BfG-1877

Bericht

Parameter- und Modellstrukturunsicherheit von HBV96 in der operationellen Rheinvorhersage – Analysen und Verbesserungsvorschläge

Autoren:
Dipl.-Umweltwiss. Christoph Tyralla
Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Schumann

Januar 2016

Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde
SAP-Nr.: M39610204022
Anzahl der Seiten: 88

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik
Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Schumann

Impressum

Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: +49 (0)261 1306 0
Fax: +49 (0)261 1306 5302
E-Mail: posteingang@bafg.de
Internet: http://www.bafg.de

DOI: 10.5675/BfG-1877
URL: http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1877.pdf

Zitiervorschlag:
TYRALLA, C., SCHUMANN, A. (2016): Parameter- und Modellstrukturunsicherheit von HBV96 in der operationellen Rheinvorhersage – Analysen und Verbesserungsvorschläge, BfG-Bericht 1877, 88 Seiten, Koblenz, doi: 10.5675/BfG-1877.

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel- und Fragestellungen 5

2 Parameter- und Modellstrukturunsicherheit 7

3 Daten und Methoden 11

3.1 Modellframework HydPy 11

3.2 Meteorologische und hydrologische Zeitreihen 12

3.3 Untersuchungsgebiete 13

3.4 Zeiträume und Anfangsbedingungen 16

3.5 Extremereignisse 16

3.6 Kalibrierstrategie 19

3.7 Gütekriterien 20

3.7.1 Kalibrierkriterien 20

3.7.2 Validierkriterien 22

4 Analyse Ist-Zustand 24

4.1 Kurzcharakterisierung HBV96 24

4.2 Simulationsgüte der operationellen HBV-Parametrisierung 26

4.3 Neukalibrierung 30

4.3.1 Versuchsspezifikationen 30

4.3.2 Analyse 32

5 Untersuchungen zur Prozessabstraktion 42

5.1 Basisabfluss 42

5.1.1 Versuchsspezifikationen 42

5.1.2 Analyse 43

5.2 Sättigungsflächen-Ansatz 45

5.2.1 Diskussion von Abflussbildung und –konzentration nach HBV96 45

5.2.2 Alternativer Ansatz 49

5.2.3 Versuchsspezifikationen 52

5.2.4 Analyse 52

5.3 Anzahl der Abflusskomponenten 57

5.3.1 Vergleich HydPy-H mit HydPy-HL 57

5.3.2 Versuchsspezifikationen 59

5.3.3 Analyse 61

6 Regularisierung unstetiger Differenzialgleichungen 66

6.1 Versuchsspezifikationen 66

6.2 Analyse 67

7 Quantifizierung der Modellunsicherheit 72

7.1 Versuchsspezifikationen 73

7.2 Analyse 74

8 Zusammenfassung und Ausblick 81

8.1 Ergebnisse 81

8.2 Empfehlungen 83

Literaturverzeichnis 84

1 Ziel- und Fragestellungen

Eine Aufgabe der Bundesanstalt für Gewässerkunde ist die Veröffentlichung schifffahrtsrelevanter Wasserstandsvorhersagen. Für die Bundeswasserstraße Rhein werden aktuell (Stand: Ende 2015) die hierfür notwendigen Berechnungen durch Kopplung des hydrologischen Modells HBV (Bergström 1995) mit dem hydrodynamischen Modell SOBEK (Deltares 2015) durchgeführt. Auf der Grundlage synoptischer Wetterdaten simuliert HBV die Zuflüsse großer Flussgebiete, welche SOBEK zur Simulation des Wasserstands an ausgewählten Pegeln des Rheins benötigt.

Im Rahmen des von der BfG initiierten und vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojektes "Seamless Prediction – Quantifizierung und Reduktion von Unsicherheiten durch Datenassimilation und Ensembletechniken für Kurz-, Mittel- und Langfristvorhersagen der BfG" wurden in der Projektlaufzeit von 2012 bis 2014 im Rahmen des Teilprojektes 5 „Hydrologische Modellunsicherheit“ am Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum als „Seamless Prediction“-Projektpartner die hydrologischen Simulationsunsicherheiten im Vorhersagesystem quantifiziert und – soweit möglich – reduziert. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Modellunsicherheit und der damit eng verknüpften Parameterunsicherheit.

Entsprechend seiner Verwendung im operationellen Dienst der BfG ist HBV der primäre Untersuchungsgegenstand dieses Berichts. Der Begriff „operationelles HBV-Modell“ bezieht sich im Folgenden auf die aktuell von der BfG für das Rheingebiet eingesetzte HBV-Implementierung samt aller Spezifikationen hinsichtlich der räumlichen Gliederung, der Parametrisierung, der verwendeten Eingangsdaten usw. Als Vergleichsmodell wird das von der BfG im Bereich der Klimafolgenforschung (BMVI 2015) eingesetzte hydrologische Modell LARSIM (Bremicker 2000) herangezogen.

Im Fokus stehen Abflussbildungs- und Abflusskonzentrations-Prozesse. Die temperaturbasierte Berechnung der potenziellen Verdunstung von HBV wurde bereits in SMHI (2009) einer Überprüfung unterzogen und erscheint für Abflussvorhersagen, in denen Korrekturverfahren langfristige Bilanzfehler ausgleichen, tendenziell weniger relevant. Das HBV-Verfahren zur Wellenablauf-Berechnung kommt im operationellen HBV-Modell der BfG nur innerhalb der Rhein-Zuflussgebiete zum Einsatz. Dennoch sind hier aufgrund der Einfachheit des HBV-Ansatzes Verbesserungspotenziale zu vermuten. Für entsprechende, zukünftige Untersuchungen wurden notwendige modelltechnische Voraussetzungen geschaffen (siehe Abschnitt 3.1).

Die Modellevaluierung und -optimierung ist mit Blick auf die erarbeiteten Methoden der „Seamless Prediction“-Teilprojekte zur Datenassimilation (Lisniak et al. 2014) und probabilistischen Bewertung von Vorhersagen (Klein et al. 2015) strukturiert. Der Erfolg der darin getesteten Nachführungs- und Ensemble-Methoden steht in Abhängigkeit zu den Struktur- und Parameterspezifikationen des zugrundeliegenden hydrologischen Modells bzw. der zugrundeliegenden hydrologischen Modelle. Entsprechend bestehen Synergiepotenziale hinsichtlich der Optimierung des operationellen Betriebs, die es zukünftig bestmöglich auszuschöpfen gilt.

Der Schwerpunkt des Seamless Prediction-Teilprojekts „Hydrologische Modellunsicherheit“ liegt im Methodischen. Mit der Bereitstellung des hydrologischen Modellframeworks HydPy und der Implementierung der genannten Modelle darin (Tyralla und Schumann 2013) wird der BfG zudem die Möglichkeit eröffnet, weitere inhaltliche Fragestellungen oder Optimierungen im Modellsystem schnell und flexibel anzugehen. Im Projekt wurden zahlreiche Änderungen der Modellstruktur von HBV und im Umgang mit HBV erwogen, deren Umsetzung im Folgenden erläutert und deren potenzieller Nutzen exemplarisch an drei Flussgebieten veranschaulicht wird. Durch Bereitstellung aller verwendeten Software-Tools kann die BfG zukünftig die für das jeweilige Flussgebiet geeignet erscheinende Methodenkombination eigenständig umsetzen.

Die wichtigsten verfolgten Fragestellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ist HBV als klassisches Wasserhaushaltsmodell die geeignete Wahl für stundenwertbasierte Rhein-Wasserstandsvorhersagen?
- Geht der optionale HBV-Sättigungsflächenansatz (Bergström et al. 1997) mit einer signifikanten Verringerung der Simulationsunsicherheit einher?
- Lassen sich die mit dem Sättigungsflächenansatz erzielten Effekte auf inhaltlich plausiblere und methodisch einfachere Weise umsetzen?
- Bewirkt die Einführung eines Nichtlinearität-Parameters in die Berechnung des Basisabflusses eine signifikante Verringerung der Simulationsunsicherheit?
- Erhöht die Eliminierung von Unstetigkeiten in den Prozessgleichungen die Effizienz von Nachführungsmethoden wie dem Ensemble-Kalman-Filter?
- Steigt die Güte von Ensemble-Vorhersagen, wenn die Modellparameter der Ensemble-Member vorab entsprechend Tyralla und Schumann (2016) simultan bestimmt werden?

2 Parameter- und Modellstrukturunsicherheit

Hydrologische Modellierung ist der Versuch, die wesentlichen Merkmale komplexer hydrologischer Wirkungsgefüge bei lückenhafter Informationslage mit stark abstrahierten Prozessbeschreibungen mathematisch abzubilden. Das ist nicht ohne Inkaufnahme relevanter Diskrepanzen zwischen den berechneten Größen und ihren realen Entsprechungen möglich. Liegen Vergleichsmessungen vor, lassen sich diese Diskrepanzen durch Maßzahlen quantifizieren. Eine oder mehrere solcher Maßzahlen beischreiben – positiv formuliert – die erreichte Simulationsgüte. Dagegen bezeichnet Simulationsunsicherheit im Folgenden das Ausmaß der Diskrepanzen sowie das Unwissen über deren Ausmaß im Anwendungsfall, für den keine Vergleichsmessungen vorliegen. Die objektiv fassbare Simulationsgüte hilft dem Theoretiker bei der Entwicklung und Prüfung eines hydrologischen Modells; die stets auch subjektive Simulationsunsicherheit stört den Praktiker bei der Modellwahl und -spezifikation sowie der Interpretation der erzielten Ergebnisse.

Die hydrologische Literatur differenziert die Quellen der Simulationsunsicherheit gewöhnlich in Daten-, Modellstruktur- und Parameterunsicherheit. Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf der Modellstrukturunsicherheit, was detaillierte Betrachtungen zur Parameterunsicherheit einschließt (s. u.).

Gupta et al. (2012) gliedern die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten zur expliziten Berücksichtigung der Modellunsicherheit wie folgt:

1. Analyse und Verringerung numerischer Fehler (z. B. Clark und Kavetski 2010, Kavetski und Kuczera 2007, Schoups et al. 2010)
2. Identifikation von Unsicherheiten einzelner Gleichungen durch
    a. Modellierung von Systemzuständen und/oder Parametern als zeitvariable stochastische Größen (z. B. Leandro et al. 2013, Moradkhani 2005, Reichert und Mieleitner 2009, Smith et al. 2008)
    b. Verwendung von Ensembles alternativer mathematischer Gleichungen für Teilprozesse (z. B. Fenicia et al. 2007)
    c. Methoden zur datenbasierten Wahl oder Modifikation von Gleichungen (z. B. Bulygina und Gupta 2009)
3. Ermittlung der für die relevanten Prozesse idealen Modellskala zur angemessenen Berücksichtigung der räumlichen Variabilität (z. B. Reggiani et al. 1998)
4. Identifikation bzw. Reduktion von Unsicherheiten des Gesamtmodells durch
    a. Schrittweise Erhöhung der Modellkomplexität nach dem „Top-Down“-Ansatz, ggf. unter Rückgriff auf alternative Messgrößen (Grundwasser, gelöste Stoffe usw.) (z. B. Hogue et al. 2006)
    b. Vergleich verschiedener Modelle und Bildung von Modellensembles (z. B. Ajami et al. 2007, Diks und Vrugt 2010)

Modellstruktur- und Parameterunsicherheit sind ineinander verwoben. Der starke Abstraktionsgrad hydrologischer Prozessgleichungen bedingt, dass deren Konstanten keine direkt messbaren lokalen physikalischen Gebietseigenschaften darstellen. Als effektive Parameter sollen sie dagegen das globale hydrologische Verhalten größerer Gebietseinheiten repräsentieren, was i. d. R. durch Parameterkalibrierungen herbeizuführen versucht wird. Die Notwendigkeit zur Kalibrierung schränkt infolge begrenzter quantitativer Informationen über das globale Systemverhalten – oftmals liegen nur Abflussmessungen an einem Pegel vor – die Anzahl der identifizierbaren Modellparameter stark ein (Renard et al. 2010), was wiederum die zu rechtfertigende Komplexität der Prozessgleichungen begrenzt. Frühe Versuche dieses Problem durch Verwendung stärker physikalisch orientierter Modellkonzepte, umgesetzt in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, zu verringern (Abbott et al. 1986) waren wenig erfolgreich (Beven 1989). Viele der aktuell in der Forschung diskutierten Modelle setzten weiterhin auf stark abstrahierte Prozessgleichungen mit geringer Parameteranzahl (z. B. Perrin et al. 2003).

Abbildung 2.1 soll die obigen abstrakten Aussagen aus einer statistischen Perspektive veranschaulichen und konkretisieren sowie den für diesen Bericht gewählten Umgang mit der Parameterunsicherheit in den Vergleichsrechnungen zur Modellstrukturunsicherheit verständlich machen. Dargestellt sind vier Versuche, die Zielgröße y mit Hilfe bekannter Werte von x_1 zu schätzen.

In den beiden oben dargestellten Teilabbildungen entspricht der angenommene funktionale Zusammenhang $f(x_1) = a \cdot x_1$ (durchgezogene Linie) exakt dem realen Zusammenhang $y = a \cdot x_1$. Im oben links dargestellten Idealfall sind zudem die Werte beider Variablen absolut sicher. Entsprechend reicht ein Datenpunkt, um den Wert des einzigen Modellparameters a eindeutig zu bestimmen. Da weder Modellstruktur- noch Datenunsicherheit vorliegt, entsteht weder Parameter- noch Vorhersageunsicherheit.

Die Teilabbildung oben rechts veranschaulicht den Effekt von Datenunsicherheit durch Einführung der zufälligen Störgröße ε. Die Werte von y ergeben sich zu $y = a \cdot x_1 + \varepsilon$; die Werte von ε sind heteroskedastisch normalverteilt entsprechend $\varepsilon = NV(0, c \cdot x_1)$, d. h. deren arithmetischer Mittelwert beträgt null und deren Standardabweichung ist x_1 proportional. Die stochastische Komponente ε bedingt, dass der Steigungskoeffizient a nicht eindeutig bestimmbar, sondern in Abhängigkeit von der Stichprobengröße nur mehr oder weniger genau abschätzbar ist. Diese Parameterunsicherheit drückt sich im dunkelgrau hinterlegten Unsicherheitsband aus. Davon ausgehend, dass die y-Werte nur wegen ihrer Datenfehler um den geschätzten Zusammenhang streuen, liegen die fehlerbereinigten y-Werte mit definierter Wahrscheinlichkeit innerhalb dieses Bandes. Das hellgrau hinterlegte Vorhersageunsicherheitsband umfasst hingegen die „vollständigen“ y-Werte mit definierter Wahrscheinlichkeit. Es wäre heranzuziehen, wenn Datenfehler keine Rolle spielen und die Streuung z. B. aus der Vernachlässigung anderer Einflussfaktoren resultiert. Mit zunehmender Stichprobengröße sinkt das Ausmaß der Parameterunsicherheit und steigt die Genauigkeit der geschätzten Vorhersageunsicherheit.

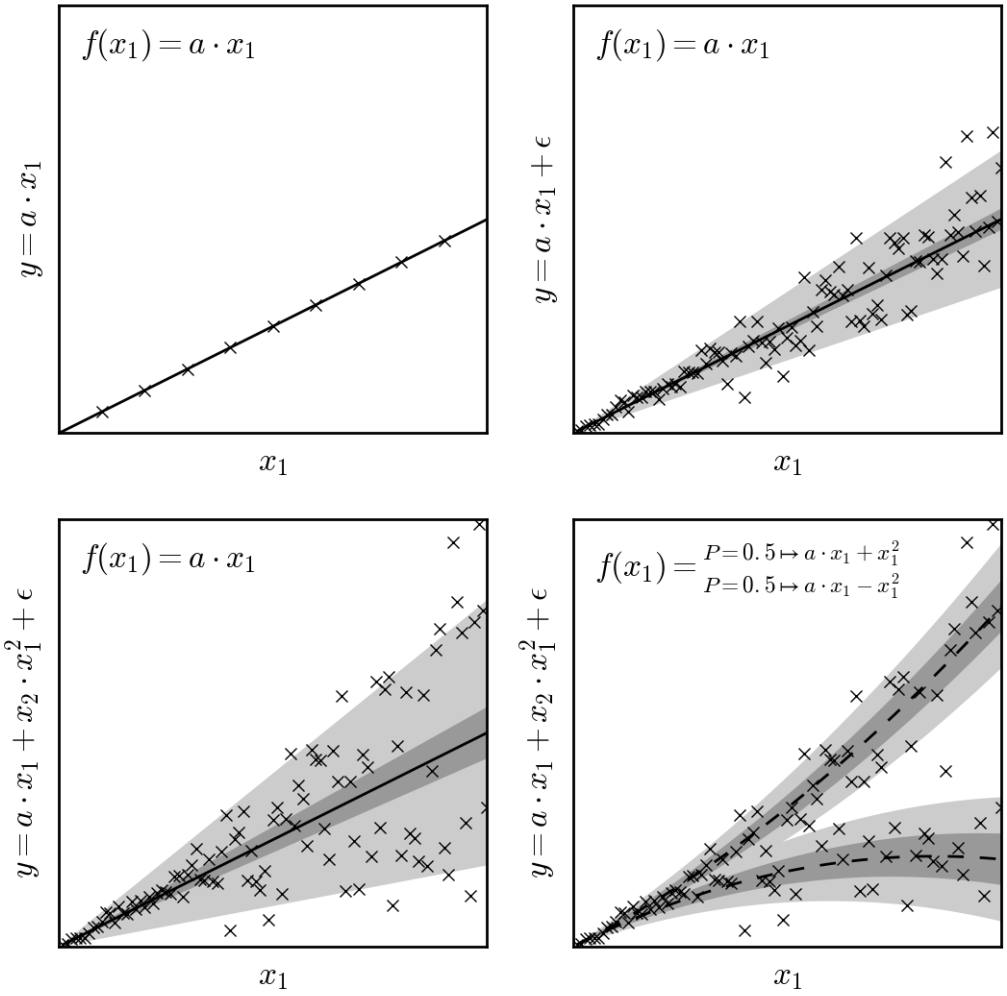

Abbildung 2.1: Wechselwirkungen der Quellen der Simulationsunsicherheit

In der Teilabbildung unten links kommt zur oben beschriebenen Datenunsicherheit Modellstrukturunsicherheit hinzu. Der angenommene Zusammenhang ist weiterhin $f(x_1) = a \cdot x_1$, die y-Werte ergeben sich hingegen über $y = a \cdot x_1 + x_2 \cdot x_1^2 + \varepsilon$. Die Variable x_2 nimmt mit gleicher Wahrscheinlichkeit den Wert -1 oder 1 an und fungiert so als „Prozessschalter“: ein Teil der y-Werte wird erhöht, der andere verringert. Die zusätzliche Streuung durch Vernachlässigung des Terms $x_2 \cdot x_1^2$ führt zu einem Anstieg der Parameter- sowie der Vorhersageunsicherheit. Zudem zeigen die entsprechenden Unsicherheitsbänder systematische Fehler. Die Verwendung des unzutreffenden Zusammenhangs $f(x_1) = a \cdot x_1$ macht a zu einem effektiven Parameter ohne reale Entsprechung. Dessen Unsicherheitsband lässt sich durch Erhöhung der Stichprobengröße zwar beliebig verringern, gibt die Lage der von der Datenunsicherheit bereinigten y-Werte aber grundsätzlich falsch an und verliert so an Aussagekraft. Außerdem führt die Vernachlässigung des Terms $x_2 \cdot x_1^2$ zu einer gegenüber x_1 überproportionalen Zunahme der Streuung um die postulierte Gerade. Das entsprechend $\varepsilon = NV(0, c \cdot x_1)$ ermittelte Band der Vorhersageunsicherheit fällt im unteren Wertebereich daher zu weit und im oberen Wertebereich zu schmal aus.

Die Teilabbildung unten rechts zeigt, welcher Nutzen sich aus der Kenntnis des Modellfehlers ziehen lässt. Angenommen, der wahre Zusammenhang $y = a \cdot x_1 + x_2 \cdot x_1^2$ sei bekannt aber nicht deterministisch umsetzbar, weil keine Daten für x_2 vorliegen. Dann findet sich eine stochastische Lösung des Problems durch die Formulierung der beiden Zusammenhänge $f(x_1) = a \cdot x_1 - x_1^2$ und $f(x_1) = a \cdot x_1 + x_1^2$ (gestrichelte Linien), denen jeweils die Wahrscheinlichkeit $P = 1/2$ zugeordnet wird. Für die Breite der Bänder der Parameterunsicherheit ergibt sich hieraus kein Vorteil, zusammengenommen fällt sie sogar deutlich größer aus als bei Verwendung des unzutreffenden Zusammenhangs (vgl. mit der Teilabbildung unten links). Allerdings entspricht die Lage der Bänder wieder der Lage der von der Datenunsicherheit bereinigten y-Werte. Zudem fallen die Bänder der Vorhersageunsicherheit etwas schmaler aus und treffen in allen Bereichen von x_1 zu.

Im zuletzt diskutierten Beispiel (Abbildung 2.1, unten) nimmt die Parameterunsicherheit aufgrund eines symmetrischen Modellfehlers zu. Es besteht keine Abhängigkeit zwischen dem optimalen Wert von Parameter a und dem Wert der erklärenden Variablen x_1. Dies ist bei hydrologischen Modellen und Modellkomponenten wie beispielsweise dem Muskingum-Verfahren zur Wellenablaufberechnung (McCarthy 1938) oftmals nicht der Fall. Einer der beiden Muskingum-Parameter ist die (konstante) Schwerpunktlaufzeit k. Da die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers innerhalb eines typischen Gerinnes mit dem Durchfluss Q steigt, ist die tatsächliche Schwerpunktlaufzeit einer Hochwasserwelle bei kleinen Q-Werten relativ groß und bei großen Q-Werten relativ klein. k sollte somit in Abhängigkeit vom (erwarteten) Wertebereich einer zu simulierenden Hochwasserwelle bestimmt werden. Bei derartigen unsymmetrischen Modellfehlern kann die Parameterunsicherheit somit um die subjektive Komponente erweitert sein, in Abhängigkeit der jeweiligen Rahmenbedingungen zwischen verschiedenen Parameterwerten wählen zu müssen. Entsprechend groß ist die Simulationsunsicherheit im Extrapolationsbereich.

Neben den bereits genannten Problemen der Modellstruktur- und Parameterunsicherheit ist das Problem der Äquifinalität herauszustellen (Beven 2006): unterschiedliche Modelle oder Parametersätze können in der Kalibrierperiode ähnliche Simulationsergebnisse zur Folge haben; es ist oftmals nicht ersichtlich, welches Modell oder welcher Parametersatz im konkreten Anwendungsfall zu favorisieren ist. Daher stellt sich die Frage, ob es überhaupt sinnvoll ist, ein einzelnes „bestes“ Modell und für dieses den „besten“ Parametersatz für das jeweilige Untersuchungsgebiet zu bestimmen. Beven (2006) propagiert stattdessen das Mitführen einer großen Menge „akzeptabler“ Modell-Parametersatz-Kombinationen. Ob und wenn wie dies zur gewünschten Quantifizierung von Modellstruktur- und Parameterunsicherheit führt, wird bislang kontrovers diskutiert (siehe z. B. Montanari 2005, Mantovan und Todini 2006, Stedinger et al. 2008).

3 Daten und Methoden

3.1 Modellframework HydPy

Die Bearbeitung vieler modellstruktureller Problem- und Fragestellungen setzt softwaretechnische Flexibilität voraus. Die Anbieter etablierter hydrologischer Modelle zielen dagegen stärker auf die Anwendungssicherheit der bereitgestellten Software ab. Sowohl das Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) als auch die LARSIM-Entwicklergemeinschaft stellen HBV bzw. LARSIM nur als bereits kompilierte, ausführbare Dateien zur Verfügung. Damit lassen sich Methodenkopplungen – beispielsweise mit anderen Modellen, aber auch mit Algorithmen zur Parameteroptimierung oder Zustandsnachführung – nur umständlich und rechenzeitintensiv umsetzen. Hypothesentests zur Modellunsicherheit durch Modifikation der Prozessgleichungen sind unmöglich.

Vor diesem Hintergrund wurde das für Forschungszwecke entwickelte Modellframework HydPy während der Projektdauer mit Blick auf die Praxiszwecke der BfG weiterentwickelt (Tyralla und Schumann 2013). Durch die Weiterentwicklung ist sichergestellt, dass gewonnene theoretische Erkenntnisse langfristig in den operativen Dienst überführt werden können.

HydPy ist in der objektorientierten Skriptsprache Python programmiert. Es bietet zwar verschiedene Assistenzfunktionen für die einfache Anwendung, zielt aber eher auf erfahrene Modellierer mit grundlegenden Programmierkenntnissen ab. Folgende Eigenschaften des Frameworks sind für die Projektzwecke von Vorteil:

- Dynamischer Zugriff auf initialisierte Modell-Instanzen während der Laufzeit, z. B. zum Auslesen oder Einspeisen neuer Informationen.
- Einfaches Einbinden neuer in Python programmierter Modelle.
- Automatisches Erstellen, Kompilieren und Einbinden von „Fortran-Modellen“ sowie eine Multiprocessing-Option zur Verringerung der Rechendauer.
- Kombination verschiedener Modelltypen in einer Framework-Instanz, z. B. zur Berücksichtigung naturräumlicher Unterschiede innerhalb eines Einzugsgebietes.

Um eine enge Anbindung des Projektes an den operativen Betrieb der BfG zu erreichen, wurden die Modelle HBV und LARSIM in möglichst originalgetreuen Versionen in HydPy implementiert; mit der Beschränkung auf diejenigen Modellkomponenten, die in BfG-Applikationen zum Einsatz kommen. Auf Grundlage von insb. Lindström et al. 1997, SMHI 2011, Bremicker 2000 sowie der LARSIM-Onlinedokumentation konnten die meisten Prozessgleichungen relativ zweifelsfrei umgesetzt werden. Hinsichtlich der numerischen Lösung der gekoppelten Gleichungssysteme bestand allerdings eine größere Unsicherheit (Tyralla und Schumann 2014). Durch zahlreiche Detailvergleiche mit den Ergebnissen der jeweiligen Original-Software und Hilfestellungen durch die Mitarbeiter des SMHI, der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

und der Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH (Hydron) konnte ein hinreichender Grad an Übereinstimmung erzielt werden (siehe bzgl. HBV Tyralla und Schumann 2013, ein Folgebericht bzgl. LARSIM ist in Vorbereitung).

Im Folgenden werden statt HBV und LARSIM die Bezeichnungen HydPy-H sowie HydPy-L verwendet. Dies soll auf bestehende Unterschiede verweisen, die bis auf die genannten Auslassungen weniger im Modellkonzept als in der Implementierungsstrategie verortet sind. Diese zielt, wie die folgenden Beispiele zeigen, auf erhöhte Flexibilität ab:

- In HydPy-H und -L kann allen Zonen bzw. hydrologischen Einheitsflächen ein individueller Parameterwert zugeordnet werden. Somit ist der Modellanwender freier in seiner Entscheidung, wie welche Kriterien in die Differenzierung einzelner Teilflächen eines Gebietes einfließen sollen.
- Prozesse „an Land“ und „im Fluss“ liegen in getrennten Klassen vor. Dies ermöglicht z. B die Kopplung der landbezogenen Routinen von HydPy-H mit dem Wellenablaufverfahren von HydPy-L.

Inhaltliche Details zu den untersuchten Aspekten der verwendeten Modelle finden sich in den entsprechenden Folgeabschnitten.

3.2 Meteorologische und hydrologische Zeitreihen

Das operationelle HBV-Modell der BfG verwendet kontinuierliche Antriebsreihen des Niederschlags und der Temperatur in Stundenauflösung. Diese wurden vorab mit dem Flood Early Warning System FEWS-DE entsprechend der in Weerts et al. (2008) beschriebenen Methodik aufbereitet. Mit FEWS-DE wird auch die Aufbereitung und Bereitstellung der Antriebsdaten für die operationelle Vorhersage durchgeführt. Entsprechend ist die im Projekt verwendete Datenbasis aus Sicht der Praxis „realistisch“. Gegenüber mit größerem zeitlichen Versatz und Aufwand erstellten Niederschlagsprodukten wie REGNIE ergeben sich allerdings qualitative Einbußen, insbesondere aufgrund der notwendigen Beschränkung in der Stationswahl auf synoptische Wetterstationen.

Die Anzahl der verfügbaren synoptischen Stationen variiert bis in die 2000er Jahre hinein stark. Entsprechend ist mit größeren zeitlichen Inkonsistenten der aufbereiteten Gebietsniederschläge zu rechnen. Dem wird durch Beschränkung des betrachteten Zeitraums auf die hydrologischen Jahre 2002 bis 2013 begegnet.

Die zur Kalibrierung und Validierung benötigten Abflussreihen ausgewählter Pegel in Stundenauflösung wurden vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie, vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht und von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Im betrachteten Zeitraum liegen in allen Fällen nur wenige Fehlwerte vor. Ergänzungen wurden nicht vorgenommen, da für die durchgeführten Analysen nicht notwendig.

3.3 Untersuchungsgebiete

Alle Untersuchungen wurden an drei Einzugsgebieten durchgeführt: am oberen Neckar bis unterhalb Pegel Horb, an der Lahn bis Pegel Kalkofen und der Nahe bis unterhalb Pegel Grolsheim (Abbildung 3.1). Diese bieten sich aufgrund ihrer überschaubaren Größe (nach der Gebietseinteilung des operationellen HBV-Modells 1.499 km², 5.298 km² sowie 4.013 km²) und dem geringen Ausmaß anthropogener Steuerung (z. B. durch Talsperren oder Einleitungen) als Modellgebiete an. Zudem ist von einer relativ geringen Beeinträchtigung der Abflussmessung (z. B. durch Staustufen oder Rhein-Rückstau) auszugehen.

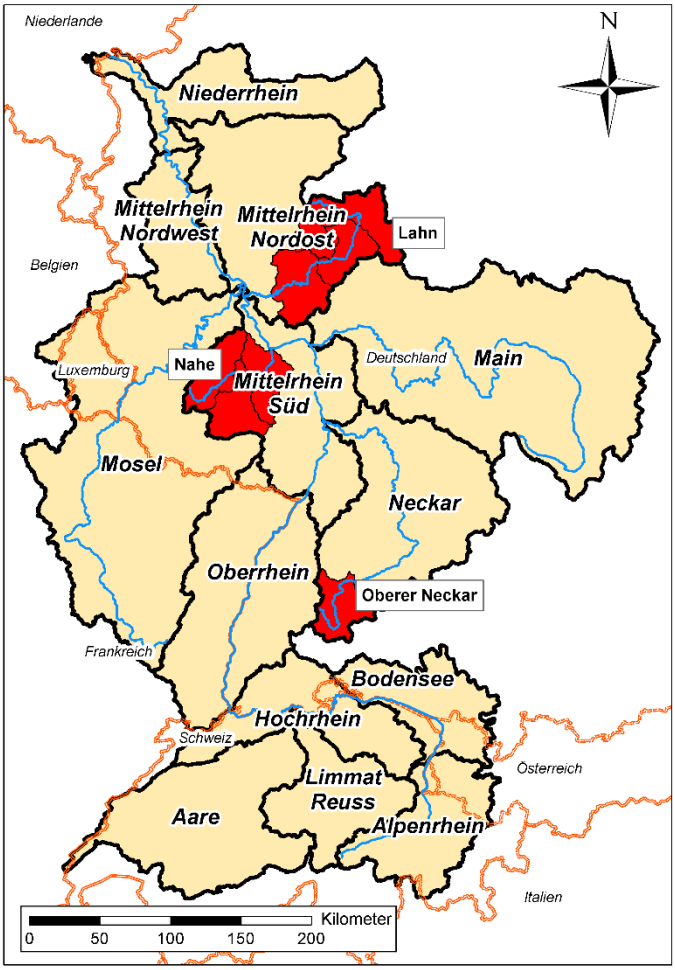

Abbildung 3.1: Lage der Untersuchungsgebiete im Rheingebiet

Modelltechnisch ist der obere Neckar bis unterhalb Pegel Horb im operationellen HBV-Modell als nicht in weitere Teilgebiete differenziertes Kopfgebiet repräsentiert (Abbildung 3.2). Entsprechend greifen bis zum Gebietsauslass keine Wellenablauf-Verfahren in die Simulation ein, was die Analyse vereinfacht. Die Lahn bis Pegel Kalkofen (Abbildung 3.3) und die Nahe bis Pegel Grolsheim (Abbildung 3.4) sind dagegen in vier bzw. drei Teilgebiete differenziert, die durch drei bzw. zwei Routing-Strecken miteinander verknüpft sind.

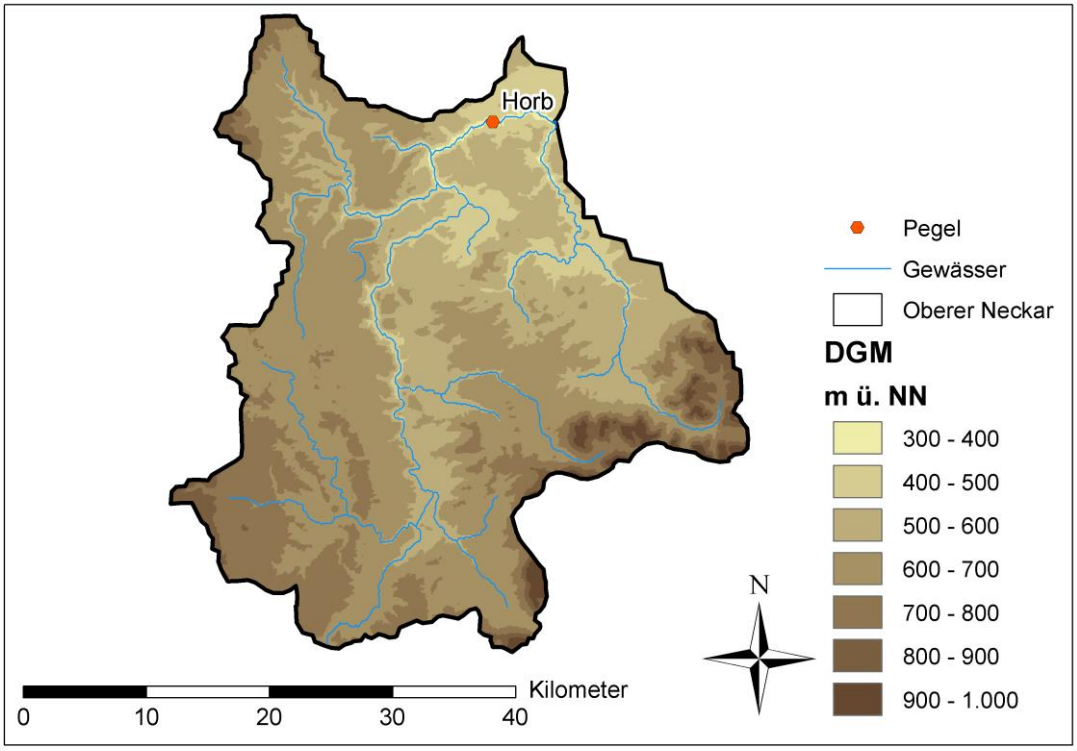

Abbildung 3.2: Oberer Neckar bis unterhalb Pegel Horb (Zufluss der Eyach)

Ebenso wie die Differenzierung der Gesamtgebiete in Teilgebiete wurde die Differenzierung aller Teilgebiete in Zonen des operationellen HBV-Modells beibehalten (Eberle 2007). So sind alle Gebiete in Zonen (HBV-Bezeichnung, die etwa dem Begriff der hydrologischen Einheitsfläche entspricht) mit der Landnutzung „field“ oder „forest“ sowie in 100 m-Höhenstufen unterteilt. Aus der Kombination ergeben sich zwischen 10 und 14 Zonen je Teilgebiet.

Die naturräumlichen Unterschiede zwischen den drei Untersuchungsgebieten sind, in Relation zum gesamten Rheingebiet, gering ausgeprägt. Es dominieren Braunerden die zumeist aus Festgesteinen, in größeren Teilen des Lahngebiets aber auch aus Löss hervorgegangen sind. Geologisch überwiegen am oberen Neckar Feinsandsteine, Tonsteine und Mergelgesteine; zwar wasserführend aber nur mit wenig ergiebigen Grundwasservorkommen einhergehend sind die weniger häufigen Karstwasserleiter Kalkstein, Dolomit und Gips. Die Grundwasservorkommen der im Zentrum und Süden des Nahegebiets anstehenden Sande und Kiese sind zum Teil sehr ergiebig; die der übrigen Sedimentite und seltener Vulkanite allenfalls lokal bedeutsam. Das Lahngebiet ist ebenfalls zum großen Teil durch Sand- und Schluffsteine mit geringen Grundwasservorkommen geprägt, hat aber im Norden und Osten sehr ergiebige vulkanische Kluftgrundwasserleiter (Bundesanstalt für Gewässerkunde und Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. 2003).

