

Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg

Daily discharge forecasting with operational water-balance models in Baden-Württemberg

von Annette Luce, Ingo Haag und Manfred Bremicker

Bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg werden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM täglich für ca. 90 Pegel Abflussvorhersagen berechnet, die bis zu 7 Tage in die Zukunft reichen. Die hierbei innerhalb von LARSIM eingesetzten Verfahren zur automatisierten Modellnachführung werden erläutert. Die Möglichkeiten, die sich aus den kontinuierlichen Abflussvorhersagen ergeben, werden diskutiert.

The Flood Forecast Centre of the State Institute for Environment, Measurements and Nature Conservation Baden-Württemberg issues daily discharge forecasts for approximately 90 river gauges. These forecasts are calculated with the distributed water-balance model LARSIM, covering up to 7 days ahead. To guarantee reliable forecasts, LARSIM uses automated process-oriented optimization techniques, which are described in this paper. The possibilities arising from the continuous forecasts are discussed.

1 Einführung

Bereits seit der Inbetriebnahme des operationellen Niederschlagsmessnetzes im Jahr 1996 werden bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale (HVZ) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Flussgebietsmodelle zur Hochwasser-
vorhersage eingesetzt (Homagk & Ludwig 1998). Mit diesen ereignisbezogenen Modellen wird die Abflussbildung und -konzentration, der Wellenablauf im Gerinne sowie die Wirkung von Seen und Rückhaltebecken berechnet. Die Verdunstung und die Entwicklung des Bodenwassergehalts werden bei den Flussgebietsmodellen nicht berücksichtigt, weshalb hiermit keine kontinuierliche Simulation des Wasserhaushalts und keine Abflussvorhersagen im Mittel- und Niedrigwasserbereich möglich sind.

Im Gegensatz zu den ereignisbezogenen Flussgebietsmodellen kann mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen (WHM) der terrestrische Teil des Wasserkreislaufs vollständig und kontinuierlich simuliert werden. Somit können mit einem WHM für den gesamten Abflussbereich vom Niedrig- bis zum Hochwasser Vorhersagen erstellt werden. Da der Bodenwassergehalt mit simuliert wird, können im Vorfeld von Hochwassern Aussagen zur Vorfeuchte bzw. Abflussbereitschaft gemacht werden, so dass auch für kleine Einzugsgebiete (bis wenige 100 km²) Hochwasservorhersagen oder zumindest Frühwarnungen möglich sind, sofern die Niederschlagsvorhersagen ausreichend genau sind.

Solche Wasserhaushaltsmodelle werden bei der HVZ seit dem Sommer 2003 für die operationelle Abflussvorhersage eingesetzt. In den Trockenwetterperioden der Jahre 2003 und 2004 dienten die entsprechenden Niedrigwasservorhersagen bereits als wichtige Entscheidungsgrundlage für das Niedrigwassermanagement in Baden-Württemberg. Auch im Hinblick auf die Hochwasserfrühwarnung zeichnet sich eine maßgebliche Verbesserung durch den operationellen Einsatz der Wasserhaushaltsmodelle ab.

Im vorliegenden Artikel wird das in Baden-Württemberg operationell eingesetzte Wasserhaushaltsmodell LARSIM erläutert. Der Schwerpunkt der Darstellung liegt auf den Verfahren, die speziell für den automatisierten Vor-

hersagebetrieb entwickelt wurden. Anhand von Simulationsergebnissen werden die Funktionsweise veranschaulicht sowie die Möglichkeiten und Grenzen der operationellen Abflussvorhersagen aufgezeigt.

2 Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) ist eine Weiterentwicklung des Flussgebietsmodells FGMOD (Ludwig 1982) und wird zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz in Einzugsgebieten unterschiedlicher Größenordnung zwischen 10 km² und 1 Mio. km² mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen eingesetzt (z.B. Bremicker 1998, Gathenya 1999, Ebel et al. 2000, Richter & Ludwig 2003).

LARSIM ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des terrestrischen Wasserkreislaufs in hoher zeitlicher Auflösung. Das Modell basiert auf räumlich aufgelösten Systemdaten (Geländehöhe, Gefälle, Landnutzung, Feldkapazität der Böden, Gerinnegeometrie, etc.) und wird von meteorologischen Eingangsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur, etc.) angetrieben. Nach einer modellinternen Regionalisierung der meteorologischen Eingangsdaten werden mit LARSIM alle relevanten hydrologischen Teilprozesse simuliert (Abb. 1).

Beim Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells wird das jeweilige Flussgebiet in Teilgebiete aufgelöst (Teileinzugsgebiete oder Rasterzellen). Zur Berücksichtigung subskaliger Prozesse sind diese Teilgebiete nochmals in Landnutzungsklassen unterteilt, denen die Feldkapazitäten der Böden zugeordnet sind. Unter Berücksichtigung landnutzungsspezifischer, jahreszeitlich variabler Systemdaten werden die folgenden Prozesse subskalig berechnet (Bremicker 2000):

- Schneeakkumulation und -ablation (Knauf 1980).
- Evapotranspiration (inkl. Interzeptionsverdunstung) nach dem Penman-Monteith-Ansatz (DVWK 1996).
- Bodenwasserhaushalt nach dem Xinanjiang-Verfahren (Zhao 1977), in der modifizierten Form von Todini (1996).

Die folgenden Prozesse werden teilgebietspezifisch behandelt:

- Abflusskonzentration über drei parallele Einzel-linearspeicher für Direktabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss.
- Translation und Retention im Gerinne werden zu- meist mit hydrologischen Verfahren (z.B. Williams 1969) abgebildet. Es können aber auch Volumen- Abfluss-Beziehungen eingebunden werden, die mit Hilfe hydrodynamischer Modelle ermittelt wurden.

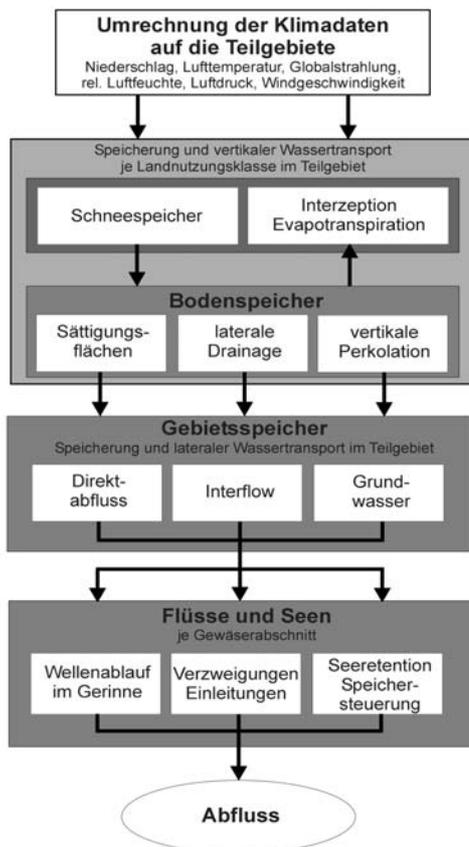


Abb.1: Schematische Struktur des Wasserhaushaltsmodells LARSIM.

Darüber hinaus können Rückhaltebecken, Talsperren, Ein- bzw. Überleitungen sowie in vereinfachter Weise Karsteflüsse berücksichtigt werden.

In Baden-Württemberg stehen für die gesamte Landesfläche Wasserhaushaltsmodelle auf Basis des Programms LARSIM zur Verfügung, die im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz erstellt wurden. Dabei handelt es sich um rasterbasierte Modelle mit Teilgebietsflächen von $1 \times 1 \text{ km}^2$, wobei innerhalb jeder Rasterzelle auf der Basis von Fernerkundungsdaten subskalig 16 Landnutzungs-klassen unterschieden werden (Bremicker et al. 2004).

