

Charakterisierung und Analyse hydrologischer Modelle im deutschsprachigen Raum

Für hydrologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen wird eine Vielzahl von Modellen mit unterschiedlichsten Konzeptionen und Prozessabbildungen eingesetzt. Vorgestellt werden die Ergebnisse einer Online-Umfrage zur Modellklassifizierung und Charakterisierung der Modellstärken und -schwächen.

Björn Guse, Tobias Pilz, Michael Stoelzle und Helge Bormann

Hydrologische Modelle unterscheiden sich in einer Vielzahl von Eigenschaften hinsichtlich Konzeption, Anwendungsbereich, räumlicher und zeitlicher Auflösung, ihrer Rechenzeit sowie im Detaillierungsgrad der Abbildung der verschiedenen hydrologischen Prozesse [2]. Die Wahl eines geeigneten Modells kann je nach Zielsetzung variieren. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Detaillierungsgrad und die physikalisch basierte Darstellung der hydrologischen Prozesse, da diese je nach Anwendung und Einzugsgebiet eine unterschiedlich große Bedeutung haben können [17]. Die Auswahl eines Modells erfolgt nach Clark et al. [7] unter Berücksichtigung von (mindestens) vier Aspekten: Exaktheit (in der Prozessabbildung), Komplexität (Detaillierungsgrad in der Prozessabbildung), Durchführbarkeit (z.B. durch Rechenbedarf) und Datenverfügbarkeit. Darüber hinaus kann noch die Erfahrung des Modellentwicklers eine wichtige Rolle spielen.

Eine vereinfachte Prozessabbildung führt dazu, dass der Prozess weniger realitätsnah in Raum und/oder Zeit abgebildet wird [6, 17]. Andererseits ermöglicht dies unter anderem eine Reduktion der Rechenzeit und des Aufwands bei der Datenbereitstellung. Reicht eine solche Prozessabbildung nicht mehr aus, um Detailliertheit und Variabilität eines hydrologischen Prozesses abzubilden, kann diese in eine stärker physikalisch basierte Repräsentation überführt werden (z.B. Energie-

bilanzansatz statt Tag-Grad-Verfahren für die Berechnung der Schneeschmelze). Für die Berechnung einzelner hydrologischer Prozesse sind in der Regel eine Vielzahl an alternativen Konzeptionen verfügbar [7], zum Beispiel verschiedene Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung (z. B. Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith).

Um die Art der Prozessabbildung in Modellen für die hydrologische Gemeinschaft zu strukturieren, werden hydrologische Modelle klassifiziert [9]. Dies ermöglicht bei der Nennung eines (unbekannten) Modells eine erste Einschätzung der Funktionsweise. Typischerweise werden Modelle strukturell in mindestens drei Kategorien unterteilt.

- Konzeptionelle Modelle bilden die hydrologische Situation mit vereinfachenden und abstrakten Konzepten wie Speicherkaskaden ab. Diese Modelle müssen kalibriert werden, und die Parametrisierung ist nur bedingt auf andere Gebiete übertragbar [16].
- Konzeptionell-prozessbasierte Modelle bilden im Allgemeinen die (Teil-)Prozesse der Niederschlags-Abfluss-Transformation explizit ab. Allerdings enthalten sie auch vereinfachende konzeptionelle Elemente.
- Physikalisch basierte Modelle zielen darauf ab, die hydrologischen Prozesse möglichst exakt und auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten in Raum und Zeit abzubilden [20]. Deren Parameter haben eine physikalische Bedeutung und sind (zumindest theoretisch) messbar, wodurch sich ein geringerer Aufwand bei der Kalibrierung der Modellparameter ergeben sollte.

Vielfach wird die modellbasierte Darstellung von Schlüsselprozessen zur Klassifizierung von Modellen herangezogen [2, 17], etwa Evapotranspiration (häufig Penman-Monteith vs. konzeptionelle Ansätze) oder Bodenwasserfluss (z. B. Richards-Gleichung vs. speicherbasierte Modelle). Aus der vereinfachten Abbildung des hydrologischen Systems ergeben sich, auch in Abhängigkeit der Modellanwendung, zwangsläufig Modelldefizite [1]. Diese Defizite können sich aus der Modellkonzeption ergeben [11] oder aber auch den spezifischen Eigenschaften eines Untersuchungsgebiets geschuldet sein. Eine vereinfachte Prozessbeschreibung in einem Schneemodul limitiert etwa die Modellanwendung im norddeutschen Tiefland kaum, während es zu großen Modellfehlern in alpinen Gebieten führen kann. In diesem Kontext bedingt die Modellkonzeption das Spektrum sinnvoller Modellanwendungen. Eine konsistente und zielführende Anwendung von Modellen setzt gute Kenntnisse der Stärken und

/ Kompakt /

- Zur Auswertung einer Umfrage unter Anwendern hydrologischer Modelle standen 47 ausgefüllte Fragebögen zur Verfügung, bei denen 26 Modelle unterschiedlichster Konzeption genannt wurden.
- Geringe Unterschiede in zeitlicher Auflösung oder räumlicher Ausdehnung verschiedener Modellkonzeptionen sind festzustellen.
- Bezogen auf die Prozessabbildung zeigt sich aber, dass Verdunstungsprozesse vorzugsweise mit physikalisch basierten und Boden- und Grundwasserprozesse mit konzeptionellen Ansätzen abgebildet werden.

Tabelle 1: Übersicht über die Themen und Unterthemen der Umfrage

| Thema | Abfrage | Antwort-Kategorie |
|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Modelleigenschaften (ME) | Name + Version | Freitext |
| | Konzeption | Vorgaben |
| | Räumliche Diskretisierung | Vorgaben |
| | Skalenbereich | Vorgaben (Mehrfachnennung) |
| | Zeitliche Diskretisierung | Vorgaben (Mehrfachnennung) |
| | Determinismus | Dropdown-Menü |
| | Dimensionalität | Dropdown-Menü |
| Anwendungsbereich (MA) | Betriebssystem | Vorgaben (Mehrfachnennung) |
| | Bedienung | Vorgaben (Mehrfachnennung) |
| | Anwendungsbereich | Freitext |
| | Einzugsgebiete/Regionen | Freitext |
| | Schlüssel-Publikationen | Freitext |
| Prozesse und Parameter (MP) | Implementierte Prozesse | Vorgaben (Mehrfachnennung) |
| | Weitere Prozesse | Freitext |
| | Anzahl zu kalibrierender Parameter | Vorgaben |
| Stärken und Schwächen (MS) | Stärken bzgl. der Prozessabbildung | Freitext |
| | Defizite bzgl. der Prozessabbildung | Freitext |
| | Ursachen für Defizite | Freitext |
| | Ideen zur Beseitigung der Defizite | Freitext |

Schwächen der Modelle voraus [10] und kann bei der Interpretation der Modellergebnisse weiterhelfen [13]. Bislang wurden Defizite in der Prozessabbildung überwiegend modellspezifisch analysiert. Hierdurch kann zwar ermittelt werden, bei welchem Prozess ein einzelnes Modell Defizite zeigt [13]. Allerdings lassen sich diese modellspezifischen Erkenntnisse nicht zwangsläufig auf andere Modelle übertragen. Systematische Analysen [vgl. 5] basieren auf Modellvergleichsstudien. Dabei werden unterschiedliche Modelle auf einen einheitlichen Datensatz angewendet und deren Stärken und Schwächen bei der Modellanwendung unter Berücksichtigung der Zielstellung analysiert [4, 14]. Systematische Modellvergleiche haben dabei u. a. gezeigt, dass Modelle in Abhängigkeit der Konzeption unterschiedliche Merkmale von Abflussganglinien unterschiedlich gut abbilden können [4] und unterschiedlich sensitiv auf verfügbare Datengrundlagen reagieren [3].