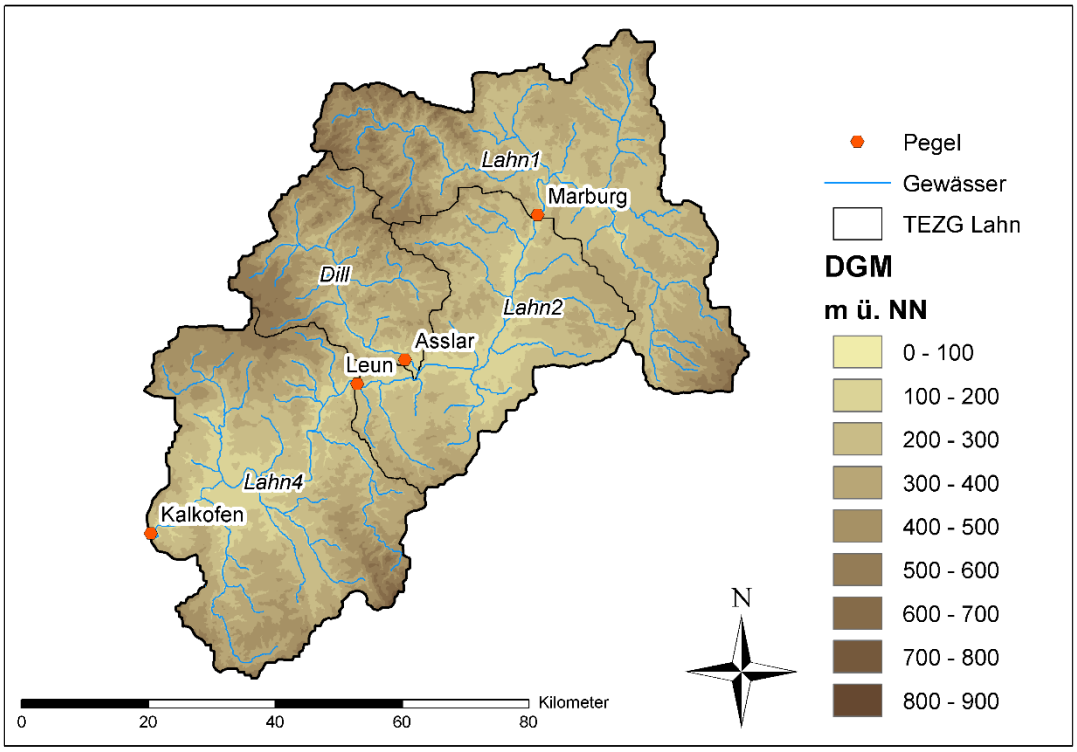

Abbildung 3.3: Lahn bis Pegel Kalkofen

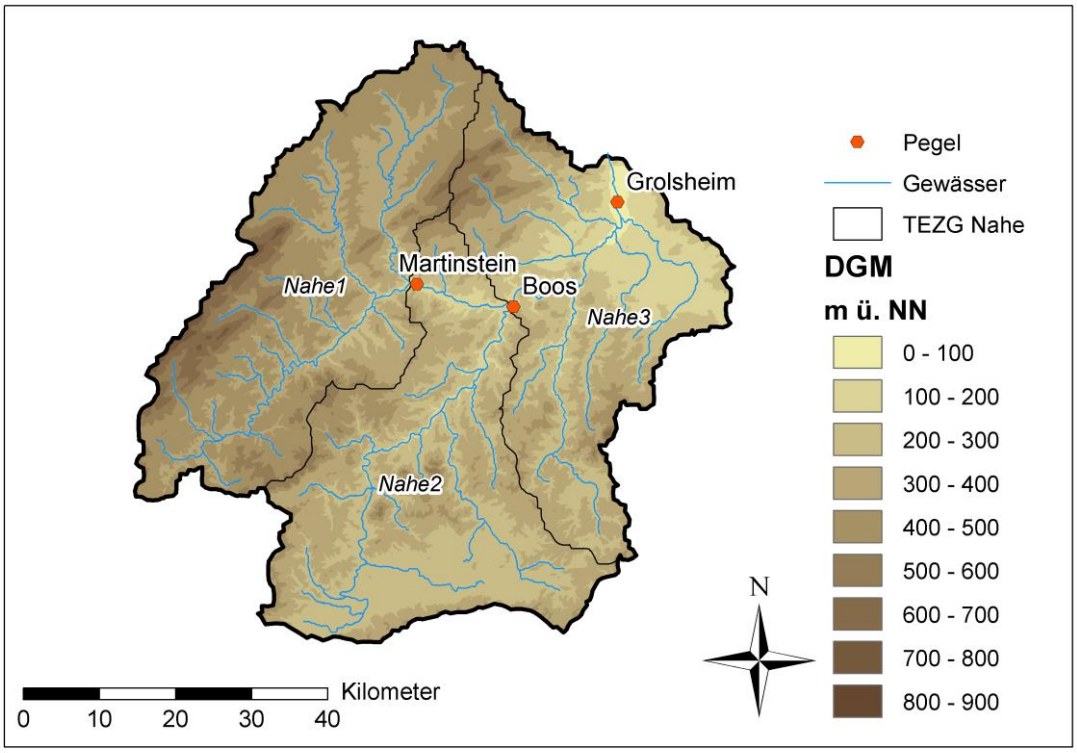

Abbildung 3.4: Nahe bis unterhalb Pegel Grolsheim

Auch topographisch weichen die Gebiete, aus dem Blickwinkel der mesoskaligen hydrologischen Modellierung betrachtet, recht wenig voneinander ab. So liegt die maximale Höhendifferenz der Zonen der jeweiligen Teilgebiete in den meisten Fällen bei 600 m. Das mittlere Höhenniveau des oberen Neckar übersteigt mit ca. 700 m ü. NN allerdings das der Lahn- und Nahe-Teilgebiete um ca. 200 m. Dies zeigt sich klimatisch im höchsten mittleren Jahresniederschlag im Untersuchungszeitraum von 925 mm (ermittelt wie in Abschnitt 3.2 erläutert). Die Teilgebietsniederschläge der Lahn variieren dagegen zwischen 689 mm (Lahn zwischen Pegel Marburg und Leun) und 918 mm (Dill), die der Nahe zwischen 594 mm (Nahe zwischen Pegel Boos und Grolsheim) und 781 mm (Glan). Die mittleren Lufttemperaturen (Minimum: oberer Neckar mit 8,3 °C, Maximum: Nahe zwischen Pegel Boos und Grolsheim mit 9,8 °C) und damit verbundene Größen wie beispielsweise das Andauerverhalten der Schneedecke unterscheiden sich nicht markant.

3.4 Zeiträume und Anfangsbedingungen

Entsprechend der gängigen Praxis wurden die ausgewählten hydrologischen Jahre 2002 bis 2013 in Warmlauf-, Kalibrier- und Validierperioden unterteilt.

Die vergleichsweise kurze Kalibrierperiode von 5 Jahren startet 2005 und endet 2009. Durch deren Festlegung auf die Mitte des Gesamtzeitraums ergeben sich zwei voneinander unabhängige Validierperioden: die erste umfasst die Jahre 2003 und 2004, die zweite die Jahre 2010 bis 2013. Die so ermöglichte Doppelvalidierung soll zum einen die Robustheit der abgeleiteten Schlüsse erhöhen. Zum anderen umfassen die beiden Validierperioden mehrere relevante Rhein-Extremereignisse, was Interpretationen hinsichtlich der Extrapolationssicherheit der verschiedenen Methoden ermöglichen soll (siehe Abschnitt 3.5).

Es wird jeweils ein Jahr als Warmlauf-Periode, also zum „einpendeln“ der Anfangsbedingungen, herangezogen: 2002 für die erste Validierperiode, 2004 für die Kalibrierperiode, 2009 für die zweite Validierperiode. Damit die Dauer von einem Jahr auch für die trägeren Modellkomponenten (Grundwasser) ausreicht, wurde vorab – basierend auf der operationellen Parametrisierung von HBV – Anfangsbedingungen für den 01.11.2001, den 01.11.2003 sowie den 01.11.2008 erstellt.

3.5 Extremereignisse

Abbildung 3.5 zeigt die Ausprägung der für die visuelle Modell- und Methodenevaluierung verwendeten Extremereignisse am Rhein-Pegel Köln sowie an den drei Untersuchungspegeln. Zur besseren Vergleichbarkeit sind Abflussspenden dargestellt (Normierung des Abflusses mit der Einzugsgebietsgröße).

Mit den Niedrigwassern von 2003 und 2011 befinden sich zwei markante Trockenperioden im Validierungszeitraum. 2003 ist vom zeitlichen Verlauf her ein typisches Rhein-Niedrigwasser mit Herbstschwerpunkt, allerdings von extremer Ausprägung. Von Februar bis September wiesen mehrere Monate stark unterdurchschnittliche Niederschläge und stark überdurchschnittliche Temperaturen auf. Bedingt durch alpine Schmelzwasserzuflüsse und der Ausgleichswirkung des Bodensees

bildete sich das Niedrigwasser im Rhein gegenüber den untersuchten Zuflussgebieten verzögert aus. 2011 kam es – trotz prägnanter Hochwasser im Januar – verursacht durch warme-trockene Frühjahrsverhältnisse bereits in der ersten Jahreshälfte zu Niedrigwasserbedingungen. Das daran anschließende Herbst-Niedrigwasser war zwar ebenfalls markant, aufgrund überdurchschnittlicher Niederschläge in Juli und August aber weniger gravierend als aufgrund der Frühjahrsbedingungen befürchtet. Detaillierte Beschreibungen der Ereignisse finden sich in Kohn et al. (2014) sowie der Internet-Informationsplattform Undine der BfG.

Ebenso wie bei den Niedrigwassern wurden auch Hochwasser mit unterschiedlicher Genese ausgewählt. Die Hochwasser 2003 und 2011 traten jeweils im Januar auf. Das Ereignis 2003 war nur unterhalb der Mainmündung markant. Es entstand infolge starker Niederschläge von Mitte Dezember bis Anfang Januar, Schneeschmelzen waren von untergeordneter Bedeutung (Fell 2003). Für das Ereignis 2011 zeigte sich dagegen ein Wechsel der Großwetterlage verantwortlich. In großen Teilen des Rheingebietes schmolz eine geschlossene Schneedecke infolge eines starken Temperaturanstiegs sowie ergiebiger Regenfälle innerhalb weniger Tage vollständig ab, die daraus resultierenden Hochwasserabflüsse wurden durch weitere, zeitnah folgende Niederschlagsereignisse verstärkt (Fell 2011). Im Vergleich zu diesen Winterhochwassern ist das Sommerhochwasser 2013 in den drei Untersuchungsgebieten von sehr unterschiedlichem zeitlichem Verlauf. Nach einem ungewöhnlich nassen Frühling kam im es insbesondere zum Monatswechsel Mai/Juni in ganz Mitteleuropa zu ergiebigen Dauerregen. Im Rheingebiet war hiervon unter anderem der Schwarzwald stark betroffen. Dem Ereignis zum Monatswechsel waren mehrere lokale Ereignisse vorangegangen, so im Nahegebiet Mitte Mai (Fell 2013).

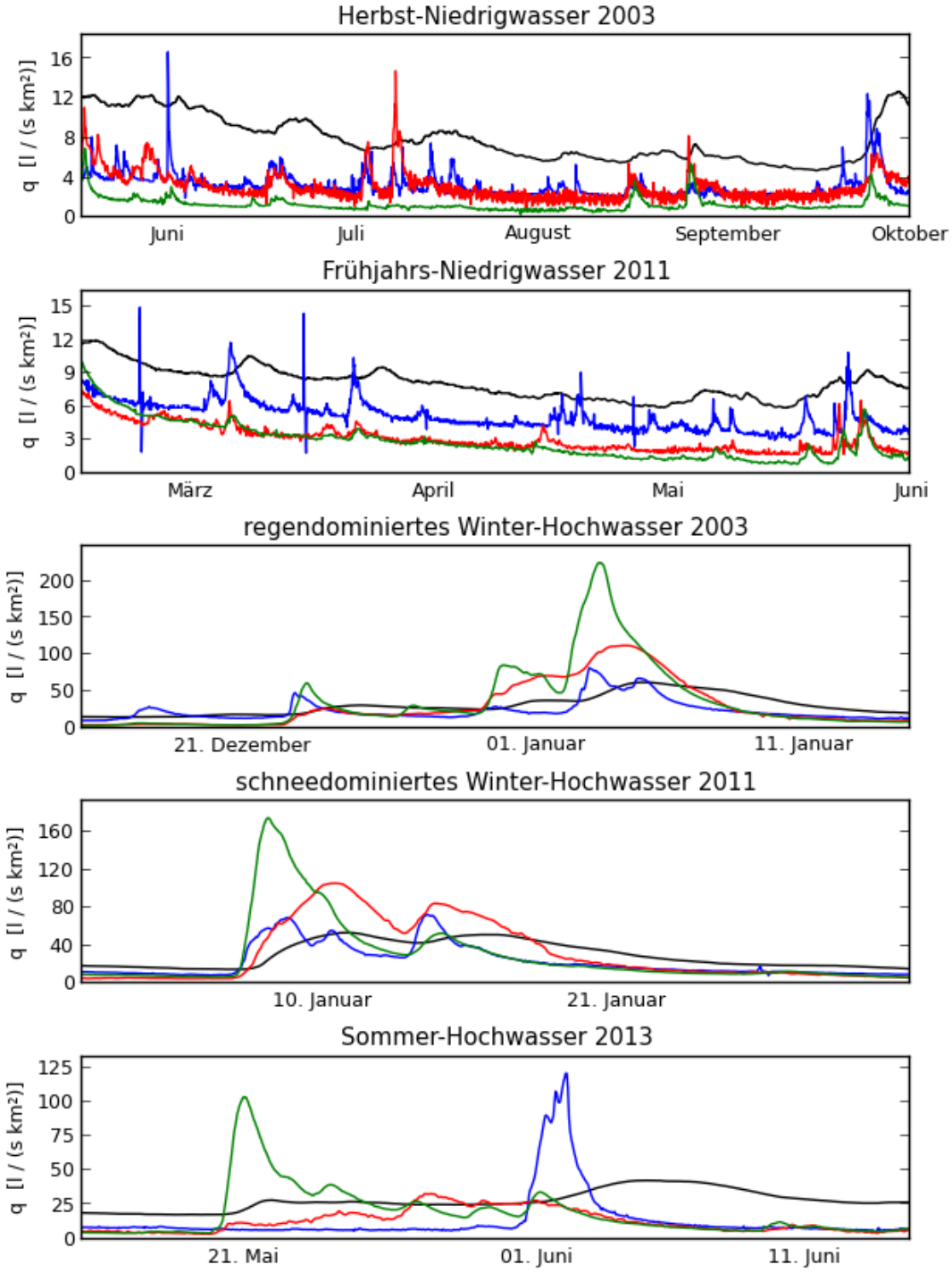

Abbildung 3.5: Abflussspenden am Rhein-Pegel Köln (schwarz), Neckar-Pegel Horb (blau), Lahn-Pegel Kalkofen (rot) und Nahe-Pegel Grolsheim (grün).

3.6 Kalibrierstrategie

Wie in Kapitel 2 erläutert, besteht in der hydrologischen Forschung bislang kein Konsens über die „richtige“ Ermittlung der Werte und Unsicherheitsbereiche effektiver Modellparameter.

In der Praxis gängig ist die einfache Verwendung eines einzelnen Parametersatzes, der hinsichtlich eines oder mehrere Gütekriterien aufwendig kalibriert wurde. Hierfür lassen sich oftmals enge Bereiche der Simulationsunsicherheit ableiten. Allerdings immer die Gefahr in Kauf nehmend, im Extrapolationsfall einen ungeeigneten Parametersatz zu verwenden und wahre Unsicherheiten zu unterschätzen (Beven 2006).

Monte-Carlo-basierte Methoden wie GLUE (Beven und Binley 1992) erscheinen für den Extrapolationsfall robuster, allerdings auch subjektiver und weniger effizient für „normale“ Anwendungsbedingungen (siehe z. B. die Diskussionsbeiträge zu Kennedy und O'Hagan 2001). Zudem ist die Verwendung einer Vielzahl akzeptabler Parametersätze praktisch oftmals nicht handhabbar, beispielsweise bei Modellen mit langer Rechendauer.

In den folgenden Untersuchungen kommt eine Kompromissstragie zwischen diesen beiden Extremen zum Einsatz: Mittels einer multivariaten Gleichverteilung im jeweils zu definierenden Parameter-Suchraum werden 30 initiale Parametersätze gezogen. Diese werden anschließend mit einem lokalen Optimieralgorithmus in 30 voneinander unabhängigen Optimierungsläufen hinsichtlich eines zu definierenden Kriteriums (siehe Abschnitt 3.7) verbessert. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Experimente zu erhöhen, werden identische Parameter für einen bestimmten Optimierungslauf stets mit demselben Wert initialisiert. So beginnt die Kalibrierung des HydPy-H-Parameters TT in Lauf 1 grundsätzlich mit dem Wert 1.05, in Lauf 2 mit dem Wert 0.83 usw.

Diese Strategie ist zeiteffizienter als die reine Monte-Carlo-Suche. Gegenüber der Ermittlung eines einzelnen Parametersatzes ergeben sich zusätzliche Interpretationsmöglichkeiten:

- Nur wenn mehrere der erfolgreichsten Läufe zu einem ähnlichen Zielwert führen, lässt sich von einer näherungsweisen Identifikation des globalen Optimums der Zielfunktion ausgehen.
- Eine Vielzahl nicht erfolgreicher Läufe kann auf Probleme in der Modellstruktur hindeuten.
- Art und Ausmaß der jeweils vorliegenden Äquifinalität lassen sich durch Analyse der finalen Parameterwerte und der resultierenden Simulationsergebnisse bewerten.

In den meisten Untersuchungen kommt ausschließlich der Algorithmus Bound Optimization By Quadratic Approximation (BOBYQA) zum Einsatz (Powell 2009). BOBYQA versucht, basierend auf einer kontinuierlich angepassten quadratischen Annäherung der wahren Zielfunktionsoberfläche, den aktuellen Wert der Zielfunktion durch „lokale“ Parameteränderungen innerhalb gegebener Grenzen zu verbessern. Im Gegensatz zu vielen anderen lokalen Optimierungsalgorithmen arbeitet BOBYQA ableitungsfrei.

In einigen Experimenten kommt zusätzlich der Algorithmus Differential Evolution (DE) zum Einsatz (Storn und Price 1997). DE ist ein globaler Optimierungsalgorithmus, der eine große Population initialer Parametersätze (ermittelt durch Latin-Hypercube-Sampling) durch einfache Mutations-, Kreuzungs- und Selektionsmethoden schrittweise verbessert. Infolge dieser Zufallsmechanismen erfordert DE ein Vielfaches der Funktionsaufrufe von BOBYQA, erreicht das globale Optimum aber

mit größerer Wahrscheinlichkeit. Entsprechend bietet sich DE zur Überprüfung einzelner Experimente an, in denen die mit BOBYQA ermittelten Parametersätze suboptimal erscheinen.

Alle freigegebenen Parameter werden „global“ für das jeweilige Gesamteinzugsgebiet kalibriert. Für die Lahn und die Nahe bedeutet dies beispielsweise für den Niederschlags-Korrekturfaktor PCORR, dass dieser in jedem Optimierschritt in allen Teilgebieten denselben Wert annimmt. Entsprechend geht nur der Pegel am Gebietsauslass (Kalkofen bzw. Grolsheim) in die Berechnung der Zielfunktion ein. Zwar lässt sich durch „lokale“ Kalibrierung ausgewählter Parameter unter Einbeziehung gebietsinterner Pegel oftmals eine signifikant höhere Simulationsgüte am Gebietsauslass erzielen. Die damit einhergehenden zusätzlichen Freiheitsgrade würden aber den in diesem Bericht angestrebten objektiven Methodenvergleich erschweren.

3.7 Gütekriterien

Die im Folgenden erläuterten mathematischen Gütekriterien bilden die Basis aller durchgeführten Kalibrierung und Validierungen.

Zur Validierung werden die Kriterien zum einen getrennt auf die Kalibrier- und Validierperioden angewandt (siehe Abschnitt 3.4). So lässt sich die zeitliche Übertragbarkeit der gewonnenen Parametrisierungen bewerten.

Zum anderen werden die Kriterien separat auf die Bereiche niedriger, mittlerer und hoher Abflüsse angewandt. Dies soll prozessdifferenzierte Analysen unterstützen. Hierbei wird immer der Gesamtzeitraum (Kalibrierperiode plus Validierperioden) betrachtet, um die Stichprobengröße nicht zu stark zu reduzieren. Ein Abflusswert wird dem „Niedrigwasserbereich“ zugeordnet, wenn er kleiner MQ/2 ist; dem „Hochwasserbereich“, wenn er größer MQ ist; dem „Mittelwasserbereich“, wenn er zwischen MQ/2 und MQ liegt. So entstehenden Gruppen sind etwa gleich groß.

3.7.1 Kalibrierkriterien

Üblicherweise erfolgt die algorithmische Kalibrierung hydrologischer Modelle anhand einer iterativen Minimierung von Residuen. Residuen sind im vorliegenden Zusammenhang Differenzen aus simuliertem und gemessenem Abfluss. Diese werden i. d. R. zunächst transformiert und anschließend aufsummiert; zur Veranschaulichung wird die resultierende Summe abschließend normiert. Vielverwendete Beispiele sind die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean squared error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}_i - y_i\right)^2} \quad , \qquad 3.1$$

sowie die Nash-Sutcliffe-Effizienz (Nash und Sutcliffe 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}_i - y_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2} \quad , \qquad 3.2$$

mit y als gemessenem und $\hat{y}$ als simuliertem Abflusswert sowie $\bar{y}$ als arithmetischem Mittelwert aller gemessenen Abflusswerte.

Die in Abschnitt 7 eingesetzte Ensemble-Technik basiert dagegen auf der expliziten Verwendung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen; der Normalverteilung (normal distribution, ND) sowie der Skewed Exponential Power Distribution (SEPD). Zur Wahrung der Einheitlichkeit kommen diese auch in den übrigen Versuchen zum Einsatz. Im einfacheren Fall ergibt sich unter Verwendung univariater Normalverteilungen mit identischer Standardabweichung σ.

$$ND = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\log\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{\sigma}\right)^2\right)\right). \qquad 3.3$$

Gleichung 3.3 entspricht etwa einer Log-Likelihood-Funktion, soll im Gegensatz zur Standardformulierung aber Vergleiche zwischen unterschiedlich langen Kalibrier- und Validierperioden erleichtern.

Alle drei bislang vorgestellten Kriterien sind hinsichtlich des angestrebten Maximum-Likelihood-Ansatzes identisch: Derjenige Parametersatz ist optimal, der zur geringsten Summe über alle $(\hat{y}_i - y_i)^2$ führt. Die explizite Verwendung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bietet aber zahlreiche Möglichkeiten, Annahmen oder Kenntnisse gegebener Daten- oder Modellfehler in den Optimierungsprozess einzubeziehen.

Residuen sind in der hydrologischen Modellierung in aller Regel korreliert und heteroskedastisch und folgen nicht der Normalverteilung. Dies widerspricht den von Gleichung 3.3 (und bei statistischer Interpretation auch von Gleichung 3.1 und 3.2) implizierten Annahmen über die Entstehung der Residuen.

Das Voraussetzen vermeintlich unkorrelierter Residuen wirkt sich insbesondere bei der „klassischen“ statistischen Bestimmung von Parameter-Konfidenzintervallen gravierend aus. Durch die Nichtbeachtung der zeitlichen Persistenz der zugrundeliegenden Prozesse wird der Informationsgehalt der Residuen überschätzt und dadurch die Parameter-Unsicherheit unterschätzt. Bei der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Behandlung der Parameter-Unsicherheit ist die Korrelation der Residuen dagegen von untergeordneter Bedeutung.

Die Heteroskedastizität der Residuen beeinträchtigt dagegen auch die Maximum-Likelihood-Parameterwerte signifikant. So ist beispielsweise intuitiv klar, dass absolute Abflussmessfehler im Hochwasserfall deutlich stärker ausgeprägt sein sollten als im Niedrigwasserfall. Entsprechend ist (auch aus anderen Gründen) im Hochwasserfall mit einer größeren Varianz der Residuen zu rechnen. Bei Nichtbeachtung dieser strukturellen Abhängigkeit wird der Informationsgehalt der Niedrigwasserperioden zu gering gewichtet. Dies zeigt sich im häufig beobachteten Phänomen, dass hinsichtlich RMSE oder NSE optimierte Modelle schlechte Niedrigwasseranpassungen zeigen.

Oftmals wird diesem Problem durch Logarithmieren der Residuen begegnet. So ergibt sich z. B. die logarithmische Nash-Sucliffe-Effizienz zu

$$logNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\log(\hat{y}_i) - \log(y_i)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\log(y_i) - \log(\bar{y})\right)^2}. \qquad 3.4$$

Losgelöst von statistischen Überlegungen wird die NSE oftmals als hochwasser- und die logNSE als niedrigwassersensitives Kriterium betrachtet. Als Kompromiss zur Parametrisierung des operationellen HBV-Modells herangezogen wurde von SMHI (2009) das kombinierte Kriterium

$$crit = 0.5 \cdot NSE + 0.5 \cdot logNSE - 0.1 \cdot \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i - y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i} \right| . \qquad 3.5$$

Durch Hinzunahme des letzten Terms wird dem (relativen) Mittelwertfehler ein stärkeres Gewicht eingeräumt. Nach Lindström (1997) führt die Verwendung des entsprechenden Wichtungsfakors 0,1 normalerweise zu einer deutlichen Verringerung des Volumenfehlers ohne die Nash-Sutcliffe-Effizienz zu stark zu beeinträchtigen.

Im vorliegenden Bericht wird die zeitliche Variabilität der Residuenvarianz dagegen explizit modelliert durch das Modell

$$\sigma_i = a + b \cdot \hat{y}_i \qquad 3.6$$

mit den freien Parameter a und b. Dieser lineare Zusammenhang hat sich in zahlreichen Studien (z. B. Renard et al. 2011) und Voruntersuchungen für diesen Bericht als ausreichend erwiesen.

Solche expliziten Modelle schaffen größere Freiräume als Residuentransformationen. Beispielsweise ließe sich bei Umsetzung der vorgestellten Methodik für den Main eine Zunahme der Unsicherheit der Abflussmessungen im Niedrigwasserbereich für stark staustufenbeeinflusste Pegel hinzufügen.

Gleichung 3.6 zur Berücksichtigung der Heteroskedastizität wird in die Skewed Exponential Power Distribution (SEPD) einbezogen (Schoups und Vrugt 2010). Die SEPD kann verschiedene Wölbungen und so z. B. die Form der Gleichverteilung, der Normalverteilung sowie der Laplace-Verteilung annehmen. Neben den genannten symmetrischen Formen sind auch extrem links- oder rechtsschiefe Formen möglich. Durch Verwendung dieser flexiblen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird die Gefahr einer Verfälschung der Optimierungsergebnisse durch falsche Verteilungsannahmen verringert. Die Definition der SEPD ist sehr umfangreich, weshalb auf eine Angabe der entsprechenden Formeln verzichtet wird.

Die beiden beschriebenen Kalibrierungskriterien werden im Folgenden mit ND-hom und SEPD-het bezeichnet.

3.7.2 Validierkriterien

Die Modellkalibrierung erfolgt jeweils anhand eines einzelnen statistisch basierten Kriteriums (entweder ND-hom oder SEPD-het). Für die Validierung werden dagegen mehrere, leichter interpretierbare Kriterien herangezogen.

Hierbei wird versucht ein gewisses Maß an Unabhängigkeit von den Kalibrierkriterien herzustellen. Beispielsweise scheidet die NSE als mögliches Validierkriterium aus, weil ein hinsichtlich ND-hom optimaler Parametersatz zwangsläufig auch hinsichtlich NSE optimal ist, ein hinsichtlich SEPD-het – trotz zutreffenderer Verteilungsannahmen – dagegen nicht (vgl. Abschnitt 3.7.1).

Aufgrund ihrer häufigen Verwendung in der hydrologischen Modellierung dient die NSE aber dennoch als Ausgangspunkt der folgenden Überlegungen: Gupta et al. (2009) zeigen, dass sich die NSE darstellen lässt über

$$NSE = 2 \cdot \frac{\sigma_{\hat{y}}}{\sigma_y} \cdot r - \left(\frac{\sigma_{\hat{y}}}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{\mu_{\hat{y}} - \mu_y}{\sigma_y}, \qquad 3.7$$

mit μ und σ als arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung sowie r als dem Pearson-Korrelationskoeffizient der simulierten ($\hat{y}$) und gemessenen (y) Abflusswerte. Um die für die inhaltliche Interpretation problematische Interaktion der einzelnen Komponenten zu eliminieren, schlagen Gupta et al. (2009) die folgende auf der euklidischen Distanz basierende Alternativdefinition vor (Kling-Gupta-Effizienz):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{\hat{y}}}{\sigma_y} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\mu_{\hat{y}}}{\mu_y} - 1 \right)^2} \qquad 3.8$$

Um die KGE weiter von Verteilungsannahmen zu befreien und robuster zu gestalten, wird im vorliegenden Bericht unter Verwendung des Median (MED), des Medians der absoluten Abweichungen vom Median (MAD, mean absolute deviation) und des Spearman-Rankorrelationskoeffizienten (ρ) eine rangbasierte Abwandlung der KGE angewandt:

$$rKGE = 1 - \sqrt{(\rho-1)^2 + \left(\frac{MAD_{\hat{y}}}{MAD_y} - 1 \right)^2 + \left(\frac{MED_{\hat{y}}}{MED_y} - 1 \right)^2} \qquad 3.9$$

In den jeweils dargestellten Analysetabellen sind neben der rKGE auch deren einzelne Komponenten angegeben. Der Rankorrelationskoeffizient nach Spearman ist in Maß für die zeitliche Übereinstimmung von simuliertem und gemessenem Abfluss. Das Verhältnis

$$\beta = \frac{MAD_{\hat{y}}}{MAD_y} \qquad 3.10$$

quantifiziert das Zutreffen der simulierten Wasserbilanz und das Verhältnis

$$\alpha = \frac{MED_{\hat{y}}}{MED_y} \qquad 3.11$$

quantifiziert das Zutreffen der simulierten Abflussdynamik.

4 Analyse Ist-Zustand

In diesem Kapitel wird die Konzeption von HBV96 diskutiert und die Simulationsgüte der des operationellen HBV-Modells der BfG analysiert. Durch die anschließenden Neukalibrierungen der unmodifiziert in HydPy-H überführten Modellstruktur wird zum einen der Vergleichsrahmen für die Versuche der folgenden Kapitel gelegt und zum anderen nach Vereinfachungs- und Verbesserungspotenzialen innerhalb der bestehenden Modellstruktur gesucht.

4.1 Kurzcharakterisierung HBV96

Das Modell HBV wird seit Anfang der 1970er Jahre vom Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) entwickelt. Anlass war die Optimierung der Wasserkraftnutzung mit einem einfachen, problem- und datenadäquaten Tageswertmodell (Bergström und Forsman 1973). Details zur ursprünglichen Modellkonzeption sowie zur mit der Zeit zunehmenden Diversität der Anwendungszwecke finden sich in Bergström (1995).

Seit der umfassenden Überarbeitung des Modellkonzeptes durch Lindström et al. (1997) findet die Bezeichnung HBV96 Verwendung. Hierbei wurden beispielsweise eine Interzeptions-Routine in die Modellgleichungen aufgenommen und die Anzahl der Abflusskomponenten von drei auf zwei reduziert. Zudem wurde eine optionale, alternative Umsetzung des HBV-Sättigungsflächenansatzes implementiert (Bergström et al. 1997).

Abbildung 4.1 stellt die Anordnung der berücksichtigten Zustandsgrößen (Speicher) und deren Verknüpfungen durch Flussgrößen (Pfeile) dar. Anhand dessen wird hier ein grober Einblick in die Modellkonzeption gegeben. Detaillierte Beschreibungen ausgewählter, im Rahmen dieser Untersuchung relevanter Prozessumsetzungen finden sich in den folgenden Kapiteln, die der übrigen Prozesse in SMHI (2011) und Tyralla und Schumann (2013).

Alle Teileinzugsgebiete der Untersuchungsgebiete (siehe Abschnitt 3.3) sind im operationellen HBV der BfG ausschließlich in Zonen aufgeteilt, denen die Landnutzung „Field“ oder „Forest“ zugeordnet ist. Diese beiden Zonentypen sind strukturell identisch, weisen i. d. R. aber unterschiedliche Parameterwerte für die maximale Interzeptionskapazität (ICMAX) und den Grad-Tag-Faktor (CFMAX) auf. Üblicherweise wird ICMAX für „Forest“-Zonen aufgrund größerer Blattflächenindizes höher und CFMAX aufgrund der damit einhergehenden Beschattungszunahme kleiner angesetzt.

Niederschlag (P), der den als einfachen Grenzwertspeicher ausgebildeten Interzeptionsspeicher als Throughfall (TF) passiert, erreicht anteilig je nach Temperatur den festen (SP) oder flüssigen (WC) Anteil der Schneedecke. Durch Schmelzen (MELT) kann SP in WC übergehen und durch Gefrieren (REFR) WC in SP. Übersteigt WC die SP proportionale Wasserhaltekapazität der Schneedecke bzw. ist keine Schneedecke vorhanden, wird das überschüssige Wasser als potenzielle Infiltration (IN) an das Bodenmodul weitergereicht.

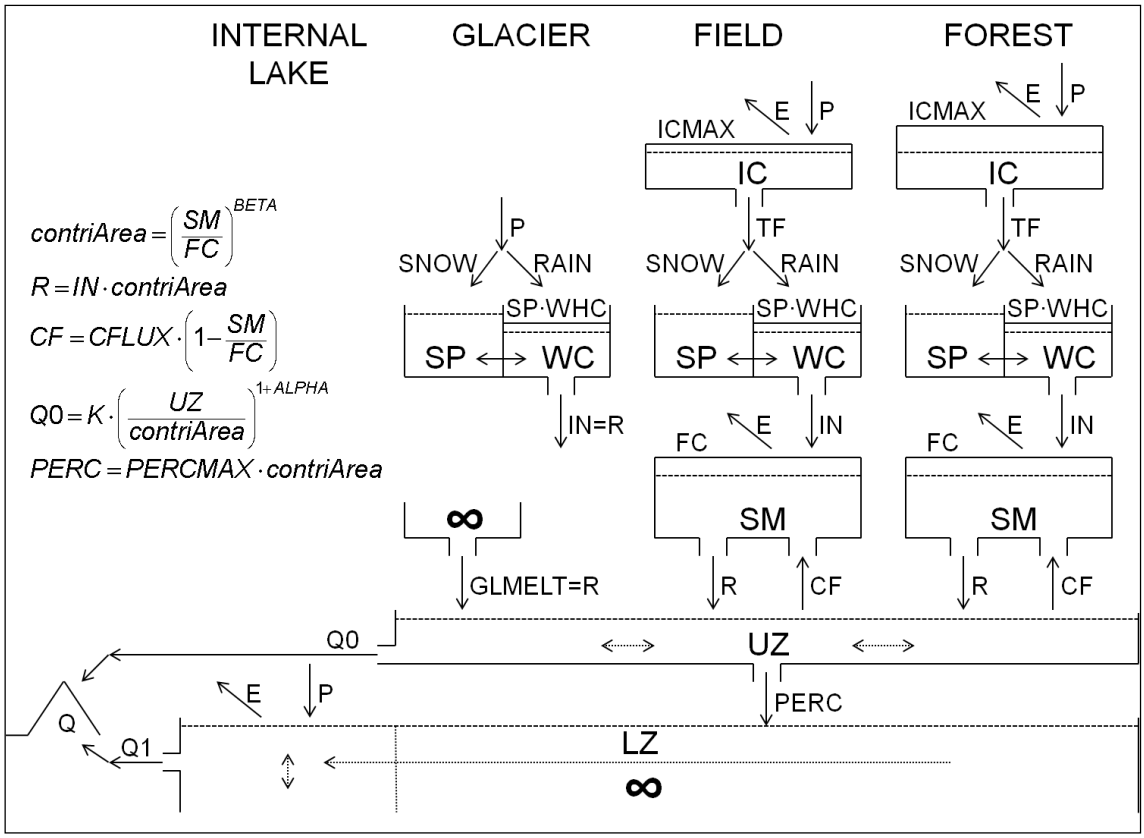

Abbildung 4.1: Schematische Skizze eines Teilgebietes nach HydPy-H

Die Abflussbildung ist (neben der normwertbasierten Bestimmung der potenziellen Verdunstung) eine der signifikanten Eigenständigkeit von HBV96. Potentieller Abfluss (R) tritt entsprechend einem Abflussbeiwert-Ansatz nur bei Vorhandensein potentieller Infiltration (IN) auf, also ausschließlich während Niederschlags- oder Schneeschmelzphasen. Der Abflussbeiwert steht i. d. R. in nichtlinearer Abhängigkeit zur Bodenfeuchte (SM). Somit lässt sich das Bodenmodul als reiner Sättigungsflächenansatz auffassen.

R erreicht zunächst den „upper zone layer“ (UZ) und kann wieder kapillar aufsteigen (CF) oder weiter in die „lower zone layer“ (LZ) perkolieren (PERC). Sowohl UZ als auch LZ sind teilgebietsweite Größen, wohingegen das Bodenmodul samt der vorgelagerten Komponenten zonal differenziert zum Einsatz kommt. Die schnelle Abflusskomponente (Q0) steht in i. d. R. nichtlinearem Zusammenhang mit UZ, die langsame Abflusskomponente (Q1) steht in linearem Zusammenhang mit LZ. In Bergström et al. (1997) wurden versucht, die mit UZ und LZ verbundenen Prozesse mit dem Sättigungsflächenansatz des Bodenmoduls zu homogenisieren. Die resultierenden Gleichungen sind, da sie von der offiziellen Dokumentation SMHI (2011) abweichen, in Abbildung 4.1 enthalten.

Umfassende Diskussionen des Bodenmoduls sowie des Grundwassers bzw. der Abflusskonzentration finden sich in Kapitel 5.

Der finale Gebietsabfluss (Q) wird – zur zusätzlichen Berücksichtigung der Abflusskonzentrationsprozesse – durch einen Dreiecks-Unit-Hydrograph verzögert. Hier liegt die einzige Abweichung vom sonst vorliegenden Differenzialgleichungs-Charakter von HBV96 vor (Tyralla und Schumann 2014).

4.2 Simulationsgüte der operationellen HBV-Parametrisierung

Dieser Abschnitt diskutiert die Simulationsgüte von HydPy-H, betrieben mit dem operationellen HBV-Parametersatz. Unterschiede zwischen den Implementierungen des HBV-Konzeptes in HydPy sowie im Integrated Hydrological Modelling System des SMHI erscheinen hierbei irrelevant (Tyralla und Schumann 2013). Vergleiche mit den Ergebnissen der folgenden Kapitel sind aufgrund unterschiedlicher zugrundeliegender Kalibrierstrategien aber mit Vorsicht zu ziehen (vgl. Abschnitt 3.6 und SMHI 2009). Neben einigen Unterschieden in den Parameterspezifikationen (siehe Abschnitt 4.3.1) und in der Datengrundlage ist insbesondere der abweichende Kalibrierzeitraum von 2001 bis 2007 zu nennen. Dieser ist zwei Jahre länger und umfasst auch den ersten Validierzeitraum des vorliegenden Berichtes.

Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.3 quantifizieren, entsprechend den Definitionen in Abschnitt 3.7, die Simulationsunsicherheit für den oberen Neckar, die Lahn und die Nahe. Da dem von SMHI (2009) verwendeten Gütekriterium (Gleichung 3.5) keine Verteilungsannahme zugrunde liegt, lässt sich kein „Likelihood-Maß“ wie ND-hom oder SEPD-het angeben.