Im Offline-Betrieb liefern die baden-württembergischen Wasserhaushaltsmodelle Eingangsdaten für zahlreiche Fragestellungen, wie z.B. räumlich hochaufgelöste Abflussdaten für Stoffemissionsbetrachtungen und Gewässergütesimulationen sowie flächendetaillierte Angaben zur Grundwasserneubildung. Darüber hinaus werden die Wasserhaushaltsmodelle genutzt, um (in Kombination mit Klimamodellen) mögliche Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen infolge des Klimawandels zu prognostizieren (Bartels et al. 2004; Gerlinger 2004) und um Aussagen zu Auswirkungen von

Landnutzungsänderungen auf die Wasserwirtschaft zu treffen (Haag et al. 2005a).

3. Weiterentwicklung von LARSIM für den operationellen Betrieb

Die operationellen Wasserhaushaltsmodelle arbeiten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Sie wurden so kalibriert, dass das gesamte Abflussspektrum von Niedrig- bis Hochwasser über lange Zeiträume hinweg möglichst gut nachgebildet wird. Im täglichen operationellen Betrieb können jedoch vorübergehende Diskrepanzen zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen auftreten, die unterschiedliche Ursachen haben: Häufig sind die Diskrepanzen auf eine unzureichende Niederschlags- und Klimastationsdichte bzw. auf nicht repräsentative Daten oder auf ungenaue Wasserstands-Abfluss-Beziehungen zurückzuführen, aber auch modellimmanente Ungenauigkeiten sind unvermeidbar.

Durch den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen kann jedoch im täglichen Betrieb überprüft werden, wie gut das Modell den aktuellen Wasserhaushalt der Einzugsgebiete abbildet. Bei Abweichungen kann durch die Nachführung geeigneter Modellgrößen sichergestellt werden, dass das Modell den Wasserhaushalt zum aktuellen Zeitpunkt möglichst gut repräsentiert und die Vorhersagequalität verbessert wird. Im Auftrag der HVZ wurde LARSIM daher um die nachfolgend beschriebenen Komponenten einer automatisierten, prozessorientierten Modellnachführung erweitert.

3.1 Fortschreibung modellinterner Speicherfüllungen

Als Grundvoraussetzung für den operationellen Betrieb wurde die Möglichkeit geschaffen, den Modellzustand an vorzugebenden Zeitpunkten abzuspeichern. In den hierdurch erzeugten „WHM-Zustandsdateien“ werden für alle Teilgebiete die Füllungen der hydrologischen Speicher abgelegt. Für das Rastermodell des 14.000 km^2 großen Neckareinzugsgebiets sind dies z.B. rund 1,1 Millionen Werte, die u.a. die aktuelle Füllung des Grundwasserspeichers je Rasterfläche sowie landnutzungs-spezifisch die Benetzung der Blattoberflächen, die Schneehöhen und die Füllungen der Bodenspeicher repräsentieren.

Dieser zwischengespeicherte Modellzustand wird als Anfangsbedingung für eine nachfolgende Simulation eingelesen. Damit wird sichergestellt, dass auch bei kurzen Simulationsläufen eine kontinuierliche Fortschreibung des berechneten Wasserhaushalts stattfindet.

Im operationellen Vorhersagebetrieb wird der vom Modell berechnete Gesamtzeitraum in zwei Abschnitte unterteilt: Im Simulationszeitraum (= Berechnungsbeginn bis zum Zeitpunkt der Vorhersage) wird das Modell auf der Basis von operationell verfügbaren, gemessenen meteorologischen Daten und gemessenen Abflüssen betrieben. Im anschließenden Vorhersagezeitraum hingegen erfolgt der Modellbetrieb auf der Basis der Wettervorhersagen des Deutschen Wetterdienstes.

Im Routinebetrieb umfasst der Simulationszeitraum zwei Tage, d.h. als Anfangsbedingung wird die für zwei Tage vor dem Vorhersagezeitpunkt erzeugte WHM-Zustands-datei eingelesen.

3.2 Verwendung gemessener Abflüsse

Im operationellen Betrieb wird generell davon ausgegangen, dass für die Berechnung des Abflusses flussabwärts von Pegelstandorten die an den Pegeln gemessenen Abflussganglinien verwendet werden sollen, sofern diese verfügbar und von guter Qualität sind. Als Information zur Qualität der gemessenen Abflussganglinien wertet das Modell einen Datensatz aus, der pegelspezifische Angaben zur jeweiligen Güte der Wasserstands-Abfluss-Beziehung im Niedrig-, Mittel- und Hochwasserbereich enthält. Hieraus kann sich beispielsweise die Situation ergeben, dass das WHM an einem Pegel die gemessenen Abflüsse im Niedrigwasserbereich als unzuverlässig ignoriert, während dort gemessene Mittel- und Hochwasserabflüsse vom Modell als Eingangsdaten verwendet werden.

Zudem entscheidet die Güte der Messung auch darüber, ob der Pegel im jeweiligen Abflussbereich zur automatisierten Modellnachführung verwendet wird oder nicht.

3.3 Automatisierte Modellnachführung

Die automatisierte Modellnachführung von LARSIM wertet Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen aus und führt anschließend die im folgenden beschriebene situationsabhängige Korrektur durch. Das Prinzip der automatisierten Modellnachführung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Zunächst wird einem Datensatz entnommen, ob der Pegel grundsätzlich für die Nachführung verwendet werden soll. Falls ja, überprüft das Modell anhand der gemessenen Abflussganglinie im Simulationszeitraum, ob der aktuelle Abfluss am Pegel dem Niedrig-, Mittel- oder Hochwasserbereich zuzuordnen ist. Sofern die Wasserstands-Abfluss-Beziehung im aktuellen Abflussbereich als zuverlässig eingestuft wurde, erfolgt eine Nachführung an diesem Pegel. Je nach Abflussbereich wird dabei eine andere Nachführungsstrategie verwendet.

3.3.1 Mittel- und Niedrigwasserbereich

Im Niedrig- und Mittelwasserbereich werden die Modellabweichungen i.d.R. für die letzten 48 Stunden vor dem Vorhersagezeitpunkt (NQM-Auswertzeitraum) analysiert, so dass kurzfristige Wasserstandsschwankungen am Pegel nicht überbewertet werden. Eine Modellnachführung wird nur vorgenommen, wenn im Auswertzeitraum die relative Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Abfluss über einem vorzugebenden Schwellenwert $MaxAbw$ (z.B. 5%) liegt.

Im nächsten Schritt wird das Verhältnis zwischen dem Minimum und dem Maximum der Stundenwerte des gemessenen Abflusses im NQM-Auswertzeitraum ermittelt (Q_{min}/Q_{max}). Liegt dieses Verhältnis unterhalb eines vorzugebenden Schwellenwertes $VariQuot$, so wird davon ausgegangen, dass annähernd stationäre Abflussverhältnisse vorliegen. Andernfalls wird die Situation als instationär eingestuft.

Nachführung des Wasserdargebots

Im instationären Niedrig- und Mittelwasserfall wird zunächst geprüft, ob durch eine Anpassung des Wasserdargebots (WD) im Simulationszeitraum eine ausreichende Übereinstimmung zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss im NQM-Auswertzeitraum erreicht werden kann. Die maximal zulässige Korrektur

des Wasserdargebots wird dabei durch vorzugebende minimale und maximale Korrekturfaktoren eingeschränkt.

Die Korrektur des Wasserdargebots ist vor allem in folgenden Fällen notwendig und zielführend: Beim Auftreten kleinräumiger, konvektiver Niederschläge (Gewitterzellen) kann es je nach Lage der Niederschlagsstationen sowohl zur Über- als auch zur Unterschätzung des Niederschlags kommen, was über die Nachführung des Wasserdargebots ausgeglichen werden kann. Auch beim Abschmelzen von Schneedecken, deren Wasseräquivalent im Modell nicht korrekt abgebildet wurde, kann es zur Fehleinschätzung des Abflusses kommen, die über die Wasserdargebotnachführung abgefangen werden kann. In den beschriebenen Fällen wird ein Korrekturfaktor ermittelt, mit dessen Hilfe das Wasserdargebot über den gesamten Simulationszeitraum so angepasst wird, dass der berechnete Abfluss im NQM-Zeitraum möglichst gut mit dem gemessenen Abfluss übereinstimmt.

