

Entwicklung eines aggregierten  
Modellsystems zur szenariobasierten  
Simulation der Wasserhaushalte von  
Flusseinzugsgebieten, unter  
Berücksichtigung klimatischer und  
sozioökonomischer Einflüsse

*Dissertation*

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften im Fachbereich  
Geowissenschaften  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

*Christian Alwardt*

aus  
Bremen

Hamburg

2015

Als Dissertation angenommen vom Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg  
auf Grund der Gutachten von Professor Dr. Jürgen Scheffran  
und Professor Dr. Götz Neuneck

Hamburg, den 11. Mai 2015

Professor Dr. Christian Betzler  
Leiter des Fachbereichs Geowissenschaften

„Das Prinzip aller Dinge ist das Wasser, denn Wasser ist alles  
und ins Wasser kehrt alles zurück.“

Thales von Milet, griechischer Philosoph



## Abstract

*Kaum ein Element ist für unseren Planeten, die Menschen und das Ökosystem von einer solch essentiellen Bedeutung wie Wasser. Das für den Menschen so besonders wichtige Süßwasser ist eine global ungleich verteilte Ressource. Eine entscheidende Stellung bei den erneuerbare Süßwasserressourcen nehmen die weltweiten Flusseinzugsgebiete und ihre regionalen Wasserhaushalte ein. Klimatische Veränderungen stellen neben zivilisatorischen Eingriffen einen entscheidenden Mechanismus dar, der zu Schwankungen oder Änderungen in diesen regionalen Süßwasserhaushalten führen kann. Die möglichen regionalen Auswirkungen des Klimawandels, aber auch ein regional vielfach zu beobachtender Anstieg in der Nachfrage nach Wasser, wird viele der regionalen Wasserhaushalte zukünftig verstärkt in den Fokus des Interesses rücken – insbesondere in solchen Regionen, in denen Wasserknappheit bereits heute ein Thema ist. Im Raum steht hierbei stets auch die Frage, welche kurz-, mittel- und langfristigen regionalen Konfliktpotenziale sich durch eine zunehmend auftretende Wasserknappheit mit der Zeit ergeben und welche Instrumentarien zur rechtzeitigen Konfliktbewältigung ergriffen werden könnten. Notwendige Grundlage solcher Überlegungen ist stets immer auch die szenariobasierte Prognose der zukünftigen, regional vorhandenen Wassermengen – idealerweise sowohl in Hinsicht auf die absoluten jährlichen Mengen als auch in Bezug auf die zeitlichen Schwankungen der Wasserbilanz in einem regionalen Wasserhaushalt. Hierfür sind sowohl die geophysikalischen Prozesse als auch sozioökonomische Einflussfaktoren innerhalb eines Wasserhaushaltes zu berücksichtigen.*

*Mit dieser Arbeit wurden die nötigen Grundlagen für eben eine solche szenariobasierte Prognose identifiziert und ein interdisziplinäres aggregiertes Modellsystem entwickelt, das eine szenariobasierte Simulation der regionalen Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten unterstützen und zugleich helfen soll, deren zukünftige Entwicklung zu prognostizieren.*

*In dieser Arbeit sind dabei folgende wissenschaftliche Beiträge zur Forschung hervorzuheben: Mit dem HD-Modell wurde ein globales Abflussmodell an eine höhere Auflösung angepasst und dafür zu einem Abflussmodell mittlerer Komplexität erweitert sowie für eine 5-km-Auflösung parametrisiert und erfolgreich evaluiert. Die Implementierung dieses Abflussmodells erfolgte erstmalig über eine GIS-Umgebung, was zum einen die direkte Einbeziehung von sowohl geophysikalischen als auch sozioökonomischen Einflussfaktoren in den Simulationsprozess und zum anderen die Lauffähigkeit in einer Desktop-Umgebung ermöglicht. Die hierdurch erreichte Bedienerfreundlichkeit des aggregierten Modellsystems und dessen optionale Erweiterbarkeit tragen dem interdisziplinären Anwendungsspektrum und der Variabilität in Hinblick auf die regionalen Unterschiede von Flusseinzugsgebieten Rechnung. Die zugrundeliegende Grunddatenbasis und die entwickelte, methodisch einheitliche Vorgehensweise bei der Anwendung des aggregierten Modellsystems ermöglichen die potenzielle Anwendung auf alle weltweiten Flusseinzugsgebiete, gewährleisten eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse und die tendenzielle Abschätzung der szenariobasierten Veränderungen von Wasserhaushalten. Das aggregierte Modellsystem wurde im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch auf das Flusseinzugsgebiet der Elbe und des Nils angewendet und konnte anhand der hieraus resultierenden Ergebnisse erfolgreich evaluiert werden.*

*Sowohl Wissenschaftlern als auch Entscheidungsträgern gibt dieses aggregierte Modellsystem damit ein sinnvolles Analysetool zur tendenziellen Abschätzung der Entwicklung regionaler Wasserhaushalte, zur Identifikation möglicher Konfliktpotenziale sowie zur Bewertung von Präventionsmechanismen an die Hand.*



## Inhaltsverzeichnis:

Abstract .....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1. Einleitung .....	1
1.1 Kontext und Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit.....	3
1.3 Hydrologische Abflussmodelle – ein Überblick.....	4
1.4 Anforderungen und Forschungsfragen .....	6
1.5 Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	8
2. Wasser als Konfliktstoff.....	9
2.1 Der Wasserkreislauf .....	9
2.2 Die globale Verteilung von Frischwasser .....	10
2.3 Klimawandel und sozioökonomische Einflüsse.....	12
2.3.1 Prognostizierte Folgen des Klimawandels.....	12
2.3.2 Regionale sozioökonomische Einflüsse.....	13
2.4 Wasser – ein Threat-Multiplier? .....	14
2.4.1 Wie viel Wasser ist „ausreichend“? .....	15
2.4.2 Konfliktpotenziale .....	16
2.4.3 Kooperation vs. Konflikt.....	17
3. Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten .....	19
3.1 Modelle, EDV- und Datengrundlage .....	27
3.1.1 Geographisches Informationssystem – SAGA GIS.....	28
3.1.2 Naturwissenschaftliche Datenbasis / Modelle.....	29
3.1.3 Sozioökonomische Datenbasis.....	37
3.1.4 Zusammenfassung und Datenüberblick.....	39
3.2 Aufbereitung von Höhendaten zur Erstellung eines regionalen Geländemodells .....	40
3.2.1 Aufbereitung von <i>DEM</i> -Daten mit SAGA GIS .....	40
3.2.2 Evaluation des bearbeiteten <i>DEMs</i> mit Methoden des SAGA GIS.....	43
3.2.3 Rasterzellenmanipulation mit Hilfe der <i>RivFlow</i> -Anwendung .....	45
3.3 <i>RivFlow</i> -Anwendung .....	47
3.3.1 Die Programmgrundlagen .....	47
3.3.2 Programmentwicklung und -funktionen.....	47
3.3.3 Zusammenfassung der Modularchitektur und der Ergebnisdaten der <i>RivFlow</i> -Anwendung .....	63
3.4 Adaption und Erweiterung des <i>HD</i> -Modells für höhere Auflösungen.....	64

3.4.1 Die Evaluationskriterien des Parametrisierungsprozesses.....	65
3.4.2 Parametrisierungsprozess für eine 5-km-Auflösung .....	67
4. Anwendung des aggregierten Modellsystems .....	99
4.1 Methodische Vorgehensweise bei der Anwendung des aggregierten Modellsystems .....	99
4.2 Evaluierung des aggregierten Modellsystems am Flusseinzugsgebiet der Elbe .....	103
4.2.1 Das Flusseinzugsgebiet der Elbe.....	103
4.2.2 Die Referenzsimulation .....	105
4.3 Methodische Anwendung auf ein komplexes Fallbeispiel:	
Das Flusseinzugsgebiet des Nils .....	124
4.3.1 Das Flusseinzugsgebiet des Nils.....	124
4.3.2 Vorbereitung und Aufbereitung der Eingangsdaten .....	128
4.3.3 Referenzsimulation.....	131
4.3.4 Szenariobasierte Simulationen.....	141
5. Ergebniszusammenfassung und Ausblick.....	147
5.1 Die Beantwortung der Forschungsfragen .....	147
5.2 Resümee dieser Arbeit .....	150
5.3 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick .....	151
6. Literaturverzeichnis .....	155
Anhang.....	161
Danksagung .....	163
Erklärung .....	165



## Abkürzungsverzeichnis

CGIAR-CSI	Consortium for Spatial Information der CGIAR
D8	Deterministic 8 (hydrologische Abflusskonvention)
DEM	Digital Elevation Modell (Höhenmodell)
DTM	Digital Terrain Modell (Geländemodell)
FGG	Flussgebietsgemeinschaft Elbe
GIS	Geographisches Informationssystem
HD-Modell	Hydrological Discharge-Modell
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LSP-Datensatz	Land Surface Parameter-Datensatz
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie
RCM	Regional Climate Model
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SL-Schema	Simplified Land Surface-Schema (Landoberflächen-Schema)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UTM	Universal Transverse Mercator (geographische Koordinatenprojektion)
WATCH	Integrated Project Water and Global Change
WaterGAP	Water Global Assessment and Prognosis
WFD	WATCH Forcing Data
WFDEI	WATCH Forcing Data based on ERA-Interim



# 1. Einleitung

Das Wasser in Flüssen stellt eine lebenswichtige Ressource dar, deren regionale und zeitliche Verfügbarkeit sowohl klimatischen als auch menschlichen Einflüssen unterliegt und ein wesentliches Konfliktpotenzial darstellen kann. Mit der Entwicklung des aggregierten Modellsystems zur szenariobasierten Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten ist im Rahmen dieser Arbeit ein Analysetool geschaffen worden, mit deren Hilfe regionale Wasserhaushalte auf potenzielle Folgen des Klimawandels sowie sozioökonomische Wirkmechanismen hin untersucht werden können. Das bereitgestellte Modellsystem soll damit sowohl Wissenschaftlern als auch Entscheidungsträgern ein Instrument an die Hand gegeben, welches die Simulation der lokalen Wasserflussmengen eines Flusseinzugsgebiets ermöglichen und – unter Variation sowohl klimatischer als auch sozioökonomischer Einflussfaktoren – Rückschlüsse auf szenariobasierte Veränderungen im Wasserabflussverhalten zulassen soll. Die Ergebnisse derartiger szenariobasierter Simulationen und daraus abgeleiteter Prognosen stellen eine wichtige Voraussetzung für die politische Interpretation und Bewertung der zukünftigen regionalen Verfügbarkeit von Wasser dar und können einen entscheidenden Beitrag leisten, etwaige Konfliktpotenziale frühzeitig zu identifizieren und ihnen in adäquater Form (z.B. durch Kooperations- oder rechtliche Rahmenvereinbarungen) zu begegnen.

Die Motivation und Zielsetzung dieser Forschungsarbeit erfordern eine interdisziplinäre Ausrichtung, die ihren Schwerpunkt in den Geowissenschaften hat. Der Interdisziplinarität des Forschungsthemas wurde durch eine enge Kooperation mit dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg, dem Max-Planck-Institut für Meteorologie und dem Institut für Friedensforschung und Sicherheitspolitik an der Universität Hamburg (IFSH) Rechnung getragen. Inhaltlich eingebunden war diese Arbeit in den Exzellenzcluster "*Integrated Climate System Analysis and Prediction*" (CLISAP) der Universität Hamburg, wo sie in der Forschungsgruppe „*Climate Change and Security*“ (CLISEC) und im Institut für Geographie verortet war. Die Durchführung dieser Arbeit wurde durch den Exzellenzcluster CLISAP und das IFSH finanziert.

## 1.1 Kontext und Motivation

Der Zugang und die Verfügung über ausreichende Mengen sauberen Süßwassers ist eine entscheidende menschliche Lebensvoraussetzung. Flüsse, die eine der wichtigsten erneuerbaren Süßwasserquellen darstellen, gewährleisten eine überregionale Verteilung dieser Wasserressource. Flüsse und Wasserquellen waren so auch in der Vergangenheit immer schon primäre Auswahlkriterien für die Ansiedlung, sie prägten Kultur und Religion und waren eine Voraussetzung für Handel, Landwirtschaft, Produktion und Wissenschaft. Neben ihrer Funktion als Süßwasserquelle dienen Flüsse heute auch als wichtiger Verkehrsweg und ihr Wasser wird für die industrielle Produktion sowie als Kühl- oder Betriebswasser für Kraftwerke benötigt.

Viele der großen Flusssysteme und ihre Flusseinzugsgebiete erstrecken sich heute grenzüberschreitend über mehrere Länder und stellen so auch ein zwischenstaatliches Konfliktpotenzial dar. Hohe Wasserentnahmen und Staumaßnahmen, aber auch die Einleitung umweltgefährdender Abwässer können dazu führen, dass Länder am Flussunterlauf sich mit unverschuldeten Umweltproblemen konfrontiert sehen, nicht mehr genügend sauberes Süßwasser zur Verfügung haben oder Gefahr laufen, gänzlich von der Wasserversorgung abgeschnitten zu werden. Aber auch innerhalb von Staaten müssen der Zugang, ein wirtschaftlicher Umgang und eine gerechte

Verteilung in Hinsicht auf die verfügbaren Wasserressourcen gewährleistet sein, denn auch innerstaatliche Auseinandersetzungen um Wasser können Konfliktpotenziale bergen. Bereits heute wird in vielen Regionen – bedingt durch Bevölkerungswachstum sowie der Ausweitung der Bewässerungslandwirtschaft oder der industriellen Produktion – mit einem in Zukunft steigendem Wasserbedarf gerechnet. Eine durch klimatische Veränderungen induzierte Wasserverknappung kann zu einer weiteren Verschärfung der Situation und in einzelnen Fällen sogar zu regionalem Wassermangel führen (IPCC 2014).

Das mittlere Wasserabflussvolumen in Flüssen kann durch steigende Temperaturen oder ein verändertes Niederschlagsverhalten sinken. Extreme Wetterereignisse könnten in einem Flusseinzugsgebiet eine zunehmende Anzahl an jahreszeitabhängigen Überschwemmungen oder Dürren hervorrufen, und das Abschmelzen von Gletschern würde einige Flüsse irgendwann gänzlich ihrer Zuflussquellen berauben. In einem verstärkten Maß werden klimatische Veränderungen und ihr Einfluss auf die Wasserhaushalte von Staaten zukünftig auch in der Planung internationaler Programme (z.B. der Vereinten Nationen oder der deutschen Entwicklungshilfe) zu berücksichtigen sein (GTZ 2008).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf solchen regionalen Wasserhaushalten, die – wenn auch nicht ausschließlich, so doch maßgeblich – durch die Wasserflussmengen eines Flusseinzugsgebietes bestimmt sind. Für viele dieser Flusseinzugsgebiete ist heute ungewiss, welche etwaigen Folgen der Klimawandel oder starke sozioökonomische Veränderungen für deren Wasserhaushalt mit sich bringen würden.

Werden nun für einen regionalen Flusswasserhaushalt folgende Hypothesen angenommen,

- 1.) Wassermangel oder eine starke schwankende Wasserverfügbarkeit kann zu regionalen Konflikten führen oder diese verstärken („Wasser als Threat-Multiplier“);
- 2.) die rechtzeitige Identifizierung potenziell gefährdeter Regionen würde die Ausarbeitung und Implementierung konfliktentschärfender Maßnahmen zulassen bzw. begünstigen;
- 3.) das staatliche Interesse an einer kooperativen Konfliktprävention ist generell größer als an der Konfliktaustragung;

so unterstreicht dies die Relevanz, die einer rechtzeitigen Identifikation der potenziellen klimatischen und sozioökonomischen Einflüsse auf die Mechanismen eines Flusseinzugsgebiets und den hieraus abgeleiteten tendenziellen Prognose über die zukünftige Wasserverfügbarkeit in diesem Wasserhaushalt zukommt.

Tendenzielle Prognosen darüber, wie sich der Wasserhaushalt eines Flusseinzugsgebiets unter klimatischen und sozioökonomischen Einflüssen zukünftig entwickeln wird, lassen sich aus den Ergebnissen von szenariobasierten Simulationen eben dieses Wasserhaushaltes – bei denen sowohl die klimatischen als auch sozioökonomischen Einflussfaktoren berücksichtigt werden – ableiten. Die Prognosen können wesentlich dazu beitragen, das Auftreten möglicher Konfliktpotenziale (*Hot-Spots*) einschätzen zu helfen und potenzielle Maßnahmen zur Krisenprävention zu identifizieren.<sup>1</sup>

Die szenariobasierte Simulation des Wasserhaushalts eines Flusseinzugsgebiets kann in weiteren Schritten auch dazu beitragen, konfliktverschärfende Mechanismen einzugrenzen bzw. ge-

---

<sup>1</sup> “Strengthening such information systems is vital not only at a national scale but also at a global scale – to inform the construction of global models of the hydrologic cycle and decisions on where interventions, including external aid, would be most useful” (WWAP 2009: xi).

nauer zu bestimmen oder etwaige Maßnahmen zur Krisenprävention auf ihre relative Wirksamkeit hin zu überprüfen.

Der interdisziplinären Forschung stand bisher kein Analysetool zur Verfügung, anhand dessen eine szenariobasierte Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten unter Berücksichtigung klimatischer und sozioökonomischer Einflussfaktoren durchgeführt werden konnte.

## 1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit

Zentraler Gegenstand und Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ist die *Entwicklung eines aggregierten Modellsystems zur szenariobasierten Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten unter Berücksichtigung interdisziplinärer Einflussfaktoren* – im Folgenden auch kurz als aggregiertes Modellsystem bezeichnet. Tabelle 1.2-1 gibt die motivationsbedingten Forschungsziele dieser Arbeit wieder.

---

### Zielsetzung für das aggregierte Modellsystem

Szenariobasierte Simulationen der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten (auf der regionalen Skala) und hieraus ableitbare Prognosen zu den möglichen tendenziellen Änderungen des Wasserabflussverhaltens

Potenziell anwendbar auf alle weltweiten Flusseinzugsgebiete

Berücksichtigung interdisziplinärer Einflussfaktoren

Benutzerfreundliche Anwendung (einfache Handhabung)

Möglichkeit zur unkomplizierten Erweiterung/Ergänzung des Modellsystems

---

*Tabelle 1.2-1 : Zielsetzung der Entwicklung des aggregierten Modellsystems.*

Um eine potenzielle Anwendung auf alle weltweiten Flusseinzugsgebiete zu gewährleisten, die gleichzeitige Einbindung von naturwissenschaftlichen und sozioökonomischen Einflussfaktoren zu ermöglichen und der Arbeitsweisen eines interdisziplinären Umfelds Rechnung zu tragen, muss eine einheitliche Analysemethodik entwickelt werden. Dem aggregierten Modellsystem liegt daher eine *methodische Vorgehensweise*, eine *gemeinsame Modell- und Grunddatenbasis* sowie eine *rechnergestützte Anwendung* zugrunde.

Nach Anwendung des aggregierten Modellsystems auf ein spezifisches Flusseinzugsgebiet sollen aus den szenariobasierten Simulationsergebnissen tendenzielle Prognosen in Hinblick auf den Wasserfluss und die zukünftige Wasserverfügbarkeit innerhalb dieses Flusseinzugsgebiets abgeleitet werden können. Abhängig vom Szenario können die Simulationsergebnisse auch zu einem besseren Verständnis der langfristigen klimatischen Einflüsse auf die Hydrologie der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten und deren Wechselwirkung mit sozioökonomischen und geophysikalischen Einflussfaktoren beitragen.

Bei der Simulation des Wasserhaushaltes eines Flusseinzugsgebiets ist zwischen den zugrundeliegenden geophysikalischen (hydrologischen und klimatischen) und sozioökonomischen Prozessen zu unterscheiden. Während die geophysikalischen Prozesse in erster Linie die Generierung, sowie den zeitlichen und räumlichen Abfluss des Wassers innerhalb eines Flusseinzugsgebiets verantworten (natürlicher lateraler Wasserhaushalt), stellen die sozioökonomischen Prozesse immer einen Eingriff in diesen natürlichen Wasserabfluss dar, sei es z.B. durch Wasserentnah-

men oder Flussregulierungen. Die Kombination beider Prozesse resultiert in der effektiven Wasserverfügbarkeit in der Fläche (gesamter lateraler Wasserhaushalt).

Die Simulation eines Wasserhaushaltes besteht daher im Wesentlichen aus der Simulation der Abflussprozesse, welche die entscheidende Rolle bei der regionalen Verteilung und der zeitlichen Verfügbarkeit von Wasser innerhalb des Wasserhaushaltes eines Flusseinzugsgebietes spielen. Die Simulation der hydrologischen Prozesse innerhalb eines Flusseinzugsgebietes bildet deshalb auch den Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit. Auch die klimatischen Einflussfaktoren entfalten im Verlauf der hydrologischen Abflussgenerierung ihre Wirkung.

Sozioökonomische Einflussfaktoren werden im Rahmen dieser Arbeit nicht selber erhoben oder modelliert und können daher nur berücksichtigt werden, soweit sie bereits vorliegen (siehe Unterkapitel 3.1.3). Sie können sowohl – je nach Art der Daten – bereits im zeitlichen Verlauf der Simulation der hydrologischen Prozesse berücksichtigt oder aber erst am Ende mit den Ergebnissen der Simulation verrechnet werden.

Generell soll zwischen zwei Arten von Simulationen unterschieden werden. Auf der einen Seite den Referenzsimulationen, die für Zeiträume (Vergangenheit bis Gegenwart) durchgeführt werden, in denen für das Flusseinzugsgebiet auch Vergleichsmessreihen zum Wasserabflussvolumen vorliegen. Die Referenzsimulation dient bei der Analyse der Wasserhaushalte eines Flusseinzugsgebietes der Evaluierung der Modellgenauigkeit und der Identifizierung systematischer Abweichungen. Auf der anderen Seite handelt es sich um szenariobasierte Simulationen, bei denen Eingangsdaten und Einflussfaktoren in Hinblick auf ein spezifisches Szenario verändert und die hieraus resultierenden Abflussvolumen simuliert werden. Weist nun die Referenzsimulationen eine hinreichende Genauigkeit im Vergleich mit den Messreihen auf, so kann die Veränderung des Abflussvolumens zwischen Referenzsimulation und der szenariobasierten Simulation, als eine dem Szenario zugrundeliegende, tendenzielle Änderung des Abflussverhaltens innerhalb des Flusseinzugsgebietes angesehen werden. Zur Verdeutlichung dieses Referenz-/Szenariovergleiches siehe Abbildung 1.2-1.

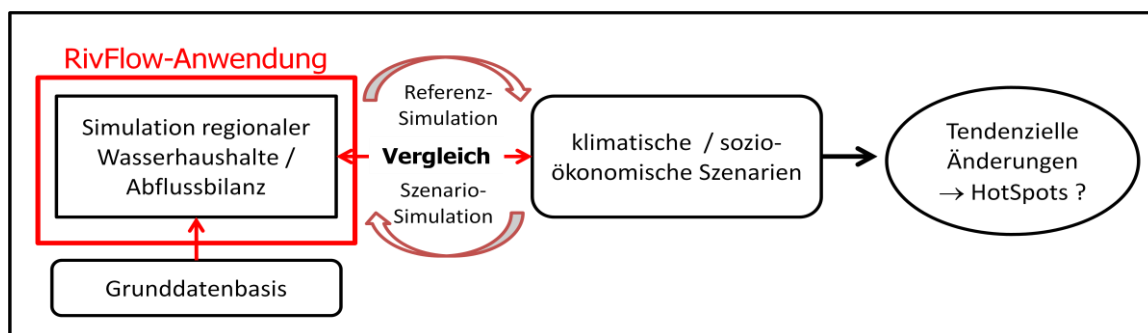


Abbildung 1.2-1 : Schematische Darstellung des Referenz-/Szenariovergleiches mittels der für diese Arbeit konzipierten RivFlow-Anwendung zur Simulation der Wasserhaushalte.

### 1.3 Hydrologische Abflussmodelle – ein Überblick

Von zentraler Bedeutung für die hydrologischen Prozesse innerhalb eines Flusseinzugsgebietes ist die Simulation des horizontalen Wasserabflusses auf Grundlage eines hydrologischen Abflussmodells. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die Kategorien und Funktionen dieser Modelle gegeben werden (vgl. Abbildung 1.3-1), weiter vertieft wird die Thematik in Unterkapitel 3.1.2.4. In der wissenschaftlichen Forschung wird heute im Wesentli-

chen mit zwei Arten von hydrologischen Abflussmodellen gearbeitet, die den Wasserabfluss über die Landoberfläche simulieren können:<sup>2</sup>

Auf der einen Seite sind dies **globale Abflussmodelle**, die auf der globalen Skala den Süßwasserabfluss in die Ozeane üblicherweise in niedrigen Auflösungen (0,5 bis einige Grad) und in Simulationsschritten von mehreren Stunden oder auf Tagesbasis berechnen und mit ihren Ergebnissen insbesondere einen Beitrag zu globalen Klimamodellen leisten.<sup>3</sup> Ihre Eingangsdaten müssen für die gesamte globale Skala einheitlich verfügbar sein und sind vom Umfang und der Auflösung beschränkt, sodass ihre Ergebnisse zumeist keine Rückschlüsse auf dezidierte regionale oder lokale Prozesse zulassen (was im Rahmen globaler Klimaberechnungen auch nicht nötig ist).

Auf der anderen Seite handelt es sich um detaillierte, auf einzelne Flusseinzugsgebiete zugeschnittene **Flussmodelle**, die zumeist eine hohe Auflösung aufweisen (einige Meter bis hundert Meter) und z.B. zur Simulation der Strömungseigenschaften eines Flusses oder zur Bestimmung von Hochwasserschutzmaßnahmen eingesetzt werden. Die Eingangsparameter sind hier vielfältiger und sehr detailliert und müssen für jedes untersuchte Flusseinzugsgebiet einzeln erhoben werden. So bedarf es z.B. sehr genauer Angaben zum Verlauf und der Form des Flussbettes, eine detaillierte Berücksichtigung aller flussbaulichen Maßnahmen, und alle Eingangsparameter müssen in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung vorliegen.

Beim überwiegenden Teil der Modelle handelt es sich also entweder um globale Abflussmodelle, die allerdings nur geringe räumliche und zeitliche Auflösungen sowie eine begrenzte Anzahl von Eingangsparametern aufweisen, oder um sehr detaillierte, dafür aber auch sehr spezialisierte und daher zumeist nur auf ein bestimmtes Flusseinzugsgebiet anwendbare Abflussmodelle.

Beide Modellarten benötigen aufgrund der globalen Abflussberechnung bzw. der hochauflösenden und sehr detaillierten Abflusssimulation auf der regionalen Ebene, zumeist große Rechen- und Speicherkapazitäten (z.T. Klimagroßrechner) und sind hierfür deshalb auch in entsprechender Weise konzipiert und programmiert. Diese Modelle werden aus Gründen der Effizienz zumeist in einer UNIX-Umgebung betrieben und auf Benutzeroberflächen und Datenschnittstellen wird häufig verzichtet, was die potenzielle Zugänglichkeit, Bedienung und etwaige Modellpräzisierung auf Fachexperten begrenzt und damit auch eine interdisziplinäre Verwendung stark erschwert bzw. verhindert.

Ein **regionales Abflussmodell mittlerer Komplexität** (siehe Abbildung 1.3-1) aber, das mit seiner räumlichen und zeitlichen Simulationsauflösung zwischen diesen beiden Modellen angesiedelt ist, potenziell auf alle weltweiten Flusseinzugsgebiete angewendet, aber auch regional sukzessive verfeinert und einfach in ein aggregiertes Modellsystem mit interdisziplinärer Anwendung eingebunden werden kann, existiert in dieser Form bisher noch nicht.

---

<sup>2</sup> Weiterführende Informationen zur Abflussmodellierung finden sich in der Fachliteratur, u.a. in MANIAK (2010) und HAGEMANN (1997).

<sup>3</sup> Mit dem *WaterGAP 3* Modell befindet sich derzeit ein globales Abflussmodell mit einer angestrebten Auflösung von 5 Min. (1/12 Grad) in der Entwicklung, siehe auch die Webseite unter: [http://www.usf.uni-kassel.de/cesr/index.php?option=com\\_project&task=view\\_detail&agid=47&lang=en](http://www.usf.uni-kassel.de/cesr/index.php?option=com_project&task=view_detail&agid=47&lang=en) (letzter Zugriff: 30.01.2015).

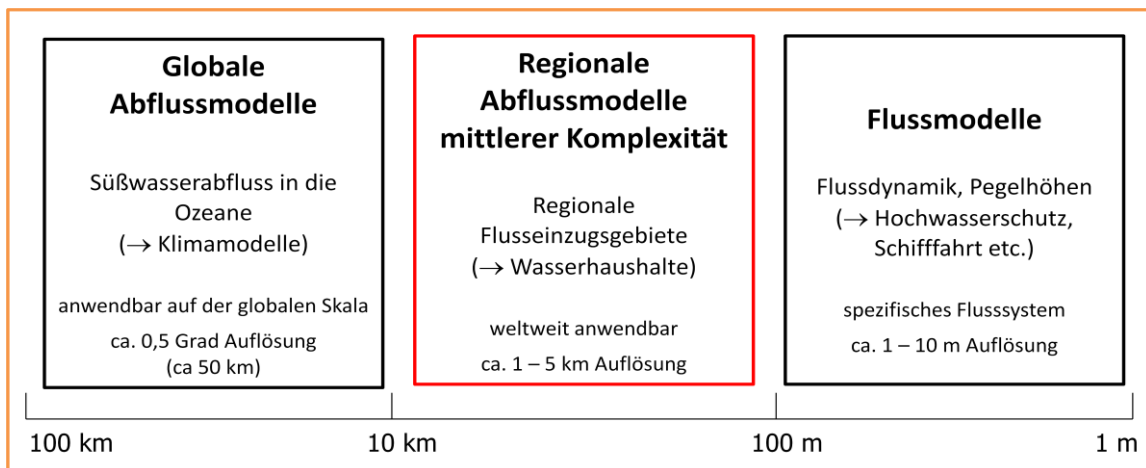


Abbildung 1.3-1 : Darstellung verschiedener Kategorien von Abflussmodellen in Bezug auf ihre räumliche Auflösung. Insbesondere die Einordnung eines Abflussmodells mittlerer Komplexität.

## 1.4 Anforderungen und Forschungsfragen

Um potenziell in der Lage zu sein, die Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten weltweit simulieren zu können, wird ein hydrologisches Abflussmodell mit hinreichender (regionaler) Auflösung benötigt. Gleichzeitig muss eine rudimentäre, aber global vorliegende Datenbasis der benötigten Modelleingangsgrößen und ggf. der wesentlichen sozioökonomischen Einflussfaktoren zur Verfügung stehen. Sowohl das Abflussmodell mittlerer Komplexität als auch diese **Grunddatenbasis** sind die entscheidenden Grundvoraussetzungen und damit zentrale Bestandteile des zu entwickelnden aggregierten Modellsystems.

Ein solches Abflussmodell mittlerer Komplexität mit regionaler Auflösung (Kilometerbereich), würde eine bessere räumliche und zeitliche Auflösung als die bisherigen globalen Abflussmodelle aufweisen, trotzdem einen globalen Anwendungsfokus haben, nicht aber auf die vielen (fluss-spezifischen) Details eines hochauflösenden Flussmodells angewiesen sein. Entsprechend würden auch die Simulationsergebnisse räumlich und zeitlich besser als bei einem globalen Abflussmodell verortet werden können, aber bei Weitem nicht die Genauigkeit und Präzision eines Flussmodells aufweisen. Um die Simulation regionaler Wasserhaushalte fallspezifisch noch zu verbessern, sollte die rudimentäre Datenbasis regional beliebig um weitere Einflussfaktoren erweiterbar sein und (falls genauere regionale Daten vorliegen) flusseinzugsgebietsspezifisch präzisiert werden können. Auch ist darauf zu achten, dass im Rahmen des Modellsystems zusätzliche sozioökonomische Einflussfaktoren einfach ergänzt und eingebunden werden können.

Das aggregierte Modellsystem soll am Ende befähigt sein, den Referenzzustand bzw. ein Zukunftsszenario mit einer Genauigkeit abbilden zu können, die eine tendenzielle Aussage zu den zeitlichen und mengenmäßigen Änderungen im Abflussverhalten zulässt und aus der Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden (szenariobasierten) Einflussfaktoren abgeleitet werden können.