Erste Auffälligkeit ist die große Variation aller Gütemaße für die verschiedenen Zeiträume. Dies gilt auch für konventionelle Kriterien wie die NSE (nicht dargestellt). Hierbei besteht ein enger Zusammenhang mit der Variation der jeweils dominanten hydrologischen Prozesse (s. u.). Ein zusätzlicher Einfluss der Qualität der verwendeten Zeitreihen ist nicht auszuschließen (vgl. Abschnitt 3.2).

In allen Fällen liegen Überschätzungen des Medians vor (β größer eins). Diese sind insbesondere im Niedrigwasserbereich stark ausgeprägt. Die mittels MAD abgeschätzte Streuung ist oftmals zu groß (α größer eins). Mit der Aufteilung der Gesamtstreuung der Abflussmessungen in die drei Abflussbereiche sinkt die durch die Simulation erklärte Streuung, wovon der Mittelwasserbereich am stärksten betroffen ist (ρ kleiner eins).

Im Vergleich der Untersuchungsgebiete ist der viel kleinere rangbasierte KGE-Wert für die Nahe auffällig – trotz besserer zeitlicher Übereinstimmung von Simulation und Messung, gemessen an ρ. Ursache ist die große Überschätzung sowohl der Lage als auch der Streuung. Im Vergleich hierzu fallen die in SMHI (2009) dokumentierten und durch eigene Rechnungen verifizierten Gütekriterien für die Nahe positiv aus. Es zeigt sich, dass ein anderer „Blickwinkel“ auf die Simulationsgüte in Form eines variierten mathematischen Gütekriteriums durchaus als Validierung verstanden werden kann, der beispielsweise zeitlich übertragbare Fehlerkompensationen aufdecken kann.

Tabelle 4.1: Gütekriterien, Operationelle Parametrisierung, Oberer Neckar

	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	0.20	1.62	1.50	0.93
2005 - 2009	0.73	0.97	0.78	0.84
2010 - 2013	0.80	1.16	1.00	0.88
gesamt	0.80	1.10	0.92	0.84
Q < MQ/2	0.26	1.34	1.49	0.55
MQ/2 < Q <MQ	0.30	1.10	1.49	0.51
MQ < Q	0.55	0.94	1.23	0.62

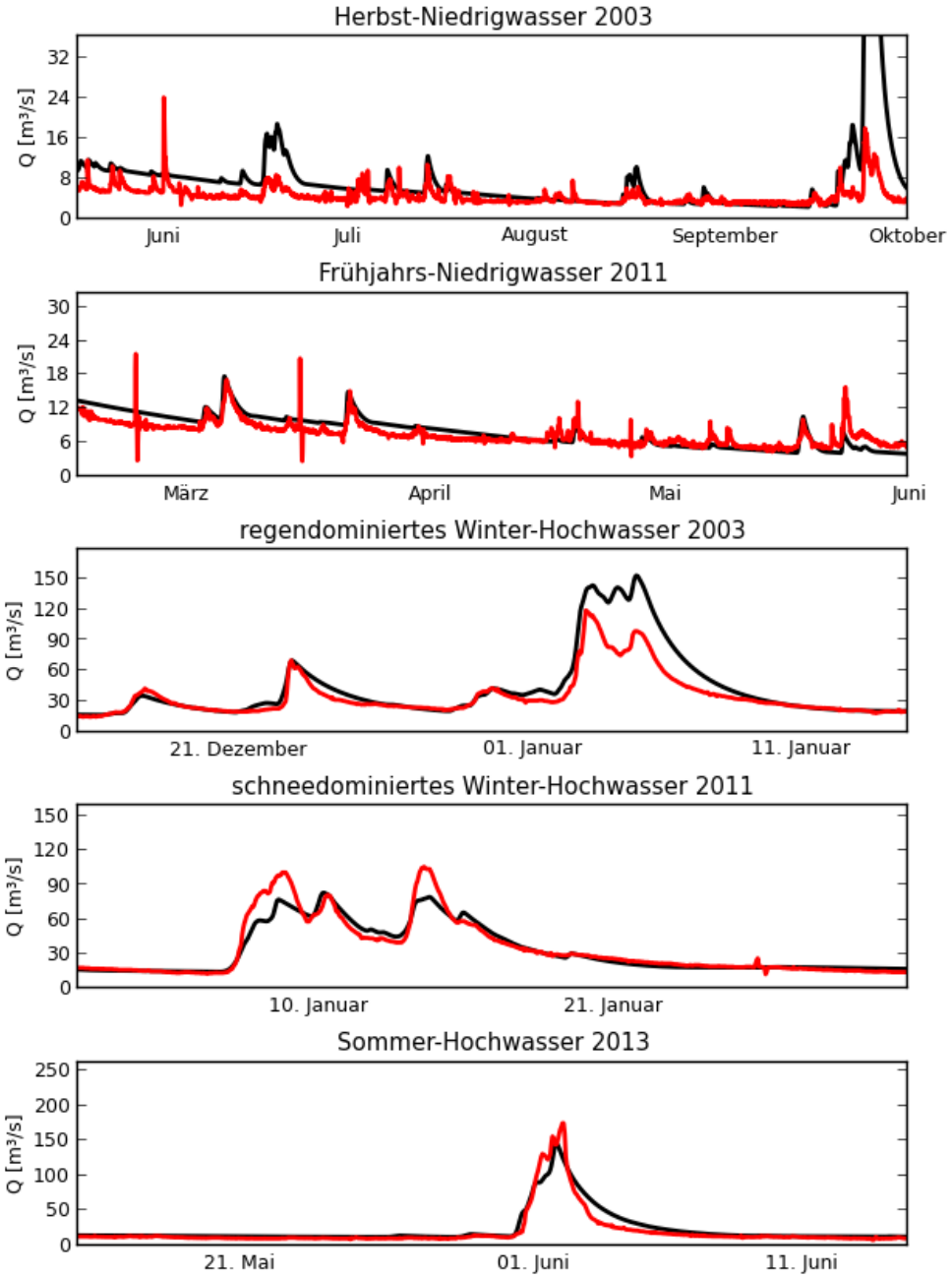

Abbildung 4.2: Extremereignisse, Operationelle Parametrisierung, Oberer Neckar

Tabelle 4.2: Gütekriterien, Operationelle Parametrisierung, Lahn

	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	0.62	1.22	1.29	0.88
2005 - 2009	0.82	1.07	0.90	0.87
2010 - 2013	0.65	1.27	1.19	0.89
gesamt	0.75	1.19	1.10	0.87
Q < MQ/2	0.22	1.20	1.61	0.56
MQ/2 < Q <MQ	0.18	1.12	1.52	0.37
MQ < Q	0.72	0.87	0.96	0.76

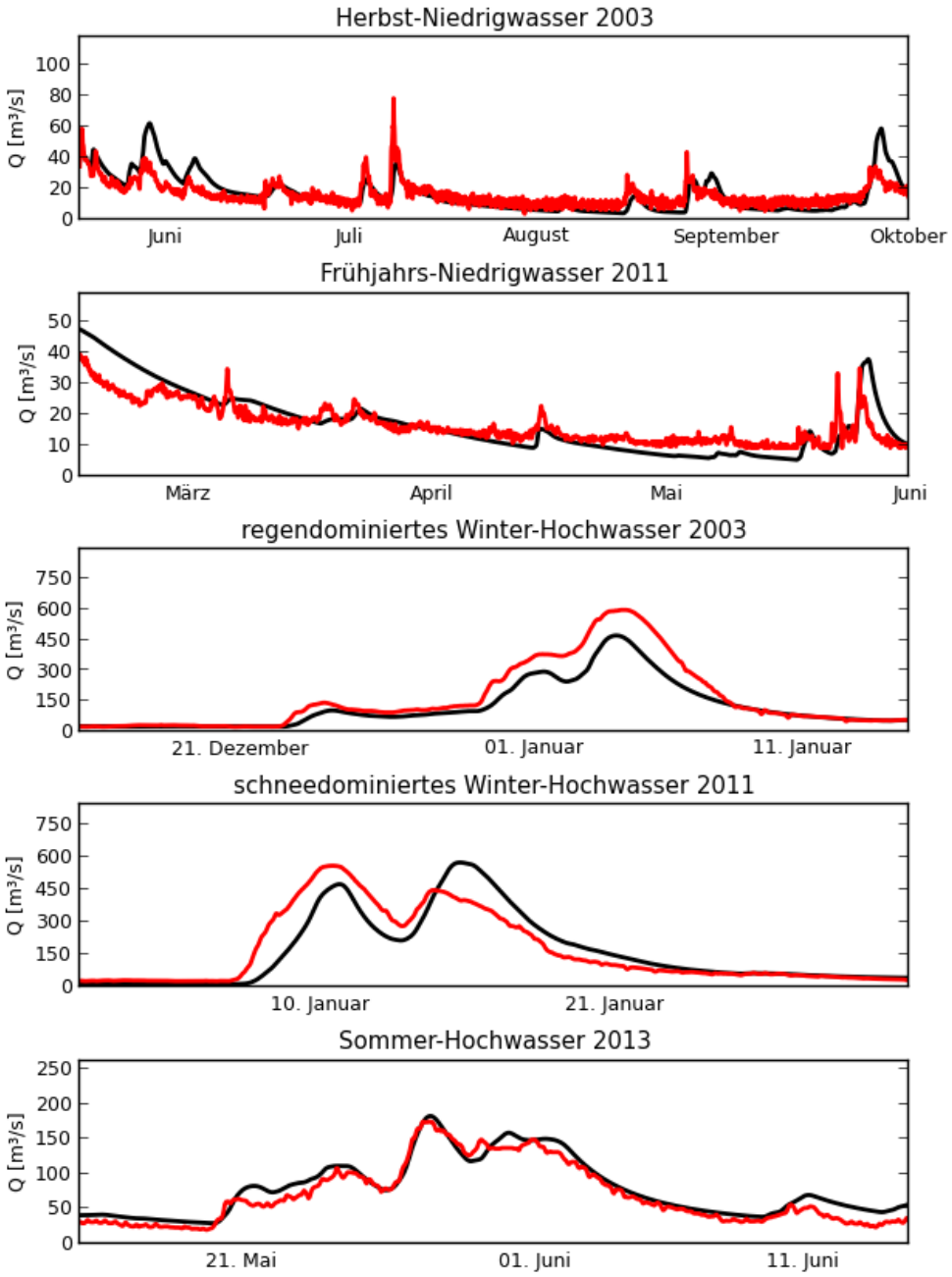

Abbildung 4.3: Extremereignisse, Operationelle Parametrisierung, Lahn

Tabelle 4.3: Gütekriterien, Operationelle Parametrisierung, Nahe

	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	0.15	1.52	1.67	0.95
2005 - 2009	0.18	1.59	1.55	0.86
2010 - 2013	0.64	1.30	1.18	0.93
gesamt	0.37	1.47	1.41	0.90
Q < MQ/2	0.09	1.44	1.75	0.74
MQ/2 < Q <MQ	0.08	1.33	1.66	0.45
MQ < Q	0.78	1.02	0.99	0.78

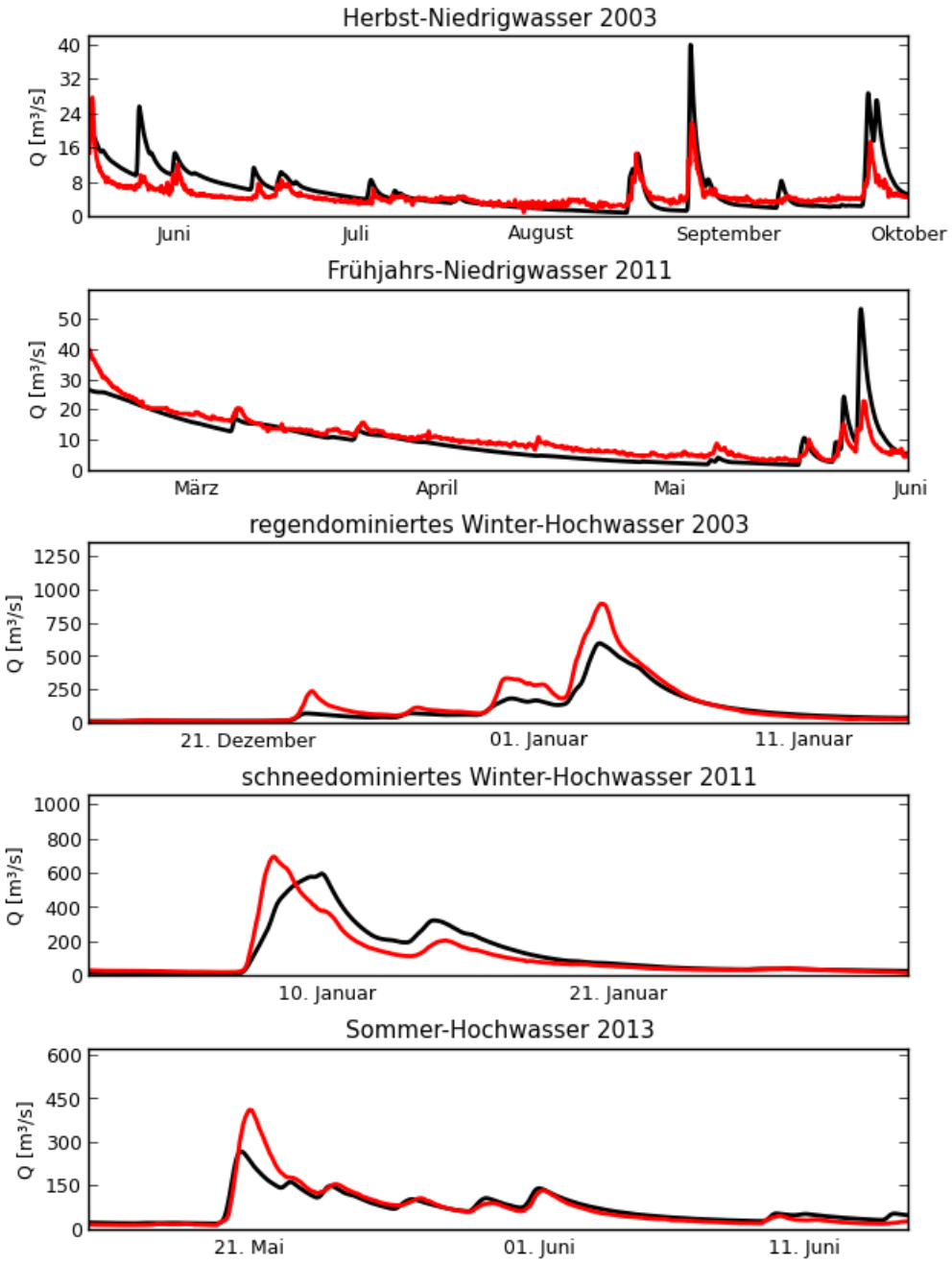

Abbildung 4.4: Extremereignisse, Operationelle Parametrisierung, Nahe

Abbildung 4.2 bis Abbildung 4.4 vergleichen den jeweils am Gebietsauslass gemessenen und simulierten Abfluss. Da bereits die tabellierten Güterkriterien in starker Abhängigkeit zum gewählten Zeitraum stehen, gilt dies erst recht für visuelle Eindrücke der Simulationsgüte einzelner Ereignisse (Abschnitt 3.5). Dennoch lassen sich einzelne systematische Muster identifizieren. So zeigt sich am Ende jeder Niedrigwasserperiode eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Unterschätzung des Abflusses und daran anschließend eine extreme Überschätzung des die Niedrigwasserperiode beendenden Ereignisses. Datenfehler scheinen aufgrund der Wiederholung des Musters unwahrscheinlich, statt dessen ist eine in der Modellstruktur oder -parametrisierung begründete Ursache anzunehmen.

4.3 Neukalibrierung

Die neue Parametrisierung der unmodifizierten Struktur von HydPy-H dient als Referenz für die folgenden Untersuchungen. Zudem wird geprüft, ob sich ohne signifikante Qualitätseinbußen auf den erweiterten Sättigungsflächenansatz sowie den Dreiecks-Unit-Hydrograph verzichten lässt (vgl. Abschnitt 4.1). Beide Ansätze weichen in verschiedener Hinsicht von der allgemeinen HBV-Konzeption ab und können bestimmte Anwendungen erschweren. Im Fokus steht der erweiterte Sättigungsflächenansatz, der in Abschnitt 5.2 eingehender diskutiert wird.

4.3.1 Versuchsspezifikationen

Die Kalibrierungen sind entsprechend der in Abschnitt 3.6 definierten Strategie umgesetzt. Für jedes der drei Untersuchungsgebiete wird sowohl ein hinsichtlich ND-hom als auch hinsichtlich SEPD-het optimaler Parametersatz gesucht. Zudem wird jeweils unter Aktivierung und unter Deaktivierung der RESPAREA-Option, also mit und ohne erweiterten Sättigungsflächenansatz, kalibriert. Es ergeben sich 12 Kombinationen mit jeweils 30 Optimierungsläufen.

Die Werte der fixierten Parameter und die Spannen der freigegebenen Parameter orientieren sich an SMHI (2009) und SMHI (2011). Soweit möglich werden die folgenden Festlegungen auch in den übrigen Kapiteln beibehalten.

Die Korrekturfaktoren für den Niederschlag (PCORR) und die potenzielle Verdunstung (ECORR) werden beide im konservativen Intervall [0.8, 1.2] freigegeben. Zur Berücksichtigung systematischer Niederschlagsmessfehler und deren stärkerer Ausprägung bei Schneefall (Richter 1995) werden die separaten Korrekturfaktoren für flüssigen (RFCF) und festen (SFCF) Niederschlag auf 1.1 und 1.2 fixiert. Die Gesamtkorrektur des Niederschlages bewegt sich damit etwa zwischen ca. 90 % und 135 %. In SMHI (2009) werden dagegen PCORR sowie ECORR fixiert und RFCF sowie SFCF freigegeben. Die zwischen PCORR und ECORR zu erwartende Interaktion wird in dieser Untersuchung aber als weniger problematisch erachtet als die Gefahr, SFCF im Falle zu weniger Schneeereignisse im Kalibrierungszeitraum mit einem unplausiblen Wert zu belegen.

Die übrigen Parameter zur Berechnung der potenziellen Verdunstung (ECALT, EPF, ETF) werden auf die in SMHI (2011) gegebenen Standardwerte (0.1, 0.02, 0.1) gesetzt. Der Reduktionsparameter ERED ist in SMHI (2009) auf 0.0 gesetzt. Damit nimmt die aktuelle Verdunstung an feuchten Tagen den zweifachen Wert der potenziellen Verdunstung an – zur einen Hälfte aus dem Interzeptionsspeicher, zur anderen aus dem Bodenspeicher. In dieser Untersuchung wird ERED auf 0.5 gesetzt, womit die Bodenverdunstung so gedeckelt ist, dass maximal das Anderthalbfache der potenziellen Verdunstung auftritt.

Zur zonalen Höhenkorrektur der Temperatur wird TCALT auf den empirisch fundierten Wert 6 °C/km gesetzt. Da der noch sicherere, aber aufgrund seiner Sensitivität dennoch kritische Temperaturgrenzwert für Schneefall (TT) auf 0 °C fixiert wird (im Gegensatz zu SMHI 2009), wird der entschärfende Übergangsintervall-Parameter (TTINT) mit 4 °C auf das Doppelte des Standardwertes gesetzt.

Die relative Wasserhaltekapazität (WHC) und der Gefrierfaktor (CFR) werden statt der Standardwerte von 0.1 und 0.05 auf die Werte 0.4 und 0.1 gesetzt. Wenigstens ersteres erscheint physikalisch plausibler (vgl. Bertle 1966). Der Grad-Tag-Faktor (CFMAX) wird vergleichbar SMHI (2009) im Intervall [2.0, 7.0] mm/°C/d kalibriert. Der jeweilige Wert wird für Zonen vom Typ „Field“ um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöht und für alle „Forest“-Zonen um den Faktor $1/\sqrt{2}$ verringert (vgl. Abschnitt 4.1).

Die landnutzungsabhängige Interzeptionskapazität sowie die bodenartabhängige Feldkapazität aller Zonen des operationellen HBV-Modells werden beibehalten. Wie in SMHI (2009) wird der Standartwert des Linearparameters (LP) zur Modifikation der Bodenverdunstung auf den Standardwert 0.9 gesetzt und die maximale kapillare Aufstiegsrate (CFLUX) auf 0 mm/d. Die Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs führt – nach der Vorerfahrung der Verfasser – eher zur Erschwerung der Parameteroptimierung als zur Erhöhung der resultierenden Simulationsgüte. Der Nichtlinearitätsparameter der Bodensättigung (BETA) wird mit gegenüber SMHI (2009) erhöhter oberer Grenze im Intervall [1.0, 10.] freigegeben.

Der Nichtlinearitätsparameter der Direktabflusskonzentration (ALPHA) wird im Gegensatz zu SMHI (2009) freigegeben für das konservative Intervall [0.0, 2.0]. Statt der üblichen indirekten Parametrisierung der Direktabfluss-Speicherkonstante des upper zone-layer (K) mittels KHQ (siehe Tyralla und Schumann 2013), wird K direkt im Intervall $[10^{-3}, 10^{-1}]\,h^{-1}$ kalibriert. Für die Basisabfluss-Speicherkonstante des lower zone-layer wird mit $[5\cdot10^{-3}, 5\cdot10^{-2}]\,d^{-1}$ ein Intervall definiert, das im Vergleich zu SMHI (2009) enger ausfällt und als plausibler angesehen wird.

Die obere Intervallgrenze der maximalen Perkolationsrate (PERCMAX) wird in Abhängigkeit von der Aktivierung oder Deaktivierung der RESPAREA-Option unterschiedlich gesetzt. Bei Deaktivierung erfolgt die Kalibrierung im Intervall [0.1, 5.0] mm/d, bei Aktivierung im Intervall [0.1, 10.0] mm/d. Diese Unterscheidung dient als Ausgleich für die bodenfeuchteabhängige Reduktion der Perkolation bei Verwendung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes (siehe Abschnitt 5.2.1).

Die bislang aufgeführten Parameterspezifikationen werden für alle Untersuchungsgebiete einheitlich gehandhabt. Die Basislänge des gleichschenkligen Unit-Hydrograph-Dreiecks (MAXBAZ) wird dagegen für die Untersuchungsgebiete Oberer Neckar und Lahn auf 0.0 d gesetzt. So wird geprüft, ob auch unter Wegfall des Unit-Hydrograph akzeptable Abflussdynamiken zu erzielen sind. Für die Nahe werden dagegen die MAXBAZ-Werte des operationellen HBV-Modells beibehalten, um geplante Vergleichsrechnungen mit den Methoden von Lisniak et al. (2014) zu erleichtern.

Der Wellenablauf kommt nur in den Untersuchungsgebieten Lahn und Nahe zum Tragen. Der strekkenabhängige Verzögerungsparameter (LAG) des operationellen HBV-Modells wird beibehalten, der Abflachungsparameter (DAMP) wird im maximalen Intervall [0.0, 1.0] modifiziert.

4.3.2 Analyse

Abbildung 4.5 trägt für die 30 Kalibrierläufe das Likelihood-Kriterium L (hier ND-hom) gegen alle für die Kalibrierung freigegebenen Modellparameter auf. In dieser und den folgenden Abbildungen zur Parameterunsicherheit ist die Abszisse jeweils auf das Kalibrierintervall begrenzt. Die Ordinate umfasst alle Werte größer $\max(L) - 0.1$ (schwarze Punkte). Parametersätze mit Werten kleiner $\max(L) - 0.1$ werden auf die Abszisse projiziert (rote Punkte). Grün hervorgehoben ist der entsprechend L für den Kalibrierzeitraum beste Parametersatz, welcher in einigen Analysen gesondert betrachtet wird.

Für den Oberen Neckar scheint sowohl bei Verwendung von ND-hom (Abbildung 4.5) als auch von SEPD-het (Abbildung 4.6) eine akzeptable Näherung des globalen Optimums erreicht. Die mit SEPD-het erzielten Likelihood-Werte fallen deutlich höher aus. Die einfacheren, von ND-hom implizierten statistischen Annahmen treffen folglich nicht zu. Zudem werden viele Parameterwerte unter Verwendung von SEPD-het deutlicher identifiziert (geringere Streuung auf der Abszisse). Die besten Parameterwerte unterscheiden sich zum Teil extrem. Diese liegen sowohl für ND-hom als auch für SEPD-het mehrfach an der als plausibel angesehenen Parametergrenze, was auf daten- und modellstrukturelle Probleme hindeuten kann.

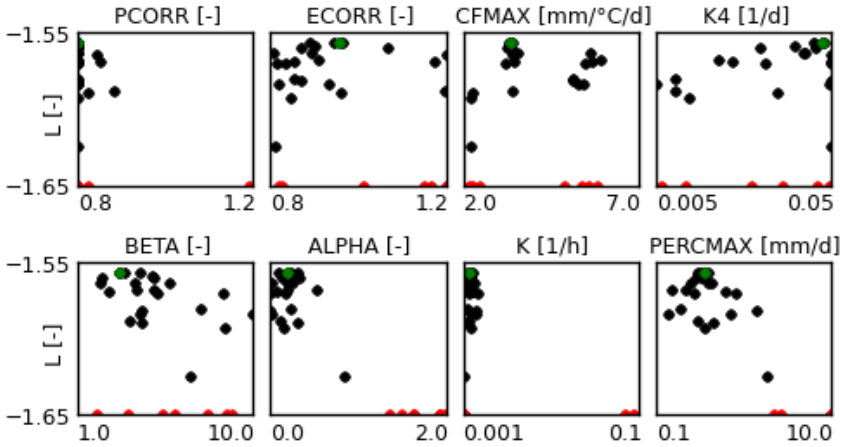

Abbildung 4.5: Parameterunsicherheit, Oberer Neckar, ND-hom, HydPy-H, RESPAREA=1

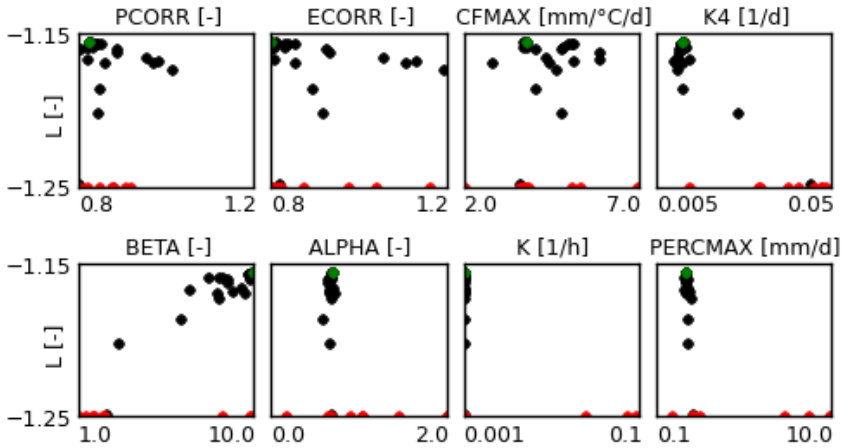

Abbildung 4.6: Parameterunsicherheit, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

Die beiden folgenden Tabellen bewerten die Simulationsgüte des jeweils besten Parametersatzes der Kalibrierperiode. Die mit SEPD-het bestimmten Likelihood-Werte (Tabelle 4.5) fallen auch in den Validierungsperioden deutlich positiver aus als die mit ND-hom ermittelten (Tabelle 4.4). Die Übertragungsmöglichkeit der zusätzlich bestimmten statistischen Verteilungsparameter scheint somit gegeben.

Auch die übrigen Gütekriterien sind für SEPD-het mehrheitlich näher am Optimum. So fällt die rangbasierte Kling-Gupta-Effizienz für SEPD-het mit 0.78 deutlich höher aus als für ND-hom mit 0.60. Die Verwendung statistisch plausiblerer Verteilungsannahmen bewirkt für den Oberen Neckar somit auch eine Verbesserung der von Verteilungsannahmen befreiten Maßzahlen.

Abbildung 4.7 zeigt den an Pegel Horb gemessenen Abfluss in rot und den mit dem Parametersatz der Kalibrierperiode simulierten Abfluss in schwarz. Das graue Band entspricht dem 5 %- sowie dem 95 %-Quantil der verwendeten Verteilungsfunktion, hier der (homoskedastischen) Normalverteilung. Zur Bewertung der Parameterunsicherheit sind zusätzlich in Grün die Ganglinien der neun nächstbesten Parametersätze dargestellt.

Die Unsicherheitsbänder sollten im Idealfall in allen Abflussbereichen 90 % der gemessenen Werte umfassen. Dies ist, insbesondere aufgrund der vernachlässigten Heteroskedastizität, für ND-hom nicht der Fall (Abbildung 4.7). SEPD-het repräsentiert die tatsächliche Simulationsunsicherheit befriedigender (Abbildung 4.8).

Bezüglich der Übereinstimmung von simulierter und gemessener Ganglinie ergibt sich dagegen ein gemischtes Bild. Die auf ND-hom basierende Parametrisierung führt – wie bei reinen Fehlerquadrat-Ansätzen typisch – zu schlechten Niedrigwasseranpassungen. Die Ganglinien der Parametersätze nach SEPD-het sind sowohl beim Herbst-Niedrigwasser 2003 als auch beim Frühjahr-Niedrigwasser 2011 realistischer.

Bessere Übereinstimmungen von Simulation und Messung im Niedrigwasserbereich nach SEPD-het müssen durch schlechtere Übereinstimmungen in anderen Abflussbereichen (mit ggf. größeren Messunsicherheiten) kompensiert werden. Dies deutet sich zumindest beim regendominierten Winter-Hochwasser 2003 an: die auf SEPD-het basierenden Parametersätze überschätzen – im Vergleich zu den auf ND-hom basierenden Parametersätzen – sowohl Scheitel als auch Volumen extrem. Beim Sommer-Hochwasser 2013 sind dagegen die ND-hom-Parametersätze bezüglich dem Volumen und die die SEPD-het-Parametersätze bezüglich dem Scheitel vorteilhaft.

Das Winter-Hochwasser 2011 ist das erste Beispiel für einen markanten Effekt der Parameterunsicherheit entsprechend der angewandten Methodik. In Abbildung 4.5 und in abgeschwächter Form auch in Abbildung 4.6 kristallisieren sich zwei mit lokalen Optima verbundene Bereiche des Grad-Tag-Faktors (CFMAX) heraus. Diese zeigen sich als zwei grüne „Bündel“ simulierter Ganglinien in Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8. Offensichtlich ist der im Kalibrierungszeitraum marginal bessere SEPD-het-Parametersatz für dieses stark schneedominierte Validierungsereignis weniger geeignet, als die Parametersätze des anderen lokal optimalen CFMAX-Bereichs. Eine zu geringe Anzahl relevanter Schneeereignisse in der Kalibrierperiode kann als Ursache für diesen Fall von Parameterunsicherheit angesehen werden.

Zusammengefasst ist SEPD-het für den Oberen Neckar die zu favorisierende Likelihood-Funktion – insbesondere bei der Fokussierung auf schifffahrtsrelevante Niedrigwasserperioden. In ähnlicher Form bestätigt sich dies auch für die Lahn und die Nahe.

Tabelle 4.4: Gütekriterien, Oberer Neckar, ND-hom, HydPy-H, RESPAREA=1

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-2.05	0.16	1.41	1.73	0.87
2005 - 2009	-1.56	0.67	0.96	1.30	0.87
2010 - 2013	-1.53	0.48	1.11	1.49	0.88
gesamt	-1.64	0.60	1.07	1.37	0.85
Q < MQ/2	-1.37	-0.24	0.87	2.06	0.37
MQ/2 < Q <MQ	-1.43	-0.25	1.05	2.17	0.58
MQ < Q	-2.21	0.29	1.16	1.61	0.69

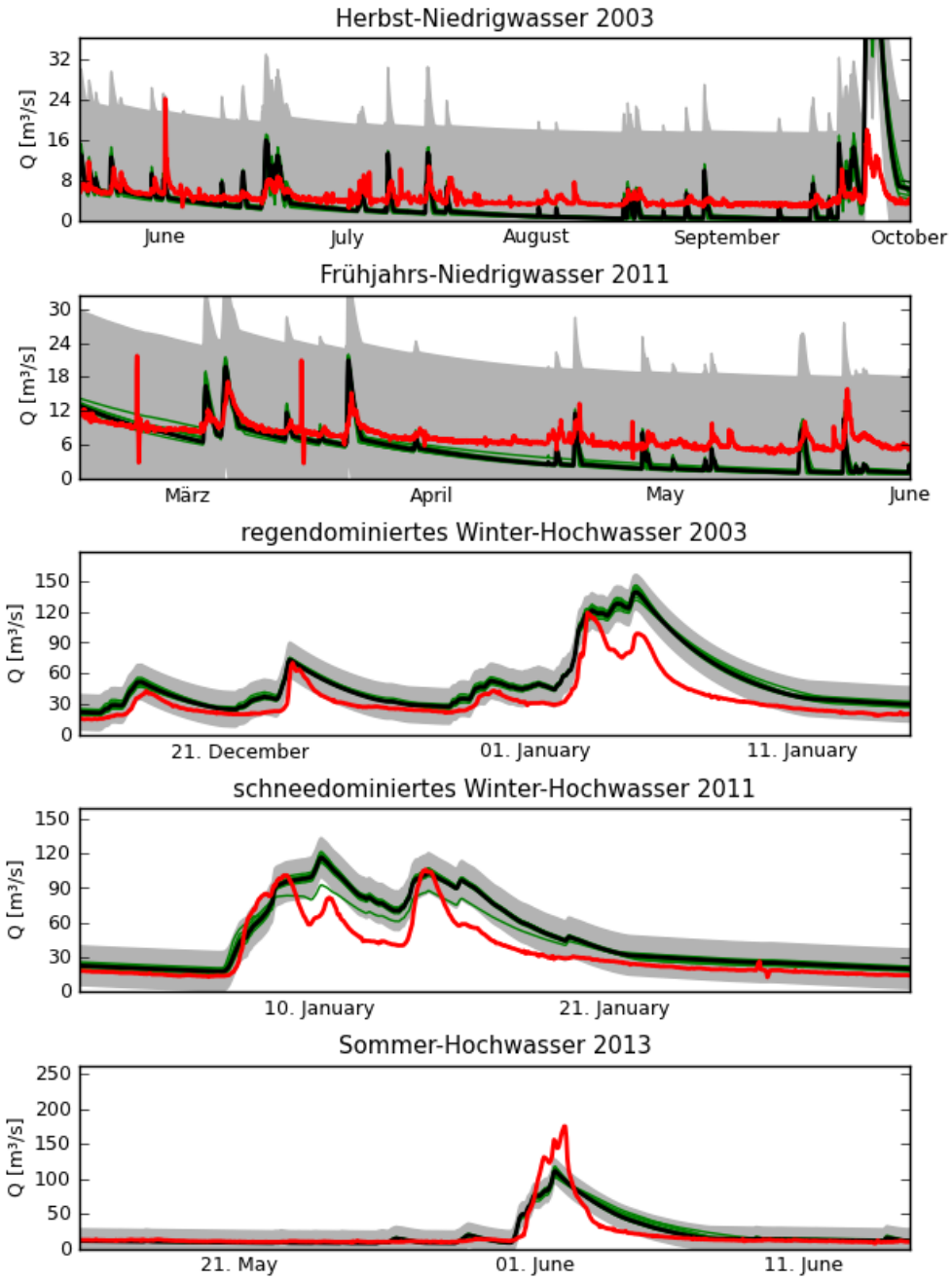

Abbildung 4.7: Extremereignisse, Oberer Neckar, ND-hom, HydPy-H, RESPAREA=1

Tabelle 4.5: Gütekriterien, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.48	0.22	1.60	1.48	0.91
2005 - 2009	-1.15	0.86	1.07	0.94	0.89
2010 - 2013	-1.16	0.75	1.21	1.06	0.89
gesamt	-1.21	0.78	1.18	1.02	0.87
Q < MQ/2	-0.88	0.20	1.30	1.64	0.62
MQ/2 < Q <MQ	-1.12	0.41	1.17	1.30	0.52
MQ < Q	-1.71	0.36	1.06	1.58	0.73

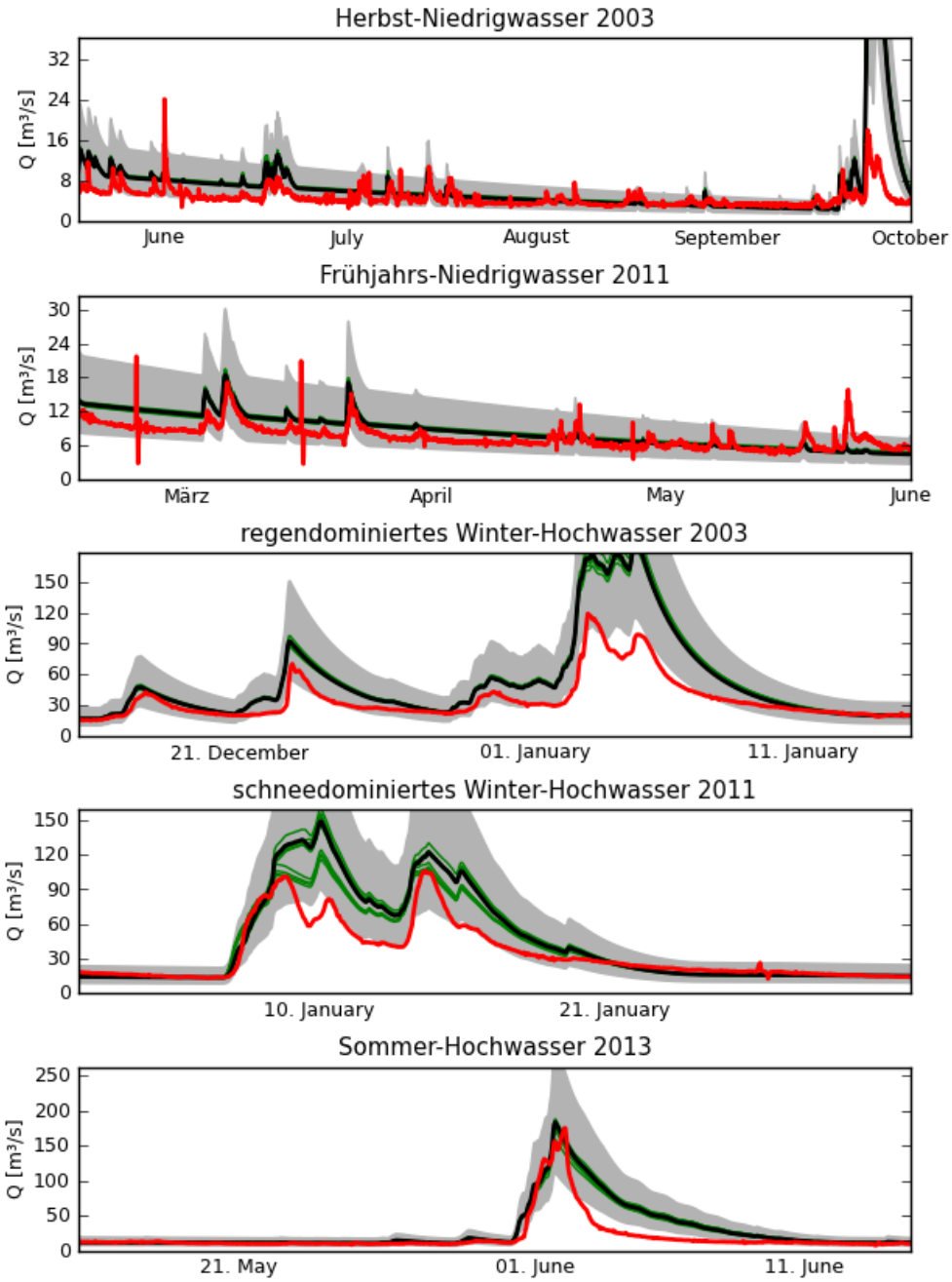

Abbildung 4.8: Extremereignisse, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

Im Gegensatz zum Oberen Neckar zeigen sich sowohl für die Lahn (Abbildung 4.9) als auch für die Nahe (Abbildung 4.10) große Parameterunsicherheiten. Ob eine gute Annäherung an das globale Optimum der Kalibrierperiode erzielt wurde, erscheint zweifelhaft. Wichtiger als eine weitere Verfeinerung der besten Parametrisierung ist aber die Identifikation der Ursache der Parameterunsicherheit.

