

Möglichkeiten der Modellnachführung im Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Bearbeiter: Dr.-Ing. Kai Gerlinger
Stand: 06.06.2017

1. Grundlagen der Modellnachführung

Die Grundlagen zur Modellnachführung sind auch in der LARSIM-Dokumentation (LEG 2017) in Kapitel 5.3 beschrieben. Die folgenden Erläuterungen ergänzen diese Ausführungen. Sie beruhen auf einer Lerneinheit, die für das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz erstellt wurde.

1.1 Einleitung

Bei der Aufstellung und Kalibrierung der operationellen Wasserhaushaltsmodelle mit LARSIM werden die Modellparameter so gewählt, dass das gesamte Abflussspektrum von Niedrig- bis Hochwasser über lange Zeiträume hinweg (in der Regel Jahre) möglichst gut nachgebildet wird. Es wird ein Satz für die Modellparameter erstellt, der unverändert für alle Ereignisse gültig ist.

Im täglichen Betrieb der Modelle für die Berechnung der Abflussvorhersagen können Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen auftreten. Diese Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen an einzelnen Pegeln ergeben sich aufgrund von u.a.:

- Zufällige oder systematische Fehler in den gemessenen Eingabedaten (z.B. nicht repräsentative Erfassung der Niederschläge durch unzureichende Stationsdichte des meteorologischen Messnetzes)
- Zufällige oder systematische Fehler in den gemessenen Abflussdaten (z.B. Ungenauigkeiten der Wasserstands-Abfluss-Beziehungen (WQ-Beziehungen) an den Pegeln)
- Modellimmanente Ungenauigkeiten (Unsicherheiten durch suboptimale Auswahl der Modellparameter oder durch eine unzureichende Modellstruktur)

Durch den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Simulationszeitraum kann im täglichen Betrieb überprüft werden, wie gut das Modell den aktuellen Wasserhaushalt abbildet (Bild 1).

Bei größeren Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Abflusswerten können geeignete Modellgrößen angepasst und nachgeführt werden, damit das Modell den Wasserhaushalt zum aktuellen Zeitpunkt möglichst gut repräsentiert und die Vorhersagequalität verbessert wird.

Die Zielgröße bei der Modellnachführung in LARSIM ist eine möglichst hohe Übereinstimmung des gemessenen und simulierten Abflussvolumens im Auswertezeitraum. Als Auswertezeitraum (AZR) wird ein definierter Zeitraum (z.B. sechs Stunden) vor dem Zeitpunkt verstanden, an dem eine Vorhersage berechnet wird (Vorhersagezeitpunkt). Nur in diesem Auswertezeitraum wird durch die Modellnachführung versucht, die Abweichung zwischen dem simulierten Abflussvolumen und dem gemessenen Abflussvolumen zu verringern. Die Länge des Auswertezeitraums kann in der Steuerdatei <tape10> für alle Pegel einheitlich vorgegeben werden.

Da die operationellen Wasserhaushaltsmodelle mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde rechnen, stehen somit bei einem Auswertezeitraum von z.B. sechs Stunden für die Volumenberechnung jeweils sechs gemessene und simulierte Abflusswerte für den Vergleich der gemessenen und simulierten Abflussvolumen zur Verfügung.

Nach Aktivierung der Option WHM-NACH AUSWERTEZEIT in der Steuerdatei <tape10> kann der Auswertezeitraum auch spezifisch für jeden Pegel vorgegeben werden. Dabei ist dann in der Datei <pegel.stm> für jeden Pegel das Anfangs- und Enddatum des Auswertezeitraums zu definieren.

Um die Höhe der Abweichungen zwischen dem simulierten und dem gemessenen Abflussvolumen zu erfassen, wird zunächst mit dem Modell eine Berechnung mit meteorologischen Messdaten bis zum Vorhersagezeitpunkt durchgeführt.

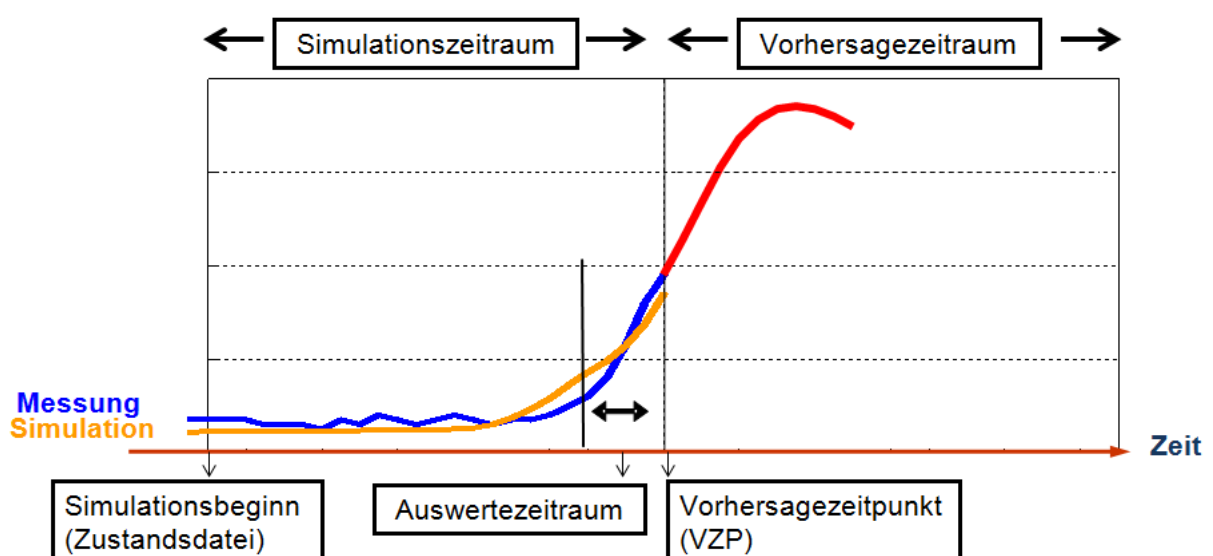


Bild 1: Übersicht der Modellnachführung der simulierten Abflüsse an die gemessenen Abflüsse im operationellen Fall

Anschließend wird die prozentuale Differenz zwischen der Summe der simulierten Abflüsse Vol/Q_{sim} und der Summe der gemessenen Abflüsse Vol/Q_{gem} im Auswertezeitraum berechnet.

Diese Abweichung wird mit einem bestimmten Schwellenwert $MaxAbw$ (z.B. 5%) verglichen, der vom Nutzer vorgegeben werden kann (Bild 2):

- Ist die Abweichung kleiner als $MaxAbw$, wird keine Änderung an den Modellgrößen vorgenommen. Die Übereinstimmung ist gut und die Vorhersage kann berechnet werden.
- Ist die Abweichung größer als $MaxAbw$, wird eine Modellnachführung umgesetzt. Bei einer Modellnachführung werden Variablen oder Modellgrößen so verändert, damit eine möglichst gute Übereinstimmung von simuliertem und gemessenem Abflussvolumen im Auswertezeitraum erzielt wird. Erst dann wird die Vorhersage für den Vorhersagezeitraum berechnet.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellnachführung ist, dass die gemessene Abflusswerte auch wirklich zuverlässige Messwerte ist. Daher soll die Modellnachführung nur dann umgesetzt werden, wenn die Wasserstands-Abfluss-Beziehung (WQ-Beziehung) für den aktuellen Abflussbereich der gemessenen Abflusswerte am Pegel vertrauenswürdig ist.

Als Information zur Qualität der WQ-Beziehung und damit der gemessenen Abflusswerte wird in LARSIM die Datei <pegel.stm> ausgewertet, in der u.a. pegelspezifische Angaben enthalten sind, wie die Zuverlässigkeit der gemessenen Abflusswerte im Niedrig-, Mittel- und Hochwasserbereich eingeschätzt wird. Es kann in der Datei <pegel.stm> für jeden Abflussbereich für jeden Pegel bestimmt werden, ob eine Modellnachführung durchgeführt werden soll oder nicht.

Hieraus kann sich beispielsweise die Situation ergeben, dass LARSIM an einem Pegel keine Modellnachführung im Niedrigwasserbereich durchführt, während eine Modellnachführung an Hand der gemessenen Mittel- und Hochwasserabflüsse vom Modell umgesetzt wird. Dies sollte z.B. so umgesetzt werden, wenn die gemessenen Abflusswerte im Niedrigwasserbereich als nicht zuverlässig eingeschätzt werden.

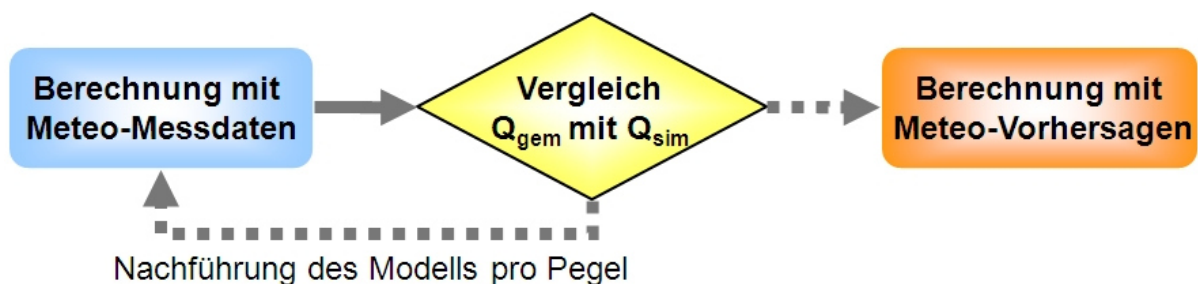


Bild 2: Schema der Modellnachführung

1.2 Ansätze der Modellnachführung

Die Anwendung von Modellnachführungen („updating procedure“) stellt eine Möglichkeit dar, die Informationen, die aus den Modellrechnungen stammen, mit den Messdaten zu vergleichen und zu kombinieren, um den Zustand des Modells möglichst präzise zu erfassen.

Unter Einbeziehung der aktuell vorliegenden sowie von zurückliegenden Messdaten werden dabei zeitlich variable Modellgrößen angepasst. Das Modell wird somit an die Messdaten herangeführt.

Daher wird die Modellnachführung auch als Datenassimilation bezeichnet. Als weiteres Synonym kann von Modelloptimierung gesprochen werden. Seit einigen Jahren ist die Anwendung von Datenassimilationen in der operationellen Anwendung von Modellen in der Meteorologie und Ozeanologie verbreitet.

Im Bereich der Hydrologie wird statt von Datenassimilation meist von Modellnachführung gesprochen, weswegen dieser Begriff auch im Weiteren verwendet wird.

Je nach Methode der Modellnachführung werden nicht unbedingt die gemessenen Beobachtungsdaten vor dem Vorhersagezeitpunkt übernommen, da die Messdaten ebenfalls mit einem Fehler behaftet sein können. In Bild 3 ist eine Modellnachführung aus dem Bereich der Meteorologie exemplarisch dargestellt, bei der alle sechs Stunden ein beobachteter Wert mit einem simulierten Wert verglichen wird. Der gemessene Wert zum Vorhersagezeitpunkt wird bei diesem Beispiel nicht für den Modelllauf übernommen.

Von der mathematischen Seite betrachtet lassen sich grundsätzlich zwei Ansätze zur Modellnachführung unterscheiden (Le Dimat et al. 2009, Honnorat 2007):

- Variationelle (oder deterministische) Methoden, die auf der Optimierungstheorie basieren. Sie sind auf eine Minimierung des Abstands zwischen den simulierten und den gemessenen Werten innerhalb eines Zeitraums ausgerichtet. Diese Methoden werden in LARSIM eingesetzt und im Folgenden weiter beschrieben.
- Filtermethoden, die auf statistischen Prinzipien basieren (auch als stochastische Methoden bezeichnet). Die stochastischen Methoden der Modellnachführung betrachten die Entwicklung des Modells als einen Zufallsprozess auf Grund einer stochastischen Dynamik. Die bekannteste stochastische Methode ist der Kalman-Filter. Dieser versucht den Verlauf der Zustandsvariablen des Modells zu korrigieren, damit dieser mit den verfügbaren Messungen am besten übereinstimmt.