Im Zuge des Entwicklungsprozesses des aggregierten Modellsystems werden keine (grundlegend) neuen naturwissenschaftlichen Modelle entwickelt und auch keine klimatischen, geophysikalischen oder sozioökonomischen Eingangsdaten selber neu erhoben oder generiert. Vielmehr ist erklärtes Ziel, für die Entwicklung des Modellsystems nur bereits vorhandene globale Modelle und Daten heranzuziehen und diese, wenn nötig, an eine höhere Auflösung zu adaptieren. Die spätere regionale Erweiterung um Einflussfaktoren oder die Präzisierung von Daten im



Rahmen einer anwendungsspezifischen Simulation eines Flusseinzugsgebietes bleibt davon natürlich unberührt – vielmehr sollen die Voraussetzungen hierzu durch das aggregierten Modellsystem ausdrücklich gegeben sein.

Folgende Anforderungen sollen an das aggregierte Modellsystem gestellt werden und sind bei der Entwicklung umzusetzen (basierend auf der Zielsetzung, siehe auch Tabelle 1.2-1):

- potenziell auf alle weltweiten Flusseinzugsgebiete anwendbar,
- Simulation der hydrologischen Prozesse auf der regionalen Skala (Kilometerbereich) anhand eines Abflussmodells mittlerer Komplexität,
- Verwendung/Adaption von bereits vorhandenen Daten und Modellen,
- jederzeit die Möglichkeit zur Berücksichtigung und Einbindung neuer geophysikalischer oder sozioökonomischer Einflussfaktoren oder deren fortlaufende Ergänzung und Präzisierung,
- Ergebnisse sollen in tendenziellen Aussagen (Referenz-/Szenariovergleich) zum natürlichem Wasserabfluss, der resultierenden Wasserverfügbarkeit innerhalb des Flusseinzugsgebiets (gesamter Wasserabfluss) und einer Abflussbilanz des Hauptstroms bestehen,
- weitestgehende Umsetzung der Analysemethode in Form einer Computeranwendung,
- interdisziplinären Anwendungen und Benutzern soll Rechnung getragen werden, daher soll eine einfache Handhabung anhand der folgenden Punkte umgesetzt werden:
  - a) Desktopanwendung,
  - b) lauffähig auf handelsüblichen PCs,
  - c) bedienerfreundliche Anwendung,
  - d) möglichst geringer Rechenaufwand / schnelle Berechnungszeiten,
  - e) die Möglichkeit zu programmatischen Erweiterungen.
- Soweit erforderlich sollen Analysemethoden zur Evaluierung der Genauigkeit der Eingangsdaten, Modellrechnungen und Simulationsergebnisse in die Computeranwendung bereits integriert bzw. Schnittstellen hierfür angeboten werden.

Auf Basis des Forschungszieles, den oben definierten Anforderungen an die Analysemethodik und den bereits identifizierten Forschungslücken, ergeben sich für den weiteren Verlauf der Forschungsarbeit folgende **Forschungsfragen**:

- A) Wie kann das geforderte Modellsystem programmatisch umgesetzt werden, um den interdisziplinären Anforderungen, einer einfachen Handhabung und einer potenziellen Erweiterbarkeit der Anwendung gerecht zu werden?
- B) Welche prozeduralen Schritte muss das aggregierte Modellsystem zur Simulation regionaler Wasserhaushalte im Einzelnen umfassen? Welche naturwissenschaftlichen und sozioökonomischen Prozesse und Basisdaten spielen hierbei eine zwingende Rolle?
- C) Können globale Abflussmodelle dahingehend adaptiert werden, dass man zu einem Abflussmodell mittlerer Komplexität gelangt und welche Prozesse / Effekte müssen in Hinblick auf eine höhere Auflösung zusätzlich bedacht werden?
- D) Welche Simulationsergebnisse und -genauigkeit können bei einer einfachen exemplarischen Anwendung des aggregierten Modellsystems im Rahmen dieser Arbeit erzielt werden und sind diese ausreichend, um eine belastbare oder tendenzielle Aussage über Änderungen der regionalen Wasserverfügbarkeit (Wasserhaushalte) innerhalb der untersuchten Flusseinzugsgebiete treffen zu können?

## 1.5 Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit untergliederte sich in fünf wesentliche Abschnitte. In **Kapitel eins** wurden zunächst die Motivation und der Kontext erläutert, welche der Entwicklung eines *aggregierten Modellsystems zur Simulation regionaler Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten* zugrunde liegen. Es wurden die zum Erreichen der Zielsetzung als notwendig erachteten Anforderungen an das Modellsystem definiert und die in diesem Zusammenhang aufgeworfenen Forschungsfragen angeführt.

Das folgende **Kapitel zwei** gibt einen kompakten Überblick der geophysikalischen und sozioökonomischen Mechanismen und Einflussfaktoren, die in Bezug auf regionale Wasserhaushalte eine Rolle spielen. Es dient auch dazu, die Komplexität von Klimaprozessen und die Wechselwirkungen innerhalb von Flusseinzugsgebieten aufzuzeigen. Die wesentlichen sozioökonomischen Einflussfaktoren auf die Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten werden herausgearbeitet und der aktuelle Forschungsstand wird erläutert. Unter dem Gesichtspunkt der Hypothese, dass Wasserknappheit/-mangel zu Konfliktpotenzialen führen könnte, wird mit einer Übersicht des sozialwissenschaftlichen Wasserdiskurses abgeschlossen.

**Kapitel drei** widmet sich dem eigentlichen Kernelement dieser Arbeit, der Entwicklung des aggregierten Modellsystems. Hierfür wird zunächst eruiert, welche Voraussetzungen (Modelle und Daten) und prozedurale Schritte für die Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten notwendig sind und wie die Genauigkeit von Simulationsergebnissen eingeschätzt werden kann. Anschließend wird erörtert, wie die an das Modellsystem gestellten Anforderungen in Form einer Computeranwendung am besten umgesetzt werden können. Außerdem wird die Aufbereitung von Rasterdaten, die entwickelte Computeranwendung und das adaptierte Abflussmodell mittlerer Komplexität und der entwickelte Parametrisierungsprozess detailliert und nachvollziehbar dargestellt.

In **Kapitel vier** wird eingangs die methodisch einheitliche Vorgehensweise in Hinblick auf die Anwendung des aggregierten Modellsystems beschrieben. Daran anschließend wird die Anwendung und Handhabung des Modellsystems anhand einer Referenzsimulation exemplarisch am Elbeinzugsgebiet evaluiert und im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit bewertet. Abschließend wird die entwickelte Analysemethode auf das sehr komplexe Flusseinzugsgebiet des Nils angewendet, einerseits um die Grenzen des Modellsystems auszutesten und andererseits, um teilweise auch zwei szenariobasierte Simulationen durchzuführen.

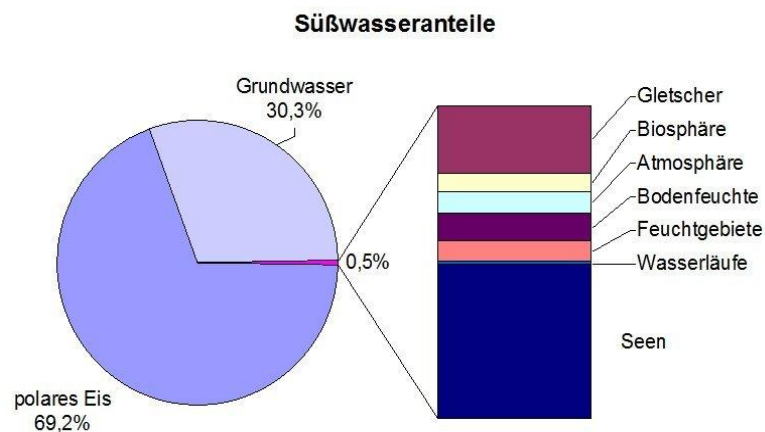
Nach der Beantwortung der Forschungsfragen und einer Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse, schließt **Kapitel fünf** mit einer Diskussion der potenziellen Verbesserungsmöglichkeiten und gibt einen Ausblick auf die mögliche, zukünftige Anwendung des aggregierten Modellsystems.

## 2. Wasser als Konfliktstoff

Das folgende Kapitel beleuchtet aus verschiedenen Perspektiven die Ressource Wasser und soll eine Übersicht derjenigen Aspekte geben, die in Hinblick auf die Verfügbarkeit, globale Verteilung und Nutzung von Wasser eine Rolle spielen und ist daher als eine kurze Einführung in wesentliche Aspekte der Wasserthematik zu verstehen. Zum einen soll so ein Einblick in die Mechanismen des natürlichen Wasserkreislaufes gegeben und zum anderen die Rückkopplungseffekte aufgezeigt werden, die sich auf die Wasserhaushalte durch klimatische oder sozioökonomische Einflüsse ergeben können. Es ist die entscheidende Motivation dieser Forschungsarbeit, mit dem aggregierten Modellsystem einen Beitrag zur rechtzeitigen Identifikation potenzieller regionaler Wasserkonflikte zu leisten. Das Kapitel schließt deshalb mit einer kurzen Darlegung des zurzeit vorherrschenden, sozialwissenschaftlichen Wasserdiskurses.<sup>4</sup>

### 2.1 Der Wasserkreislauf

Das Wasser auf der Erde unterliegt einem geschlossenen Kreislauf, d.h. die Menge des Wassers ist seit Millionen von Jahren annähernd konstant. Der Anteil des Süßwassers – definiert als Wasser mit weniger als 0,05 % Salzanteil (BMZ 1995) – hat nur einen Anteil von 2,5 Prozent (etwa 35 Millionen Kubikkilometer) an der globalen Wassermenge. Die entscheidenden Faktoren in Bezug auf die mögliche Nutzung von Süßwasser sind dessen physikalischer/chemischer Zustand, seine Erschließbarkeit und die zeitliche Verfügbarkeit. Ungefähr 69 % des Süßwassers ist an den Polkappen in Form von Eis gebunden und ca. 30 % liegen als Grundwasser vor. Nur 0,01 % des Süßwassers befindet sich hingegen in Wasserläufen bzw. Flüssen (Abbildung 2.1-1). Als unmittelbar zugänglich können somit auch nur ca. 31 % des Süßwassers angesehen werden (hierbei handelt es sich um Grundwasser, Binnengewässer und Wasserläufe), was einer Menge von ungefähr 11 Millionen Kubikkilometern entspricht (WWAP 2009).



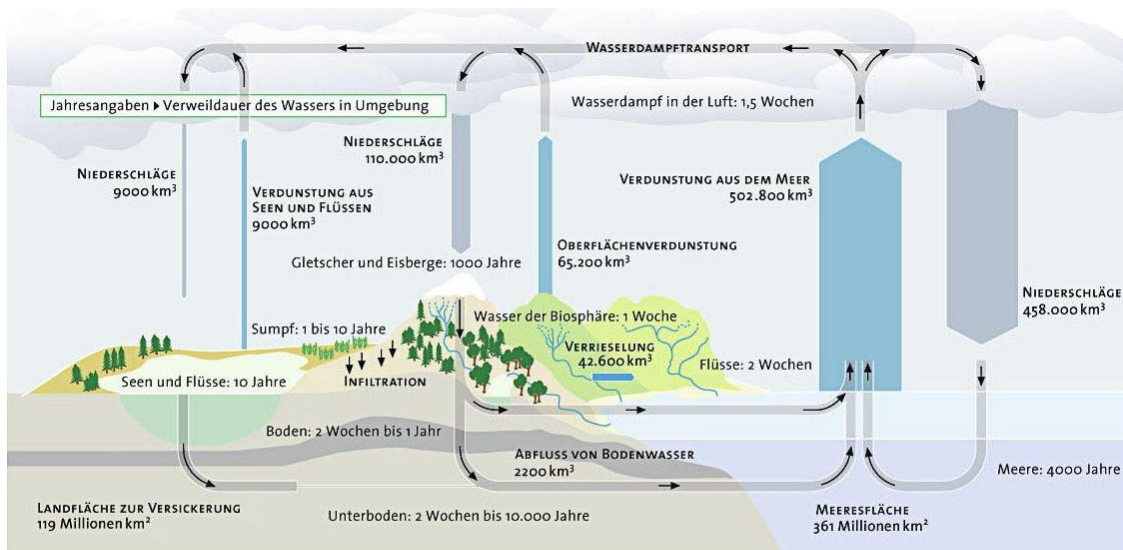
data source: UN World Water Development Report 3 - Water in a Changing World

Abbildung 2.1-1 : Süßwasseranteile

Der globale Wasserkreislauf wird im Wesentlichen von Verdunstungs- und Niederschlagsprozessen angetrieben, die mittlere Verweildauer des Wassers in den unterschiedlichen Speicherme-

<sup>4</sup> Dieses Kapitel basiert auf den Recherchen und Ausarbeitungen, die im Rahmen dieser Promotion zur Thematik Wasser durchgeführt wurden. In wesentlichen Teilen besteht dieses Kapitel daher aus ausgewählten Abschnitten (zum Teil im Wortlaut) des Arbeitspapiers ALWARDT (2012), das in diesem Zusammenhang erarbeitet und bereits veröffentlicht wurde.

dien weicht dabei jedoch stark voneinander ab. Abbildung 2.1-2 veranschaulicht die Verdunstungs- und Niederschlagsprozesse sowie die Wasserabflussprozesse, wie sie über der Landoberfläche und dem Wasser stattfinden. Ferner finden sich in der Abbildung die typischen Zeiträume, in denen das Wasser in den unterschiedlichen Speichermedien verweilt.<sup>5</sup>



#### Der Kreislauf des Wassers

©2008, Le Monde diplomatique, Berlin

Quellen: Philippe Rekacewicz, in Vital Water Graphics, an Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters, UNEP/GRID-Arendal, 2002 ([www.unep.org/vitalwater/](http://www.unep.org/vitalwater/)), nach Igor A. Shiklomanov, State Hydrological Institute (SHI, Sankt Petersburg) und United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (Unesco, Paris), 1999; Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, 1994; Alan R. Freeze und John A. Cherry, Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.

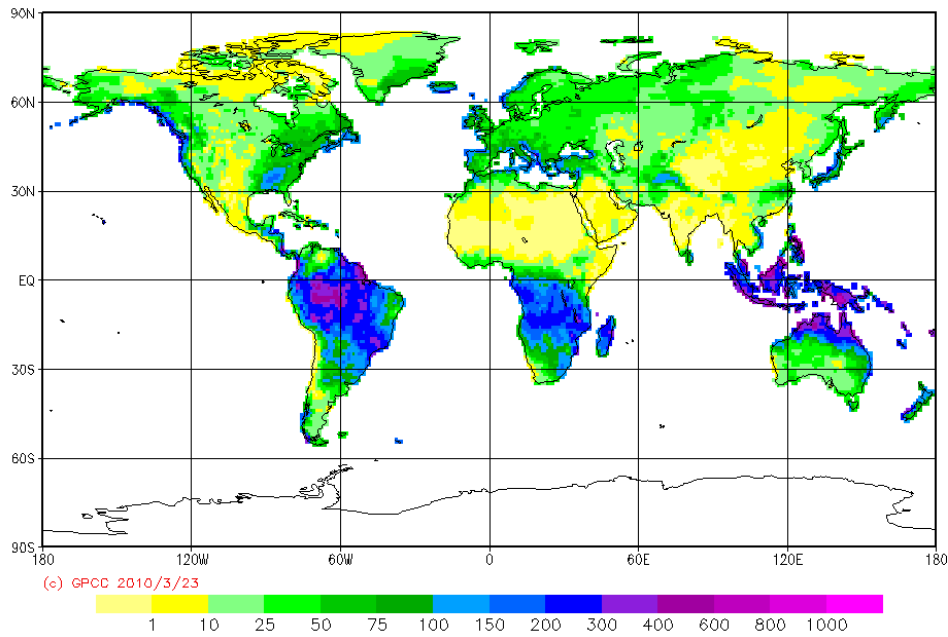
Abbildung 2.1-2 : Der Wasserkreislauf mit Angabe der durchschnittlichen Wassermengen und Verweildauern in den jeweiligen Medien.

## 2.2 Die globale Verteilung von Frischwasser

Die Wasserverteilung hängt maßgeblich vom Niederschlag über der Landoberfläche ab. Hierbei handelt es sich zugleich um die einzige sich natürlich erneuernde Süßwasserquelle. Global sind Niederschläge zeitlich und räumlich jedoch sehr ungleich verteilt. Die Abbildung 2.2-1 gibt den lokalen gemittelten monatlichen Niederschlag für den Winter 2008/09 und den Sommer 2009 in mm/Monat wieder. Deutlich sichtbar sind die saisonalen Niederschlagsschwankungen in Regionen wie Südafrika, dem indischen Subkontinent oder Teilen von Amerika, Asien und Ozeanien. Ein extremer Niederschlagsmangel herrscht das ganze Jahr über im überwiegenden Teil von Nordafrika und dem Mittleren Osten. Regionen, die nicht mit einer stetigen, ganzjährigen Niederschlagsmenge rechnen können, sind also auf natürliche Mechanismen angewiesen, über die das Wasser von Niederschlägen längerfristig gespeichert und damit auch in regenarmer Zeit verfügbar gemacht wird. Hierzu zählen insbesondere Oberflächengewässer und Grundwasser, aber auch Fließgewässer, die Wasser zugleich überregional verteilen. Im Sinne der Themenstellung dieser Arbeit wird der Betrachtungsfokus im Folgenden auf dem lateralen Wasserabfluss über die Landoberfläche und den hierdurch ausgebildeten Flusssystemen liegen.

<sup>5</sup> Die Werte zu den jeweiligen Verweildauern variieren in der Literatur zum Teil erheblich. Andere Zeiträume finden sich so u.a. in HENDL & LIETKE (2002: 454).

GPCC Monitoring Product Gauge-Based Analysis 1.0 degree precipitation for Season (Dec,Jan,Feb) 2008/2009 in mm/month



GPCC Monitoring Product Gauge-Based Analysis 1.0 degree precipitation for Season (Jun,Jul,Aug) 2009 in mm/month

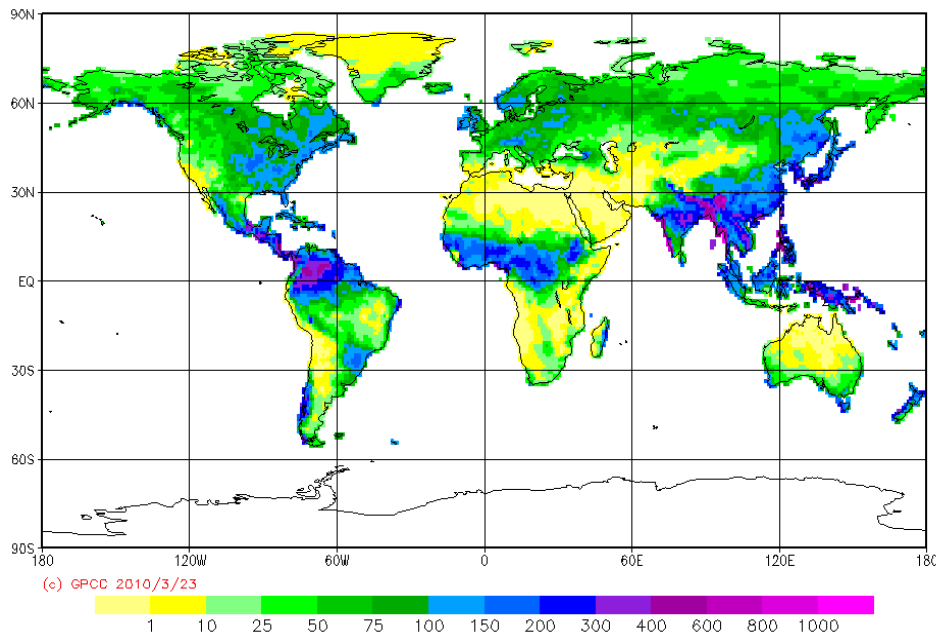


Abbildung 2.2-1 : Globale Niederschläge in mm/Monat für die Monate Dezember bis Februar 2008/2009 und Juni bis August 2009.<sup>6</sup>

### Lateraler Wasserabfluss über Land

Derjenige Anteil des Niederschlags, der lateral über die Landoberfläche abfließt (auch als *Runoff* bezeichnet), sammelt sich in sogenannten Flusseinzugsgebieten und wird über Gerinne, Bäche

<sup>6</sup> Datenquelle: <http://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

und Flussnebenarmen, den Hauptströmen der großen Flusssysteme zugeführt, die das Wasser zum überwiegenden Anteil in Richtung der Ozeane oder aber vereinzelt auch in Oberflächengewässer bzw. Feuchtgebiete transportieren.

„Als Fluss wird jeder natürliche, in einer langgestreckten und einseitig geöffneten Hohlform der Landfläche fließende Wasserlauf bezeichnet, der umgrenzbare Flächen mit natürlichem Gefälle entwässert“ (HENDL & LIEDTKE 2002). Zur Ausbildung eines Wasserabflusses kommt es also durch zwei grundsätzliche Faktoren; einer geneigten Oberfläche und ausreichendem Niederschlag, der in seiner Menge die auftretende Verdunstung und Versickerung übertrifft. Die Gerinne, Bäche, Nebenarme und die daraus resultierenden Hauptströme bilden dann ein Flusssystem, das von der Mündung her betrachtet einen verästelten Aufbau (*Strombaum*) hat (HENDL & LIEDTKE 2002: 461). Die von einem solchen Flusssystem insgesamt entwässerte Fläche wird als *Flusseinzugsgebiet* (engl. *River Basin*) bezeichnet. Ein Flusseinzugsgebiet ist also derjenige Teil der Landoberfläche, deren Wasserfluss maßgeblich zur Speisung des entsprechenden Flusssystems beiträgt.

Verschiedene Flusseinzugsgebiete werden durch sogenannte *Wasserscheiden* voneinander abgegrenzt, bei denen es sich um hydrogeographische Grenzlinien (zumeist geologische Erhebungen) handelt, die den Wasserfluss nur in bestimmte, ausgewiesene Richtungen zulassen. Der überwiegende Anteil der weltweiten Flüsse (etwa 80 %) transportiert ihr Wasser in Richtung der Ozeane. Der Abfluss einiger Flusseinzugsgebiete mündet jedoch nicht in das Meer, sondern bildet *Binnenentwässerungsgebiete* aus – weiträumige abflusslose oberirdische Areale (Binnengewässer oder Feuchtgebiete) –, die durch sogenannte *Kontinentalwasserscheiden* abgegrenzt werden (HENDL & LIEDTKE 2002: 461).

Die Abflussbildung und schlussendliche Wasserführung eines Flusssystems wird durch klimatische Einflussfaktoren bestimmt und wechselseitig durch die Gestalt des Flusses (Flussquerschnitt, Tiefe, Struktur des Flussbettes etc.), die Form und Größe des Einzugsgebietes (Quellen, Zuflüsse, Bodenstruktur, Vegetation etc.) sowie durch mögliche zivilisatorische Einflussfaktoren (Wasserentnahmen, bebaute/versiegelte Flächen, Flussbegradigungen etc.) beeinflusst. Umfangreiche Informationen zur Flusskunde (*Potamologie*) und den Flussmechanismen finden sich in der Fachliteratur, zum Beispiel bei HENDL & LIEDTKE (2002).

## **2.3 Klimawandel und sozioökonomische Einflüsse**

Sowohl der Klimawandel als auch sozioökonomische Einflüsse können zu einer Beeinträchtigung der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten, zu einer regionalen Verknappung der Ressource Wasser und damit potenziell auch zu Wasserkonflikten führen. Der tatsächliche Einflussgrad des Klimawandels ist in Bezug auf regionale Konfliktpotenziale aber nur schwer abzuschätzen. Eine eindeutige Abgrenzung von anderen, sozioökonomischen Konfliktfaktoren ist überwiegend nicht möglich. Inwiefern das Klima auch durch technologische Maßnahmen, wie z.B. *Climate Engineering*, gesteuert werden kann und welche potenziellen Folgen hieraus resultieren könnten, ist derzeit Gegenstand von wissenschaftlichen Debatten (siehe u.a. LINK et al. 2013).

### **2.3.1 Prognostizierte Folgen des Klimawandels**

Nach Prognosen des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) wird je nach Klimaszenario bis 2100 mit einem durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg zwischen 1° und 3,7° Celsius gerechnet und diese globale Erwärmung wird nach vielfacher Expertenmeinung weltweit

zu extremeren Wetterereignissen führen (IPCC 2013). Stürme können in manchen Regionen häufiger und in verstärkter Form auftreten, viele Länder werden zunehmender Dürre, andere unstetigeren Niederschlägen oder Starkregenschauern ausgesetzt sein. Die Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur wird auch zu einem verstärkten Abschmelzen von Festlandsgletschern und den polaren Eiskappen in der Arktis führen.

Die klimatischen Auswirkungen auf die Wasserhaushalte werden regional schwanken: Eine erhöhte regionale Durchschnittstemperatur führt im Allgemeinen zu einer stärkeren Verdunstung, was bei gleichzeitig ausbleibenden bzw. nachlassenden Niederschlägen zu einer Austrocknung des Bodens sowie sinkenden Flusspegeln führt. Auch den Grundwasserspeichern wird weniger Wasser durch Versickerung zugeführt. Einhergehend mit extremerem Wettergeschehen werden in manchen Regionen auch heftigere, unregelmäßigere Niederschläge prognostiziert (MIN et al. 2011), die in kurzen Zeiträumen auftreten. Flusspegelstände werden in solchen Gebieten größeren Schwankungen unterliegen. Dies kann regional zu einem schnelleren und heftigerem Überlandabfluss des Wassers und damit einerseits zu Überflutungen, andererseits zu Bodenerosionen führen (PALL et al. 2011). Es ist anzunehmen, dass im Gegenzug auch der Zugriff auf vorhandene Grundwasserreserven in vielen Regionen intensiviert wird. Gerade aber ein schneller Abfluss von Wassermassen kann nur wenig zur Regeneration der Grundwasserspeicher beitragen. Aufgrund der langsam vorstattgehenden Versickerungsprozesse füllen sich Grundwasserspeicher effektiv nur durch gleichmäßig und längerfristig auftretende Niederschläge wieder hinreichend auf.

Einige Länder, die bereits heute unter Dürreperioden zu leiden haben, werden zukünftig in deutlich verstärkter Form hierdurch beeinträchtigt werden. In Regionen des südlichen Europas wird zukünftig mit weniger Niederschlägen gerechnet und selbst in Deutschland gehen Experten in der Region Brandenburg von einer stark sinkenden Grundwasserneubildung und einer daraus möglicherweise resultierenden Versteppungsgefahr aus (BUND 2007). Auf der anderen Seite werden einige Regionen aber durchaus auch von einem Temperaturanstieg profitieren. In Folge einer Nordverschiebung der Agrarzonen könnte so zum Beispiel in einigen Gebieten des nördlichen Russlands erstmalig Agrarwirtschaft möglich werden, in südlicheren Gegenden ist dafür im Gegenzug aber mit zunehmender Trockenheit zu rechnen (GÖTZ 2009).

Auch das Abschmelzen der Festlandgletscher wird eine Anzahl von Flusssystemen vor eine große Herausforderung stellen. So speist sich eine Mehrzahl der Flüsse in Zentralasien zu einem überwiegenden Anteil aus Gletscherwasser, das seinen Ursprung im Himalaja bzw. im tibetischen Hochland hat. Diese im Hochgebirge entspringenden Flüsse werden bei schwindenden Gletschern eines erheblichen Anteils ihres Wassers beraubt und stark sinkende Flusspegel werden die Folge sein. Dieses kann insofern immense Auswirkungen nach sich ziehen, als dass viele dieser Flüsse die wesentliche Wasserquelle für Gebiete darstellen, die eine der weltweit größten Bevölkerungsdichten aufweisen.

### **2.3.2 Regionale sozioökonomische Einflüsse**

Neben einem möglichen negativen Einfluss des Klimawandels auf die regionalen Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten spielen die vorherrschenden sozioökonomischen Entwicklungen eine entscheidende Rolle.

Wenn es um die Prognose des zukünftigen regionalen Wasserbedarfes geht, stellt das Bevölkerungswachstum eine der entscheidenden Größen dar: Etwas mehr als sieben Mrd. Menschen

leben heute auf der Erde. Schätzungen gehen davon aus, dass es 2050 vermutlich 9,6 Mrd. und im Jahr 2100 etwa 10,9 Mrd. Menschen sein werden (DSW 2013). Zugleich bedeutet dies aber auch einen potenziellen Mehrbedarf an Wasser für mehr als drei Mrd. Menschen, die – so ist aufgrund der Statistiken zu befürchten – in Entwicklungsregionen leben werden, die bisher größtenteils nicht über eine gesicherte Wasserversorgung verfügen. Ein großes Problem wird auch die Zunahme regionaler Ballungszentren (Mega-Cities) darstellen, die aufgrund ihres hohen „punktuellen Wasserbedarfs“ eine große Herausforderung für die Infrastruktur zur Wasser- und Sanitärversorgung, aber auch die Abwasserentsorgung darstellen.

Neben dem Trinkwasserbedarf für 9,6 Mrd. Menschen im Jahr 2050 wird es auch auf dem Agrarsektor zu einem erheblichen Anstieg der Produktion kommen müssen. Bereits bisher werden ca. 70 % aller Frischwasserentnahmen für die Landwirtschaft getätigt, in semiariden Regionen beträgt dieser Anteil sogar mehr als 90 %. Gerade aber die sehr wasserintensive Bewässerungslandwirtschaft ist in vielen Regionen unwirtschaftlich bzw. ineffizient und geht mit enormen Wasserverlusten von manchmal mehr als 50 % Prozent einher (BMZ 2006: 6). In Flusseinzugsgebieten wie dem Nil ist zukünftig noch mit einem Ausbau der Bewässerungslandwirtschaft zu rechnen (AWULACHEW et al. 2012: 3f).

Zunehmender Wohlstand in den Schwellenländern führt zu einem gesteigerten Konsum. Eine steigende Nachfrage nach Konsumgütern wie z.B. Unterhaltungselektronik und Fahrzeuge auf der einen Seite, aber auch die Änderung von Ernährungsgewohnheiten auf der anderen Seite, lassen den produktionsbedingten Wasserverbrauch stark anwachsen. Gerade eine regionale Veränderung der Essgewohnheiten, hin zu mehr tierischen Produkten, kann zu einem erheblichen Anstieg der Menge an verbrauchtem Wasser führen (fast jeder zehnte Liter Frischwasser, den die Menschheit verbraucht, fließt in die Viehhaltung). Die Frage, die sich eigentlich stellt, ist also häufig nicht, wie viel Wasser ein Mensch durchschnittlich pro Tag zum „Überleben“ benötigt (etwa 2-5 Liter), sondern wie viel Wasser er „konsumiert“ – in den Industrienationen wird diese Menge auf etwa 3.000 bis 4.000 Liter pro Tag/Person geschätzt (siehe u.a. BBU (2006)).

Außerdem führt auch die fortschreitende industrielle Entwicklung vieler Staaten zu einem erheblich ansteigenden Bedarf an Brauch- und Nutzwasser. Dieses gilt insbesondere bei Ausbau der industriellen Produktion sowie der Energieversorgung. Der Bau von Wasserkraftanlagen, der überwiegend mit Staumaßnahmen an Flüssen einhergeht, stellt einen Eingriff in die natürlichen Flussmechanismen dar und kann in der Folge zur Beeinträchtigung der Wasserversorgung anderer Flussanliegerstaaten führen.

## **2.4 Wasser – ein Threat-Multiplier?**

Aus sicherheitspolitischer Perspektive ist es von besonderer Bedeutung, ob der zeitweise oder dauerhafte Mangel an Wasser in einem Flusseinzugsgebiet zu regionalen Konflikten führen oder vorhandene Konflikte verstärken könnte. Ein entscheidender Faktor bei dieser Betrachtung wird neben den potenziellen klimatischen oder sozioökonomischen Veränderungen auch die Stabilität der regionalen und staatlichen Strukturen sowie der Grad der regionalen bzw. innerstaatlichen Anpassungsfähigkeit (technologische, strukturelle Anpassung) sein (siehe u.a. WBGU (2007), CAN (2007) und SCHEFFRAN & BATTAGLINI (2011)). Auf der zwischenstaatlichen Ebene spielen darüber hinaus das Mächteverhältnis, die Legitimität der Ansprüche und die internationale Bedeutung bzw. die potenzielle internationale Einflussnahme eine entscheidende Rolle. Nach der Identifizierung wasserbedingter Konfliktpotenziale steht somit die Frage im Raum, wie



der Konflikt aller Vorräusicht nach ausgetragen wird, aber auch welche Möglichkeiten und Instrumentarien der Steuerung – hin zu einer kooperativen Konfliktlösung – ergriffen werden könnten. Für weiterführende Literatur siehe auch CHATTERJI (2002), PACHOVA (2008) und CONCA (2006).