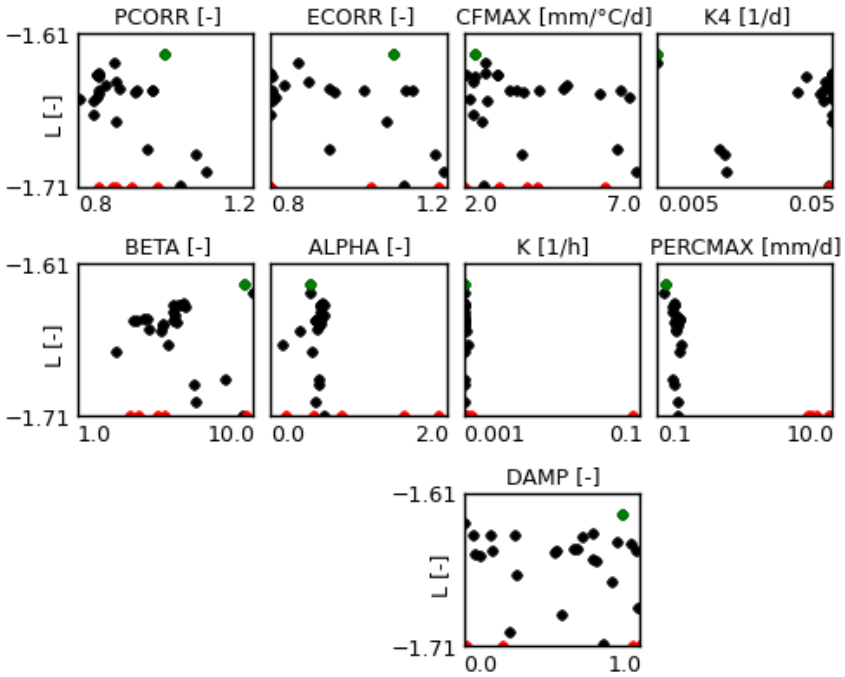

Abbildung 4.9: Parameterunsicherheit, Lahn, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

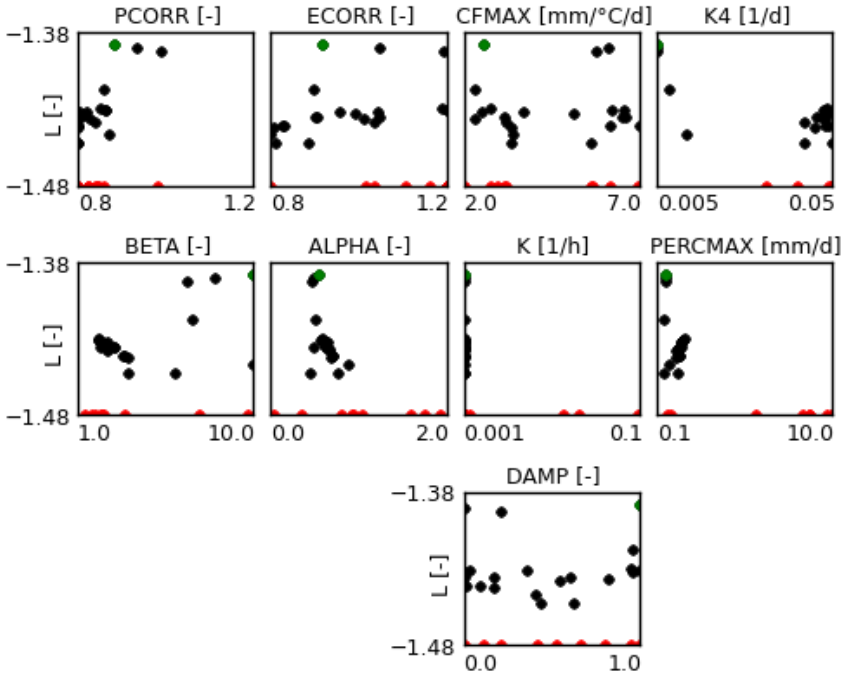

Abbildung 4.10: Parameterunsicherheit, Nahe, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

Tabelle 4.6: Gütekriterien, Lahn, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.68	0.58	1.11	1.37	0.85
2005 - 2009	-1.62	0.84	1.07	1.10	0.90
2010 - 2013	-1.70	0.84	1.07	1.10	0.90
gesamt	-1.66	0.78	1.09	1.17	0.89
Q < MQ/2	-1.29	0.54	1.05	1.12	0.56
MQ/2 < Q <MQ	-1.68	-0.14	1.06	1.98	0.43
MQ < Q	-2.18	0.45	1.20	1.44	0.75

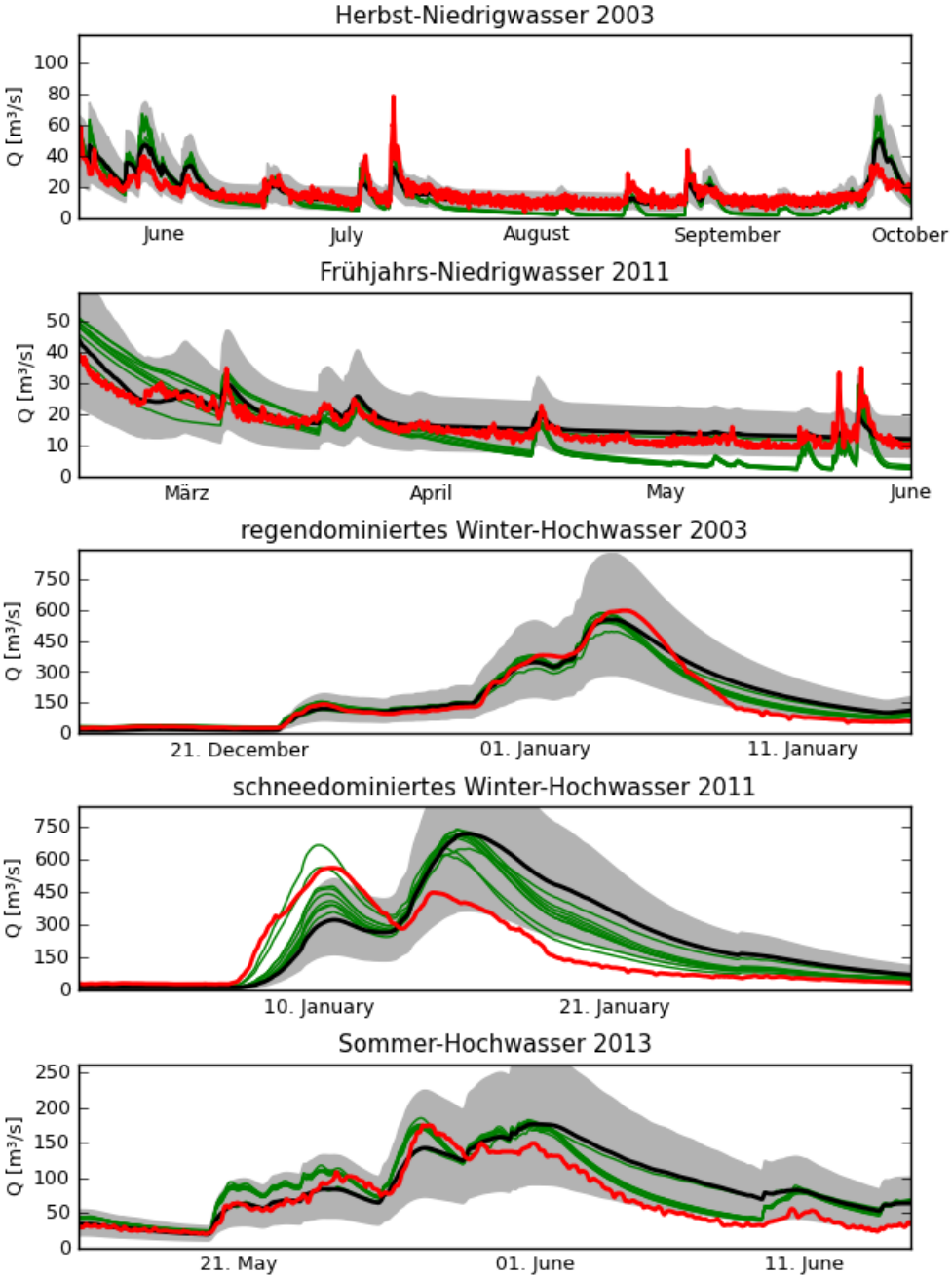

Abbildung 4.11: Extremereignisse, Lahn, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

Tabelle 4.7: Gütekriterien, Nahe, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.29	0.80	1.16	1.03	0.90
2005 - 2009	-1.39	0.76	1.11	1.14	0.83
2010 - 2013	-1.44	0.73	0.91	0.76	0.93
gesamt	-1.39	0.87	1.04	0.96	0.88
Q < MQ/2	-1.06	0.58	1.15	0.95	0.61
MQ/2 < Q <MQ	-1.47	0.12	0.98	1.71	0.48
MQ < Q	-1.98	0.48	1.24	1.42	0.82

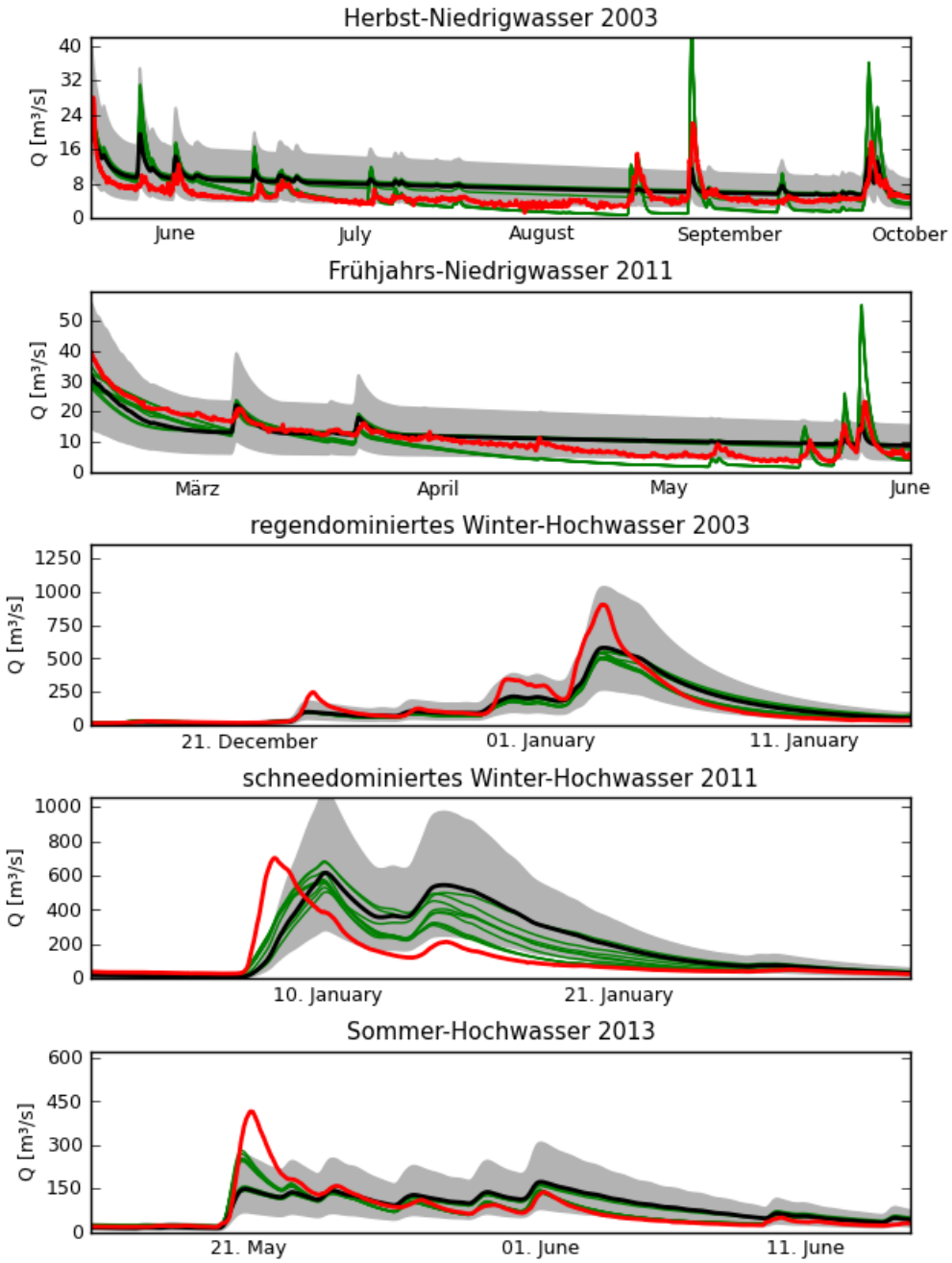

Abbildung 4.12: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=1

Beim Oberen Neckar handelt es sich um ein Kopfgebiet, Lahn und Nahe sind dagegen in vier bzw. drei Teilgebiete unterteilt. Dies wird nicht als direkte Ursache angenommen, ist aber als Effektverstärker nicht auszuschließen.

Die Betrachtung der 30 erzielten Parameterwerte der Basisabfluss-Speicherkonstante K4 zeigt für die Nahe (Abbildung 4.10) eine Gruppenbildungen an den beiden Rändern des Kalibrierintervalls. Dies ist ebenso für die Lahn der Fall (Abbildung 4.9), wobei sich hier noch eine dritte Gruppierung in der Intervallmitte andeutet. Dieses Muster von K4 ist insbesondere mit dem Abflussbildungsparameter BETA verknüpft.

Die durch SEPD-het definierte Fehleroberfläche scheint somit wenigstens zwei bzw. drei lokale Optima aufzuweisen. Dabei scheint der Kontraktionsbereich (unter Verwendung von BOBYQA) des höheren lokalen Maximums (kleine K4-Werte) kleiner zu sein, als der Kontraktionsbereich des kleineren lokalen Maximums (große K4-Werte).

In der graphischen Darstellung der Validierereignisse zeigen sich für die Lahn in Abbildung 4.11 und für die Nahe in Abbildung 4.12 die beiden lokalen Optima wiederum als zwei grüne „Bündel“ simulierter Ganglinien. Die Bündel für sich sind im Wesentlichen nur bei Präsenz von Schneeprozessen nennenswert aufgefächert. In der Identifizierbarkeit von CFMAX bestehen somit Parallelen zum Oberen Neckar.

Insbesondere für die Nahe zeigt sich eine deutliche Überlegenheit der Parametersätze mit kleinen K4-Werten im Niedrigwasserbereich und der Parametersätze mit großen K4-Werten im Hochwasserbereich. Dies deutet auf strukturelle Defizite von HydPy-H hin.

Der tabellarische Vergleich mit dem aktuellen operationellen Parametersatz (Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.3) fällt tendenziell zugunsten der neu gewonnen Parametrisierung (Tabelle 4.5 bis Tabelle 4.7) aus, insbesondere für die Nahe. Die rangbasierte Kling-Gupta-Effizienz sinkt im für beide Parametersätze unabhängigen Validierungszeitraum 2010-2013 für den Oberen Neckar von 0.80 auf 0.78, steigt für die Lahn aber von 0.65 auf 0.84 und für die Nahe von 0.64 auf 0.73.

Der graphische Vergleich ist weniger eindeutig. Im Niedrigwasserbereich zeigen sich teils Vorteile der neuen Parametrisierung. So tritt die Abschnitt 4.2 diskutierte Überschätzung der die Niedrigwasserperiode auflösenden Ereignisse seltener auf. In den Hochwasserphasen schneidet die neu gewonnene Parametrisierung dagegen etwas schlechter ab, insbesondere beim schneedominierten Winter-Hochwasser 2011 aufgrund der ungenauen Identifikation von CFMAX.

Tabelle 4.8: Gütekriterien, Nahe, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=0

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.24	0.67	0.90	0.70	0.90
2005 - 2009	-1.38	0.79	1.08	0.93	0.82
2010 - 2013	-1.42	0.65	0.83	0.71	0.92
gesamt	-1.37	0.73	0.96	0.77	0.88
Q < MQ/2	-1.03	0.40	1.05	0.52	0.65
MQ/2 < Q <MQ	-1.52	0.02	0.90	1.81	0.45
MQ < Q	-1.93	0.54	1.12	1.42	0.85

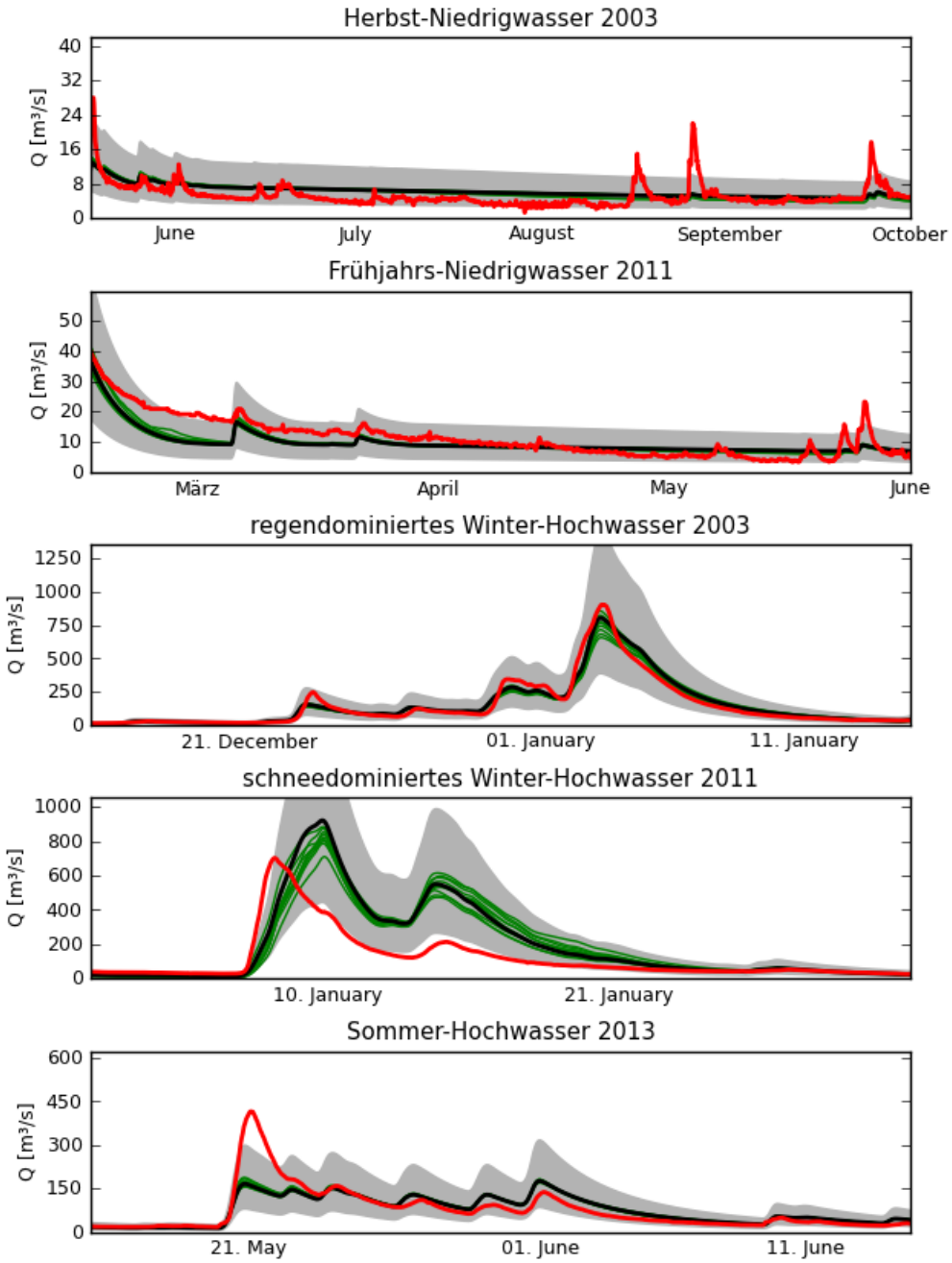

Abbildung 4.13: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=0

Die Frage, ob sich auch ohne Verwendung des Dreiecks-Unit-Hydrograph Parametrisierungen finden lassen, die mit der operationellen Parametrisierung qualitativ vergleichbar sind, lässt sich im Rahmen der diskutierten Ergebnisse bejahen.

Die Frage, ob sich der Einsatz des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes lohnt, ist anhand der durchgeführten Untersuchungen schwer zu beantworten. Nach den berechneten Gütekriterien geht die Auslassung des erweiterten Ansatzes, wenn überhaupt, nur mit geringen Nachteilen einher. Tabelle 4.8 zeigt dies exemplarisch für die Nahe (vgl. mit Tabelle 4.7).

Graphisch zeigen sich allerdings markante Unterschiede, wie ebenfalls nur exemplarisch für die Nahe dargestellt (Abbildung 4.13). So geht durch Deaktivierung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes die simulierte Abflussdynamik in den späteren Niedrigwasserphasen fast vollständig verloren, was sich mit den in SMHI (2009) diskutierten Ergebnissen deckt.

Auffällig ist das deutlich geringere Ausmaß an Parameterunsicherheit unter Verzicht auf den erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz. Für keines der Untersuchungsgebiete zeigt sich eine mit mehreren lokalen Optima verknüpfte Aufteilung der besten erzielten Parametersätze. Lediglich die mit der unbefriedigenden Identifikation von CFMAX verknüpfte Spreizung des einzelnen „Simulationsbündels“ beim schneedominierten Winter-Hochwasser 2011 bleibt erhalten.

Die Abbildungen zur Parameterunsicherheit, hier wiederum nur für die Nahe dargestellt (Abbildung 4.14), zeigen zwar ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Streuung auf der Abszisse. Aufgrund der Ähnlichkeit der korrespondierenden Ganglinien scheinen diese aber zumindest teilweise Kompensationseffekten geschuldet zu sein. Das globale Optimum scheint akzeptabel angenähert.

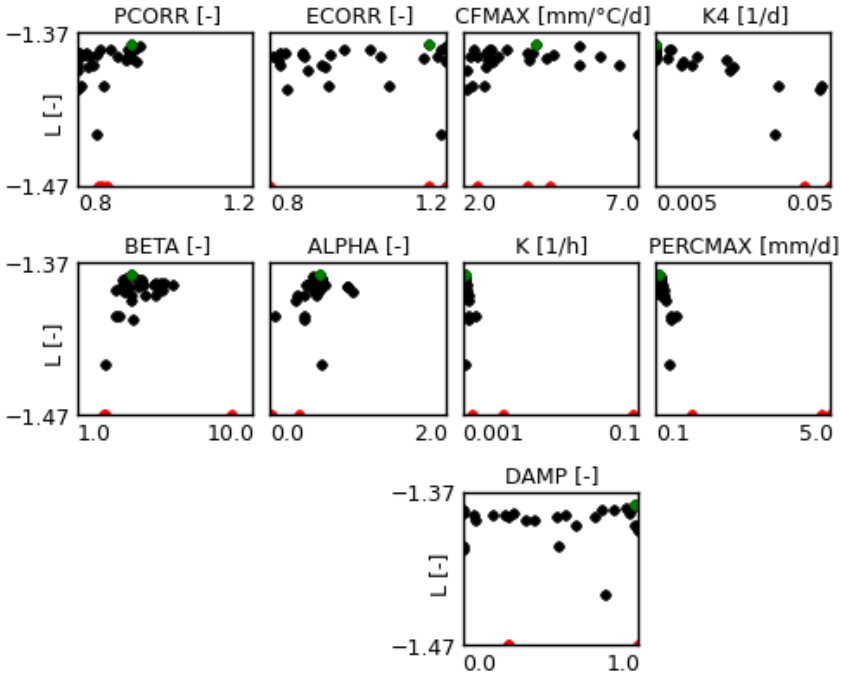

Abbildung 4.14: Parameterunsicherheit, Nahe, SEPD-het, HydPy-H, RESPAREA=0

Der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz bringt im Niedrigwasserbereich also durchaus die gewünschten Verbesserungen mit sich. Allerdings führt er auch zu Komplikationen, was im Abschnitt 5.2 eingehender diskutiert wird.

5 Untersuchungen zur Prozessabstraktion

Nach den in Kapitel 4 gewonnenen Einblicken in die Stärken und Schwächen der Konzeption von HBV96– insbesondere den erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz betreffend –, fasst dieses Kapitel ausgewählte modellstrukturelle Verbesserungspotenziale ins Auge.

5.1 Basisabfluss

Die langsame Abflusskomponente ergibt sich nach der HBV96-Konzeption aus dem Linearspeicher-Zusammenhang

$$Q1 = \max\left(K4 \cdot LZ;0\right), \qquad 5.1$$

der wegen der Doppelfunktion des lower zone layers (LZ) als begrenztem Grundwasserspeicher und unbegrenztem Seespeicher in eine Maximum-Funktion eingebettet ist (siehe Tyralla und Schumann 2013).

Verschiedentlich wurde untersucht, ob – aus modelltechnischer Sicht – nichtlineare Beziehungen den Basisabfluss eines Gebietes besser beschreiben (z. B. Fenicia et al. 2006). Derartige Fragen können nicht allgemeingültig, sondern immer nur im Rahmen der jeweils angewandten Modellkonzeption beantwortet werden. Hier wird insbesondere geprüft, ob die alternative Verwendung des nichtlinearen Zusammenhangs

$$Q1 = \max\left(K4 \cdot LZ^{(1+GAMMA)};0\right) \qquad 5.2$$

ein adäquates Mittel ist, um Schwächen von HydPy-H im Niedrigwasserbereich zu beheben.

5.1.1 Versuchsspezifikationen

Die alternative Gleichung 5.2 wurde in HydPy-H implementiert. Der neue Nichtlinearitäts-Parameter GAMMA wurde im Intervall [0.0, 1.0] zur Kalibrierung freigegeben. Die obere Grenze von 1.0 ist konservativ gewählt, um die Relation der Dynamiken von Q1 und Q0 zu gewährleisten. Alle übrigen Versuchsspezifikationen entsprechen denen von Abschnitt 4.3.1.

Um im Folgenden zwischen der Originalstruktur von HydPy-H (bzw. der Fixierung von GAMMA auf den Wert 0.0) und der modifizierten Struktur (mit zur Kalibrierung freigegebenem GAMMA) zu unterscheiden, wird die Abkürzung HydPy-Hγ eingeführt.

5.1.2 Analyse

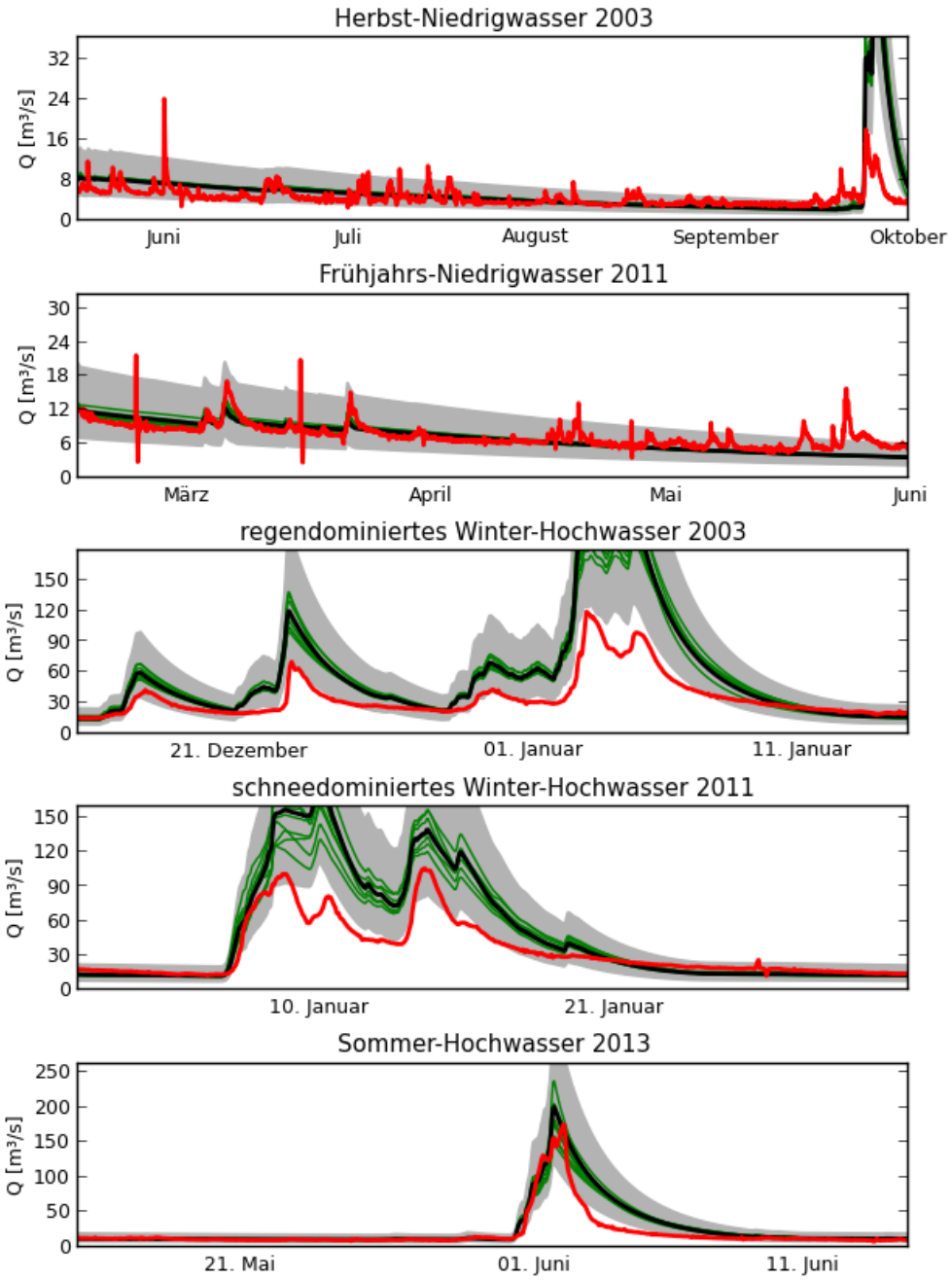

Abbildung 5.1: Extremereignisse, Oberer Neckar, ND-hom, HydPy-Hγ, RESPAREA=0

Da Gleichung 5.2 eine Verallgemeinerung von Gleichung 5.1 darstellt, müssen bei erfolgreicher Optimierung die mittels HydPy-Hγ in der Kalibrierperiode erzielten Likelihood-Werte größer oder gleich denen von HydPy-H sein. Dies ist im Rahmen der gegebenen Genauigkeiten durchweg der Fall, die Verbesserungen sind allerdings marginal. Die größte Steigerung des SEPD-het-Wertes von -1.61 auf -1.60 zeigt sich bei Deaktivierung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes für die Lahn. Da auch in anderen Teilzeiträumen und für andere Gütekriterien kaum größere Abweichungen auftreten, wird auf entsprechende tabellarische Darstellungen im Hauptteil des Berichtes verzichtet.

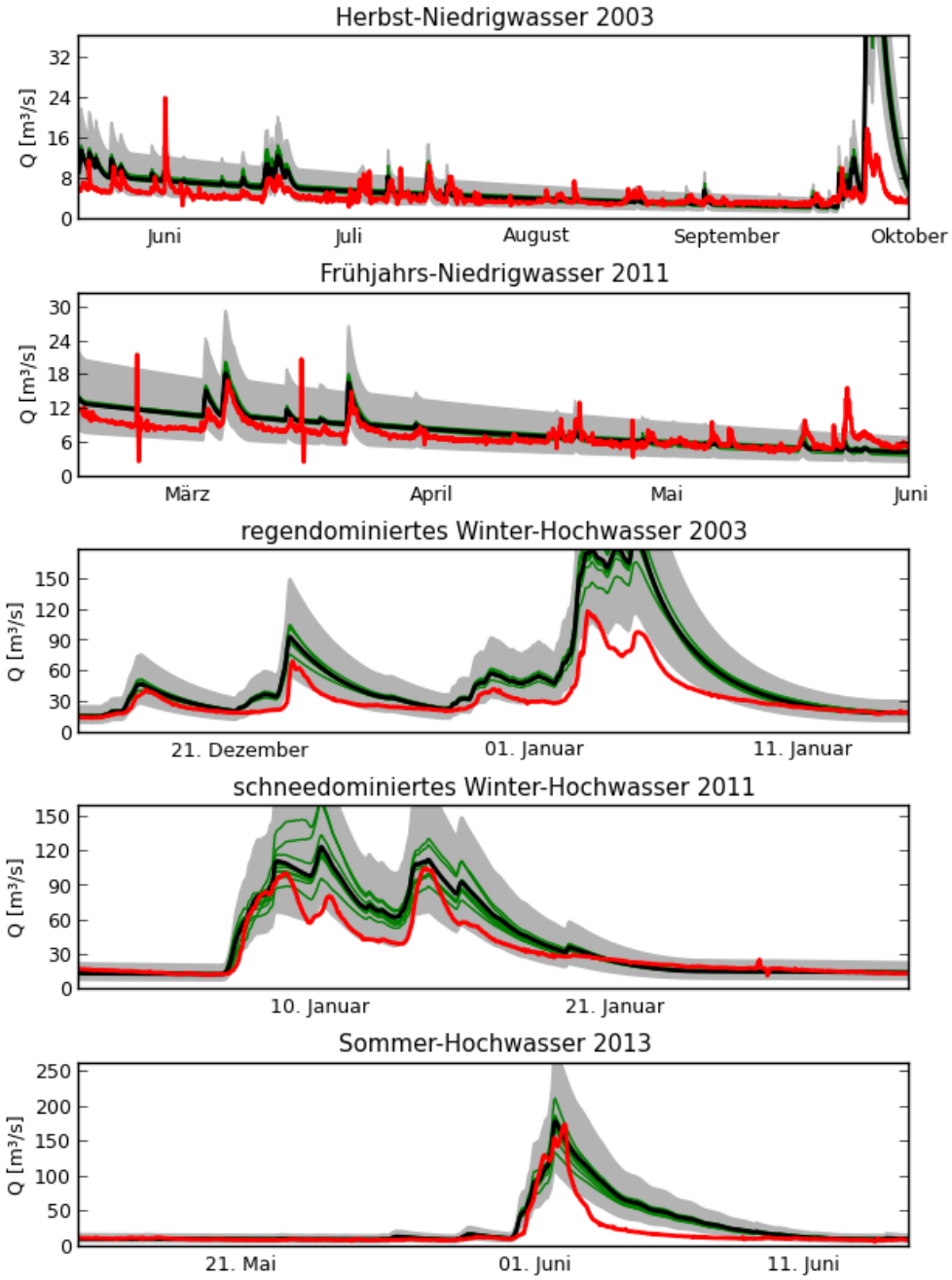

Abbildung 5.2: Extremereignisse, Oberer Neckar, ND-hom, HydPy-Hγ, RESPAREA=1

Nur für den Oberen Neckar ist der GAMMA-Wert des besten Parametersatzes sowohl mit als auch ohne Verwendung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes größer null. Abbildung 5.1 deutet jedoch an, dass Gleichung 5.2 keinen ausreichenden Ersatz für den erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz darstellt, da unter Auslassung desselben weiterhin Abflussdynamik im Niedrigwasserbereich verloren geht. Und die Kombination aus Gleichung 5.2 und dem erweitertem Sättigungsflächen-Ansatz bringt keine Vorteile in der Simulation der beiden Niedrigwasserperioden mit sich (Abbildung 5.2).

Im Rahmen dieser Untersuchung ist somit das Ergebnis von Fenicia et al. (2006) zu bestätigen, dass nichtlineare Basisabfluss-Beziehungen die Simulationsgüte nicht signifikant erhöhen. Fenicia et al. (2006) machen in ihrer acht Einzugsgebiete umfassenden Studie allerdings eine Ausnahme aus: die hochgradig urban geprägte Petruss (Luxemburg). Die Überprüfung der Nützlichkeit von Gleichung 5.2 für Flüsse mit derart anthropogenem Abflussregime – wie im Rheingebiet z. B. bei der Emscher der Fall – in Folgestudien bietet sich an. Durch Bereitstellung von HydPy-Hγ wird der BfG dies ermöglicht.

5.2 Sättigungsflächen-Ansatz

Die in Abschnitt 4.3 angestellten Untersuchungen deuten an, dass der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz zwar Vorteile mit sich bringt, aber die Parametrisierung von HydPy-H erschweren kann. Im Folgenden wird versucht, die Ursache hierfür aus den entsprechenden Modellgleichungen abzuleiten. Andere Anwendungsprobleme, die aus der HBV96-Konzeption von Abflussbildung und –konzentration resultieren können, werden diskutiert. Eine Umstrukturierung der Prozessgleichungen wird erwogen und als Alternative zur aktuellen Umsetzung des Sättigungsflächen-Ansatzes geprüft.