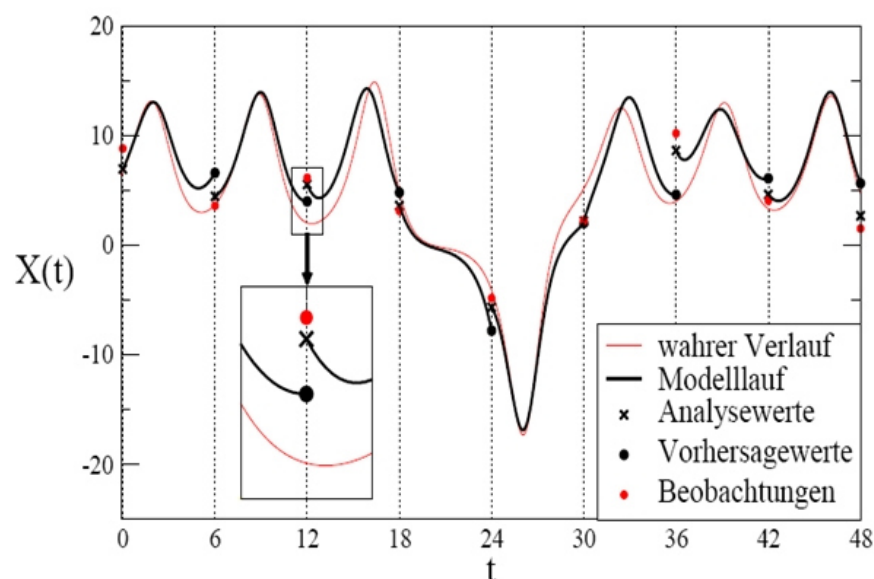


Bild 3: Schematische Darstellung einer Modellnachführung (Faulwetter 2009)

Der Kalmanfilter setzt ein lineares Modell sowie die Kenntnis über die Unsicherheit der Messungen und über den vorhergesagten Zustand voraus. Eine Erweiterung des Modells ist der Ensemble Kalman-Filter, der eine Monte-Carlo-Methode verwendet, um die Fehlerkovarianzmatrizen der Vorhersage zu schätzen (Evensen 1994).

Auf die Filtermethoden wird im weiteren Text nicht mehr eingegangen.

1.3 Möglichkeiten der Modellnachführung

Die praktische Umsetzung der Modellnachführung kann grundsätzlich durch vier verschiedene Ansätze durchgeführt werden (Refsgaard 1997, Komma et al. 2009). Diese Ansätze unterscheiden sich in der Komponente des Modells, die für die Modellnachführung herangezogen wird. Dabei können Eingangsgrößen (Modellinput), Zustandsgrößen, Modellparameter oder die Berechnungsergebnisse (Modelloutput) selbst nachgeführt werden (Bild 4).

In LARSIM werden alle vier Ansätze der Modellnachführung umgesetzt. Insgesamt liegen in LARSIM sogar fünf Möglichkeiten der Modellnachführung vor, die bei Bedarf aktiviert werden können:

- Nachführung des Wasserdargebots (Korrektur Inputvariable)
- Nachführung der Inhalte der Gebietsspeicher (Korrektur Systemzustand)
- Nachführung der Schnee-Wasseräquivalente und/oder Schneehöhen (Korrektur Systemzustand)
- Nachführung der Grenztemperatur Schnee (Korrektur Modellparameter)
- ARIMA-Korrektur (Korrektur Outputvariable)

An Hand der in LARSIM umgesetzten Modellnachführungen wird zunächst im nächsten Kapitel das prinzipielle Vorgehen erläutert. Im nachfolgenden Kapitel wird dann detailliert auf die in LARSIM umgesetzten Verfahren der Modellnachführung eingegangen.

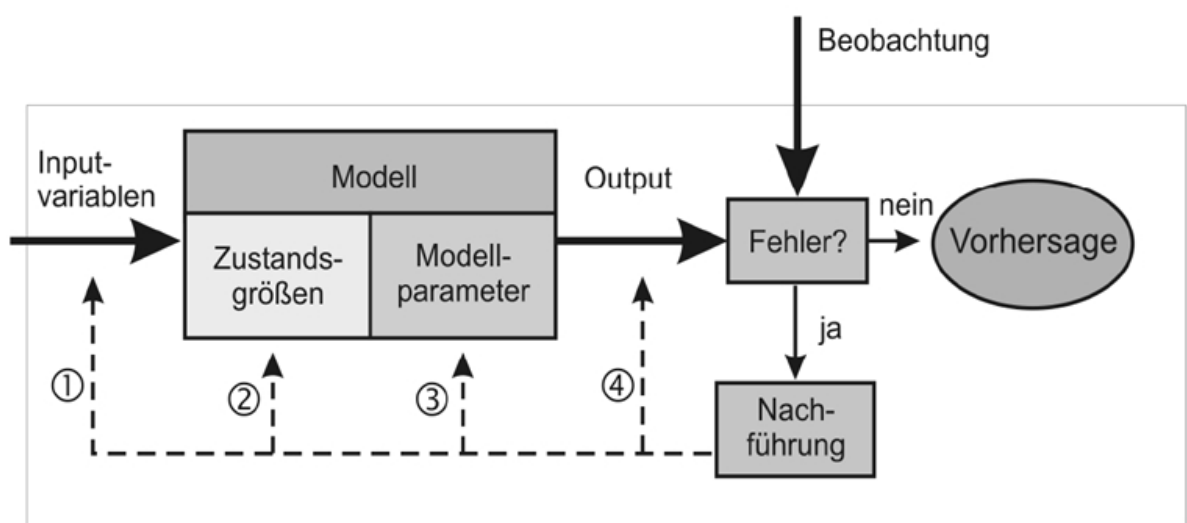


Bild 4: Mögliche Ansätze für die Nachführung in hydrologischen Modellen (Komma et al. 2009)

1.3.1 Anpassung der Inputvariablen

Die Anpassung der Inputdaten als Korrektur kann angewendet werden, wenn als Quelle für Vorhersagefehler die Inputdaten (also die gemessenen Eingangsgrößen für das Modell) identifiziert werden können. Hierbei müssen die Inputdaten in das Modell so lange verändert werden, bis die Modellergebnisse bestmöglich an die Beobachtungen (z.B. an die gemessenen Abflüsse) angepasst sind (Fall (1) in Bild 4).

Als Inputdaten wird in LARSIM das Wasserdargebot nachgeführt. Dabei wird unter Wasserdargebot die für die Infiltration in den Boden bereitstehende Summe der Wassermenge aus Niederschlag (flüssig und fest) und ggf. aus der Schneeschmelze verstanden.

Der Input „Wasserdargebot“ in das Modell ist niemals die wahre, im Einzugsgebiet tatsächlich aufgetretene Menge Regen oder Schnee, da er aus Punktmessungen und daraus ermittelten flächenhaften Daten (Gebietsmittel, Rasterwerte) hervorgeht. Es handelt sich also um die aus den Beobachtungen ermittelte, bestmögliche Annäherung an die Wirklichkeit. Auf Grund dieser Unsicherheit in der Bestimmung des Wasserdargebots ist es zulässig, bei der Modellnachführung diese Inputdaten zu verändern.

Die Korrektur des Wasserdargebots ist v.a. in folgenden Fällen notwendig und zielführend:

- Vor allem 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.

Aber auch bei stratiformen Niederschlag kann je nach Anzahl der Messstationen und deren Güte der punktuell erfasste und interpolierte Niederschlag den wirklichen Gebietsniederschlag u.U. nur ungenau wiedergeben.

- Auch beim Abschmelzen von Schneedecken, deren Wasseräquivalent im Modell nicht korrekt abgebildet wurde, kann es zur Fehleinschätzung des Abflusses kommen, die über die Wasserdargebotsnachführung abgefangen werden kann.

In den folgenden Bildern (Bild 5 bis Bild 8) wird die Modellnachführung in LARSIM anhand der Nachführung des Wasserdargebots durch die Multiplikation mit einem konstanten Faktor illustriert. Die detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich in Kapitel 2.1:

- Ausgangslage in Bild 5 ist der gemessene Abfluss (blau) und ein meteorologischer Input, insbesondere der Niederschlag, im Simulationszeitraum. Zudem kann aus der Schneeschmelze Wasser zur Verfügung stehen.
- Das gesamte Wasserdargebot als Summe aus Niederschlag und Schneeschmelze führt zu einem simulierten Abfluss (orange) (Bild 6).
- Das Volumen des simulierten Abflusses wird mit dem Volumen des gemessenen Abflusses im Auswertzeitraum verglichen. Das Wasserdargebot wird daraufhin angepasst und nachgeführt, um eine bessere Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Volumina zu erhalten. In Bild 7 ist die nachgeführte simulierte Ganglinie im Auswertzeitraum näher an der gemessenen Ganglinie als in Bild 6.

Mit den vorhergesagten meteorologischen Daten für den Vorhersagezeitraum und den modellinternen Ergebnissen aus dem Schneeschmelzmodell ergibt sich das Wasserdargebot für den Vorhersagezeitraum (Bild 7).

- In Bild 8 ist die gesamte simulierte Ganglinie für den Simulationszeitraum und Vorhersagezeitraum ersichtlich. Die simulierte Ganglinie für den Vorhersagezeitraum wird noch so verschoben, dass sie an den letzten Messwert anschließt (ARIMA-Korrektur (vgl. Kapitel 2.4)).

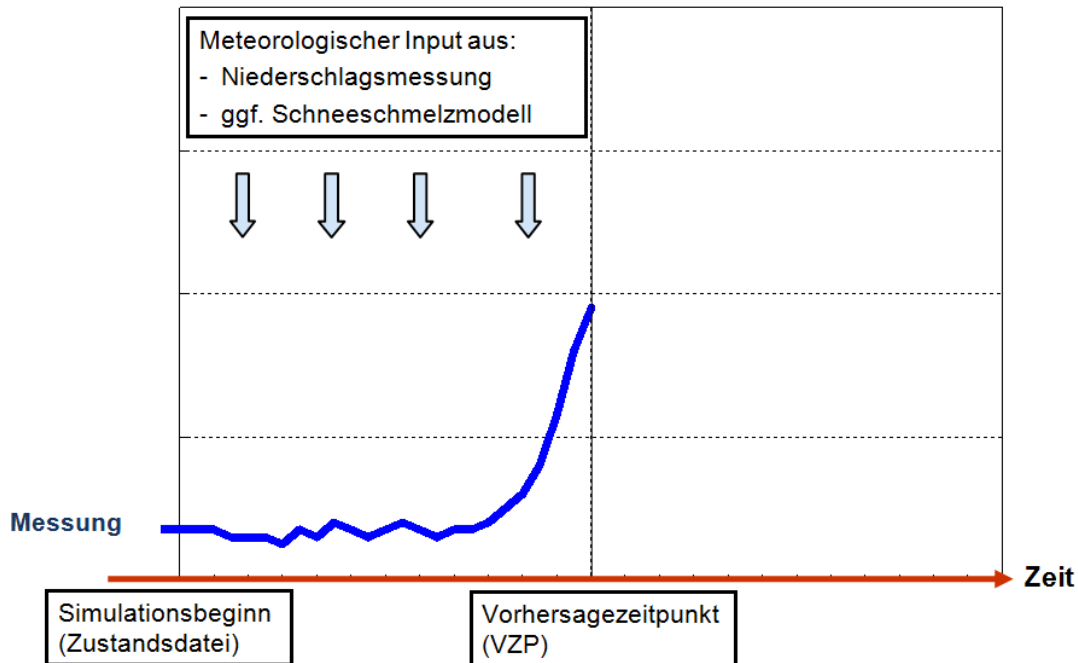


Bild 5: Beispiel der Modellnachführung durch Anpassung des Wasserdargebots: Abfluss-Messwerte (blau) und meteorologischer Input bis zum Vorhersagezeitpunkt (VZP)