Folglich stellt sich die Frage, ob es für die hydrologische Gemeinschaft zielführender erscheint einzelne Modelle zu optimieren, oder ob eine gemeinschaftliche Diskussion über Modellstrukturen und Skalenabhängigkeit der Prozesse wichtiger ist, um ein allgemein akzeptiertes „Community Hydrological Model“ zu entwickeln [18]. In Anlehnung an systematische Modellvergleichsstudien sehen Clark et al. [8] den Bedarf eines „Community modeling process“, um Prozessabbildungen gezielt in verschiedenen Modellen zu vergleichen.

Um eine aktuelle Übersicht der hydrologischen Modelllandschaft im deutschsprachigen Raum zu erhalten, wurde eine Online-Umfrage unter Modellentwicklern und Modellanwendern durchgeführt, um Charakteristika, Stärken und Schwächen der genutzten Modelle zu erfassen und auszuwerten. Die Ergebnisanalyse der Umfrage soll dabei die folgenden Forschungsfragen beantworten:

- Wie groß ist das **Spektrum** der genannten hydrologischen Modelle und besteht eine konsistente Klassifikation der Modelle (innerhalb der hydrologischen Modellierung)?
- Wie werden verschiedene **Prozesse** strukturell in Modellen mit unterschiedlicher Konzeption abgebildet?
- Welche **Stärken und Schwächen** werden den in der Umfrage genannten Modellen hinsichtlich der Prozessabbildung zugeordnet und können systematische Ursachen für Modelldefizite abgeleitet werden?

Methodik

Design der Umfrage

Zwischen November 2017 und Januar 2018 wurde eine Onlineumfrage unter Anwendern hydrologischer Modelle durchgeführt. Die Umfrage wurde durch das Netzwerk der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft e.V. (DHG) verbreitet und darüber hinaus gezielt an hydrologische Forschungsgruppen in der Schweiz und in Österreich verschickt. Das Ausfüllen der Umfrage erfolgte anonym. Die komplette Umfrage ist auf der DHG-Internetseite des DHG-Arbeitskreises „Prozessabbildung in hydrologischen Modellen“ einsehbar [21].

Die Umfrage thematisierte die eingangs vorgestellten Fragestellungen und wurde in vier Unterthemen unterteilt: Modelleigenschaften (ME), implementierte Prozesse und Modellparameter (MP), Modellstärken und -schwächen (MS) sowie Modellanwendung (MA).

Zu jedem Unterthema wurden verschiedene, überwiegend quantitativ auswertbare Fragen gestellt (**Tabelle 1**). Hierbei gab es drei Antwort-Kategorien. Freitext ermöglichte eine freie

Tabelle 2: Übersicht über die im Rahmen der Umfrage genannten Modelle mit der von den Teilnehmenden angegebenen Konzeption(en); Die vollständigen Referenzen sind auf der Internetseite der DHG einsehbar [21].

| Modell | Konzeptionell | Konzeptionell-prozessbasiert | Physikalisch basiert | Referenz |
|----------------|---------------|------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| BlueM | 0 | 1 | 0 | [Bach et al., 2009] |
| CMF | 0 | 0 | 0 | [Kraft et al., 2011] |
| COSERO | 1 | 4 | 0 | [Kling und Nachtnebel, 2009] |
| GSFLOW | 0 | 1 | 0 | [Carroll et al., 2016] |
| HBV | 5 | 0 | 0 | [Bergström, 1976] |
| HEC-HMS | 0 | 1 | 0 | [HEC, 2013] |
| HILLFLOW | 0 | 0 | 1 | [Bronstert und Plate, 1997] |
| HydroGeoSphere | 0 | 0 | 1 | [Jones et al., 2008] |
| J2000 | 0 | 1 | 1 | [Nepal et al., 2014] |
| LARSIM | 1 | 1 | 0 | [Ludwig und Bremicker, 2006] |
| LWF-Brook90 | 0 | 1 | 0 | [Hammel und Kenel, 2001] |
| mHM | 0 | 1 | 0 | [Samaniego et al., 2010] |
| MIKE-SHE | 0 | 0 | 1 | [Abbott et al., 1986] |
| NASIM | 2 | 1 | 0 | [www.hydrotec.de/software/nasim] |
| PANTA RHEI | 0 | 1 | 0 | [Meon et al., 2015] |
| RoGeR | 0 | 1 | 0 | [Steinbrich et al., 2016] |
| SES | 0 | 0 | 1 | [Asztalos, 2004] |
| Simulat | 0 | 0 | 1 | [Diekkrüger und Arning, 1995] |
| SWAT | 0 | 2 | 2 | [Arnold et al., 1998] |
| SWIM | 0 | 1 | 0 | [Krysanova et al., 1998] |
| TOPMODEL | 1 | 0 | 0 | [Beven und Kirkby, 1979] |
| TRAIN | 0 | 1 | 1 | [Menzel, 1997] |
| UHP | 1 | 0 | 0 | [Bormann und Diekkrüger, 2003] |
| WASA-SED | 0 | 3 | 1 | [Güntner und Bronstert, 2004] |
| WaSiM-ETH | 0 | 0 | 2 | [Schulla, 1997] |
| WaterGAP | 1 | 1 | 0 | [Döll et al., 2003] |
| Summe | 12 | 22 | 12 | |

Eingabe eines beliebigen Textes. Eingerichtete Vorgaben geben eine begrenzte Anzahl an Möglichkeiten vor. Teilweise war hierbei eine Mehrfachnennung möglich. Bei einigen Fragen wurden als dritte Kategorie Antwortmöglichkeiten aus einem dropdown-Menü zur Auswahl gestellt.

Auswertung der Umfrage

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Antworten aus der Umfrage bei Bedarf kategorisiert, jedoch nicht bewertet. Es wurden in dieser Auswertung lediglich alle vollständigen Umfrage-Beteiligungen verwendet. Die Teilnehmenden waren dabei jedoch nicht gezwungen, die Fragen vollständig zu beantworten, so dass Lücken in den betrachteten Datensätzen vorhanden sein können. Versionsbedingt abweichende Modellnamen wurden nachträglich einem Modell zugeordnet. Freitexteingaben wurden im Rahmen der Auswertung in vorab definierte Kategorien einsortiert. Im Falle von Mehrfachnennungen innerhalb einer Freitexteingabe wurden alle Nennungen separat gezählt und kategorisiert.

Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurde die Umfrage von 81 Teilnehmenden geöffnet und begonnen, nach Erhebungsschluss lagen letztlich 47 beendete Umfrageteilnahmen vor, welche zur Auswertung genutzt wurden. Dabei wurden 26 verschiedene Modelle genannt.

Modellkonzeption

In der Umfrage wurden die meisten Modelle als konzeptionell-prozessbasiert klassifiziert (22 Nennungen, 48 %), während je 12 Modelle als konzeptionell und als physikalisch basiert eingestuft wurden (je 26 %) (**Tabelle 2**). Bei einem Modell (CMF) wurde in der Umfrage keine Klassifikation angegeben. Acht der zehn im Rahmen der Umfrage mehrfach bewerteten Modelle wurden dabei von unterschiedlichen Personen unterschiedlich klassifiziert (**Tabelle 2**). So wurden z. B. SWAT, J2000 und TRAIN sowohl als konzeptionell-prozessbasiert, als auch als physikalisch basiert eingestuft, während u. a. NASIM, COSERO und LARSIM sowohl als konzeptionell, als auch als konzeptionell-prozessbasiert klassifiziert wurden. Ausnahmen hiervon stellen das HBV Modell, welches konsistent als konzeptionell