5.2.1 Diskussion von Abflussbildung und –konzentration nach HBV96

Der erste Schritt der Abflussbildung ergibt sich nach HBV grundsätzlich über einen einfachen Sättigungsflächen-Ansatz. Entsprechend der aktuellen (SM) und der maximalen (FC) Bodenwasserspeicherung ergibt sich der Anteil gesättigter Flächen aus

$$contriArea = \left(\frac{SM}{FC}\right)^{BETA} . \qquad 5.3$$

Häufig wird für den Nichtlinearitäts-Parameter (BETA) der Wert zwei angesetzt.

Der Teil des Inputs (IN), der auf die gesättigten Teilflächen fällt, ist potenziell abflusswirksam (R). Aus der Annahme der räumlichen Gleichförmigkeit des Inputs ergibt sich

$$R = IN \cdot contriArea . \qquad 5.4$$

R wird dem upper zone layer (UZ) aufgeschlagen. UZ hat eine Doppelfunktion: zum einen wird er als oberer Grundwasserspeicher aufgefasst, zum anderen als Direktabflussspeicher.

Der Funktion eines oberflächennahen Grundwasserleiters entsprechend, kann Inhalt von UZ kapillar in den Bodenspeicher wiederaufsteigen. Diese Option wird weder im operationellen HBV-Modell der BfG noch im vorliegenden Bericht aktiviert und daher nicht weiter diskutiert.

Ebenfalls an die Funktionsweise eines oberflächennahen Grundwasserleiters angelehnt, findet ein Durchsickern (PERC) in den tiefen Grundwasserspeicher (LZ) statt. Im Originalentwurf von HBV96 (Lindström et al. 1997) ohne erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz entsprechend einer konstanten maximalen Perkolationsrate (PERCMAX), die nur bei Entleerung von UZ reduziert wird:

$$PERC = \min\left(PERCMAX, UZ\right) \qquad 5.5$$

In seiner Funktion als Direktabflussspeicher gibt UZ ohne Aktivierung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes die schnelle Abflusskomponente (Q0) wie folgt ab:

$$Q0 = K \cdot UZ^{1+ALPHA} \qquad 5.6$$

Solange keine Zonen vom Typ „Internal Lake“ vorliegen, was für alle Teilgebiete der Untersuchungsgebiete der Fall ist, gibt der tiefe Grundwasserspeicher die langsame Basisabflusskomponente (Q1) proportional zum aus PERC gespeistem Speicherinhalt ab:

$$Q1 = K4 \cdot LZ \qquad 5.7$$

Wie aus dieser kurzen Diskussion ersichtlich, ist die Abbildung von Abflussbildung und –konzentration in HBV96 – insbesondere im Vergleich zur detaillierten Behandlung der Verdunstungs- und Schneeprozesse – schlicht gehalten. HBV96 zielt, zumindest bei Deaktivierung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes, eher auf die Modellierung des langfristigen Wasserhaushalts ab und weniger auf die kurzfristige Abflussdynamik.

Das hieraus resultierende starre und grenzwertdominierte Systemverhalten von HydPy-H ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die gezeigten Simulationsergebnisse basieren auf dem operationellen Parametersatz für den Oberen Neckar, mit der einzigen Ausnahme das der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz deaktiviert wurde (RESPAREA=0). In den Darstellungen des Abflusses (erstes und drittes Teilbild von oben) ist der Ordinatenausschnitt auf den Niedrigwasserbereich begrenzt.

Das obere Teilbild zeigt erstens, dass die kurzen sommerlichen Abflussereignisse ab Juni 2002 nicht adäquat simuliert werden. Zweitens kommt es im fallenden Ast der winterlichen Abflussereignisse zu unrealistischen Knickpunkten. Bei höherer zeitlicher Auflösung (drittes Teilbild von oben) wird erkennbar, dass die zunächst sehr steil abfallende Hochwasserganglinie schnell abflacht um anschließend abrupt in einen beinahe linearen Rückgang überzugehen. Dieses Muster wiederholt sich und ist nicht durch zwischenzeitlich auftretende Niederschläge verursacht.

Das zweite und vierte Bild von oben verdeutlichen die Ursache der Knickpunkte. Phasen mit gefülltem und leerem upper zone layer wechseln sich ab. Nach Ende der Auffeuchtung des Gebietes geht Q0 schnell zurück. Q1 steigt dagegen bis zur vollständigen Entleerung von UZ an, da PERC zunächst konstant bleibt. Erst wenn PERC ausfällt, sinkt auch der Speicherinhalt des lower zone layers (LZ) und dessen Ausfluss Q1, wodurch das Systemverhalten abrupt wechselt.

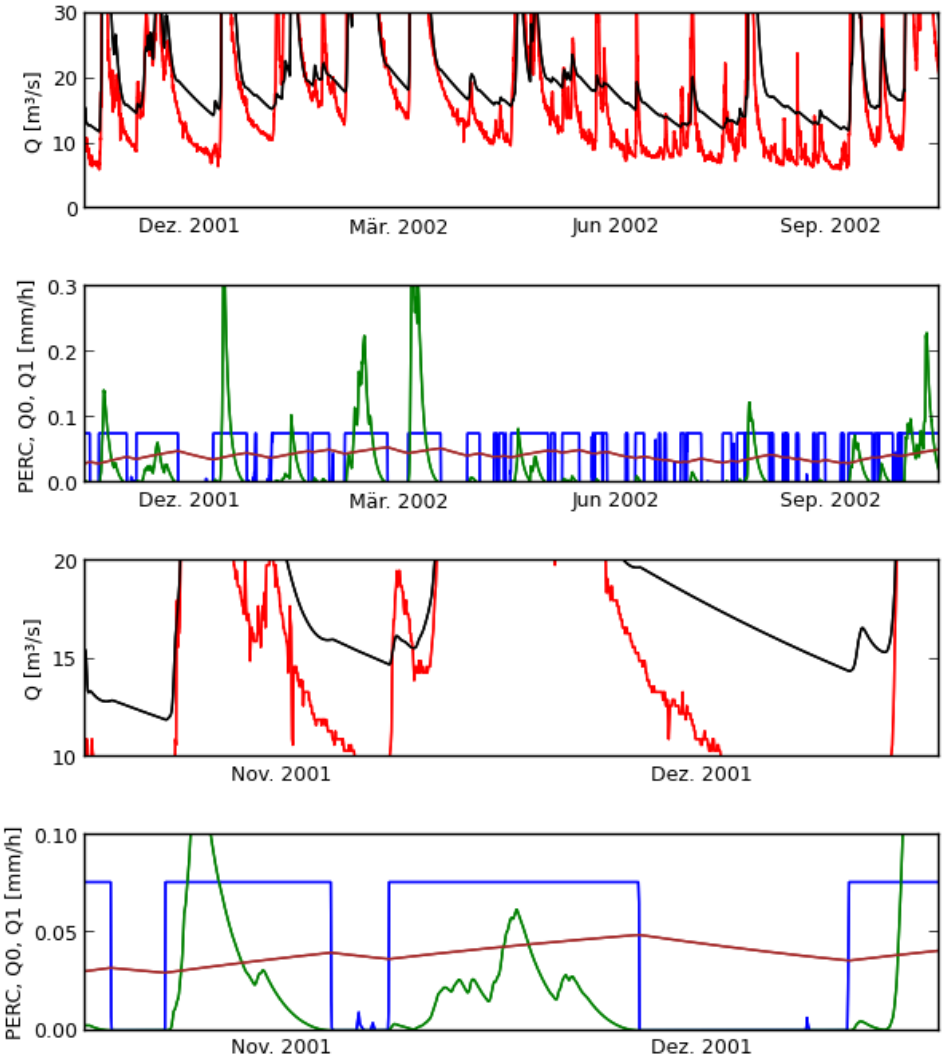

Abbildung 5.3: Niedrigwasseranalyse Oberer Neckar, HydPy-H, RESPAREA=0 (Q gemessen: rot, Q simuliert: schwarz, PERC: blau, Q0: grün, Q1: braun)

Die Verwendung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes nach Bergström et al. (1997) modifiziert dieses Systemverhalten. Hauptgedanke ist, nicht nur die Bodenprozesse (Gleichung 5.4) sondern auch die oberen Grundwasserprozesse direkt von der relativen Bodenfeuchte abhängig zu machen. Dazu wird zum einen die Perkolation entsprechend dem Anteil gesättigter Flächen erhöht:

$$PERC = \min\left(PERCMAX \cdot contriArea, UZ\right) \qquad 5.8$$

Zum anderen wird die schnelle Abflusskomponente entsprechend dem Anteil gesättigter Flächen, modifiziert entsprechend dem für ALPHA angesetzten Wert, verringert:

$$Q0 = K \cdot \left(\frac{UZ}{contriArea}\right)^{1+ALPHA} \qquad 5.9$$

Kontraintuitiv und ungewöhnlich an diesem Ansatz ist die direkte Steuerung des Systemverhaltens vom upper zone layer durch den Systemzustand des Bodenspeichers. Die zonale Differenzierung des Bodenspeichers bei gebietsweit einheitlichem upper zone layer verkompliziert den Sachverhalt zusätzlich (siehe Tyralla und Schumann 2013 zur konkreten rechentechnischen Umsetzung).

Die in SMHI (2009) veranschaulichte Idee hinter diesem Ansatz ist, dass bei einer gegebenen Speicherung im upper zone layer und bei geringer Bodensättigung nur ein geringer Gebietsanteil zur Perkolation beiträgt, dieser Gebietsanteil aber abflusswirksamer ist, als wenn sich die gleiche Speicherung im upper zone layer auf einen größeren Gebietsanteil verteilt.

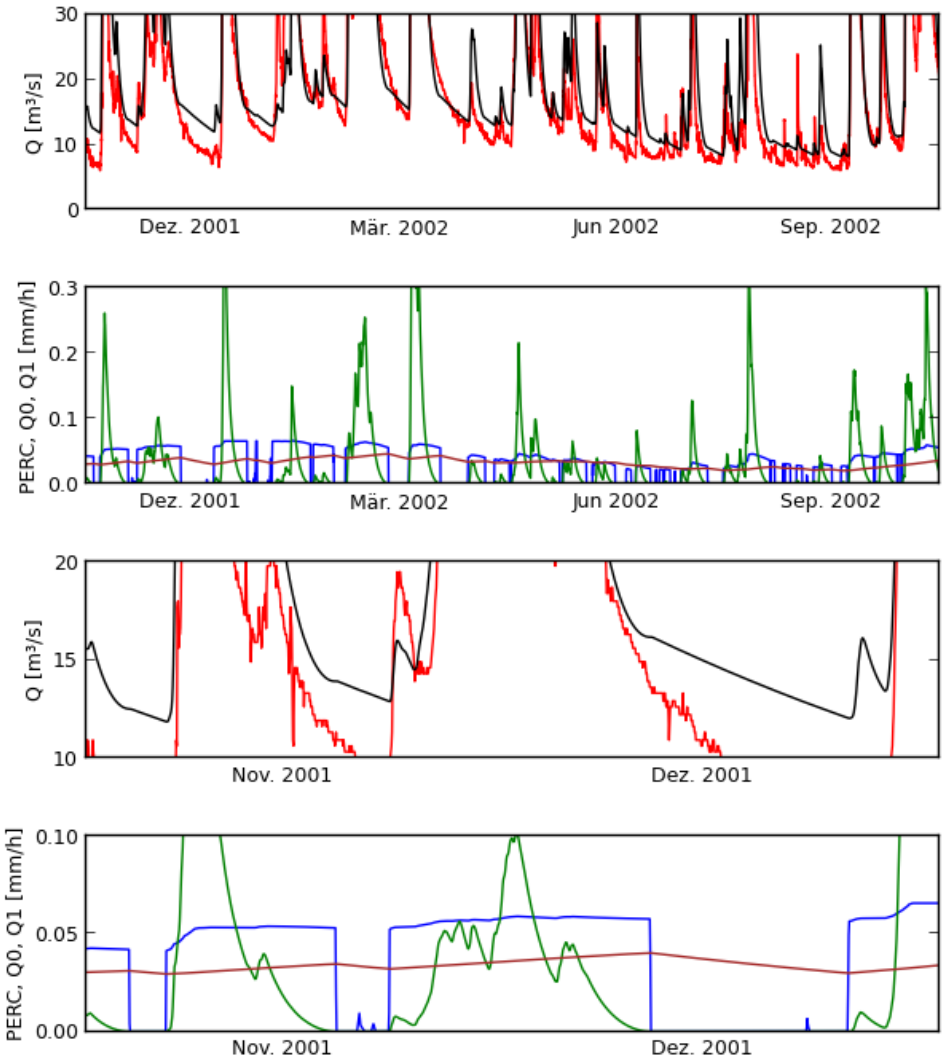

Abbildung 5.4: Niedrigwasseranalyse Oberer Neckar, HydPy-H, RESPAREA=1 (Q gemessen: rot, Q simuliert: schwarz, PERC: blau, Q0: grün, Q1: braun)

Abbildung 5.4 entspricht Abbildung 5.3, allerdings wurde die Simulation unter Einsatz des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes durchgeführt. Der Ansatz zeigt die gewünschte Änderung im Systemverhalten: die sommerlichen kurzen Abflussereignisse werden viel besser simuliert. Zudem zeigt die maximale Rate der jeweiligen Perkolationsblöcke nun einen Jahresgang, der dem der (nicht dargestellten) Bodenspeicherung entspricht. An den Knickpunkten der Rezessionsäste ändert dagegen sich nichts Wesentliches.

Die diskutierten Besonderheiten der HBV-Konzeption führen nicht nur zu stellenweise unrealistischen Ganglinien, sondern können sich auch negativ auf angekoppelte Methoden auswirken. Durch den Sättigungsflächen-Ansatz hervorgerufene Kalibrierungsprobleme zeigten sich bereits in Abschnitt 4.3.2. Hier sollen mögliche Effekte auf die Methoden der anderen Seamless Prediction-Teilprojekte aufgezeigt werden.

Erstes Beispiel sind die im „Seamless Prediction"-Teilprojekt zu Vorhersagekorrektur / Model Output Statistics (Pinzinger et al. 2014) eingesetzten Verfahren zur Modellausgabe-Korrektur. Statistische Korrekturverfahren (z. B. basierend auf autoregressiven Modellen) gehen von der Übertragbarkeit vorangegangener Fehlersystematiken auf zukünftige Simulationsfehler aus. Diese Übertragbarkeit ist im Falle abrupter Wechsel des Modellverhaltens, die nicht dem Verhalten des modellierten System in Einklang steht, nicht oder nur eingeschränkt gegeben.

Zweites Beispiel sind die im „Seamless Prediction"-Teilprojekt zur Datenassimilation (Lisniak et al. 2014) eingesetzten Filtertechniken. Das grenzwertbasierte, also extrem nichtlineare Verhalten des upper zone layers kann die Umsetzung von Techniken zur Zustandsnachführung erschweren. Es ist zu vermuten, dass der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz hierbei eher verstärkend als begünstigend wirkt. Nach Auffassung der Autoren resultiert die positive Wirkung dieses Ansatzes für Sommerereignisse aus folgendem Zusammenhang: Wenn der upper zone layer relativ viel Wasser speichert, der Bodenspeicher aber relativ wenig, muss die Speicherung des upper zone layers aus vorangegangenen Niederschlägen überdurchschnittlicher Intensität resultieren. Und (sommerliche) Starkniederschläge führen auch ohne Durchfeuchtung großer Gebietsteile zu markanten Abflussereignissen. Nach dieser Interpretation wirkt der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz wie ein implizites Gedächtnis über die Struktur vorangegangener Niederschlagsereignisse. Wenn aber bei einer Zustandsnachführung beispielsweise der Abflussbeiwert durch Verringerung der Bodenfeuchte verkleinert werden soll, führt dies zu einer unmittelbaren Direktabflusszunahme, da die Entstehungsgeschichte der Füllung des upper zone layers neu bewertet wird.

5.2.2 Alternativer Ansatz

Die obige Diskussion der Abstraktionsunsicherheit der Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse lässt die Frage nach alternativen Umsetzungsmöglichkeiten aufkommen. Im Folgenden wird die aus derartigen Überlegungen hervorgegangene HBV-Modifikation HydPy-HΨ vorgestellt. Der griechische Buchstabe Ψ dient in der Literatur zur Bezeichnung des Abflussbeiwertes und verweist auf den Kern der vorgenommenen Änderungen. HydPy-HΨ soll die folgenden Vorgaben zu erfüllen:

- Weitgehende Beibehaltung der Originalkonzeption von HBV96.
- Plausiblere Umsetzung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes unter Erhaltung der Vorteile bei kurzen Sommerereignissen.
- Vermeidung von Knickpunkten in Rezessionsästen.

Abbildung 5.5 skizziert die originalgetreue Verknüpfung des Bodenspeichers (SM), des upper zone layers (UZ) sowie des lower zone layers (LZ) und stellt dem die Neuanordnung in HydPy-HΨ gegenüber. Grundgedanke der Neuanordnung ist, UZ nicht mehr als oberen Grundwasserleiter, sondern ausschließlich als Direktabflussspeicher aufzufassen. Somit entfällt die Perkolation (PERC) von UZ nach LZ. Stattdessen findet, gegebenenfalls auch über den kapillaren Wiederaufstieg (CF), ein direkter Austausch zwischen SM und LZ statt.

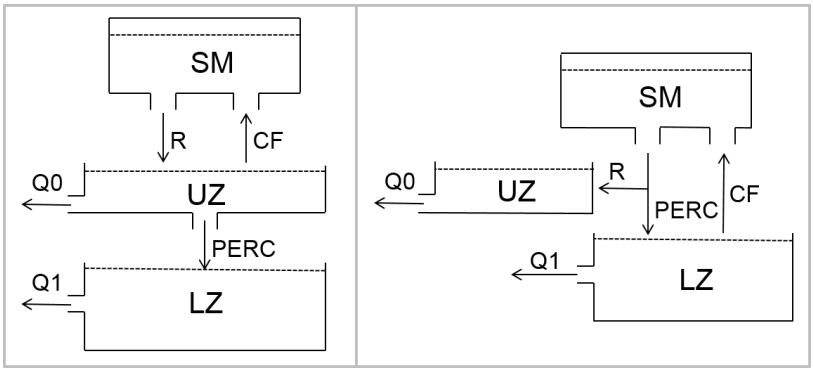

Abbildung 5.5: Verknüpfung von SM, UZ und LZ in HydPy-H (links) und -HΨ (rechts)

Welcher Anteil des Inputs potenziell abflusswirksam ist, hängt weiterhin vom relativen Anteil gesättigter Flächen (contriArea) ab. Die weitere Aufteilung in Perkolation (PERC) und Direktabfluss (R) erfolgt anhand des festen Verhältnisses PERCREL:

$$PERC = PERCREL \cdot IN \cdot contriArea \qquad 5.10$$

$$R = \left(1 - PERCREL\right) \cdot IN \cdot contriArea \qquad 5.11$$

Der Direktabfluss (Q0) ergibt sich wie in HydPy-H ohne erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz (Gleichung 5.6).

Diese simple Änderung behebt das Problem der Knickpunkte der Rezessionsäste. Dies zeigt Abbildung 5.6, die wie Abbildung 5.4 auf dem operationellen Parametersatz für den Oberen Neckar basiert, wobei die HydPy-H-Parameter RESPAREA sowie PERCMAX entfallen und der neue HydPy-HΨ-Parameter PERCREL auf 0.25 fixiert ist. Obwohl keine Nachkalibrierung der übrigen Parameter erfolgte, werden die Rezessionsäste der längeren Ereignisse der ersten Jahreshälfte durchweg zufriedenstellender simuliert als unter Verwendung von HydPy-H. Die kürzeren Sommerereignissen werden zumindest grob nachvollzogen.

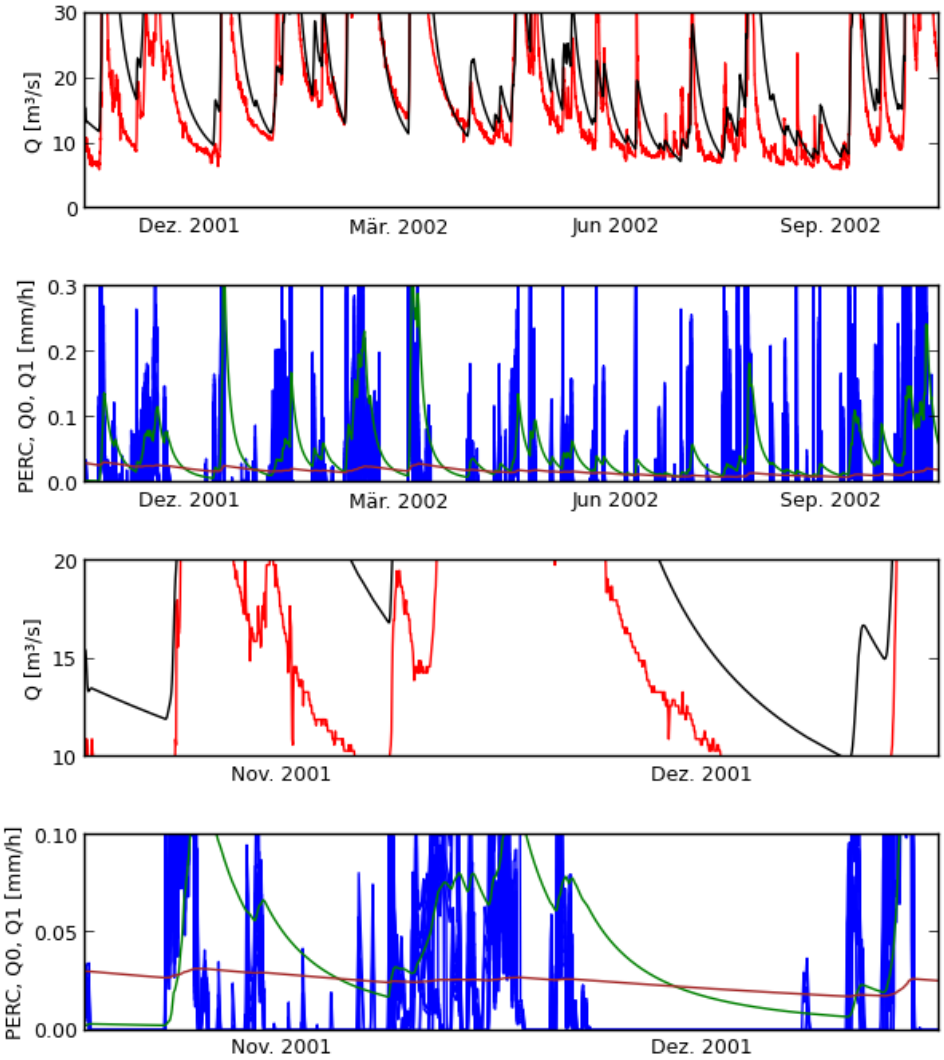

Abbildung 5.6: Niedrigwasseranalyse Oberer Neckar, HydPy-HΨ
(Q gemessen: rot, Q simuliert: schwarz, PERC: blau, Q0: grün, Q1: braun)

Soweit beschrieben steht der jeweils aktuelle Abflussbeiwert nach HydPy-HΨ nur in Relation zur Bodenfeuchte (SM). Bei typischer Parametrisierung variiert SM primär jahreszeitlich. Für die in Abschnitt 5.2.1 diskutierte „Gedächtnisfunktion“ des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes für kurzfristige Schwankungen der Niederschlagsstärke gibt es somit keine Entsprechung.

Von der Implementierung zusätzlicher Modellkomponenten wie einem Vorregenindex wird abgesehen, um nicht zu stark von der HBV-Konzeption abzuweichen. Entsprechend bleibt nur die Kopplung des Abflussbeiwertes an den, im Vergleich zur Bodenfeuchte, dynamischeren upper zone layer. Dies wird erzielt durch die Neudefinition des in die Berechnung von contriArea (Gleichung 5.3) eingehenden Nichtlinearitäts-Parameters:

$$BETA = BETA0 \cdot \exp\left(-BETA1 \cdot UZ\right) \qquad 5.12$$

BETA repräsentiert somit nicht allein die (zeitlich konstante) räumliche Heterogenität der Feldkapazität im Einzugsgebiet, sondern auch die Abflussbereitschaft nicht vollständig gesättigter Flächen bei kürzeren Starkregenereignissen. contriArea ist daher bei Anwendung von Gleichung 5.12 nicht als gesättigter Flächenanteil, sondern allgemeiner als abflusswirksamer Flächenanteil aufzufassen. Abbildung 5.7 zeigt für die Belegung von BETA0 mit 2.0 und BETA1 mit 0.1, dass bei leerem upper zone layer die Original-HBV-Relation zwischen abflusswirksamen Flächenanteil und relativer Bodenfeuchte erhalten bleibt. Mit Zunahme der Speicherung in UZ steigt die Abflussbereitschaft dagegen über das Maß der Original-HBV-Relation hinaus an.

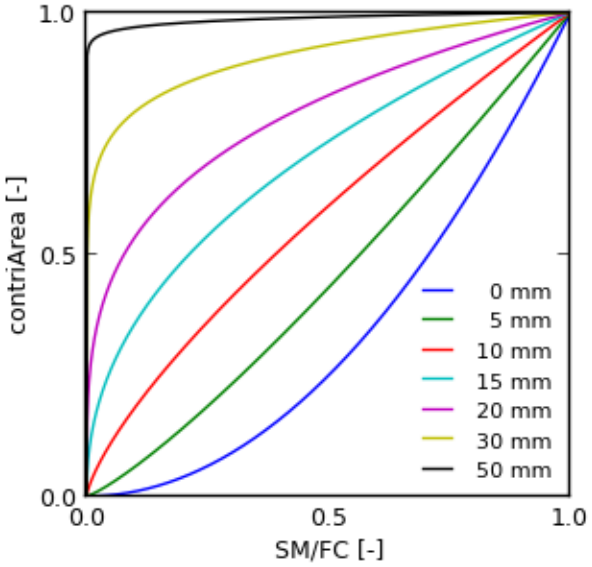

Abbildung 5.7: Abflussbeiwert vs. Bodenfeuchte für verschiedene Werte von UZ

Es erscheint schlüssig, im Rahmen der beschriebenen Änderungen der HBV-Konzeption den upper zone layer zonal zu differenzieren. Eine solche Anpassung von HydPy-HΨ wäre leicht umzusetzen. Zur Wahrung der Konsistenz mit den übrigen im Rahmen des Seamless Prediction-Projekts durchgeführten Experimenten wurde hiervon jedoch abgesehen.

5.2.3 Versuchsspezifikationen

Die Entfernung der für HydPy-H typischen Knickpunkte in Rezessionsästen durch kleinere Modifikationen des HBV-Konzeptes wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt demonstriert. Zur tieferen Analyse wird im Folgenden die in Abschnitt 4.3 beschriebene Untersuchung auf HydPy-HΨ angewandt. Im Unterschied zu den Versuchsspezifikationen von 4.3.1 entfallen die Parameter RESPAREA und PERCMAX; die Parameter PERCREL, BETA0 und BETA1 werden in den Grenzen [0.2, 0.8], [1.0, 10.0] und [0.0, 0.2] zur Kalibrierung freigegeben. Dass für BETA1 der Wert 0.0 im Kalibrierintervall enthalten ist, ermöglicht den Ausschluss der Abhängigkeit der Abflussbildung von Wassergehalt des upper zone layers.

5.2.4 Analyse

Der Vergleich von Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.3 sowie Abbildung 5.9 bis Abbildung 5.11 mit den in Abschnitt 4.3.2 dargestellten Ergebnissen zeigt deutliche Unterschiede in der Funktionsweise von HydPy-HΨ und HydPy-H (unter Einbeziehung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes) auf.

HydPy-HΨ führt zu einer deutlichen Erhöhung der Simulationsgüte hoher Abflüsse. Dies zeigt sich sowohl anhand der für den oberen Abflussbereich tabellierten Gütekriterien als auch anhand der graphischen Darstellung der drei Hochwasser der Validierungsperioden. Dem stehen aber im Mittelwasserbereich teilweise und im Niedrigwasserbereich deutlich schlechtere Anpassungsgüten gegenüber. Der grundsätzliche Verlauf beider Niedrigwasser der Validierungsperioden wird ähnlich wie durch HydPy-H wiedergegeben. Die darin eingelagerten Abflussereignisse, durch den erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz von HydPy-H zumindest ansatzweise erfasst, werden durch HydPy-HΨ dagegen nahezu vollständig übergangen.

Die in Abschnitt 4.3.2 diskutierte, mit mehreren lokalen Optima der Fehleroberfläche in Verbindung stehende Ausbildung voneinander getrennter „Simulationsbündel“ ist bei Verwendung von HydPy-HΨ zwar reduziert, aber nicht gänzlich verschwunden. Die Identifikation des globalen Maximums bleibt für den Oberen Neckar zufriedenstellend und hat sich die Lahn höchstens geringfügig, für die Nahe dagegen deutlich verbessert (Abbildung 5.8).

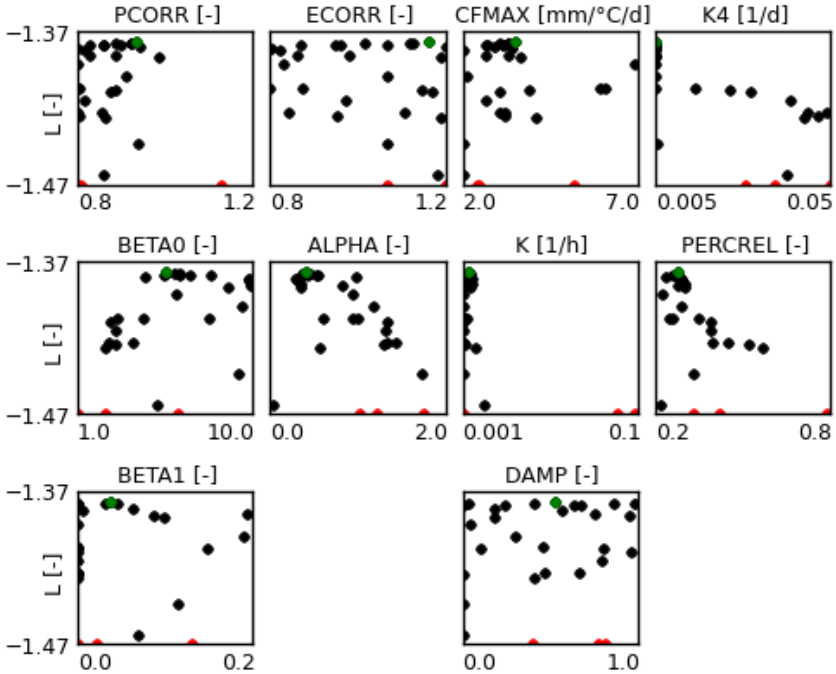

Abbildung 5.8: Parameterunsicherheit, Nahe, SEPD-het, HydPy-HΨ

Tabelle 5.1: Gütekriterien, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-HΨ

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.65	-0.16	1.88	1.74	0.91
2005 - 2009	-1.18	0.85	1.05	1.01	0.86
2010 - 2013	-1.17	0.62	1.28	1.22	0.88
gesamt	-1.26	0.68	1.23	1.15	0.84
Q < MQ/2	-1.02	-0.14	1.40	1.95	0.51
MQ/2 < Q <MQ	-1.20	-0.25	1.21	2.10	0.45
MQ < Q	-1.61	0.46	1.11	1.45	0.72

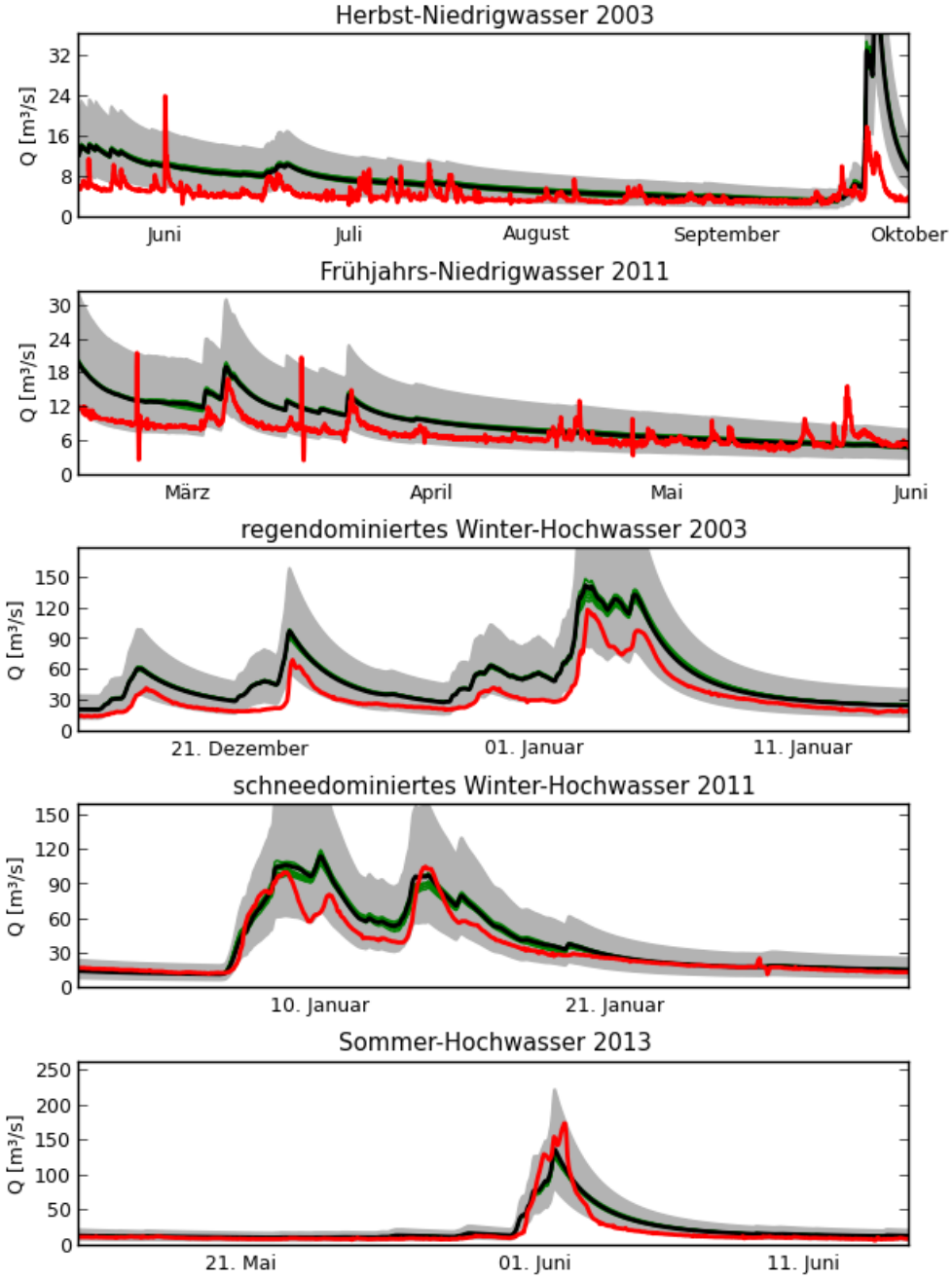

Abbildung 5.9: Extremereignisse, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-HΨ

Tabelle 5.2: Gütekriterien, Lahn, SEPD-het, HydPy-HΨ

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.63	0.63	1.22	1.26	0.86
2005 - 2009	-1.61	0.86	1.02	0.92	0.89
2010 - 2013	-1.69	0.67	1.21	1.23	0.89
gesamt	-1.64	0.78	1.15	1.12	0.88
Q < MQ/2	-1.33	0.36	1.20	1.39	0.53
MQ/2 < Q <MQ	-1.63	0.18	1.07	1.54	0.39
MQ < Q	-2.11	0.61	1.11	1.33	0.81

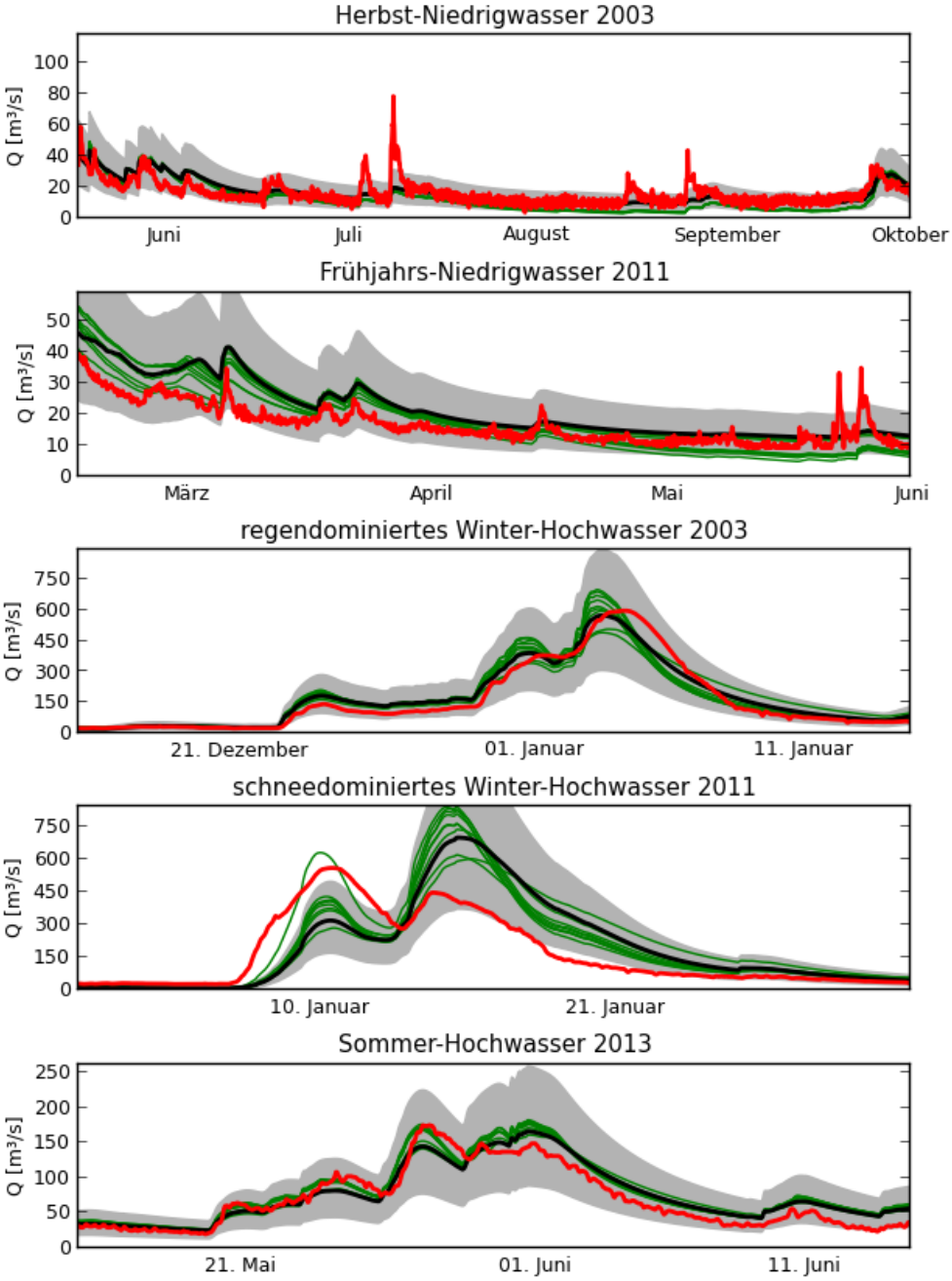

Abbildung 5.10: Extremereignisse, Lahn, SEPD-het, HydPy-HΨ

Tabelle 5.3: Gütekriterien, Nahe, SEPD-het, HydPy-HΨ

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.29	0.52	1.39	1.26	0.92
2005 - 2009	-1.38	0.70	1.19	1.15	0.83
2010 - 2013	-1.40	0.76	1.02	0.77	0.93
gesamt	-1.37	0.80	1.16	1.00	0.88
Q < MQ/2	-1.09	0.52	1.27	1.17	0.65
MQ/2 < Q <MQ	-1.41	0.28	1.02	1.47	0.45
MQ < Q	-1.91	0.72	1.06	1.22	0.85