Eine entscheidende Bedeutung in Hinblick auf die Nutzung grenzüberschreitender Wasserressourcen kommt bisher vor allem zwischenstaatlichen Abkommen zu. Die bisherigen Erfahrungen mit solchen bi- und multilateralen Abkommen (z.B. Nileinzugsgebiet, Indien/Pakistan, Jordanien/Israel) bestätigten über die letzten Jahrzehnte deren stabilisierende Wirkung.

### 2.4.1 Wie viel Wasser ist „ausreichend“?

Süßwasser zählt zu den wichtigsten Ressourcen, ohne die das heutige Leben auf der Erde nicht möglich wäre. Der Mensch und das Ökosystem sind auf ausreichende Mengen an sauberem Wasser angewiesen. Die tägliche Verfügbarkeit von Trinkwasser ist ein lebensnotwendiges menschliches Bedürfnis und eine ausreichende Sanitärversorgung ist ein entscheidender Gesundheitsfaktor.

Heute geht man davon aus, dass etwa 2,3 Mrd. Menschen in Gebieten leben, die mit Wasserarmut (*water stress*) zu kämpfen haben und diese Zahl könnte bis 2025 auf voraussichtlich 3,5 Mrd. Menschen ansteigen (WRI 2002). Bei Wasserknappheit (*water scarcity*) handelt es sich um eine verschärfte Form der Wasserarmut. Wenn in einer Region eine große Anzahl von Menschen keinen Zugang zu sicherem und erschwinglichem Wasser hat, um ihre unmittelbaren Bedürfnisse (Trinken, Waschen etc.) und ihre Lebensgrundlage abzusichern, kann man von Wasserknappheit sprechen (RIJSBERMAN 2004). Wie der Tabelle 2.4-1 entnommen werden kann, geht man nach FALKENMARK (1989) davon aus, dass ab einer Menge von 1.700 m<sup>3</sup> erneuerbaren Süßwassers pro Jahr und Einwohner in einem Land von einer *ausreichenden Wasserversorgung* gesprochen werden kann. Bei einer Menge von nur 1.000 - 1.700 m<sup>3</sup> herrscht hingegen Wasserarmut, unter 1.000 m<sup>3</sup> spricht man bereits von Wasserknappheit und bei weniger als 500 m<sup>3</sup> Wasser pro Person und Jahr muss von einer absoluten Wasserknappheit in diesem Land ausgegangen werden.

Definition	erneuerbares Süßwasser pro Person/Jahr
Ausreichende Wasserversorgung	ab 1.700 m <sup>3</sup>
Wasserarmut ( <i>water stress</i> )	1.700 bis 1.000 m <sup>3</sup>
Wasserknappheit ( <i>water scarcity</i> )	unter 1.000 m <sup>3</sup>
Absolute Wasserknappheit	unter 500 m <sup>3</sup>

Tabelle 2.4-1 : Gängige Definition von Wasserarmut und Wasserknappheit nach FALKENMARK (1989).

Aber auch das Ökosystem ist bei vielen seiner Funktionen auf eine ausreichende Menge an Süßwasser angewiesen (BMZ 2006). Neben seiner Funktion als Lebensraum von Tieren, Pflanzen und dem Menschen verantwortet es den Abbau organischen Materials, spielt die entscheidende Rolle in vielen chemischen, atmosphärischen Prozessen (u.a. Sauerstoffproduktion, Reinigung der Luft) und fungiert als natürlicher Wasserspeicher und -aufbereiter und ist damit unmittelbarer Teil des globalen Wasserkreislaufes. Außerdem ist das Ökosystem für den Menschen ein unverzichtbarer, wirtschaftlicher Faktor und trägt auch zum individuellen Wohlbefinden bei.

Ob ein Staat bzw. eine Region unter Wassermangel oder sogar Wasserknappheit zu leiden droht, hängt auch wesentlich davon ab, inwiefern erneuerbare Wasserressourcen (Niederschlag, Wasserquellen und Zuflüsse) langfristig bzw. regelmäßig zur Verfügung stehen oder aber Kapazitäten vorhanden sind, Frischwasser ggf. zu importieren oder technisch zu gewinnen (siehe hierzu Tabelle 2.4-2).

Arten der Frischwasserversorgung, deren Verlässlichkeit, Abhängigkeit von Dritten bzw. erforderliche Kosten (ohne Einbeziehung klimatischer Einflüsse) Legende: X = trifft zu (X) = trifft unter Umständen zu	verlässlich	unstetig	nicht erneuerbar	Abhängigkeit	hohe Kosten
Erneuerbares, territoriales Frischwasser (durch Niederschlag)	X	(X)			
geologische Grundwasserleiter (schnelles Grundwasser)	X	(X)			
Fossile Grundwasservorkommen	X		X		(X)
stetiger Frischwasserzufluss von außerhalb des eigenen Territoriums (Flüsse/Grundwasser)		(X)		X	
Frischwassererzeugung (Meerwasserentsalzung)	(X)				X
Möglichkeit von Wasserimporten				X	X

Tabelle 2.4-2 : Verschiedene Arten der Frischwasserversorgung: Verlässlichkeit des Zugriffs, un-stetige oder nur zeitlich begrenzte Verfügbarkeit, Abhängigkeit von anderen Akteuren oder hohe anfallende Kosten (ALWARDT 2011).

## 2.4.2 Konfliktpotenziale

In Hinblick auf Wasserressourcen erscheint es sinnvoll, zwischen *nationalen* und *transnationalen* Konfliktpotenzialen zu unterscheiden, also zwischen möglichen Konflikten, die innerhalb eines Landes ausgetragen werden, und solchen, die sich zwischen zwei souveränen Staaten abspielen würden (siehe auch Tabelle 2.4-3).

### **Transnationale Konflikte**

Zwischen zwei Staaten wird die Konfliktlinie eines möglichen Wasserdisputes vor allem entlang gemeinsam genutzter Flüsse oder Grundwasserreservoirs verlaufen (siehe hierzu u.a. SAGER 2008). Konfliktfaktoren können hier eine steigende Wasserentnahme, Flussumleitungen, Stau-maßnahmen oder eine Beeinflussung der Wasserqualität sein. Aber auch transnationale Migra-tionsströme – hervorgerufen durch innerstaatlichen Wassermangel oder Nutzungskonflikte – können in ein zwischenstaatliches Konfliktpotenzial resultieren.

### **Nationale Konfliktlinien**

Innerstaatliche Wasserkonflikte können entstehen, wenn es zu einer zeitweisen oder dauerhaf-ten Einschränkung bzw. Unterbrechung der Wasserversorgung kommt. Mögliche Ursachen hier-für können zum einen klimatische Faktoren (ausbleibender Niederschlag, Hitzewelle, niedriger Flusspegelstand) oder Streitigkeiten bei der Wasserverteilung sein. Bei der innerstaatlichen Wasserverteilung müssen i.A. eine Vielzahl verschiedener Interessengruppen berücksichtigt werden, wie zum Beispiel (Vieh-)Bauern, Produktionsbetriebe, Konzerne oder die Bevölkerung. Konfliktlinien verlaufen immer dort, wo eine Interessengruppe unverhältnismäßig viel Wasser

zum Nachteil einer anderen Gruppe entnimmt (oder unbrauchbar macht), sich die Besitzverhältnisse von Wasserressourcen ändern oder die Kosten für Wasser ansteigen. Das Fehlen entsprechender Kompensationsmechanismen (z.B. Erschließung neuer Wasserressourcen, Import von Wasser, etc.) und nicht vorhandene oder nur schwach ausgeprägte staatliche Strukturen – die regulierend eingreifen könnten – wirken konfliktverschärfend. Treten in einem Land nur auf der regionalen Ebene Wasserengpässe auf, so können auch hierdurch hervorgerufene innerstaatliche Migrationsströme zu erheblichen Spannungen zwischen einzelnen Bevölkerungsgruppen oder Ethnien führen.

	Mögliche Konfliktlinien		
	transnationale		nationale
	Grenzüberschreitende Flüsse	Länderübergreifende Grundwasservorkommen	Innerstaatliche Wasservorkommen
<b>Konflikt-Ursachen</b>	Wasserentnahme, Umleitung, Staumaßnahmen, Wasserqualität	Wasserentnahme	Verfügbarkeit, Erschließbarkeit, Besitzverhältnisse, Wasserkosten
<b>mögliche Folgen</b>	diplomatischer Konflikt, Sanktionen, militärischer Schlagabtausch, Migration		Migration (innerstaatlich oder transnational), staatl. Destabilisierung, gewaltförmige Konflikte
<b>Präventionsmaßnahmen</b>	rechtliche Rahmenvereinbarungen/Abkommen		Gesetzgebung, staatliche Strukturen

*Tabelle 2.4-3 : Transnationale und nationale Konfliktlinien in Bezug auf Wasserressourcen. Die möglichen Konfliktursachen, Folgen und Präventionsmaßnahmen (Alwardt 2011).*

### 2.4.3 Kooperation vs. Konflikt

Zu welchem Grad ein regionales Konfliktpotenzial um Wasser den Auswirkungen von klimatischen Veränderungen geschuldet ist, kann in den seltensten Fällen genau bestimmt werden oder ist allenfalls über längere Zeiträume ersichtlich. Die Debatte darüber, ob klimatische Veränderungen auch für die Zunahme von Konflikten oder Kriegen unmittelbar verantwortlich gemacht werden können, wird international kontrovers geführt, siehe hierfür u.a. SCHEFFRAN et al. (2012), SOLOW (2013) und BRZOSKA & SCHEFFRAN (2013).

Es ist historisch zu beobachten, dass ausschließlich um Wasser geführte zwischenstaatliche Konflikte bisher bevorzugt durch kooperative Ansätze gelöst wurden. Handelt es sich bei Wasserstreitigkeiten jedoch nur um den Teilaspekt eines zwischenstaatlichen Konfliktpotenzials, so dienten Wasserdispute in der Vergangenheit bereits häufiger als Auslöser oder vorgeschobener Grund für einen zwischenstaatlichen Konflikt, dessen eigentliche Ursache in Wirklichkeit vielschichtiger war. Auch können Wasserressourcen in Konfliktsituationen als ein potentes Druckmittel instrumentalisiert werden, siehe u.a. STAUFFER (1996), SPIEGEL (1990) und AMNESTY INTERNATIONAL (2009). In Hinblick auf die zunehmende Bedeutung von Wasserressourcen für die Energiewirtschaft, industrielle Produktion und Landwirtschaft – gerade unter dem Gesichtspunkt

wirtschaftlicher Entwicklung, steigenden Wohlstands, wachsender Bevölkerungszahlen und klimatischen Veränderungen – besteht aber die Gefahr, dass im Verständnis einiger Staaten der Ressource Wasser zukünftig eine stärkere strategische Rolle als bisher zukommen wird. Der Spielraum für Kompromisse und kooperative Lösungen könnte in manchen Regionen daher erheblich kleiner ausfallen.

Neben den zwischenstaatlichen Konfliktrisiken, erfordern auch innerstaatlich ausgetragene Wasserstreitigkeiten eine hohe Aufmerksamkeit. Innerstaatliche Wasserkonflikte können eine Vielzahl verschiedener Ursachen haben und oftmals auch ein hohes Gewaltpotenzial bergen. Bei den Konfliktursachen kann es sich zum einen um *versiegende Brunnen oder sinkende Flusspegel* als Folge zunehmender ökonomischer Ausbeutung oder klimatischer Veränderungen handeln. Zum anderen sind aber auch *veränderte Besitzverhältnisse* von Wasser, Spannungen zwischen Bevölkerungsgruppen, steigende Wasserkosten oder aber ein starkes Bevölkerungswachstum potenzielle Konfliktfaktoren. Zumeist ist es auch hier eine Kombination aus mehreren Ursachen, sodass Wasser häufig auch nur ein Teilaspekt der Gemengelage darstellt. Sind die staatlichen Strukturen eines Landes nun nicht hinreichend ausgeprägt, um für einen Ausgleich oder regulierende Mechanismen Sorge zu tragen, besteht die Gefahr, dass potenzieller Wassermangel zu Wasserstreitigkeiten, (innerstaatlicher) Migration und der gewaltsamen Austragung von Konflikten (z.B. in Form von Aufständen oder Kämpfen zwischen verschiedenen Gruppierungen) führen könnte. Kooperative Lösungsansätze gestalten sich nach erfolgtem Ausbruch solcher Konflikte immer sehr viel schwieriger.

Zusammenfassend soll festgehalten werden, dass sich die unmittelbaren sicherheitspolitischen Folgen einer potenziellen klimatischen Veränderung nach der vorherrschenden internationalen Expertenmeinung nur schwer einschätzen oder identifizieren lassen. Die frühzeitige Konflikteinbegung durch Verhandlungsansätze, das Ergreifen präventiver Anpassungsmaßnahmen und etwaige Kompensationsleistungen stellen somit eine große Herausforderung dar (BRZOSKA 2009). Die szenariobasierte Analyse der Wasserhaushalte unter sowohl klimatischen als auch sozioökonomischen Einflussfaktoren kann hierzu aber einen wertvollen Beitrag leisten und zu einem besseren Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen, Wechselwirkungen und nicht zuletzt der potenziellen Folgen für die regionale Wasserverfügbarkeit beitragen.

### 3. Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten

In diesem Kapitel wird der zentrale Forschungsgegenstand dieser Arbeit vorgestellt: die Entwicklung eines aggregierten Modellsystems, das die szenariobasierte Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten ermöglicht. Sowohl klimatische als auch sozioökonomische Einflussfaktoren sollen bei der Simulation grundsätzlich berücksichtigt werden können. Das Modellsystem soll so konzipiert werden, dass es prinzipiell auf alle weltweiten Flusseinzugsgebiete angewendet werden kann, was zumindest eine rudimentäre Basis an geophysikalischen und sozioökonomischen Datensätzen erfordert, die für die gesamte globale Skala verfügbar sein müssen (**gemeinsame Grunddatenbasis**). Diese Grunddatenbasis beinhaltet zugleich auch die notwendigen Antriebsdaten des aggregierten Modellsystems.

Zunächst soll hierfür genauer definiert werden, was in dieser Arbeit unter einem Wasserhaushalt verstanden wird und welches die Ergebnisse der Simulation eines Wasserhaushaltes sind.

Der Wasserhaushalt eines Flusseinzugsgebietes soll als ein geschlossenes System verstanden werden, welches durch die Grenzen des Einzugsgebietes – also die Gewässerscheide – definiert ist. Natürliche Wasserzuflüsse in dieses System können abhängig von der Region in Form von Niederschlag (vertikaler Zufluss über die Fläche) sowie Quell- und Gletscherwasser (punktuellem Zufluss) erfolgen. Je nach klimatischen Verhältnissen, Vegetation und Bodenbeschaffenheit verdunstet ein Teil dieses Wassers, wird durch Pflanzen aufgenommen oder versickert in tiefere Bodenschichten. Auf Basis des dann noch räumlich und zeitlich zur Verfügung stehenden Wassers bilden sich über die Landoberfläche des Einzugsgebietes dynamische laterale Wasserabflussprozesse aus, die durch die Geländebeschaffenheit bestimmt werden. Diese Abflussprozesse sammeln und konzentrieren die Menge des transportierten Wasser im Gerinnenetzwerk – erst in Rinnsalen, Bächen und dann im Hauptgerinne (Flussarme und Hauptstrom) –, über welches das Wasser das Flusseinzugsgebiet auch verlässt (Mündung ins Meer oder in ein Binnengewässer). Innerhalb des Systems eines Wasserhaushaltes treten aber auch menschliche Einflüsse auf. Diese sozioökonomischen Einflussfaktoren wechselwirken und beeinflussen die natürlichen lateralen Abflussprozesse, z.B. durch Wasserentnahmen (Landwirtschaft, Industrie), oder beeinflussen deren zeitlichen Verlauf (z.B. Staumaßnahmen etc.). Sie können sowohl über die Fläche des Einzugsgebiets auftreten (z.B. Flächenentnahmen), als auch punktuell direkt am Flussnetzwerk erfolgen (siehe auch Abbildung 3-1).

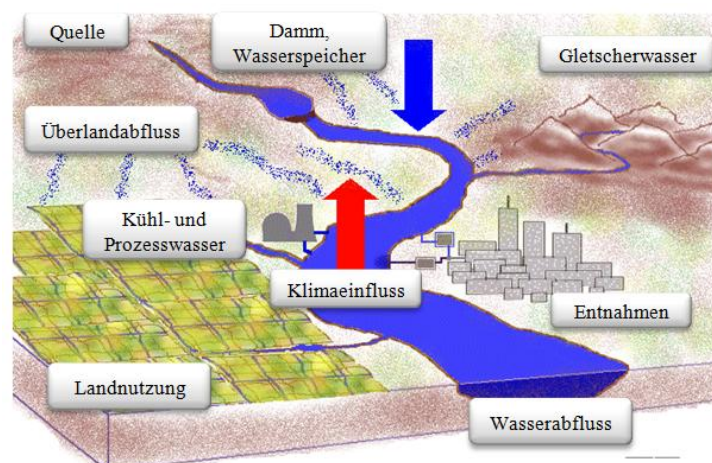


Abbildung 3-1 : Schematische Darstellung möglicher Einflüsse auf ein Flusssystem

## Die Ergebnisse der Simulation eines Wasserhaushaltes

Die Simulation des Wasserhaushalts eines Flusseinzugsgebiets kann entweder nur unter Berücksichtigung der geophysikalischen Wasserabflussprozesse durchgeführt werden (**natürlicher lateraler Wasserhaushalt**) oder zusätzlich auch die anthropogenen Einflussfaktoren mit einbeziehen (**gesamter lateraler Wasserhaushalt**). Das betrachtete Ergebnis ist die **Abflussbilanz des Hauptstroms** als Teilergebnis des jeweils simulierten Wasserhaushaltes (siehe Abbildung 3-2).

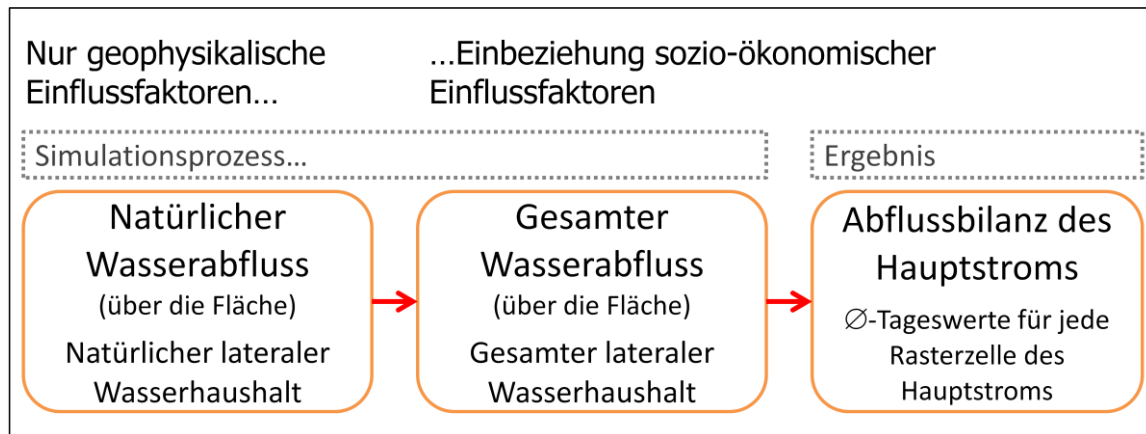


Abbildung 3-2 : Die simulierten Wasserhaushalte und das betrachtete Ergebnis des aggregierten Modellsystems.

Der natürliche laterale Wasserhaushalt ist das Ergebnis der ausschließlichen Simulation der dynamischen klimatischen und hydrologischen Prozesse in Bezug auf die Landoberfläche. Das bedeutet, in diese Simulation finden zeitlich variable Klimadaten und die geographischen Eigenschaften der Landoberfläche Eingang, nicht jedoch mögliche sozioökonomische Einflussfaktoren. Werden im Verlauf einer Simulation zusätzlich zu den natürlichen Wasserabflussprozessen auch noch zeitlich variable, sozioökonomische Einflussfaktoren berücksichtigt (Flächenwasserentnahmen, punktuelle Manipulation des Wasserflusses etc.), gelangt man zum gesamten Wasserabfluss (gesamter lateraler Wasserhaushalt) innerhalb des Flusseinzugsgebietes, bei dem sowohl geophysikalische als auch die sozioökonomische Einflussfaktoren des Simulationszeitraums berücksichtigt sind. Die Abflussbilanz des Hauptstroms stellt das betrachtete Ergebnis in Bezug auf den simulierten Wasserhaushalt eines Flusseinzugsgebietes dar. Hierbei handelt es sich um das resultierende Abflussvolumen des Hauptstroms in der Einheit Kubikmeter pro Sekunde [m<sup>3</sup>/s], bezogen auf einen Flussabschnitt (entspricht der Länge einer Rasterzelle in km und ist somit auflösungsabhängig) und gemittelt über einen definierten Zeitabschnitt. Unter Berücksichtigung von sowohl geophysikalischen als auch sozioökonomischen Einflussfaktoren, besteht die Abflussbilanz in der simulierten dynamischen Wasserführung des Hauptstromes, welche maßgeblich die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit des zugänglichen Oberflächenwassers des Flusseinzugsgebietes abbildet.

## Szenariobasierte Simulationen und Analyse der Simulationsgenauigkeit

Im Rahmen der Anwendung des aggregierten Modellsystems wird zwischen zwei Arten von Simulationen unterschieden – zum einen den **Referenzsimulationen** und zum anderen den **szenariobasierten Simulationen**. Die Referenzsimulation dient der Evaluation der Simulationsgenauigkeit in Bezug auf das untersuchte Flusseinzugsgebiet und wird für einen Zeitraum in der Vergangenheit (bis Gegenwart) auf Basis realer Klimadaten und den zu diesem Zeitraum vorherrschenden geophysikalischen und sozioökonomischen Einflussfaktoren (→Grunddatenbasis)

durchgeführt. Nach der Abschätzung der Simulationsgenauigkeit der Ergebnisse des aggregierten Modellsystems für eine spezifische Region, kann die Modellgenauigkeit ggf. unter Einbeziehung weiterer Einflussfaktoren (*regionale Eingangsdaten*) – die sich für die Berücksichtigung regional vorherrschender Begebenheiten und Einflüsse als notwendig erweisen – noch verbessert werden (*Evaluierung und regionale Anpassung des aggregierten Modellsystems*). Die Referenzsimulation stellt aber ebenso den Ausgangspunkt für eine szenariobasierte Simulation (*Variation der Eingangsdaten und Einflussfaktoren*) dar und liefert mit ihren Ergebnissen diejenigen Referenzwerte, anhand derer die tendenziellen Veränderungen bestimmt werden können, die sich durch eine ebensolche szenariobasierte Simulation ergeben.

**Szenariobasierte Simulation:** Über die Einbeziehung von Klimaprognosen und der Variation der geographischen und sozioökonomischen Eingangsdaten und Einflussfaktoren kann mit dem aggregierten Modellsystem eine szenariobasierte Simulation des Wasserhaushaltes im besagten Flusseinzugsgebiet durchgeführt werden. Die hierdurch ermöglichte szenariobasierte Analyse der Wasserhaushalte kann eine tendenzielle Abschätzung der zukünftigen regionalen Abflussvolumen und deren zeitlicher Entwicklung erlauben. Diese ist eine wichtige Voraussetzung, um politisch, sozioökonomisch und ökologisch induzierte Wasserkonfliktpotenziale zu erkennen und rechtzeitig regulierende und konfliktentschärfende Maßnahmen ergreifen zu können. Ein solches Szenario ergibt sich zumeist aus einer Forschungsfrage bzw. muss aus dieser abgeleitet werden (**Szenariobildung**). Grundlage hierfür können unter anderem die Entwicklung möglicher Extremszenarien – vor allem hervorgerufen durch klimatische und demographische Veränderungen – und die hieraus resultierenden veränderten Eingangsdaten sein.

Bei der Szenariobildung muss beim aggregierten Modellsystem zwischen kontinuierlichen und/oder flächenbasierten Einflüssen auf der einen Seite und einmaligen punktuellen Einflüssen direkt auf den Hauptstrom auf der anderen Seite unterschieden werden. Bei den kontinuierlichen bzw. flächenbasierten Einflüssen ist außerdem eine Unterscheidung zwischen dynamischen (sich im Simulationsverlauf zeitlich verändernden) und statischen Einflussfaktoren vorzunehmen.

Sowohl die kontinuierlichen, die flächenbasierten als auch die dynamischen Einflussfaktoren können ihre zeitliche Wirkung nur entfalten, wenn diese direkt in den Simulationsverlauf eingebunden werden. Die szenariobasierte Simulation kontinuierlicher bzw. flächenbasierter Einflussfaktoren kann dabei theoretisch entweder über szenariospezifische, flächenbasierte Eingangsdaten (variiertes Klima-Rasterdatensatz, Flächenentnahmen etc. ) oder über eine gezielte Rasterzellenmanipulation (spezifische Abflussbedingungen, um z.B. Wasserabzweigung, Staudamm oder Wasserkraftwerk zu simulieren) durchgeführt werden.

Über die Ergebnisse der Abflussbilanz des Hauptstroms kann die Wirkung einmaliger, szenariobasierter Einflüsse auf den Hauptstrom auch direkt betrachtet und analysiert werden. Solche zeit- und flächenentkoppelte Einflussfaktoren (z.B. punktuelle Wasserentnahmen/-zuflüsse sowie urbane und geographische Aspekte), die ihre Wirkung direkt am Verlauf des Hauptstroms zu einem definierten Zeitpunkt entfalten, können so direkt mit den Ergebnissen der Abflussbilanz des Hauptstroms verschnitten und auf ihre unmittelbare Wirkung hin untersucht werden. Hierbei muss aber beachtet werden, dass die etwaige Beeinflussung des Abflussverhaltens nachfolgender Rasterzellen auf diese Weise nicht simuliert wird, sondern es sich nur um die Betrachtung des „Momentszenarios“ einer spezifischen Rasterzelle handelt.

In der Praxis wird häufig eine Kombination an Einflussfaktoren vorliegen, die dann entsprechend zu berücksichtigen sind. Zum Beispiel kann ein Szenario darin bestehen, dass bei einem um 10 % verringerten Niederschlag und einer um 5 % gestiegenen Flächenbewässerung (beides kontinuierliche Einflussfaktoren über den Simulationsverlauf) innerhalb eines Flusseinzugsgebiets untersucht werden soll, ob einer Stadt am Hauptstrom noch genügend Abflussvolumen zur Verfügung steht, um damit ihren im Sommer um 3 % gestiegenen Bedarf an Wasser (in diesem Fall einmalig wirkender Einflussfaktor, der anhand der Ergebnisse der Abflussbilanz des Hauptstroms untersucht werden kann) zu decken.

**Simulationsgenauigkeit:** Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist zum einen stark von der Qualität und Quantität der in das Modell einfließenden Eingangsdaten abhängig. Zum anderen bilden Modelle die Realität immer nur näherungsweise, in einer zumeist erheblich vereinfachten Form ab und simulieren reale Prozesse daher auch nur ungenau. Vor allem komplexe Sachverhalte können durch Modelle oftmals nur sehr unzureichend und mit teils hohen Abweichungen abgebildet werden. Je genauer ein Modell gestaltet werden soll, desto detaillierter müssen die realen Prozesse berücksichtigt und auf die Vereinfachung von Sachverhalten verzichtet werden. Außerdem geht mit der Berücksichtigung zusätzlicher Prozesse eine größer werdende Anzahl an Eingangsdaten und -parametern einher, jeweils wieder mit spezifischen Fehlern behaftet. Ebenso ist eine eindeutige Zuordnung der Fehlerursachen eines von der Realität abweichenden Simulationsergebnisses häufig dann nicht möglich, wenn z.B. ein Modell und die zugehörigen Eingangsdaten (die teilweise das Ergebnis anderer Modelle sind), jeweils eine nicht genau bestimmbare Fehlerbehaftung aufweisen. Im Vergleich zu anderen Naturwissenschaften fallen gerade in den Geowissenschaften – insbesondere im Bereich der Klimawissenschaften – die Modell- und Datenfehler aufgrund der sehr komplexen Prozesse mit vielen Variablen relativ hoch aus, sind nur schwer abzuschätzen und bedingen sich häufig sogar wechselseitig. Eine Abschätzung der Simulationsgenauigkeit ist deshalb zumeist nur in qualitativer, nicht aber in quantitativer Form möglich. Die großen Fortschritte auf dem Gebiet der Datenverarbeitung erlauben auf diesem Feld aber die zunehmende Berücksichtigung immer komplexerer Sachverhalte und tragen so zu einer stetigen Steigerung der Genauigkeit geophysikalischer Modelle bei. Für eine eingehende Betrachtung der Genauigkeitsabschätzung von Klima- und Abflussmodellen sei auf die Fachliteratur verwiesen, wie u.a. REICHLER & KIM (2008), HAGEMANN et al. (2013) und STACKE & HAGEMANN (2012).

Die Analyse der Simulationsgenauigkeit des aggregierten Modellsystems erfolgt in zweierlei Hinsicht. Zum einen in Hinblick auf die Übereinstimmung der Referenzsimulation mit Vergleichsmessreihen, zum anderen durch eine Plausibilitätsabschätzung der Veränderungen zwischen Referenzsimulation und der szenariobasierter Simulation.

Durch erstere Methode soll abgeschätzt werden, wie genau die Ergebnisse einer Anwendung des Modellsystems die Realität abbilden. Hierfür wird für das Flusseinzugsgebiet eine Referenzsimulation des Wasserhaushaltes für einen Zeitraum durchgeführt, für den zusammenhängende Messreihen des Abflussvolumens am Hauptstrom vorliegen. Anhand eines Vergleichs der Messwerte mit den räumlich entsprechenden Simulationsergebnissen der Abflussbilanz des Hauptstroms kann die Genauigkeit der Simulationsergebnisse abgeschätzt werden. Die auftretenden Abweichungen sollten insbesondere auf eine mögliche Systematik untersucht werden. Tritt eine **systematische Abweichung** zwischen einer Simulations- und Messkurve über den gesamten Simulationszeitraum auf, so weist dies entweder auf eine systematische Ungenauigkeit der zugrunde liegenden Modelle oder Eingangsdaten hin oder lässt auf nicht berücksichtigte



systematische Einflussfaktoren schließen. Eindeutig identifizierte systematische Abweichungen können damit theoretisch aus den Ergebnissen der Referenzsimulationen heraus gerechnet werden, es verbleiben dann also nur die unsystematisch auftretenden Abweichungen. Die Ursachen **unsystematischer** bzw. **zufälliger Abweichungen** sind im Allgemeinen schwerer zu bestimmen und können ihre Ursache in fehlerhaften Eingangsdaten haben oder durch zeitweise auftretende Einflussfaktoren verursacht werden, die durch die Eingangsdatenbasis oder Modelle nicht hinreichend berücksichtigt werden.

Eindeutig identifizierte und näher bestimmte systematische Abweichungen – für die zugleich ausgeschlossen werden kann, dass ihr Abweichungsverhalten durch eine szenariobasierte Variation der Einflussfaktoren beeinflusst wird – werden in selber Höhe auch bei einer (ansonsten auf der Referenzsimulation beruhenden) szenariobasierten Simulation auftreten. Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Referenzsimulation mit denen der szenariobasierten Simulation, werden diese Abweichungen also von vornherein nicht ins Gewicht fallen. Eine über diesen Vergleich getroffene Abschätzung der szenariobasierten, tendenziellen Veränderungen des Abflussverhaltens innerhalb des Flusseinzugsgebiets wird davon also ebenso wenig beeinflusst werden. Die Genauigkeit der tendenziellen Abschätzung wird damit maßgeblich durch die Höhe und Häufigkeit der verbliebenen Abweichungen beeinflusst, deren Ursachen nicht bestimmt werden können. Abbildung 3-3 verdeutlicht das aggregierte Modellsystem und den Simulationsprozess in einer vereinfachten Darstellung.