Nachführung der Gebietsspeicher

Die Nachführung des Wasserdargebots ist hingegen nicht zielführend, wenn die Instationarität des Abflusses nicht durch Niederschlag bzw. Schneeschmelze im Simulationszeitraum bedingt ist. Dies kann z.B. im abfallenden Ast nach einer Abflusserhöhung der Fall sein, wenn der Rückgang des Abflusses auf das Auslaufen der Gebietsspeicher für Interflow und Direktabfluss zurückzuführen ist. In solchen instationären Niedrig- und Mittelwasserfällen, bei denen die Nachführung des Wasserdargebots nicht zielführend ist, wird der aktuelle Wasserinhalt der o.g. hydrologischen Gebietsspeicher so nachgeführt, dass der berechnete Abfluss mit den Messwerten am Pegel möglichst gut übereinstimmt. Eine Nachführung der Gebietsspeicher erfolgt auch dann, wenn bereits im Vorfeld über das Verhältnis Q_{min}/Q_{max} festgestellt wurde, dass annähernd stationäre Verhältnisse herrschen.

Für eine weitere Differenzierung bei der Nachführung von Gebietsspeichern wird der Anteil des Grundwasserabflusses am simulierten Gesamtabfluss als Kriterium herangezogen. Liegt der Grundwasserabflussanteil über einem vorzugebenden Schwellenwert $MinQ_B$ (z.B. 90%), wird die aktuelle Situation von LARSIM als annähernd stationäre Niedrigwasserphase eingestuft. In diesem Fall werden die Füllungen aller drei Gebietsspeicher in den Teilgebieten des Pegelkontrollbereichs zu Beginn des Simulationszeitraums so nachgeführt, dass der simulierte Abfluss im NQM-Auswertzeitraum möglichst gut mit dem gemessenen Abfluss übereinstimmt. Dabei ist zu beachten, dass es sich in diesem Fall vor allem um eine Nachführung des Grundwasserspeichers handelt. Ist der simulierte Grundwasserabflussanteil geringer als der vorgegebene Schwellenwert $MinQ_B$, so wird von einer stationären Mittelwassersituation oder von einem abfallenden Ast nach einer Abflusserhöhung ausgegangen und es werden ausschließlich die Gebietsspeicher für Interflow und Direktabfluss nachgeführt. Dadurch wird ausgeschlossen, dass Fehleinschätzungen des Wasserdargebots oder des Auslaufverhaltens von Interflow- und Direktabflussspeicher durch eine Nachführung des Grundwasserspeichers kompensiert werden.

- HQ-AZR = Auswertezeitraum für Hochwasser (z.B. 6 h)
 NQM-AZR = Auswertezeitraum für Niedrig- und Mittelwasser (z.B. 48 h)
 MaxAbw = Maximal zulässige mittlere Abweichung des berechneten vom gemessenen Abfluss im Auswertezeitraum (z.B. 5%)
 VariQuot = Variationsquotient Q_{\min}/Q_{\max} als Maß für die Schwankungsbreite des Abflusses (z.B. 80%)
 MinQ_B = Mindestanteil Basisabfluss am Gesamtabfluss für die Nachführung des Basisabflussspeichers (z.B. 90%)
 V_B, V_I, V_D = Gebietspeicher für Basisabfluss, Interflow, Direktabfluss
 WD = Wasserdargebot

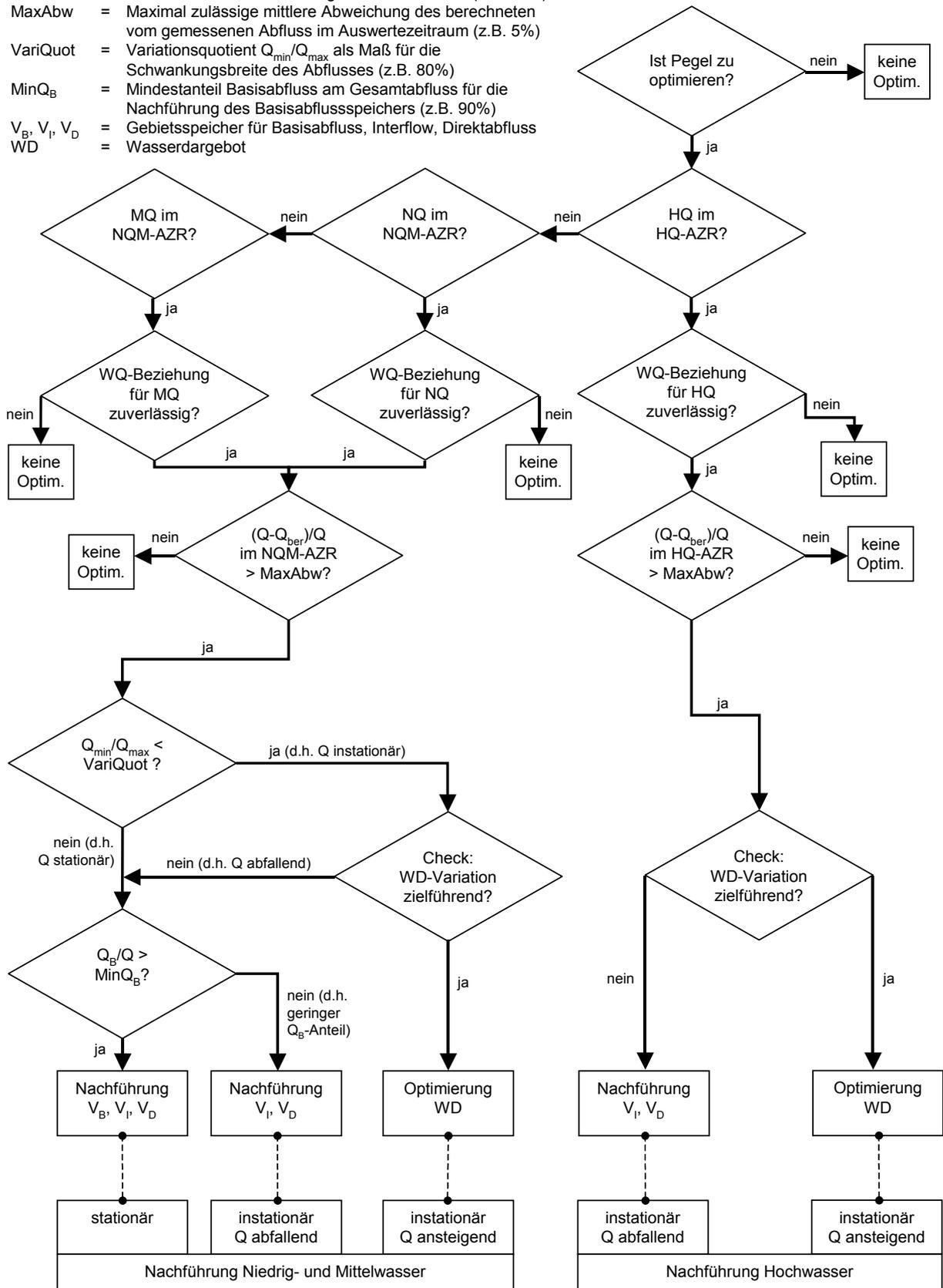


Abb.2: Struktur der automatisierten Modellnachführung im operationellen Betrieb von LARSIM. (Angaben zur Nachführung der Schneedecke: Siehe Text).

3.3.2 Hochwasserbereich

Der Auswertezeitraum für den Hochwasserbereich umfasst aufgrund der gegenüber Mittel- und Niedrigwasser wesentlich höheren Abflussdynamik i.d.R. lediglich die letzten 6 Stunden vor dem Vorhersagezeitpunkt (HQ-Auswertezeitraum). Damit wird der Abflussentwicklung unmittelbar vor dem Vorhersagezeitpunkt Rechnung getragen. Liegt mindestens ein Wert der gemessenen Abflussganglinie des Pegels im HQ-Auswertezeitraum im vordefinierten Hochwasserbereich, werden die Nachführungsbedingungen für Hochwasser zugrunde gelegt: Eine Modellnachführung erfolgt nur, wenn die Messung im Hochwasserbereich zuverlässig ist und die relative Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Abfluss im HQ-Auswertezeitraum größer ist als der vorgegebene Schwellenwert (MaxAbw).