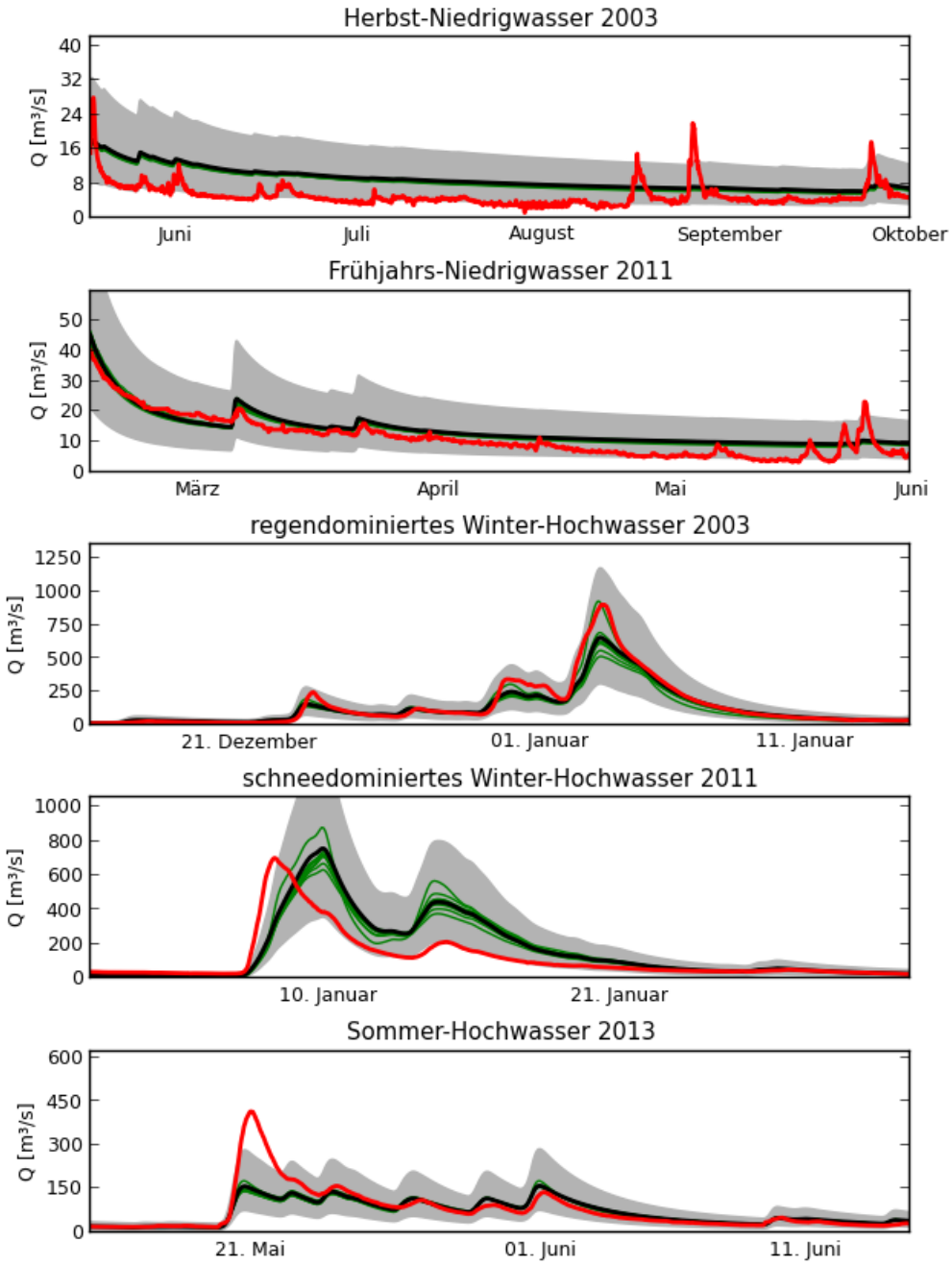

Abbildung 5.11: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-HΨ

Der Parameter BETA1 des jeweils besten Parametersatzes ist für die Nahe mit einem relativ kleinen Wert, für den Oberen Neckar und die Lahn sogar mit (annährend) Null belegt. Das erklärt, warum sich HydPy-HΨ in der graphischen Niedrigwasser-Analyse eher wie HydPy-H mit deaktiviertem Sättigungsflächen-Ansatz verhält. Größere Werte für BETA1 führen zu höheren Abflussbeiwerten. Hierbei fällt auf, dass der Median der gemessenen Abflüsse in beinahe allen Gebieten bzw. Validierungsperioden unter Verwendung von HydPy-HΨ deutlich mehr überschätzt wird, als bei Verwendung von HydPy-H mit aktiviertem Sättigungsflächen-Ansatz der Fall.

HydPy-HΨ ist somit nur bedingt als Ersatz für HydPy-H mit erweitertem Sättigungsflächen-Ansatz zu empfehlen. Die Umstrukturierung der Verknüpfung von Bodenmodul, upper zone layer und lower zone layer (Gleichung 5.10 und 5.11) bringt eindeutige Vorteile mit sich. Die Anbindung der Abflussbildung an die kurzfriste Niederschlagsdynamik (Gleichung 5.12) scheint dagegen kein adäquater Ersatz für die Erhöhung der Dynamik des upper zone layers bei kurzen Sommerereignissen zu sein. Eine stärkere Abweichung von der HBV-Konzeption zur verbesserten Modellierung der kurzfristigen Abflussdynamik, eventuell in Form zusätzlicher Abflusskomponenten, erscheint notwendig.

5.3 Anzahl der Abflusskomponenten

Abschnitt 5.2 diskutiert mit der Abstraktion von Abflussbildung und Abflusskonzentration verbundene Besonderheiten von HydPy-H mit potenziell negativen Seiteneffekten. Diese lassen sich durch kleinere Modifikationen zwar beheben, die daraus resultierende Modellvariante HydPy-HΨ zeigt aber – ähnlich wie HydPy-H ohne erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz – Defizite in der Simulation kurzer Sommerereignisse.

Es ist naheliegend, die Abbildung kurzfristiger Abflussdynamiken von HydPy-H (ohne erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz) oder HydPy-HΨ durch Implementierung zusätzlichen Abflussbildungs- und Abflusskonzentrations-Mechanismen zu verbessern. Dies führt aber zu starken Abweichungen von der HBV96-Konzeption, mit ggf. weitreichen Folgen für angekoppelte Methoden.

Diese einmal in Kauf nehmend, lassen sich auch radikalere Modifikationen von HydPy-H denken, namentlich der vollständige Austausch der Abflussbildungs- und -konzentrations-Module. Als eine mögliche Variante wird im Folgenden die Kopplung der HBV- mit der LARSIM-Konzeption getestet. Die umfangreichere Berechnung der potenziellen Verdunstung nach HBV wird beibehalten, die umfangreichere Umsetzung von Abflussbildung und -konzentration nach LARSIM wird übernommen.

5.3.1 Vergleich HydPy-H mit HydPy-HL

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt, wurde im Rahmen des Seamless Prediction-Projektes HydPy-L, eine Variante des LARSIM-Modells (Bremicker 2000), in HydPy implementiert. Eine eigenständige Anwendung von HydPy-L ist in Tyralla und Schumann (2014) dokumentiert. Um den Fokus auf die Abstraktionsunsicherheit von Abflussbildung und -konzentration zu richten, kommt in den folgenden Untersuchungen dagegen eine HydPy-HL genannte Modellkopplung zum Einsatz. Bis zur potenziellen Verdunstung erfolgt die Rechnung entsprechend HydPy-H, ansonsten entsprechend HydPy-L.

Abbildung 5.12 zeigt durch Vergleich mit Abbildung 4.1 Unterschiede in der Abstraktion von Abflussbildung und Abflusskonzentration zwischen HydPy-H und HydPy-HL. Die Interzeptionsmodule sind bis auf die Verwendung verschiedener Variablennamen identisch. Das Schneemodul von HydPy-HL ist in zweierlei Hinsicht vereinfacht: erstens gibt es keinen Mischniederschlag, d. h. Niederschlag fällt grundsätzlich in entweder flüssiger oder fester Form; zweitens erfolgt kein (Wieder-)Gefrieren des flüssigen Anteils der Schneedecke.

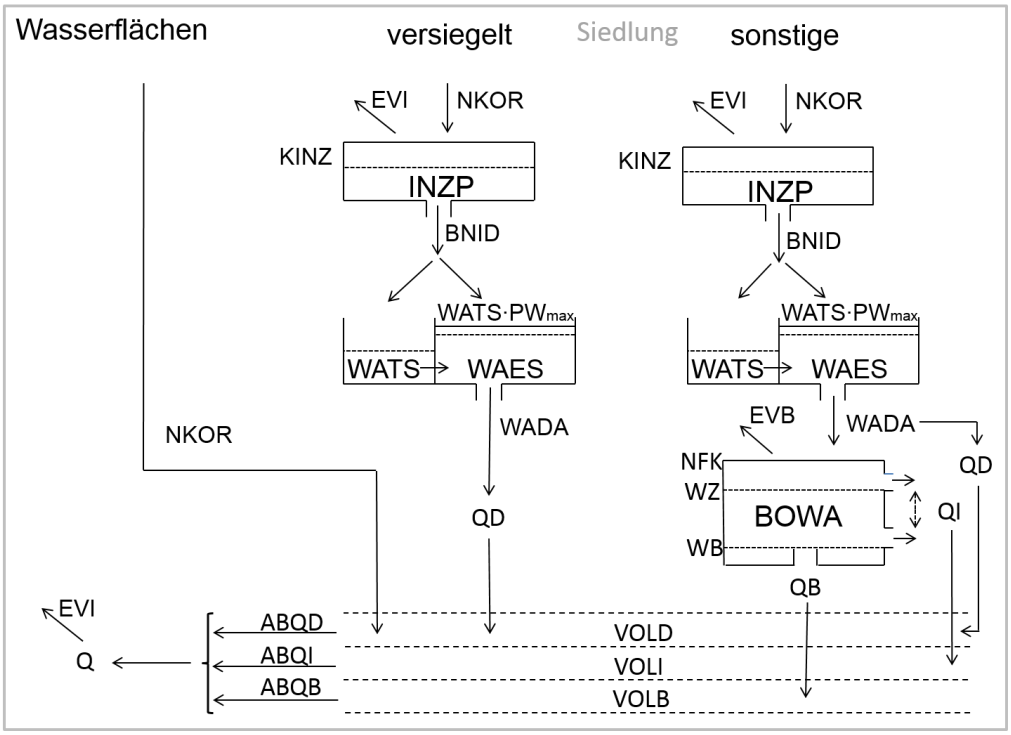

Abbildung 5.12: Schematische Skizze eines Teilgebietes nach HydPy-L

Durch die Berücksichtigung von drei bzw. vier Mechanismen der Abflussbildung ist das Bodenmodul von HydPy-HL ungleich komplexer als das von HydPy-H. Es basiert zunächst auf dem häufig angewandten Xinanjiang-Modell (Ren-Jun 1992). Hierbei wird die Direktabflussbildung (QD) über die analytische Lösung der Differenzialgleichung

$$\Psi = 1 - \left(1 - \frac{BOWAx}{nFKx}\right)^{BSF} \qquad 5.13$$

ermittelt. BOWAx und nFKx (Gleichung 5.13) stellen die maximale, BOWA und nKF (Abbildung 5.12) die mittlere Bodenspeicherung und Bodenspeicherkapazität im Teilgebiet dar. Es handelt sich um einen mathematisch expliziter hergeleiteten, im Rahmen des großen Abstraktionsunsicherheit letztendlich aber Gleichung 5.3 und 5.4 vergleichbaren Sättigungsflächen-Ansatz.

QD tritt, wie das Äquivalent R in HydPy-H, nur simultan zu Niederschlags- oder Schmelzperioden auf. In HydPy-HL gibt das Bodenmodul darüber hinaus kontinuierlich Wasser ab, insofern der Grenzwert WB überschritten ist. Die Abgabe des Basisabflusses (QB) steht in linearer Abhängigkeit zum WB überschreitenden Bodenwassergehalt:

$$QB = \begin{cases} beta \cdot (BOWA - WB) & falls \quad BOWA > WB \\ 0 & falls \quad BOWA \leq WB \end{cases} \qquad 5.14$$

Die Abgabe dies Interflows (QI) ist selbst in zwei Komponenten differenziert. Die erste Komponente (QI_1) tritt wie QB nur bei Überschreitung von WB auf, dann allerdings sprunghaft und anschließend linear steigend bis hin zur maximalen Rate Dmin:

$$QI_1 = \begin{cases} \mathrm{Dmin} \cdot \dfrac{BOWA}{nFK} & falls \quad BOWA > WB \\ 0 & falls \quad BOWA \leq WB \end{cases} . \qquad 5.15$$

Die zweite durchweg nichtlineare Komponente (QI_2) kommt bei Überschreitung des zweiten Grenzwertes WZ hinzu:

$$QI_2 = \begin{cases} (\mathrm{Dmax} - \mathrm{Dmin}) \cdot \left(\dfrac{BOWA - WZ}{nFK - WZ} \right)^{1.5} & falls \quad BOWA > WZ \\ 0 & falls \quad BOWA \leq WZ \end{cases} \qquad 5.16$$

Entsprechend Gleichung 5.15 und 5.16 ist QI (Summe von QI_1 und QI_2) auf die maximale Interflow-Rate Dmax beschränkt.

Die zeitliche Verzögerung der drei Abflusskomponenten QD, QI und QB erfolgt mit Hilfe der Gebietsspeicher VOLD, VOLI und VOLB, die allesamt als einfache Einzellinearspeicher umgesetzt sind mit den Abgaben ABQD, ABQI und ABQB. Eine Entsprechung für den Dreiecks-Unit-Hydrograph von HydPy-HL ist in HydPy-L nicht implementiert.

Hinsichtlich der Berücksichtigung räumlicher Heterogenität sind die zugrundeliegenden HBV- und LARSIM-Konzepte ähnlich: bis zum Bodenmodul wird zonal differenziert, anschließend nur auf Ebene der Teilgebiete. Während HBV-Zonen typischerweise nach Gebietshöhe und wenigen Landnutzungsklassen gebildet werden, werden LARSIM-Teilgebiete üblicherweise nur nach einer größeren Anzahl von Landnutzungsklassen differenziert. LARSIM-Zonen vom Typ „versiegelt“ funktionieren etwa wie HBV-Zonen vom Typ „Glacier“. Ansonsten gilt, von Wasserflächen abgesehen, für LARSIM und HBV gleichermaßen, dass sich Landnutzungsunterschiede nicht in Gleichungs- sondern nur in Parameterunterschieden ausdrücken.

5.3.2 Versuchsspezifikationen

Die Modellkopplung HydPy-HL erfolgt durch Einschleusen der von HydPy-H berechneten potenziellen Verdunstung in HydPy-L. Hierfür wurde die Option „EPext“ zur Verwendung extern berechneter Werte der potenziellen Verdunstung in HydPy-L implementiert.

Um modellstrukturelle Unterschiede in den Vordergrund zu rücken, wird HydPy-HL in allen Untersuchungsgebieten in der in Abschritt 3.3 beschriebenen Teilgebiets-Differenzierung eingesetzt. Dies

ermöglicht die Verwendung identischer meteorologischer Eingangsreihen (Abschnitt 3.2). Zur Zonenbildung wurde unter Verwendung von HydPy das im KLIWAS-Projekt verwendete 5 km-Raster auf die Teilgebiete aggregiert. Dabei wurden beispielsweise die nutzbare Feldkapazität entsprechend ihrer Werte in den jeweiligen Rastern und der Flächenanteile der jeweiligen Landnutzung gewichtet gemittelt. Die verwendeten Skripte sowie die damit erstellten Steuerdateien stehen der BfG zur Verfügung.

Die Wellenablaufberechnung für die Untersuchungsgebiete Lahn und Nahe erfolgt mit dem in HydPy-H implementierten HBV-Ansatz. Dies dient der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Der etwas aufwendigere, in HydPy-L implementierte LARSIM-Ansatz sollte in Folgestudien aber als Verbesserungsmöglichkeit in Betracht gezogen werden.

Die Festlegungen zur Parameterkalibrierung sind soweit möglich an Abschnitt 4.3.1 angelehnt. Aufgrund unterschiedlicher Prozessbeschreibungen durch HydPy-H und HydPy-HL sind der Objektivität hier aber starke Grenzen gesetzt. Dies ist insbesondere zu beachten, weil die für HydPy-H gesetzten minimalen und maximalen Parameterwerte oftmals die erreichbaren Likelihood-Werte einschränken.

HydPy-HL kennt im Gegenteil zu HydPy-H keine getrennte Korrektur von flüssigem und festem Niederschlagsanteil. Der Gesamt-Korrekturfaktor für Niederschlag (KG) wird im Intervall [0.9, 1.4] freigegeben; die Korrektur der potenziellen Verdunstung im Intervall [0.8, 1.2]. Der Parameter zur Berechnung zu bodenfeuchteabhängigen Reduzierung der tatsächlichen Verdunstung (Grasref_r) wird auf 5.0 fixiert.

Die LARSIM-typische Ermittlung der Interzeptionskapazität (KINZ) entsprechend der für verschiedene Landnutzungen und Monate tabellierten Blattflächenindizes mit dem auf 0.2 fixierten Faktor HINZ wird beibehalten. Der Grad-Tag-Faktor (GTF) wird wie sein Äquivalent in HydPy-H (CFMAX) behandelt. Der jeweils aktuelle Wert wird für Zonen vom Typ „Nadelwald“, „Laubwald“ sowie „Mischwald“ erhöht und für die übrigen verringert.

Alle Temperatur-Grenzwerte für die Unterscheidung zwischen flüssigem und festem Wasser (TGr, TRefT, TRefN) sind auf 0 °C fixiert.

Während die meisten der bislang genannten Parameter recht enge HydPy-H-Entsprechungen aufweisen, ist dies für die folgenden Abflussbildungs- und Abflusskonzentrations-Parameter nicht der Fall.

Der untere Bodenwasser-Grenzwert (WB) ergibt sich als Zwanzigstel der jeweils aus Geodaten abgeleiteten Feldkapazität. Der obere Bodenwasser-Grenzwert wird relativ (WZBo) im Intervall [0.05, 0.95] variiert, wodurch er absolut (WZ) minimal 5 % und maximal 95 % der jeweiligen Feldkapazität annimmt. Der Nichtlinearitätsparameter BSF wird im Intervall [0.0, 2.0] freigegeben.

Der Drainageindex des tiefen Bodenspeichers (beta) wird im Intervall [0.0, 0.01] 1/d kalibriert, der Drainageindex des mittleren Bodenspeichers (Dmin) im Intervall [0.0, 1.0] mm/d. Bei letzterem ist zu beachten, dass – im Gegensatz zur Original-Implementierung von LARSIM – vorgegebene Parameterwerte unmodifiziert verwendet werden. Dies gilt auch für den Drainageindex des oberen Bodenspeichers (Dmax). Um die Relation Dmax > Dmin zu gewährleisten, wird effektiv ein Hilfsterm Dmax* im variablen Intervall [0.0, 9.0] mm/d kalibriert. Der eigentliche Modellparameter Dmax ergibt sich durch Addition von Dmin und Dmax*.

HydPy-HL-intern erfolgt die Ermittlung der Schwerpunktlaufzeiten der drei Abflusskonzentrationsspeicher (kD, kI, kB) über getrennte Kalibrierfaktoren (EQD, EQI, EQB) und einen gemeinsamen Fließzeitindex (Tind), für den Direktabfluss beispielsweise über $\mathrm{kD} = \mathrm{Tind} \cdot \mathrm{EQD}$. Zur Vereinheitlichung werden die Länge des Vorfluters (TAL) und die Höhe ü. NN am oberen Ende (HOT) sowie am unteren Ende (HUT) des Vorfluters so angesetzt, das der über diese Größen berechnete Tind für alle Teilgebiete 1 d beträgt. Dies erlaubt eine im Endeffekt unmittelbare Kalibrierung der Schwerpunktlaufzeiten. Zur Wahrung der konzeptionellen Konsistenz sollten – ähnlich wie Dmin und Dmax – auch die Schwerpunktlaufzeiten in einer festen Relation sein. Dies wird unter Verwendung der Hilfsterme EQI* und EQB* realisiert. Die freigegebenen Intervalle sind [0.1, 5.0] für EQD, [0.1, 10.] für EQI* und [0.1, 100.0] für EQB*. EQI ergibt sich aus der Summe von EQD und EQI*, EQB aus der Summe von EQI und EQB*.

Die Behandlung der Wellenablaufparameter erfolgt wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben.

5.3.3 Analyse

In der Kalibrierung von HydPy-HL sind elf (Oberer Neckar) bzw. zwölf (Lahn und Nahe) Modellparameter freigegeben: drei mehr als für HydPy-H mit erweitertem Sättigungsflächen-Ansatz (Abschnitt 4.3.2) und zwei mehr als für HydPy-HΨ (Abschnitt 5.2.4). Dennoch erscheint die Annäherung des globalen Optimums insgesamt zufriedenstellender als bei Verwendung von HydPy-HΨ und insbesondere von HydPy-H.

Wie in den bisherigen Experimenten befinden sich einige optimale Parameterwerte im Randbereich des jeweils freigegebenen Intervalls. So liegt beispielsweise der Grad-Tag-Faktor (hier GTF genannt) an der unteren Grenze von 2.0 mm/°C/d.

Abbildung 5.13 zeigt exemplarisch für die Nahe ein vergleichsweise geringes Maß an Parameterunsicherheit. Einzig beim relativen Grenzwert für die schnelle Interflow-Komponente (WZBo) deutet sich ein markantes zweites lokales Optimum der durch SEPD-het definierten Fehleroberfläche an. Die mit den jeweils zehn besten Parametersätzen simulierten Ganglinien (Abbildung 5.14 bis Abbildung 5.16) zeigen kaum Gruppierungs-Effekte.

Für die Lahn ist die Simulationsgüte von HydPy-HL für beide Validierungs-Niedrigwasser der von HydPy-H mit erweitertem Sättigungsflächen-Ansatz vergleichbar. Für den Oberen Neckar und die Lahn berechnet HydPy-HL als einziges der getesteten Modelle realitätsnahe Ganglinien, welche sowohl den langfristige Niedrigwasser-Verlauf als auch die eingelagerten, kürzeren Abflussereignisse gut erfassen. Eine generelle Tendenz zur Überschätzung der die Niedrigwasserperioden auflösenden Abflussereignisse besteht nicht.

Für das schneedominierte Winter-Hochwasser 2011 zeigt sich nicht die starke Zunahme der Parameterunsicherheit der HBV-basierten Modelle. Von der Nahe abgesehen erzielt HydPy-HL für die Validierungs-Hochwasser aber zum Teil markant schlechtere Anpassungen als HydPy-H und insbesondere als HydPy-HΨ.

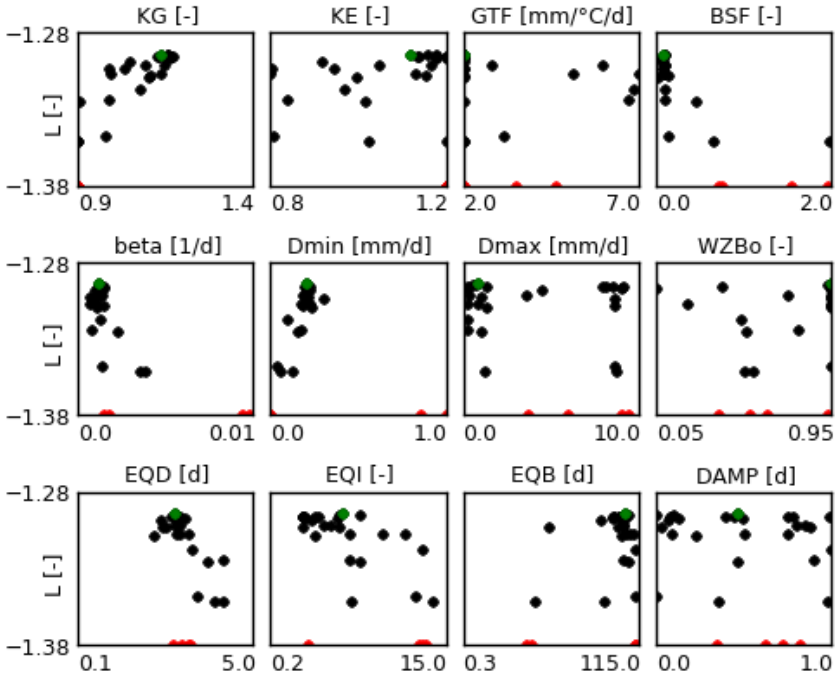

Abbildung 5.13: Parameterunsicherheit, Nahe, SEPD-het, HydPy-HL

An den in Tabelle 5.4 bis Tabelle 5.6 gegebenen Güterkriterien fällt auf, dass für alle Untersuchungsgebiete in allen Abflussbereichen akzeptable rangbasierte Kling-Gupta-Effizienzen erzielt werden. In den Validierungsperioden übertrifft HydPy-HL sowohl HydPy-H als auch HydPy-HΨ in drei von sechs Fällen hinsichtlich der rangbasierten Kling-Gupta-Effizienz und in vier von sechs Fällen hinsichtlich der Likelihood-Funktion SEPD-het.

Aufgrund der mit HydPy-HL angestellten Analyse ist die Frage, ob sich die Niedrigwasserdynamik durch die eine flexiblere, mehr Prozesse berücksichtigende Umsetzung von Abflussbildung und Abflusskonzentration besser beschreiben lässt als durch die relativ starre Struktur von HydPy-H, positiv zu beantworten. HydPy-HL (oder auch HydPy-L) erscheint als aussichtsreicher Kandidat, den modellstrukturellen Anteil der hydrologischen Unsicherheit im Vorhersagesystem FEWS-Rhein zu verringern.

Tabelle 5.4: Gütekriterien, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-HL

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.45	0.58	1.39	1.08	0.86
2005 - 2009	-1.14	0.85	1.04	0.90	0.90
2010 - 2013	-1.18	0.82	1.14	0.95	0.91
gesamt	-1.21	0.81	1.12	0.91	0.88
Q < MQ/2	-0.93	0.28	1.32	1.46	0.55
MQ/2 < Q <MQ	-1.05	0.52	1.09	1.21	0.57
MQ < Q	-1.74	0.60	0.99	1.29	0.73

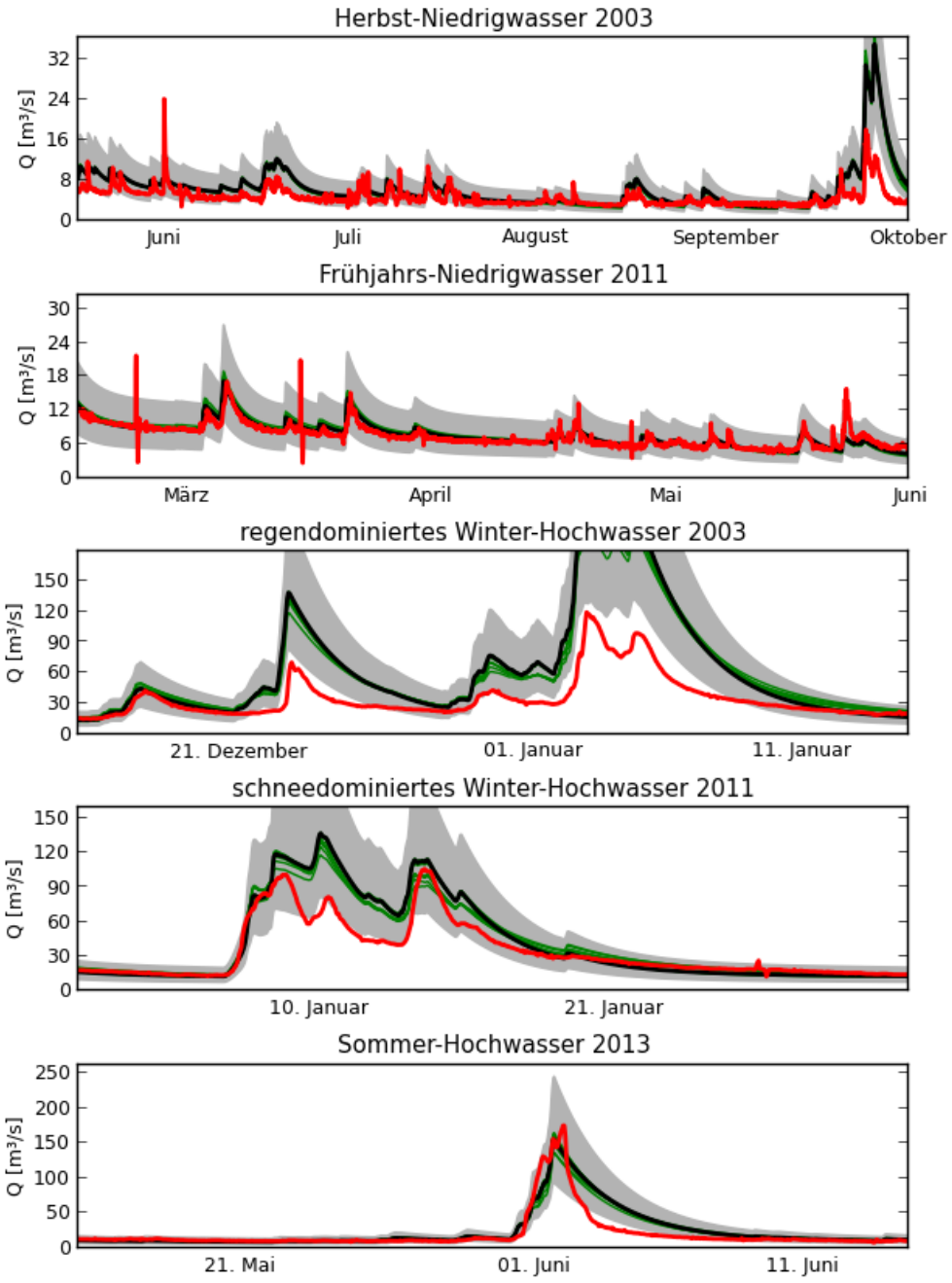

Abbildung 5.14: Extremereignisse, Oberer Neckar, SEPD-het, HydPy-HL

Tabelle 5.5: Gütekriterien, Lahn, SEPD-het, HydPy-HL

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.74	0.60	1.22	1.31	0.90
2005 - 2009	-1.56	0.89	1.08	1.04	0.94
2010 - 2013	-1.54	0.60	1.24	1.32	0.95
gesamt	-1.58	0.72	1.18	1.21	0.93
Q < MQ/2	-1.25	0.40	1.12	1.51	0.71
MQ/2 < Q <MQ	-1.52	0.44	1.12	1.33	0.56
MQ < Q	-2.13	0.60	1.09	1.30	0.76

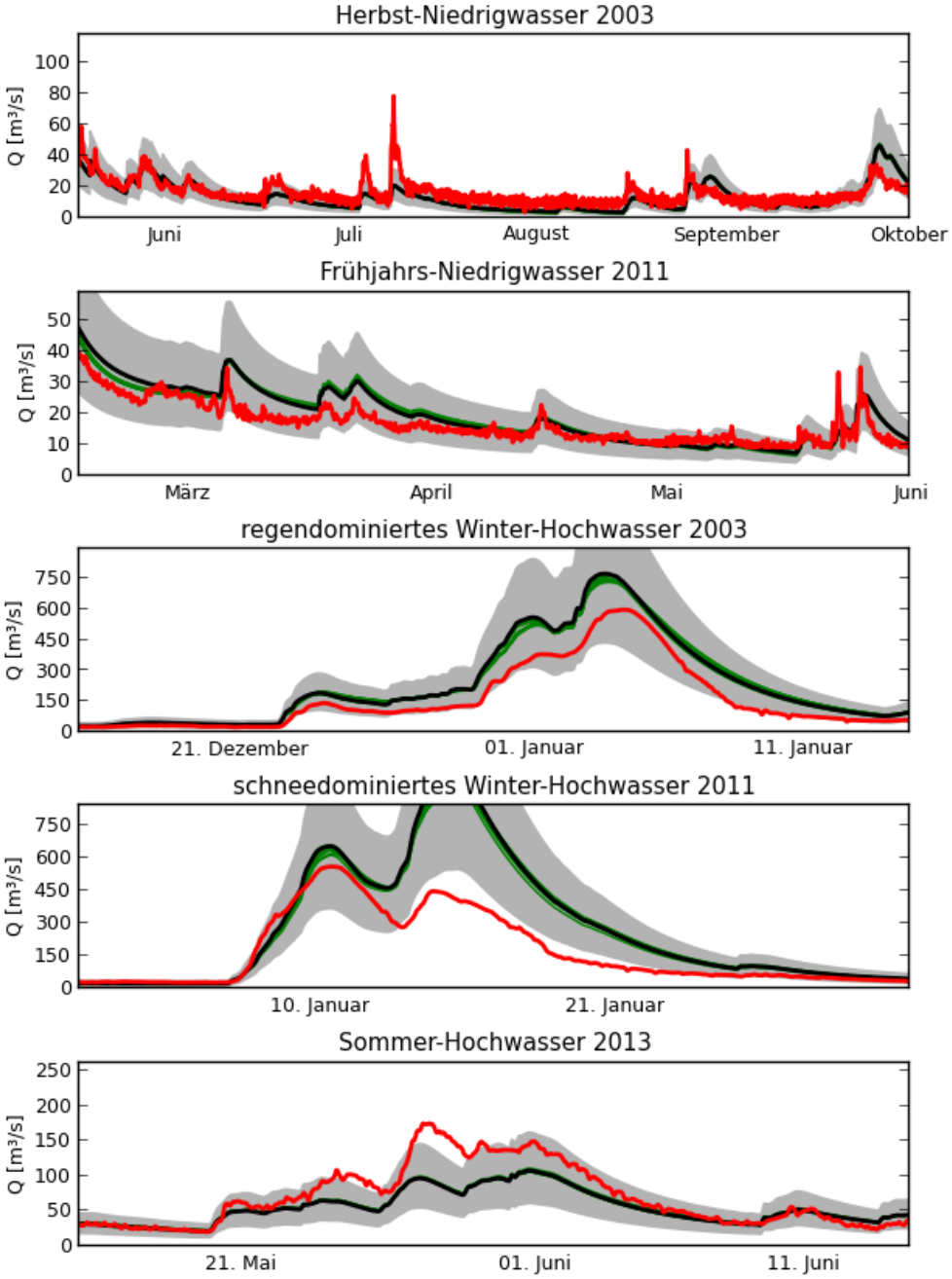

Abbildung 5.15: Extremereignisse, Lahn, SEPD-het, HydPy-HL

Tabelle 5.6: Gütekriterien, Nahe, SEPD-het, HydPy-HL

	L	rKGE	β	α	ρ
2003 - 2004	-1.24	0.64	1.28	1.23	0.96
2005 - 2009	-1.29	0.77	1.16	1.13	0.90
2010 - 2013	-1.31	0.81	0.94	0.83	0.96
gesamt	-1.29	0.87	1.11	1.00	0.93
Q < MQ/2	-0.93	0.72	1.14	1.16	0.82
MQ/2 < Q <MQ	-1.30	0.54	0.96	1.05	0.55
MQ < Q	-2.02	0.69	1.00	1.26	0.83

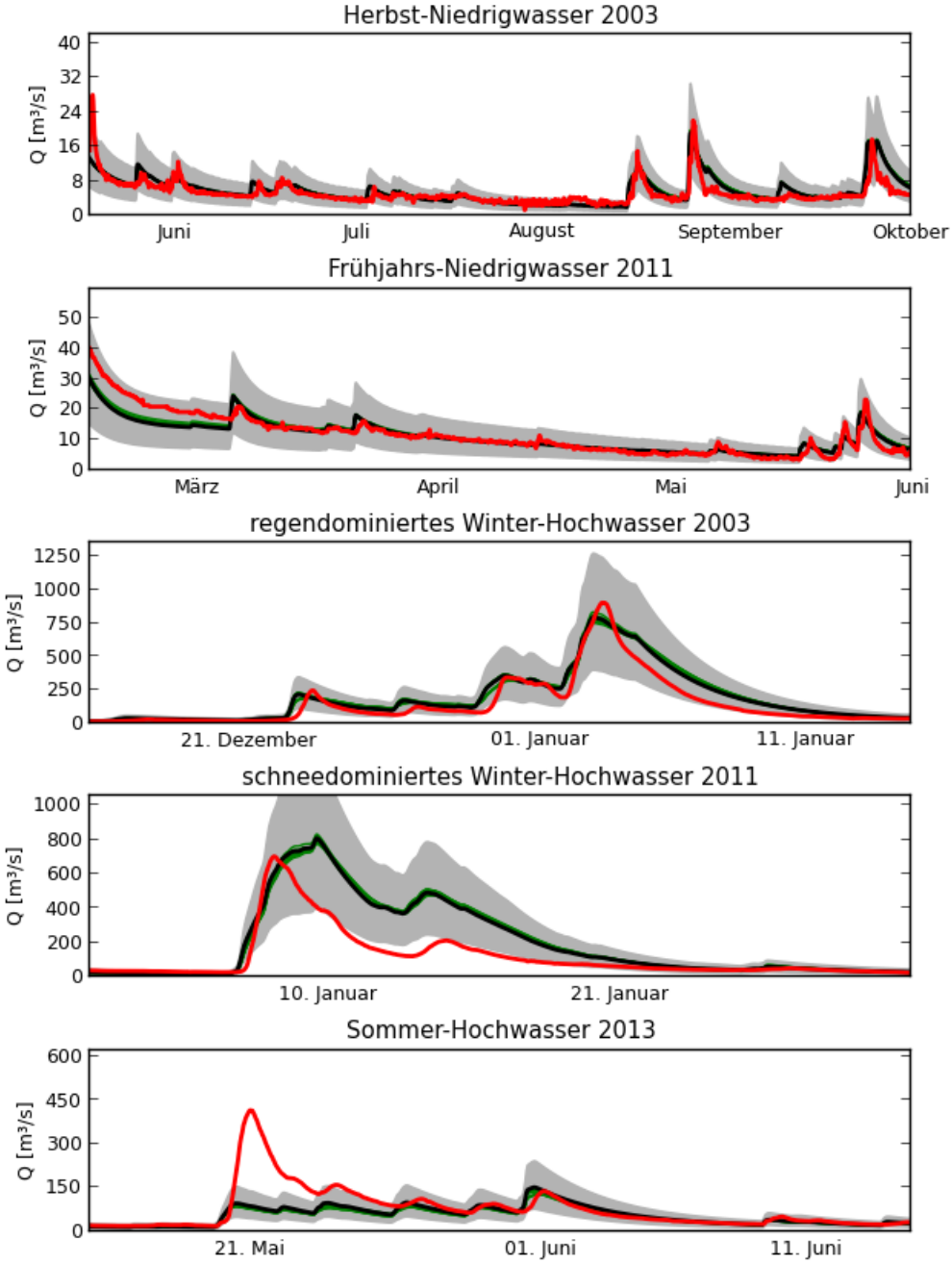

Abbildung 5.16: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-HL

6 Regularisierung unstetiger Differenzialgleichungen

Die Prozessgleichungen hydrologischer Modelle sind oftmals unstetig. Dies kann, wie Kavetski und Kuczera (2007) für ein einfaches Schnee-Modell demonstrieren, zur Parameterunsicherheit beitragen. In Abschnitt 5.2 wurde das aus einer unstetigen Perkolations-Gleichung resultierende „Block-Verhalten“ des upper zone layers von HydPy-H samt daraus resultierender Probleme eingehend diskutiert.