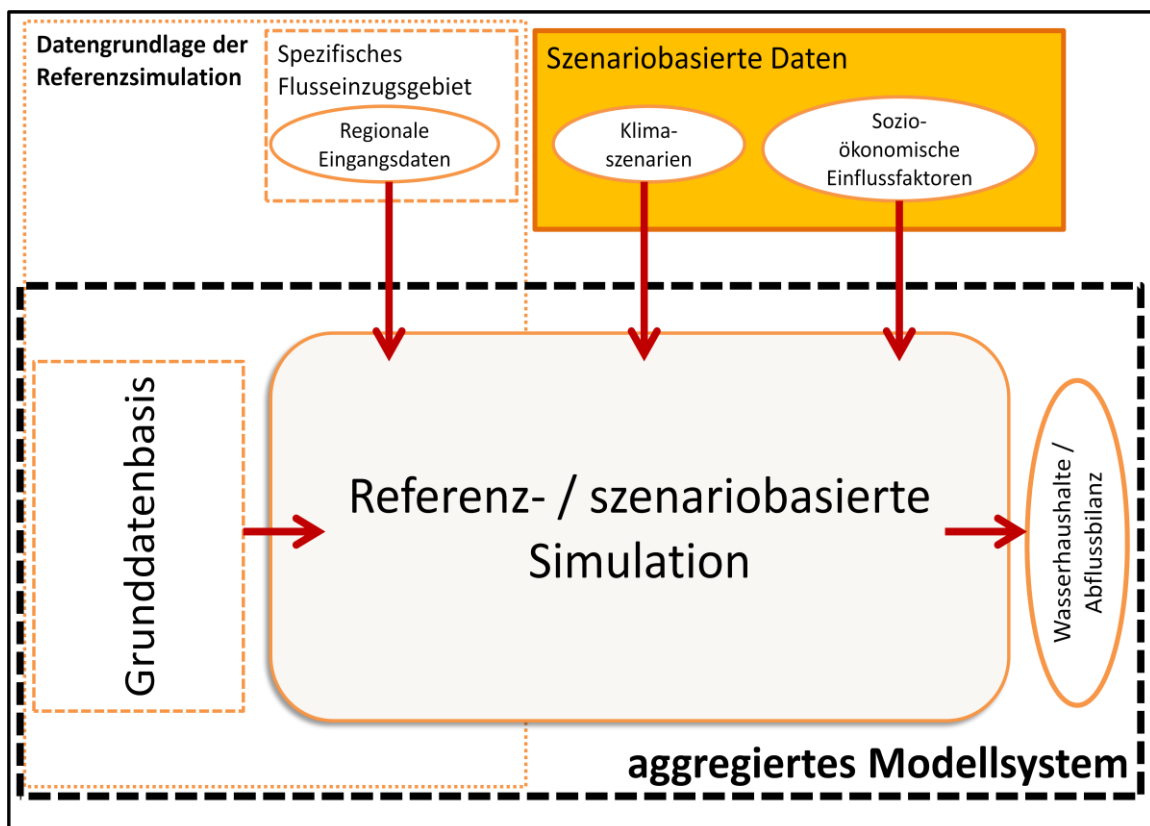


Abbildung 3-3 : Das aggregierte Modellsystem und der Simulationsprozess - schematische Darstellung 1.

### Rechnergestützte Umsetzung der Simulation

Die Simulation des Wasserhaushaltes in Form eines aggregierten Modellsystems ist ein komplexer und schrittweiser Prozess. Im Mittelpunkt der Simulation steht ein Abflussmodell, das die

hydrologischen Abflussprozesse simuliert und so die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers innerhalb des Einzugsgebietes steuert. Zum Teil bedürfen die Eingangsdaten und Modelle dabei vor jeder Simulation einer Anpassung (Auflösung, Georeferenzierung etc.) an das zu untersuchende Flusseinzugsgebiet. Den arbeitsintensivsten Teil bei der Entwicklung des aggregierten Modellsystems stellt die Anwendungsentwicklung dar. Nötig ist die Konzeption und programmatische Umsetzung einer Computeranwendung, die eine rechnergestützte Simulation gemäß den Zielvorgaben dieser Arbeit möglich macht. Diese Anwendung muss neben dem programmierten Abflussmodell auch Möglichkeiten zur Einbindung, Bearbeitung, Verschneidung und der Ansteuerung von Eingangsdaten bzw. Einflussfaktoren beinhalten, Analysemöglichkeiten bereitstellen sowie die geforderten Ergebnisse simulieren und in adäquater Form speichern.

Um den Anforderungen an eine einfache Handhabung sowie interdisziplinäre Anwendung gerecht zu werden (Forschungsfrage A, siehe Kapitel 1.4), gleichzeitig aber auch die programmatische Umsetzung des Abflussmodells mit den relevanten geophysikalischen und sozioökonomische Daten auf eine effiziente Art und Weise zu koppeln, wird als Anwendungsschnittstelle und Simulationsumgebung ein **Geographisches Informationssystem (GIS)** gewählt.

Ein GIS ist primär dafür konzipiert, raumbezogene Eingangsgrößen zu bearbeiten, zu verknüpfen und zu visualisieren. Ein GIS ist dabei prädestiniert, einzelne Datenkategorien in einer Schichtfolge (Layer) georeferenziert abzubilden. Auf diese Weise in Relation zueinander stehende Daten können über Funktionen algorithmisch verknüpft werden und zur Gewinnung neuer Informationen beitragen (Datenverschneidung). Hierfür stehen in einem GIS im Allgemeinen eine umfangreiche und nutzerspezifisch erweiterbare Anzahl geowissenschaftlicher Funktionen und Analysetools (Module) zur Verfügung. Auch für das aggregierte Modellsystem soll die Simulation der Abflussprozesse und der daraus resultierenden Wasserhaushalte deshalb in Form eines solchen speziell programmierten GIS-Moduls umgesetzt werden. Dieses GIS-Modul kann über die GIS-Benutzeroberfläche direkt angesteuert werden und auch auf die Datenschnittstelle und weitere Funktionen der GIS-Umgebung zugreifen. Die während dieser Arbeit als GIS-Modul programmierte Anwendung zur Simulation der Abflussprozesse innerhalb von Flusseinzugsgebieten wird von nun an als **RivFlow-Anwendung** bezeichnet und ist als das zentrale Element des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten anzusehen.

Im folgenden Abschnitt werden kurz die Grundlagen der Abflusssimulation vorgestellt, die in den folgenden Unterkapiteln dann vertieft und bei der Programmierung der *RivFlow*-Anwendung zusammengeführt werden.

Basis der Simulation von Abflussprozessen ist zum einen ein Abflussmodell und zum anderen eine Anzahl notwendiger topografischer, klimatischer und sozioökonomischer Antriebsdaten (Grunddatenbasis). Topographische Daten der Region des Flusseinzugsgebietes (Höhendatensatz) werden zu einem **Geländemodell (Digital Terrain Modell, DTM)** aufbereitet und bilden den rasterbasierten **Hauptdaten-Layer** der *RivFlow*-Anwendung (siehe Kapitel 3.2). Dieses *DTM*-Raster erlaubt eine Identifizierung des Flusseinzugsgebiets, eine Abgrenzung des Flusssystemes (Hauptgerinne) und eine Bestimmung des Hauptstroms. Die Auflösung der gesamten Abflusssimulation wird durch die Größe der Rasterzellen des *DTM*-Rasters festgelegt. Die Topographie des *DTM*-Rasters und die resultierenden Gradienten zwischen zwei Rasterzellen sind entscheidende Eingangsdaten des Abflussmodells und maßgeblich für die Bestimmung der zeitlichen Wasserabflussprozesse und die Ausbildung einer lateralen Abflussrichtung über die Landoberfläche (siehe Abschnitt 3.1.2.4). Die klimatischen Einflussfaktoren werden im Abflussmodell in

Form der (niederschlagsbedingten) vertikalen Wasserzuflüsse berücksichtigt, deren Datenwerte über ein Landoberflächen-Schema generiert werden. Dynamische geophysikalische und sozio-ökonomische Einflussfaktoren, die über die gesamte Fläche des Flusseinzugsgebietes mit dem Wasserabfluss im zeitlichen Verlauf der Simulation wechselwirken (z.B. flächenbasierte Entnahmen oder punktuelle Abflussmanipulationen in der Fläche), können in der *RivFlow*-Anwendung in Form flächenbasierter Eingangsdaten berücksichtigt oder aber direkt in den Simulationsablauf integriert werden. Die flächenbasierten Eingangsdaten (rasterbasierte Daten) müssen hierfür zunächst durch *Up-* bzw. *Downskalierung (Resampling)* an die Rasterauflösung des Hauptdaten-Layers angeglichen werden. Abbildung 3-4 zeigt eine erweiterte schematische Darstellung des aggregierten Modellsystems inklusive der GIS-Prozesse und der *RivFlow*-Anwendung.

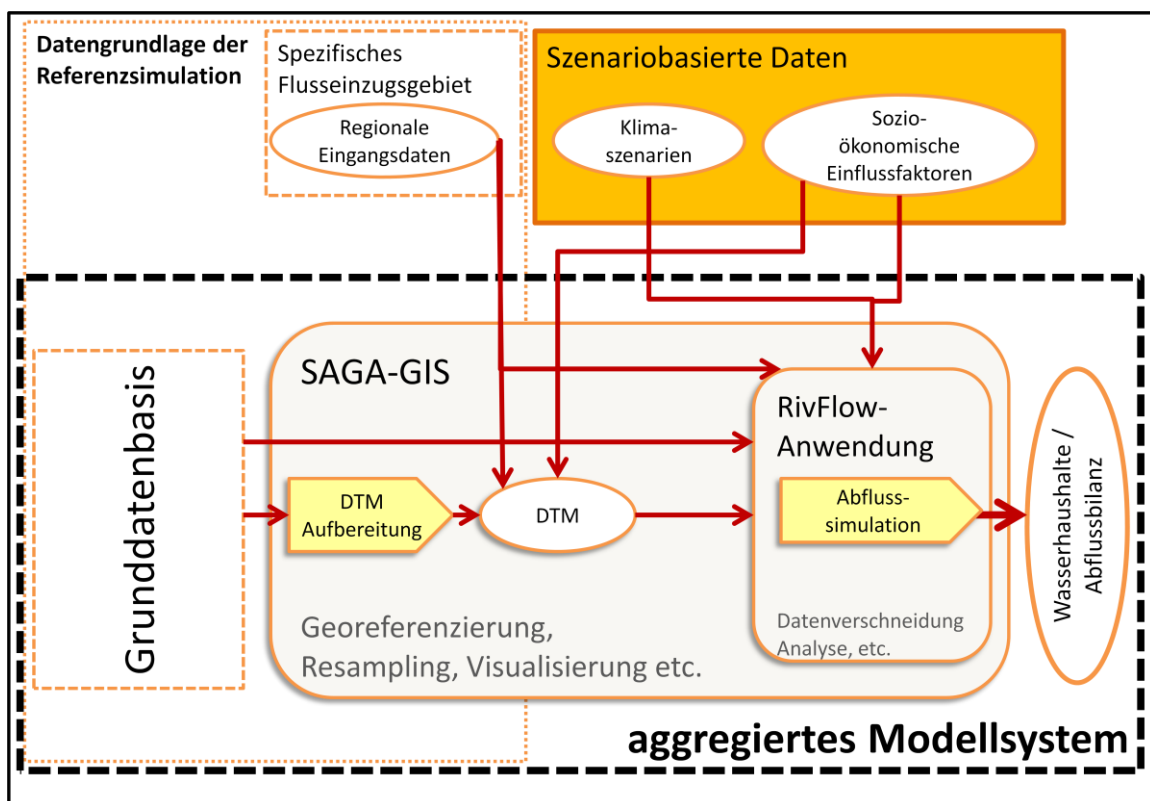


Abbildung 3-4 : Das aggregierte Modellsystem - schematische Darstellung 2

Das wesentliche Ergebnis des aggregierten Modellsystems ist die Abflussbilanz des Hauptstroms, die über die Simulation der Abflussprozesse und des daraus resultierenden gesamten lateralen Wasserhaushaltes, von der *RivFlow*-Anwendung ausgegeben wird. Sie besteht für den gesamten Simulationszeitraum aus den jeweiligen Angaben zum Abflussvolumen pro Flussabschnitt des Hauptstroms. Dieses Abflussvolumen ist das Resultat der räumlichen, dynamischen Wechselwirkungen aller geophysikalischen und sozioökonomischen Eingangsdaten über den gesamten zeitlichen Verlauf der Abflusssimulation. Auf dieser Basis kann eine Aussage zur resultierenden Wasserverfügbarkeit an den verschiedenen Flussabschnitten zu einem bestimmten Zeitpunkt der Simulation getroffen werden. Das Abflussvolumen ist dabei definiert als diejenige Menge Wasser in Kubikmetern, die pro Sekunde in einen Flussabschnitt hinein abfließt (Einheit:  $m^3/s$ ). Die Größe der Flussabschnitte wird durch die Auflösung des *DTM*-Rasters bestimmt und damit durch dessen Rasterzellengröße. Das Abflussvolumen wird von der *RivFlow*-Anwendung in Zeitschrittlängen berechnet, die von der Auflösung des *DTM*-Rasters und den maximalen Fließ-

geschwindigkeiten abhängen und in dieser Arbeit (5 km Auflösung) eine Dauer von 15 Min. (Elbe) bis 45 Min. (Nil) aufweisen. Die Ergebnisse der Abflussbilanz des Hauptstroms werden als gemittelte Tageswerte in  $m^3/s$  ausgegeben.

Sowohl die für die Entwicklung des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten herangezogenen Modelle und Daten als auch die zugrundeliegende GIS-Anwendung werden in Kapitel 3.1 detailliert beschrieben. Kapitel 3.2 beschäftigt sich anschließend mit der methodischen Aufbereitung von Höhendaten hin zu einem Geländemodell. Die Entwicklung und die Funktionen der *RivFlow*-Anwendung sind Gegenstand von Kapitel 3.3. Die Adaption des Abflussmodells an eine höhere Auflösung (Parametrisierung) wird in Kapitel 3.4 erläutert. Zur Übersicht siehe auch Abbildung 3-5.

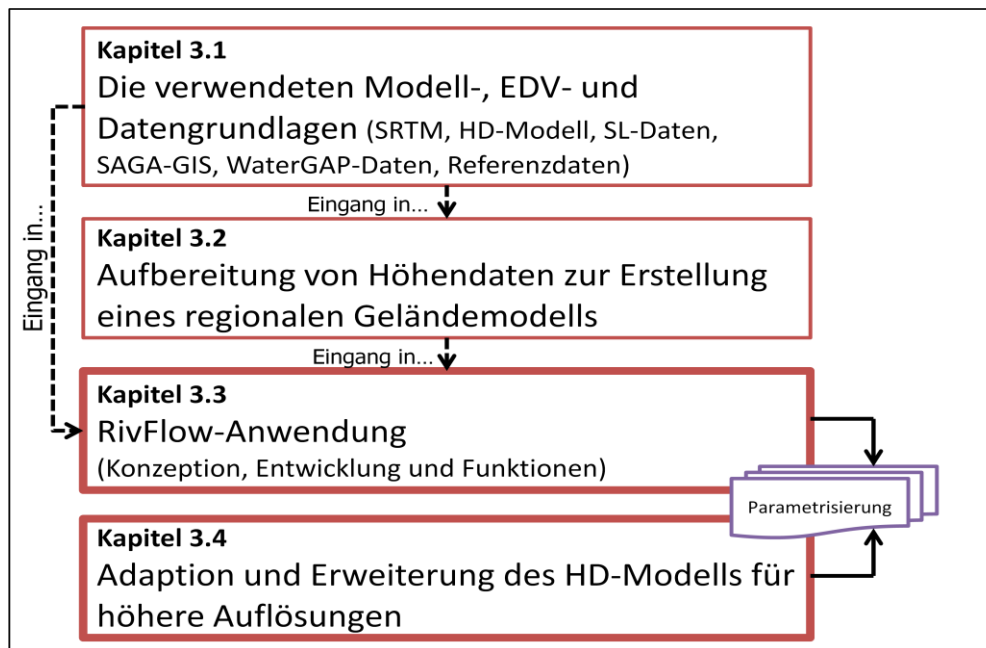


Abbildung 3-5 : Grundlagen des aggregierten Modellsystems und Struktur des Kapitels 3.

### 3.1 Modelle, EDV- und Datengrundlage

Die Prozesse und Einflüsse, die für den Wasserabfluss und die Wasserverfügbarkeit innerhalb eines Flusseinzugsgebiets eine dominante Rolle spielen, müssen in relevante geophysikalische Prozesse und sozioökonomischen Einflussfaktoren unterschieden werden.

#### Geophysikalische Prozesse

Unter den geophysikalischen Prozessen werden all diejenigen Vorgänge verstanden, die für sich genommen den Wasserkreislauf natürlich beeinflussen und bestimmen (u.a. Niederschlag, Verdunstung, Versickerung, Wasserabfluss). Zentraler Gegenstand der Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten ist die Modellierung des Wasserabflusses über die Landoberfläche und die hieraus resultierenden Flussnetzwerke und transportierten Wasservolumina. Dieser geophysikalische Prozess wird unter Verwendung eines hydrologischen Abflussmodells simuliert (siehe Abschnitt 3.1.2.4). Grundlagen für die meisten Abflussmodelle sind zum einen ein Geländemodell und zum anderen klimatische Daten (Niederschlag, Temperatur, etc.), deren Wechselwirkung mit den Landoberflächencharakteristika durch ein Landoberflächen-Schema (siehe Abschnitt 3.1.2.3) bestimmt wird.

Zur Erstellung bzw. Aufbereitung eines Geländemodells (siehe Kapitel 3.2) werden im Rahmen dieser Arbeit *SRTM*-Datensätze herangezogen (siehe Abschnitt 3.1.2.1), die für nahezu die gesamte Erdoberfläche verfügbar sind (ausgenommen sind Teile der Polarregionen). Als klimatische Datengrundlage der Simulationen des Landoberflächen-Schemas dienen Niederschlags- und Temperaturwerte des EU-Projektes *WATCH*, die für die globale Skala und einen Zeitraum von 1958 bis 2012 vorliegen (siehe Abschnitt 3.1.2.2). In Bezug auf die geophysikalischen Abflussprozesse kann damit auf eine für die globale Skala einheitlich vorliegende Datengrundlage zurückgegriffen werden, was die Evaluierung der Ergebnisse und die einheitliche, methodische Anwendung auf verschiedene Regionen erleichtert und daher einen Teil der **Grunddatenbasis** des aggregierten Modellsystems bildet.

#### Sozioökonomische Prozesse

Im Gegensatz zu den geophysikalischen Prozessen werden die sozioökonomischen Einflussfaktoren durch menschliche Einflüsse hervorgerufen und stellen einen künstlichen Eingriff dar, der die geophysikalischen Prozesse direkt oder indirekt beeinflusst bzw. mit diesen rückkoppelt (u.a. Wasserentnahmen /-einleitungen, Wasserbaumaßnahmen und Veränderungen an der Landoberfläche, die das Abflussverhalten beeinflussen etc.). Eine eigene Erhebung oder Modellierung von sozioökonomischen Einflüssen findet im Rahmen dieser Arbeit nicht statt. Zur rudimentären, einheitlichen Berücksichtigung sozioökonomischer Einflüsse auf regionale Wasserhaushalte wird im Rahmen der Abflusssimulation der *RivFlow*-Anwendung ein flächenbasierter Datensatz zu den weltweiten Wasserentnahmen verwendet (siehe Unterkapitel 3.1.3). Weitere sozioökonomische Daten und Einflussfaktoren, die zu einer erheblichen Verbesserung der Simulationsergebnisse führen können, sind vom Anwender flusseinzugsgebietspezifisch zu erheben und bei der methodischen Anwendung entsprechend zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 4.1).

In den folgenden Unterkapiteln wird das verwendete Geographische Informationssystem *SAGA* vorgestellt (Unterkapitel 3.1.1) und die geophysikalischen und sozioökonomischen Modell- und

Datengrundlagen des aggregierten Modellsystems detailliert beschrieben (Unterkapitel 3.1.2 und 3.1.3).

### 3.1.1 Geographisches Informationssystem – SAGA GIS

Geographische Informationssysteme (GIS) dienen der Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation (EVAP) von raumbezogenen Daten (Geodaten), siehe u.a. DE LANGE (2013). Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen zwei Datentypen: rasterbasierte und vektorbasierte Geodaten. Bei Rasterdatensätzen (engl.: *Grids*) handelt es sich um flächenbasierte, georeferenzierte Daten, deren räumliche Auflösung durch die Größe der zugrundeliegenden Rasterzellen (engl.: *Grid Boxes*) bestimmt werden (z.B. Klimadaten, Flächennutzungsdaten, Bevölkerungsdichten etc.). Vektordaten sind hingegen diskrete Geobjekte, bei denen es sich im einfachsten Fall um einzelne Punkte handelt, die durch einen Ortsvektor repräsentiert werden. Durch eine Verkettung solcher Ortsvektoren können linien- oder flächenhafte Objekte abgebildet werden (z.B. Grenzverlauf, Gewässerumrisse etc.). Hybride GIS stellen Bearbeitungsfunktionen sowohl in Hinblick auf die Datengrundlage als auch zu Zwecken der optischen und geographischen Darstellung für beide Datenformate bereit und ermöglichen die wechselseitige Konvertierung der Datentypen. Ein besonderer Vorteil von GIS liegt aber insbesondere darin, dass sowohl geographische, geophysikalische als auch sozioökonomische Daten einander gegenübergestellt und visualisiert werden können. Auf diese Weise ist es möglich, Zusammenhänge zwischen den Daten optisch sichtbar zu machen und darüber hinaus neue Informationen durch die (z.B. funktionale) Verschneidung von Daten zu generieren. Für eine detaillierte Beschreibung der Möglichkeiten von GIS und der zugrundeliegenden Arbeitsweise siehe z.B. LONGLEY et al. (2011) und HENNERMANN (2006). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die grundlegenden geographischen Methoden (z.B. Koordinatenprojektionen) und Begrifflichkeiten (z.B. Rasterdaten, Vektordaten etc.) im Rahmen dieser Arbeit nicht immer gesondert erklärt werden können; für weitere Informationen zu den geographischen Grundlagen sei deshalb u.a. auch auf LONGLEY et al. (2011) verwiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde entschieden das Geographische Informationssystem SAGA GIS zu verwenden (CONRAD 2006). Mit dem Programm SAGA GIS wird Geowissenschaftlern ein effektives sowie leicht zu bedienendes Werkzeug zur Implementierung und Bereitstellung geowissenschaftlicher Methoden an die Hand gegeben. Der Schwerpunkt von SAGA liegt auf der Bearbeitung von Rasterdaten, beinhaltet aber auch zahlreiche Methoden und Funktionen für Vektordaten, sodass sowohl raster- als auch vektorbezogene räumliche Analysen unterstützt werden (CIMMERY 2010a). Bei SAGA handelt es sich um eine in C/C++ geschriebene *Free Open Source Software* (FOSS), die frei verwendet, weiterentwickelt und weiterverbreitet werden darf. Der besondere Vorteil liegt in der freien Zugänglichkeit des Quellcodes, die eine Anpassung und Erweiterung des Programmes an die eigenen Bedürfnisse erlaubt. Die Entwicklung von SAGA GIS wird durch die *SAGA User Group Association* betreut und maßgeblich durch die Abteilung Physische Geographie der Universität Hamburg vorangetrieben.<sup>7</sup> SAGA GIS kann im Internet kostenlos heruntergeladen werden.<sup>8</sup> Ausschlaggebend für die Verwendung von SAGA GIS war neben der guten Bedienbarkeit und der freien Verfügbarkeit des Quellcodes die Bereitschaft eines Teils

---

<sup>7</sup> Die Webseite der Abteilung Physische Geographie der Universität Hamburg ist erreichbar unter: <http://www.geo.uni-hamburg.de/geographie/abteilungen/physische-geographie.html> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>8</sup> SAGA GIS Software, Download unter: <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

des SAGA GIS-Entwicklerteams an der Universität Hamburg, die GIS-Modulprogrammierung dieser Arbeit durch einen intensiven fachlichen Austausch zu unterstützen.

### 3.1.2 Naturwissenschaftliche Datenbasis / Modelle

Die für die Abflusssimulation nötige topographische und klimatische Datengrundlage, die zugrunde liegenden Modelle (hydrologisches Abflussmodell und Landoberflächen-Schema) und die verwendeten geophysikalischen Referenzdaten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### 3.1.2.1 Globale Höhendatensätze – SRTM

Im Rahmen der *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* startete das Space Shuttle *Endeavour* im Februar 2000 zu einer 11-tägigen Fernerkundungsmission in den Weltraum. Ziel dieser Mission war die Erfassung des Höhenprofils der Erdoberfläche. Mit den durch diese Mission gewonnenen Daten lag erstmals ein weltweiter Datensatz einheitlicher Qualität mit einer Höhengenaugigkeit von  $\pm$  zehn Metern vor, anhand dessen präzise digitale Höhenmodelle der Erdoberfläche (**Digital Elevation Modell, DEM**) berechnet werden konnten.<sup>9</sup> Das Überfluggebiet der *Endeavour* erlaubte eine globale Abdeckung zwischen 56 Grad Süd und 60 Grad Nord, was ca. 80 % der Erdoberfläche entspricht – die Pole nicht eingeschlossen. Die Höhendaten der Erdoberfläche wurden durch das sogenannte *Single-Pass*-Verfahren erhoben, bei dem sich eine Sende- und Empfangseinheit im Laderaum des Space Shuttles und eine zusätzliche Empfangseinheit an einem 60 Meter langen Auslegermast befanden. Die durch beide Empfangssensoren so gleichzeitig erfolgte, aber räumlich versetzte Beobachtung eines von der Erdoberfläche reflektierten Radarimpulses ermöglichte über die erhobenen Daten die Berechnung eines dreidimensionalen digitalen Höhenmodells. Für eine ausführliche Beschreibung der *SRTM*-Mission sowie der Datengewinnung und -verarbeitung, siehe FARR (2007).

Einer der wesentlichen Schritte hin zu einem *DEM* ist die Aufbereitung der *SRTM*-Daten und die Interpolation von messbedingten Datenartefakten und *No-data*-Bereichen mit Hilfe von Algorithmen und sekundären (Hilfs-)*DEMs*. In Hinsicht auf die *SRTM*-Daten wurde diese Aufbereitung u.a. durch das *Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)*<sup>10</sup> durchgeführt, das im Internet eine vierte überarbeitete Version der *SRTM 90m Digital Elevation Data* zum kostenlosen Download bereitstellt und darüber hinaus auch auf Datensätze verweist, die mittels Resampling auf eine geringere Auflösung herunter skaliert wurden.<sup>11</sup> In Kapitel 3.2 wird anhand der *DEM*-Daten der *CGIAR-CSI* die weitere, flusseinzugsgebietsspezifische Aufbereitung dieser Daten zu einem Geländemodell (**Digital Terrain Modell, DTM**) beschrieben, das den Anforderungen an die Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten genügt.

---

<sup>9</sup> Für weitere Informationen siehe die SRTM Projektseite der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt: [http://www.dlr.de/caf/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214\\_read-17716/](http://www.dlr.de/caf/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716/) (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>10</sup> Webpräsenz der CGIAR-CSI: <http://www.cgiar-csi.org/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>11</sup> Download Seite der CGIAR-CSI SRTM Daten unter: <http://srtm.csi.cgiar.org> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

### 3.1.2.2 Globale Klimadatenätze – EU WATCH-Forcing Daten

Die der Grunddatenbasis dieser Arbeit zugrunde liegenden Klimadaten basieren auf Ergebnissen des EU-Projektes *WATCH (Integrated Project Water and Global Change)*. Beim *WATCH*-Projekt handelt es sich um ein durch die EU im Zeitraum von 2007 bis 2011 finanziertes Forschungsprogramm, das ein besseres Verständnis des derzeitigen und des zukünftigen globalen Wasserkreislaufs zum Ziel hatte.<sup>12</sup>

Im Rahmen des *WATCH*-Projektes wurden zudem aufbereitete und korrigierte globale Klimadatenätze der jüngeren Vergangenheit erzeugt – sogenannte *Driving-* oder *Forcing-Daten* –, die als Referenzeingangsdaten geophysikalische Modelle antreiben und helfen sollen, diese zu validieren. Hierbei handelt es sich um die Datensätze *WFD (WATCH Forcing Data)* von 1958 bis 2001 und *WFDEI (WATCH Forcing Data based on ERA-Interim)* von 1979 bis 2012. Von eigentlichem Interesse für diese Arbeit sind vor allem die darin enthaltenen Daten zu Temperatur und Niederschlagsmengen, die in einem rasterbasierten Datenformat mit einer Auflösung von 0,5 Grad vorliegen und die Eingangsdaten des vereinfachten Landoberflächen-Schemas des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (siehe Abschnitt 3.1.2.3) darstellen, anhand dessen die für das Abflussmodell eigentlich benötigten Eingangsdaten **Surface Runoff** und **Drainage** generiert werden.

### 3.1.2.3 Globales Landoberflächen-Schema

Die für die Abflusssimulation benötigten Eingangsdaten *Surface Runoff* und *Drainage* (zusammen als **Runoff** bezeichnet) werden mit dem *Simplified Land Surface (SL)-Schema* berechnet, einem vereinfachten Modell des hydrologischen Kreislaufs der Landoberfläche (HAGEMANN & GATES 2003: 354). Die Generierung von *Surface Runoff* und *Drainage* wird in der Hydrologie als Abflussbildung bezeichnet. Das *SL*-Schema basiert zum einen auf täglichen Inputwerten für Niederschlag und Temperatur, zum anderen auf den spezifischen, ortsabhängigen Landoberflächencharakteristika und verschiedenen Algorithmen, die die Wechselwirkung von Niederschlag, Temperatur und Landoberfläche beschreiben. Als Ergebnis erhält man in Tageszeitschritten die anteiligen *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Werte mit einer horizontalen Auflösung, die der Auflösung der Inputwerte Niederschlag und Temperatur entspricht. Abbildung 3.1-1 zeigt die Ablauffolge der Generierung von *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten mit Hilfe des *SL*-Schemas.

Der Inputwert Niederschlag kann dabei sowohl in Form von Regen als auch Schnee auftreten. Flüssiges Wasser – das für die Abflussprozesse von eigentlichem Interesse ist – kann die Landoberfläche also direkt als Regen oder zeitverzögert als Schmelzwasser erreichen (im Folgenden als *gesamter vertikaler Wasserzufluss* bezeichnet).

Die eigentliche Landoberfläche wird durch eine Bodenschicht mit jeweils ortsabhängigen Charakteristika beschrieben. Diese Bodeneigenschaften finden ihren Ausdruck vor allem im globalen *Land Surface Parameter (LSP) Datensatz*, welcher in einer 1-km-Auflösung vorliegt (HAGEMANN 2002). Der hierin enthaltene Parameter *Soil Water Capacity* beschreibt denjenigen Wasseranteil eines gesättigten Bodens, der über die dort vorherrschenden Kapillarkräfte längerfristig gespeichert werden kann. Er ist ein wesentlicher Faktor bei der Berechnung der aus dem gesamten vertikalen Wasserzufluss hervorgehenden Wasseranteile auf der Landoberfläche: der Bodeninfiltration, des *Surface Runoffs*, der *Drainage* sowie der Evapotranspiration (Verdunstung) (Hagemann & Gates 2003: 350).

---

<sup>12</sup> Webseite des EU Projektes WATCH: <http://www.eu-watch.org/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).



Diese Berechnungen erfolgen im *SL*-Schema im Wesentlichen mit Hilfe des *Arno-Schemas* (DÜMENIL & TODINI 1992) bzw. *Improved-Arno-Schemas* (IA) (HAGEMANN & GATES 2003). Der zeitliche Anteil des *Surface Runoffs* und der *Drainage* ist dabei abhängig vom Volumen des vertikalen Wasserzuflusses, der jeweiligen Bodensättigung und der *Soil Water Capacity* (bevor *Runoff* erfolgen kann, ist zunächst eine „gewisse“ Sättigung des Bodens nötig) sowie von der örtlichen Topographie (bestimmend dafür, ab wann der *Runoff* einsetzt).