Im Hochwasserfall kann grundsätzlich von instationären Verhältnissen ausgegangen werden, so dass auf die Prüfung des Verhältnisses Q_{min}/Q_{max} verzichtet wird. Analog zur Niedrig- und Mittelwassernachführung wird zunächst geprüft, ob mit einer Nachführung des Wasserdargebots im Simulationszeitraum die gewünschte Anpassung der simulierten an die gemessene Ganglinie im HQ-Auswertezeitraum erreicht werden kann. Ist dies nicht der Fall, werden die Füllungen der Gebietspeicher für Interflow und Direktabfluss nachgeführt. Eine Nachführung des Grundwasserspeichers ist im Hochwasserfall ausgeschlossen.

3.3.3 Schneedecke

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM umfasst weiterhin ein Verfahren zur automatisierten Nachführung der berechneten Schneedecke an gemessene Schneedaten. Hierbei wird die modellinterne Grenztemperatur für den Übergang von Schnee- in Regenniederschlag innerhalb eines vorgegebenen Wertebereiches (in der Regel von -1°C bis $+1^{\circ}\text{C}$) regionalspezifisch so festgelegt, dass die berechnete Schneedecke möglichst gut mit den entsprechenden Messwerten übereinstimmt.

Als Messwerte können sowohl bodengebundene Schneemessungen (NSD-Messungen des DWD) als auch Schneegrenzen bzw. schneefreie Flächen aus optischen Satellitenbildern (NOAH) verwendet werden. Die entsprechende Nachführungsverfahren wurden im Rahmen des DLR-geförderten Vorhabens InFerno entwickelt (Schulz et al., 2002).

4 Automatisierter Betrieb von LARSIM bei der HVZ

4.1 Grundlagen des täglichen operationellen Betriebs

Mit den operationellen Wasserhaushaltsmodellen werden derzeit täglich aktuelle Abflussvorhersagen für rund 90 Pegel in den baden-württembergischen Einzugsgebieten von Neckar, Donau, Hoch- und Oberrhein, Tauber und Bodensee berechnet. Der Vorhersagezeitraum erstreckt sich über sieben Tage. Für die Berechnung ist die automatisierte operationelle Einbeziehung umfangreicher Mess- und Vorhersagedaten unabdingbar. Der sich hieraus ergebende operationelle Datenfluss ist in Abbildung 3 skizziert.

Für den Simulationszeitraum vor dem Vorhersagezeitpunkt werden operationell abgerufene Messdaten für Wasserstand, Abfluss, Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Luftdruck einbezogen. Die ungeprüften Rohdaten stammen aus dem Pegelmessnetz und dem Luftmessnetz des Landes Baden-Württemberg, dem Ombrometernetz, das gemeinsam vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Land betrieben wird, dem Messnetz 2000 des DWD sowie dem Messnetz von Meteomedia. Während der ersten 48 Stunden nach dem Vorhersagezeitpunkt werden die Wasserhaushaltsmodelle mit den Kurzfristwettervorhersagen des DWD (LM-Modell) betrieben. Für den dritten bis siebten Vorhersagezeit gehen die Mittelfristvorhersagen des DWD (GME-Modell) ein.

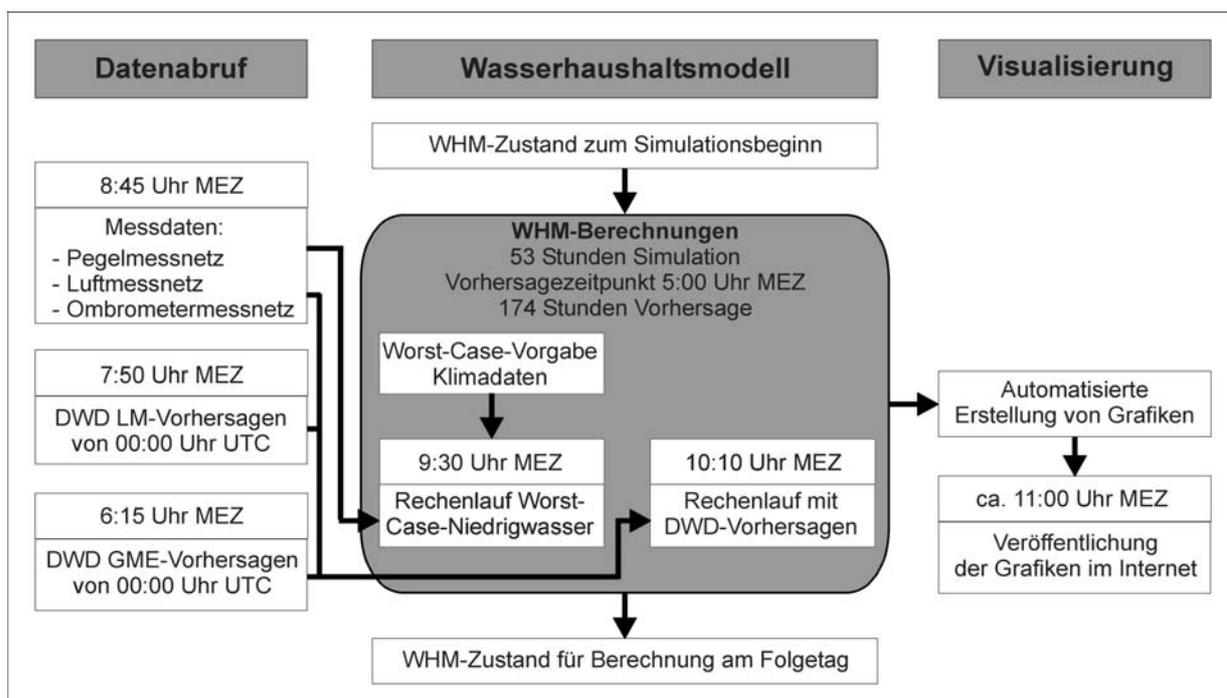


Abb. 3: Schematische Darstellung des automatisierten Datenflusses beim operationellen Routinebetrieb der Wasserhaushaltsmodelle.

4.2 Worst-Case-Niedrigwasservorhersagen

Insbesondere bei labilen Schichtungsverhältnissen in der Atmosphäre (Gewitterneigung) sind die meteorologischen Vorhersagen hinsichtlich Menge und räumlicher Verteilung des Niederschlags mit großen Unsicherheiten behaftet. Folglich kann es gerade bei sommerlichen Niedrigwasserverhältnissen zur Überschätzung des vorhergesagten Abflusses kommen, wenn Gewitterniederschläge vorhergesagt wurden, die dann aber im Einzugsgebiet gar nicht eintreten. Um für solche Fälle den im Vorhersagezeitraum minimal möglichen Abfluss bei Ausbleiben von Niederschlag abzuschätzen, werden parallel zu den oben beschriebenen Vorhersagen auch Worst-Case-Niedrigwasserszenarien berechnet. Hierfür wurden auf der Grundlage historischer Messdaten monatspezifische klimatische Bedingungen ermittelt, die ungünstige Randbedingungen hinsichtlich des weiteren Niedrigwasserverlaufs vorgeben (kein Niederschlag, hohe Lufttemperaturen, etc.). Bei der Berechnung der Worst-Case-Niedrigwasserszenarien werden für den Vorhersagezeitraum anstelle der vorhergesagten meteorologischen Bedingungen diese ungünstigen Witterungsbedingungen angesetzt.

4.3 Visualisierung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Mit den Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulationen werden für vorgegebene Pegelstandorte automatisiert Grafiken erstellt, die sowohl die mit der Wettervorhersage als auch die unter Worst-Case-Bedingungen hinsichtlich Niedrigwasser erstellten Abflussvorhersagen enthalten. Die Grafiken werden im Internet unter „www.hvz.baden-wuerttemberg.de“ veröffentlicht.