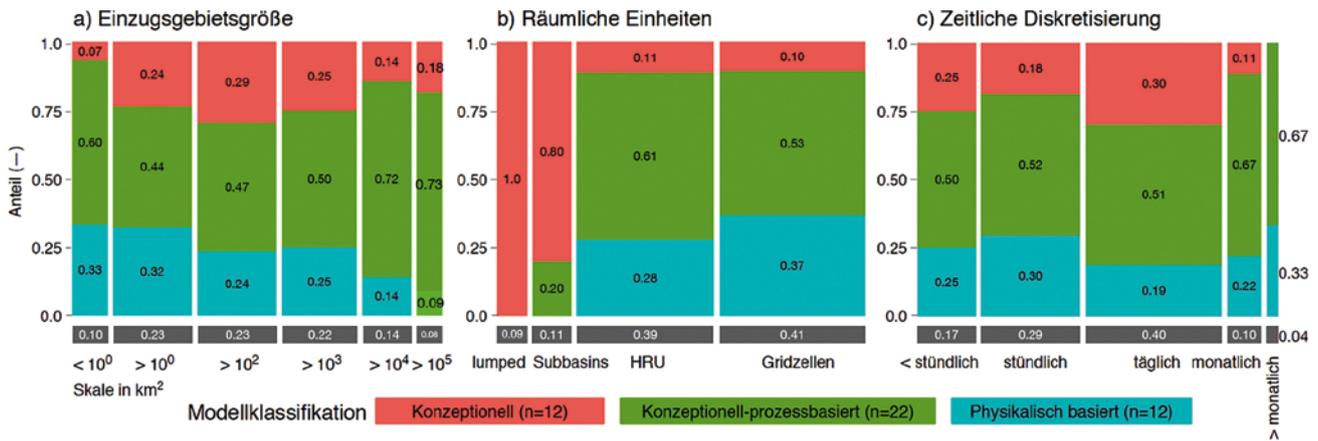


Bild 1: Anteile der a) Einzugsgebietsgröße, b) räumlichen Einheiten und c) zeitlichen Diskretisierung in verschiedenen Klassen in Abhängigkeit der Modellkonzeption

bezeichnet wurde, sowie WaSiM-ETH dar, das ausschließlich als physikalisch basiert klassifiziert wurde. Dies zeigt, wie subjektiv ein anerkanntes Klassifikationsschema in der Hydrologie wahrgenommen wird und dass der Übergang zwischen konzeptioneller und physikalisch basierter Klassifikation als fließend anzusehen ist.

Modelldiskretisierung

In Bezug auf die Modelldiskretisierung wurden drei Kategorien unterschieden: räumliche Ausdehnung, strukturelle räumliche Einheiten, zeitliche Auflösung (**Bild 1**). Die Nennungen wurden jeweils für die drei Modellkonzeptionen getrennt analysiert. Die Auswertung dieser Frage unterlag der Annahme, dass die Modelle spezifisch angewendet werden, da sie ursprünglich für eine

bestimmte Skala, Zielstellung und Datenverfügbarkeit entwickelt wurden. Demnach wäre zu erwarten, dass sich ein charakteristisches Muster in Bezug auf die Modellkonzeption ergibt. In Abhängigkeit der Detailliertheit der Prozessbeschreibungen sind Modelle nur für bestimmte Zeitschritte, räumliche Auflösungen und strukturelle Einheiten geeignet. Darüber hinaus war zu erwarten, dass sich Modelle in fallspezifisch genutzte Modelle und in „Alleskönner“ gruppieren lassen.

Räumliche Ausdehnung (Skala)

Hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung werden alle Modelltypen über alle Skalen angewendet (**Bild 1**, links). Allerdings zeigt sich hier, dass die physikalisch basierten Modelle eher selten auf großen Skalen und die konzeptionellen seltener auf kleiner Skala

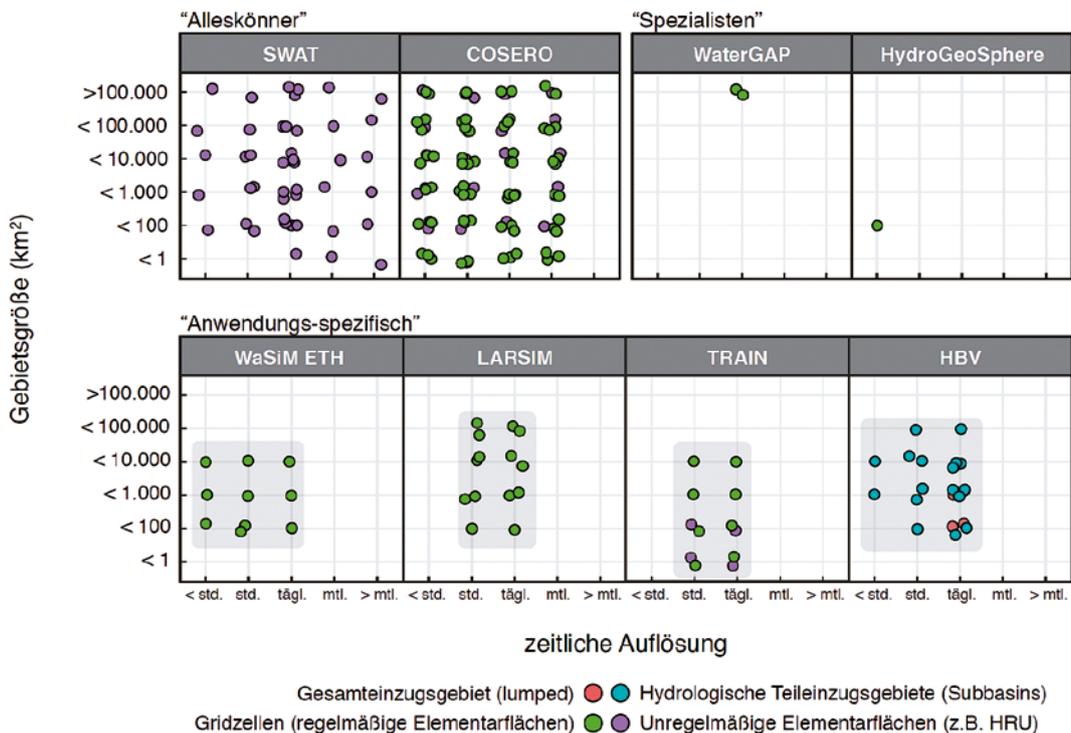


Bild 2: Beziehung zwischen räumlicher Ausdehnung und zeitlicher Auflösung für ausgewählte Modelle

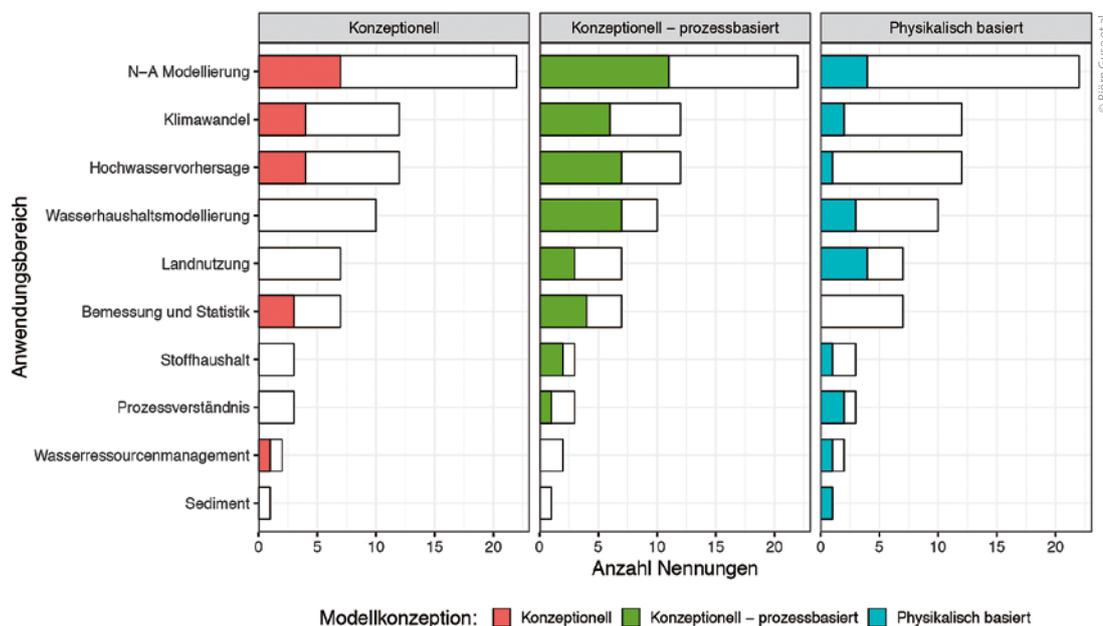


Bild 3: Anwendungsbereiche der hydrologischen Modelle in Beziehung zur Modellkonzeption

angewendet werden. Physikalisch basierte Modelle wurden ursprünglich für die Feldskala entwickelt, wohingegen konzeptionelle Modelle die hydrologischen Prozesse von Einzugsgebieten abbilden sollten. Es wäre zu erwarten gewesen, dass dieses Muster deutlicher auftritt.