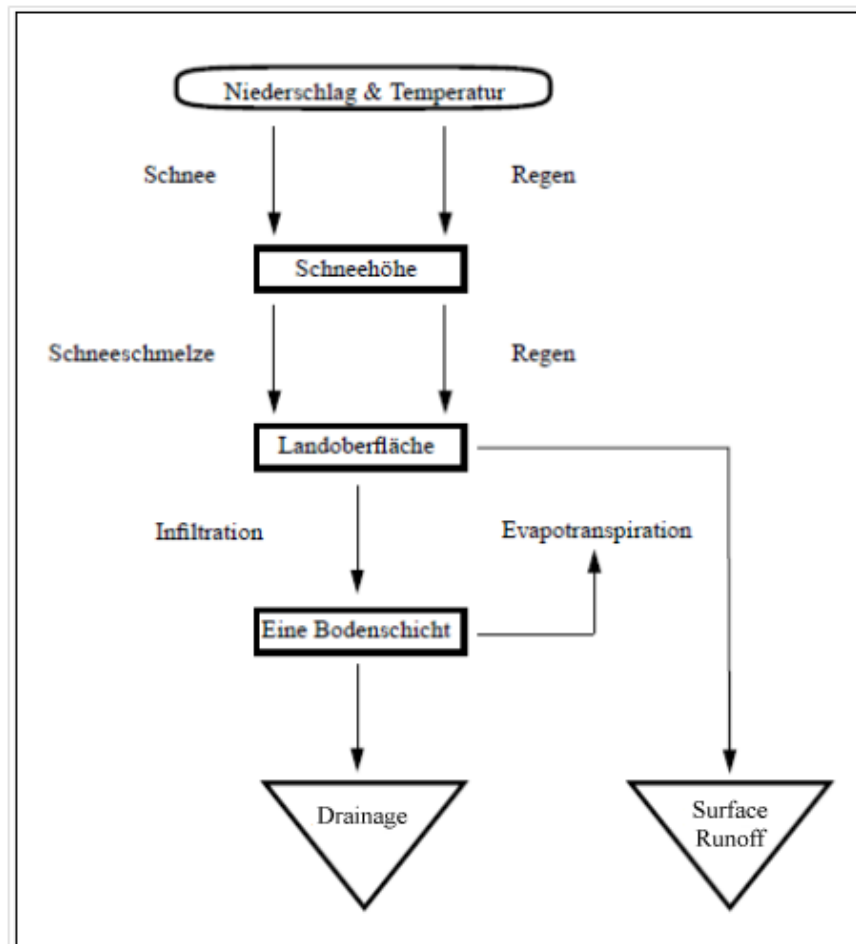


Abbildung 3.1-1 : Darstellung des *SL*-Schemas nach HAGEMANN (1997).

Problematisch kann sich die Berechnung der *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten aber insbesondere für solche Oberflächen gestalten, die einen großen Anteil an Feuchtgebieten oder Oberflächengewässern aufweisen. Für solche Gebiete wurde als eine Modellerweiterung u.a. das *Dynamical Wetlands Extent Scheme* (*DWES*)<sup>13</sup> entwickelt, siehe hierzu STACKE & HAGEMANN (2012).

Die *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten, die in dieser Arbeit einen Teil der Grunddatenbasis darstellen, wurden vom MPI für Meteorologie für die Jahre 1979 bis 2012 bereitgestellt und sind über das *SL*-Schema auf Basis von *WATCH-Forcing*-Daten (WFDEI in einer Auflösung von 0,5 Grad) generiert worden. Die Evapotranspiration wurde nach der Penman-Monteith-Formel berechnet. (Quelle der *Surface Runoff*- und *Drainage*-Daten: MPI-HM\_00082 Datensatz).

Die aus den *WATCH-Forcing*-Daten resultierenden *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten sind eine entscheidende Grundlage der Referenzsimulationen dieser Arbeit. Aber auch für szenario-

<sup>13</sup> Anmerkung: Inzwischen umbenannt in *Wetland Extent Dynamics* (*WEED*).

basierte Simulationen, in denen nur sozioökonomische Einflussfaktoren variiert werden und/oder Klimadaten ausschließlich systematisch verändert werden (gleiche Änderungsbedingungen für alle Rasterzellen des Datensatzes, wie z.B. 10 % weniger Niederschlag im gesamten Flusseinzugsgebiet), kann auf diese, den *WATCH*-Daten zugrundeliegenden, *Surface Runoff*- und *Drainage*-Daten zurückgegriffen werden.

Es können aber natürlich auch andere rasterbasierte Klimadaten als Eingangsdaten für das Landoberflächen-Schema verwendet und auf deren Basis die *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten generiert werden. Dieses bietet sich insbesondere bei einer Simulation innerhalb von Regionen an, für die präzisere oder höheraufgelöste Klimadaten zur Verfügung stehen. Vor allem aber bei der Simulation dynamischer Klimaszenarien sind *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten zu verwenden, die anhand szenariobasierter Klimadaten generiert werden. Die räumlichen und zeitlichen Klimadaten eines spezifischen Klimaszenarios können über Klimamodelle wie z.B. das MPI-ESM (ein gekoppeltes Land-Atmosphären-Klimamodell) des MPI für Meteorologie erstellt werden.<sup>14</sup>

### 3.1.2.4 Hydrologische Abflussmodelle

Hydrologische Abflussmodelle dienen zur Berechnung des horizontalen Wasserabflusses über die Landoberfläche. Im Rahmen der Klimaforschung wurde eine Reihe von Abflussmodellen entwickelt, die bisher alle eine Auflösung im relativ groben 0,5 Grad bis 2,5 Grad Bereich aufweisen, so aber auf Basis weltweit vorliegender Eingangsdaten eine Abbildung der Abflussprozesse auf der gesamten globalen Skala erlauben. Eine Auflistung und ein Vergleich von globalen Abflussmodellen finden sich u.a. bei HAGEMANN (1997: 9).

Wo es sich bei den gebräuchlichen Abflussmodellen bisher vor allem um Einparameter-Modelle handelte, die entweder die Translation oder aber die Retention der lateralen Wasserabflussprozesse mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit simulieren, liegen mittlerweile auch Abflussmodelle vor, die die Translations- und Retentionsmechanismen von Abflussprozessen gleichermaßen berücksichtigen (hierzu zählt u.a. das *Hydrological Discharge*-Modell).

#### ***Hydrological Discharge-Modell***

Das *Hydrological Discharge (HD)*-Modell wurde Ende der 1990er Jahre am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit dem ursprünglichen Ziel entwickelt, die globalen lateralen Wasserflüsse auf der Landoberfläche genauer zu simulieren und so die jeweiligen Frischwasserzuflüsse in die Ozeane – welche mittelbar einen klimatischen Einflussfaktor darstellen und deshalb in globalen Klimamodellen zu berücksichtigen sind – präziser bestimmen zu können.<sup>15</sup> Als Ergebnis der Untersuchung und des Vergleichs der bis dato gebräuchlichen Modellstrukturen stellt es eine Kombination verschiedener Modellansätze dar (HAGEMANN 1997: 16ff.). Das *HD*-Modell beschreibt einen Abflussprozess über einen Zweiparameteransatz, der sowohl die Translation als auch die Retention des Abflussprozesses als eine Funktion der vertikalen Zuflüsse und der Topographie der Landoberfläche simulieren kann. Das *HD*-Modell betrachtet die unterschiedlichen lateralen Abflussprozesse dabei separat und beschreibt diese jeweils in Form eines oder mehrerer Speicher. Die globale Parametrisierung des *HD*-Modells erfolgte für eine Auflösung von 0,5 Grad, was einer Rasterzellengröße von etwa 50 x 50 km entspricht. Das *HD*-Modell

---

<sup>14</sup> Zum MPI-ESM Modell siehe: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mp-ism.html> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>15</sup> Der Beschreibung des *HD*-Modells in diesem Abschnitt liegt als wesentliche Literaturquelle HAGEMANN (1997) zugrunde.

wurde für die Simulation der Abflussprozesse auf der globalen Skala validiert und Modellvergleiche zeigten, dass das *HD*-Modell mit seinem Zweiparameteransatz und der Unterscheidung verschiedener Abflussprozesse bessere Simulationsergebnisse als die bis dato verwendeten Abflussmodelle lieferte (HAGEMANN 1997: 109ff). Beim *HD*-Modell handelt es sich nach wie vor um eines der „state of the art“-Modelle für die globale Abflusssimulation, weshalb es im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt und an eine höhere Auflösung adaptiert wurde. Ziel ist es, auf diese Weise zu einem hydrologischen Abflussmodell mittlerer Komplexität (siehe Kapitel 1.3) zu gelangen, mit dem der Wasserabfluss von Flusseinzugsgebieten auf der regionalen Skala hinreichend genau simuliert werden kann.

#### *Eingangsgrößen des Modells*

Bei den Eingangsgrößen des *HD*-Modells muss zwischen den zeitlich variablen Klimadaten, den statischen Geländeeigenschaften und den Parametrisierungswerten unterschieden werden. Sowohl die Klimadaten als auch die Geländeeigenschaften müssen jeweils als Rasterdatensatz derselben Auflösung und Georeferenz vorliegen bzw. entsprechend angepasst werden.

Das sich zeitlich ändernde Klimageschehen findet über die Klimadaten *Surface Runoff* und *Drainage* seinen Eingang ins *HD*-Modell. Ihre ortsabhängigen Werte werden anhand von Klimadaten über ein Landoberflächen-Schema generiert (siehe Abschnitt 3.1.2.3). Die Werte von *Surface Runoff* und *Drainage* entsprechen dabei den wasserabflussrelevanten Anteilen des Niederschlags, die über die Landoberfläche (*Surface Runoff*) und in den oberen Bodenschichten (*Drainage*) abfließen. Die Geländeeigenschaften finden ihren Ausdruck in den Höhengradienten, die einem aufbereiteten Geländemodell (*DTM*-Raster) des zu untersuchenden Flusseinzugsgebietes (siehe Kapitel 3.2) entnommen werden und die maßgebliche Berechnungsgrundlage des *HD*-Modells bilden.

Die Parametrisierungswerte des *HD*-Modells wurden ursprünglich für Rasterzellen mit einer Auflösung von 0,5 Grad bestimmt. Für abweichende Rasterauflösungen müssen diese Werte über eine Parametrisierung neu bestimmt werden (siehe Kapitel 3.4).

#### *Die Modellstruktur und eine globale Parametrisierung für die 0,5-Grad-Auflösung*

Das *HD*-Modell ist ein rasterbasiertes Modell, mit dessen Hilfe laterale Abflussprozesse simuliert werden können. Für jede Rasterzelle berechnet es den seitlichen (horizontalen) Wasserabfluss in die am niedrigsten gelegene Nachbarzelle (D8-Abflussschema). Dieser Abfluss setzt sich aus drei verschiedenen lateralen Abflussprozessen zusammen: dem **Gerinneabfluss** (*Channel Flow*), dem **Oberflächenabfluss** (*Overland Flow*) und dem **Grundwasserabfluss** (*Base Flow*). Innerhalb der Fläche einer Rasterzelle wird jeder dieser Abflussprozesse durch einen oder mehrere identische, lineare Speicher repräsentiert (HAGEMANN 1997: 22ff.). Jeden dieser Speicher zeichnet eine spezifische Verweildauer aus, welche als die Verzögerungszeit zwischen dem Schwerpunkt eines Zuflusses und dem Schwerpunkt dessen Abflusses definiert ist. Diese Verzögerungszeit wird als Lagtime  $\tau$  bezeichnet. Die Lagtime  $\tau$  hängt mit der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v$  in der Form

$$(1) \quad v = \frac{dx}{\tau}$$

zusammen. Die Summe der Oberflächen-, Grundwasser- und Gerinneabflüsse je Zeitschritt stellt den gesamten lateralen Rasterzellen-Abfluss bzw. einen horizontalen Zufluss in die niedrigste Nachbarzelle für diesen Zeitraum dar.

Gespeist werden die Speicher des Oberflächenabflusses und des Grundwasserabflusses durch jeweils einen spezifischen vertikalen Zufluss: Der Oberflächenabfluss durch den *Surface Runoff* und der Grundwasserabfluss durch die *Drainage*. Der Speicher des Gerinneabflusses erhält einen horizontalen Zufluss, der sich über die Summe aller Abflüsse bildet, die aus Nachbarzellen in besagte Rasterzelle fließen. Abbildung 3.1-2 skizziert die Struktur des gesamten lateralen Wasserabflussprozesses im *HD-Modell*.

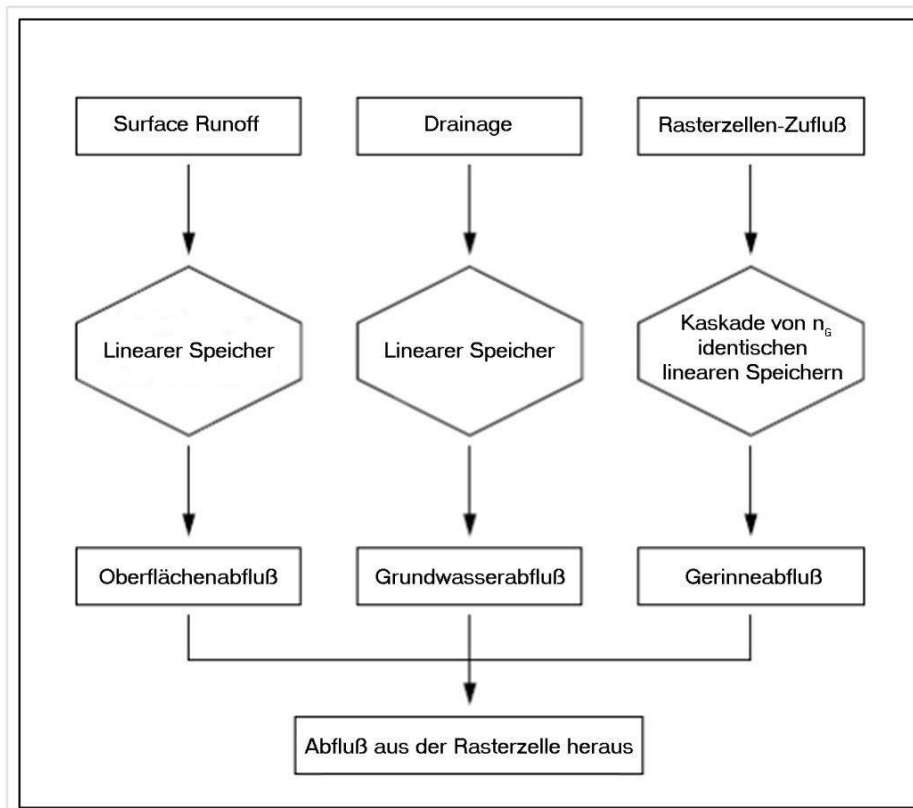


Abbildung 3.1-2 : Modellstruktur des lateralen Wasserabflussprozesses im *HD-Modell*, nach HAGEMANN (1997).

Die spezifische Verzögerungszeit  $\tau$  (Lagtime) des Wassers für jeden der drei Abflussspeicher einer Rasterzelle bestimmt die zeitliche Verzögerung des jeweiligen Abflussprozesses und damit auch den volumenanteiligen Speicherabfluss je Zeitschritt. Der Zweiparameteransatz des *HD-Modells* ermöglicht darüber hinaus die Retention und die Translation eines Abflussprozesses gleichermaßen zu berücksichtigen. Hierfür wird für den Gerinneabfluss nicht nur ein einziger linearer Speicher angesetzt, sondern der Speicher durch eine Kaskade von  $n$  identischen linearen Speichern repräsentiert. Jeder dieser  $n$  Speicher hat die gleiche Retentionszeit, die durch den Retentionskoeffizienten  $k$  bestimmt wird (HAGEMANN 1997: 32). Für die Lagtime  $\tau$  einer Rasterzelle mit einer Kaskade  $n$  identischer linearer Speicher gilt:

$$(2) \quad \tau = n \cdot k$$

Der Oberflächenabfluss wird nur durch einen linearen Speicher  $n_O = 1$ , der Gerinneabfluss durch eine Speicherkaskade von  $n_G = 5$  repräsentiert. Die Berechnung der Retentionskoeffizienten  $k_O$  (Oberflächenabfluss) und  $k_G$  (Gerinneabfluss) erfolgt im *HD-Modell* nach HAGEMANN (1997) über

$$(3) \quad \tau_i = n_i \cdot k_i = \frac{c_i \cdot dx}{\left(2 \cdot \left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}\right)} \cdot \frac{[d]}{[km]}, \quad i \in \{O, G\}$$

zu

$$(4) \quad k_i = \frac{c_i}{(n_i \cdot 2)} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}} \cdot \frac{[d]}{[km]} = p_i \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}} \cdot \frac{[d]}{[km]}, \quad i \in \{O, G\}$$

wobei  $c_i$  bzw.  $p_i$  die dimensionslosen Modellparameter sind,  $dx$  den Gitterboxdurchmesser in Kilometern darstellt, es sich bei  $[d]/[km]$  um die Einheit Tage pro Kilometer handelt und  $dh/dx$  den Höhengradient bezüglich der niedrigsten Nachbar-Gitterbox angibt. Die Retentionskoeffizienten haben die Einheit Tage  $[d]$ .

Der Grundwasserabfluss wird im *HD*-Modell anhand eines einzelnen linearen Speichers dargestellt. Die Speicherverweildauer  $k_B$  ergibt sich zu

$$(5) \quad k_B = t_B \cdot \frac{dx}{dx_p}, \quad \text{mit } dx_p = 50 \text{ km}$$

Die Besonderheit des Grundwasserabflussansatzes des *HD*-Modells liegt in der Ortsunabhängigkeit (der Topographiegradient wird bei der Berechnung nicht berücksichtigt). Als Parametrisierung für die 0,5-Grad-Auflösung wurde eine für alle Gitterboxen global einheitlich gültige Konstante von  $t_B = 300$  Tagen gewählt. Über die explizite Einbeziehung der 0,5-Grad-Parametrisierungsauflösung in die Formel (d.h. des Gitterboxdurchmessers  $dx_p$  in 0,5 Grad-Auflösung) erhält die Formel des linearen Speichers einen auflösungsunabhängigen Charakter und kann ohne erneute Parametrisierung so auch für andere Auflösungen verwendet werden (HAGEMANN 1997: 41).

Die ursprüngliche Parametrisierung des *HD*-Modells wurde nach HAGEMANN (1997) für eine Auflösung von 0,5 Grad durchgeführt. Die optimalen Modellparameterwerte ( $c_O$ ,  $c_G$ ) und die Anzahl  $n_G$  der linearen Speicher der Gerinnespeicherkaskade wurden dabei iterativ über die Berechnung der Retentionskoeffizienten ( $k_O$ ,  $k_G$ ) und einer darauf beruhenden manuellen Optimierung der resultierenden zeitlichen Abflussvolumen bestimmt (HAGEMANN 1997: 40ff.). Beim Oberflächenabfluss stellte sich in der 0,5-Grad-Auflösung heraus, dass bessere Ergebnisse zu erzielen sind, wenn man den Höhengradient  $dh/dx$  zur Nachbarzelle durch das mittlere Gefälle  $\varphi$  innerhalb der betreffenden Rasterzelle ersetzt (HAGEMANN 1997: 38).

Für eine 0,5-Grad-Auflösung gelangte HAGEMANN (1997) zu folgenden Parametrisierungswerten und daraus resultierenden Formeln für die Berechnung der Retentionskoeffizienten des optimierten Oberflächen- und Gerinneabflusses:

**Oberflächenabfluss:**

$$p_O = 17,87 \cdot 10^{-2}, \quad c_O = 35,74 \cdot 10^{-2},$$

mit diesen Parametrisierungswerten ergibt sich Formel (4) für den Oberflächenabfluss zu:

$$(6) \quad k_O = 17,87 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{(\varphi)^{0,1}}, \quad \text{Anzahl der Speicher: } n_O = 1$$

**Gerinneabfluss:**

$$p_G = 9,92 \cdot 10^{-4}, \quad c_G = 9,92 \cdot 10^{-3},$$

mit diesen Parametrisierungswerten ergibt sich Formel (4) für den Gerinneabfluss zu:

$$(7) \quad k_G = 9,92 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}}, \text{ Anzahl der Speicher: } n_G = 5$$

Für Regionen innerhalb eines Flusseinzugsgebietes, die einen besonders hohen Anteil an Feuchtgebieten oder Seen aufweisen, gestaltet sich die Abflusssimulation hingegen komplizierter, weil hier nicht der Bodentyp das ausschlaggebende Element für die Speicherkapazität einer Rasterzelle darstellt. Mit dem bisherigen Ansatz des *HD*-Modells werden die Simulationsergebnisse für solche Regionen voraussichtlich größere Abweichungen vom tatsächlichen Abflussverhalten aufweisen. Hier wäre der Einfluss von Seen und Feuchtgebieten durch eine gesonderte Parametrisierung zu berücksichtigen, siehe auch HAGEMANN (1997: 43ff.).

### **Die Adaption des *HD*-Modells an höhere Auflösungen**

Nach HAGEMANN (1997: 109ff.) konnte das *HD*-Modell aufgrund einer unzureichenden Datenlage zwar nicht direkt global validiert werden, wohl aber indirekt über die regionale Modellvalidierung anhand verschiedener, großer Flusseinzugsgebiete. Generell simulierte das *HD*-Modell hier den monatlichen Jahresgang realistisch. Hinsichtlich des Ziels, eine bestmögliche Simulation der Abflussprozesse zu erreichen, wurde festgestellt, dass die Parametrisierung in erster Linie von der Topographie und der Gitterboxlänge (Auflösung) beeinflusst wird. Eine Ausnahme hiervon bilden nur Rasterzellen, die einen hohen Anteil an Feuchtgebieten oder Seen aufweisen (HAGEMANN 1997: 109). Auf dieser Basis erscheint eine Adaption des *HD*-Modells für höhere Auflösung, d.h. eine Parametrisierung für andere Gitterboxlängen – unter Beibehaltung der bisherigen Genauigkeit – theoretisch möglich zu sein. Aufgrund der höheren Auflösung und damit potenziell einhergehenden genaueren Eingangsdaten (dieses betrifft vor allem das Höhenmodell und damit die Topographiegradienten) könnte die Adaption bei entsprechender Eingangsdatenslage sogar zu einer Steigerung der Genauigkeit des simulierten Wasserabflusses führen. Dieses hängt aber in einem hohen Maße auch davon ab, welcher relativen Fehlerbehaftung die Eingangsdaten unterliegen und ob es bei höheren Auflösungen nicht zu unvorhergesehenen Modelleffekten kommt, die einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der Abbildung der Abflussprozesse haben.

Auf Basis der *RivFlow*-Anwendung und der darin implementierten Algorithmen des *HD*-Modells wird über eine Vielzahl von Abflusssimulationen in Kapitel 3.4 eine Parametrisierung des *HD*-Modells für höhere Auflösungen durchgeführt. Die Ergebnisse einer daran anschließenden und auf dieser Parametrisierung beruhenden Referenzsimulation des Wasserhaushaltes des Elbeeinzugsgebietes werden in Kapitel 4.2 einer kritischen Betrachtung unterzogen.

### **3.1.2.5 Geophysikalische und geographische Referenzdaten**

Zu Zwecken der Evaluierung und der Verbesserung der Simulationsgenauigkeit wird für diese Arbeit eine Reihe von Referenzdaten herangezogen. Hierbei handelt es sich zum einen um geophysikalische Referenzdaten, insbesondere um reale Messdaten in Bezug auf das Wasserabflussvolumen der in dieser Arbeit untersuchten Flusseinzugsgebiete. Zum anderen um allgemeine geographische Referenzdaten, die für die globale Skala vorliegen.

#### **Messdaten**

Sowohl für das Elbeeinzugsgebiet als auch für das Flusseinzugsgebiet des Nils liegen für verschiedene Abschnitte der Hauptströme zeitliche Messreihen des Wasserabflussvolumens vor.

Im Fall der Elbe werden in dieser Arbeit Daten verwendet, die durch die *Flussgebietsgemeinschaft Elbe* (FGG) bereitgestellt werden.<sup>16</sup> Über ihr Fachinformationssystem<sup>17</sup> hat man die Möglichkeit, auf verschiedene Kategorien von Messwerten zuzugreifen, die an verschiedenen Messstellen innerhalb des deutschen Teils des Elbeeinzugsgebietes erhoben werden. An hydromorphologischen Messdaten liegen hier mehr als 1 Mio. Messwerte von etwa 41 Messstellen an der Elbe vor – für einen Zeitraum von 1950 bis 2013 (teilweise aber mit erheblichen Lücken in der zeitlichen Erfassung). Die Auswahl der Evaluierungspunkte für das Flusseinzugsgebiet der Elbe erfolgt im Verlauf des Parametrisierungsprozesses in Kapitel 3.4.

Für den Fall des Nils gestaltete sich die Datenlage ungleich schwieriger. Aktuelle Messdaten zum Abflussverhalten im Flusseinzugsgebiet des Nils standen im Rahmen dieser Arbeit nicht zu Verfügung. Für die Durchführung und Evaluation der Referenzsimulationen des Nils musste daher auf ältere Messreihen zurückgegriffen werden, die durch die *Global River Discharge Database*<sup>18</sup> bereitgestellt werden. Für das Flusseinzugsgebiet des Nils liegen zwar die Werte einer Reihe von Messstationen vor, diese weichen jedoch in ihrer zeitlichen Datenerfassung und dem Datenumfang erheblich voneinander ab. Auch weisen viele dieser Messreihen zeitliche Lücken, Datenartefakte oder teils widersprüchliche Angaben auf. Die aktuellsten, bei einer genaueren Betrachtung verlässlich erscheinenden, Messwerte liegen für Anfang der 1980er Jahre vor. Die Auswahl der Evaluierungspunkte für das Nileinzugsgebiet erfolgt in Kapitel 4.3.

### **Geographische Referenzdaten**

Das *Natural-Earth-Data-Projekt*<sup>19</sup> ist eine öffentlich zugängliche Datensammlung geographischer Vektor- und Rasterdaten, die für die globale Skala vorliegen. Die Daten untergliedern sich in zwei wesentliche Kategorien: die physischen (Verlauf von Flüssen, Küstenlinien, Seen etc.) und die kulturellen Oberflächencharakteristika (Grenzverläufe, urbane Räume, Städte etc.). Insbesondere die enthaltenen vektoriellen Referenzdaten zum Verlauf der Hauptströme der weltweiten Flusssysteme bilden im Rahmen dieser Arbeit ein wichtiges Instrument für die Modellevaluierung und -verbesserung (siehe hierzu u.a. auch Kapitel 3.2, Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3).

### **3.1.3 Sozioökonomische Datenbasis**

Eine weithin (global) gültige Modellierung sozioökonomischer Einflüsse auf die Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten gestaltet sich i.A. schwierig. Dieses hängt zum einen damit zusammen, dass die wasserrelevanten Einflussfaktoren oftmals stark variieren und in hohem Maße vom Land und der Region abhängig sind, zum anderen, dass der Umfang und die Qualität der erhobenen Daten global stark voneinander abweichen und in vielen Regionen häufig gar nicht oder nur punktuell zur Verfügung stehen. Datenerhebungen über Messgrößen wie Wasserentnahme und -zuleitungen liegen zumeist nur in den wirtschaftlich entwickelten Ländern zeitlich und räumlich in hoher Auflösung vor. Aber auch sozial- und wirtschaftswissenschaftliche Prognosen in Hinsicht auf Bevölkerungswachstum, Wohlstand, industrielle Entwicklung und Produktivität etc. und die hieraus resultierenden Veränderungen im regionalen Wassernutzungsverhalten

---

<sup>16</sup> Webseite der FGG erreichbar unter: <http://www.fgg-elbe.de/fgg-elbe.html> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>17</sup> Webseite des FGG Datenportals: <http://www.elbe-datenportal.de/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>18</sup> Webseite der *Global River Discharge Database*: <http://www.sage.wisc.edu/riverdata/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>19</sup> Download Website *Natural Earth Data*: <http://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

sind mit großen Unsicherheiten behaftet und erschweren eine verlässliche Szenariobildung (siehe hierzu auch Kapitel 2). In der Grunddatenbasis des aggregierten Modellsystems sollen die sozioökonomischen Einflüsse anhand eines globalen Datensatzes der bisherigen sektoralen, flächenbasierten Wassernutzung des *WaterGAP*-Modells berücksichtigt werden (siehe nächster Abschnitt). Eine darüber hinausgehende Erhebung oder Modellierung weiterer sozioökonomischer Daten erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht. Weitere sozioökonomische Einflussfaktoren, Daten und Prognosen können durch den Benutzer aber anwendungsspezifisch einfach über das aggregierte Modellsystem eingebunden werden.

## **Flächenbasierte Wassernutzungsdaten**

Mit dem **WaterGAP-Modell** (*Water Global Assessment and Prognosis*) liegt eine rudimentäre, globale Datenbasis in Hinsicht auf die regionalen, flächenbasierten Wasserentnahmen und den Wasserverbrauch vor. Eine detaillierte Erläuterung des *WaterGAP*-Modells findet sich u.a. in DÖLL et al. (2001) und ALCAMO et al. (2003).

Beim *WaterGAP*-Modell handelt es sich um ein rasterbasiertes, globales Modell, das auf der Makroskala sowohl die hydrologische Wasserverfügbarkeit berechnen als auch die Wassernutzung im jeweiligen Flusseinzugsgebiet modellieren kann (DÖLL et al. 2001). Das *WaterGAP*-Modell in seiner bisherigen Form hat eine räumliche Auflösung von 0,5 Grad und besteht aus zwei Teilmodellen, dem **Global Hydrology-Modell** und dem **Global Water Use-Modell**. Ähnlich dem *HD*-Modell, modelliert das *Global Hydrology*-Modell auf Basis von Klimadaten und Abflussvektoren den Wasserabfluss auf der Landoberfläche. Von eigentlichem Interesse für diese Arbeit ist aber das *Global-Water-Use*-Modell, das die Wassernutzungsdaten generiert.

### **Global-Water-Use-Modell**

Das innerhalb des *WaterGAP*-Modells implementierte *Global-Water-Use*-Modell simuliert die Wassernutzung unterteilt nach fünf Sektoren (s.u.) und jeweils unterschieden nach Wasserentnahme und Wasserverbrauch. Bei der Wasserentnahme (*withdrawal water use*) handelt es sich im Modell um diejenige Menge Wasser, die der natürlichen Umgebung entnommen wird. Der Verbrauch (*consumptive water use*) ist als derjenige Anteil am entnommenen Wasser definiert, der durch Verdunstung und Transpiration sowie durch den Konsum verloren geht (DÖLL et al. 2001: 3).

Bei der Simulation der Wassernutzung wird zwischen vier verschiedenen Wassersektoren unterschieden: Haushalte (*domestic water sector*), Industrie (*industrial water sector*), Bewässerung (*irrigation water sector*) und Tierhaltung (*livestock water sector*), siehe auch Abbildung 3.1-3. Die Wassernutzung in allen Sektoren wird als eine Funktion der Intensität der Wassernutzung und der jeweiligen Anzahl relevanter Nutzer berechnet. Länderspezifische Schätzwerte finden in diese Berechnung ebenso Eingang wie u.a. die Bevölkerungsdichten und die Bruttoinlandsprodukte (DÖLL et al. 2001: 3ff.). Obwohl alle Sektoren einem gewissen klimatischen Einfluss unterliegen, sind das Wettergeschehen und jahreszeitliche Klimaschwankungen nur im Fall des Bewässerungssektors die dominierenden Faktoren.

Die in die Grunddatenbasis dieser Arbeit integrierten *WaterGAP*-Daten wurden im Rahmen des EU-Projektes *WATCH* generiert und liefern die jeweiligen sektoralen Wasserentnahmen und den sektoralen Wasserverbrauch in einer räumlichen Auflösung von 0,5 Grad und der Einheit  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ . Für die Vorbereitung und Einbindung der Wassernutzungsdaten in die *RivFlow*-Anwendung siehe Kapitel 3.3.





Abbildung 3.1-3: Die dem *Global-Water-Use-Modell* zugrunde liegenden Wassersektoren.