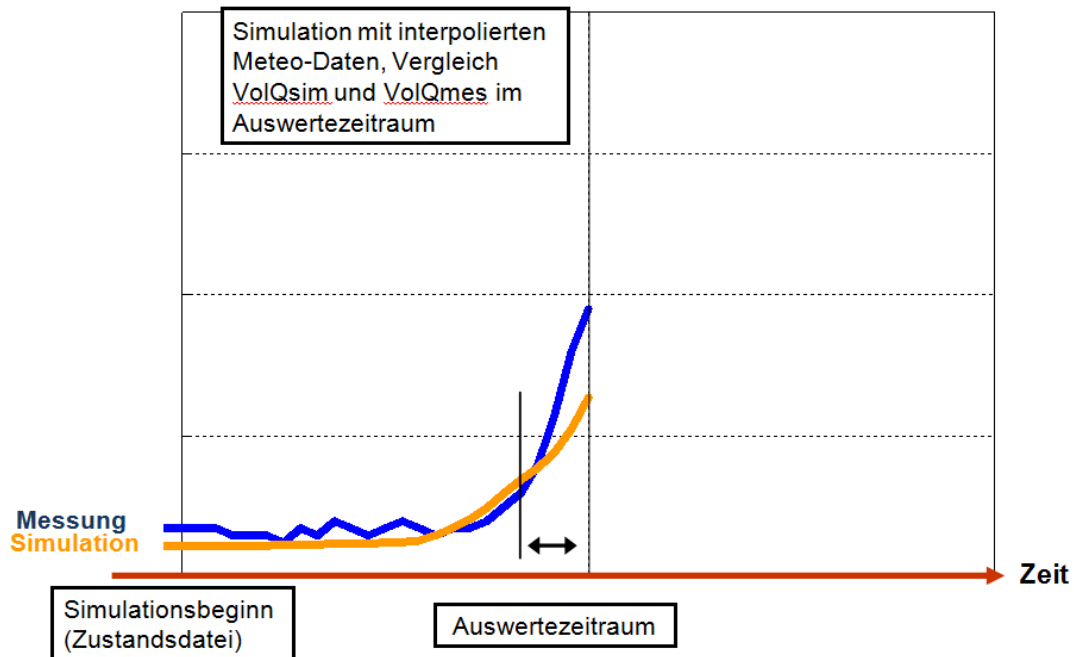


Bild 6: Beispiel der Modellnachführung durch Anpassung des Wasserdargebots: Vergleich der simulierten Abflusswerte (orange) mit den gemessenen Abflusswerten (blau) im Auswertzeitraum (AZR)

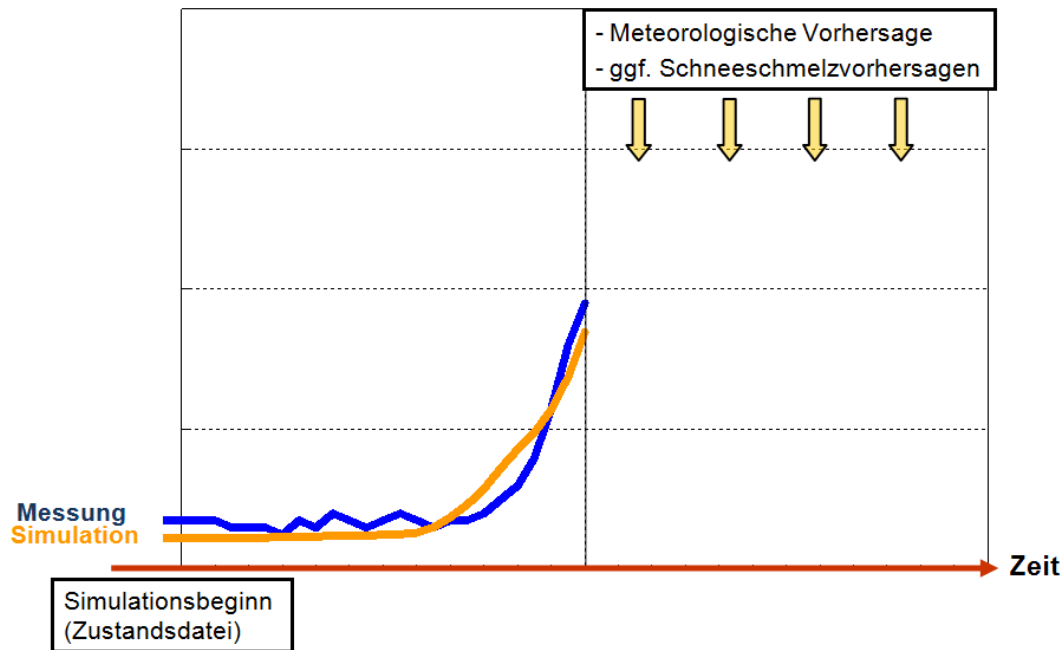


Bild 7: Beispiel der Modellnachführung durch Anpassung des Wasserdargebots: Veränderung der simulierten Abflusswerte nach Veränderung der Werte für das Wasserdargebot. Verwendung des nachgeführten Modells und der meteorologischen Vorhersagedaten für die Berechnung des Vorhersagezeitraums.

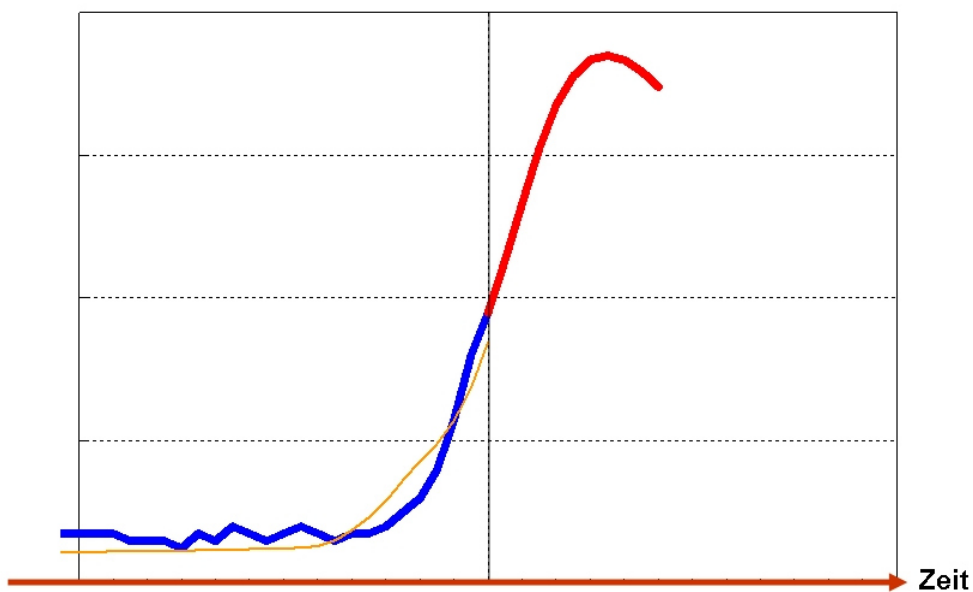


Bild 8: Beispiel der Modellnachführung durch Anpassung des Wasserdargebots: berechnete Abflussganglinie für den Vorhersagezeitraum (mit ARIMA-Korrektur (vgl. Kapitel 2.4))

1.3.2 Anpassung der Zustandsvariablen

Eine andere Möglichkeit der Modellnachführung ist es, die Zustandsvariablen des Modells anzupassen (Fall (2) in Bild 4). Unter Zustandsvariable werden Modellgrößen verstanden, die die aktuellen Gegebenheiten innerhalb des Modellgebiets beschreiben wie z.B. den Wassergehalt einzelner Speicher im Modell oder die Verteilung der Schneedecke. Speziell die Angaben der Verteilung der Modellzustände „Bodenfeuchte“ und „Wasseräquivalente der Schneedecke“ sind wegen ihres großen Einflusses auf die Reaktion des Einzugsgebiets für die gute Modellierung des Abflussgeschehens essenziell.

In LARSIM wurde als Grundvoraussetzung für den operationellen Betrieb die Möglichkeit geschaffen, den Modellzustand an vorzugebenden Zeitpunkten abzuspeichern. In den hierdurch erzeugten „Zustandsdateien“ werden für alle Teilgebiete z.B. die Füllungen der hydrologischen Speicher oder die Schneedeckeninformationen abgelegt. So enthält z.B. die Zustandsdatei für das LARSIM-Rastermodell des 30.000 km² großen Moseleinzugsgebiets rund 2,7 Millionen Werte, die u.a. die aktuelle Füllung des Grundwasserspeichers je Rasterfläche sowie landnutzungsspezifisch die Benetzung der Blattoberflächen, die Schneehöhen und den Wassergehalt der Bodenspeicher repräsentieren.

Dieser in der Zustandsdatei 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. Das Datum der letzten verfügbaren Zustandsdatei definiert den Beginn des Simulationszeitraums im operationellen Betrieb (vgl. Bild 1).

Somit steht mit der Zustandsdatei eine Möglichkeit zur Verfügung, eine Anpassung der Zustandsvariablen bei der Modellnachführung umzusetzen und den modellierten Systemzustand zum aktuellen Berechnungszeitpunkt durch die entsprechenden beobachteten Werte zu ersetzen. Diese direkte Variante erfordert allerdings aktuelle Messwerte, die für typische Zustandsvariablen kontinuierlicher Wasserhaushaltsmodelle wie z.B. den "Wassergehalt einzelner Speicher" nicht einfach zu messen sind und fehlerbehaftet sein können.

In LARSIM sind zwei Anpassungen der Zustandsvariablen in der Zustandsdatei möglich:

- Nachführung der Inhalte der Gebietsspeicher (Korrektur Systemzustand): Bei einer Nachführung der Speicherfüllungen der Gebietsspeicher in der Zustandsdatei wird in LARSIM ein indirekter Weg beschritten. Dabei werden die Speicherfüllungen in der Zustandsdatei durch Multiplikation mit einem einheitlichen Faktor variiert, um die Abweichung zwischen Vol/Q_{sim} und Vol/Q_{gem} zu verringern.
- Nachführung der Schnee-Wasseräquivalente und/oder Schneehöhen (Korrektur Systemzustand): Im Falle der Wasseräquivalente der Schneedecke kann statt der indirekten Anpassung der Werte in der Zustandsdatei die direkte Variante zur Anpassung gewählt werden, da verschiedene Quellen vorliegen, um die Werte der Wasseräquivalente in der Zustandsdatei in LARSIM nachzuführen. So sind z.B. folgende Daten verfügbar:
 - An bestimmten Messstellen können Messungen des Wasseräquivalents durchgeführt werden, deren Werte dann flächig interpoliert werden. Diese interpolierten Werte des Wasseräquivalents können die Werte in der Zustandsdatei ersetzen.

- Zudem liegen aus dem Schneemodell des Deutschen Wetterdienstes SNOW ebenfalls flächenhaft die Werte für das Wasseräquivalent vor. Somit können alternativ die SNOW-Wasseräquivalente die Werte in der Zustandsdatei ersetzen.

Die detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich in Kapitel 2.1.

1.3.3 Anpassung der Modellparameter

Während der Aufstellung und Kalibrierung eines Modells werden an Hand gemessener, meist mehrjähriger Abflusszeitreihen die Parameter des Modells für jeden Pegel einzeln bestimmt. Die ermittelten Modellparameter sind dann für alle Zeiträume (und somit auch für den Niedrig- bis Hochwasserbereich) festgelegt.

Allerdings sind die ermittelten Kombinationen der Modellparameter nicht immer als die einzig mögliche Wahl anzusehen. Eventuell lässt sich durch eine Veränderung der Modellparameter ein besseres Simulationsergebnis erzielen. Da der Niederschlags-Abfluss-Prozess ein komplexer, nicht linearer Vorgang ist und die Modelle immer eine Abstraktion der realen Bedingungen darstellen, kann es unter Umständen gerechtfertigt sein, die Modellparameter während der Modellnachführung zu verändern, um eine gute Nachbildung des aktuellen Zustandes zu erreichen (Fall (3) in Bild 4).

In LARSIM ist dieses Vorgehen der Anpassung der Modellparameter zur Modellnachführung im operationellen Betrieb nicht vorgesehen. Da es sich bei LARSIM um ein relativ detailliertes Modell handelt, sind zu viele Parameter vorhanden, um gleichzeitig angepasst zu werden.

Zudem ist es schwer zu begründen, warum sich Modellparameter über den kurzen Zeitraum der Vorhersageerstellung verändern sollen.