Als Ursache hierfür kann eine hohe Datenverfügbarkeit angenommen werden. Detailgenaue, flächendeckende Boden- und Landnutzungskarten sowie die zunehmende Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten können dazu führen, dass auch konzeptionelle Modelle auf kleine Gebiete sowie physikalisch basierte Modelle auf großer Skala angewendet werden können. Diese Tendenz wird dadurch verstärkt, dass der Aspekt der Rechenleistung aufgrund der verbesserten Situation in den letzten Jahren an Bedeutung verloren hat und die Anwendbarkeit numerischer Modelle hierdurch kaum noch limitiert wird (**Bild 7**). Eine andere mögliche Erklärung ist, dass bei der Auswahl eines Modells eher die Kenntnisse und Erfahrungen mit einem bereits bekannten Modell den Ausschlag zur Nutzung geben als die Modelleignung für die Fragestellung, da letzteres unter anderem eine Einarbeitung erfordert („Hausmodell vor Passfähigkeit“) [15].

Räumliche Einheiten

Für die räumlichen Modelleinheiten (**Bild 1**, Mitte) zeigt sich ein typisches und erwartetes Muster [19]. Die physikalisch basierten Modelle unterteilen die Einzugsgebiete entweder rasterbasiert oder räumlich detailliert mit unregelmäßigen Elementarflächen, wie z. B. Hydrological Response Units (HRU). Gleiches gilt für die konzeptionell-prozessbasierten Modelle. Dagegen werden konzeptionelle Modelle für alle in der Umfrage auswählbaren räumlichen Einheiten angewendet. Die Spanne reicht hier von räumlich konzentrierter Anwendung (lumped), über Teileinzugsgebiete (subbasins) bis hin zu HRUs und Gridzellen (Rastern) als räumliche Diskretisierung. Somit ergibt sich eine klare Unterscheidung zwischen den konzeptionellen einerseits und den konzeptionell-prozessbasierten und physikalisch basierten Modellen andererseits.

Modelle, die auf eine räumliche Unterteilung verzichten (lumped), wurden von den Teilnehmenden ausschließlich als konzeptionell klassifiziert.

Zeitliche Diskretisierung

Die Angabe einer zeitlichen Auflösung konnte in der Umfrage zwischen kürzer als stündlich und länger als monatlich variieren (**Bild 1**, rechts). Die angegebenen Modelle werden überwiegend mit stündlichen und täglichen Zeitschritten angewendet (ca. 70 %). Hierbei ergibt sich kein klares Muster in Bezug auf die Modellkonzeption. Alle Modellkonzeptionen werden prinzipiell für alle genannten zeitlichen Diskretisierungen angewendet. Dieses Ergebnis ist überraschend, da zu erwarten war, dass physikalisch basierte Modelle eher mit zeitlich höherer Auflösung genutzt werden. Da die Prozesse überwiegend sehr detailliert dargestellt sind, kann eine unzureichende zeitliche Auflösung im Falle nicht-linearer Zusammenhänge schneller zu Instabilitäten bei der Integration der zugrunde liegenden Differentialgleichungen führen. Andererseits war auch zu erwarten, dass konzeptionelle Modelle ihren optimalen Anwendungsbereich vermehrt bei größeren zeitlichen Auflösungen finden. Daraus folgt die Frage, ob die Prozessdarstellung nicht (mehr) vorrangig von der strukturellen Modellkonzeption abhängig ist. Die Modelle können anscheinend aufgrund verbesserter Datenlage und gesteigerter Computerperformance mittlerweile über die Grenzen ihres eigentlichen Anwendungsbereiches genutzt werden.

In der kombinierten Analyse des räumlichen Anwendungsbereichs und der zeitlichen Diskretisierung, die spezifisch für acht ausgewählte Modelle durchgeführt wurde (**Bild 2**), fällt auf, dass einige Modellen wie SWAT oder COSERO für nahezu alle Kombinationen aus zeitlicher Diskretisierung und räumlichem Skalensbereich angewendet werden. Andere Modelle werden flexibler bzgl. der räumlichen Skala, aber nur für bestimmte zeitliche Auflösungen angewendet (z. B. TRAIN, LARSIM). Bei wiederum anderen Modellen variiert die räumliche Ausdehnung weniger, während die zeitliche Auflösung variabler gehandhabt wird (z. B. WaSiM-ETH).

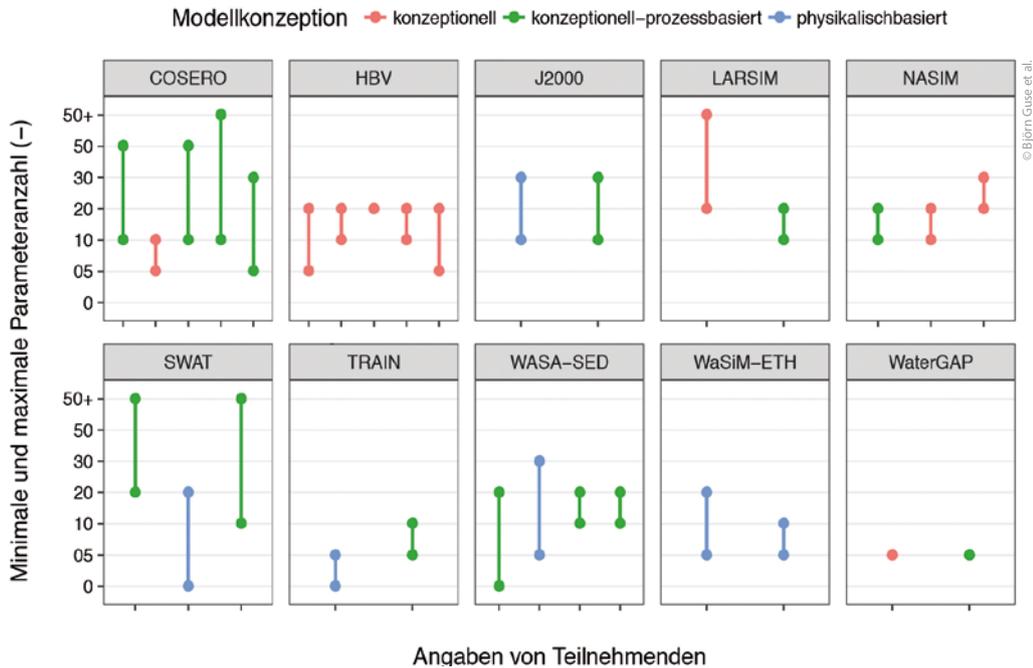


Bild 4: Minimale und maximale Anzahl an erforderlichen Modellparametern zur Kalibrierung (Modelle mit mehr als einer Nennung)

Entsprechende Auswertungen können helfen, Überschneidungen von Modellen unterschiedlicher Konzeptionen hinsichtlich zeitlicher Auflösung und räumlicher Skala zu identifizieren.