Abbildung 4 zeigt eine solche Grafik für den Pegel Schwaibach an der Kinzig. Hieraus wird deutlich, dass die Wasserstandsvorhersage auf Basis der Wettervorhersage in eine zuverlässige Zeitspanne (durchgezogene Linie) und eine Abschätzung (gestrichelte Linie) unterteilt wird. Diese Unterteilung wird gemäß pegelspezifischer Vorgaben automatisch durch das Wasserhaushaltsmodell vorgenommen. Die Länge der als zuverlässig eingestuften Vorhersage richtet sich dabei nach dem Abflusszustand (Niedrig-, Mittel- oder Hochwasser) sowie nach der Einzugsgebietsgröße des jeweiligen Pegels. Die Vorhersagezeiträume sind für Hochwasser

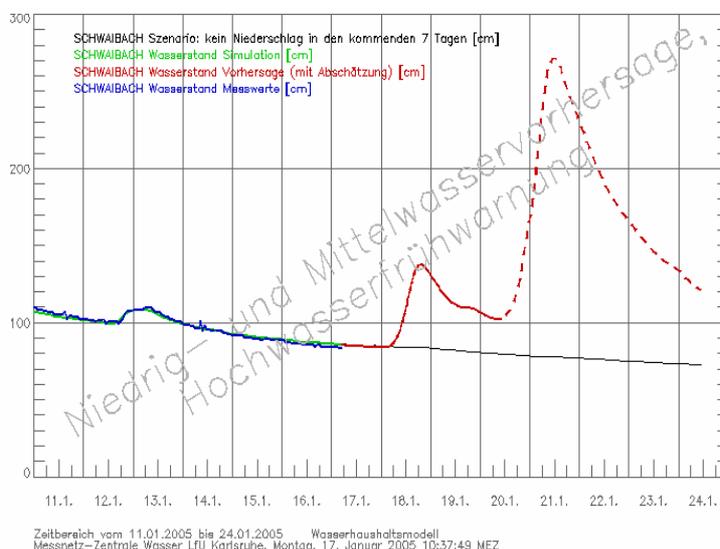


Abb. 4: Beispiel einer operationellen Abflussvorhersage für den Pegel Schwaibach / Kinzig (Einzugsgebiet: 954 km²).

deutlich kürzer als im Niedrig- und Mittelwasserbetrieb, da die Niederschlagsvorhersagen in Starkregensituationen zusätzliche Unsicherheiten aufweisen. Je nach Flussgebiet und Pegel erfassen die Hochwasservorhersagen daher Zeiträume zwischen (minimal) 4 Stunden bis (maximal) 24 Stunden.

5 Vorhersagetests mit dem operationellen Wasserhaushaltsmodell

5.1 Spezifikation der Vorhersagetests

Bevor die Wasserhaushaltsmodelle in den operationellen Betrieb überführt wurden, erfolgte eine intensive Überprüfung der Ergebnisse anhand von offline durchgeführten Vorhersagetests. Zudem wird die Vorhersagequalität auch im operationellen Betrieb laufend geprüft. Zur Qualitätsbewertung wurden Vorhersagetests für zurückliegende Zeiträume durchgeführt, wodurch die Vorhersagen mit bereits vorliegenden gemessenen Abflüssen verglichen werden können. Hierfür wurden vier unterschiedliche Berechnungsansätze gewählt:

- (1) Durchgängige Simulationen mit gemessenen meteorologischen Daten, ohne automatische Modellnachführung.
- (2) Vorhersagetests mit automatischer Modellnachführung, bei denen mit gemessenen meteorologischen Daten anstelle von Wettervorhersagen im Vorhersagezeitraum gerechnet wurde.
- (3) Vorhersagetests mit automatischer Modellnachführung unter Verwendung von Wettervorhersagen im Vorhersagezeitraum.
- (4) Vorhersagetests mit automatischer Modellnachführung und Worst-Case-Annahmen hinsichtlich der Niedrigwasserentwicklung für die meteorologischen Bedingungen im Vorhersagezeitraum.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Ansätze (1) und (2) verdeutlicht, ob und in welchem Maße die Modellnachführung zur Verbesserung der Abflussvorhersagen beiträgt. Die Ansätze (3) und (4) spiegeln reale Ergebnisse des operationellen Einsatzes wider, wobei die Worst-Case-Annahmen (Ansatz (4)) eine Abschätzung des minimal möglichen Abflusses liefern (vgl. Abb. 4). Aus dem Vergleich der Ansätze (2) und (3) wird deutlich, wie sich die Güte der Abflussvorhersagen durch die zusätzliche Ungenauigkeit der Wettervorhersagen verändert.

5.2 Ergebnisse der Niedrigwasservorhersagen

In Abbildung 5 werden die Ergebnisse der durchgängigen Simulation (Ansatz (1)) für den Pegel Untergriesheim an der Jagst mit den gemessenen Abflüssen des Jahres 2003 verglichen. Mit der Simulation kann das Abflussgeschehen im Allgemeinen gut nachvollzogen werden. Zeitweise ergeben sich jedoch kleinere Diskrepanzen, die im operationellen Betrieb mit Hilfe der Modellnachführung ausgeglichen werden.

Ein detaillierter Vergleich der Ergebnisse für Untergriesheim Anfang August 2003 ist in Abbildung 6 dargestellt. Aus der oberen Grafik wird eine vorübergehende Abweichung bei der durchgängigen Simulation deutlich. Aus dem Vergleich mit dem Ergebnis des Ansatzes (2) wird die Wirkung der Modellnachführung für diese stationäre Niedrigwassersituation

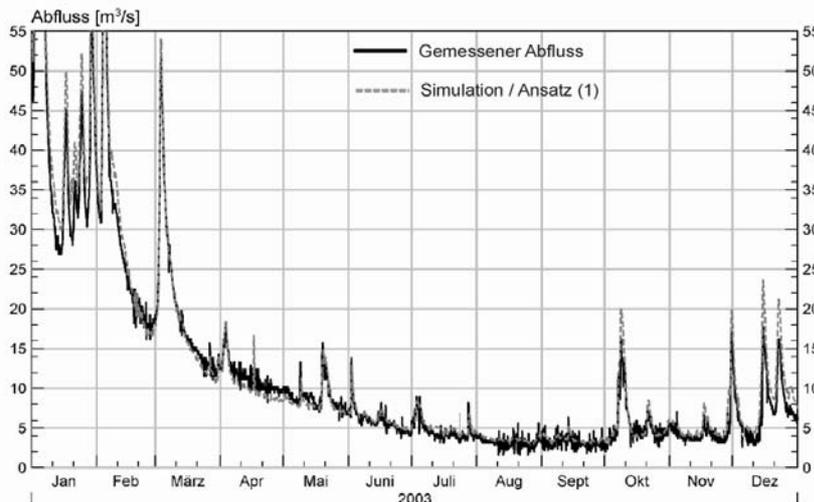


Abb. 5: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Abflussganglinie für den Pegel Untergriesheim an der Jagst (1.825 km²).

ersichtlich: Die Anfangsfüllungen aller drei Gebietsspeicher (insbesondere des Grundwasserspeichers) werden zu Beginn der Simulation so vermindert, dass der berechnete und der gemessene Abfluss im Simulationszeitraum gut übereinstimmen. Die hierdurch erzielte Verminderung des Abflusses erbringt eine wesentliche Verbesserung der Abflussvorhersage. Die bei durchgehender Simulation auftretende Fehleinschätzung von knapp 1 m³/s wird durch die Modellnachführung vollständig ausgeglichen.

Die untere Grafik in Abbildung 6 veranschaulicht, dass im vorliegenden Fall ab dem 8. August Fehleinschätzungen auftreten, wenn die vorhergesagten meteorologischen Daten für die Berechnung der Abflussvorhersagen verwendet werden (Ansatz (3)). Aus dem Vergleich mit dem Ergebnis des Ansatzes (2) (obere Grafik in Abb. 6) wird deutlich, dass die Ungenauigkeit der Abflussvorhersage hier eindeutig auf die Wettervorhersagen zurückzuführen ist. In der Mittelfristvorhersage des DWD vom 4.8.2003 wurden für den 7. und 8. August Niederschläge vorhergesagt, die dann aber nicht eintrafen. Solche Fehler bzw. Ungenauigkeiten in der Abflussvorhersage können nicht durch Optimierungsroutinen von LARSIM behoben werden.