Als einzige Ausnahme ist es in LARSIM möglich, den Modellparameter der Grenztemperatur Schnee (Temperatur für den Übergang von Schnee- in Regenniederschlag) nachzuführen (vgl. Kapitel 2.4). Mit der Option WHM-TGR-NACHFUEHRUNG besteht die Möglichkeit, eine Variation der Grenztemperatur Schnee innerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs auf Basis einer vorgegebenen Schrittweite durchzuführen. Ziel ist auch hier die Minimierung der prozentualen Abweichung zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss innerhalb des Auswertzeitraums. Da die Option WHM-TGR-NACHFUEHRUNG nicht mit den Optionen zur Nachführung des Wasserdargebots bzw. der Gebietsspeicher kombinierbar ist, wird die Option operationell jedoch i.d.R. nicht genutzt.

1.3.4 Anpassung der Outputvariablen

Die berechneten Modellergebnisse können auch direkt an Hand der Messwerte wie z.B. des Abflusses nachgeführt werden (Fall (4) in Bild 4). Eine Möglichkeit ist z.B. die vertikale Verschiebung der simulierten Abflusswerte um einen festen Betrag, damit der gemessene und simulierte Abflusswert zum Vorhersagezeitpunkt übereinstimmen. Das Nachführen der berechneten Modellergebnisse ist laut einer WMO-Studie (1992) das am weitesten verbreitete Verfahren der Modellnachführung.

Die berechneten Modellergebnisse werden in LARSIM ebenfalls nachgeführt. Die dabei angewandte ARIMA-Korrektur wird in Kapitel 2.2 detaillierter beschrieben.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die berechnete Abflussganglinie zeitlich (horizontal) mit Hilfe der Optionen TIME-LAG AUTO, TIME-LAG VORHERSAGE und TIME-LAG GESAMT-ZEITRAUM zu verschieben. Diese Optionen sind aber derzeit noch in der Erprobung und werden daher nicht weiter vorgestellt.

FRAGEN zu Kapitel 1:

(bei den Fragen sind z.T. mehrere Antworten möglich)

- 1) Weswegen kann es erforderlich sein, eine Modellnachführung bei einem Pegel bei der Anwendung eines operationellen Modells durchzuführen?
 - a) Ungenaue Abbildung der natürlichen Prozesse innerhalb des Pegeleinzugsgebiets im Modell
 - b) Fehler in der WQ-Beziehung für den Pegel
 - c) Verwechslung der Zeitzonen (UTC, MEZ, MESZ)
 - d) Probleme bei der Messung des Niederschlags im Pegeleinzugsgebiet
- 2) Anstelle des Begriffs „Modellnachführung“ werden auch andere Begriffe verwendet. Welche?
 - a) Modelljustierung
 - b) Modellassimilation
 - c) Modelloptimierung
 - d) Datenassimilation
- 3) Für die Nachführung des hydrologischen Modells wird ein Vergleich des simulierten Abflussvolumens mit dem _____ Abflussvolumen im Auswertezeitraum pro Pegel durchgeführt.
- 4) Die Modellnachführung kann an verschiedenen Bereichen des Modellierungsprozess durchgeführt werden. Welche prinzipiellen Möglichkeiten zur Modellnachführung bestehen?
 - a) Veränderung der gemessenen Abflussdaten
 - b) Anpassung der in der Zustandsdatei gespeicherten Information zu den Ausgangsbedingungen im Gebiet
 - c) Veränderung der gemessenen Eingangsdaten in das Modell
 - d) Wechsel des Rechners
 - e) Modifikation der berechneten Ergebnisse des Modells
 - f) Anpassung der modellinternen Parameter

- g) Nachführung der vorhergesagten Niederschläge
- 5) Die Modellnachführung durch Veränderung der Eingangsdaten wird in LARSIM durch eine Veränderung des ----- umgesetzt. Dieses ergibt sich aus der Summe der Wassermenge aus ----- und ggf. -----.
- 6) In der Zustandsdatei von LARSIM sind die modellinternen Zustände und Werte auf folgender Skala abgelegt (mehrere Antworten sind möglich):
- a) für jedes Einzugsgebiet
 - b) für jedes Modellelement
 - c) für jede Landnutzungsklasse innerhalb einer Modellelements
 - d) für jeden Quadratzentimeter des Modells
- 7) In LARSIM erfolgt im operationellen Betrieb ----- (eine oder keine?) Modellnachführung der Modellparameter an Hand der gemessenen Abflüsse.

2. Methoden der Modellnachführung in LARSIM

2.1 Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen

2.1.1 Definition der Abflussbereiche der Modellnachführung

In LARSIM kann vom Nutzer für jeden Pegel einzeln festgelegt werden, ob an dem Pegel überhaupt (unabhängig vom aktuellen Abflussbereich) eine Modellnachführung durchgeführt werden soll. Im Anschluss kann der Nutzer noch speziell für jeden der drei möglichen Abflussbereiche (Niedrig-, Mittel- oder Hochwasser) definieren, ob eine Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen an Hand der gemessenen Abflussdaten in dem jeweiligen Abflussbereich gewünscht ist.

Die Datei <pegel.stm> enthält die nötigen Informationen, an Hand derer das Modell überprüft, ob eine Nachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen durchgeführt wird. Für jeden der drei Abflussbereiche ist in der <pegel.stm> durch Vorgabe der Buchstaben 'J' (für 'Ja') und 'N' (für 'Nein') in den Spalten mit der Überschrift Opt_NQ, Opt_MQ und Opt_HQ festzulegen, ob die Modellnachführung umgesetzt werden soll (vgl. Bild 9).

Auch die Abfluss-Schwellenwerte, an Hand derer zwischen den Abflussbereichen Niedrig-, Mittel- und Hochwasser unterschieden wird, sind in der <pegel.stm> aufgeführt. Diese Schwellenwerte werden über folgende Formeln ermittelt:

- Grenze NQM zwischen Niedrig- und Mittelwasser: $NQM = MNQ + 0,5 * (MQ - MNQ)$
- Grenze MQH zwischen Mittel- und Hochwasser: $MQH = 3 * MQ$

Die beiden Schwellenwerte NQM und MQH können aber auch vom Nutzer frei gewählt und in der <pegel.stm> festgelegt werden.

Soll an dem Pegel eine Modellnachführung umgesetzt werden, analysiert das Modell, zu welchem Abflussbereich (Hoch-, Mittel- oder Niedrigwasser) der aktuell gemessene Abfluss gehört. Ist dann entsprechend den Angaben in der <pegel.stm> eine Optimierung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen des Pegels erwünscht, wird eine Modellnachführung an Hand der gemessenen Abflüsse durchgeführt.

Somit wird die Nachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen nur durchgeführt, wenn:

- generell an dem Pegel eine Nachführung durchgeführt werden soll,

Dateiname;	GMD;	IPRIN;	Gem_NQ;	Opt_NQ;	Ari_NQ;	Ari_h_NQ;	Ari_h_VZP_NQ;	NQM;
Lorsch_13_s-2.wq;	LORS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.25;
Bensheim_4.wq;	BENS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.23;
Eberstadt_12.wq;	EBST;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.53;
Naenheim_08.wq;	NAUH;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.43;
Michelstadt_9.wq;	MICH;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	1.21;
Hainstadt_15_s-14.wq;	HAIN;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.46;
Wersau_1.wq;	WERS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.75;
Harreshausen_13.wq;	HARR;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.05;

Bild 9: Ausschnitt für den NQ-Bereich aus der Datei <pegel.stm>: Einstellung der gewünschten Optionen für die Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen

- der aktuelle Abfluss des Pegels sich in einem Abflussbereich befindet, in dem für diesen Pegel eine Nachführung gewünscht ist und
- die Abweichung zwischen gemessenem und simuliertem Abfluss im Auswertzeitraum größer dem Schwellenwert *MaxDev* ist.

2.1.2 Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen im Hochwasserbereich

Bei der Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen unterscheidet sich das Vorgehen im Hochwasserbereich vom Vorgehen im Niedrig- und Mittelwasserbereich.

Im Hochwasserbereich beträgt die Dauer des Auswertzeitraums nur sechs Stunden (sofern dieses so über den Einzelparameter HQ-AUSWERTEZEIT in der Datei <tape10> festgelegt wurde). Der Auswertzeitraum wird kurz gewählt, da von einem Abflussanstieg im Hochwasserfall ausgegangen wird und das Programm im Zeitbereich kurz vor dem Vorhersagezeit versuchen soll, die größtmögliche Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Ganglinie herzustellen. Liegt mindestens ein Wert der gemessenen Abflussganglinie des Pegels im Auswertzeitraum oberhalb des definierten Schwellenwertes MQH für Hochwasser, werden die Nachführungsbedingungen für Hochwasser zugrunde gelegt.

Bei der Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen im Hochwasserbereich werden zwei Fälle unterschieden (Bild 10):

Fall 1: Variation des Wasserdargebots (Hochwasserbereich)

Zunächst wird vom Programm überprüft, ob eine Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationswerten durch die Variation eines Faktors für das Wasserdargebot (WD-Variation, vgl. Bild 10) erzielt werden kann. Mit diesem Faktor werden alle Wasserdargebotswerte im Simulationszeitraum multipliziert.

Bei dieser Überprüfung werden vom Programm zunächst extreme minimale und maximale Test-Faktoren für die WD-Variation verwendet. In der Regel wird dabei als untere Grenze der Faktor 0,0001 und als obere Grenze der Faktor 10 gewählt.

Ziel der Verwendung von Test-Faktoren ist es herauszufinden, ob

- das Wasserdargebot so niedrig ist, dass auch bei Multiplikation mit dem hohen Faktor von 10 kein oder nur ein geringes Abflussvolumen berechnet wird (dies ist zum Beispiel in trockenen Sommerperioden der Fall), oder ob
- das Wasserdargebot so hoch ist, dass selbst bei Multiplikation mit einem sehr geringen Wert von 0,0001 immer noch ein zu hohes Abflussvolumen im Vergleich zum gemessenen Abflussvolumen simuliert wird.

Wenn durch Anwendung dieser beiden Tests der WD-Variation das simulierte und gemessene Abflussvolumen im Auswertzeitraum angenähert werden kann, wird das Wasserdargebot automatisiert nachgeführt. Dabei werden engere Grenzen eingehalten, bis zu denen der WD-Faktor variiert wird (untere Grenze 0,5; oberer Grenze 1,5).

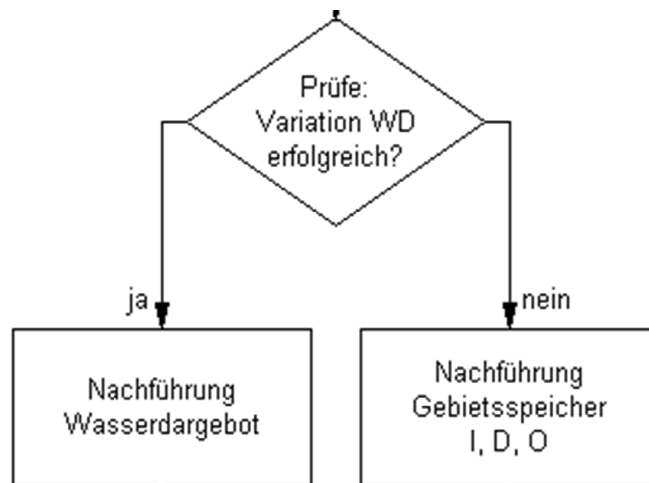


Bild 10: Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen im Hochwasserbereich

Die Grenzen für die Faktoren für die WD-Variation sind in der Datei <tape10> festgeschrieben (Einzelparameter „ZUL. FAKTOR WD-NACH“) und können dort bei Bedarf modifiziert werden. Dabei können sowohl die extremen minimalen und maximalen Test-Faktoren (also z.B. 0,0001 und 10) wie auch die dann tatsächlich zu Modellnachführung verwendeten Faktoren (also z.B. 0,5 und 1,5) im <tape10> festgelegt werden.

Während der Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Abflusswerten innerhalb des Auswertezeitraums erfolgt, erfolgt die Nachführung des Wasserdargebots im gesamten Simulationszeitraum (vgl. Bild 1). Im operationellen Routinebetrieb ist in LARSIM definiert, dass der Simulationszeitraum mindestens zwei Tage umfasst. Somit wird als Anfangsbedingung für einen Modelllauf diejenige WHM-Zustandsdatei eingelesen, deren Datum mindestens zwei Tage vor dem Vorhersagezeitpunkt liegt.