Modellanwendung

Die Auswertung geeigneter Anwendungsbereiche hinsichtlich der Modellkonzeption (**Bild 3**) zeigt, dass Hochwasservorhersage und Bemessungsaufgaben verstärkt durch konzeptionelle Modelle durchgeführt werden. Dagegen werden Prozessanalysen sowie

Stoff- und Wasserhaushaltsbetrachtungen eher durch komplexere Modelle (physikalisch basiert, prozessbasiert) durchgeführt. Hier scheint ein wichtiges Argument zu sein, dass man diesen Modellen eher eine Extrapolation vom Bekannten ins Unbekannte zutraut [10].

Implementierte Prozesse und Parameter

Um Modelle an die Bedingungen im Untersuchungsgebiet anzupassen, werden oftmals Parameter in der Modellstruktur ver-

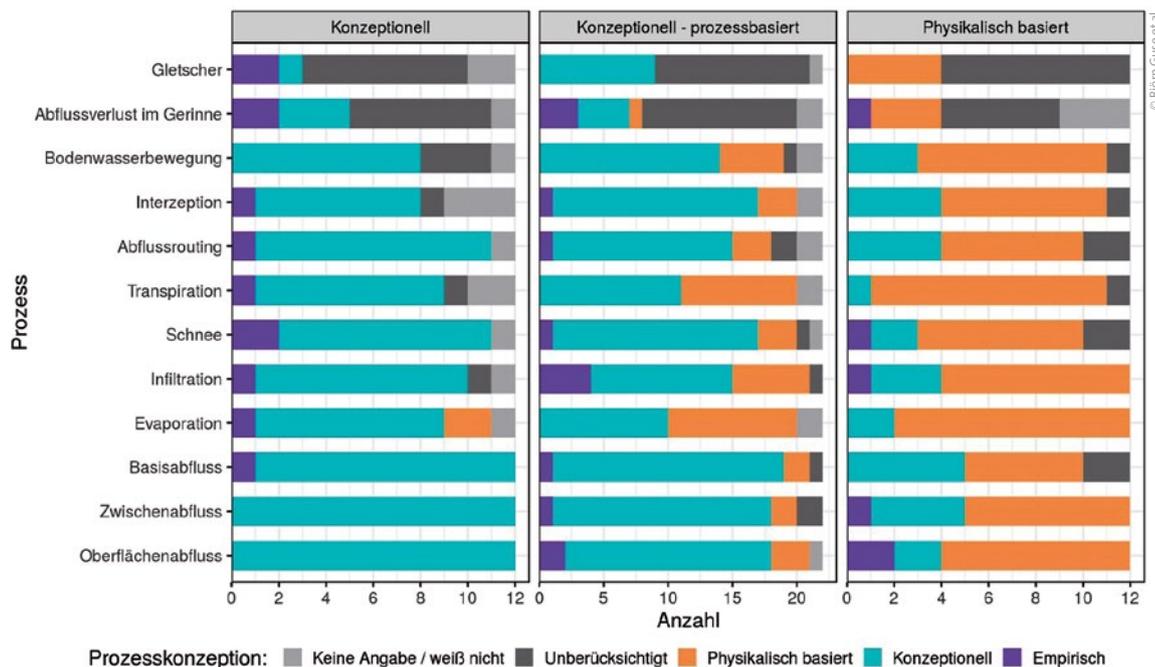


Bild 5: Konzeption ausgewählter hydrologischer Prozesse innerhalb der Modelle

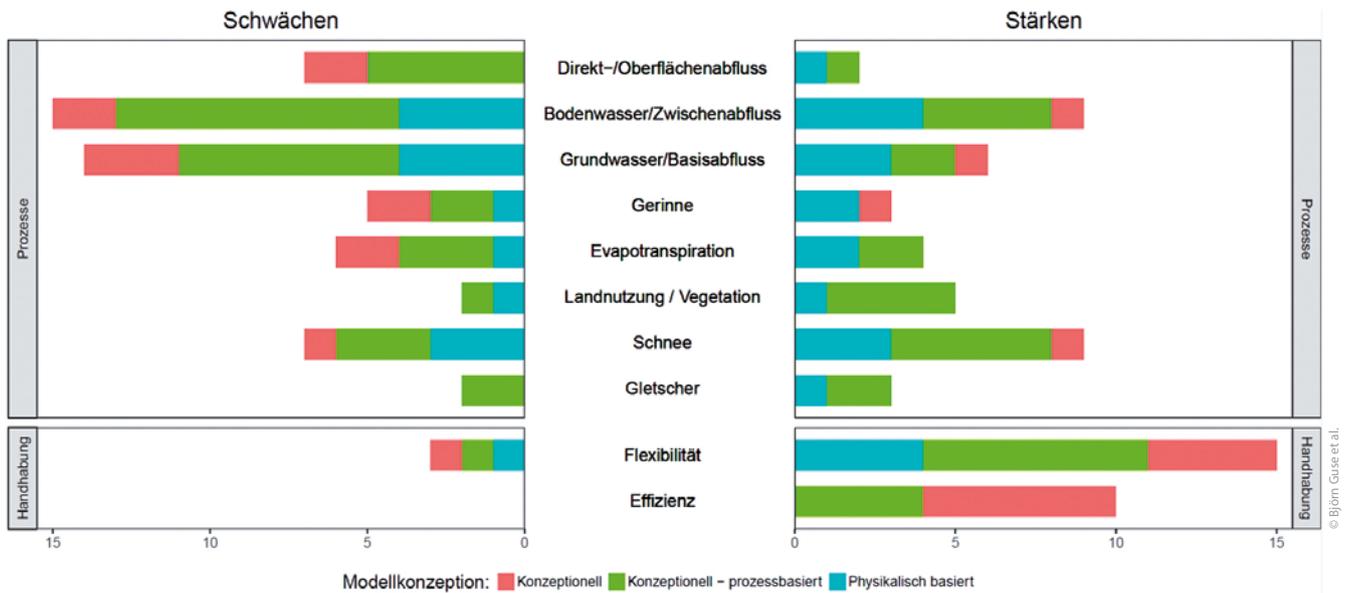


Bild 6: Nennungen von Stärken und Schwächen in der Prozessabbildung

wendet, um hydrologisch relevante Informationen zu berücksichtigen, die nicht in physikalischen Gesetzmäßigkeiten, konzeptionellen Ansätzen oder den zugrundeliegenden Daten enthalten sind. Die genannte Anzahl an Modellparametern, die für die Kalibrierung der jeweiligen hydrologischen Modelle benötigt werden, variiert zwischen und innerhalb der Modelltypen erheblich (**Bild 4**). Hierbei finden sich Angaben für alle vordefinierten Klassen. Auch die Variabilität innerhalb der Nennungen für ein bestimmtes Modell ist dabei teilweise erheblich. Beim Modell COSERO variiert die minimale genannte Parameteranzahl zwischen 1 und 10, während für die Maximalzahl Werte zwischen 5 – 10 und > 50 angegeben wurden. Beim SWAT-Modell variiert die Minimalzahl zwischen 0 und 10 – 20, während Maximalzahlen zwischen 10 – 20 und > 50 angegeben wurden. Beide Beispiele zeigen die große Spannweite bei der Einschätzung der zu kalibrierenden Parameter, die aufgrund der Größe nicht allein auf unterschiedlich komplexe Einzugsgebiete zurückgeführt werden kann. Da diese Einschätzung zudem zwischen den Anwendern stark variiert, müssen auch die Zielsetzung der Modellanwendung oder die Anwendung von Standard-Parameterwerten als Grund angenommen werden [15].

Insgesamt zeigt sich, dass bei physikalisch basierten Modellen die Anzahl der Kalibrierungsparameter geringer ist. Die Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalzahl sind bei den physikalisch basierten Modellen am geringsten (**Bild 4**). Hieraus kann gefolgert werden, dass bei physikalisch basierten Modellen eindeutiger geklärt ist, welche Parameter anwendungsspezifisch bestimmt werden müssen.