### 3.1.4 Zusammenfassung und Datenüberblick

Die folgende Tabelle 3.1-1 gibt einen zusammenfassenden Überblick der beschriebenen Grunddatenbasis und der zugrundeliegenden Datenmodelle des aggregierten Modellsystems. Diese Datensätze bzw. Modelle liegen für die globale Skala vor. Bei den *SRTM*-, *Surface-Runoff*- und *Drainage*- sowie den *WaterGAP*-Daten handelt es sich um die zwingend notwendige **Antriebsdaten** des aggregierten Modellsystems. Die hydrologischen Referenzdaten sind flusseinzugsgebietspezifisch erhoben und beziehen sich nur auf die beiden Anwendungsbeispiele im Rahmen dieser Arbeit.

<b>Modell- und Datengrundlagen des aggregierten Modellsystems</b>	
<b>Naturwissenschaftliche Grundlagen</b>	<p><b>SAGA GIS Software</b></p> <p><i>Hydrological Discharge-Modell, HD-Modell</i> des MPI-M → Modell-Implementierung in RivFlow Anwendung</p> <p><b>Globale <i>Surface-Runoff</i>- und <i>Drainage</i>-Datensätze</b>, erzeugt durch das globale Landoberflächen-Schema, <i>SL</i>-Schema → Daten generiert und bereitgestellt vom MPI für Meteorologie</p> <p><b>Globaler Klimadatensatz: <i>WATCH-Forcing</i>-Daten</b> → EU-Forschungsprojektdaten, Eingangsdaten des <i>SL</i>-Schemas</p> <p><b>Globale <i>SRTM</i>-Daten</b> → Daten vom <i>CGIAR-CSI</i></p> <p><b>Geographische Referenzdaten:</b> → Daten des <i>Natural Earth Projektes</i></p> <p><b>Hydrologische Referenzdaten</b> Messwerte Elbe → Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) Messwerte Nil → <i>Global River Discharge Database</i></p>
<b>Sozioökonomische Datenbasis</b>	Wassernutzungsdaten des <b><i>WaterGAP-Modells</i></b>

Tabelle 3.1-1 : Zusammenfassung der Grunddatenbasis und der dem aggregierten Modellsystems zugrunde liegenden Modelle.

## 3.2 Aufbereitung von Höhendaten zur Erstellung eines regionalen Geländemodells

Die Daten der *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* stellen bis dato eine wichtige und genaue Datenquelle zur Erstellung globaler *Digital Elevation Models (DEMs)* bzw. Höhenmodelle dar. *DEMs* finden in den Geowissenschaften eine vielfältige Verwendung. Abhängig von der Anwendung bedürfen sie jedoch zumeist einer mehr oder weniger aufwendigen Aufbereitung, um auch den Ansprüchen an ein digitales Geländemodell (*DTM*) zu genügen. Im folgenden Abschnitt sollen mögliche Schritte zur Aufbereitung von *DEMs* mittels der Software SAGA GIS aufgezeigt werden. Auf diese Weise soll ein Geländemodell in Form eines Rasterdatensatzes (→*DTM*-Raster) generiert werden, welches den Verlauf des Gerinnes eines Flusseinzugsgebiets möglichst genau abbildet und anhand dessen sich so das Wasserabflussverhalten innerhalb des Flusseinzugsgebiets simulieren lässt. Zum Schluss soll mit Hilfe einer SAGA-GIS-Funktion der genaue Verlauf des Flussnetzwerkes – auf Basis des aufbereiteten Geländemodells – berechnet und im Vergleich mit Referenzvektoren des realen Flussverlaufs, die Genauigkeit des Geländemodells in dieser Hinsicht abgeschätzt werden.

Ein *DEM* gibt die Höhe des Geländes inklusive aller auf der Erdoberfläche befindlichen künstlichen und natürlichen Objekte wieder. Großflächige Bebauungen, vor allem aber weitflächige Waldgebiete können daher eine „künstliche Geländeerhöhung“ verursachen. Für viele Anwendungen, wie zum Beispiel der Berechnung des Wasserabflusses, wird aber explizit nur die Geländehöhenstruktur der Erdoberfläche benötigt, künstliche Geländeerhöhungen können hier zu erheblichen Abweichungen in den Richtungen der Abflussberechnungen führen.

Bei vorliegenden und hinreichend genauen Informationen zu Vegetationsbestand, Infrastruktur oder Geländeeigenschaften, können diese künstlichen Geländeerhöhungen durch die Anwendung von Filteralgorithmen weitgehend herausgerechnet werden, immer abhängig von der Qualität der vorliegenden Daten. Als Ergebnis ergibt sich im Idealfall dann ein digitales Geländemodell, das nur die Geländestruktur der Erdoberfläche wiedergibt. Prinzipien und Methoden der Geländemodellierung finden sich u.a. in Li et al. (2005).

### 3.2.1 Aufbereitung von *DEM*-Daten mit SAGA GIS

Dieser Abschnitt beschreibt am Beispiel der Elbe und in einer Auflösung von 5 km die methodische Aufbereitung von *DEM*-Rasterdaten mit Hilfe der Software SAGA GIS, hin zu einem digitalen Geländemodell. Eine Beschreibung der Aufbereitungsmethode des SAGA GIS und die zugrundeliegende Vorgehensweise findet sich in CIMMERY (2010b: 128ff.). Als *DEM*-Datengrundlage des Geländemodells dient die vierte Version der bereits interpolierten und teilweise aufbereiteten *SRTM*-Daten des *CGIAR-CSI*, siehe Abschnitt 3.1.2.1. Zur Bearbeitung der *DEM*-Daten wurde eine 64-Bit-Version des SAGA GIS (Programmversion 2.1.0) verwendet.

Zunächst müssen die *DEM*-Rasterdaten an die spezifischen Bedürfnisse (Datenausschnitt, Koordinatenprojektion etc.) angepasst und entsprechend aufbereitet werden (Beseitigung von Artefakten). Erster Schritt ist die Auswahl und Extraktion des zu untersuchenden Flusseinzugsgebietes aus den *DEM*-Rasterdaten (die Fläche sollte dabei immer etwas größer als das tatsächliche Flusseinzugsgebiet sein). Das entsprechende Gebiet wird aus dem überregionalen *DEM*-Datensatz – der im geographischen Koordinatensystem GCS\_WGS\_1984 vorliegt – mit Hilfe des SAGA Moduls „*Grid-Tools: Cutting [interactive]*“ markiert, ausgeschnitten und anschließend als Rasterdatensatz gespeichert. Für die weitere Prozessierung wird für den Kartenausschnitt eine Ko-

ordinatentransformation in eine *Universal Transverse Mercator (UTM)* Projektion vorgenommen (→SAGA-Modul „*Projection-Proj.4: Coordinate Transformation (Grid)*“). Die zu wählende *UTM*-Zone wird dabei abhängig von der geographischen Lage des Flusseinzugsgebietes (ausgehend von der Datumsgrenze) bestimmt.<sup>20</sup> Für das Elbeeinzugsgebiet wird im Folgenden die Zone 32-Nord verwendet. In Bezug auf die resultierende Projektion ist die Wahl der Interpolationsmethode von entscheidender Bedeutung und die Ergebnisse können je nach Methode erheblich voneinander abweichen. Im Rahmen der Projektion von *DEM*-Rasterdaten hat sich herausgestellt, dass die „*Bicubic Spline Interpolation*“ und „*B-Spline Interpolation*“ die realistischste Projektion gewährleisten. Als Projektionsziel wird ein benutzerdefiniertes Raster-System (*Grid-System*) gewählt, wobei die Rasterzellengröße hier theoretisch frei bestimmt und die Rasterdaten (falls nötig) so an dieser Stelle auch *resampled* werden können (in diesem Fall wird eine Auflösung von 5 km gewählt). Abbildung 3.2-1 zeigt exemplarisch ein Höhenmodell des Elbeeinzugsgebietes als Reliefschummerung.

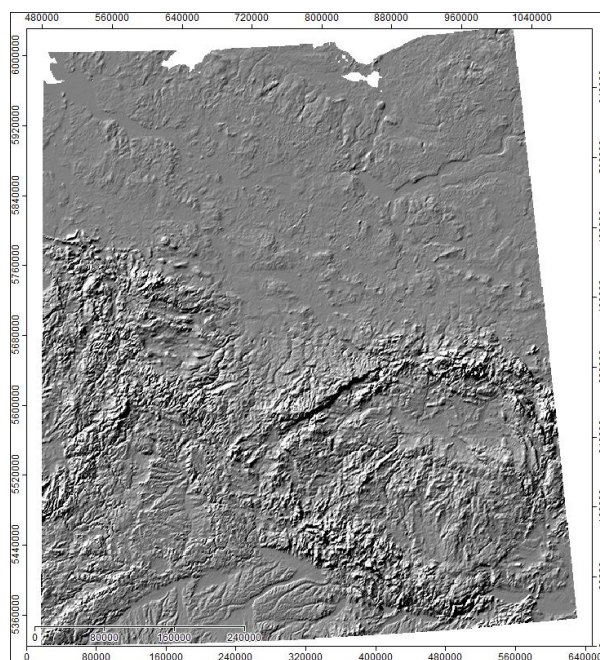


Abbildung 3.2-1 : Reliefschummerung des Elbeeinzugsgebietes

Das SAGA-Modul „*Terrain Analysis-Preprocessing: Burn Stream Network into DEM*“ erlaubt das Einprägen von bekannten geophysikalischen Informationen (die im Rasterdatenformat vorliegen) in das *DEM*-Raster. Geeignet ist diese Methode insbesondere um Flussverläufe, die als Referenzvektor vorliegen, vorab im *DEM*-Raster genauer festzulegen. Auf diese Weise kann die Genauigkeit des Geländeverlaufes und damit auch die des Flussnetzwerkes bzw. Hauptgerinnes präzisiert werden. Vom Prinzip her wird bei dieser Methode ein Raster des Referenz-Flussverlaufes über das *DEM*-Raster gelegt und alle Rasterzellen des *DEM*-Rasters, die deckungsgleich mit den Rasterzellen des Referenz-Flussverlaufes sind, werden hinsichtlich ihrer Nachbarzellen um einen vorher definierten Höhenwert abgesenkt. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, kleinere Artefakte aus dem *DEM*-Raster zu beseitigen, die sich zum Beispiel durch künstliche Geländeerhöhungen ergeben haben und zu Abweichungen beim Abflussverlauf führen würden. Durch die Einprägung des referenziellen Flussverlaufes können solche künstlichen Erhöhungen also ggf. „durchbrochen“ werden.

<sup>20</sup> Weitergehende Informationen finden sich in LONGLEY et al. (2011: 138ff.).

Um das Flussnetzwerk der Elbe nun mittels des SAGA-Moduls „*Terrain Analysis-Preprocessing: Burn Stream*“ in das DEM-Raster des Elbeeinzugsgebietes einzuprägen, werden georeferenzierte Flussverlaufsdaten des *Natural Earth Data* Projektes (siehe Abschnitt 3.1.2.5) verwendet, die als Vektordatensatz vorliegen und zunächst konvertiert werden müssen. Im Fall des Elbeeinzugsgebietes werden die beiden Basisflüsse eingepreßt, wobei es sich um die Elbe und die Moldau handelt. Das Koordinatensystem der entsprechenden Vektordaten wird hierfür zunächst auf das zugrundeliegende GCS\_WGS\_1984-Referenzsystem gesetzt (→SAGA Modul „*Projection-Proj.4: Set Coordinate Reference System*“). Anschließend wird auch hier eine UTM-Projektion auf die Zone32-Nord durchgeführt (→SAGA Modul „*Projection-Proj.4: Coordinate Transformation (Shape)*“). Der so projizierte Flussverlaufsvektor wird dann im nächsten Schritt mit dem SAGA-Modul „*Grid-Gridding: Shapes to Grid*“ in einen Rasterdatensatz umgewandelt.

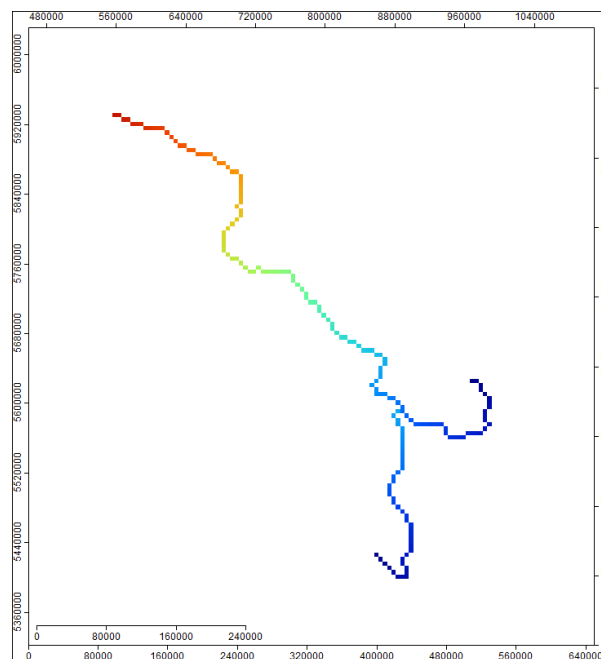


Abbildung 3.2-2: Referenzvektor des Flussverlaufes als Rasterdatensatz – von den Quellen (in blau) bis zur Mündung (in rot).

Es besteht hier die Möglichkeit ein benutzerdefiniertes Rasterdatensystem zu definieren oder aber das Format eines bestehenden Rastersystems zu übernehmen. In diesem Fall soll das Format des DEM-Raster des Elbeeinzugsgebietes gewählt werden, da beide Rasterdatensätze für das SAGA-Modul „*Terrain Analysis-Preprocessing: Burn Stream*“ im selben Rasterformat (Zellgröße, Anzahl Spalten/Zeilen) vorliegen müssen. Abbildung 3.2-2 zeigt die beiden Hauptströme (Elbe und Moldau) des Elbeeinzugsgebietes als Rasterdatensatz.

Anhand des Rasters der beiden Hauptströme kann nun der Verlauf des Flusssystemes in das Höhenprofil des DEM-Rasters eingepreßt werden. Es empfiehlt sich hier die Methode „*lower cell's value to neighbors minimum value minus epsilon*“. Diese Methode bewirkt, dass der Höhenwert jeder Rasterzelle des DEM-Rasters (aber nur, wenn diese zugleich auch einer der Rasterzellen der beiden Hauptströme entspricht), bezüglich der Werte der Nachbarrasterzellen um den Wert *Epsilon* niedriger gesetzt wird. Die Wahl des *Epsilonwertes* ist in einem hohen Maße von dem DEM-Raster, dem dortigen Geländeprofil und der Auflösung abhängig, muss in den meisten Fällen also iterativ (Variation des *Epsilonwertes* ↔ Evaluation des Ergebnis) bestimmt

werden. Allgemein betrachtet ist es jedoch sinnvoll, den Wert von Epsilon und damit auch den Eingriff in das *DEM*-Raster möglichst klein zu halten (Werte im niedrigen Meterbereich).

Der vorerst letzte Bearbeitungsschritt umfasst die Beseitigung von Artefakten im *DEM*-Raster unter der Verwendung des SAGA-Moduls „*Terrain Analysis-Preprocessing: Sink Removal*“. Hierzu werden im *DEM*-Raster alle Senken bzw. Mulden – also solche Rasterzellen/-flächen, die niedriger als alle ihre Nachbarzellen liegen und aus denen somit kein Wasser abfließen würde – identifiziert. Artefakte in Form von kleinflächigen Senken können bei der Berechnung des Wasserüberlandabflusses oder bei der Bestimmung von Flussnetzwerken zu irregulären Umleitungen oder zur Unterbrechung von Wasserverläufen führen. Im Folgenden soll daher der Wasserabfluss aus solchen Senken erzwungen werden. Der Höhenwert dieser Senken-Zellen/Flächen wird deshalb nun durch die Methode „*Fill Sinks*“ automatisch solange erhöht, bis die Senke höher als zumindest eine der Nachbarzellen liegt, ein Wasserabfluss also stattfinden kann. Das Ergebnis ist nun ein **prä-prozessiertes DTM-Raster**, das im nächsten Schritt auf seine Eignung als Geländemodell (→*DTM*-Raster) für eine Abflusssimulation untersucht werden soll.

### 3.2.2 Evaluation des bearbeiteten *DEMs* mit Methoden des SAGA GIS

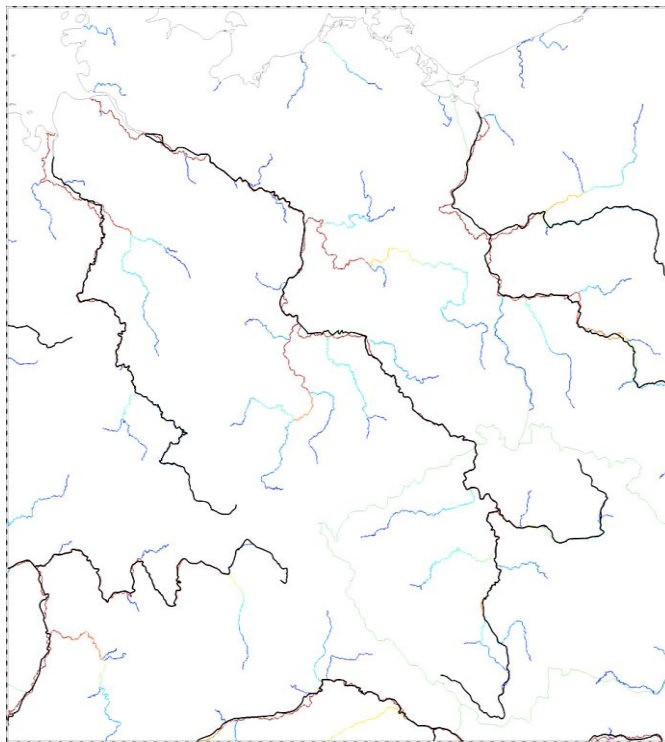
Zur Bestimmung der Präzision des *prä-prozessierten DTM*-Rasters, sollen unter Berücksichtigung der Abflussrichtungen einzelner Rasterzellen, das geländebedingte Gerinnenetzwerk und der hieraus resultierende Verlauf der beiden Hauptströme Elbe und Moldau qualitativ bestimmt und mit den Referenzvektoren dieser beiden Basisflüsse verglichen werden, um so eine Aussage über die Genauigkeit der Geländeeigenschaften des *prä-prozessierten DTM*-Rasters treffen zu können.

Hierzu werden mit dem SAGA-Modul „*Terrain Analysis-Hydrology: Catchment Area (Parallel)*“ zunächst die Abflussbeziehungen der Rasterzellen des Flusseinzugsgebiets untereinander errechnet (siehe hierzu u.a. O'CALLAGHAN & MARK 1984). In Bezug auf den zugrundeliegenden Wasserabflussalgorithmus kann prinzipiell zwischen solchen Algorithmen unterschieden werden, die den Abfluss zwischen nur einzelnen Rasterzellen oder aber innerhalb des gesamten *prä-prozessierten DTM* Rasters als freibeweglich betrachten (CIMMERY 2010b). Die hier beschriebene Analyse wird sich auf den direkten Abfluss in jeweils nur genau eine Nachbarrasterzellen beschränken. Hierfür wird das *prä-prozessierte DTM* Raster von der höchsten zur niedrigsten Zelle parallel sortiert und in absteigender Höhe bearbeitet. Der älteste und weitverbreitetste Abflussalgorithmus hierfür ist *Deterministic 8 (D8)*. Bei diesem klassischen Ansatz findet der Abfluss vom Zentrum einer Rasterzelle in diejenige Nachbarrasterzelle statt, zu der das größte Gefälle besteht. Bei D8 fließt das Wasser einer Zelle also in genau eine andere Rasterzelle ab, es kommt somit zu keiner Aufteilung des Abflusses zwischen mehreren niedrigeren Nachbarrasterzellen. Darüber hinaus ist bei D8 der Abfluss auf die acht, jeweils angrenzenden Nachbarrasterzellen beschränkt. Die hier angestellte Betrachtung und auch das verwendete Abflussmodell stützen sich auf den D8-Algorithmus, gerade wegen der angestrebten Linearität und der eindeutigen Zuordnung von Teileinzugsgebieten bei der Berechnung des Abflussverhaltens und der Ausbildung der Hauptströme. Die Einschränkungen von D8 können in Bezug auf andere Anwendungen aber einen wesentlichen Nachteil darstellen. Zur Berechnung von großflächigen Flussdeltas (Flussfächer) eignen sich andere Methoden besser, wie z.B. „*Multiple Flow Direction*“.

Die Anwendung des SAGA-Moduls „*Terrain Analysis-Hydrology: Catchment Area (Parallel)*“ auf das *prä-prozessierte DTM*-Raster erfolgt nun also auf Basis der Betrachtung des Wasserabflusses in immer genau eine einzelne Rasterzelle, unter Verwendung des D8-Algorithmus und durch

Parallel Processing. Das Ergebnis ist ein Rasterdatensatz, in dem für jede Rasterzelle als Wert diejenige Anzahl vorheriger Rasterzellen angegeben ist, die – über das gesamte Flusseinzugsgebiet akkumuliert – zum Abfluss in eben diese Rasterzelle beigetragen haben.

Anhand dieses Rasterdatensatzes und auf Basis des *prä-prozessierten DTM*-Rasters werden mit dem SAGA-Modul „*Terrain Analysis-Channels: Channel Network*“ die Flussnetzwerke (bzw. Gerinnenetzwerke) berechnet und als Ergebnis drei Datensätze ausgegeben: das Flussnetzwerk als Rasterdatensatz (*ChannelNetwork-Grid*), eine Vektordarstellung des Flussnetzwerkes (*ChannelNetwork-Sharp*) sowie eine Rasterdarstellung der Abflussrichtungen jeder Rasterzelle (*ChannelDirection-Grid*). Die Werte der Rasterzellen des Flussnetzwerkes (*Channel Network-Grid*) geben die Flussordnungszahl des jeweiligen Flussteilstücks nach SHREVE (1967) an. Von eigentlichem Interesse in Hinblick auf die Evaluation des *prä-prozessierten DTM*-Rasters und der Beurteilung, ob es sich als Geländemodell für eine Abflusssimulation eignet, ist der Vergleich des *ChannelNetwork-Grid* mit den entsprechenden Referenzvektoren. Legt man die Referenzvektoren des Flussverlaufes über das *ChannelNetwork-Grid* (siehe die exemplarische Abbildung 3.2-3), so kann über eine qualitative Abschätzung der Übereinstimmung der Verläufe der beiden Hauptströme (Elbe und Moldau) im Umkehrschluss visuell auf die Genauigkeit des verwendeten *prä-prozessierten DTM*-Rasters, also des potenziellen Geländemodells geschlossen werden.



*Abbildung 3.2-3 : Genauigkeitsabschätzung des prä-prozessierten DTM-Rasters (exemplarische Darstellung). Errechnete Flussverläufe in Farbe (Farbverlauf gibt für jede Rasterzelle die Größe des Teileinzugsgebietes an: Von Quellen/Seitenarmen in blau, ansteigend bis Hauptströme in rot). Dazu in schwarz die Referenzvektoren der tatsächlichen Verläufe der Hauptströme.*

Bei der *DTM*-Erstellung für das Flusseinzugsgebiet der Elbe wurde nun deutlich, dass eine Anzahl von Artefakten mit den Bildaufbereitungsmethoden des SAGA-GIS nicht beseitigt werden kann-

ten (siehe hierfür die Abbildung 3.2-4 mit Beispielen für Abweichungen des errechneten vom referentiellen Elbverlaufes (urbane Regionen in Gelb)). Deutlich zu sehen sind hier die Abweichungen des Verlaufes der Elbe im Mündungsbereich (1.) und für den Fall urbaner Bebauung (2.), und bei der Moldau im Fall einer Wasserstaumaßnahme (3.), siehe auch Luftbild des dortigen Staudamms.

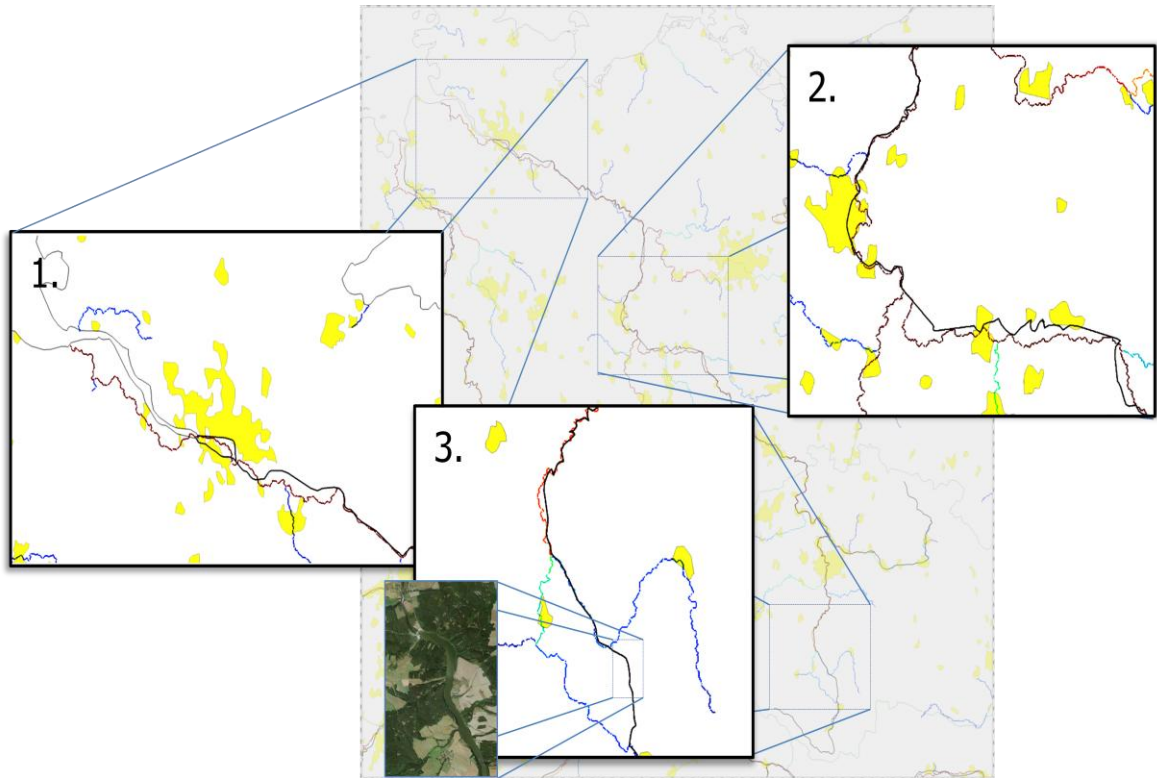


Abbildung 3.2-4 : Beispiele für Abweichungen im prä-prozessierten-DTM. Auch hier in Farbe die berechneten Flussverläufe (Farbverlauf (blau bis rot) ansteigend in Bezug auf die Größe des Teil-einzugsgebietes jeder Rasterzelle) und in schwarz die Referenzvektoren. In Gelb sind urbane Gebiete eingezeichnet (Luftbildquelle: GoogleMaps)

### 3.2.3 Rasterzellenmanipulation mit Hilfe der *RivFlow*-Anwendung

In dieser Hinsicht wurde für die *RivFlow*-Anwendung im Rahmen dieser Arbeit das Modul *Grid-Manipulation* entwickelt (für eine detaillierte Beschreibung siehe Abschnitt 3.3.2.1). Mit Hilfe des Moduls *GridManipulation* können einzelne Rasterzellen in einem Rasterdatensatz gezielt manipuliert, auftretende Artefakte auf diese Weise beseitigt und der Verlauf des Flussnetzwerkes im *prä-prozessierten DTM*-Rasters so schrittweise dem Verlauf der Referenzvektoren angeglichen werden. Außerdem können auch andere Einflussfaktoren – die sich durch Geländeeigenschaften ausdrücken (z.B. künstliche Wasserbaumaßnahmen) – auf diese Weise in ein *DTM*-Raster eingearbeitet werden. Nach jeder so erfolgten Bearbeitung des *prä-prozessierten DTM*-Rasters sollte ein erneuter Evaluationsprozess durchgeführt und das Ergebnis in Hinblick auf Verbesserungen in der Genauigkeit untersucht werden. Gegebenenfalls sind diese wechselseitigen Bearbeitungs- und Evaluationsprozesse iterativ auszuführen.

Das im Rahmen dieser Arbeit für das Flusseinzugsgebiet der Elbe aufbereitete digitale Geländemodell (→*DTM*-Raster) in einer Auflösung von 5 km sowie der Abgleich des resultierenden *ChannelNetwork-Grid* mit den Referenzvektoren des Elbeflussnetzwerkes finden sich in Abbildung 3.2-5.

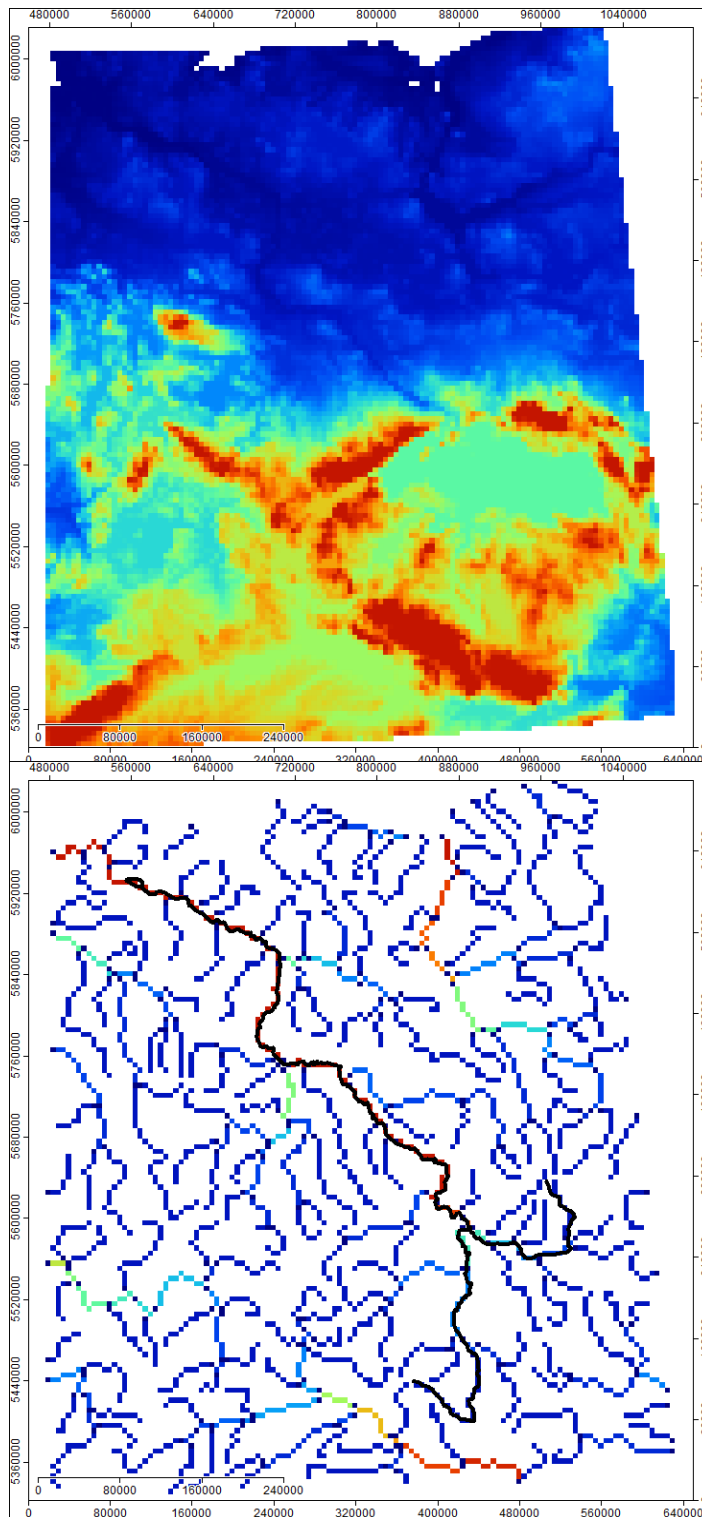


Abbildung 3.2-5 : Oben: DTM-Raster des Elbeeinzugsgebiet in einer 5-km-Auflösung (Höhenanstieg von blau bis rot). Unten: Die Evaluation des DTM-Rasters anhand eines Vergleichs des resultierenden ChannelNetwork-Grids (Farbverlauf (blau bis rot) ansteigend in Bezug auf die Größe des Teileinzugsgebietes jeder Rasterzelle) mit den Referenzvektoren des Flussverlaufes im Elbeeinzugsgebiet.



