

NW-Vorhersage für die Donau mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Exposé für die IÖB-Challenge der viadonau:
„Niederwasserprognose für die Schifffahrt auf der österreichischen Donau – aktuell, präzise und zuverlässig“

April 2020

1. Referenzen und Unternehmensstruktur

Die HYDRON GmbH ist eine Ingenieurgesellschaft, die vielseitige wasserwirtschaftliche Fragestellungen im Auftrag öffentlicher und privater Kunden bearbeitet. Der Arbeitsschwerpunkt des Büros liegt in der Entwicklung und Anwendung hydrologischer Modelle, die unter anderem zur Abflussvorhersage sowie für Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel genutzt werden.

Ein zentraler Bestandteil der Arbeit ist das Wasserhaushaltsmodell (WHM) LARSIM. LARSIM wird von HYDRON im Auftrag der LARSIM-Entwicklergemeinschaft (einem Zusammenschluss vier deutscher Landesbehörden und dem Bundesamt für Umwelt der Schweiz) kontinuierlich erweitert (www.larsim.info). Mehrere deutsche und ausländische Vorhersagezentralen werden von HYDRON bei Implementierung, Betrieb und Anpassung der Modelle unterstützt. Darüber hinaus werden in enger Zusammenarbeit mit den Kunden spezifische Modelle und Programme, Auswertungs-Tools und Benutzeroberflächen entwickelt.

Folgende Auswahl von Referenzprojekten mit Schwerpunkt auf Aufbau, Betrieb, Support und Weiterentwicklung hydrologischer Modelle für kurz- und längerfristige Vorhersagen zeigen das Spektrum der in den letzten Jahren erfolgten Bearbeitungen:

Aufbau und Kalibrierung hydrologischer Modelle

- **Erstellung eines Wasserhaushaltsmodells Donau mit Paar, Altmühl und Naab (Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern)), Laufzeit 2018**
 - Aufstellung eines LARSIM WHM für den Donauabschnitt zwischen Donauwörth und Regensburg (ohne Lech) mit Überarbeitung der WHM Altmühl und Naab
 - Berücksichtigung gebietsspezifischer Besonderheiten (z.B. Bauwerke, Steuerungen)
 - Modellkalibrierung und -validierung
 - Durchführung von Vorhersagetests

Im Bereich der LARSIM-Modellaufstellung und -überarbeitung wurden in den letzten Jahren zahlreiche weitere Projekte durchgeführt (z.B. Bregenzerach, Ill, Isel und Drau (Osttirol), Lech, Main, Nordrhein-Westfalen (Rur, Sieg, Ruhr, Werre...), Baden-Württemberg (Neckar, Obere Donau, ...)).

Unterstützung des operationellen Modellbetriebs

- **Unterstützung beim operationellen Modellbetrieb der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale (HVZ) Baden-Württemberg (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Laufzeit 2016-2019)**
Niedrigwasservorhersagen:
 - Wartung und Unterstützung beim operationellen Vorhersagebetrieb der LARSIM WHM der HVZ samt Spezialmodelle wie u.a. Langfristvorhersagemodelle zur Niedrigwasserprognose
 - Erstellung und Weiterentwicklung des Niedrigwassermanagement-Tools für Neckar und Rhein (Python, Java, HTML, JavaScript) mit Pflege des GIT Repository

Modellanalyse und -weiterentwicklungen:

- Optimierung des automatisierten Vorhersagesystems der HVZ
- Analyse abgelaufener Ereignisse (Hoch- und Niedrigwasser) und Weiterentwicklung
- Analyse und Optimierung der Datenflüsse im operationellen Betrieb
- Integration zusätzlicher Mess- und Vorhersagedaten

Programmierung und Visualisierung:

- Konzeptionelle Weiterentwicklungen und Programmierungen von LARSIM
- Verbesserung der Schneeoptimierung im Modell
- Anpassungen und Weiterentwicklungen von Visualisierungstools, Prä- und Postprozessoren

- Automatisierter Datenaustausch mit benachbarten Vorhersagezentralen
- Entwicklung der HVZ-Oberfläche „Pegeldurchsicht“ (u.a. Programmierung in JavaScript, PHP)

Modellverbesserungen:

- Verbesserung von Vorhersagemodellen (Kalibrierungen, Floodrouting, Kläranlagen)
 - Integration neuer und zusätzlicher meteorologischer Vorhersagen
 - Analyse der Wirkung von Dammrückverlegungen (Variation von dV/dQ-Beziehungen)
- **Unterstützung bei der Anwendung und Weiterentwicklung der operationellen Abflussvorhersagemodelle (Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP), Laufzeit 2019-2020)**
 - Weiterentwicklung des LARSIM-Quellcodes im Hinblick auf die operationelle Abflussvorhersage
 - Analyse, Beratung und technische Unterstützung bei der Anpassung der Modellumgebung im Hinblick auf den Einsatz von LARSIM in der operationellen Abflussvorhersage
 - Unterstützung der Vorhersagezentralen im Moseleinzugsgebiet (inkl. Luxemburg und Grand Est)
 - Beratungsleistungen während operationeller Einsätze des LfU RLP
 - Installation, Wartung und Betrieb der operationellen LARSIM-Modelle bei HYDRON als Redundanz-System des LfU RP (24h/7Tage online System)
 - **Weiterentwicklung und Betreuung der operationellen Abflussvorhersagemodelle für Vorarlberg (Amt der Vorarlberger Landesregierung (AVLR)), Laufzeit 2019-2020**
 - Anpassungen an Weiterentwicklungen der Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie der Mittelfristvorhersage des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) für die Abflussvorhersage
 - Installation, Wartung und Betrieb der operationellen LARSIM-Modelle bei HYDRON als Redundanz-System für das AVLR (24h/7Tage online System)
 - Aktualisierung der Programmoberfläche
 - Beratung und Weiterbildung (Schulungen)

Neben dem operationellen Betrieb werden die LARSIM-Modelle auch für zahlreiche andere wasserwirtschaftliche Fragestellungen eingesetzt. So wurden zahlreiche Projekte durchgeführt unter Verwendung von langen Zeitreihen aus Klimaprojektionen als Eingabedaten in WHM zur Abschätzung der Wirkung des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft (inkl. Niedrigwasser) (z.B. für das 69.000 km² große Rhein-Einzugsgebiet bis Worms). HYDRON hat LARSIM z.B. im Auftrag des LfU Bayern auch eingesetzt, um zu vergleichen, wie sich kleine dezentrale Maßnahmen und große zentrale Flutpolder auf die Abflüsse in der bayerischen Donau auswirken.

Kundenbetreuung und 24/7 online Systeme

Das zentrale Arbeitsgebiet der HYDRON GmbH ist die hydrologische Modellierung, was alle Arbeiten von der Erstellung und Entwicklung der Modelle bis zu deren operationellen Betrieb umfasst. Für mehrere Flussgebiete betreibt HYDRON selbst operationelle Abflussvorhersage-Modelle als 24/7 Client-Server-System.

HYDRON hat seit Jahren stabile und bewährte Kundenbeziehungen zu mehreren staatlichen Abflussvorhersagezentralen in Deutschland, Österreich, Frankreich, Luxemburg und der Schweiz. Die Kunden werden in der operationellen Modellanwendung bei Bedarf unterstützt. Dies erfolgt bei HYDRON durch feste Ansprechpartner, die erfahrene Hydrologen sind und sich in den jeweiligen Modellgebieten sehr gut auskennen (immer zusammen mit einem weiteren Mitarbeiter zur Redundanz). Durch diese personalisierte Betreuung erreicht die HYDRON mit ihren 15 akademischen Mitarbeitern hohe Qualitätsstandards und eine sehr gute Kundenzufriedenheit.