Bei den konzeptionellen und konzeptionell-prozessbasierten Modellen schwankt die Anzahl an zu kalibrierenden Parametern stärker. Dies lässt sich einerseits mit der höheren Anzahl an potenziell relevanten und zu kalibrierenden Modellparametern, andererseits durch die subjektive Entscheidung erklären, welche Parameter kalibriert werden sollten. Hierbei kann eine längere Erfahrung mit dem jeweiligen Modell dazu führen, dass die zu kalibrierende Parameterzahl enger eingegrenzt

werden kann. Andererseits kann die benötigte Parameteranzahl auch in Abhängigkeit der Kalibrierungsmethode variieren.

Ausgewählte Prozesse wurden hinsichtlich ihrer konzeptionellen Implementierung abgefragt (**Bild 5**). Für jeden dieser Prozesse wurde bestimmt, ob er in dem jeweiligen Modell empirisch, konzeptionell oder physikalisch basiert abgebildet wird. Hierbei wurde in der Analyse in **Bild 5** unterschieden, wie die hydrologischen Modelle insgesamt klassifiziert wurden. Es ergibt sich ein konsistentes Ergebnis, da die Art der Implementierung der Prozesse in den meisten Fällen mit der Modellkonzeption im Einklang steht.

Verdunstungsprozesse (Evaporation und Transpiration) haben bei allen drei Modellkonzepten den größten Anteil an physikalisch basierter Implementierung (45 %). Dadurch sind die Modelle unabhängiger von einer bestimmten Region anwendbar. Allerdings wurde auch deutlich, dass physikalisch basierte Modelle Prozesse enthalten, die konzeptionell oder empirisch implementiert wurden. Prozesse im Untergrund (Basisabfluss, Zwischenabfluss und Bodenwasserbewegung) sind häufiger konzeptionell implementiert (67 %).

Diese Erkenntnisse geben Hinweise darauf, dass für ausgewählte Prozesse unabhängig von der Konzeption des Modells eine einheitliche Prozessbeschreibung verwendet wird. So kann z. B. die Verdunstung physikalisch basiert in verschiedenen Modelltypen implementiert werden.

Dadurch dass innerhalb eines Modells die konzeptionelle Art der Prozessabbildung variieren kann, ergibt sich zwangsläufig eine gewisse Subjektivität hinsichtlich der Einschätzung der Konzeption des gesamten Modells. Anzunehmen ist, dass die Einordnung von Modellen in Kategorien auch vor dem Hintergrund gebietsspezifischer Schlüsselprozesse vorgenommen wurde. Dies würde bedeuten, dass einzelne Modellmodule die Modellklassifikation prägen und Veränderungen eines Moduls auch zu einer anderen Klassifikation führen würden. So dürfte ein empirisches Schneemodul in einem alpinen Einzugsgebiet eher zu einer Zuordnung in konzeptionelle Modelle führen als in Tieflandgebieten.

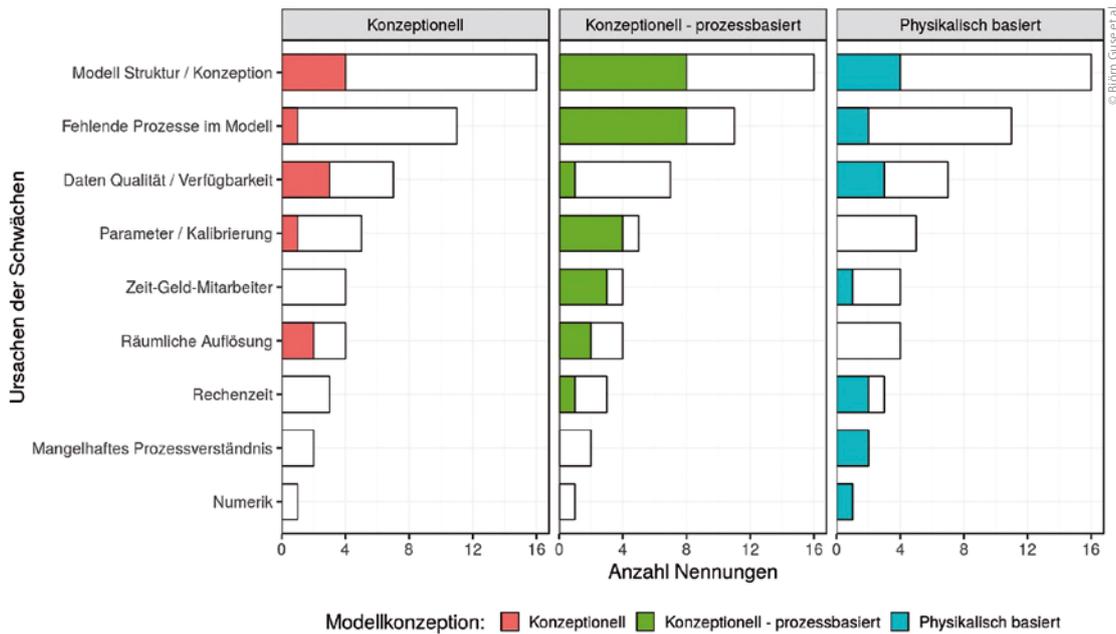


Bild 7: In der Umfrage genannte Ursachen für Modelldefizite in Beziehung zur Modellkonzeption

Stärken und Schwächen der implementierten Prozesse

In **Bild 6** werden Stärken und Schwächen der Modelle in Bezug auf die Prozessabbildung differenziert für die wesentlichen hydrologischen Prozesse sowie für die Eigenschaften Flexibilität und Effizienz klassifiziert.

Unabhängig vom Modelltyp wurden die Prozesse Bodenwasser/Zwischenabfluss, Grundwasser/Basisabfluss und Schnee am häufigsten als Stärken und auch als Schwächen genannt. Effizienz wird als klare Stärke von konzeptionellen und konzeptionell-prozessbasierten Modellen eingeschätzt. Hierbei bezieht sich Effizienz auf eine effiziente Handhabung oder auch kurze Initialisierungs- und Rechenzeiten. Dagegen wird Flexibilität für alle Modellkonzeptionen fast ausschließlich als Stärke genannt. Mangelnde Flexibilität wurde dagegen nur selten explizit als Schwäche benannt. Unter Flexibilität verstehen wir hier einen modularer Aufbau oder ein breites Anwendungsspektrum Auffällig ist, dass vereinfachte konzeptionelle Modelle vor allem mit Schwächen in der Prozessabbildung und Stärken bezüglich Flexibilität und Effizienz in Verbindung gebracht wurden.

Die Angaben hinsichtlich der Hauptursachen für Modelldefizite lassen sich vor allem in modellstrukturelle Schwächen und die fehlende Implementierung von bestimmten Prozessen in den Modellen zusammenfassen (**Bild 7**). Mangelhaftes Prozessverständnis, Rechenzeit und Schwächen in der Numerik wurden fast ausschließlich den physikalisch basierten Modellen zur Last gelegt. Allerdings ist die absolute Zahl der Angaben gering. Relativ eindeutig dagegen werden konzeptionell-prozessbasierte Modelle vor allem mit fehlenden Prozessen, limitierter Modellstruktur und problematischer Kalibrierung in Verbindung gebracht. Auffallend ist, dass Datenqualität und -verfügbarkeit bei konzeptionell-prozessbasierten Modellen seltener limitierend bewertet wird, während sie sowohl bei konzeptionellen als auch bei physikalisch basierten Modellen als Ursachen für Defizite angeführt wurden. Unklar bleibt aber, ob eine verbesserte Daten-

lage die Defizite reduzieren würde oder, ob gleichzeitig die Prozessbeschreibung verbessert werden müsste [12].

Als erfolgversprechende Strategie für die Verbesserung von Modelldefiziten wird unabhängig von der Modellkonzeption eine Verbesserung der Prozessimplementierung angesehen (**Bild 8**). Nachrangig wird neben Verbesserungen der räumlichen Auflösung oder der Modellkonzeption auch eine Verbesserung der Ressourcen (Zeit, Geld, Mitarbeiter) erwähnt.