Während in Abschnitt 5.2 mit HydPy-HΨ eine Alternative entwickelt wurde, welche die vielleicht gravierendste Unstetigkeit von HydPy-H eliminiert, wird in diesem Kapitel der Nutzen einer vollständigen Eliminierung aller Unstetigkeiten der Prozessgleichungen von HydPy-H diskutiert.

In Tyralla und Schumann (2013) wird die von Kavetski und Kuczera (2007) vorgeschlagene Regularisierungstechnik erweitert, verallgemeinert und auf HydPy-H angewandt. Das resultierende Modell, HydPy-Hε, kann in seinem „Glättungsgrad“ eingestellt werden. Bei geringem Glättungsgrad verhält sich HydPy-Hε ähnlich wie HydPy-H, kleinere Unterschiede bleiben allerdings bestehen. Die programmtechnische Umsetzung von HydPy-H ist eine (für konzeptionelle hydrologische Modelle typische) „ad hoc“-Kombination aus Differenzialgleichungen und festgesetzten Lösungsstrategien. HydPy-Hε ist dagegen als reines Differenzialgleichungssystem formuliert, welches über die durch HydPy bereitgestellten numerischen Integrationsalgorithmen in wählbarer Genauigkeit gelöst werden kann (siehe Tyralla und Schumann 2014 für entsprechende Vergleichsrechnungen am Oberen Neckar).

6.1 Versuchsspezifikationen

Da HydPy-Hε im Wesentlichen HydPy-H entspricht, können alle in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Versuchsspezifikationen beibehalten werden. Mit der Konstante der Linearspeicherkaskade (KSC), welche in HydPy-Hε den Dreiecks-Unit-Hydrograph ersetzt (Tyralla und Schumann 2014), wird verfahren wie mit MAXBAZ: Setzen auf null für die Untersuchungsgebiete Oberer Neckar und Lahn, Beibehalten der bis auf den Faktor zwei zu KSC identischen MAXBAZ-Werte für die Teilgebiete der Nahe. Auch in HydPy-Hε ist der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz optional, in den folgenden Anwendungen wird aber grundsätzlich von diesem Gebrauch gemacht.

HydPy-Hε erfordert zusätzliche Spezifikationen. Zum einen hinsichtlich der numerischen Lösung des zugrundeliegenden Systems gewöhnlicher Differenzialgleichungen. Zum Einsatz kommt das explizite Runge-Kutta-Verfahren von Dormand und Prince (1980) der Ordnung fünf mit Fehlerkontrolle basierend auf der Ordnung vier. Da die Anwendung von HydPy-Hε mit sinnvoller Parametrisierung ein gänzlich nicht steifes Problem darstellt, entfällt die Notwendigkeit einer komplizierten Schrittweitensteuerung (siehe z. B. Hairer und Wanner 2010 für Details). Bei der Wahl des Algorithmus hat die sichere Einhaltung der relativ hoch angesetzten Rechengenauigkeit (10^{-6} mm/d) die oberste Priorität, um – soweit möglich – jeglichen Einfluss numerischer Ungenauigkeit auf die Untersuchungsergebnisse auszuschließen. Für operative Anwendungen ließe sich durch Ansetzen eine praxisrelevanteren Rechengenauigkeit und durch Einsatz einfacherer numerischer Lösungsverfahren

(z. B. Bogacki und Shampine 1989) bzw. der Kopplung verschieden komplexer Verfahren (Tyralla und Schumann 2014) Rechenzeit einsparen.

Um nicht alle Glättungsparameter der einzelnen Differenzialgleichungen getrennt festlegen zu müssen, wird das Glättungsverhalten von HydPy-Hε über zwei Metaparameter gesteuert: einen für temperaturbezogene Unstetigkeiten (Tsmooth) und einen für wassermengenbezogene Unstetigkeiten (Wsmooth). Details zur Wirkungsweise dieser Metaparameter sind in Tyralla und Schumann (2013) beschrieben. Zum Vergleich werden die folgenden Experimente mit kleinem, mittlerem und großem Glättungsgrad durchgeführt; mit Tsmooth- und Wsmooth-Werten von jeweils 0.1 °C, 1.0 °C und 5.0 °C bzw. 0.1 mm, 1.0 mm und 5.0 mm.

6.2 Analyse

Erfolgreiche Kalibrierungen vorausgesetzt, sollte die mit HydPy-Hε erzielte Simulationsgüte etwa der von HydPy-H entsprechen. Da dies in etwa zutrifft, wird auf die umfangreiche Tabellierung der berechneten Gütekriterien im Hauptteil des Berichtes verzichtet. Es fällt allerdings auf, dass HydPy-Hε unabhängig vom gewählten Glättungsgrad tendenziell schlechtere rangbasierte Kling-Gupta-Effizienz in den Validierungsperioden mit sich bringt. Der Median wird durchweg stärker überschätzt als durch HydPy-H. Ob dies eine Folge der Eliminierung der Unstetigkeiten oder der genaueren Lösung der Differenzialgleichungen ist, wäre durch Vergleichsrechnungen mit der Differentialgleichungs-Form von HydPy-H überprüfbar.

Relevanter ist, ob die Eliminierung der Unstetigkeiten den gewünschten Effekt der Reduktion von Parameterunsicherheit mit sich bringt. Diese ist in den für HydPy-H angestellten Untersuchungen insbesondere für die Lahn und die Nahe stark ausgeprägt. Durch Verwendung von HydPy-Hε treten für beide Untersuchungsgebiete vergleichbare Änderungen der Parameterunsicherheit auf, die in den folgenden Abbildungen exemplarisch für die Nahe dargestellt werden.

Bei geringen Glättungsgraden (Abbildung 6.1) zeigen die Simulationsergebnisse der zehn besten Parametersätze wie bei Anwendung von HydPy-H (Abbildung 4.12) ein ausgeprägte Bündelung beim Herbst-Niedrigwasser 2003, beim Frühjahrs-Niedrigwasser 2011 und beim Sommer-Hochwasser 2013 sowie eine starke Auffächerung beim schneedominierten Winter-Hochwasser 2011. Bei mittlerem Glättungsgrad bleibt die Bündelung unverändert bestehen, die Auffächerung wird allerdings reduziert (Abbildung 6.2). Unter Einsatz der höchsten Werte der Glättungs-Metaparameter entfällt die Bündelung komplett (Abbildung 6.3). Und auch in Form der Auffächerung zeigt sich allenfalls in den Hochwasserscheiteln der beiden Winterereignisse eine geringe Auswirkung der Parameterunsicherheit.

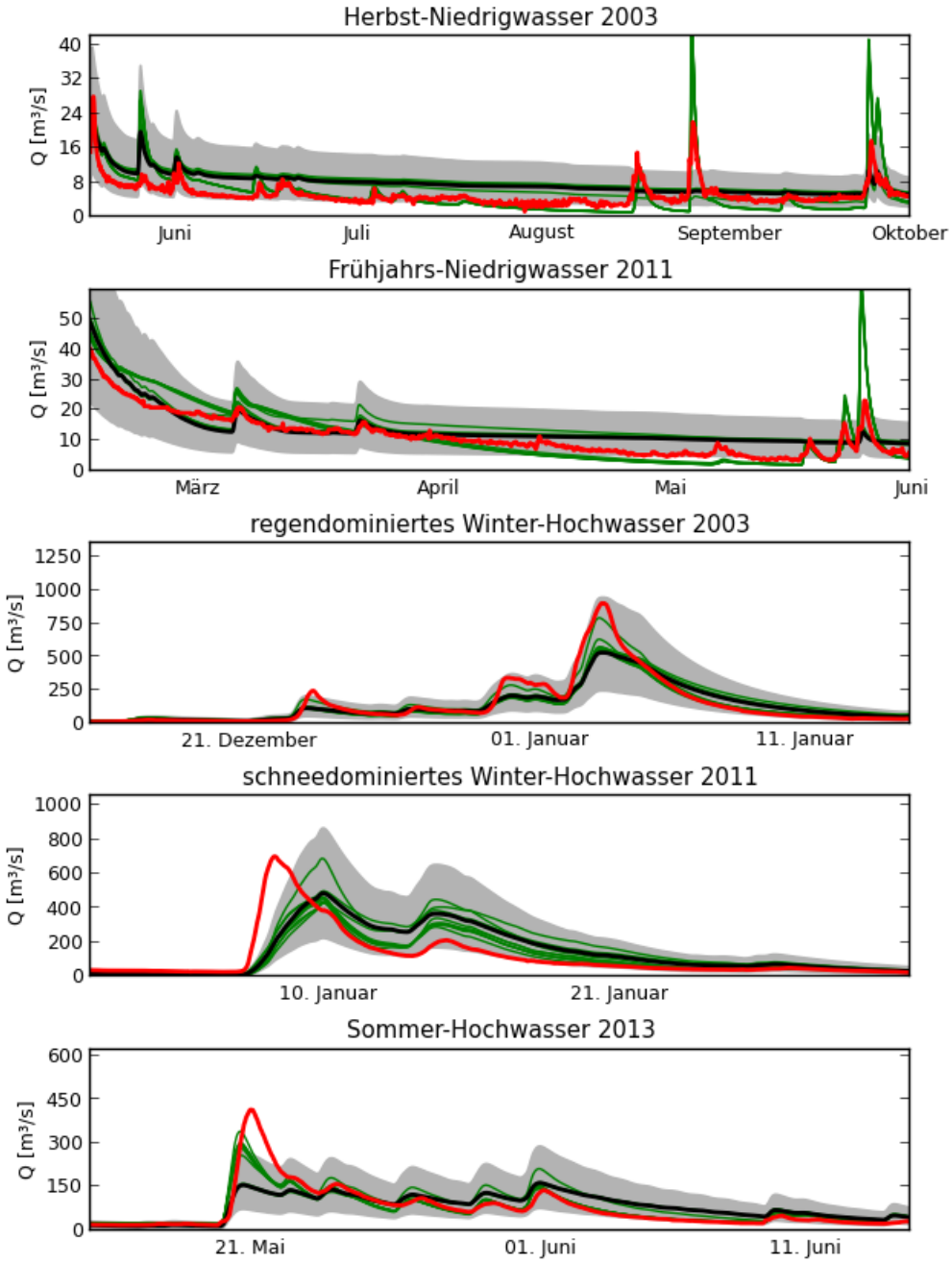

Abbildung 6.1: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-Hε, Tsmooth=0.2 °C, Wsmooth=0.2 mm

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die mit dem größten Glättungsgrad simulierten Ganglinien nicht exakt auf einem der beiden „Bündel“ der mit kleinem und mittlerem Glättungsgrad simulierten Ganglinien liegen. Wie zu erwarten weicht HydPy-Hε umso stärker vom Originalverhalten ab, je mehr Glättung erlaubt wird. Dies macht sich beispielsweise beim das Frühjahrs-Niedrigwasser 2011 auflösenden Abflussereignis im Juni positiv und beim ins Herbst-Niedrigwasser 2003 eingelagerten Abflussereignis im August negativ bemerkbar.

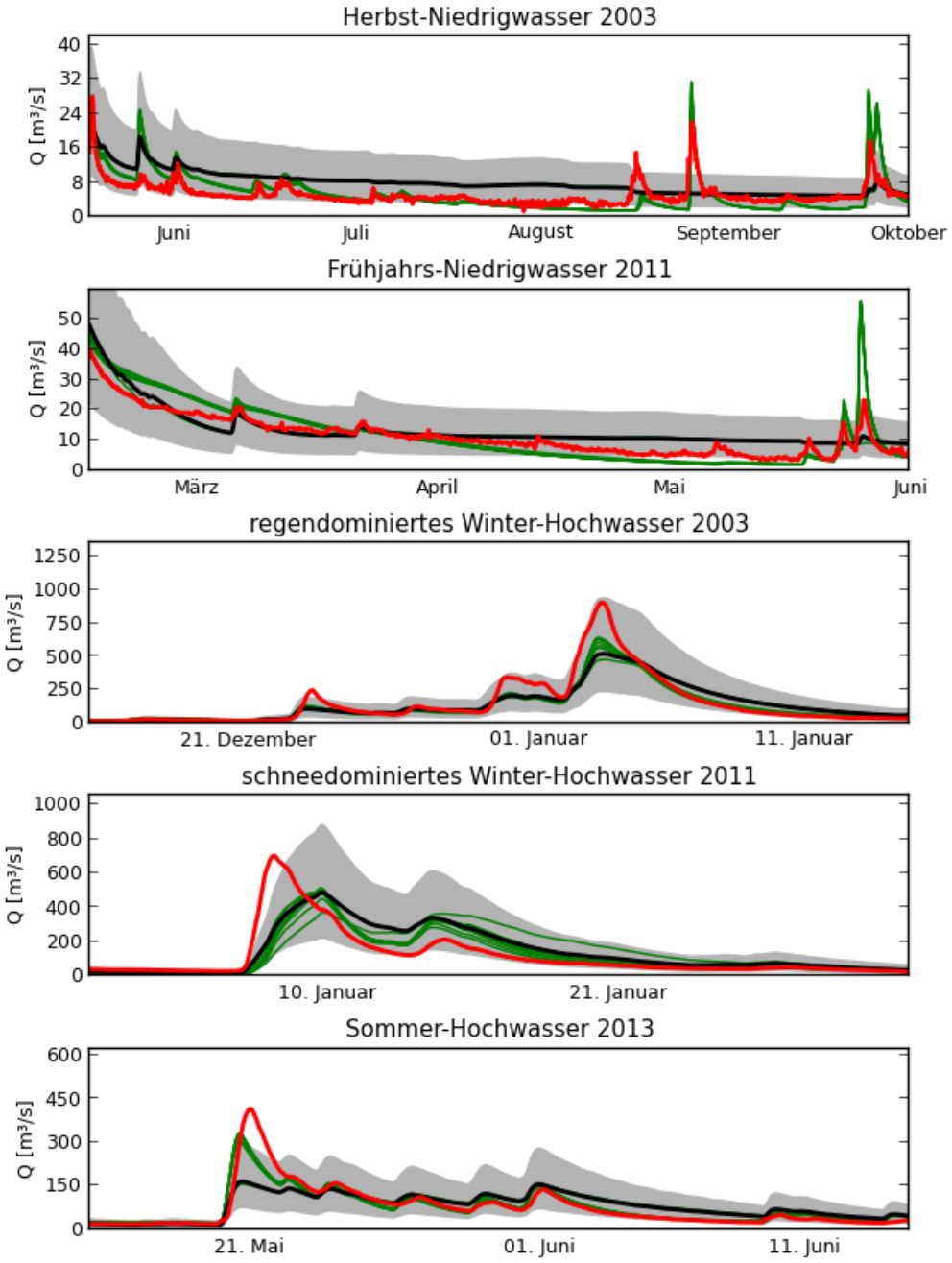

Abbildung 6.2: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-Hε, Tsmooth=1.0 °C, Wsmooth=1.0 mm

Die Änderung der Parameterunsicherheit wird exemplarisch für die Nahe und dem größten Glättungsgrad veranschaulicht (vgl. Abbildung 6.4 mit Abbildung 4.10). Unter Verwendung von HydPy-Hε erscheint das globale Maximum der Likelihood-Funktion SEPD-het deutlich sicherer angenähert.

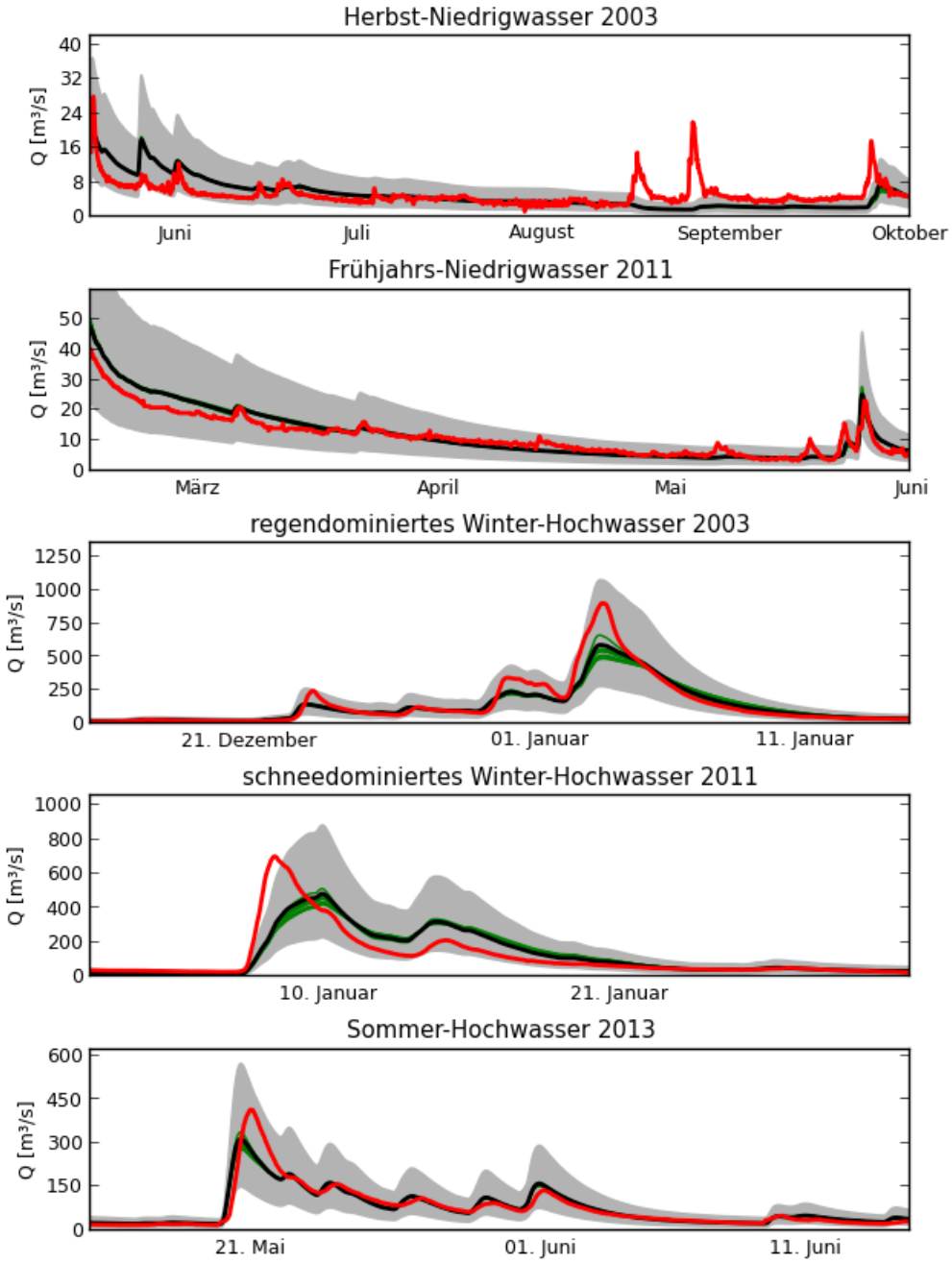

Abbildung 6.3: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, HydPy-Hε, Tsmooth=5.0 °C, Wsmooth=5.0 mm

Wie bereits die Visualisierung der Simulationsergebnisse vermuten lässt, sind mit lokalen Optima der Fehleroberfläche verbundene Phänomene eingeschränkter vorhanden, wiewohl nicht ganz verschwunden. Der Grad-Tag-Faktor (CFMAX) wird weiterhin nicht eindeutig identifiziert, eine Aufteilung der Parametersätze auf den unteren und den oberen Grenzbereich des freigegebenen Intervalls tritt aber nicht auf. Für einige Parameter ändert sich der optimale Parameterwert markant, beispielsweise für den Nichtlinearitätsparameter des Bodenmoduls (BETA). Gleiches gilt für die Speicherkonstante des lower zone layers (K4), für die der optimale Parameterwert nun an der anderen Intervallgrenze liegt. Für K4 scheint weiterhin das bereits für HydPy-H diskutierte lokale Optimum mit

kleinem Kontraktionsbereich an der unteren Intervallgrenze zu bestehen. Dieses weist für HydPy-Hε allerdings einen kleineren Likelihood-Wert als das lokale Optimum mit größerem Kontraktionsbereich an der oberen Intervallgrenze auf.

In der Analyse von K4 wird deutlich, dass die Eliminierung von Unstetigkeiten in den Differenzialgleichungen zwar einige Problem in der Parameteridentifikation behebt. Unsicherheiten, die mit größeren modellstrukturellen Problemen verbunden sind, werden aber allenfalls gelindert. Entsprechend stark bietet sich die Anwendung der Regularisierungstechnik auf HydPy-HΨ in Folgestudien an.

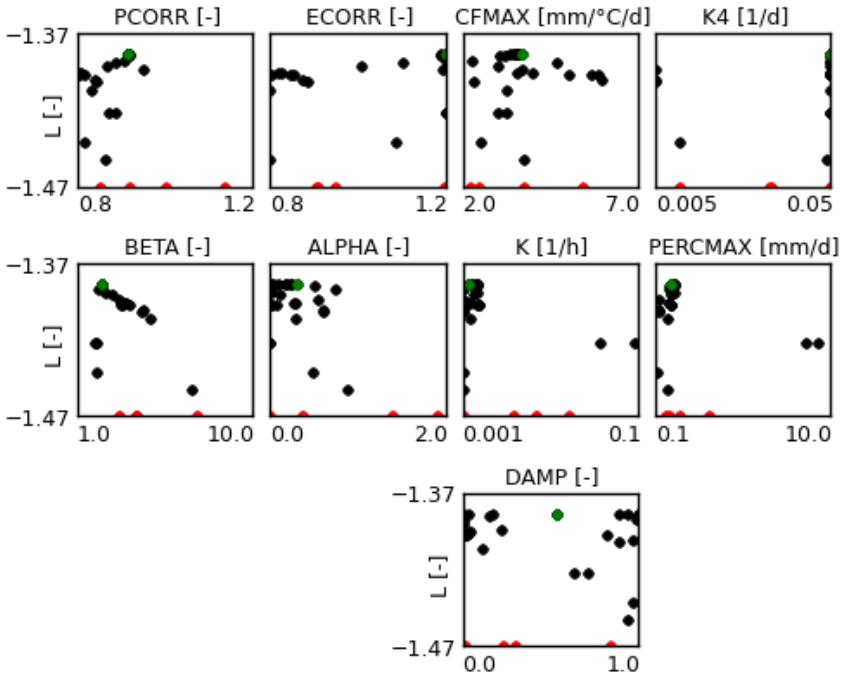

Abbildung 6.4: Parameterunsicherheit, Nahe, SEPD-het, HydPy-Hε, Tsmooth=5.0 °C, Wsmooth=5.0 mm

Zur effizienteren Kalibrierung erscheint der Wechsel von HydPy-H zu HydPy-Hε bislang nicht lohnend. Die geringere Anzahl von notwendigen Optimierungsläufen durch BOBYQA bis zur (vermuteten) Annäherung des globalen Optimums wird durch die deutlich erhöhte Rechendauer des numerischen Integrationsalgorithmus überkompensiert. Ob sich dieses Verhältnis durch eine Beschleunigung der numerischen Integration umkehren lässt, ist fraglich. Für andere Optimierungsalgorithmen sind aber durchaus andere Nettoeffekte zu erwarten: gegenüber BOBYQA sollten gradientenbasierte Verfahren stärker von der Eliminierung der Unstetigkeiten profitieren, globale Verfahren dagegen weniger stark.

Neben der Wahl des Optimierungsalgorithmus hat die Länge der Kalibrierperiode den größten Einfluss auf den Nutzen der angewandten Regularisierungstechnik. Grundsätzlich gilt: je kürzer der betrachtete Zeitraum, desto stärker pausen sich Grenzwerte in den Prozessgleichungen auf Fehleroberflächen durch (beispielsweise aufgrund der Verwendung zeitkonstanter Eingangsgrößen für einzelne Zeitschritte). Ein größerer Nutzen der Methodik ist dementsprechend für die ereignisbezogene Kalibrierung und – im Projektkontext relevanter – für die Zustandsnachführung zu vermuten. Ein positiver Effekt auf statistische Verfahren zur Modell-Output-Korrektur ist zwar theoretisch zu erwarten (siehe Abschnitt 5.2.1), allerdings aufgrund der (z. B. mit den Modifikationen von HydPy-HΨ verglichen) subtilen Änderung des Systemverhaltens wohl nicht im relevanten Bereich.

7 Quantifizierung der Modellunsicherheit

In den vorangegangenen Analysen zeigt sich keines der untersuchten Modelle als durchweg überlegen. Gleiches gilt für die Parametersätze einzelner Modelle. So wird zwar die Likelihood-Funktion SEPD-het favorisiert, auf ND-hom basierende Parametersätze können aber durchaus Vorteile im Hochwasserfall aufweisen (Abschnitt 4.3.2).

Derartige Mehrdeutigkeiten sind nicht nur für die hydrologische Modellierung typisch, sondern treten in vielen datenbasierten Wissenschaften auf. Eine Möglichkeit, hiermit pragmatisch umzugehen, ist die Ensemble-Modellierung. Hierbei werden Ensembles aus Modellen mit unterschiedlicher Struktur, Parametrisierung oder Initialisierung gebildet. Jedes Modell berechnet „seine“ Modellausgabe. Durch die Diversität aller Modellausgaben kann ein Maß für Modellunsicherheit gewonnen und oftmals ein Gesamtergebnis erzielt werden, welches an Genauigkeit und Zuverlässigkeit die Ergebnisse aller Einzelmodelle übertrifft.

Tyralla und Schumann (2016) generalisieren die beiden frühen Ensemble-Techniken von Bates und Granger C. W. J. (1969) und Zarnowitz (1969). Der resultierende „Ensemble Range Approach“ zielt auf eine mathematische Beschreibung der Modellunsicherheit ab, welche die hydrologische Interpretation unterstützt. Dazu wird die Modellunsicherheit durch eine modifizierte Beta-Verteilung in der jeweiligen Spanne der Simulationsergebnisse der Ensemble-Mitglieder repräsentiert.

Die Interpretierbarkeit der Ergebnisse des Ensemble Range Approach konnte bislang nur über einfache synthetische Fallstudien demonstriert werden. Für reale Fallstudien ergeben sich große Einschränkungen, da die Unsicherheit der Eingangsdaten bislang unberücksichtigt bleibt. Dies kann zur impliziten Übernahme der Eingangsdaten-Unsicherheit durch die Beta-Verteilung und somit zu einer Überschätzung der Modell-Unsicherheit führen. Dies muss sich hinsichtlich der Unterstützung der im „Seamless Prediction“-Teilprojekt zur Probabilistischen Bewertung von Vorhersagen (Klein et al. 2015) angewandten Ensemble-Techniken nicht zwangsläufig negativ auswirken. Denkbar ist auch eine erhöhte Robustheit der Ensemble-Vorhersagen infolge der Repräsentation der Eingabedaten-Unsicherheit durch die Ensemble-Mitglieder.

In der hydrologischen Modellierung kommen gewöhnlich Modellstruktur-Ensembles zum Einsatz (z. B. Liu und Gupta 2007 sowie Diks und Vrugt 2010). Vorab wird jedes Modell unabhängig von den anderen Mitgliedern des Ensembles kalibriert. Es lässt sich vermuten, dass durch die Anpassung der Modelle an dieselben Abflussdaten Ensemble-Diversität verlorengeht, was bekanntermaßen den Erfolg von Ensemble-Techniken begrenzen kann (siehe Veenhuis 2013 für eine entsprechende Diskussion im Bereich der numerischen Wettervorhersage).

In diesem Kapitel werden zwei Ensembles gebildet. Eines als reines Parameter-Ensemble, basierend auf der doppelten Verwendung von HydPy-H. Das andere als Struktur-Ensemble, bestehend aus HydPy-H und HydPy-HL. HydPy-HL wird gewählt, da dieses im Vergleich zu HydPy-Hγ und HydPy-HΨ die größten strukturellen Unterschiede gegenüber HydPy-H aufweist.

Ein für Folgestudien interessantes Ensemble könnte durch Kombination von HydPy-HΨ und HydPy-HL gebildet werden. HydPy-HΨ zeigt überdurchschnittliche Ergebnisse im oberen, HydPy-HL zeigt überdurchschnittliche Ergebnisse im unteren Abflussbereich. Vorzüge gegenüber den beiden oben genannten Ensembles erscheinen daher plausibel, diesen wird wegen der Stellung von HydPy-H als Referenzmodell dieser Studie aber der Vorrang eingeräumt.

Die jeweils im Ensemble enthaltenen Modelle werden unter Einsatz des Ensemble Range Approach simultan kalibriert. Dies ermöglicht den Ensemble-Mitgliedern die Konzentration auf verschieden Aspekte der gemessenen Ganglinie und macht die doppelte Verwendung von HydPy-H im ersten Ensemble überhaupt erst sinnvoll möglich (alternativ wäre auf unterschiedliche Likelihood-Kriterien oder Kalibrierperioden zurückzugreifen).

Die simultane Kalibrierung der Modellparameter (sowie der statistischen Parameter) führt etwa zu einer Verdopplung der Dimensionalität des Parameterraumes. Die Verwendung von Ensembles mit mehr als zwei Modellen würde die Größe des Suchraumes weiter erhöhen. Dies würde eine Modifikation der gewählten Kalibrierstrategie erfordern.

7.1 Versuchsspezifikationen

Hinsichtlich HydPy-H werden die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Versuchsspezifikationen übernommen, hinsichtlich HydPy-HL die von Abschnitt 5.3.2. HydPy-H wird grundsätzlich unter Aktivierung des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes eingesetzt. Details zu Verwendung des Ensemble Range Approach finden sich in Tyralla und Schumann (2016).

Bei jedem der 30 Optimierungsläufe des Parameter-Ensembles sind die initialen Parameterwerte beider Realisierungen von HydPy-H identisch. Es kommen die für die Einzelkalibrierung von HydPy-H verwendeten Startwerte zum Einsatz. Für das Struktur-Ensemble wird analog sowohl auf die zur Einzelkalibrierung von HydPy-H als auch auf die zur Einzelkalibrierung von HydPy-HL verwendeten Startwerte zurückgegriffen.

Von der in Tyralla und Schumann (2016) verwendeten Modifizierung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Beta-Verteilung (mBD) durch einen zusätzlichen Exponenten wird abgewichen. In diesem Bericht kommt eine flexiblere, auf dem Grenzwert t basierende „Aufsteilungsmöglichkeit“ zum Einsatz:

$$mBD(x,\Theta,t) = \frac{\max\left(BD(x,\Theta) - \max\limits_{z\in[\min(x_A,x_B),\max(x_A,x_B)]}\left(BD(z,\Theta)\cdot t\right),\ 0\right)}{\int\limits_{\min(x_A,x_B)}^{\max(x_A,x_B)} \max\left(BD(u,\Theta) - \max\limits_{u\in[\min(x_A,x_B),\max(x_A,x_B)]}\left(BD(u,\Theta)\cdot t\right),\ 0\right)du} \qquad 7.1$$

$$\Theta = x_A, x_B, p, q$$

x ist der jeweils betrachtete Abflusswert, x_A und x_B die Simulationswerte der Ensemble-Mitglieder, BD die unmodifizierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Beta-Verteilung, p und q deren Formparameter. t muss im Intervall [0,1) liegen. Bei Belegung mit Null bleibt die Form von BD erhalten. Je größer t, desto mehr werden Unterschiede in der Wahrscheinlichkeitsdichte verstärkt.

7.2 Analyse

Die simultane Kalibrierung von zwei Ensemble-Mitgliedern stellt eine deutlich größere Herausforderung für Optimierungsalgorithmen dar, als die Kalibrierung einzelner Modelle. Als erster Plausibilitätstest für das Parameter-Ensemble bietet sich der Vergleich der in der Kalibrierperiode erzielten Likelihood-Werte mit den unter alleiniger Verwendung von HydPy-H erzielten Werten an (vgl. Tabelle 7.1 mit Tabelle 4.5, Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7). Die Ensemble-Werte müssen theoretisch stets größer oder zumindest gleich den Einzelmodell-Werten sein. Dies ist für das Parameter-Ensemble durchweg der Fall.

Tabelle 7.1: Likelihood-Werte, SEPD-het, Parameter-Ensemble

	Neckar	Lahn	Nahe
2003 - 2004	-1.67	-1.62	-1.19
2005 - 2009	-1.13	-1.57	-1.31
2010 - 2013	-1.17	-1.60	-1.33
gesamt	-1.24	-1.59	-1.30
Q < MQ/2	-0.96	-1.26	-0.96
MQ/2 < Q <MQ	-1.14	-1.59	-1.37
MQ < Q	-1.69	-2.06	-1.92

Tabelle 7.1 umfasst die Likelihood-Werte aller Perioden und Abflussbereiche für alle Untersuchungsgebiete. Die Angabe der rangbasierten Kling-Gupta-Effizienz und ihrer Komponenten muss entfallen. Derartige deterministische Gütemaße eignen sich nicht zur Evaluierung von wahrscheinlichkeitsdichtebasierten Ergebnissen, wie sie der Ensemble Range Approach liefert.

Die likelihood-basierte Evaluierung fällt für den Oberen Neckar negativ aus. Die Werte beider Validierperioden verschlechtern sich gegenüber Tabelle 4.5, ebenso die Werte für den unteren und mittleren Abflussbereich. Einzig für den oberen Abflussbereich ergibt sich eine leichte Zunahme. Dem steht eine Zunahme der Likelihood-Werte für alle Validierperioden und Abflussbereiche sowohl für die Lahn (vgl. Tabelle 4.6) als auch die Nahe (vgl. Tabelle 4.7) gegenüber. Für diese beiden Gebiete scheint sich die zeitliche Übertragbarkeit unter Verwendung des Ensemble Range Approach trotz drastischer Zunahme der freien Parameter zu erhöhen.