Aus diesem Grund werden für Niedrigwassersituationen zusätzlich immer die Abflussvorhersagen mit meteorologischen Worst-Case-Annahmen hinsichtlich der weiteren Niedrigwasserentwicklung (Ansatz (4)) veröffentlicht. Die ebenfalls im unteren Teil von Abbildung 6 dargestellte Worst-Case-Vorhersage unterscheidet sich kaum von der Vorhersage mit gemessenen meteorologischen Daten (Ansatz (2)). Im vorliegen-

den Fall spiegelt die Worst-Case-Niedrigwasservorhersage die tatsächliche Entwicklung des Abflusses sehr gut wider. Dies verdeutlicht, dass die zusätzliche Veröffentlichung der Worst-Case-Vorhersage im Niedrigwasserfall hilfreich ist, um die mögliche Abflussentwicklung nach unten hin einzugrenzen.

In Abbildung 7 ist eine instationäre Niedrigwassersituation für den Pegel Talhausen an der Glems dargestellt. Hier werden die durchgängige Simulation (Ansatz(1)) und drei aufeinander folgende Abflussvorhersagen mit Wettervorhersagen (Ansatz (3)) mit dem gemessenen Abfluss verglichen. Die Simulationen vor dem Vorhersagezeitpunkt sind nicht mit dargestellt. Auch im hier vorliegenden instationären Niedrigwasserfall wird durch die Mo-

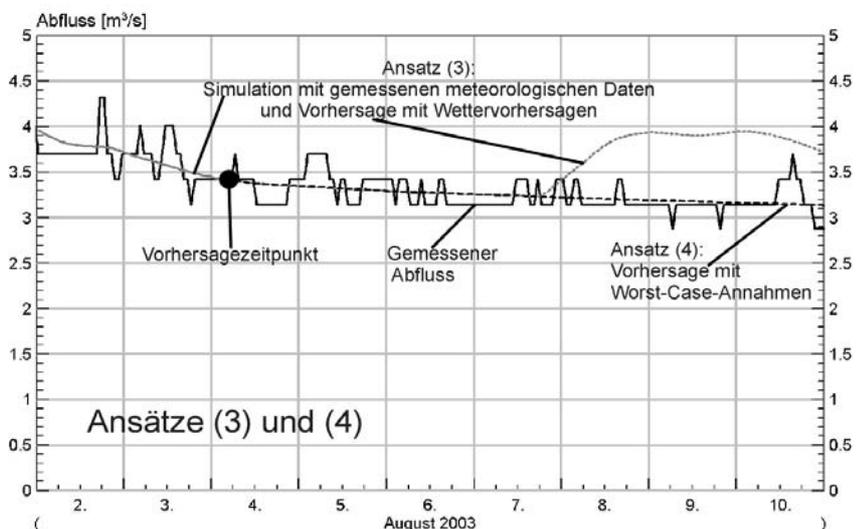
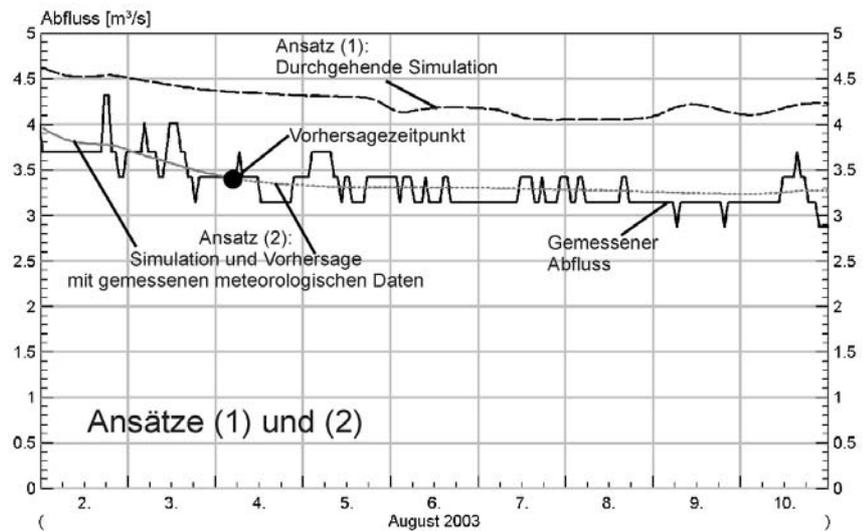


Abb. 6: Vergleich zwischen durchgängiger Simulation und Vorhersagetests für den Pegel Untergriesheim an der Jagst (1.825 km²).

dellnachführung eine deutliche Verbesserung der Abflussvorhersage erzielt. Der geringfügige Abflussanstieg am 1. August wird allerdings nur bei Verwendung der Wettervorhersage vom 30.7.2003 vorhergesagt.

Mit Hilfe des operationellen Wasserhaushaltsmodells LARSIM können bei Trockenwetterlagen im Allgemeinen zuverlässige Niedrigwasservorhersagen erstellt werden, die bis zu 7 Tage in die Zukunft reichen. Unsicherheiten bei der Niedrigwasservorhersage ergeben sich jedoch insbesondere bei Gewitterneigung, wenn die meteorologischen Vorhersagen hinsichtlich Auftreten und Höhe von Niederschlägen häufig fehlerbehaftet sind. In solchen Fällen zeigt die Worst-Case-Niedrigwasservorhersage auf, ob in den kommenden 7 Tagen kritische Niedrig-

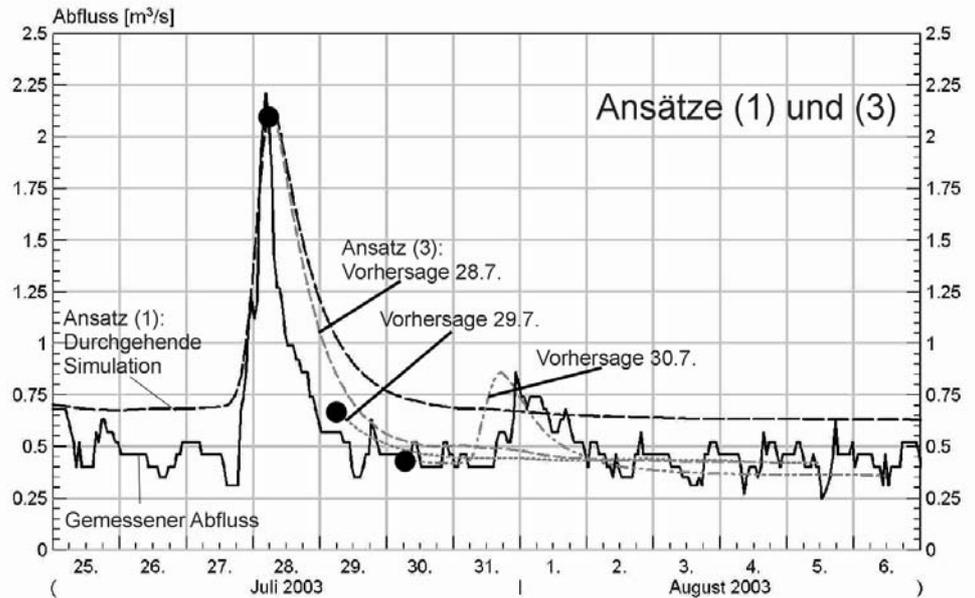


Abb. 7: Vergleich zwischen durchgängiger Simulation und Vorhersagetests für den Pegel Talhausen an der Glems (192 km²).