2. Niederwasserprognose - Produktbeschreibung und Zugang

Ziel ist die Erstellung einer zuverlässigen Niedrigwasservorhersage (Abfluss und Wasserstand) für die beiden schifffahrtsrelevanten Pegel Kienstock und Wildungsmauer (Fläche des Untersuchungsgebiets: ca. 104.000 km²). Eine Erwartungshaltung an die Prognosegenauigkeit der Niedrigwasservorhersage an diesen beiden Pegeln zu formulieren ist ohne Kalibrierung des WHM Donau nicht möglich. Nach Kalibrierung wird dieser Wert als hydrologische Modellunsicherheit in Abhängigkeit vom Vorhersagehorizont als Quantile der Abweichungen angegeben. Die Prognosegenauigkeit wird zudem von der meteorologischen Modellunsicherheit deutlich beeinflusst, die wiederum situationsabhängig ist. Als Beispiel für die Erwartungshaltung wird die Prognosegenauigkeit für den Pegel Achleiten/Donau (EZG-Fläche ca. 76.000 km²) angegeben, dessen Vorhersagen vom LfU Bayern mit LARSIM-Modellen berechnet wird. Dort beträgt die Gesamtunsicherheit aus hydrologischer und meteorologischer Modellunsicherheit für die 4-Tages-Vorhersage bei Niedrigwasser nach Angaben des HND weniger als $\pm 20\%$ (für das 10%- und 90%-Perzentil).

Für die verbesserte Niedrigwasserprognose an den schifffahrtsrelevanten Pegeln der viadonau wird mit LARSIM ein neues Modell aufgebaut. Mit dem Modell wird zum einen eine möglichst exakte deterministische Fünf-Tages-Vorhersage (mit Angabe der Unsicherheitsbänder) erstellt. Für einen Zeitraum von fünf Tagen werden die Meteo-Vorhersagen als ausreichend zuverlässig eingeschätzt. Zum anderen werden probabilistische Vorhersagen für den mittelfristigen (9 Tage) und den langfristigen Zeithorizont (6 Wochen) bereitgestellt. Die Vorhersagen ergeben sich aus dem Zusammenführen bestehender Modelle mit dem neuen Modell und weiteren Meteovorhersagen. Durch die Verwendung dieses Modellensembles verschiedener hydrologischen und meteorologischen Vorhersagen lassen sich Vorhersagen erstellen, die auf verschiedenen unabhängigen Datenquellen beruhen. Durch den Ansatz wird die Vorhersageunsicherheit, die bei Vorhersagen immer vorliegt, operationell quantifiziert und den Nutzern in transparenter Form zur Verfügung gestellt. Schifffahrtstreibende können so unter Abschätzung des Risikos besser kurz-, mittel- und langfristig planen. Folgende Modelle sollen dafür operationell von HYDRON genutzt und ausgewertet werden:

Hydrologische Modelle

1. Modell WHM Donau: HYDRON bietet den Aufbau und den Betrieb eines neuen LARSIM-Wasserhaushaltsmodell für das Donaeinzugsgebiet bis zum Pegel Wildungsmauer an (WHM Donau). Der Modellaufbau erfolgt anhand einer Unterteilung des Untersuchungsgebiets in Teilgebiete (TGB), die auf realen hydrologischen Einzugsgebieten basieren. Dabei ist für das WHM Donau eine mittlere TGB-Flächengröße von 15 km² bis 20 km² vorgesehen. Dieses TGB werden wiederum in hydrologisch ähnlich reagierende Hydrotöpfe differenziert, die z.B. die Landnutzung, die Bodeneigenschaften und die Versiegelung berücksichtigen. Die Berechnung der für Niedrigwasser relevanten hydrologischen Prozesse (z.B. Abflussbildung, Schneeschmelze) erfolgt in der räumlich sehr hohen Auflösung dieser Hydrotöpfe.

Für die Modellierung des Wiederanstiegs der Niedrigwasserabflüsse nach Trockenzeiten ist die realistische Abbildung des Bodenspeichers und des Bodenwassergehalts wichtig. Diese Berechnung erfolgt in der räumlich hohen Auflösung der Hydrotöpfe. Bereits durchgeführte Datenrecherchen bei der LUBW, dem LfU Bayern, dem Bundesamt für Wasserwirtschaft und dem Land Niederösterreich zeigen, dass die erforderlichen Bodendaten für das Projekt verfügbar sind.

Für die genaue Modellierung des Bodenwassergehalts ist auch ein präzises Verfahren zur Verdunstungsberechnung erforderlich. Hier wird in LARSIM das Penman-Monteith-Verfahren eingesetzt, das eine korrekte physikalische Berechnung der Verdunstung ermöglicht. Um dieses

zuverlässige und präzise Verfahren zu verwenden, werden neben Niederschlag und Temperatur auch Werte zur Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, relative Feuchte und Luftdruck benötigt.