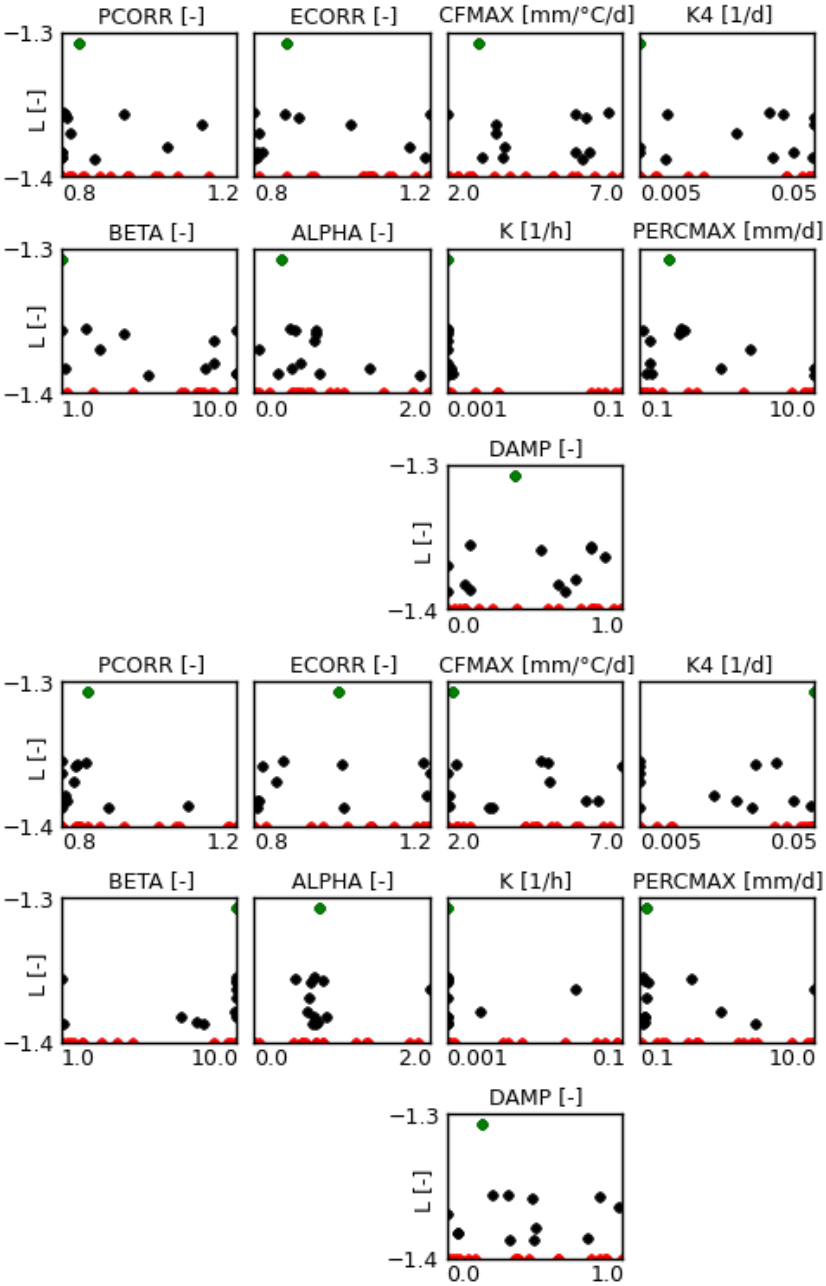

Abbildung 7.1: Parameterunsicherheit, Nahe, SEPD-het, Parameter-Ensemble

Die Parameterunsicherheit ist groß. Insbesondere für die Nahe ist kaum davon auszugehen, dass das globalen Optimums gut angenähert wird (Abbildung 7.1). Interessant ist die Betrachtung des besten Parametersatzes. Die meisten Parameterwerte fallen für beide Ensemble-Mitglieder ähnlich aus, nicht aber die der Speicherkonstante des lower zone layers (K4) und des Nichtlinearität-Parameters des Bodenmoduls (BETA). Hier liegen die Werte des ersten Ensemble-Mitglieds an der unteren Grenze des jeweils freigegebenen Intervalls, die des zweiten Ensemble-Mitglieds dagegen an der oberen Grenze. Dieses Muster ist (in umgekehrter Zuordnung zu den Ensemble-Mitgliedern) auch für die Lahn festzustellen, für den Oberen Neckar dagegen nicht.

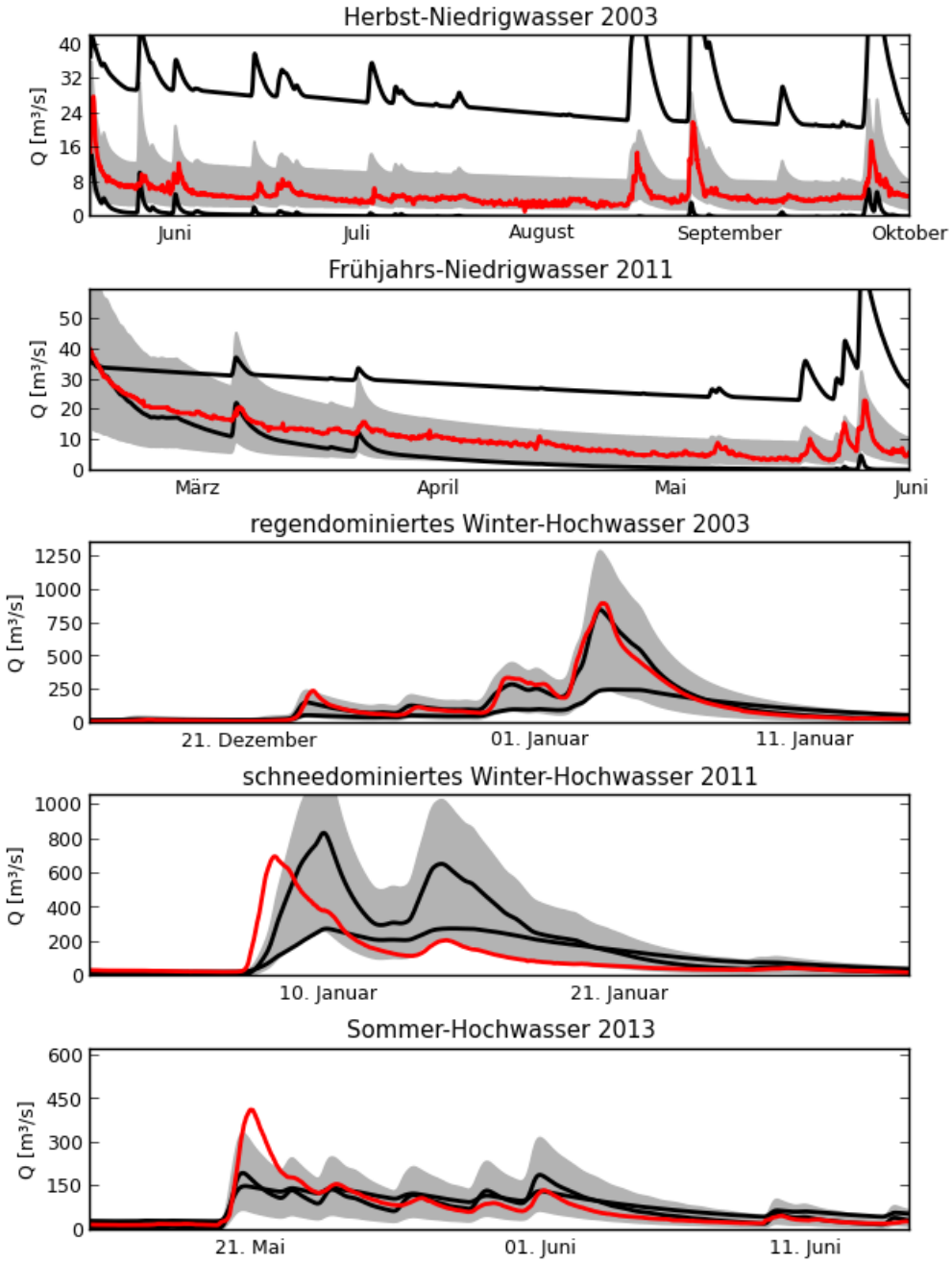

Abbildung 7.2: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, Parameter-Ensemble

Die Parallelen zur in Abschnitt 4.3.2 angestellten Analyse sind offenkundig. In der Bewertung der Parameterunsicherheit der Einzelkalibrierung von HydPy-H mit erweitertem Sättigungsflächen-Ansatz zeigen sich für K4 und BETA lokale Optima an den Intervallgrenzen für die Lahn (Abbildung 4.9) und die Nahe (Abbildung 4.10), nicht aber für den Oberen Neckar (Abbildung 4.6).

Die Vorteile durch die Verwendung des reinen Parameter-Ensembles ergeben sich also aus der Berücksichtigung dieser strukturellen Unsicherheit. Wie in Abbildung 2.1 unten rechts visualisiert, lässt sich in solchen Fällen Simulationsunsicherheit durch die gleichzeitige Berücksichtigung beider lokaler Optima mit Hilfe von Ensemble-Techniken verringern. Für den Oberen Neckar dagegen, wo

sich von vornherein keine Probleme mit lokalen Optima andeuten, zeigt die Anwendung des Ensemble Range Approach keinen Nutzen.

Abbildung 7.2 veranschaulicht die Funktionsweise des Ensemble Range Approach anhand der fünf Validierungs-Ereignisse für die Nahe. Die simulierten Abflusswerte beider Ensemble-Mitglieder sind in schwarz dargestellt. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung der Auswirkung der Parameter-Unsicherheit verzichtet.

Es ließe sich vermuten, dass die beiden Ganglinien des Parameter-Ensembles etwa den mit den lokalen Optima verbundenen grünen Simulationsbündeln von Abschnitt 4.3.2 entsprechen. Der Vergleich von Abbildung 7.2 und Abbildung 4.12 widerlegt dies. Mit Ausnahme des Sommer-Hochwassers 2013 sind die Unterschiede in den Ganglinien des Parameter-Ensembles deutlich stärker ausgeprägt. Die Ensemble-Mitglieder repräsentieren mehr Unsicherheit (vermutlich auch Eingangsdaten-Unsicherheit, s. o.), als dies bei Bildung eines Ensembles entsprechend der beiden lokalen Optima der Einzelkalibrierung der Fall wäre. Die gemessene Ganglinie wird dadurch häufiger, keineswegs aber durchgehend durch die Modellausgaben umschlossen.

Trotz großer Differenzen des System-Verhaltens der verschiedenen Parametrisierungen von HydPy-H ähneln sich die Abbildung 7.2 und Abbildung 4.8 dargestellten Unsicherheitsbereiche stark. Einziger markanter Unterschied ist eine Verbesserung beim Frühjahrs-Niedrigwasser 2011, wodurch die gemessene Ganglinie nun auch in der späten Niedrigwasserphase sicher im berechneten Unsicherheitsbereich liegt.

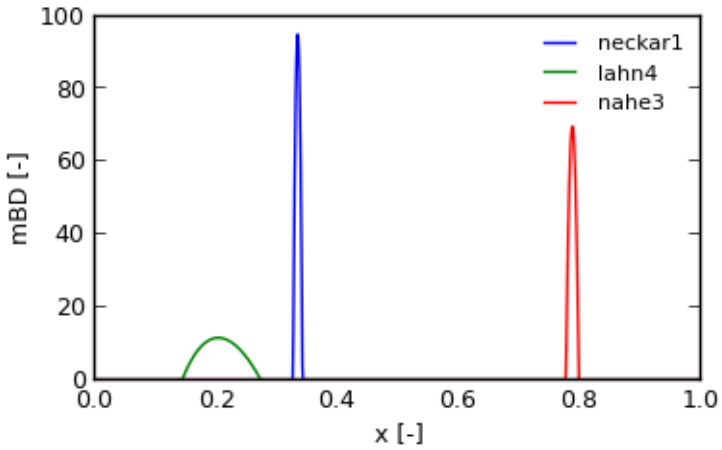

Abbildung 7.3: Modellstruktur-Unsicherheit, Parameter-Ensemble

Aufgrund der Enge des Unsicherheits-Bandes in den Niedrigwasser-Perioden im Vergleich zur Spannweite der Modell-Ausgaben lässt sich erkennen, dass der Ensemble Range Approach hier weitgehend die Form eines Point Forecasting-Ansatzes (Bates und Granger C. W. J. 1969) annimmt. Dies ist ebenfalls für die anderen Untersuchungsgebiete der Fall, wie Abbildung 7.3 veranschaulicht. Für das Norm-Intervall [0, 1] ist die jeweilige Form der modifizierten Beta-Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dargestellt. In allen Fällen liegen, mit gewisser Einschränkung für die Lahn, äußerst enge Verteilungen vor. Die Kombination der Modell-Ausgaben erfolgt demnal funktional in etwa als gewichtetes Mittel. Modell-Unsicherheit trägt höchstens für die Lahn in relevantem Maße zur Zunahme der geschätzten Simulationsunsicherheit bei.

Im Rahmen der Konzeption des Ensemble Range Approach ließe sich diese Beobachtung als mangelnde Berücksichtigung konzeptioneller oder räumlicher Prozessheterogenität durch HydPy-H auffassen. Ersteres wird umfangreich in Abschnitt 5.3 untersucht und tendenziell bestätigt. Letzteres erscheint aber ebenfalls plausibel, wenn man die grobe räumliche Auflösung der hier diskutierten Modelle in Betracht zieht.

Die durch die Beta-Verteilung definierten „Mischverhältnisse“ sind für die Nahe und die Lahn beinahe identisch. Wie die Betrachtung des besten Parametersatzes zeigt, folgt die spiegelverkehrte Positionierung der Wahrscheinlichkeitsdichten in Abbildung 7.3 aus einem (dem Zufall überlassenen) „Rollentausch“ der Member des jeweiligen Ensembles. Diese große Übereinstimmung lässt ein gewisses Maß an Übertragbarkeit der obigen Diskussion auf andere Rhein-Zuflussgebiete vermuten.

Die simultane Parametrisierung beider Mitglieder des Struktur-Ensembles stellt die verwendete Kalibrierstrategie (30 unabhängige Läufe von BOBYQA) vor noch größere Probleme, als die Parametrisierung des reinen Parameter-Ensembles. Nach ersten Fehlversuchen wurde auf den zeitlich aufwendigeren DE-Algorithmus zurückgegriffen. BOBYQA kam anschließend zum sogenannten „smoothing“ der DE-Ergebnisse zum Einsatz.

Tabelle 7.2: Likelihood-Werte, SEPD-het, Struktur-Ensemble

	Neckar	Lahn	Nahe
2003 - 2004	-1.50	-1.64	-1.23
2005 - 2009	-1.12	-1.56	-1.31
2010 - 2013	-1.20	-1.56	-1.33
gesamt	-1.22	-1.58	-1.30
Q < MQ/2	-0.97	-1.25	-0.98
MQ/2 < Q <MQ	-1.08	-1.59	-1.39
MQ < Q	-1.68	-2.04	-1.89

Theoretisch müssen die Likelihood-Werte der Kalibrierperiode unter Verwendung des Struktur-Ensembles (Tabelle 7.2) wenigstens genausogut sowohl wie die unter alleiniger Verwendung von HydPy-H (Tabelle 4.7) als auch wie die unter alleiniger Verwendung von HydPy-HL (Tabelle 5.6) erzielten Likelihood-Werte sein. Dies trifft für den Oberen Neckar ($+0.02$) und die Lahn (± 0.00) zu, nicht aber für die Nahe (-0.02). Die Unterschiede sind allerdings für alle drei Untersuchungsgebiete zu gering, als das sie im Rahmen der gegebenen Parameterunsicherheit als signifikant einzustufen wären. Auch in den Validierperioden weist das Struktur-Ensemble zumindest gegenüber der alleinigen Verwendung des besseren Ensemble-Mitglieds keine deutlichen Vorteile, aber auch keine wesentlichen Nachteile auf.

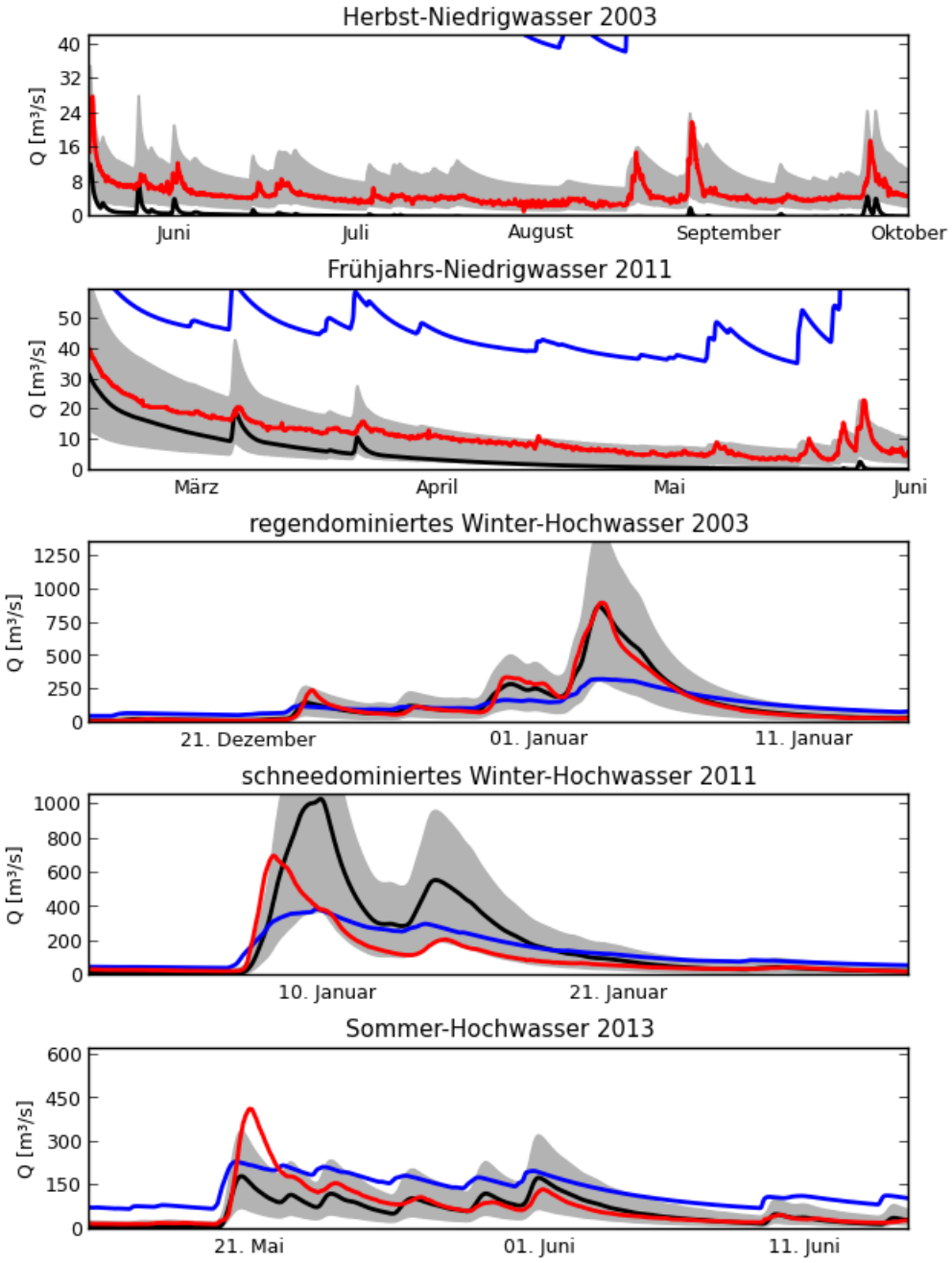

Abbildung 7.4: Extremereignisse, Nahe, SEPD-het, Struktur-Ensemble

Abbildung 7.4 zeigt die Ergebnisse des Struktur-Ensembles für die Validierungsereignisse an der Nahe. Die Kombination der Modell-Ausgaben entspricht wie beim reinen Parameter-Ensemble etwa dem Point Forecasting-Ansatz. Die stärkere Gewichtung der Ganglinie von HydPy-H (schwarze Linie) gegenüber der von HydPy-HL (blaue Linie) überrascht, wenn man die besseren Anpassungen (insbesondere im Niedrigwasserbereich) bei alleiniger Anwendung von HydPy-HL vergegenwärtigt (vgl. Abbildung 5.16).

Es stellt sich die Frage, warum weder für die Nahe noch für die Lahn eine Parametrisierung der modifizierten Beta-Verteilung identifiziert wird, die zur ausschließlichen Berücksichtigung von Hy-

dPy-HL führt. Ein Zufallseffekt wurde mit Hilfe zusätzlicher DE-basierter Optimierungsläufe ausgeschlossen. Die Autoren vermuten, dass die Gewichtung von HydPy-HL mit dem Faktor eins durch die modifizierte Beta-Verteilung einem lokalen Optimum der Fehleroberfläche mit sehr viel kleinerem Kontraktionsbereich entspricht, als es das identifizierte Optimum aufweist.

Dass die Kopplung von HydPy-H und HydPy-HL mit dem Ensemble-Range-Approach keine Verbesserung der Ergebnisse der reinen HydPy-HL-Anwendung bewirkt, spricht erneut für strukturelle Vorteile von HydPy-HL gegenüber HydPy-H. Detailliertere Erkenntnisse zur modellstrukturellen Unsicherheit von HydPy-HL ließen sich eventuell durch Anwendung eines reinen HydPy-HL-Parameter-Ensembles ableiten. Ob dies im Rahmen der großen Unsicherheit der operationellen meteorologischen Eingangsdaten gelingen kann, ist aber fraglich. Ob die explizite Berücksichtigung der Eingangsdaten-Unsicherheit schärfere Aussagen bei mäßiger Datenqualität ermöglicht, ist Gegenstand aktueller methodischer Weiterentwicklungen des Ensemble Range Approach.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hydrologie großer Einzugsgebiete modelltechnisch abzubilden bedeutet, sich auf große Unsicherheiten einzulassen. Eine wesentliche Unsicherheitsquelle ist die verwendete Modellstruktur. Die konzeptionelle Formulierung hydrologischer Prozesse und deren programmtechnische Umsetzung gehen mit starken Vereinfachungen und Auslassungen einher. Es gilt, die hieraus resultierenden Simulationsunsicherheiten zu erkennen, zu bewerten und soweit möglich zu verringern.

Der vorliegende Bericht fasst entsprechende Analysen für das von der BfG operationell zur Abflussvorhersage eingesetzte HBV96-Modell zusammen. Durch die weitgehend originalgetreue Implementierung des Modellkonzeptes (HydPy-H) in das Modellframework HydPy (Tyralla und Schumann 2013) und die Entwicklung der aus den Analyseergebnissen abgeleiteten Alternativversionen

- HydPy-HΨ (modifizierte Abflussbildung),
- HydPy-Hγ (modifizierte Basisabflusskonzentration),
- HydPy-HL (Boden- und Abflusskonzentrationsmodul nach LARSIM-ME),
- HydPy-Hε (regularisierte Prozessgleichungen),

konnten zahlreiche Optimierungsideen auf ihre Tauglichkeit hin untersucht werden. Die Bereitstellung der zugrundeliegenden methodischen Entwicklungen ermöglicht der BfG, die gewonnenen theoretischen Erkenntnisse auch in die Praxis zu überführen.

8.1 Ergebnisse

Wie mehrere andere Studien weisen die durchgeführten Untersuchungen darauf hin, dass die aus einer gegebenen Modellstruktur herrührende Simulationsunsicherheit stark von den hydrologischen (und datentechnischen) Gegebenheiten des jeweils betrachteten Einzugsgebietes abhängt. Die Heterogenität der von der BfG bearbeiteten großen Flussgebiete lässt den kombinierten Einsatz mehrerer Modellkonzepte geboten erscheinen. HydPy unterstützt sowohl die Zuordnung verschiedener Modellstrukturen zu verschiedenen Teilgebieten als auch die Kombination verschiedener Modellstrukturen innerhalb eines Teilgebietes, was die Berücksichtigung gebiets- und teilgebietsinterner Heterogenität erleichtert.

Das primär auf die Wasserhaushaltssimulation ausgerichtete HBV-Modell (bzw. HydPy-H) erscheint nicht als optimale Wahl für die stundenwertbasierten Vorhersagen der BfG. Der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz nach Bergström et al. (1997) erhöht zwar die simulierte Dynamik kurzer Ereignisse, bringt aber ein zumindest als kontraintuitiv zu bezeichnendes Systemverhalten des Direktabflusses mit sich. Sowohl in der Analyse interner Zustandsgrößen (unstetige Perkolation) als auch

in der Parameterkalibrierung (mehrere lokale Optima) sind Probleme in der Abbildung von Abflussbildung und -konzentration erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Besonderheiten des erweiterten Sättigungsflächen-Ansatzes als auch die unstetige Perkolation die Anwendung statistischer Korrekturmethoden zur Verbesserung von Abflussvorhersagen erschweren und eventuell deren Effizienz beschränken.

Die entwickelte Alternativversion HydPy-HΨ behebt das Problem der unstetigen Perkolation, erleichtert die Parameteridentifikation aber nur teilweise. Im Hochwasserbereich zeigen sich Vorteile gegenüber HydPy-H, im Niedrigwasserbereich Nachteile. Die Neuerungen von HydPy-HΨ tragen nicht in gleichem Maße wie der erweiterte Sättigungsflächen-Ansatz zur Dynamikerhöhung bei kurzen (sommerlichen) Ereignissen bei. HydPy-HΨ bietet sich somit entweder als Ergänzung zu HydPy-H an oder als Ausgangspunkt für eine Weiterentwicklung, in der die kurzfristige Abflussdynamik durch eine zusätzliche Abflusskomponente explizit Berücksichtigung findet.

Die in HydPy-Hγ implementierte nichtlineare Basisabflussbeziehung ist – zumindest für die gewählten Untersuchungsgebiete – von geringem Nutzen und nicht als Ersatz für den erweiterten Sättigungsflächen-Ansatz geeignet.

Vorteile durch die Berücksichtigung von mehr als zwei Abflusskomponenten zeigen sich in der Evaluierung von HydPy-HL. HydPy-HL kombiniert die Verdunstungsberechnung nach HBV bzw. HydPy-H mit der Abflussbildung und -konzentration von HydPy-L bzw. LARSIM. Die Modellkopplung führt (insbesondere im Niedrigwasserbereich) zu den besten Simulationsgüten.

Die auf HydPy-H angewandte Regularisierungstechnik zur Eliminierung von Unstetigkeiten in Prozessgleichungen bringt zwar Vorteile in der Parameteridentifikation mit sich. Diese sind bei der gewählten Kalibrierperiode von mehreren Jahren aber nicht stark genug ausgeprägt, um den erhöhten Rechenaufwand von HydPy-Hε zu rechtfertigen. Deutlichere Effekte sind bei Betrachtung kurzer Zeiträume und bei der Anwendung gradientenbasierter Optimierungsmethoden zu erwarten, wie bei Anwendung verschiedener Datenassimilationstechniken der Fall.

Der Einsatz von Modell-Ensembles, kalibriert nach dem Prinzip des „Ensemble Range Approach“, verringert die Simulationsunsicherheit einzelner Ensemble-Member umso mehr, je stärker modellstrukturelle Unsicherheiten im betrachteten Gebiet zum Tragen kommen. Soweit aus den extremen Validierereignissen dieser Studie ersichtlich, ergibt sich für die HydPy-H-Parameter-Ensembles eine Verringerung der Extrapolationsunsicherheit. Die Kombination von HydPy-H mit HydPy-HL in einem Struktur-Ensemble bringt in der kontinuierlichen Simulation keine relevanten Vorteile gegenüber der alleinigen Verwendung von HydPy-HL mit sich. Vermutlich verhindert die mäßige Qualität der in dieser Studie eingesetzten operationellen meteorologischen Eingangsdaten eine weitere Reduzierung der Simulationsunsicherheit.

8.2 Empfehlungen

HBV96 bzw. HydPy-H wird aufgrund seiner starken Ausrichtung auf die Wasserhaushaltsmodellierung und einiger struktureller Besonderheiten für die stundenwertbasierten Abflussvorhersagen der BfG als verbesserungswürdig bewertet. Sollen sich zukünftige modellstrukturelle Änderungen zur Reduzierung der Simulationsunsicherheit möglichst im Rahmen der HBV-Konzeption bewegen, empfiehlt sich zumindest die Hinzunahme einer schnellen Abflusskomponente beispielsweise zu HydPy-HΨ. Allerdings lassen die Ergebnisse dieser Arbeit den Wechsel zu einer von HBV abweichenden Modellkonzeption vielversprechender erscheinen. Auch aufgrund der Praxiserfahrungen der BfG mit LARSIM bietet sich HydPy-HL bzw. HydPy-L hierfür als Ausgangspunkt an.

Die der BfG zur Verfügung gestellten Skripte zur Kalibrierung und Evaluierung erlauben die schnelle Anpassung der untersuchten Modelle an die übrigen Rhein-Zuflussgebiete. In Kombination mit der relativ einfachen Implementierung neuer Modelle oder neuer Modellkomponenten in HydPy kann dies zur Erstellung einer Modellsammlung genutzt werden, welche die Heterogenität großer Einzugsgebiete angemessen zu berücksichtigen imstande ist. In diesem Zusammenhang sollte auch eine feinere, prozesshydrologisch begründete räumliche Gliederung des Rheingebietes erwogen werden.

Bislang ungeklärt sind die zentralen Fragestellungen, inwieweit die Eliminierung problematischen Systemverhaltens durch HydPy-HΨ, die Regularisierung des HBV-Differenzialgleichungssystems durch HydPy-Hε sowie die Ermittlung aufeinander abgestimmter Parametersätze durch Anwendung des „Ensemble Range Approach“ die Effizienz statistischer Verfahren zur Korrektur von Abflussvorhersagen fördert. Insbesondere hinsichtlich der Datenassimilation sowie der probabilistischen Ensemblevorhersage, beide Forschungsgegenstand anderer „Seamless Prediction“-Teilprojekte, bieten sich entsprechende Folgestudien an.

Literaturverzeichnis

Abbott, M.B; Bathurst, J.C; CUNGE, J. A.; O'Connell, P.E; Rasmussen, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. In: *Journal of Hydrology* (87), S. 45–59.

Ajami, Newsha K.; Duan, Qingyun; Sorooshian, Soroosh (2007): An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. In: *Water Resour. Res.* 43 (1), S. n/a.

Bates, J. M.; Granger C. W. J. (1969): The combination of forecasts. In: *Operational Research Quarterly* 40 (4), S. 451–468.

Bergström, S. (1995): The HBV model. In: V. P. Singh (Hg.): Computer models of watershed hydrology. Rev. ed. Highlands Ranch, Colo.: Water Resources Publications.

Bergström, S.; Carlsson, B.; Grahn, G., Johansson (1997): A more consistent approach to catchment response in the HBV model. In: *Vannet i Norden Uppsala* (4).

Bergström, S.; Forsman, A. (1973): Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. In: *Nordic Hydrology* 4 (3), S. 147–170.

Bertle, F. A. (1966): Effect of Snow Compaction on Runoff From Rain on Snow. Denver, Colorado (Engineering Monograph, 35).

Beven, K.J (1989): Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. In: *Journal of Hydrology* (105), S. 157–172.

Beven, Keith (2006): A manifesto for the equifinality thesis. In: *Journal of Hydrology* 320 (1-2), S. 18–36.

Beven, Keith; Binley, Andrew (1992): The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. In: *Hydrol. Process.* 6 (3), S. 279–298.

BMVI (Hg.) (2015): KLIWAS : Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schiffahrt in Deutschland - Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin, Bonn.

Bogacki, P.; Shampine, L. F. (1989): A 3(2) pair of Runge - Kutta formulas. In: *Applied Mathematics Letters* 2 (4), S. 321–325.

Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele (Freiburger Schriften zur Hydrologie, 11).

Bulygina, Nataliya; Gupta, Hoshin (2009): Estimating the uncertain mathematical structure of a water balance model via Bayesian data assimilation. In: *Water Resour. Res.* 45 (12), S. n/a.

Bundesanstalt für Gewässerkunde; Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Bonn/Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Clark, Martyn P.; Kavetski, Dmitri (2010): Ancient numerical daemons of conceptual hydrological modeling: 1. Fidelity and efficiency of time stepping schemes. In: *Water Resour. Res.* 46 (10).

Deltares (2015): SOBEK Suite. Deltares. Online verfügbar unter https://www.deltares.nl/en/software/sobek/, zuletzt geprüft am 11.06.2015.

Diks, Cees G. H.; Vrugt, Jasper A. (2010): Comparison of point forecast accuracy of model averaging methods in hydrologic applications. In: *Stoch Environ Res Risk Assess* 24 (6), S. 809–820.

Dormand, J. R.; Prince, P. J. (1980): A family of embedded Runge-Kutta formulae. In: *Journal of Computational and Applied Mathematics* 6 (1), S. 19–26.

Eberle, M. (2007): Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part II. Report on Hourly Modelling. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz (BfG-Berichte, BfG-1338).

Fell, E. (2003): Hochwasser im Rheingebiet - Winter 2002/2003. Hg. v. Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz. Mainz (206/03).

Fell, E. (2011): Hochwasser im Rheingebiet - Januar 2011. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Mainz.

Fell, E. (2013): Hochwasser im Rheingebiet - Juni 2013. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Mainz.

Fenicia, F.; Savenije, H. H. G.; Matgen, P.; Pfister, L. (2006): Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10 (1), S. 139–150.

Fenicia, F.; Solomatine, D. P.; Savenije, H. H. G.; Matgen, P. (2007): Soft combination of local models in a multi-objective framework. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (11), S. 1797–1809.

Gupta, Hoshin V.; Clark, Martyn P.; Vrugt, Jasper A.; Abramowitz, Gab; Ye, Ming (2012): Towards a comprehensive assessment of model structural adequacy. In: *Water Resour. Res.* 48 (8).

Gupta, Hoshin V.; Kling, Harald; Yilmaz, Koray K.; Martinez, Guillermo F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. In: *Journal of Hydrology* 377 (1-2), S. 80–91.

Hairer, Ernst; Wanner, Gerhard (2010): Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems. 2., rev. ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer Series in Computational Mathematics, 14). Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05221-7.

Hogue, Terri S.; Bastidas, Luis A.; Gupta, Hoshin V.; Sorooshian, Soroosh (2006): Evaluating model performance and parameter behavior for varying levels of land surface model complexity. In: *Water Resour. Res.* 42 (8), S. n/a.

Kavetski, Dmitri; Kuczera, George (2007): Model smoothing strategies to remove microscale discontinuities and spurious secondary optima in objective functions in hydrological calibration. In: *Water Resour. Res.* 43 (3).

Kennedy, Marc C.; O'Hagan, Anthony (2001): Bayesian calibration of computer models. In: *J Royal Statistical Soc B* 63 (3), S. 425–464.

Klein, B.; Meißner, D.; Hemri, S.; Lisniak, D. (2015): Ermittlung der prädiktiven Unsicherheit von hydrologischen Ensemblevorhersagen. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz (BfG-Berichte).

Kohn, I.; Rosin, K.; Freudiger, D.; Belz, J. U.; Stahl, K.; Weiler, M. (2014): Niedrigwasser in Deutschland 2011. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (58), S. 4–17.

Leandro, J.; Leitão, J. P.; Lima, J.L.M.P. de (2013): Quantifying the uncertainty in the Soil Conservation Service flood hydrographs: a case study in the Azores Islands. In: *J. Flood Risk Manage* 6 (3), S. 279–288.

Lindström, G.A (1997): A Simple Automatic Calibration Routine for the HBV Model. In: *Nordic Hydrology* 28 (3), S. 153–168.

Lindström, Göran; Johansson, Barbro; Persson, Magnus; Gardelin, Marie; Bergström, Sten (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. In: *Journal of Hydrology* 201 (1-4), S. 272–288.

Lisniak, D.; Meißner, D.; Klein, B.; Pinzinger, R. (2014): Konzept zur Nachführung von Anfangszuständen eines operationellen hydrologischen Modells für die Verbesserung von Abflussvorhersagen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (58), S. 106–118.

Liu, Yuqiong; Gupta, Hoshin V. (2007): Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. In: *Water Resour. Res.* 43 (7).

Mantovan, Pietro; Todini, Ezio (2006): Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. In: *Journal of Hydrology* 330 (1-2), S. 368–381.

McCarthy, G.T (1938): The unit hydrograph and flood routing. Providence: Army Engineer District.

Montanari, Alberto (2005): Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. In: *Water Resour. Res.* 41 (8), S. n/a.

Moradkhani, Hamid (2005): Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. In: *Water Resour. Res.* 41 (5).

Nash, J.E; Sutcliffe, J.V (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. In: *Journal of Hydrology* 10 (3), S. 282–290.

Perrin, C.; Michel, C.; Andreassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. In: *Journal of Hydrology* (279), S. 275–289.

Pinzinger, R.; Klein, B.; Meißner, D.; Lisniak, D. (2014): Auswahl Pareto-optimaler Modelle zur statistischen Korrektur von Abflussvorhersagen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (58), S. 128–137.

Powell, M.J.D. (2009): The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives.

Reggiani, Paolo; Sivapalan, Murugesu; Majid Hassanizadeh, S. (1998): A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. In: *Advances in Water Resources* 22 (4), S. 367–398.

Reichert, Peter; Mieleitner, Johanna (2009): Analyzing input and structural uncertainty of nonlinear dynamic models with stochastic, time-dependent parameters. In: *Water Resour. Res.* 45 (10).

Renard, Benjamin; Kavetski, Dmitri; Kuczera, George; Thyer, Mark; Franks, Stewart W. (2010): Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. In: *Water Resour. Res.* 46 (5), S. n/a.

Renard, Benjamin; Kavetski, Dmitri; Leblois, Etienne; Thyer, Mark; Kuczera, George; Franks, Stewart W. (2011): Toward a reliable decomposition of predictive uncertainty in hydrological modeling: Characterizing rainfall errors using conditional simulation. In: *Water Resour. Res.* 47 (11), S. n/a.

Ren-Jun, Zhao (1992): The Xinanjiang model applied in China. In: *Journal of Hydrology* 135 (1-4), S. 371–381.

Richter, Dieter (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Offenbach am Main: Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 194).

Schoups, G.; Vrugt, J. A.; Fenicia, F.; van de Giesen, N. C. (2010): Corruption of accuracy and efficiency of Markov chain Monte Carlo simulation by inaccurate numerical implementation of conceptual hydrologic models. In: *Water Resour. Res.* 46 (10).

Schoups, Gerrit; Vrugt, Jasper A. (2010): A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors. In: *Water Resour. Res.* 46 (10).

SMHI (Hg.) (2009): Improvement HBV model Rhine in FEWS. Final report. Unter Mitarbeit von G. Berglöv, J. German, H. Gustavsson, U. Harbman und B. Johansson (Hydrology, 112).

SMHI (2011): Manual IHMS - Integrated Hydrological Modelling System. Version 6.2.

Smith, P. J.; Beven, K. J.; Tawn, J. A. (2008): Detection of structural inadequacy in process-based hydrological models: A particle-filtering approach. In: *Water Resour. Res.* 44 (1).

Stedinger, Jery R.; Vogel, Richard M.; Lee, Seung Uk; Batchelder, Rebecca (2008): Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. In: *Water Resour. Res.* 44 (12), S. n/a.

Storn, Rainer; Price, Kenneth (1997): Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. In: *Journal of Global Optimization* 11 (4), S. 341–359.

Tyralla, C.; Schumann, A. (2013): HydPy – ein interaktiv nutzbares Framework zur Erstellung und Anwendung hydrologischer Modelle. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz (BfG-1795).

Tyralla, C.; Schumann, A. (2014): Die numerische Integration von HBV96 und LARSIM-ME als Unsicherheitsquelle. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (58), S. 138–147.

Tyralla, C.; Schumann, A. (2016): Incorporating structural uncertainty of hydrological models in likelihood functions via an ‘ensemble range approach’. In: *Hydrological Sciences Journal* Sciences Journal Special issue: Facets of Uncertainty.

Veenhuis, Bruce A. (2013): Spread Calibration of Ensemble MOS Forecasts. In: *Mon. Wea. Rev.* 141 (7), S. 2467–2482.

Weerts, A. H.; Meißner, D.; Rademacher, S. (2008): Input Data Rainfall-Runoff Model Operational Systems FEWS-NL & FEWS-DE. Technical Report.

Zarnowitz, Victor (1969): The New ASA-NBER Survey of Forecasts by Economic Statisticians. In: *The American Statistician* 23 (1), S. 12.