Die Nachführung des Wasserdargebots ist besonders effizient, wenn ein ausreichendes Wasserdargebot während des Simulationszeitraums zur Verfügung steht.

Im operationellen Vorhersagebetrieb wird der vom Modell berechnete Gesamtzeitraum in zwei Abschnitte unterteilt: Im Simulationszeitraum (= Berechnungsbeginn (letzte verfügbare Zustandsdatei) 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 Basis von Wettervorhersagen, z.B. des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Für den Vorhersagezeitraum werden die Vorhersagedaten bei einer Modellnachführung unverändert übernommen, d.h. das vorhergesagte Wasserdargebot ist unabhängig von den bei der WD-Variation ermittelten Faktoren.

Fall 2: Variation der Gebietsspeichereinhalte aus der Zustandsdatei (Hochwasserbereich)

Die Nachführung des Wasserdargebots ist nicht zielführend, wenn die Abweichung der gemessenen und simulierten Abflüsse 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 zurückzuführen ist.

In solchen Fällen wird der aktuelle Wasserinhalt der hydrologischen Gebietsspeicher zu Beginn des Simulationszeitraums modellintern so nachgeführt, dass der berechnete Abfluss mit den Messwerten am Pegel im Auswertzeitraum möglichst gut übereinstimmt (Nachführung durch Anpassung der Zustandsvariable Speicherinhalt). Dabei werden im Hochwasserfall andere Gebietsspeicher als im Niedrig- und Mittelwasserbereich nachgeführt.

Nur wenn durch Anwendung der Tests der Veränderung des Wasserdargebots keine Annäherung der berechneten und gemessenen Ganglinie im Auswertzeitraum feststellbar ist, werden in einem zweiten Schritt die Inhalte der Gebietsspeicher aus der Zustandsdatei variiert.

Dabei werden die Inhalte der Gebietsspeicher für Interflow, Direktabfluss und Oberflächenabfluss in der Zustandsdatei modellintern mit einem Faktor multipliziert. Die minimalen und maximalen Faktoren, die dabei vom Programm eingesetzt werden dürfen, werden in der Datei <tape10> durch den Einzelparameter „ZUL. FAKTOR GS-NACH“ festgelegt. Für die Nachführung der Inhalte der Gebietsspeicher für Interflow, Direktabfluss und Oberflächenabfluss werden standardmäßig Werte für die Faktoren von 0,2 und 5,0 verwendet.

Da die Nachführung der Inhalte der Gebietsspeicher nur für den Zeitpunkt des Simulationsbeginns erfolgt und nur die schneller auslaufenden Gebietsspeicher (nicht der Gebietsspeicher für Basisabfluss) beeinflusst, ist die Wirkung relativ begrenzt.

2.1.3 Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich

Im Niedrig- und Mittelwasserbereich beträgt die Dauer des Auswertzeitraums statt 6 Stunden wie im Hochwasserbereich nun 48 Stunden (sofern dieses so über den Einzelparameter NQM-AUSWERTEZEIT in der Datei <tape10> festgelegt wurde), damit kurzfristige Wasserstandsschwankungen am Pegel vor dem Vorhersagezeitpunkt nicht überbewertet werden.

Es werden wie im Hochwasserfall auch im Niedrig- und Mittelwasserbereich bei der Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen zwei Fälle unterschieden (Bild 11):

Fall 1: Variation des Wasserdargebots (Niedrig- und Mittelwasserbereich)

Wie im Hochwasserfall wird zunächst mit den extremen Test-Faktoren von 10 und 0,0001 überprüft, ob überhaupt die Veränderung des Wasserdargebots eine Annäherung zwischen gemessener und berechneter Ganglinie erzielt werden kann. Ist dies möglich, wird das Wasserdargebot während des Simulationszeitraums innerhalb der Grenzen von 0,5 und 1,5 (entsprechend der Vorgaben im <tape10>) iterativ variiert, um eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Ganglinie zu erzielen.

Fall 2: Variation der Gebietsspeicherinhalte aus der Zustandsdatei (Niedrig- und Mittelwasserbereich)

Führt die Wasserdargebots-Nachführung nicht zum Ziel, werden die Inhalte der Gebietsspeicher in der Zustandsdatei durch Multiplikation mit einem Faktor variiert.

Vor der Variation der Gebietsspeicher im Niedrig- und Mittelwasserbereich wird - sofern entsprechende Werte für den Einzelparameter WHM-NQ/MQ-NACH SW % in der Datei <tape10> definiert sind – vom Programm überprüft, ob Abflussschwankungen im Auswertzeitraum vorliegen, die nicht natürlichen Ursprungs sind (z.B. durch eine anthropogen verursachte Steuerungsmaßnahme des Abflusses wie Schwallbetrieb). Ist dies der Fall, wird die Nachführung der Gebietsspeicher durch Anpassung an die beeinflussten, nicht natürlich auftretenden gemessenen Abflüssen unterbunden.

Diese automatische Kontrolle der Beeinflussung der Abflussschwankung geht von davon aus, dass bei einem realen, nicht anthropogen beeinflussten Ereignis längerfristige Trends vorliegen („Auslaufen“ der Gebietsspeicher). Daher werden die lokalen Sprünge in den Abflüssen im Auswertzeitraum untersucht, die durch die Differenzen zwischen zwei aufeinander folgende Abflusswerte gekennzeichnet sind. Überschreiten diese Abflusssprünge die mit dem Einzelparameter WHM-NQ/MQ-NACH SW % vereinbarten Werte SW_1 und SW_2 erfolgt eine Unterbindung der Modellnachführung der Gebietsspeicher:

- Max. trendbereinigter Sprung:
$$MAX \left| \frac{Dif_i - Trend_i}{Q_{mit_i}} \right| \cdot 100 > SW_1$$
- Max. lokaler Sprung:
$$MAX \left| \frac{Dif_i}{Q_{min_i}} \right| \cdot 100 > SW_2$$

Mit:

SW_1 : [%]	Schwellenwert für das erste Kriterium (Vorschlag: 35 %)
SW_2 : [%]	Schwellenwert für das zweite Kriterium (Vorschlag: 80 %)
Dif_i : [m^3/s]	$Q_i - Q_{i-1}$ für alle i Abflusswerte im NMQ-Auswertzeitraum
Q_{min_i} [m^3/s]	Minimum der 2 zur Differenzbildung verwendeten Abflüsse Q_i und Q_{i-1}
$Trend_i$ [$m^3/s/h$]	Lokaler Trend des Abflusses im Zeitbereich (Kendall-Theil-Geraden aus je drei Werten vor und nach dem aktuellen Abflusswert)
Q_{mit_i} [m^3/s]	Mittlerer Abfluss in dem Zeitbereich, über den der Trend berechnet wird

Wenn die Abflüsse als nicht beeinflusst eingestuft werden, werden als nächstes die Gebietsspeicher nachgeführt. Dabei wird aber im Niedrig- und Mittelwasserbereich im Gegensatz zur Nachführung der Gebietsspeicher im Hochwasserfall zuvor überprüft, welchen Anteil die in LARSIM berechnete Abflusskomponente des Basisabflusses am berechneten Gesamtabfluss besitzt:

- Liegt der Basisabflussanteil am Gesamtabfluss bei über 90% (sofern der Einzelparameter MINDESTANT. GW [%] in der Datei <tape10> mit diesem Wert belegt ist) ($QB/Q > MinQB$ von 90%), werden die Inhalte aller vier Gebietsspeicher (Basisabfluss, Interflow, Direktabfluss und Oberflächenabfluss) mit dem Faktor multipliziert.
- Liegt der Basisabflussanteil unter 90%, werden nur die Inhalte der drei Gebietsspeicher für Interflow, Direktabfluss und Oberflächenabfluss mit dem Faktor multipliziert.

Dadurch wird ausgeschlossen, dass Fehleinschätzungen des Wasserdargebots oder des Auslaufverhaltens von Interflow- und Direktabflussspeicher durch eine Nachführung des Basisabflussspeichers kompensiert werden.

Die Änderungen am Inhalt des Basisabflussspeichers können sich auf Grund der langsamen Reaktionszeit des Basisabflussspeichers weit in den Vorhersagezeitraum auswirken.

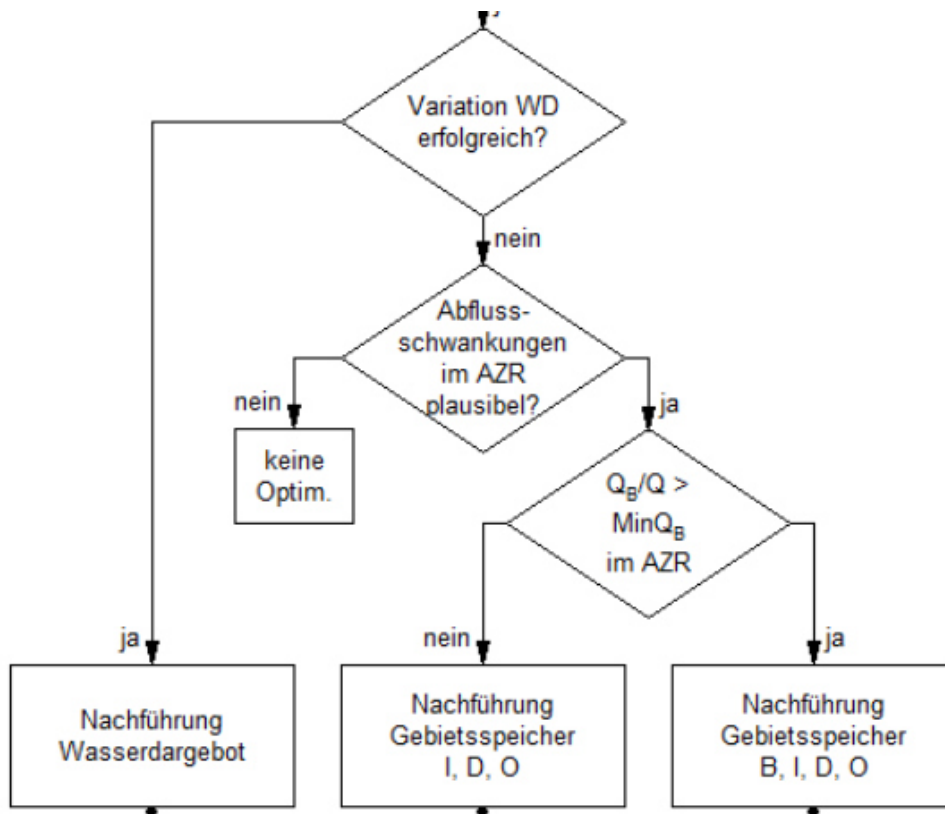


Bild 11: Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich

FRAGEN zu Kapitel 2.1:

(bei den Fragen sind z.T. mehrere Antworten möglich)

- 1) Angenommen, das Programm LARSIM führt das Wasserdargebot nach, um die Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Ganglinien zu verringern. In welchem Zeitraum wird das Wasserdargebot nachgeführt?
 - a) Auswertezeitraum
 - b) Simulationszeitraum
 - c) Vorhersagezeitraum

- 2) Die Modellnachführung wird nur dann umgesetzt, wenn folgende Punkte erfüllt sind:
 - a) Der Pegel muss einen Oberliegerpegel haben.
 - b) Der gemessene Abfluss im Vorhersagezeitraum befindet sich in einem Abflussbereich, für den am Pegel eine Modellnachführung gewünscht wird.
 - c) Für den Pegel ist in der <pegel.stm> nicht generell ausgeschlossen, dass eine Modellnachführung durchgeführt werden soll.
 - d) Die auftretende Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Auswertezeitraum ist größer als die maximal zulässige Abweichung.
 - e) Im Auswertezeitraum erreicht ein gemessener Abflusswert den Abflussbereich, für den die Durchführung der Modellnachführung laut der Datei <pegel.stm> aktiviert ist.

- 3) Der Simulationszeitraum umfasst mindestens einen Zeitraum von ----- Stunden.