Auch die Schneedynamik kann für Niedrigwasser relevant sein. Diese wird in LARSIM ebenfalls räumlich hoch aufgelöst mit sogenannten Schnee-Kompartimenten modelliert. Dabei werden Energiebilanz und Schneesetzung detailliert simuliert, wobei Höhenlage, Hangexposition und Hangneigung räumlich hoch aufgelöst berücksichtigt werden. Durch die zahlreichen Anwendungen des Modells im alpinen und voralpinen Gebieten ist die Schneemodellierung in LARSIM sehr ausgereift. Zudem ist eine operationelle Nachführung mit gemessenen Schneedaten möglich.

Analysen für das Rhein-Einzugsgebiet, die im Rahmen einer KHR-Studie gemeinsam von HYDRON und den Universitäten Zürich und Freiburg durchgeführt wurden, zeigen, dass in sommerlichen Trockenzeiten auch bei minimalem Gletscheranteil im Einzugsgebiet relevante Abflussanteile aus der Eisschmelze der Gletscher stammen können. Trotz des geringen Flächenanteils der Gletscher im Untersuchungsgebiet von 0,3% ist der Einfluss von Gletschern daher nicht zu vernachlässigen. Mit LARSIM kann auch die Abflussreaktion der Gletscherflächen zuverlässig abgebildet werden.

Die physikalisch-basierte Modellierung in LARSIM ermöglicht es, dass auch unter klimatisch veränderten Bedingungen, die bislang noch nie im Gebiet beobachtet wurden, korrekt simuliert bzw. extrapoliert wird. Während datenbasierte Modelle nur bereits beobachtete Zustände wiedergeben können und regelmäßig neu trainiert werden müssen, reagiert das deterministische Modell LARSIM auch auf veränderte Randbedingungen richtig. Für Fragestellungen des Klimawandels wird LARSIM bereits seit Jahren erfolgreich bei HYDRON eingesetzt. Zukünftige Veränderungen z.B. eine zunehmende Versiegelung können in LARSIM leicht berücksichtigt werden.

Die Kalibrierung der Modellparameter des WHM Donau soll anhand von ca. 30 relevanten Pegeln im Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 2003 bis 2019 erfolgen. Dabei wird ein Schwerpunkt auf die Niedrigwasserjahre und deren Kalibrierung gelegt. Es wird eine manuelle Kalibrierung durchgeführt, um die langjährige Erfahrung des HYDRON-Teams bei der optimalen Modellparameterwahl zu nutzen.

Nach Abschluss der Kalibrierung wird die Modellqualität durch umfangreiche VHS-Tests mit der operationellen Modellumgebung des WHM Donau analysiert. Dadurch können die maßgebenden Prozesse genauer identifiziert und die Parametrisierung iterativ weiter optimiert werden, um die bestmögliche Niedrigwasser-VHS zu erzielen. Dabei werden bei den VHS-Tests auch die Einstellungen für die Datenassimilation und Fehlerkorrekturverfahren (operationelle Modellnachführung) und für die Verwendung operativer Pegel-Messdaten optimiert. So kann LARSIM an Pegeln, deren Abflüsse deutlich durch den Schwellbetrieb eines Wasserkraftwerks beeinflusst sind, im Rahmen der operationellen Vorhersage die Schwingung der Abflüsse sowie den Trend einer mehrwöchigen Messung auf die Abflussvorhersage übertragen. Derzeit werden die Verfahren zur Datenassimilation in LARSIM insbesondere für den NW-Bereich von HYDRON weiter verbessert.