Allgemein stellt sich die Frage, ob eine komplexere Prozessbeschreibung die geeignete Lösung für die genannten Probleme sein kann, oder ob dadurch neue Probleme bzgl. der Datenverfügbarkeit, Parametrisierung und Kalibrierung entstehen. Es ist davon auszugehen, dass Modelle mit steigender Komplexität schwieriger handhabbar sind.

Synthese

Wie groß ist das Spektrum der in der Umfrage genannten hydrologischen Modelle?

Die Vielzahl der Modellnennungen (n=26) ist Ausdruck der Diversität der genutzten Modelle im deutschsprachigen Raum. Hinsichtlich der Konzeption wurden die meisten Modelle (22) von den Nutzern als konzeptionell-prozessbasiert klassifiziert, je 12 wurden als konzeptionell und physikalisch basiert angegeben und ein Modell wurde der Kategorie Sonstiges zugeordnet. Die genannten Zahlen müssen nicht notwendigerweise die tatsächlichen Verhältnisse im deutschsprachigen Raum genutzter Modelle widerspiegeln, zeigen aber, dass die hydrologische Community auf einen weitreichenden Fundus an Modellen in der Modellierung zurückgreifen kann und Modellverbesserungen oder Modellvereinigungen den Neuentwicklungen von Modellen vorzuziehen ist.

Bei der Auswertung der Umfrage wurde deutlich, dass verschiedene Teilnehmer ein bestimmtes Modell hinsichtlich der Konzep-

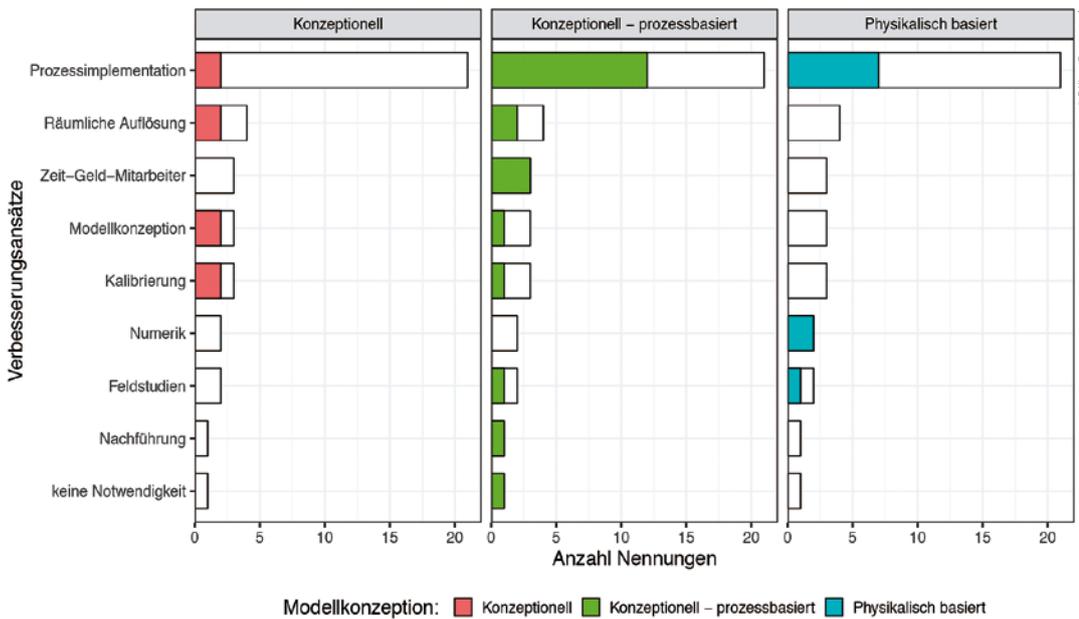


Bild 8: In der Umfrage genannte Ideen für die Verbesserung von Modelldefiziten

tion unterschiedlich klassifizierten. Obwohl diese Art der Kategorisierung von Modellen häufig genutzt wird, besteht also keineswegs Einigkeit bezüglich der Modellkonzeptionen. Auch die Grenzen der Anwendbarkeit unterschiedlicher Modellkonzeptionen sind unschärfer als erwartet. Da es jedoch Schwerpunkte bei den unterschiedlichen Modellkonzeptionen bezüglich der Anwendungsziele gibt, erscheint es weiterhin sinnvoll, die Klassifizierung hinsichtlich verschiedener Modellkonzeptionen für die Charakterisierung von hydrologischen Modellen zu verwenden.

Wie werden verschiedene Prozesse strukturell in Modellen mit unterschiedlicher Konzeption abgebildet?

Innerhalb von Modellen einer bestimmten Konzeption können Prozesse mit verschiedenem Abstraktionsgrad abgebildet sein. Physikalisch basierte Modelle können auch konzeptionelle Prozessimplementationen enthalten und umgekehrt. Über alle Modellkonzeptionen hinweg hat sich jedoch gezeigt, dass die Evapotranspiration überwiegend physikalisch basiert abgebildet wird. Boden- und Grundwasserprozesse sind demgegenüber vor allem in konzeptionellen und prozessorientierten Modellen vielfach empirisch oder konzeptionell implementiert. Nur bei den wenigsten Modellen ist eine eindeutige, objektiv gültige Zuordnung möglich. Daher scheint es sinnvoll, für die Modellauswahl genau zu prüfen, ob die dominanten Prozesse exakt genug für die jeweilige Zielstellung abgebildet werden.

Welche Stärken und Schwächen werden den in der Umfrage genannten Modellen hinsichtlich der Prozessabbildung zugeordnet und können systematische Ursachen für Modelldefizite abgeleitet werden?

Die Diversität der vorliegenden Angaben hinsichtlich Stärken und Schwächen der Modelle ist sehr groß. Häufig wurden bestimmte Prozesse im einem Modell als limitierend, im anderen als Stärke darge-

stellt. Es wurden jedoch vor allem die Boden- und Grundwassermodule ihrer Modelle häufiger als limitierend eingeschätzt. Als Stärke wurde bei konzeptionellen Modellen eher Flexibilität und Effizienz in der Anwendung, bei physikalischen Modellen vor allem bestimmte Prozessimplementationen und deren Präzision (insbesondere Schnee- und Bodenwasserprozesse) genannt. Die Ansichten über bestehende Defizite variieren so stark, dass eher eine individuelle Sichtweise als eine allgemeingültige Priorisierung von zu behobenden Modellschwächen festgestellt wurde. Eine Stärke von Modellen ist demnach die flexiblere Handhabung von Prozessimplementationen im Vergleich zu statischen Prozessabbildungen.

Als häufigste Ursache für bestehende Defizite wurde vor allem mangelhafte oder fehlende Prozessimplementationen genannt. Entsprechend wurden Verbesserungsvorschläge in Form von Prozessrealisierungen formuliert. Es erscheint lohnenswert, die durch neue Technologien und Methoden der Fernerkundung verbesserte Datenverfügbarkeit zu nutzen, um zu prüfen, ob eine alternative Prozessabbildung zu einer besseren Abbildung der jeweiligen hydrologischen Prozesse führt.

Ausblick

Für weiterführende Untersuchungen wird empfohlen, weit verbreitete und häufig genutzte Modelle unterschiedlicher Konzeptionen in einer vertiefenden Umfrage oder Analyse aufeinander treffen zu lassen. Basierend auf den hier vorgestellten Ergebnissen sollten Modelle ausgewählt werden, die auf gleichen Zeit- und Raumskalen genutzt werden können. Die Entwickler beider Modellrichtungen könnten daher in einem Diskurs gemeinsam Lösungen für Verbesserungen erarbeiten (z. B. Modell-Workshop). Darüber hinaus sollten Prozesse, die besonders oft als defizitär bewertet wurden, im Rahmen von Modellvergleichen näher untersucht werden, um besonders geeignete Prozessimplementationen zu identifizieren und auf Übertragbarkeit zu testen.