- 4) Die Modellnachführung der Gebietsspeicher erfolgt im Hochwasserbereich nur, wenn
 - a) bereits eine Modellnachführung des Wasserdargebots erfolgt ist.
 - b) der Basisabflussanteil größer als 90% ist.
 - c) die extrem hohen und niedrigen Faktoren der Variation des Wasserdargebots (10 und 0,0001) keine Annäherung der simulierten Ganglinie an die gemessene Ganglinie erzielt haben.
 - d) bei der Variation des Wasserdargebots der maximale und minimale Faktor von 0,5 und 1,5 erreicht wurde.

2.2 Pegelgebietsspezifisches Vorgehen bei der Modellnachführung

Die Modellnachführungen werden immer jeweils nacheinander von Pegel zu Pegel durchgeführt, beginnend mit den Oberlaufpegeln (Bild 12).

Zunächst werden die Abflüsse mit dem Ausgangszustand des Gebiets entsprechend der Zustandsdatei bis zum aktuell betrachteten Pegel berechnet. Im Anschluss an den Vergleich der simulierten Ganglinie mit der gemessenen Ganglinie wird ggf. eine Modellnachführung für das Einzugsgebiet des Pegels durchgeführt.

Danach wird der im Systemablauf folgende Pegel im Untersuchungsgebiet bearbeitet. Dabei werden die für den oberstrom liegenden Pegel ermittelten Abflüsse und Korrekturen festgehalten und nur für das Zwischeneinzugsgebiet des betrachteten Pegels wird die Modellnachführung durchgeführt.

Fehlen an einem Pegel Abflussmesswerte, kann an diesem Pegel keine Modellnachführung an Hand der gemessenen Abflüsse durchgeführt werden. Stattdessen wird das Einzugsgebiet des Pegels modellintern dem nächstgelegenen, stromabwärts befindlichen Pegel zugeschlagen und an diesem nächstfolgenden Pegel ein entsprechend vergrößertes Zwischeneinzugsgebiet betrachtet. Die Bestimmung der Nachführungsfaktoren erfolgt somit an Hand der Optimierung am Unterliegerpegel für das gesamte Gebiet (inklusive des Pegel-Einzugsgebiets, für das keine Abflussmesswerte sondern nur Fehlwerte vorliegen).

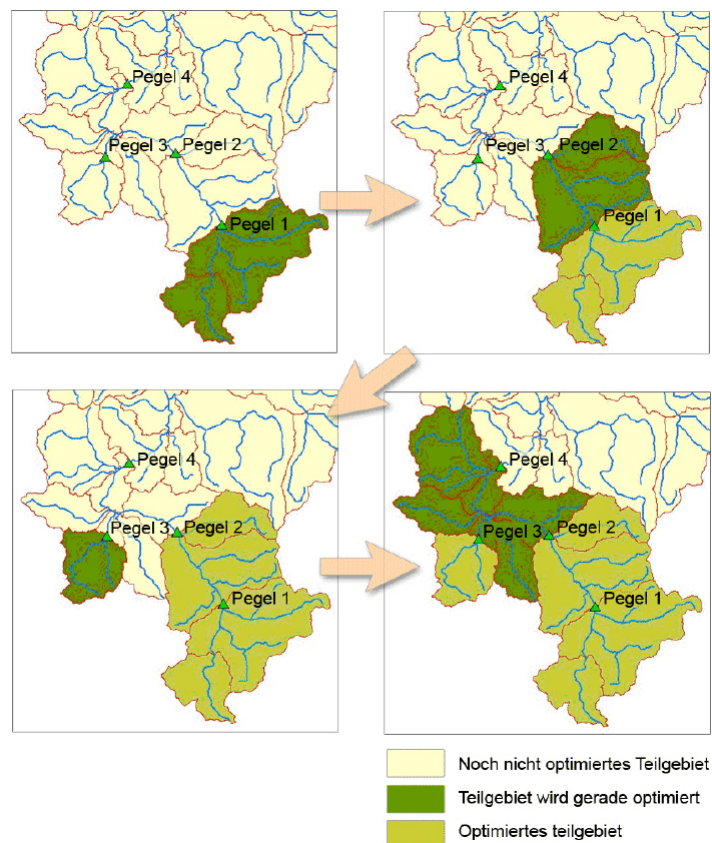


Bild 12: Pegelgebietsspezifisches Vorgehen bei der Modellnachführung (Schröder & Lipfert 2006)

Allerdings erfolgt die Ausgabe der simulierten Abflüsse auch am Pegel mit den Fehlern, so dass auch für diesen Pegel Berechnungsergebnisse bereitgestellt werden können.

Diese Prozedur der pegelweisen Modellnachführung wird fortgesetzt, bis Vorhersagen für alle vorgesehenen Pegel vorliegen.

Die Art der Modellnachführung von Oberliegerpegel zu Unterliegerpegel unter Verwendung der gemessenen Abflusswerte über die mehrere Stunden des Auswertzeitraums ist ein Vorteil, den die hydrologischen Modelle auf Grund ihrer Raum-Zeit-Schleife besitzen. Bei der operationellen Anwendung der Modelle stehen ja durch die Berechnung der gesamten Ganglinie an einem Pegel für den Simulationszeitraum die simulierten Abflusswerte für einen längeren Zeitraum vor dem Vorhersagezeitpunkt zur Verfügung. Diese Abflusswerte können dann mit den gemessenen Abflusswerten verglichen werden.

Die Nachführung des Modells an einem Pegel kann daher basierend auf mehreren gemessenen Abflusswerten über einen längeren Zeitraum des Auswertzeitraums durchgeführt werden. Die gemessenen Ganglinien, die nachgeführten Ganglinien und die auf Basis der Nachführung des Modells erstellte Vorhersage kann dann an das stromabwärts gelegene Zwischengebiet des nächsten Pegels übergeben werden.

Im operationellen Betrieb wird generell zunächst davon ausgegangen, dass für die Berechnung des Abflusses für das flussabwärts an einen bestimmten Pegel anschließende Gebiet bis zum Vorhersagezeitpunkt die an diesem Pegel gemessene Abflussganglinie als Zuflussganglinie verwendet werden soll. Dies setzt voraus, dass die gemessene Ganglinie verfügbar und von guter Qualität ist.

Falls an einzelnen Pegeln die gemessene Ganglinie nicht vertrauenswürdig bzw. nur in einzelnen Abflussbereichen vertrauenswürdig ist, kann durch die Angaben in der Spalte Gem_NQ, Gem_MQ und Gem_HQ in der Datei <pegel.stm> definiert werden, dass die gemessene Ganglinie nicht an den Unterliegerpegel als Zuflussganglinie weitergegeben werden soll (Bild 13). Stattdessen wird dann für die Berechnung des Abflusses im Simulationszeitraum bis zum Vorhersagezeitpunkt für das flussabwärts anschließende Gebiet die simulierte Ganglinie übernommen. Je nach Vorgabe in der Spalte Opt_NQ, Opt_MQ und Opt_HQ in der Datei <pegel.stm> wird dann die simulierte Ganglinie mit oder ohne Modellnachführung weitergegeben.

Dateiname;	GMD;	IPRIN;	Gem_NQ;	Opt_NQ;	Ari_NQ;	Ari_h_NQ;	Ari_h_VZP_NQ;	NQM;
Lorsch_13_s-2.wq;	LORS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.25;
Bensheim_4.wq;	BENS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.23;
Eberstadt_12.wq;	EBST;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.53;
Nauheim_08.wq;	NAUH;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.43;
Michelstadt_9.wq;	MICH;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	1.21;
Hainstadt_15_s-14.wq;	HAIN;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.46;
Wersau_1.wq;	WERS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.75;
Harreshausen_13.wq;	HARR;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.05;

Bild 13: Ausschnitt für den NQ-Bereich aus der Datei <pegel.stm>: Einstellung der gewünschten Optionen für die Weitergabe der gemessenen Abflusswerte an den Unterliegerpegel

2.3 Modellnachführung durch die ARIMA-Korrektur

Bei der Modellnachführung durch die ARIMA-Korrektur erfolgt eine vertikale Verschiebung der Werte der Vorhersage im Vorhersagezeitraum (Bild 14). Der Betrag der Verschiebung ergibt sich aus dem Unterschied zwischen dem letzten Messwert und dem für diesen Zeitpunkt simulierten Abflusswert.

Die ARIMA-Korrektur wirkt nur lokal am Pegel bzw. bei Weitergabe der korrigierten Ganglinie unterstrom des Pegels und nur im Vorhersagezeitraum. Somit ist die ARIMA-Korrektur ohne Auswirkungen auf innere Modellzustände und deren Fortführung über die WHM-Zustandsdatei. Es handelt sich bei der ARIMA-Korrektur um eine reine Output-Korrektur.

Die Modellnachführungen durch die Anpassung des Wasserdargebots (Input-Korrektur) oder der Gebietsspeicher (System-Korrektur) dagegen beeinflussen ggf. den Wasserhaushalt im (Zwischen)-Einzugsgebiet des Pegels im Simulationszeitraum. Die Nachführung kann sich dadurch auch im Vorhersagezeitraum auswirken (z.B. durch Veränderungen der Bodenfeuchte bei Nachführung des Wasserdargebots).



Bild 14: Konstante Verschiebung der Vorhersage anhand des letzten Messwertes (ARIMA-010-Korrektur) (Rademacher et al. 2009)

Vergleichbar wie bei der Modellnachführung des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen kann für jeden Pegel einzeln für jeden Abflussbereich festgelegt werden, ob überhaupt eine ARIMA-Korrektur durchgeführt werden soll (Bild 15).

Absolute und relative ARIMA-Korrektur

Bei der ARIMA-Korrektur wird in LARSIM eine Korrektur der Vorhersagewerte anhand der Differenz zwischen dem gemessenen und simulierten Abflusswert zum Vorhersagezeitpunkt durchgeführt. Die simulierten Abflüsse im Vorhersagezeitraum werden dabei absolut oder relativ verschoben:

- Absolute ARIMA-Korrektur: Ist der jeweils zu verschiebende Vorhersagewert größer als der Simulationswert zum Vorhersagezeitpunkt, wird eine absolute Verschiebung der vorhergesagten Werte um die Differenz zwischen Messung und Simulation zum Vorhersagezeitpunkt vorgenommen (Bild 14). Die Verschiebung des Vorhersagewerts erfolgt somit um einen absoluten Betrag.

- Relative ARIMA-Korrektur: Ist der Vorhersagewert hingegen kleiner als der Simulationswert zum Vorhersagezeitpunkt, wird lediglich eine relative Verschiebung durchgeführt. Für diese relative Verschiebung wird der Verschiebungsvektor anhand der Division der Differenz zwischen Messung und Simulation durch den Simulationswert zum Vorhersagezeitpunkt bestimmt. Die Verschiebung des Vorhersagewerts erfolgt somit um einen prozentualen Betrag.

LARSIM entscheidet für jeden vorhergesagten Abflusswert, ob eine relative oder eine absolute Verschiebung durchgeführt wird.

Maximale prozentuale ARIMA-Korrektur

Die maximale Verschiebung der ARIMA-Korrektur kann durch einen vorzugegebenen Wert in der Datei <tape10> (Einzelparameter MAX-ARIMA-NQ [%] usw.) begrenzt werden. Dieser Wert definiert dann die maximal zulässige prozentuale Verschiebung, d.h. den absoluten Verschiebungsvektor geteilt durch den Simulationswert zum Vorhersagezeitpunkt.

ARIMA-Korrektur auf den letzten Messwert oder auf Mittelwerte

In der Datei <pegel.stm> kann pegelspezifisch festgelegt werden, ob die ARIMA-Korrektur auf den letzten Messwert zum Vorhersagezeitpunkt oder auf den Mittelwert der letzten Abflüsse erfolgen soll. Über die Pegelparameter Ari_h_NQ, Ari_h_MQ und Ari_h_HQ in der Datei <pegel.stm> kann eine Korrektur anhand eines Mittelwerts der Abflüsse über einen definierten Zeitraum angefordert werden.

Dies kann bei Pegeln mit unnatürlichen Abflussschwankungen (z.B. Kraftwerksbetrieb) empfehlenswert sein. Insbesondere im Niedrigwasser treten solche Abflussschwankungen auf.