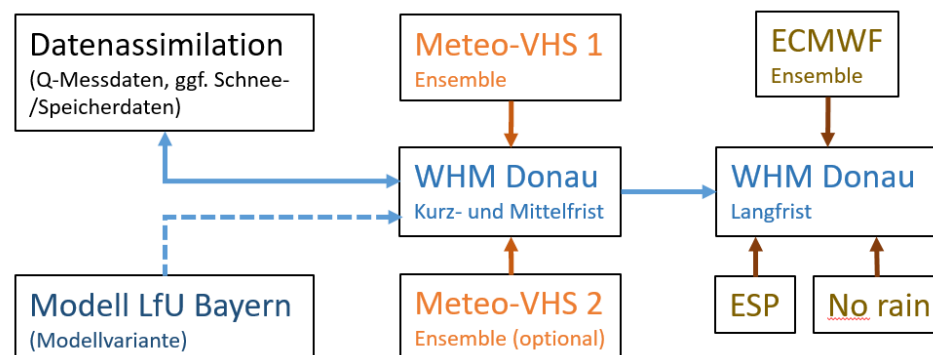
2. Modell LfU Bayern: Das LfU Bayern betreibt LARSIM-Modelle in 1 km²-Auflösung operationell und erstellt Vorhersagen mit einem VHS-Horizont von sieben Tagen mit einem meteorologischen Ensemble. Die Modellergebnisse für den Donaupegel Achleiten nach der Illmündung werden bereits dem Land Oberösterreich bereitgestellt. Eine Anfrage an das LfU hat ergeben, dass eine Bereitstellung an die viadonau über das Projekt DarEffort oder ggf. direkt erfolgen kann. Diese Ergebnisse, in denen auch detailliert die Wirkung der Speicher und Seen abgebildet sind, sollen als Berechnungsvariante in das WHM Donau übernommen werden. Damit kann in kritischen Phasen

auf ein weiteres hydrologisches Modell zurückgegriffen werden. Mit Hilfe der Experteneinschätzung durch HYDRON, unterstützt durch automatisierte Verfahren, kann das in der jeweiligen Situation zuverlässigere Modell für die Vorhersage genutzt werden.

Derzeit verwendet viadonau das hydrologische Modell der TU Wien. Dieses Modell soll zunächst weitergeführt werden, um zu überprüfen, ob das WHM Donau wirklich präziser und zuverlässiger ist. Aus der Analyse des bisherigen Modells können auch Stärken und Schwächen identifiziert werden, um für die Modell-Verbesserung die relevanten Prozesse zu kennen. Das aktuelle viadonau Modell kann ggf. auch bei HYDRON betrieben werden.

Alle drei hydrologischen Modelle werden in Stundenzeitschritten betrieben, um jeweils immer aktuelle Meteo- und Abfluss-Messdaten und meteorologische Vorhersagen verwenden zu können.

Operationelles
Modellschema:



Messdaten sowie kurz- und mittelfristige meteorologische Vorhersagen

Für die Modellaufstellung und den Betrieb sind meteorologische Mess- und Vorhersagedaten erforderlich. Daher hat HYDRON bereits Kontakt zu mehreren Wetter-Dienstleistern aufgenommen, von denen zwei ausgewählt wurden, die qualitativ hochwertige Mess- und Vorhersagedaten bereitstellen:

- Ein Wetterdienstleister wird die gemessenen Meteodaten für das Untersuchungsgebiet für die Kalibrierungszeitraum und den operationellen Betrieb bereitstellen. Zudem gerasterte Schneedaten, um die Schneekalibrierung des WHM Donau zu verifizieren. Operationell werden diese Schneedaten als komplementäre Datenquelle auch zur Nachführung der modellierten Schneedecke genutzt. Für den operationellen Betrieb des WHM Donau wird eine meteorologische 9 Tages-Vorhersage (Ensemble mit 17 Member) bereitgestellt (5 km²-Raster). LARSIM-Modelle für Vorarlberg und Tirol werden mit Vorhersagen des Wetterdienstleisters bereits erfolgreich eingesetzt.
- Optional können die 9-Tages-Vorhersagen eines weiteren Wetterdienstleisters hinzuzogen werden, dessen Daten ebenfalls bereits operationell in LARSIM-Modellen genutzt werden. Dadurch kann das ausgewertete Ensemble vergrößert und somit die Unsicherheiten der Vorhersagen besser eingeschätzt werden.

Langfristige meteorologische Vorhersagen

Für die Schifffahrtstreibende sind über den deterministischen Vorhersagezeitraum hinaus auch langfristige Abschätzungen wichtig wie z.B. wann tritt frühestens eine Über-/Unterschreitung bestimmter Schwellenwerte auf und wie wahrscheinlich ist dieses Ereignis. Um dies abzuschätzen, sollen mit dem WHM Donau Vorhersagen erstellt werden, die auf drei Datenquellen basieren:

- Das ECMWF erstellt eine 46 Tage-VHS, die zweimal wöchentlich aktualisiert wird (ECMWF-ENS extended). Für die in dieser VHS nicht zur Verfügung stehenden Variablen wird im WHM Donau ein mittleres klimatisches Verhalten (ermittelt aus zurückliegenden Messwerten) angenommen.