Dank

Wir danken der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft e. V. (DHG) für ihre Unterstützung, allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Umfrage für ihre Angaben, der SoSci Survey GmbH für die Verfügbarkeit des Umfrage-Tools, dem DHG-Arbeitskreis „Prozessabbildung in hydrologischen Modellen“ für die Diskussionen im Vorfeld der Umfrage und den KollegInnen der CAU Kiel, der Uni Potsdam und der Uni Freiburg, die die Umfrage im Vorfeld ausgetestet und uns beim Erstellen der finalen Version unterstützt haben.

Literatur

- [1] Beven, K.: Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (2007), 460 - 467.
- [2] Bormann, H.; Breuer, L.; Giertz, S.; Huisman, J.A.; Viney, N.R.: Uncertainties in Environmental Modelling and Consequences for Policy Making. In: P. C. Baveye, J. Mysiak, & M. Laba (Hrsg.) (2009a), Springer-Verlag.
- [3] Bormann, H.; Breuer, L.; Croke, B.; Gräff, T.; Huisman, J.A.: Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) IV. Model sensitivity on data aggregation and spatial (re-) distribution. In: *Advances in Water Resources* 32 (2009b), S. 171 - 192.
- [4] Breuer, L.; Huisman, J.A.; Willems, P.; Bormann, H.; Bronstert, A.; Croke, B.F.; Frede, H.-G.; Gräff, T.; Hubrechts, L.; Jakeman, A.J.; Kite, G.; Lanini, J.; Leavesley, G.; Lettenmaier, D.P.; Lindström, G.; Seibert, J.; Sivapalan, M.; Viney, N.R.: Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM) I: model intercomparison of current land use. In: *Advances in Water Resources* 32 (2009), S. 129 - 146.
- [5] Clark, M.P.; Fan, Y.; Lawrence, D.M.; Adam, J.C.; Bolster, D.; Gochis, D.J.; Hopper, R.P.; Kumar, M.; Leung, L.R.; Mackay, D.S.; Maxwell, R.M.; Shen, C.; Swenson, S.C.; Zeng, X.: Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models. In: *Water Resour. Res.* 51 (2015a), S. 5929 - 5956.
- [6] Clark, M.P.; McMillan, H.K.; Collins, D.B.; Kavetski, D.; Woods, R.A.: Hydrological field data from a modeller's perspective: Part 2: process-based evaluation of model hypotheses. In: *Hydrol. Process.* 25 (2011), S. 523 - 543.
- [7] Clark, M.P.; Nijssen, B.; Lundquist, J.D.; Kavetski, D.; Rupp, D.E.; Woods, R.A.; Freer, J.E.; Gutmann, E.D.; Wood, A.W.; Brekke, L.D.; Arnold, J.R.; Gochis, D.J.; Rasmussen, R.M.: A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. In: *Water Resour. Res.* 51/4 (2015), S. 2498 - 2514.
- [8] Clark, M.P.; Schaefli, B.; Schymanski, S.J.; Samaniego, L.; Luce, C.H.; Jackson, B.M.; Freer, J.E.; Arnold, J.R.; Moore, R.D.; Istanbuluoglu, E.; Ceola, S.: Improving the theoretical underpinnings of process-based hydrologic models. In: *Water Resour. Res.* 52. (2016), S. 2350 - 2365.
- [9] Dyck, S.; Peschke, G.: *Grundlagen der Hydrologie* (1995), 536 S, VEB Verlag für Bauwesen
- [10] Elfert, S.; Bormann, H.: Simulated impact of past and possible future land use changes on the hydrological response of the northern German lowland Hunte catchment. In: *J. Hydrol.* 383 (2010), S. 245 - 255.
- [11] Fenicia, F.; Kavetski, D.; Savenije, H.H.G.: Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. In: *Water Resour. Res.* 47 (2011), W11510.
- [12] Francke, T.; Baroni, G.; Brosinsky, A.; Förster, S.; Lopez-Tarazon, J.A.; Sommerer, E.; Bronstert, A.: What did really improve our meso-scale hydrological model? A multi-dimensional analysis based on real observations. In: *Water Resour. Res.* 54 (2018), doi:10.1029/2018WR022813.
- [13] Guse, B.; Reusser, D.E.; Fohrer, N.: How to improve the representation of hydrological processes in SWAT for a lowland catchment - Temporal analysis of parameter sensitivity and model performance. In: *Hydrol. Process.* 28 (2014), S. 2651 - 2670.
- [14] Holländer, H.M.; Blume, T.; Bormann, H.; Buytaert, W.; Chirico, G.B.; Exbrayat, J.-F.; Gustafsson, D.; Hölzel, H.; Kraft, P.; Stamm, C.; Stoll, S.; Blöschl, G.; Flüher, H.: Comparative predictions of discharge from an

artificial catchment (Chicken Creek) using sparse data. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13 (2009), S. 2069 - 2094.

- [15] Holländer, H.M.; Bormann, H.; Blume, T.; Buytaert, W.; Chirico, G.B.; Exbrayat, J.-F.; Gustafsson, D.; Hölzel, H.; Krauß, T.; Kraft, P.; Stoll, S.; Blöschl, G.; Flüher, H.: In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18 (2014), S. 2065 - 2085.
- [16] Merz, R.; Blöschl, G.: Regionalisation of catchment model parameters. In: *J. Hydrol.* 287 (2004), S. 95 - 123.
- [17] Wagener, T.; Boyle, D.P.; Lees, M.J.; Wheater, H.S.; Gupta, H.V.; Sorooshian, S.: A framework for development and application of hydrological models. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 5 (2001), Heft 1, S. 13 - 26.
- [18] Weiler, M.; Beven, K.: Do we need a Community Hydrological Model? In: *Water Resour. Res.* 51 (2015), S. 7777 - 7784.
- [19] Wood, E.: Scaling behaviour of hydrological fluxes and variables: Empirical studies using a hydrological model and remote sensing data. In: *Hydrol. Process.* 9 (1995), S. 331-346.
- [20] Zehe, E.; Maurer, T.; Ihringer, J.; Plate, E.: (2001): Modeling water flow and mass transport in a loess catchment. In: *Phys. Chem. Earth PT B* 26 (2001), S. 487 - 507.
- [21] <https://www.dhydrog.de/dhg/arbeitskreise/> (Abruf am 15.04.2019).

Autoren

Dr. Björn Guse

GFZ Potsdam, Sektion Hydrologie
Telegrafenberg, 14473 Potsdam
E-Mail: bfuse@gfz-potsdam.de
CAU Kiel
Institut für Natur- und Ressourcenschutz
Abteilung für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Olshausenstraße 75, 24118 Kiel

M. Sc. Tobias Pilz

Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Straße 24 - 25, 14476 Potsdam
E-Mail: tpilz@uni-potsdam.de

Dr. Michael Stoelzle

Universität Freiburg
Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Professur für Umwelthydrosysteme
Friedrichstraße 39, 79098 Freiburg
E-Mail: michael.stoelzle@hydro.uni-freiburg.de

Apl.-Prof. Dr. Helge Bormann

Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth
Referat Forschung und Transfer
Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg
E-Mail: helge.bormann@jade-hs.de



SpringerProfessional.de

Hydrologische Modellierung



Nützmann, G.; Moser, H.: *Modellierung hydrologischer Prozesse. In: Elemente einer analytischen Hydrologie.* Wiesbaden: Springer Spektrum, 2016.
www.springerprofessional.de/link/10363936

Hofmann, J.; Schüttrumpf, H.: Ein holistischer Modellansatz für ein multifunktionales Starkregenerisiko-Informationssystem. In: *Wasserwirtschaft, Ausgabe 4/2019.* Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
www.springerprofessional.de/link/16592594