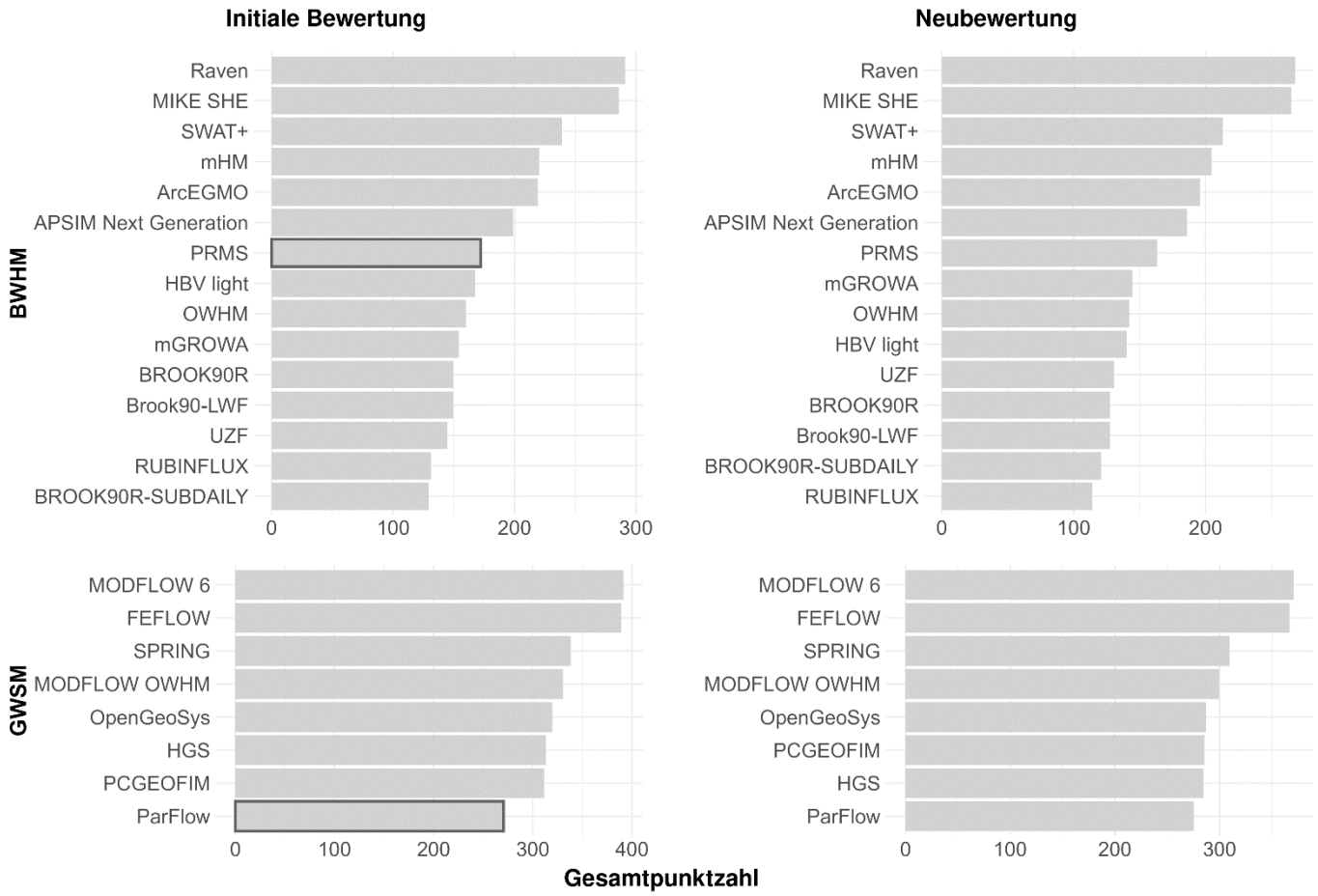


Abbildung 2: Die linke Spalte zeigt die initiale Gesamtbewertung der bewerteten Bodenwasserhaushalts- und Grundwasserströmungsmodelle inklusive der ergänzten Modelle Precipitation-Runoff-Modelling-System (PRMS) und ParFlow. Die rechte Spalte zeigt die Neubewertung nach dem angepassten Kriterienkatalog.

3.2 Neubewertung

Die Neubewertung anhand des angepassten Kriterienkatalogs führte bei den BWHM zu moderaten Bewertungsunterschieden und Veränderungen in der Rangfolge (Abbildung 2 rechte Spalte). Bei den BWHM verbesserten sich insbesondere mGROWA (von Rang 10 auf 8) und UZF (von Rang 13 auf 11). Die Einordnung von PRMS blieb unverändert. Für die bestbewerteten Modelle Raven und MIKE SHE ergab sich im Zuge der Neubewertung eine weitere Vergrößerung des Bewertungsabstands zu den übrigen BWHM.