- Ensemble Streamflow prediction (ESP): Beim ESP-Ansatz wird der aktuelle hydrologische Zustand des WHM Donau mit einem Ensemble aus gemessenen meteorologischen Werten der Vergangenheit angetrieben, wie z.B. mehreren Niedrigwasserjahren. Diese werden alle als Vorhersagen verstanden und damit das Modell angetrieben.
- No-Rain-Ansatz: Es wird ein Modelllauf unter der Annahme keines Niederschlags und klimatischer Verhältnisse eines warmen Jahres gemacht.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde erstellt mit Hilfe des LARSIM-ME-Modells bereits 6-Wochen-Niedrigwasserprognosen im präoperationellen Betrieb unter Verwendung der ECMWF ENS extended-Vorhersagen und der ESP, um Wasserstraßennutzern einen deutlich verlängerten Planungshorizont bis zu sechs Wochen zu ermöglichen. Die HVZ Baden-Württemberg berechnet No-Rain-Szenarien und ESP-Langfristvorhersagen im operationellen Betrieb mit LARSIM.

Aufgrund der Unsicherheiten sollen mit diesen langfristigen Vorhersagen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen abgeleitet werden: z.B. wann wird der kritische Wasserstand unter pessimistischen Annahmen frühestens unterschritten oder wie wahrscheinlich ist die Unter-/Überschreitung bestimmter Wasserstände auf Wochenbasis.

Modellumsetzung

Das WHM Donau wird von HYDRON als Client-Server-System redundant mit einem 24/7 Support für die technische Lauffähigkeit aufgestellt. Verschiedene service level werden für den inhaltlichen Support angeboten.

Der operationelle Betrieb des WHM Donau erfolgt bei HYDRON unter Einbeziehung der meteorologischen Messdaten und Vorhersagen. Die Vorhersagen des LfU Bayern für den Pegel Achleiten/Donau werden an HYDRON übertragen, ebenso wie die Vorhersagen des aktuellen viadonau-Modells. Die dann ausgewerteten Vorhersagen (mit Unsicherheiten und Wahrscheinlichkeiten) werden wiederum an die viadonau zurückgespielt. Die aktuelle Modellumgebung der viadonau arbeitet mit FEWS, welches ebenfalls für LARSIM genutzt werden kann, ein entsprechender Modelladapter wurde von HYDRON programmiert.

Im ersten Schritt ist geplant, dass bei Schifffahrtstreibenden bekannte viadonau Portal DoRIS für die Veröffentlichung der WHM Donau-Ergebnisse weiter zu nutzen. In Zusammenarbeit mit der viadonau sind Erweiterungen des Angebots in DoRIS zur benutzerfreundlichen und kundenorientierten Optimierung der Darstellung umsetzbar. Mittelfristig besteht auch die Option, eine angepasste Plattform bei HYDRON zu entwickeln (interaktive Web-Anwendung). Diese könnte auch als App aufgebaut werden, um z.B. den Schifffahrtstreibenden die Vorhersagen unter Einbeziehung ihrer geplanten Tonnage und Schiffstyp und somit Abladetiefe direkt zur Verfügung zu stellen.

Herausforderung

Die für Niedrigwasser maßgeblichen Einflussfaktoren und Prozesse müssen identifiziert, bestmöglich parametrisiert und soweit möglich physikalisch basiert simuliert werden, sodass auch unter veränderten (bislang nicht beobachteten) Bedingungen zuverlässige Vorhersagen erstellt werden. Neben dem Auslaufverhalten der Grundwasserspeicher kommen der Kraftwerksbetrieb, die Schnee- und Gletscherschmelze, Seewasserstände (vor allem in Bayern) sowie das Verhalten der Bodenspeicher nach dem Ende von Trockenphasen als potentiell maßgebliche Einflüsse in Betracht. Für all diese Einflussfaktoren stehen in LARSIM geeignete, variabel einsetzbare, weitgehend physikalische Simulationsmodule sowie Möglichkeiten zur Assimilation operativer Messdaten zur Verfügung.