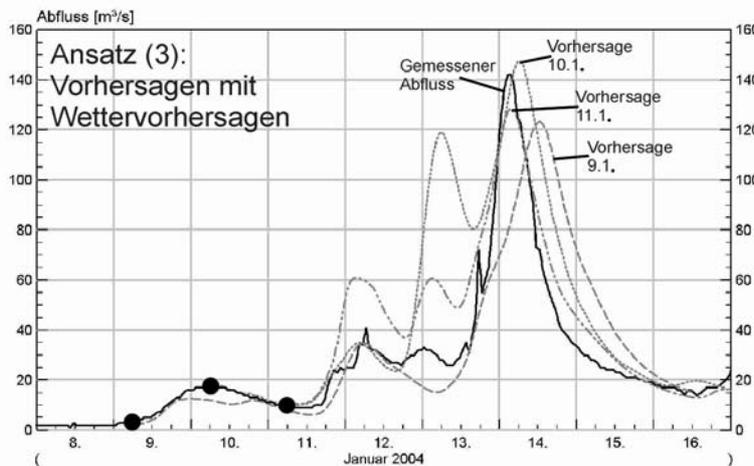
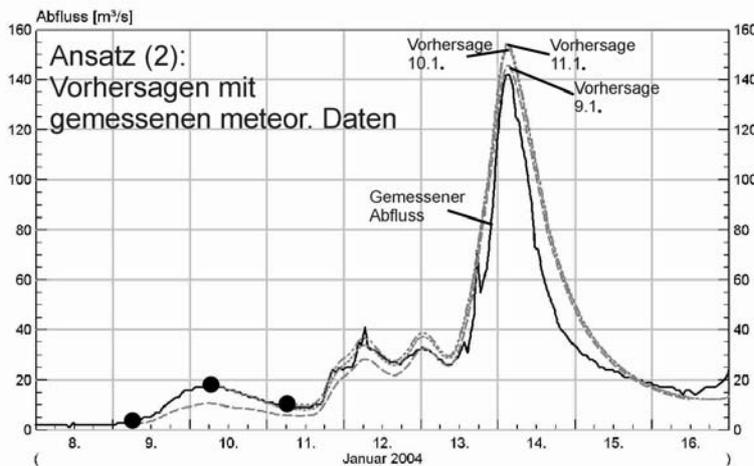


Abb. 8: Vorhersagetests für den Pegel Rottweil am Neckar (506 km²).

wasserstände erreicht werden könnten, falls die vorhergesagten Niederschläge ausbleiben. Unter der Annahme anhaltender Trockenheit sind auch Worst-Case-Niedrigwasservorhersagen möglich, die über 7 Tage hinausreichen, so dass langfristig abgeschätzt werden kann, ab wann im ungünstigsten Fall kritische Niedrigwasserstände zu erwarten sind.

5.2 Ergebnisse der Hochwasservorhersagen

In Abbildung 8 wird am Beispiel des Neckars bei Rottweil eine Abfolge täglicher Vorhersagen im Vorfeld des Hochwassers vom Januar 2004 gezeigt. Aus der oberen Grafik wird ersichtlich, dass bei Verwendung gemessener Niederschlagsdaten und automatischer Modellnachführung (Ansatz (2)) sowohl Zeitpunkt als auch Ausmaß des Hochwassers bereits fünf Tage im voraus sehr gut vorhergesagt werden können.

Aus der unteren Grafik wird allerdings deutlich, dass die Abflussvorhersagen ungenauer werden, wenn die Wettervorhersagen als meteorologischer Antrieb verwendet werden (Ansatz (3)). In diesem Fall, der den realistischen Bedingungen im operationellen Betrieb entspricht, kann der zu erwartende Spitzenabfluss bereits fünf Tage vor dem Hochwasser in brauchbarer Genauigkeit vorhergesagt werden. Somit konnte bereits fünf Tage vor dem Januarhochwasser 2004 am Pegel Rottweil vor dem Ereignis gewarnt werden. Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Hochwasserwelle ergeben sich jedoch erhebliche Unsicherheiten. Die Ergebnisse variieren dabei in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitpunkt und der jeweils zugehörigen Wettervorhersage.

Aus Vorhersagetests ist zu folgern, dass die mit dem operationellen Wasserhaushaltsmodell LARSIM berechneten Abflussvorhersagen bereits mehrere Tage im voraus Hinweise auf die mögliche Ausbildung von Hochwassern geben können und somit eine wichtige Grundlage für die Hochwasserfrühwarnung darstellen. Eine exakte Hochwasservorhersage für mehrere Tage im voraus scheitert allerdings zumeist an den Ungenauigkeiten der vorhergesagten Niederschläge.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei der HVZ werden insgesamt 7 Wasserhaushaltsmodelle für die tägliche operationelle Vorhersage eingesetzt: für das Neckargebiet (seit Juli 2003), die baden-württembergischen Hoch- und Oberrheinzuflüsse (seit Januar 2004), das Taubergebiet (seit Mai 2004), die Donau bis Ulm (seit November 2004), die Bodenseezuflüsse (seit Januar 2005) und für die verbleibenden kleinen Flussgebiete, die nach Bayern oder Hessen entwässern (seit März 2005). Damit liegen für das gesamte Flussnetz des Landes täglich aktualisierte Abflussvorhersagen vor, die bis zu 7 Tage in die Zukunft reichen.

Im bisherigen automatisierten Vorhersagebetrieb haben sich die guten Ergebnisse der Vorhersagetests bestätigt. Insbesondere für eine frühzeitige und zuverlässige Hochwasserfrühwarnung liefern die operationellen Wasserhaushaltsmodelle mit ihren über mehrere Tage in die Zukunft reichenden Vorhersagen wichtige Informationen. Durch den operationellen Betrieb der Wasserhaushaltsmodelle sollen zukünftig auch regionsspezifische Hochwasserfrühwarnungen veröffentlicht werden, die auch kleinere Gewässer umfassen.

Hinsichtlich kurzfristiger Hochwasservorhersagen (über einige Stunden) liefern die Wasserhaushaltsmodelle ähnlich gute Resultate wie die seit Jahren erfolgreich eingesetzten Flussgebietsmodelle. Insbesondere bei sehr rasch ablaufenden Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten scheinen die Vorhersagen der operationellen Wasserhaushaltsmodelle sogar noch zuverlässiger als die der Flussgebietsmodelle. Im Hochwasserfall werden mit den operationellen Wasserhaushaltsmodellen daher stündlich aktualisierte Berechnungen durchgeführt, die in Ergänzung zu den Ergebnissen der Flussgebietsmodelle auch als Kurzfristhochwasservorhersagen genutzt werden können.

Insbesondere bei kleinräumigen konvektiven Niederschlägen (Gewitter) können aufgrund der für diesen Fall unzureichenden Messnetzdicke und der ungenauen Niederschlagsvorhersagen allerdings auch mit den operationellen Wasserhaushaltsmodellen Fehleinschätzungen bezüglich des zu erwartenden (Hochwasser-) Abflusses auf der Skala kleiner Einzugsgebiete auftreten. In dieser Problematik bringen die voraussichtlich ab 2006 vom DWD bereitgestellten Kurzfristvorhersagen des räumlich hoch aufgelösten LMK-Modells möglicherweise eine weitere Verbesserung.

Auch im Niedrigwasserfall liefern die Vorhersagen der operationellen Wasserhaushaltsmodelle wichtige Informationen für Behörden, die mit ökologischen Fragestellungen oder der Überwachung der Wasserrechte betraut sind sowie für die Energiewirtschaft, die Schifffahrt und weitere Wassernutzer. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM wurde über die hier beschriebenen Funktionalitäten hinaus auch um

Module zur Berechnung des Wärmehaushalts der Gewässer erweitert. Für das Neckareinzugsgebiet befindet sich ein kombiniertes Wärme- und Wasserhaushaltsmodell seit dem Sommer 2004 im operationellen Betrieb und liefert täglich aktualisierte, bis zu 7 Tage in die Zukunft reichende Vorhersagen für Abfluss und Wassertemperatur (Haag et al., 2005b). Mit dieser Kombination aus Abfluss- und Wassertemperaturvorhersagen konnte eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Vermeidung ökologisch bedenklicher Situationen im Zusammenhang mit der Abwärmeeinleitung durch thermische Kraftwerke geschaffen werden.

Für die Zukunft erscheint es denkbar, die operationellen Vorhersagen auf weitere ökologisch relevante Größen (z.B. Sauerstoff) auszudehnen, für die die korrekte Beschreibung des Wasserhaushalts eine unabdingbare Grundvoraussetzung ist. Durch solche Vorhersagen wäre es möglich, vor dem Erreichen ökologisch kritischer Situationen Warnungen abzugeben und gegebenenfalls rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen (z.B. Belüftungsmaßnahmen; vgl. Haag 2003).