Daher wird in LARSIM zudem automatisch im Niedrigwasserfall überprüft, ob Abflussschwankungen vorliegen, die als beeinflusst eingestuft werden. Diese Überprüfung, in wie weit der Abfluss anthropogen beeinflusst ist, erfolgt vergleichbar wie bei der Modellnachführung der Gebietsspeicher im Niedrig- und Mittelwasserbereich, aber mit anderen Berechnungsansätzen:

- Unbeeinflusste Abflussverhältnisse: Bei unbeeinflussten Verhältnissen im Niedrigwasserbereich und im Mittel- und Hochwasserbereich wird die ARIMA-Korrektur auf den letzten Messwert zum Vorhersagezeitpunkt durchgeführt. Dies ist der Standardfall der ARIMA-Korrektur.
- Beeinflusste Abflussverhältnisse: Nur bei beeinflussten Abflussverhältnissen (vor dem Vorhersagezeitpunkt) im Niedrigwasserbereich werden die Vorhersagewerte nicht auf den letzten Messwert zum Vorhersagezeitpunkt, sondern automatisch auf das Mittel des gemessenen Abflusses über die letzten 24 Stunden verschoben. Dadurch wird der Einfluss des letzten Messwertes verringert, der im Niedrigwasserbereich oft durch anthropogene Beeinflussungen geprägt ist. Die Unterscheidung zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Abflussverhältnissen erfolgt in LARSIM intern an Hand einer festgelegten Formel (beeinflussbar durch den Einzelparameter REL. SUM-DELTA-Q (-) in der Datei <tape10>).

Bei Vereinbarung der Option WHM-ARIMA-NQ ERWEITERT kann die Anzahl der Stunden zur Mittelung des gemessenen Abflusses zur Bestimmung des Verschiebungsvektors für die ARIMA-Korrektur bei beeinflussten Niedrigwasserabfluss über den Parameter Ari_h_NQstat in der Datei <pegel.stm> vorgegeben werden.

Ist die Option nicht vereinbart, erfolgt bei beeinflusstem Niedrigwasserabfluss grundsätzlich eine Verschiebung der Vorhersage auf das Mittel der letzten 24 Stunden des gemessenen Abflusses.

Die Option WHM-ARIMA-NQ ERWEITERT eignet sich insbesondere für die Erweiterung des Zeitraums zur Mittelwertbildung bei starken durch Steuerung beeinflussten Tagesschwankungen des Abflusses. Auch kann mithilfe der Option für einzelne Pegel die Verschiebung in den Tagesmittelwert unterbunden werden, indem für die Anzahl der Stunden zur Mittelwertbildung der Wert 1 definiert wird.

Wird auch für unbeeinflusste Abflüsse die ARIMA-Korrektur anhand eines Mittelwerts angefordert und überschreitet der Wert des Parameter Ari_h_NQ den Wert des Parameters Ari_h_NQstat, erfolgt keine Überprüfung der Abflussverhältnisse auf Beeinflussung und es erfolgt die Mittelwertbildung anhand von Ari_h_NQ.

Dateiname;	GMD;	IPRIN;	Gem_NQ;	Opt_NQ;	Ari_NQ;	Ari_h_NQ;	Ari_h_VZP_NQ;	NQM;
Lorsch_13_s-2.wq;	LORS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.25;
Bensheim_4.wq;	BENS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.23;
Eberstadt_12.wq;	EBST;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.53;
Nauheim_08.wq;	NAUH;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.43;
Michelstadt_9.wq;	MICH;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	1.21;
Hainstadt_15_s-14.wq;	HAIN;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.46;
Wersau_1.wq;	WERS;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	0.75;
Harreshausen_13.wq;	HARR;	-;	J;	J;	J;	1;	6;	2.05;

Bild 15: Ausschnitt für den NQ-Bereich aus der Datei <pegel.stm>: Einstellung der gewünschten Optionen für die Modellnachführung durch die ARIMA-Korrektur

ARIMA-Korrektur bei fehlenden Messwerten

Die ARIMA-Korrektur wird angewendet, wenn ein Abflusswert zu Beginn der Vorhersage vorhanden ist. Ist kein Wert für den aktuellen Abfluss zum Vorhersagezeitpunkt vorhanden, wird der gemessene Wert des vorherigen Zeitschritts für die ARIMA-Korrektur genutzt. Sind auch für diesen Zeitschritt keine gemessenen Werte vorhanden, wird die ARIMA-Korrektur für den jeweiligen Pegel nicht angewendet. In der <pegel.stm> kann allerdings für jeden Pegel auch spezifisch bestimmt werden, bis zu welchem Zeitpunkt mindestens Messwerte vorliegen müssen, damit eine ARIMA-Korrektur durchgeführt wird (Parameter Ari_h_VZP (für alle Abflussbereiche) oder Ari_h_VZP_NQ, Ari_h_VZP_MQ und Ari_h_VZP_HQ (spezifisch für die Abflussbereiche)).

Lokale und globale ARIMA-Korrektur

Entsprechend der Festlegung der Vertrauenswürdigkeit der gemessenen Abflüsse in der <pegel.stm> sind die Konsequenzen der ARIMA-Korrektur für die Berechnungsergebnisse am flussabwärts liegenden Pegel relevant:

- Wenn der gemessene Abfluss am Pegel als verlässlich eingestuft ist und eine ARIMA-Korrektur durchgeführt wird, wird die vorhergesagte, ARIMA-korrigierte Abflussganglinie für die Berechnung des stromabwärts gelegenen Pegelkontrollbereichs berücksichtigt („globale“ ARIMA-Korrektur).
- Wenn der gemessene Abfluss am Pegel als nicht plausibel eingestuft ist und dennoch eine ARIMA-Korrektur durchgeführt wird, wird nur eine lokale ARIMA-Korrektur umgesetzt.

Dies bedeutet, dass die nicht ARIMA-korrigierte Abflussganglinie als Zuflussganglinie zum nächsten Pegelkontrollbereich dient. An dem Pegel selber wird die ARIMA-korrigierte Abflussganglinie z.B. für Darstellungszwecke ausgegeben („lokale“ ARIMA-Korrektur). Die lokale ARIMA-Korrektur beeinflusst somit nicht das Simulationsergebnis für den Unterliegerpegel.

Lineare Reduktion der ARIMA-Korrektur

Da die ARIMA-Korrektur in der Regel an Hand eines einzelnen Abflussmesswerts zum Vorhersagezeitpunkt durchgeführt wird, ist die Zuverlässigkeit dieses Messwertes von großer Bedeutung. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die ARIMA-Korrektur auf der Abweichung zwischen gemessenem und simuliertem Abflusswert am Vorhersagezeitpunkt und somit auf dem aktuellen Zustand des Einzugsgebietes beruht. Mit zunehmender Vorhersagedauer wird der Einfluss der Abweichungen zum aktuellen Vorhersagezeitpunkt an Bedeutung verlieren.

Um dies zu berücksichtigen besteht in LARSIM die Möglichkeit, die Option ARIMA REDUKTION zu setzen. Diese Option bewirkt, dass die ARIMA-Korrektur bei Abflussverhältnissen im HQ-Bereich oder bei unbeeinflussten Abflussverhältnissen im NQ- bzw. MQ-Bereich nicht auf alle Zeitschritte des Vorhersagezeitraums angewendet wird. Anstelle dessen erfolgt eine lineare Reduktion der ARIMA-Korrektur auf den Wert Null, beginnend vom vollständigen Verschiebungsbetrag am Vorhersagezeitpunkt über eine definierte Anzahl von Stunden.

In Bild 16 ist das Vorgehen exemplarisch verdeutlicht: die vorhergesagte simulierte Ganglinie (grün) wird zunächst durch die ARIMA-Korrektur verschobene Ganglinie in Lila ersetzt, die an die Ganglinie der Messwerte (blau) anschließt. Innerhalb des Zeitraums Ari_h_red_HQ nimmt der Betrag der ARIMA-Korrektur linear ab, bis auf den Wert Null. Daher erreicht am Ende des Zeitraums Ari_h_red_HQ die ARIMA-korrigierte Ganglinie wieder die Werte der nicht ARIMA-korrigierten vorgesagten Ganglinie.

Bei Vereinbarung der Option WHM-ARIMA REDUKTION ist die Vorgabe des Einzelparameters QMIN/QMAX [%] in der Datei <tape10> sowie der pegelspezifischen Parameter Ari_h_red_NQ, Ari_h_red_MQ und Ari_h_red_HQ mit der Anzahl der Stunden zur Reduktion der ARIMA-Korrektur in der Datei <pegel.stm> erforderlich.

Bei Niedrig- bzw. Mittelwasser wird anhand des Quotienten aus dem minimalen und maximalen Wert des gemessenen Abflusses im NQM-Auswertzeitraum (Einzelparameter NQM-AUSWERTEZEIT (H)) ermittelt, ob unbeeinflusste Abflussverhältnisse vorliegen. Liegt der Quotient unterhalb des Werts für den Einzelparameter QMIN/QMAX [%], wird von unbeeinflussten Abflussverhältnissen ausgegangen und die ARIMA-Korrektur wird linear über die durch den pegelspezifischen Parameter Ari_h_red_NQ bzw. Ari_h_red_MQ definierte Anzahl von Stunden auf den Wert Null reduziert.

Dieses Verfahren wird sowohl auf den Betrag bei der absoluten ARIMA-Korrektur als auch auf den Faktor bei der relativen ARIMA-Korrektur angewendet. Soll für einen Pegel in einem bestimmten Abflussbereich überhaupt keine ARIMA-Korrektur vorgenommen werden, ist dem entsprechenden Parameter Ari_h_red_NQ, Ari_h_red_MQ bzw. Ari_h_red_HQ der Wert 0 oder ein Fehlwert (-) zuzuweisen. Soll eine gewöhnliche Korrektur ohne lineare Reduktion durchgeführt werden, ist dagegen der Wert 9999 vorzugeben.

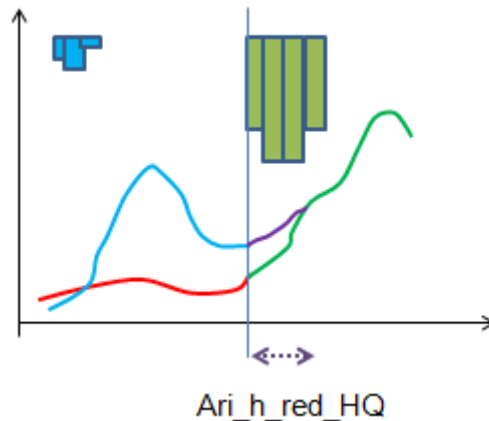


Bild 16: Schematische Darstellung der linearen Reduktion der ARIMA-Korrektur

2.4 Modellnachführung der Schneedecke

Die bisher beschriebenen Modellnachführungen des Wasserdargebots und der Speicherfüllungen sowie die ARIMA-Korrektur erfolgen im operationellen Betrieb von LARSIM automatisch, wenn die entsprechenden Optionen in der Datei <tape10> gesetzt sind.

Darüber hinaus besteht für LARSIM auch die Möglichkeit, eine Nachführung der Angaben zur Schneehöhe oder zum Wasseräquivalent der Schneedecke durchzuführen. Dazu stehen eigenständige Lösungen zur Verfügung, da diese Modellnachführungen nicht standardmäßig im operationellen Betrieb angewandt werden.

Dabei lassen sich zwei Vorgehensweisen unterscheiden:

a) Nachführung der Wasseräquivalente und/oder der Schneehöhe

In der Zustandsdatei sind die von LARSIM berechneten Wasseräquivalente und Schneehöhen für jedes Modellelement und für jede Landnutzung verzeichnet.

Stehen andere Angaben aus Punktmessungen zum Wasseräquivalent und/oder zur Schneehöhe zur Verfügung, können diese mit Kriging-Verfahren auf die Fläche interpoliert und anschließend in die Zustandsdatei übernommen werden.

Mögliche Datenquellen sind z.B. die Messungen des Wasseräquivalents und/oder der Schneehöhe (z.B. NSD-Messungen des DWD) oder die vom DWD berechneten Angaben zum Wasseräquivalent im SNOW-Modell.

Darüber hinaus stehen für Österreich Schneedaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) vor, die verwendet werden können (Schnee-Höhe und Schnee-Wasseräquivalent, 1x1 km). Für die Schweiz und Vorarlberg können Schneedaten des WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) eingelesen werden.