## 3.3 RivFlow-Anwendung

### 3.3.1 Die Programmgrundlagen

Als der zentrale Bestandteil dieser Arbeit wurde die *RivFlow*-Anwendung in Form eines Moduls des geographischen Informationssystems SAGA GIS konzipiert und in der Programmiersprache C++ programmiert. Im Rahmen dieser Entwicklung wurden eine 64-Bit-Version von SAGA GIS (Programmversion 2.1.0), das Microsoft Developer Studio 2010 und ein Computer (3,6 GHz Intel QuadroCore Prozessor, 16 GB Arbeitsspeicher) mit einem 64-Bit-Windows-7-Betriebssystem verwendet. Die Verwendung der *RivFlow*-Anwendung erfordert einen leistungsfähigen Desktop-Computer, der über einen großen Arbeitsspeicher (mindestens 8 GB) und ein Windows Betriebssystem auf 64-Bit-Basis verfügt.

Die Anwendung beinhaltet verschiedene Funktionen, mit denen Rasterdatensätze manipuliert und verarbeitet werden können, bestimmte Charakteristika von Flusseinzugsgebieten analysiert und der laterale Wasserfluss innerhalb von Flusseinzugsgebieten simuliert werden kann. Die Integration der Anwendung in ein GIS bietet die notwendigen Schnittstellen für eine unkomplizierte Einbindung weiterer (auch externer) Programmroutinen, die Möglichkeit zur Verschneidung verschiedener Datenformate und visualisierungsgestützte Datenanalysen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass zusätzliche, szenariobasierte funktionale Einflussprozesse bisher direkt in den Quellcode integriert werden müssen, aufgrund der komplexen Umsetzung bietet die *RivFlow*-Anwendung bisher keine Möglichkeit zum Einlesen von Funktionen über die Eingabemaske. Grundlegende und funktionale Änderungen des Simulationsablaufes bedürfen also ggfs. einer Anpassung des Quellcodes und setzen entsprechende Programmierkenntnisse voraus.

Rasterdatensätze mit sehr großen Datenmengen können in der *RivFlow*-Anwendung zu sehr langen Rechenzeiten oder speicherbedingten Windowsfehlern führen. Bei sehr großen Flusseinzugsgebieten kann es daher sinnvoll sein, den Hauptstrom in mehrere (kleinere) Teileinzugsgebiete zu separieren und die dortigen Abflussprozesse jeweils einzeln zu simulieren.

### 3.3.2 Programmentwicklung und -funktionen

Die *RivFlow*-Anwendung ist in fünf Teilmodule untergliedert. Zentraler Bestandteil der Anwendung ist das Primärmodul **LandFlow**, welches den zeitlichen, lateralen Wasserabfluss über Land simuliert und als Ergebnis die Abflussvolumen ausgewählter Evaluierungspunkte sowie die Wasserflussbilanz des Hauptstroms ausgibt. Des Weiteren beinhaltet die *RivFlow*-Anwendung die sekundären Module **GridManipulation** (u.a. Datenmanipulation einzelner Rasterzellen per Maus), **RiverGridGeneration** (Erstellung von Hauptgerinnenetzwerken), **RiverBasin** (Analyse der Charakteristika eines Flusseinzugsgebiets und Generierung zusätzlicher Informationsdaten) und **GridCombination** (Kombination verschiedener Wassernutzungsdaten zu einem resultierenden Rasterdatensatz der Flächenentnahme), siehe auch Abbildung 3.3-1. Viele der in den sekundären Modulen generierten Daten sind zugleich Grundlage der Berechnungen anderer Module. Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktionen der einzelnen Module detailliert beschrieben. Ein besonderer Fokus der Beschreibung liegt dabei auf dem Primärmodul **LandFlow**, das für seine Simulation eine Reihe von Inputdaten benötigt, die teilweise vorher erst durch die sekundären Module erzeugt werden müssen.

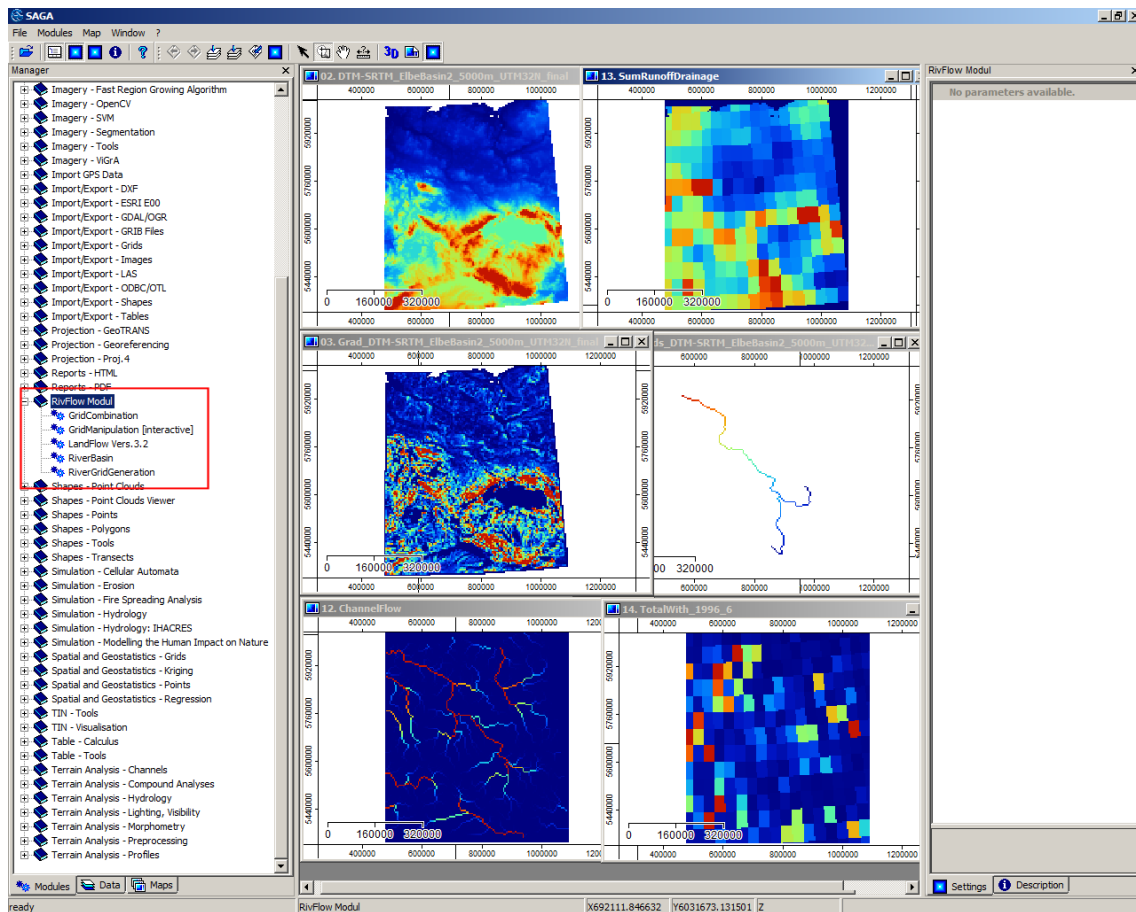


Abbildung 3.3-1 : RivFlow-Anwendung als Modul im SAGA GIS (rote Markierung).

### 3.3.2.1 Sekundäre Module

#### **GridManipulation**

Dieses Modul ermöglicht es, einzelne Rasterzellen eines Rasterdatensatzes mit der Maus auszuwählen und deren Wert um einen vorher definierten Betrag  $\epsilon$  zu erhöhen oder zu senken. Ein Rasterdatensatz kann so rasterzellenweise manipuliert werden. Diese Methode eignet sich besonders zur Aufbereitung bzw. Nachbearbeitung von Höhenrasterdaten ( $\rightarrow$ DTM-Raster), um diese z.B. um Artefakte zu bereinigen, künstliche Eingriffe ins Gelände nachzustellen bzw. zu simulieren oder Korrekturen an dem Verlauf eines Flussnetzwerkes in einem Geländemodell vorzunehmen. Außerdem bietet das *GridManipulation*-Modul eine automatisierte Methode, anhand derer eine mittels Maus bestimmte Rasterzelle automatisch auf einen niedrigeren Wert als alle ihre Nachbarrasterzellen gesetzt wird. Auf diese Art und Weise kann – beginnend an der höchsten Rasterzelle – schrittweise und Rasterzelle für Rasterzelle ein Abflussverlauf in einem Höhendatensatz eingepreßt werden, inklusive des Gefälles. Probleme könnten bei diesen Methoden im Zusammenhang mit Artefakten (z.B. größere Senken) oder bei zu großen Werten für  $\epsilon$  (Flussverlauf wird über die Strecke zu sehr vertieft) auftreten und sind bei einer Anwendung entsprechend zu berücksichtigen. Es ist stets angeraten, nach einer Bearbeitung von Höhenrasterdaten immer eine erneute Evaluierung des Geländemodells, wie in Unterkapitel 3.2.2 beschrieben, durchzuführen.

#### **RiverGridGeneration**

Auf Basis des aufbereiteten Geländemodells des Flusseinzugsgebietes ( $\rightarrow$ DTM-Raster), können mit diesem Modul die Rasterzellen eines definierten Flussnetzwerkes (im Folgenden auch als

*Hauptgerinnerasterzellen* bezeichnet) in Form eines extra Rasterdatensatzes **HGGrid** ausgegeben werden. Wie detailliert das Flussnetzwerk dabei abgebildet werden soll (nur Hauptarme des Flusses oder auch Nebenflüsse), ist dem Anwender selber überlassen und hängt auch von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Flussinformationen ab. Schrittweise werden mit diesem Modul die einzelnen Arme des Flussnetzwerkes nacheinander in denselben Ausgaberrasterdatensatz (→*HGGrid*-Raster) geschrieben, jeweils über die Angabe der Quellen- (Abflussstart) und Mündungskordinate (Abflussziel) des Flussarms und anhand des auf dieser Basis berechneten Abflusspfades.

Alle Koordinaten müssen zuvor manuell erhoben bzw. abgelesen werden, wobei alle Flussarme des Flussnetzwerkes dieselbe Mündungskordinate aufweisen (gleichzusetzen mit der Ausgangsrasterzelle des Flusseinzugsgebietes), die Quellkoordinaten aber für jeden Flussarm bzw. Nebenfluss separat zu erheben sind. Eine Möglichkeit, zu diesen Koordinaten zu gelangen, ist, diese in dem Evaluierungsrasterdatensatz *ChannelNetwork-Grid* des Geländemodells abzulesen (siehe Unterkapitel 3.2.2). Über den direkten Vergleich mit den realen Flussverlaufsvektoren, wurden diese errechneten Abflussverläufe (*Channels*) in Unterkapitel 3.2.2 für die Evaluierung des Geländemodells verwendet, entsprechen damit also auch den resultierenden Abflussverläufen des Geländemodells des Flusseinzugsgebiets (inklusive der Quellkoordinaten). Die größeren dieser Abflussverläufe müssen zunächst identifiziert und den realen Flussarmen und Nebenflüssen zugeordnet werden. Die Quellkoordinaten derjenigen Flussarme und Nebenflüsse, die man im Hauptgerinneraster berücksichtigt sehen will, können dann aus dem *ChannelNetwork-Grid* abgelesen werden.

Für jedes Eingabepaar von Quell- und Mündungskordinaten ermittelt das *RiverGridGeneration*-Modul innerhalb eines Funktionsaufrufes den Abflussverlauf zwischen dem Start- und Zielkoordinatenpaar. Ausgehend von der Quelle, werden über die jeweils ermittelte Abflussrichtung schrittweise alle Hauptgerinnerasterzellen des Verlaufes markiert – solange, bis die Mündung oder eine andere, bereits markierte Hauptgerinnerasterzelle erreicht wird (zum Beispiel der Fall, wenn ein Nebenfluss auf den Flusshauptarm stößt). Diese Prozedur muss für jeden der Flussarme bzw. Nebenflüsse, die im Hauptgerinneraster (→*HGGrid*-Raster) abgebildet werden sollen, durchgeführt werden. Wird im Verlauf der Simulation keine andere Hauptgerinnerasterzelle und auch nicht die Mündung erreicht, sondern eine Senke, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Für jede so markierte Hauptgerinnerasterzelle des Abflussverlaufes, wird von der jeweiligen Quelle bis zur Mündung (bzw. bis zum Erreichen eines Flusshauptarms) fortlaufend der jeweilige Flusskilometerwert gesetzt. Die Strecke zwischen den Mittelpunkten zweier Rasterzellen ist dabei von der Rasterzellenauflösung und davon abhängig, ob eine senkrechte/waagerechte oder diagonale Abflussrichtung vorliegt. Rasterzellen, die keine Hauptgerinnerasterzelle darstellen, haben im Hauptgerinneraster den Wert Null.

Wie beschrieben endet ein Durchlauf zur Bestimmung der Hauptgerinnerasterzellen eines Flussarmes oder Nebenflusses immer dann, wenn die Mündungskordinaten oder eine bereits markierte Hauptgerinnerasterzelle erreicht sind oder aber ein Fehler auftritt. Dieses ist gleichbedeutend damit, dass man im ersten Durchlauf bereits die Flusskilometerskala von der Quelle bis hin zur Mündung einmal bestimmt, weil bereits gesetzte Werte der Hauptgerinnerasterzellen nicht mehr überschrieben werden. Für den Fall von Nebenflüssen erweist sich diese Vorgehensweise auch als sinnvoll, da ihre Längenkilometer nur bis zum Eintritt in einen Flusshauptarm gezählt werden sollen. Wurde nun allerdings bei den Durchläufen in Hinsicht auf die Flusskilometerskalen nicht immer auf die genaue Rangfolge der einzelnen Flussarme und Nebenflüsse geachtet, erlaubt das Setzen der Option „ÜbSchr“ vor einem Durchlauf, die Kilometerwerte be-

reits bestehender Hauptgerinnerasterzellen noch einmal zu überschreiben. Mit Hilfe dieser Option kann so auch nachträglich noch die Flusskilometerskala von einer beliebig wählbaren Quelle bis hin zur Mündung neu gesetzt werden.

### **RiverBasin**

Vornehmliche Aufgabe des *RiverBasin*-Moduls ist die Aufbereitung, Generierung und Bereitstellung von Informationen, die sich auf das Flusseinzugsgebiet beziehen und für Analysezwecke oder in Folgeanwendungen genutzt werden sollen. Dabei wird auch eine Reihe von Eingabedaten für das *LandFlow*-Primärmodul erzeugt. Zwingend erforderliche Eingabedaten des *RiverBasin*-Moduls sind das *DTM*-Raster des zu untersuchenden Flusseinzugsgebietes sowie ein auf dieser Basis mit dem *RiverGridGeneration*-Modul generierter *HGGrid*-Rasterdatensatz des Hauptgerinnes.

Das *RiverBasin*-Modul besteht aus zwei Hauptfunktionen. Die erste dieser Funktionen ermittelt und errechnet eine Anzahl von **Charakteristika des Flusseinzugsgebietes** und gibt diese jeweils als Rasterdatensatz aus. Die andere Funktion berechnet zunächst eine Reihe von Sekundärdaten zu den Rasterzellen des Flusseinzugsgebietes und bestimmt, basierend auf diesen Informationen, die räumliche **Abgrenzung des Flusseinzugsgebietes** und kann die **anteilige** Wasserentnahme über die Fläche berechnen.

**1.) Charakteristika des Einzugsgebietes:** Zu den ermittelten und jeweils als separaten Rasterdatensatz ausgegebenen Charakteristika des Flusseinzugsgebietes zählen:

- a) Zu jeder Rasterzelle wird die Abflussrichtung bestimmt. Nach der Konvention soll Wasserabfluss immer nur in Richtung der niedrigsten Nachbarzelle stattfinden. Die Abflussrichtung entspricht damit also der relativen Position der niedrigsten Nachbarzelle, welche über eine interne Funktion des SAGA GIS für jede Rasterzelle bestimmt und in Form einer ganzen Zahl  $i$  zwischen Null und Sieben zurückgegeben wird (siehe Abbildung 3.3-2). Gibt es keine niedrigere Nachbarzelle, so lautet der Rückgabewert  $i = -1$ . Der Rasterdatensatz **Direc** enthält für jede Rasterzelle  $(x, y)$  deren entsprechenden  $i$ -Wert und weist so die Abflussrichtung aus bzw. kennzeichnet etwaige Senken im Geländemodell mit dem Wert minus eins. Anhand des  $i$ -Wertes können relativ zu den Koordinaten  $(x, y)$  der betrachteten Rasterzelle auch die Koordinaten  $(x_i, y_i)$  der niedrigsten Nachbarzelle ermittelt werden.

Außerdem wird noch ein Rasterdatensatz **Coordinates** erzeugt, welcher für jede Rasterzelle die zugehörigen Koordinaten im Rastersystem als Wert im Format  $[xxxx.yyyy]$  beinhaltet. Verwendet man diesen Rasterdatensatz als **Overlay** eines anderen Rasterdatensatzes, so kann man dort (durch Ablesen) für jede Rasterzelle die Koordinaten im zugrundeliegenden Rastersystem bestimmen.

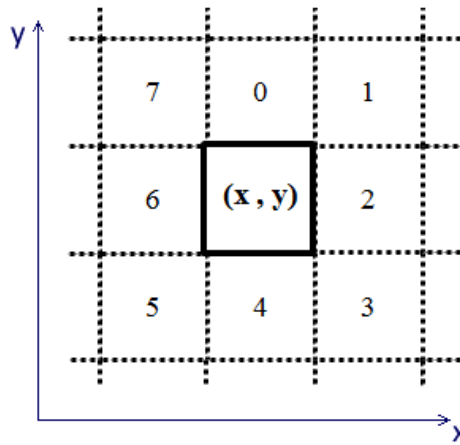


Abbildung 3.3-2 : Konvention für die relative Position  $i$  einer Nachbarzelle in Bezug auf die betrachtete Rasterzelle der Koordinaten  $(x, y)$ .

- b) Für den Mittelpunkt jeder Rasterzelle des *DTM*-Rasters wird der Gradient hin zum Mittelpunkt der niedrigsten Nachbarrasterzelle nach der Formel

$$(8) \quad dz = \frac{h}{l}$$

berechnet. Der Höhenunterschied  $h$  ergibt sich als Differenz der aus dem *DTM*-Raster ausgelesenen Höhenwerten der jeweiligen Rasterzelle  $(x, y)$  und ihrer niedrigsten Nachbarrasterzelle  $(x_i, y_i)$ . Die Variable  $l$  gibt die Entfernung zwischen den Mittelpunkten der beiden Nachbarzellen an und wird ebenfalls über eine SAGA-GIS-Funktion bestimmt. Sie ergibt sich für Nachbarzellen, die in horizontaler oder vertikaler Richtung ( $i = 0, 2, 4, 6$ ) angrenzen, zu

$$(9) \quad l = \text{Rasterauflösung}$$

und für diagonal angrenzende Rasterzellen ( $i = 1, 3, 5, 7$ ) zu

$$(10) \quad l = \sqrt{2} \cdot \text{Rasterauflösung}.$$

Der Rasterdatensatz **Grad** beinhaltet für jede Rasterzelle den spezifischen Abflussgradienten bzw. kennzeichnet etwaige Senken.

- c) **Siehe hierzu Abschnitt 3.4.2.3 – Erweiterung des HD Modells:** Anhand der Vorgabe von separaten Parametrisierungswerten für die Hauptgerinnerasterzellen kann unter Berücksichtigung der Algorithmen des *HD*-Modells die jeweilige Fließgeschwindigkeit einer Hauptgerinnerasterzelle (Rasterdatensatz **RivSpeed**) und die mittlere Fließgeschwindigkeit über den Verlauf des gesamten Flussnetzwerkes (Mittelwert aller Hauptgerinnerasterzellen) ermittelt und ausgegeben werden. Es besteht hier ebenso die Möglichkeit, eine maximale Fließgeschwindigkeit festzusetzen, sodass die Mittelwertberechnung nicht durch artefaktbedingte und nur vereinzelt auftretende Geschwindigkeitspeaks beeinträchtigt wird. Der berechnete Mittelwert wird in einer Log-Datei ausgegeben. Anhand der Analyse dieser Werte kann man die zum Erreichen einer bestimmten mittlere Fließgeschwindigkeit notwendigen Parametrisierungswerte des Hauptgerinneabflusses bestimmen (zur Verwendung siehe im Detail Abschnitt 3.4.2.3).

- d) Ausgabe eines Rasterdatensatzes **HGGrad** der ausschließlich die Gradienten der Hauptgerinnerasterzellen beinhaltet. Dieser Datensatz wird im *LandFlow* Modul direkt eingelesen und hilft die Rechenzeit zu optimieren.

**2.) Abgrenzung des Einzugsgebietes:** Anhand der zweiten Hauptfunktion erfolgt **a)** eine **Abgrenzung des Flusseinzugsgebietes** und kann **b)** für die Wassernutzungsdaten eines spezifischen Rasterdatensatzes, eine **antellige Wasserentnahme** über die Fläche berechnet werden.

- a) Um das Flusseinzugsgebiet abgrenzen zu können, wird für jede Rasterzelle des *DTM*-Rasters untersucht, ob sie in eine Hauptgerinnerasterzelle ( $\rightarrow$ *HGGrid*-Raster) des untersuchten Flussnetzwerks mündet, also zum Gesamtabfluss des Flusseinzugsgebietes beiträgt.

Beginnend mit der Rasterzelle des größten Höhenwertes wird – Rasterzelle auf Rasterzelle folgend – der fortlaufende Abflusspfad berechnet, um so den Abflussverlauf von der ursprünglichen Rasterzelle an nachzuvollziehen. Wird eine Hauptgerinnerasterzelle der Rasterkoordinate  $(x, y)$  erreicht (d.h. diese Koordinate entspricht im *HGGrid*-Raster einer Hauptgerinnerasterzelle), dann liegt ein Abflusspfad in eben diese Hauptgerinnerasterzelle vor. Im ausgegebenen Rasterdatensatz **BasinShare** wird daraufhin für alle entsprechenden Rasterzellen des Pfades als Wert die Koordinate dieser Mündung-Hauptgerinnerasterzelle im Format [xxxxyyyy] gesetzt.<sup>21</sup> Für die Hauptgerinnerasterzelle wird der Wert Null gesetzt. Außerdem wird für jede Rasterzelle des Pfades und die Hauptgerinnerasterzelle die Anzahl der vorherigen Rasterzellen ermittelt, die im Abflussverlauf in die jeweilige Zelle münden, und als Wert im separaten **NumInFlowCells-Raster** gespeichert.

Diese Prozedur wird für alle Rasterzellen in Reihenfolge der abnehmenden Größe ihrer jeweiligen Höhenwerte durchgeführt. Erreicht dabei ein Abflussverlauf keine Hauptgerinnerasterzelle, sondern stößt auf einen bereits bestehenden Abflusspfad (an der entsprechenden Koordinate im *BasinShare*-Raster sind bereits die Koordinaten einer Mündung-Hauptgerinnerasterzelle gesetzt), liegt mit dem aktuellen Abflussverlauf ein Zufluss oder Seitenarm in den bereits bestehenden Abflusspfad vor und die dort bereits gesetzte Mündungskordinate (bzw. Hauptgerinnerasterzellen-Koordinate) wird auch für alle Rasterzellen des aktuellen Abflussverlaufes übernommen. Außerdem werden die Werte des *NumInFlowCells*-Rasters um die Anzahl der zusätzlichen Abflusszellen ergänzt bzw. korrigiert.

Rasterzellen, an deren Koordinate im *BasinShare*-Raster bereits ein Wert gesetzt ist, werden bei dieser Prozedur übersprungen, da sie bereits Teil eines Abflusspfades sind (dies ist bei der Mehrheit der niedrigeren Rasterzellen im *DTM*-Raster der Fall). Die Rasterzellen von Abflussverläufen, die in einer Senke enden, werden in den *BasinShare* mit dem Wert minus eins und im *NumInFlowCells*-Raster als negativer Wert gekennzeichnet. Alle Teil-/ Abflusspfade, die in eine bestimmte Hauptgerinnerasterzelle münden, bilden das Einzugsgebiet der besagten Mündung-Hauptgerinnerasterzelle – von nun an als

---

<sup>21</sup> Die Koordinaten sind in der *RivFlow*-Anwendung bisher auf jeweils vier Stellen limitiert, was einem Rastersystem mit einer maximalen Größe von 9999 x 9999 Rasterzellen entspricht. Der Koordinatenwert wird hier als achtstellige Zahl gesetzt, deren vier erste Ziffern die x-Koordinaten und die letzten vier Ziffern die y-Koordinate repräsentieren.

**Teileinzugsgebiet** bezeichnet. Nach der Bestimmung aller Teileinzugsgebiete liegt mit dem *BasinShare*-Raster ein Datensatz vor, in dem allen Hauptgerinnerasterzellen der Wert Null und allen Rasterzellen, die Teil des Flusseinzugsgebiets sind, der Koordinatenwert ihrer jeweiligen Mündungsrasterzelle zugeordnet ist und damit die Grenzen des Flusseinzugsgebiets bestimmt wurden. Gebiete außerhalb des Flusseinzugsgebiets und Senken haben den Wert minus eins.

- b) Wird beim *RiverBasin*-Modul ein georeferenzierter Rasterdatensatz mit spezifischen Wasserentnahmewerten in der Fläche des Flusseinzugsgebiets in  $\text{m}^3/\text{s}$  vorgegeben, kann mit dieser Funktion ein Rasterdatensatz **statWUse** der **anteiligen Entnahmen** erzeugt werden. Abhängig von der gewählten Methode erfolgt eine anteilige Wasserentnahme entweder aus den Hauptgerinnerasterzellen oder aber aus allen Rasterzellen eines Teileinzugsgebiets. Für eine detailliertere Beschreibung der anteiligen Flächenwasserentnahme und möglicher Probleme siehe *Abschnitt 3.3.2.2 – Dynamische Wasserentnahme und Abflussreduktion*.

### **GridCombination**

Dieses Modul dient der Erzeugung eines Rasterdatensatzes, der die flächenbasierte *dynamische Wassernutzung* innerhalb des Flusseinzugsgebietes beschreibt. Hierfür können verschiedene Arten von Wassernutzung bei zeitlicher Übereinstimmung miteinander kombiniert werden. Im vorliegenden Fall ist das Modul auf die Wassernutzungssektoren des *WaterGAP*-Modells (siehe Unterkapitel 3.1.3) zugeschnitten und kombiniert dessen Jahresmittelwerte *Haushalt*, *Industrie* und *Tierhaltung*, mit den monatlichen Mittelwerten der *Bewässerung* und gibt diese in Form eines Rasterdatensatzes aus, der aus den Werten der resultierenden Gesamtwassernutzung pro Rasterzelle (Monatsmittelwerte) besteht. Das *GridCombination*-Modul ist darauf ausgelegt große Mengen an vorher normierten Rasterdaten automatisiert zu kombinieren und unter normierten Dateinamen abzuspeichern, sodass die Daten vom *LandFlow*-Modul im Verlauf einer Simulation dynamisch eingelesen werden können ( $\rightarrow$ *Dynamische Wasserentnahme*). Bei den Wassernutzungsdaten wird zwischen Wasserentnahmen (withdrawal) und Wasserverbrauch (consumption) unterschieden. Das Modul gibt die Rasterdaten mit den normierten Dateinamen **,TotalWUse\_Jahr\_Tag'** aus. Diese Daten liegen, abhängig von den Eingangsdaten, in der Einheit  $\text{m}^3/\text{s}$  oder  $\text{m}^3/\text{Monat}$  vor.

### **3.3.2.2 Primärmodul**

#### **LandFlow**

Beim *LandFlow*-Modul handelt es sich um das Kernelement der *RivFlow*-Anwendung. Mit Hilfe der Funktionen dieses Primärmoduls lassen sich die lateralen Wasserflüsse innerhalb des Flusseinzugsgebiets simulieren. Auf eine Rasterzelle bezogen verdeutlicht Abbildung 3.3-3 die Prozesse der Abflusssimulation mittels des erweiterten *HD*-Modells (siehe Abschnitt 3.4.2.3), wie sie mit dem *LandFlow*-Modul umgesetzt wurden.

Als wesentliches Ergebnis des *LandFlow*-Moduls wird für den Simulationszeitraum die Wasserflussbilanz des Hauptstroms als das Tagesmittel des Abflusses in  $\text{m}^3/\text{s}$  je Hauptgerinnerasterzelle ausgegeben. Ferner wird der Tagesmittelwert des Abflusses [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] für bis zu drei Evaluierungspunkte einzeln gespeichert.

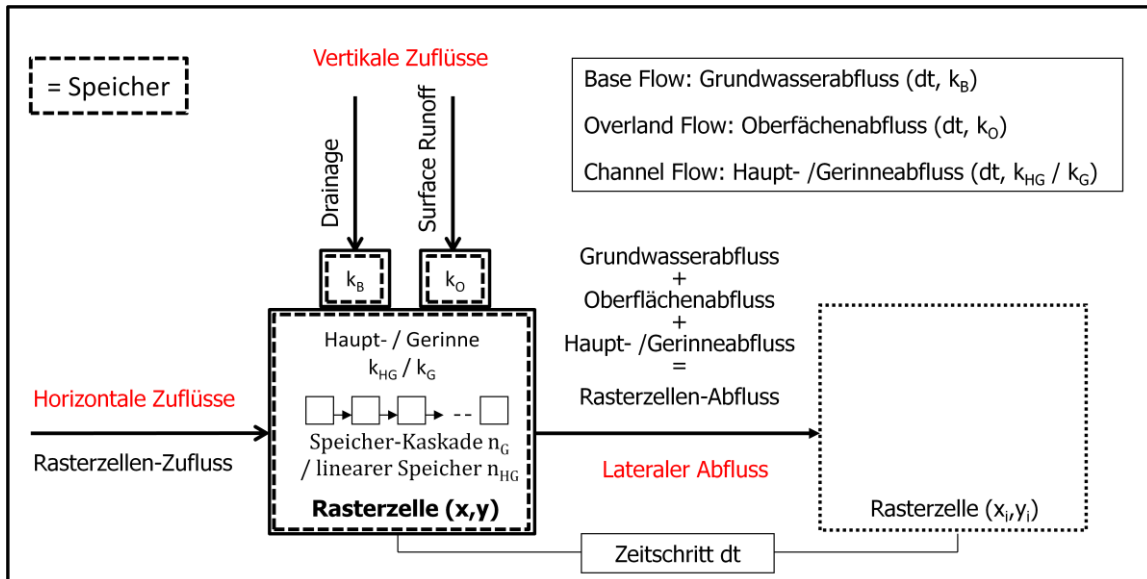


Abbildung 3.3-3 : Zufluss- und Ablaufprozesse einer Rasterzelle nach dem erweiterten HD-Modell.

Die Eingabedaten umfassen notwendige und optionale Rasterdaten, Simulationsparameter, die Parametrisierungswerte des *HD*-Modells sowie eine Anzahl von optionalen Einstellungs- und Analysemöglichkeiten. Abbildung 3.3-4 zeigt die verschiedenen Kategorien der Eingabemaske des *LandFlow*-Moduls. Auf Basis dieser Kategorien sollen im Folgenden die einzelnen Funktionen und Auswahlmöglichkeiten sowie die für eine Simulation notwendigen Einstellungen *des LandFlow*-Moduls beschrieben werden.