Über die genannten Anwendungen hinaus können die operationellen Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle auch als Randantrieb für kontinuierlich betriebene Grundwassermodelle dienen. Insbesondere bei stark grundwasserbeeinflussten Gewässern, wie dem Oberrhein, sind auch Rückkopplungen zwischen Wasserhaushalts- und Grundwassermodell denkbar.

Zusammenfassung

In Baden-Württemberg werden die landesweit vorliegenden Wasserhaushaltsmodelle im automatisierten operationellen Vorhersagebetrieb eingesetzt. Damit werden an derzeit ca. 90 Pegeln für den gesamten Abflussbereich von Niedrig- bis Hochwasser täglich aktualisierte, bis zu 7 Tage in die Zukunft reichende Vorhersagen berechnet und im Internet veröffentlicht (www.hvz.baden-wuerttemberg.de).

Für diesen operationellen Einsatz wurde das Wasserhaushaltsmodell LARSIM um Komponenten erweitert, die eine automatisierte, prozessorientierte Modellnachführung anhand gemessener Abflüsse sowie gemessener Schneedaten ermöglichen. Die Funktionsweisen dieser Nachführungsroutinen haben sich sowohl in offline durchgeführten Vorhersagetests als auch im praktischen operationellen Betrieb bewährt. Durch sie wird sichergestellt, dass das Modell im operationellen Betrieb den aktuellen Zustand des hydrologischen Systems zum Vorhersagezeitpunkt möglichst gut repräsentiert, wodurch die Vorhersagegüte merklich verbessert wird.

Die täglichen Abflussvorhersagen haben sich als wertvolle Informationsquelle etabliert. So geben die vorhergesagten Wasserstandsanstiege bereits mehrere Tage im voraus Hinweise auf die Ausbildung möglicher Hochwasser und dienen somit einer Hochwasserfrühwarnung. Im Niedrigwasserfall liefern sie eine wichtige Entscheidungsgrundlage für Wasserrechtsbehörden, die Energiewirtschaft, die Schifffahrt und zahlreiche andere Nutzer.

Die existierenden operationellen Wasserhaushaltsmodelle sind zudem die notwendige Voraussetzung und der Ausgangspunkt für Weiterentwicklungen, die zu maßgeblichen Bausteinen in der operationellen Wasserbe-

wirtschaftung und Gewässergütebewirtschaftung werden können. So wurde LARSIM beispielsweise um Module zur Simulation des Wärmehaushalts im Gewässer erweitert, so dass für den Neckar neben den hier erläuterten kontinuierlichen Abflussvorhersagen zusätzlich bereits Vorhersagen der Wassertemperatur erstellt werden.

Conclusions

The federal state of Baden-Württemberg issues daily discharge forecasts for approximately 90 river gauges which are automatically calculated with the distributed water-balance model LARSIM. The forecasts are publicly available via "www.hvz.baden-wuerttemberg.de".

To achieve an automated operation and reliable forecasts, LARSIM was extended by various modules. Automated process-based optimization schemes guarantee that the model closely matches the actual status of the hydrological system at the starting time of the forecast. The optimization schemes proved to enhance the forecast quality during offline and online tests of the operational water-balance model, and are thus valuable improvements of LARSIM.

The daily operational discharge forecasts have already proven to be an important source of information for a variety of users and the public. During times of high discharge, the forecasts form an essential basis for an early, regional flood-warning which also considers small rivers and brooks of the region. During low flow, the forecasts support decision makers in the fields of ecology, water right, power generation, riverine transportation, and various others.

Moreover, the now existing operational water-balance model is the basis for developing an operational water quality model, which may subsequently become an important tool for real-time water-quality management. For example, LARSIM has already been extended to an operational stream temperature model, also providing water temperature forecasts along with the discharge forecasts described above.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. A. Luce und Dr.-Ing. I. Haag
c/o Dr.-Ing. Karl Ludwig, Beratender Ingenieur,
Wasserwirtschaft-Wasserbau
Herrenstraße 14, 76133 Karlsruhe
E-mail: annette.luce@ludwig-wawi.de;
ingo.haag@ludwig-wawi.de

Dr. M. Bremicker
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg, Hochwasser-Vorhersage-Zentrale
Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe
E-mail: manfred.bremicker@lubw.bwl.de

Literaturverzeichnis

Bartels H., B. Katzenberger & H. Weber (2004): Klima-
veränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutsch-
land. – *Wasserwirtschaft*, 94 (4), 15 – 19.
Bremicker M. (1998): Aufbau eines Wasserhaushalts-
modells für das Weser- und das Ostsee-Einzugsgebiet
als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells.
Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LAR-
SIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele.
Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut
für Hydrologie der Universität Freiburg.
Bremicker M., P. Homagk & K. Ludwig (2004): Operati-
onelle Niedrigwasservorhersage für das Neckarein-
zugsgebiet. – *Wasserwirtschaft*, 94 (Heft 7/8), 40-46.
DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land-
und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasser-
wirtschaft, Heft 238. DVWK, Bonn.
Ebel M., K. Ludwig & K.-G. Richter (2000): Mesoskalige
Modellierung des Wasserhaushaltes im Rheinein-
zugsgebiet mit LARSIM. – *Hydrologie und Wasserbe-
wirtschaftung*, 44 (6), 308-312.
Gathenya M. (1999): Einsatz von Wasserhaushaltsmodel-
len zur Wasserbewirtschaftung am Beispiel des Thika-
Chania-Gebietes in Kenya. Dissertation, Universität Kai-
serslautern.
Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im
Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler
Klimaszenarien. In AK KLIWA (Hrsg.): 2. KLIWA-
Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg,
Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4.
Haag I. (2003): Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter
Flüsse am Beispiel des Neckars – Analysen, Experi-
mente, Simulationen. Mitteilungen des Instituts für
Wasserbau, Heft 122, Universität Stuttgart, Stuttgart.
Haag I., K. Gerlinger & V. Kolokotronis (2005a): Auswir-
kungen von Windwurfschäden auf Hochwasserabflüs-
se am Beispiel des Enz-Nagold-Gebietes. – *Wasser-
wirtschaft*, 95 (Heft 10), 8-14.
Haag I., A. Luce & U. Badde (2005b): Ein operationelles
Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Ne-
ckar. *Wasserwirtschaft*, 95 (Heft 7/8), 45-50.
Homagk P. & K. Ludwig (1998): Operationeller Einsatz
von Flussgebietsmodellen bei der Hochwasser-
Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg. – *Wasser-
wirtschaft*, 88 (4), 160-167.
Knauf D. (1980): Die Berechnung des Abflusses aus
einer Schneedecke. In: DVWK-Schriften, Heft 46, 95-
135.
Ludwig K. (1982): The program system FGMOD for
calculation of runoff processes in river basins. – *Zeit-
schrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 23, 25-
37.
Richter K.-G. & K. Ludwig (2003): Analyse des Wasser-
kreislaufes für das BALTEX Einzugsgebiet unter ge-
genwärtigen und zukünftigen klimatologischen Bedin-
gungen. In: Kleeberg, H. (Hrsg.), *Klima, Wasser,
Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut*, Forum
für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft
4/2003, 27 – 34.
Schulz, W, Merkel U., Bach H., Appel F., Ludwig R., Löw
A., Mauser W. (2002): „Inferno – Integration of remote
sensing data in operational water balance and flood
prediction modelling“, *Proceedings of the International
Conference on Flood Estimation*. Berne 6-8 March
2002, Switzerland. KHR/CHR-Report II-17, S. 659-
668.
Todini E. (1996): The ARNO rainfall-runoff model. –
Journal of Hydrology, 175, 339-382.
Williams J.R. (1969): Flood routing with variable travel
time or variable storage coefficients. – *Transactions of
the ASAE*, 100.
Zhao R.J. (1977): Flood forecasting method for humid
regions of China. East China Institute of Hydraulic En-
gineering, Nanjing, China.