Bei den GWSM führte die Neubewertung insgesamt zu geringeren Bewertungsunterschieden zwischen den Modellen, während die Rangfolge weitgehend unverändert blieb. Nur PCGEOFIM wurde von Rang 7 auf Rang 6 und damit vor HGS eingeordnet. MODFLOW 6 und FEFLOW bleiben mit deutlichem Abstand die am höchsten bewerteten Modelle. Die mittlere relative Differenz zwischen den Modellen sank von 4,7 % in der ursprünglichen Bewertung des GWML auf 3,2 %. So verringerten sich beispielsweise die Bewertungsunterschiede zwischen ParFlow (275 Punkte), HGS (285 Punkte), PCGEOFIM (286 Punkte) und OGS (287 Punkte) auf ein vergleichbares Punkteniveau.

Literatur

Bower, D. E. (1985). Evaluation of the precipitation-runoff modeling system, Beaver Creek basin, Kentucky (Water-Resources Investigations Report 84-4316). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/wri844316

Hay, L. E., Markstrom, S. L., & Ward-Garrison, C. (2011). Watershed-Scale Response to Climate Change through the Twenty-First Century for Selected Basins across the United States. *Earth Interactions*, *15*(17), 1–37. https://doi.org/10.1175/2010EI370.1

Hughes, J. D., Russcher, M. J., Langevin, C. D., Morway, E. D., & McDonald, R. R. (2022). The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling & Software*, *148*, 105257. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257

Koczot, K. M., Markstrom, S. L., & Hay, L. E. (2011). Effects of Baseline Conditions on the Simulated Hydrologic Response to Projected Climate Change. *Earth Interactions*, *15*(27), 1–23. https://doi.org/10.1175/2011EI378.1

Milmo, M. J., McDowell, J., Yesildirek, M. V., & Harwell, G. R. (2023). The use of historical data and global climate models to assess historical and future surface water and groundwater availability in the Trinity River Basin in Texas. Texas Water Journal, 14(1), 34–61.

Moeser, C. D., Chavarria, S. B., & Wootten, A. M. (2021). Streamflow response to potential changes in climate in the Upper Rio Grande Basin (Scientific Investigations Report 2021–5138). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/sir20215138

Puente, C., & Atkins, J. T. (1989). Simulation of rainfall-runoff response in mined and unmined watersheds in coal areas of West Virginia (Water-Supply Paper 2298). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/wsp2298

Regan, R.S. and Niswonger, R.G., 2021, GSFLOW version 2.2.0: Coupled Groundwater and Surface-water FLOW model: U.S. Geological Survey Software Release, 18 February 2021.

Schalge, B., Haefliger, V., Kollet, S., & Simmer, C. (2019). Improvement of surface run-off in the hydrological model ParFlow by a scale-consistent river parameterization. Hydrological Processes, 33(14), 2006–2019. https://doi.org/10.1002/hyp.13448

Shrestha, P., Sulis, M., Masbou, M., Kollet, S., & Simmer, C. (2014). A Scale-Consistent Terrestrial Systems Modeling Platform Based on COSMO, CLM, and ParFlow. *Monthly Weather Review*, *142*(9), 3466–3483. https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00029.1

Soltani, S. S., Mohammadi, Z., Izadi, A., & Kollet, S. (2026). Enhancing Flood Forecasting with Machine Learning Informed by Integrated ParFlow-CLM Hydrological Modeling. Earth Systems and Environment, 10(5), 5781–5802. https://doi.org/10.1007/s41748-025-00923-5

Van Beusekom, A. E., Gould, W. A., Terando, A. J., & Collazo, J. A. (2016). Climate change and water resources in a tropical island system: Propagation of uncertainty from statistically downscaled climate models to hydrologic models. *International Journal of Climatology*, *36*(9), 3370–3383. https://doi.org/10.1002/joc.4560

Yang, C., Sun, A., Zhang, S., Dai, Y., Kollet, S., & Maxwell, R. (2026). 20 years of trials and insights: Bridging legacy and next generation in ParFlow and Land Surface Model Coupling. *Geoscientific Model Development*, *19*(5), 1849–1866. https://doi.org/10.5194/gmd-19-1849-2026

Yang, C., Jia, Z., Xu, W., Wei, Z., Zhang, X., Zou, Y., McDonnell, J., Condon, L., Dai, Y., & Maxwell, R. (2025). CONCN: A high-resolution, integrated surface water–groundwater ParFlow modeling platform of continental China. *Hydrology and Earth System Sciences*, *29*(9), 2201–2218. https://doi.org/10.5194/hess-29-2201-2025

Yang, C., Sun, A., Zhang, S., Dai, Y., Kollet, S., & Maxwell, R. (2026). 20 years of trials and insights: Bridging legacy and next generation in ParFlow and Land Surface Model Coupling. *Geoscientific Model Development*, *19*(5), 1849–1866. https://doi.org/10.5194/gmd-19-1849-2026

Autor: Stefan Kunz; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Abteilung 4; Referat 43; Telefon: 0351 2612-4307; E-Mail: stefan.kunz@lfulg.sachsen.de; Redaktionsschluss: 23.10.2026: www.lfulg.sachsen.de