Alternativ können auch aus Satellitendaten die Ausdehnung der schneebedeckten bzw. schneefreien Gebiete übernommen werden. Allerdings sind flächenhaft qualitativ hochwertige Satellitendaten selten verfügbar (keine Daten unter Wolken und in Waldgebieten). Operationell verfügbare und verlässliche Satellitendaten zum Wasseräquivalent der Schneedecke liegen derzeit nicht vor.

Um die Nachführung der Schnee-Wasseräquivalente aus den unterschiedlichen Quellen in der Zustandsdatei umzusetzen, sind eigenständige Programme zur Interpolation und zur Integration der interpolierten Werte in die Zustandsdatei verfügbar.

Bei der Anwendung dieser Programme kann auch Einfluss genommen werden, in welchem Bereich des Modellgebiets und in welcher die Wasseräquivalente wie stark nachgeführt werden sollen. Auch der innere Zustand der Schneedecke bezüglich des Wassergehalts kann dabei räumlich differenziert verändert werden.

b) Nachführung der Grenztemperatur

LARSIM enthält zudem Verfahren zur 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 $+1\text{ °C}$) 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 entsprechenden Nachführungsverfahren wurden im Rahmen des DLR-geförderten Vorhabens InFerno entwickelt (Schulz et al. 2002). Diese Nachführung der Grenztemperatur wird aber bislang nur zu Testzwecken in Baden-Württemberg angewandt.

FRAGEN zu Kapitel 2.2, 2.3 und 2.4:

- 1) Bei der Modellnachführung unterscheidet man zwischen einer Korrektur des Modellinputs, des Systemzustands, des Parametersatzes und des Modelloutputs. Bei der ARIMA-Korrektur handelt es sich um eine Korrektur des -----.
- 2) Damit die ARIMA-Korrektur durchgeführt wird, müssen mindestens diese Voraussetzungen erfüllt sein:
 - a) zum Vorhersagezeitpunkt muss ein gemessener Abflusswert vorliegen.
 - b) zusätzlich zur ARIMA-Korrektur muss auch eine Modellnachführung an dem Pegel durchgeführt werden.
 - c) in der Datei <pegel.stm> muss für den aktuell vorliegenden Abflussbereich eine ARIMA-Korrektur angefordert sein.
 - d) 24 Stunden vor dem Vorhersagezeitpunkt dürfen keine Abflussschwankungen aufgetreten sein.
- 3) Welche der folgenden Aussagen ist richtig?
 - a) Die ARIMA-Korrektur wirkt sich nur am Vorhersagezeitpunkt auf die vorhergesagte Ganglinie aus.
 - b) Die ARIMA-Korrektur empfiehlt sich besonders bei staugeregelten Flüssen.
 - c) Die ARIMA-Korrektur kann im abfallenden Bereich einer Welle dazu führen, dass im Vorhersagezeitraum durch die Verschiebung der vorhergesagten Ganglinie der Abfluss auf $0 \text{ m}^3/\text{s}$ sinkt.
 - d) Durch die ARIMA-Korrektur wird erreicht, dass die gemessene Abflussganglinie und die vorhergesagte Abflussganglinie immer direkt aneinander anschließen.
 - e) Die ARIMA-Korrektur hat keinen Einfluss auf die Zustandsdatei.
- 4) Die Angaben zum Schneewasseräquivalent in der Zustandsdatei können durch externe Programme nachgeführt werden. Dabei können folgende Datenquellen für das Wasseräquivalent des Schnees verwendet werden:
 - a) Wasseräquivalentdaten aus Schneemessungen an Messstationen
 - b) Wasseräquivalentdaten aus Satellitenbildern
 - c) Wasseräquivalentdaten aus dem SNOW-Modell des DWD

LITERATUR

- Evensen G. (1994): Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte-Carlo methods to forecast error statistics. - *Journal of Geophysical Research*, 99(C5) :10143–10162
- Faulwetter R. (2009): Datenassimilation und numerische Wettervorhersage. – Inst. für Meteorologie, Univ. Leipzig
- Honorat M. (2007): Assimilation de données lagrangiennes pour la simulation numérique en hydraulique fluviale. – Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble
- Komma J., Drabek U. & Blöschl G. (2009): Aktuelle Methoden der Hochwasservorhersagen. - *Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage*, 181-212
- Le Dimet F.X., Castaings W., Ngnepieba P. & Vieux B. (2009): Data assimilation in hydrology: variational approach. – In Park S.K. & Xu L. (Eds.): *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic applications*, 367- 405
- LEG (2017): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. LARSIM-Entwicklergemeinschaft – verfügbar unter: <http://larsim.info/fileadmin/files/Dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>
- Rademacher S., Burek P. & Schikowski G. (2009): Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS. - Modellbeschreibung und Benutzerhandbuch. Koblenz (in Vorbereitung)
- Refsgaard J.Ch. (1997): Validation and Intercomparison of Different Updating Procedures for Real-Time Forecasting. - *Nordic Hydrology*, 28:65–84.
- Schröder R. & Lippert K. (2006): Parameternachführung im Hochwasservorhersagemodell Weiße Elster. – « Niederschlag-Abfluss-Modellierung zur Verlängerung des Vorhersagezeitraumes operationeller Wasserstands- und Abflussvorhersagen », Veranstaltungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- 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, 659-668
- WMO - World Meteorological Organization (1992): Simulated real-time intercomparison of hydrological models. - *Technical Report WMO-Publication Nr. 779*.

ANTWORTEN zu Kapitel 1:

- 1) Weswegen kann es erforderlich sein, eine Modellnachführung bei einem Pegel bei der Anwendung eines operationellen Modells durchzuführen?
- a) Ungenaue Abbildung der natürlichen Prozesse innerhalb des Pegeleinzugsgebiets im Modell
 - b) Fehler in der WQ-Beziehung für den Pegel
 - c) Verwechslung der Zeitzonen (UTC, MEZ, MESZ)
 - d) Probleme bei der Messung des Niederschlags im Pegeleinzugsgebiet

Richtige Antworten: a, b & d. Bei Zeitzonenverwechslung kann die Modellnachführung nicht helfen.

- 2) Anstelle des Begriffs „Modellnachführung“ werden auch andere Begriffe verwendet. Welche?
- a) Modelljustierung
 - b) Modellassimilation
 - c) Modelloptimierung
 - d) Datenassimilation

Richtige Antworten: c & d.

- 3) Für die Nachführung des hydrologischen Modells wird ein Vergleich des simulierten Abflussvolumens mit dem *gemessenen* Abflussvolumen im Auswertzeitraum pro Pegel durchgeführt.
- 4) Die Modellnachführung kann an verschiedenen Bereichen des Modellierungsprozess durchgeführt werden. Welche prinzipiellen Möglichkeiten zur Modellnachführung bestehen?
- a) Veränderung der gemessenen Abflussdaten
 - b) Anpassung der in der Zustandsdatei gespeicherten Information zu den Ausgangsbedingungen im Gebiet
 - c) Veränderung der gemessenen Eingangsdaten in das Modell
 - d) Wechsel des Rechners
 - e) Modifikation der berechneten Ergebnisse des Modells

f) Anpassung der modellinternen Parameter

g) Nachführung der vorhergesagten Niederschläge

Richtige Antworten: b, c, e & f.

5) Die Modellnachführung durch Veränderung der Eingangsdaten wird in LARSIM durch eine Veränderung des *Wasserdargebots* umgesetzt. Dieses ergibt sich aus der Summe der Wassermenge aus *Niederschlag* und ggf. *Schneesmelze*.

6) In der Zustandsdatei von LARSIM sind die modellinternen Zustände und Werte auf folgender Skala abgelegt:

a) für jedes Einzugsgebiet

b) für jedes Modellelement

c) für jede Landnutzungsklasse innerhalb einer Modellelements

d) für jeden Quadratzentimeter des Modells

Richtige Antworten: b & c.

7) In LARSIM erfolgt im operationellen Betrieb *keine* Modellnachführung der Modellparameter an Hand der gemessenen Abflüsse.

ANTWORTEN zu Kapitel 2.1:

1) Angenommen, das Programm LARSIM führt das Wasserdargebot nach, um die Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Ganglinien zu verringern. In welchem Zeitraum wird das Wasserdargebot nachgeführt?

a) Auswertezeitraum

b) Simulationszeitraum

c) Vorhersagezeitraum

Richtige Antwort: b.

2) Die Modellnachführung wird nur dann umgesetzt, wenn folgende Punkte erfüllt sind:

a) Der Pegel muss einen Oberliegerpegel haben.

b) Der gemessene Abfluss im Vorhersagezeitraum befindet sich in einem Abflussbereich, für den am Pegel eine Modellnachführung gewünscht wird.

c) Für den Pegel ist in der <pegel.stm> nicht generell ausgeschlossen, dass eine Modellnachführung durchgeführt werden soll.

d) Die auftretende Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Auswertezeitraum ist größer als die maximal zulässige Abweichung.

e) Im Auswertezeitraum erreicht ein gemessener Abflusswert den Abflussbereich, für den die Durchführung der Modellnachführung laut der Datei <pegel.stm> aktiviert ist.

Richtige Antworten: c, d & e.

3) Der Simulationszeitraum umfasst mindestens einen Zeitraum von 48 Stunden.

4) Die Modellnachführung der Gebietsspeicher erfolgt im Hochwasserbereich nur, wenn

a) bereits eine Modellnachführung des Wasserdargebots erfolgt ist.

b) der Basisabflussanteil größer als 90% ist.

c) die extrem hohen und niedrigen Faktoren der Variation des Wasserdargebots (10 und 0,0001) keine Annäherung der simulierten Ganglinie an die gemessene Ganglinie erzielt haben.

d) bei der Variation des Wasserdargebots der maximale und minimale Faktor von 0,5 und 1,5 erreicht wurde.

Richtige Antwort: c.

ANTWORTEN zu Kapitel 2.2, 2.3 und 2.4:

1) Bei der Modellnachführung unterscheidet man zwischen einer Korrektur des Modellinputs, des Systemzustands, des Parametersatzes und des Modelloutputs. Bei der ARIMA-Korrektur handelt es sich um eine Korrektur des *Modelloutputs*.

2) Damit die ARIMA-Korrektur durchgeführt wird, müssen mindestens diese Voraussetzungen erfüllt sein:

a) zum Vorhersagezeitpunkt muss ein gemessener Abflusswert vorliegen.

b) zusätzlich zur ARIMA-Korrektur muss auch eine Modellnachführung an dem Pegel durchgeführt werden.

c) in der Datei <pegel.stm> muss für den aktuell vorliegenden Abflussbereich eine ARIMA-Korrektur angefordert sein.

d) 24 Stunden vor dem Vorhersagezeitpunkt dürfen keine Abflussschwankungen aufgetreten sein.

Richtige Antwort: c.

- 3) Welche der folgenden Aussagen ist richtig?
- a) Die ARIMA-Korrektur wirkt sich nur am Vorhersagezeitpunkt auf die vorhergesagte Ganglinie aus.
 - b) Die ARIMA-Korrektur empfiehlt sich besonders bei staugeregelten Flüssen.
 - c) Die ARIMA-Korrektur kann im abfallenden Bereich einer Welle dazu führen, dass im Vorhersagezeitraum durch die Verschiebung der vorhergesagten Ganglinie der Abfluss auf $0 \text{ m}^3/\text{s}$ sinkt.
 - d) Durch die ARIMA-Korrektur wird erreicht, dass die gemessene Abflussganglinie und die vorhergesagte Abflussganglinie direkt aneinander anschließen.
 - e) Die ARIMA-Korrektur hat keinen Einfluss auf die Zustandsdatei.

Richtige Antwort: e.

- 4) Die Angaben zum Schneewasseräquivalent in der Zustandsdatei können durch externe Programme nachgeführt werden. Dabei können folgende Datenquellen für das Wasseräquivalent des Schnees verwendet werden:
- a) Wasseräquivalentdaten aus Schneemessungen an Messstationen
 - b) Wasseräquivalentdaten aus Satellitenbildern
 - c) Wasseräquivalentdaten aus dem SNOW-Modell des DWD

Richtige Antworten: a & c.