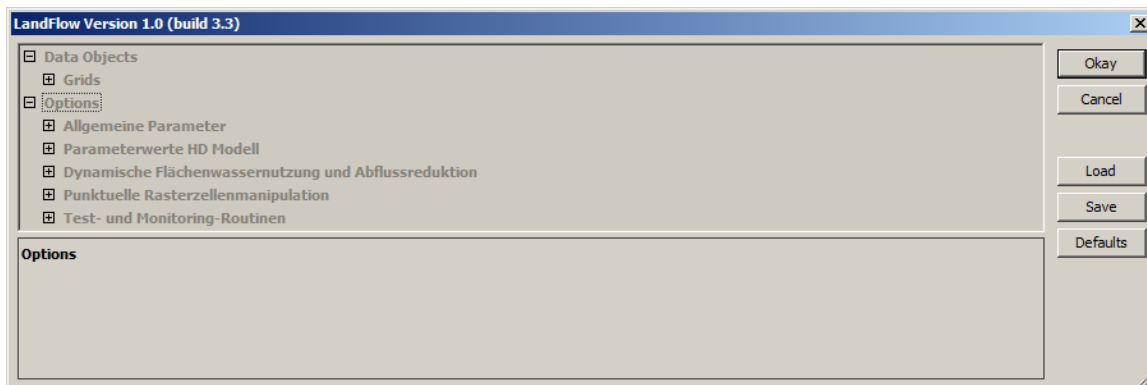


Abbildung 3.3-4 : Eingabemaske des *LandFlow*-Moduls. Übersicht der Kategorien.

**Ein- und Ausgaberrasterdaten:** Die obere Hälfte der Eingabemaske ist den Rasterdatensätzen vorbehalten. Hier wird zunächst das Referenzraster system gesetzt ( $\rightarrow$ Grid-System), also dasjenige Format, in dem die Rasterdatensätze für diese Simulation vorliegen. Hieran anschließend werden die Raster, die während der Simulation eingelesen werden sollen, ausgewählt (Eingabedaten). Außerdem finden sich hier auch diejenigen Rasterdatensätze, die im Verlauf der Anwendung des *LandFlow*-Moduls erstellt und ausgegeben werden (siehe Abbildung 3.3-5).



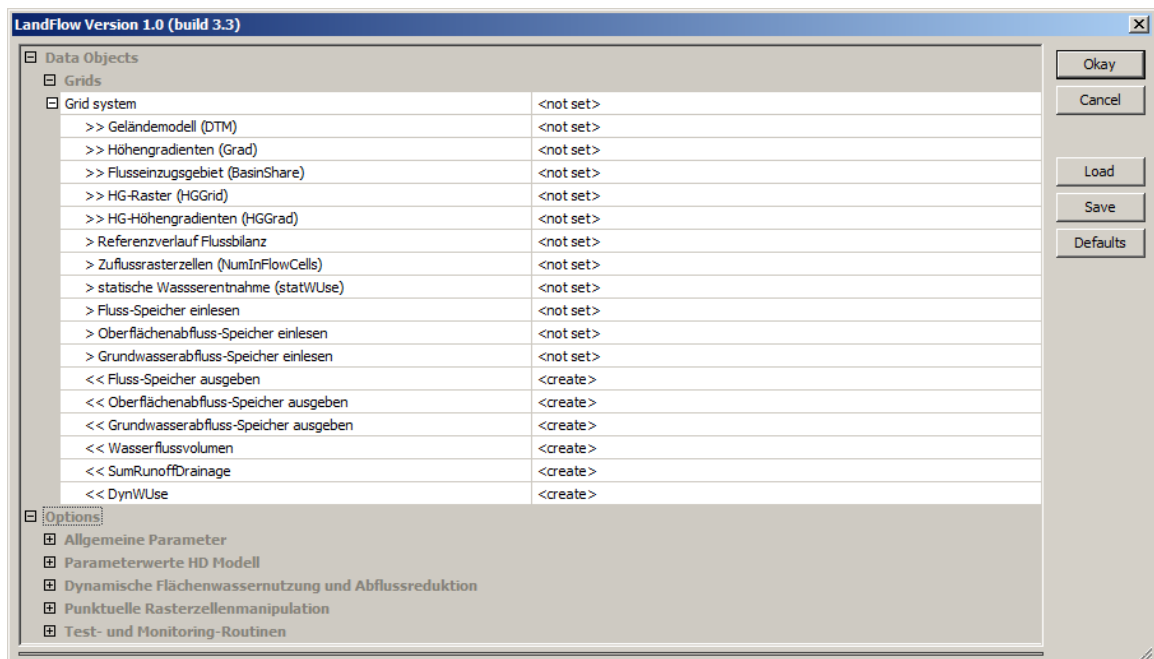


Abbildung 3.3-5 : Eingabemaske LandFlow-Modul. Auswahl der Ein- und Ausgaberrasterdaten.

Notwendige Eingabedaten sind das *Geländemodell* ( $\rightarrow$ DTM-Raster), welches zugleich innerhalb des *LandFlow*-Moduls als Referenzraster für alle Simulationsprozesse dient, die *Höhengradienten* ( $\rightarrow$ Grad-Raster) und die Abgrenzung des *Flusseinzugsgebiets* ( $\rightarrow$ BasinShare-Raster). Daneben werden für das erweiterte *HD*-Modell noch das *Hauptgerinneraster* ( $\rightarrow$ HGGrid-Raster), die *Höhengradienten der Hauptgerinnerasterzellen* ( $\rightarrow$ HGGrad-Raster) und der *Referenzverlauf der Flussbilanz* (linearer Verlauf des Hauptstroms, für den die Wasserflussbilanz ausgegeben werden soll) benötigt. Optional können Speicherwerte vorheriger Simulationen eingelesen und die Simulation mit diesen initiiert werden ( $\rightarrow$ Fluss-Speicher,  $\rightarrow$ Oberflächenabfluss-Speicher und  $\rightarrow$ Grundwasserabfluss-Speicher). Optionale Rasterdaten sind die Anzahl der jeweiligen *Zuflussrasterzellen* ( $\rightarrow$ NumInFlowCells-Raster, wird für Entnahmefunktion benötigt) und das *statWUse*-Raster (Möglichkeit pro Zeitschritt einen festen Wasserwert der Einheit [m<sup>3</sup>/s] für die gesamte Dauer der Simulation aus dem Abfluss der entsprechenden Rasterzellen 1:1 zu entnehmen).

Die zum Ende der Simulationszeit vorliegenden Speicherwerte der Gerinne bzw. Hauptgerinnerasterzellen ( $\rightarrow$ Fluss-Speicher-Raster) und die Speicher des Oberflächen- sowie Grundwasserabflusses werden als Raster ausgegeben ( $\rightarrow$ Oberflächenabfluss-Speicher-Raster sowie  $\rightarrow$ Grundwasserabfluss-Speicher-Raster). Das Raster des *Wasserabflussvolumens* wird während der Simulation fortwährend aktualisiert und gibt die jeweiligen Rasterzellenzuflüsse des entsprechenden Zeitschritts an. Ferner wird ein Raster erstellt, welches während einer Simulation fortlaufend die Summe über alle vertikalen Zuflüsse (*Surface-Runoff*- und *Drainage*-Werte) der Fläche des *DTMs* bildet ( $\rightarrow$ SumRunOffDrainage-Raster). Wird die Wassernutzung (Wasserentnahme oder -verbrauch) bei der Simulation berücksichtigt, so enthält das Raster *dynWUse* die absoluten oder anteiligen Wassernutzungswerte (je nach ausgewählter Art der Entnahme), die auf monatlicher Basis neu eingelesen und berechnet werden.

**Allgemeine Parameter:** Die nächste Kategorie der Eingabemaske des *LandFlow*-Moduls beinhaltet diverse Simulationsoptionen, verschiedene Parameter und Angaben zu Datei- und Speicherpfaden. Siehe hierfür auch Abbildung 3.3-6.

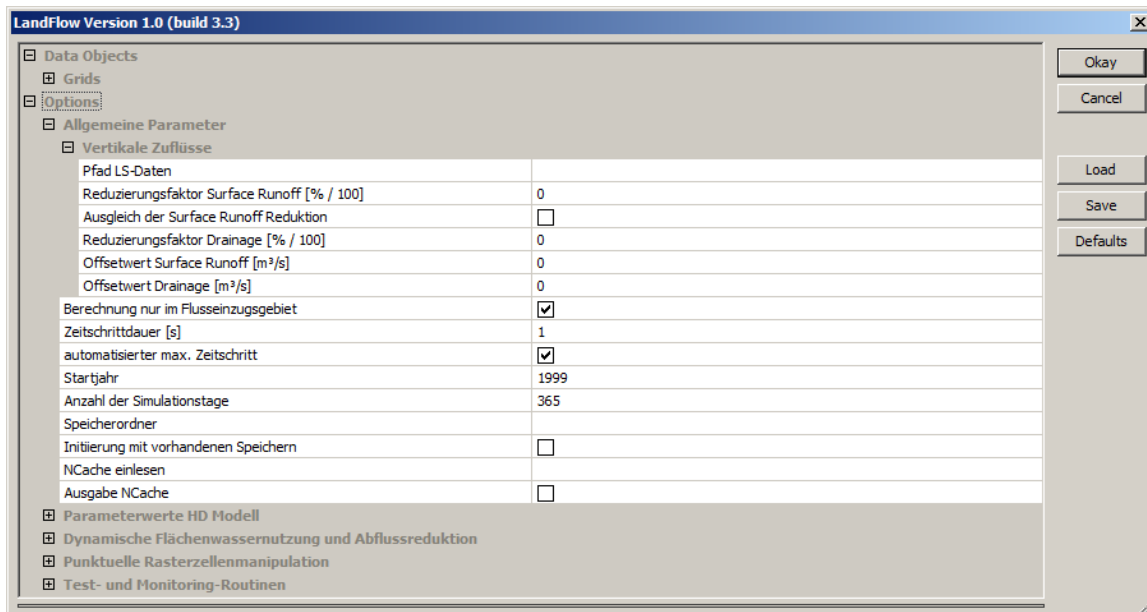


Abbildung 3.3-6 : Eingabemaske LandFlow-Modul. Allgemeine Parameter.

Zunächst kann ausgewählt werden, ob eine Simulation nur im Bereich des Flusseinzugsgebiets oder über das gesamte Geländemodell (DTM-Raster) durchgeführt werden soll. Die Festlegung der Zeitschrittlänge eines Simulationsschrittes kann manuell erfolgen ( $\rightarrow$ Zeitschrittdauer) oder die höchstmögliche Zeitschrittdauer ( $\rightarrow$ automatisierter max. Zeitschritt) wird berechnet. Die maximal zulässige Zeitschritthöchstdauer hängt im Wesentlichen von den berechneten Fließgeschwindigkeiten ab. Es gilt die Regel, dass die in einem Zeitschritt zurückgelegte Flussdistanz auf die Abmessung einer Rasterzelle beschränkt bleiben muss (stellt sich die manuell festgelegte Zeitschrittdauer als zu groß heraus, wird die Eingabe vom Programm auf den zulässigen Höchstwert korrigiert). In dieser Kategorie werden auch die Angaben zum *Startjahr* der Simulation (Simulation startet immer zum 1. Januar des Startjahres), zur Anzahl der *Simulationstage* (hierüber wird die Länge der Simulation gesteuert) und zum gewünschten *Speicherordner* gemacht, an dem die Ergebnisdaten der Simulation gespeichert werden sollen (für jede Simulation wird dort ein Speicherordner angelegt, der nach dem Zeitpunkt des Simulationsstartes im Format [Datum\_Uhrzeit] benannt ist). An dieser Stelle erfolgen auch die Angaben zum Speicherort der *SL-Daten*, also der benötigten *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Eingabedaten des Landoberflächenschemas. Diese Daten müssen in demselben Ordner mit der normierten Benennung **sr runoff\_Jahr\_Tag** bzw. **drainage\_Jahr\_Tag** für den gesamten, gewählten Simulationszeitraum vorliegen. Hier können die Werte des *Surface Runoffs* und der *Drainage* jeweils um einen bestimmten prozentualen Faktor reduziert oder je Rasterzelle ein fester Offsetwert in der Einheit  $m^3/s$  hinzuaddiert werden (für die Anwendung siehe Kapitel 4.2 und 4.3). Über die Auswahl der Funktion „Ausgleich der Surface Runoff Reduktion“ besteht des Weiteren die Möglichkeit, dass je Zeitschritt und Rasterzelle die errechnete Wassermenge einer prozentualen Reduktion des *Surface Runoffs*, als Ausgleich der *Drainage* hinzugefügt wird, sodass die Bilanz der vertikalen Zuflüsse je Rasterzelle insgesamt ausgeglichen bleibt.

Ferner kann an dieser Stelle bestimmt werden, ob für die Simulation eine *Initialisierung der Speicher mit vorhandenen Werten* erfolgen soll. Dies bedeutet, dass z.B. für eine neue Simulation mit Startzeitpunkt 1. Januar 1999, die letzten Speicherwerte einer vorherigen Simulation mit Laufzeit bis zum 31. Dezember 1998 eingelesen werden, die neue Simulation also mit bereits eingeschwungenen Speichern starten kann. Wird eine Simulation hingegen mit leeren Speichern gestartet, so müssen die Speicher zunächst erst einschwingen (sich auffüllen) ehe die Simulati-

onsergebnisse an Aussagekraft gewinnen – was abhängig von der Zeitschrittdauer in einer Simulation einige Wochen dauern kann. Um eine Simulation mit vorhandenen Speicherwerten zu initialisieren, müssen sowohl die Rasterdatensätze der Speicher ( $\rightarrow$ Fluss-Speicher,  $\rightarrow$ Oberflächenabfluss-Speicher und  $\rightarrow$ Grundwasserabfluss-Speicher) als auch die Speicherdatei des Kaskaden-speichers *NCache.txt* ( $\rightarrow$ NCache einlesen) eingelesen werden. Über die Auswahlmöglichkeit ‚Ausgabe NCache‘ wird der NCache am Ende einer Simulation als Textdatei gespeichert (eine der Grundvoraussetzungen um eine spätere Simulation mit diesen Speicherwerten zu initialisieren).

**Parameterwerte des erweiterten HD-Modells:** An dieser Stelle können die Modellparameter des erweiterten HD-Modells variiert werden, siehe Abbildung 3.3-7. Die über die Parametrisierung in Kapitel 3.4 ermittelten optimalen Parametrisierungswerte des erweiterten HD-Modells für eine 5-km-Auflösung sind die Voreinstellung. Außerdem kann hier eine maximale mittlere Abflussgeschwindigkeit erzwungen ( $\rightarrow$ obere Geschwindigkeitsgrenze erzwingen) und hierfür eine spezifische Obergrenze in km/h festgelegt werden ( $\rightarrow$ oberer Abflussgeschwindigkeitsgrenzwert), auf die dann im Verlauf einer Simulation die mittlere Geschwindigkeit jedes Wasserabflussprozesses begrenzt wird.

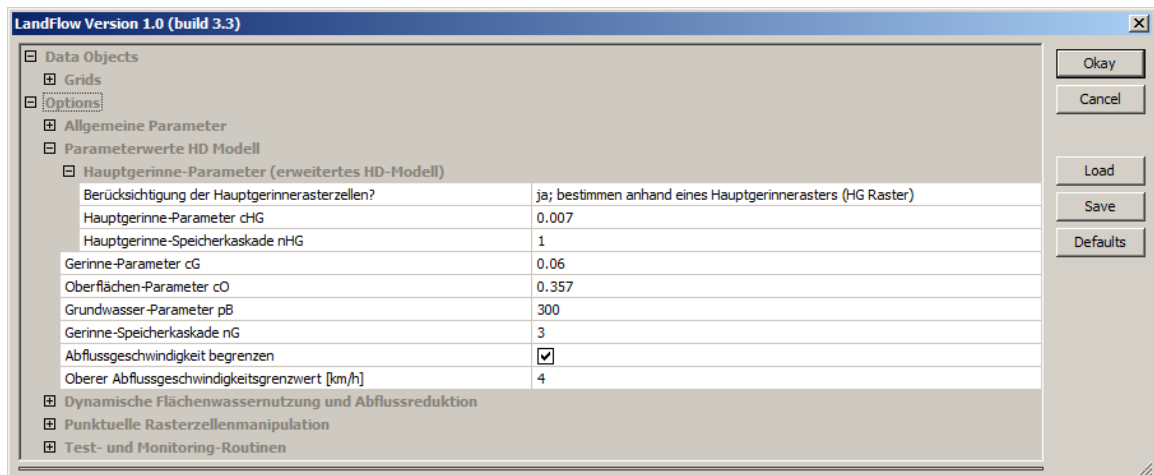


Abbildung 3.3-7 : Eingabemaske LandFlow-Modul. Parameterwerte des erweiterten HD-Modells.

Eine wesentliche Neuerung des erweiterten HD-Modells ist die *Berücksichtigung der Hauptgerinnerasterzellen* (siehe den späteren Abschnitt 3.4.2.3). In Kapitel 3.4 – Exkurs II wird eine Auswahl von Möglichkeiten zur Abgrenzung/Bestimmung der Hauptgerinnerasterzellen erläutert. In die *RivFlow*-Anwendung wurde bisher aber nur die Bestimmungsmethode über ein statisches Hauptgerinneraster ( $\rightarrow$ HGGrid-Raster) implementiert, welches im Vorfeld mit dem *RiverGrid-Generation*-Modul erzeugt werden muss (siehe Erläuterungen im vorherigen Abschnitt 3.3.2.1 – *RiverGridGeneration*). Die voreingestellten, optimalen Parameterwerte des Hauptgerinneabflusses ( $\rightarrow$ Hauptgerinne-Parameter *cHG* und  $\rightarrow$ Hauptgerinne-Speicherkaskade *nHG*) können variiert werden. Es besteht hier auch die Option, die Berücksichtigung von Hauptgerinnerasterzellen explizit auszuschließen, womit eine Abflusssimulation nach dem ursprünglichen HD-Modell durchgeführt werden würde.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Bitte beachten: Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei einer Simulation nach dem ursprünglichen HD-Modell – ohne die extra Berücksichtigung von Hauptgerinnerasterzellen – die optimalen Parametrisierungswerte des Gerinneabflusses  $c_G$  und  $n_G$ , von denen einer optimalen Parametri-

Über die Eingabemaske lassen sich die Modellparameterwerte des Gerinne-, Oberflächen- und Grundwasserabflusses ( $\rightarrow$ Gerinne-Parameter  $cG$ ,  $\rightarrow$ Oberflächen-Parameter  $cO$  und  $\rightarrow$ Grundwasserparameter  $pB$ ) und die Speicheranzahl des Gerinneabflusses ( $\rightarrow$ Gerinne-Speicherkaskaden  $nG$ ) verändern. Die Speicheranzahl des Oberflächen- und Grundwasserabflusses ist im Quellcode mit dem Wert 1 festgelegt.

**Dynamische Flächenwassernutzung und Abflussreduktion:** In dieser Kategorie des *LandFlow*-Moduls können notwendige Berechnungsgrundlagen und Parameter für die dynamische Flächenwassernutzung und eine statische Reduzierung des Abflusses gesetzt werden. Im Rahmen der Flächenwassernutzung sollen folgende beide Regeln gelten: Wasserentnahmen können grundsätzlich nur aus dem Wasserabfluss von Gerinne- und Hauptgerinnerasterzellen getätigt werden und der resultierende Wasserabfluss darf keine negativen Werte, sondern allenfalls den Wert Null annehmen (**Entnahmekonvention**). Diese Konvention entspricht nicht unbedingt einem realen Entnahme- und Abflussverhalten, ist aber notwendig, um eine Abflusssimulation mittels des erweiterten *HD*-Modells fehlerfrei durchführen zu können. Abbildung 3.3-8 können die verschiedenen Einstellungsoptionen entnommen werden.

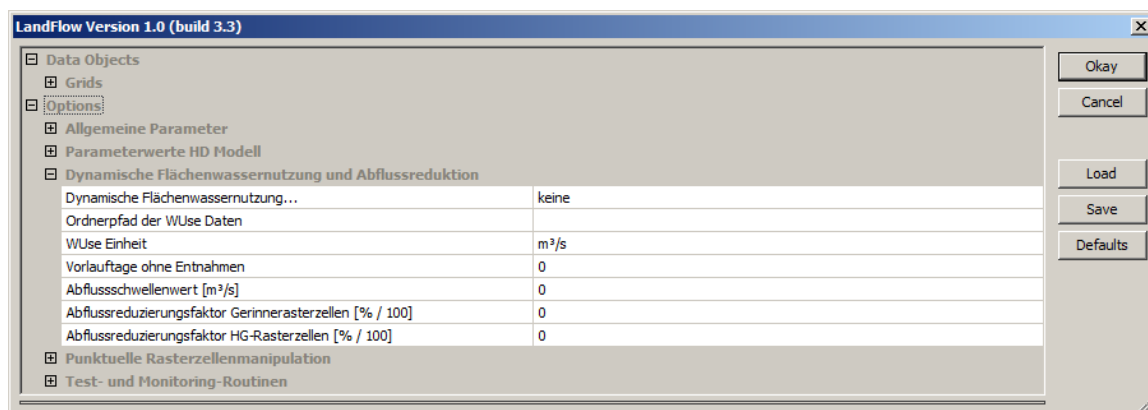


Abbildung 3.3-8 : Eingabemaske *LandFlow*-Modul. Dynamische Wasserentnahme und Abflussreduktion.

Wesentlicher Bestandteil der Grunddatenbasis des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten sind die sozioökonomischen Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells (siehe Unterkapitel 3.1.3). Diese Daten müssen zunächst anhand des *GridCombination*-Moduls zu einem Rasterdatensatz zusammengefasst werden, in das Rasterformat des *DTM*-Rasters des Flusseinzugsgebiets umgewandelt werden (geographische Projektion) und in einem hier auszuwählenden Ordner abrufbar sein.

**Mögliche Probleme bei der Wasserentnahme:** Die flächenbasierte dynamische Entnahme von Wasser im Verlaufe einer Simulation des lateralen Wasserabflusses kann aufgrund mehrerer Faktoren problematisch sein und zu Fehlern führen. Die simulierten Wasserabflüsse können zeitlich stark variieren, während die Wassernutzungswerte für längere Zeiträume (Monat oder Jahr) statisch sind. Zum anderen gelten die jeweiligen Wassernutzungswerte einheitlich für eine große Fläche (im Fall des *WaterGAP*-Modells für 50 km x 50 km Flächen) im Gegensatz zu den viel stärker variierenden Abflusswerten in einer höheren Auflösung. Diese zeitlich und räumlich andersgeartete Auflösung der Flächenwassernutzungsdaten auf der einen und des flächenbasierten Wasserabflusses auf der anderen Seite kann bei einer 1:1-Verschneidung dieser Daten in

---

sierung des erweiterten *HD*-Modells abweichen werden (die Werte der Voreinstellung gelten in diesem Fall nicht mehr als optimal).

negativen Abflusswerten resultieren (Wasserentnahme größer als vorhandene Wasserabflussmenge). Drei der hauptsächlichen Gründe für das Auftreten von negativen Abflusswerten sind dabei:

- 1) Die Wassernutzungsdaten einer 0,5-Grad-Auflösung gelten im Fall der Adaptierung für beispielsweise eine 5-km-Auflösung gleichermaßen für hundert 5-km-Rasterzellen, dem Flächenäquivalent einer 50-km-Rasterzelle. Die Abflussanteile sind unter diesen hundert 5-km-Rasterzellen allerdings ungleich verteilt. Gerade höher gelegene Rasterzellen weisen manchmal gar keine oder nur wenige Zuflüsse aus anderen Rasterzellen und damit auch nur geringe Abflüsse auf. Bei diesen Rasterzellen besteht die Gefahr, dass die generierten Abflüsse geringer als die Entnahmen sein könnten und in negativen Abflusswerten resultieren würden.
- 2) Bei den Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells handelt es sich um Jahres- oder Monatsmittelwerte. Über das Jahr können aufgrund regionaler und saisonaler Schwankungen der Abflusswerte, in Zeiten niedriger Wasserabflüsse, die Wasserentnahmen das verfügbare Flusswasservolumen übersteigen.
- 3) Die Wassernutzungsdaten können generell zu hoch oder zu niedrig abgeschätzt worden sein oder möglicherweise entfällt nur ein abweichender Anteil der Wasserentnahmen auf den Wasserhaushalt des Flusseinzugsgebietes, da noch Wasser aus anderen Quellen genutzt wird (z.B. Tiefengrundwasser, Meerwasserentsalzung, Wasserimporte), welches aber nicht im Simulationsprozess des Wasserhaushaltes des Flusseinzugsgebiets berücksichtigt ist.

Die Berücksichtigung der Wassernutzung kann im Simulationsprozess also in vermeintlich negativen Abflusswerten resultieren. Der Einfluss der oben beschriebenen ersten beiden Problemursachen könnte durch eine anteilige Entnahme von Wasser ggf. minimiert werden. Denkbare Lösung wäre dabei sowohl eine zeitlich- als auch räumlich-anteilige Wasserentnahme.

Da jedoch im Rahmen dieser Arbeit keine Informationen vorliegen, die eine zeitliche Relativierung der Entnahmen erlauben würden, wird nur die räumlich-anteilige Wasserentnahme in der Anwendung implementiert. Die räumlich-anteilige Wasserentnahme soll durch zwei verschiedene Methoden ermöglicht werden: 1.) der *anteiligen Entnahme aus den Hauptgerinnerasterzellen* und 2.) der *anteiligen Entnahme aus den Rasterzellen eines Teileinzugsgebietes*. Bei einem Teileinzugsgebiet handelt es sich um die Summe aller Gerinnerasterzellen, die im Verlauf des Abflussprozesses in eine bestimmte Hauptgerinnerasterzelle abfließen bzw. münden.

Bei beiden Methoden wird zunächst die Summe über alle Wasserentnahmen aus den einzelnen Rasterzellen (Gesamtentnahme) eines Teileinzugsgebietes gebildet. Die resultierende Gesamtentnahme wird bei der ersten Methode jeweils direkt dem Wasserabfluss der entsprechenden Hauptgerinnerasterzelle des Teileinzugsgebiets entnommen. Bei der zweiten Methode wird die Gesamtentnahme anteilig auf alle Rasterzellen (inklusive der Hauptgerinnerasterzelle) eines Teileinzugsgebiets aufgeteilt. Maßgeblich für den jeweiligen Anteil einer spezifischen Rasterzelle an der Gesamtentnahme ist die Gesamtanzahl anderer Rasterzellen, die über den Abflussverlauf in diese Rasterzellen münden (entspricht dem jeweiligen Wert der Rasterzellen im *NumInFlowCells*-Raster). Dieser *NumInFlowCells*-Wert jeder Rasterzelle des Teileinzugsgebiets, geteilt durch die Summe aller *NumInFlowCells*-Werte der Rasterzellen des Teileinzugsgebietes, entspricht dem prozentualen Anteil der spezifischen Rasterzelle an der Gesamtentnahme des Teileinzugsgebietes. Dieser Wert mit der Gesamtentnahme multipliziert ergibt also für jede Rasterzelle des Teileinzugsgebiets das anteilig entnommene Wasservolumen. Beide Methoden tragen zwar dazu bei, das Auftreten negativer Abflussmengen weiter zu minimieren, rechnerisch ist ein negativer Wasserabfluss aber weiterhin möglich.

In der Eingabemaske des *LandFlow*-Moduls kann nun also gewählt werden, ob eine dynamische Flächenwassernutzung berücksichtigt werden soll. Ist dies der Fall, so muss der Pfad zu den entsprechenden Wassernutzungsdaten ( $\rightarrow$ *Ordnerpfad WUse-Daten*) angegeben werden. Die *WUse-Daten* werden im Simulationsverlauf dynamisch eingelesen, die anteiligen Entnahmen entsprechend der gewählten Flächenwassernutzungsmethode berechnet und für jeden Monat in das *dynWUse*-Raster geschrieben. Es ist darauf zu achten, dass die Einheit ( $\rightarrow$ *WUse Einheit*) entsprechend des Formats der *WUse-Daten* gewählt wird ( $\text{m}^3/\text{s}$  oder  $\text{m}^3/\text{Monat}$ ). In Hinblick auf die Flächenwassernutzung kann zwischen den beiden oben beschriebenen, räumlich-anteiligen Methoden oder der absoluten Methode (eingelesene *WUse-Daten* werden 1:1 mit den Abflusswerten der entsprechenden Rasterzelle verschnitten) gewählt werden.

Außerdem besteht die Möglichkeit, den Gerinneabfluss aller Rasterzellen oder den Abfluss der Hauptgerinnerasterzellen um einen statischen Faktor [%/100] zu reduzieren ( $\rightarrow$ *Gerinneabflussreduzierung* bzw.  $\rightarrow$ *Hauptgerinneabflussreduzierung*). Für den Fall, dass das *statWUse*-Raster gesetzt wurden (siehe *Ein- und Ausgaberrasterdaten*), werden die dort gesetzten Werte dem resultierenden Wasserabfluss der entsprechenden Rasterzellen zusätzlich 1:1 entnommen.

Bei der Berücksichtigung von Abflussreduzierungen und der dynamischen sowie statischen Flächenwassernutzung kann es in Hinsicht auf den Wasserabfluss der Rasterzellen immer noch vorkommen, dass die simulierten Wasserabflussvolumen kleiner als die vorgesehenen Entnahmen ausfallen, was somit zu negativen Abflusswerten führen würde. Um diesen Umstand zu verhindern, wurden die folgenden beiden Sicherungsfunktionen eingebaut. Zum einen besteht die Möglichkeit, Wasserentnahmen erst nach Ablauf einer definierten Anzahl von Tagen, also einer gewissen Vorlaufzeit vorzunehmen ( $\rightarrow$ *Vorlaufzeit ohne Entnahmen*). Gerade für den Fall einer Simulation mit neu initiierten Speichern können so negative Abflüsse – die durch noch nicht eingeschwungene Speicher verursacht werden können – verhindert werden. Zum anderen wird für jeden Simulationsschritt und vor jeder Wasserentnahme aus dem Abfluss einer Rasterzelle geprüft, ob der errechnete Gerinne- bzw. Hauptgerinneabfluss – unter Berücksichtigung einer potenziellen Abflussreduktion – größer als die **vorgesehene Wasserentnahme** (entsprechend des *dynWUse*- und *statWUse*-Rasters) ist. Stellt sich hier nun aber heraus, dass die vorgesehene Wasserentnahme größer als der errechnete Abfluss ausfällt, so soll nur gerade so viel Wasser entnommen werden, dass der Abfluss für diesen Zeitschritt zwar den Wert Null, aber keinen negativen Wert annimmt ( $\rightarrow$ *Entnahmekonvention*). Die **tatsächliche Wasserentnahme** entspricht dann der Differenz aus der **vorgesehenen Wasserentnahme** und dem errechneten Abfluss. Eine bestimmte Menge Wasser konnte in diesem Zeitschritt somit nicht dem Wasserhaushalt entnommen werden. Diese **nicht berücksichtigte Wasserentnahme** entspricht der Differenz aus vorgesehener und tatsächlicher Wasserentnahme.

Soll zusätzlich verhindert werden, dass der Abfluss im Hauptgerinne zeitweise durch Entnahmen ggf. auf null reduziert wird, kann an dieser Stelle für den Wasserabfluss des Hauptgerinnes ein Schwellenwert in  $\text{m}^3/\text{s}$  gesetzt werden ( $\rightarrow$ *Abflussschwellenwert*), bei dessen Unterschreitung keine Wasserentnahmen mehr vorgenommen werden. Dieses entspricht der Garantie eines Basisabflusses im Hauptgerinne, aus dem kein Wasser entnommen werden kann. Diese Funktion liegt der Überlegung zugrunde, dass es (von kompletten Flussumleitungen einmal abgesehen) technisch nicht immer durchführbar sein könnte, einem Fluss jegliches Wasser zu entnehmen bzw. im Rahmen der Simulation die Reduktion des Abflusses auf unterhalb eines bestimmten Wertes nicht gewollt ist. Wasserentnahmen die aufgrund dieser Funktion nicht getätigt werden können, werden als nicht berücksichtigte Wasserentnahmen gewertet.

Die jeweiligen Werte der vorgesehenen Wasserentnahmen, tatsächlichen Wasserentnahmen und der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen werden als monatliche Summen für das Flusseinzugsgebiet in einer Logdatei protokolliert (siehe hierzu auch den Abschnitt *Test- und Monitoring-Routinen*).

**Punktueller Abflussmanipulation:** Über diese Eingabemaske (siehe Abbildung 3.3-9) soll eine rudimentäre Möglichkeit zu einer punktuellen Abflussmanipulation im Simulationsverlauf geboten werden. Hierzu kann das Abflussverhalten von maximal zwei Rasterzellen – die über ihre Koordinaten zu bestimmen sind – manuell verändert bzw. vorgegeben werden. Diese Manipulation kann nach zwei Methoden erfolgen.

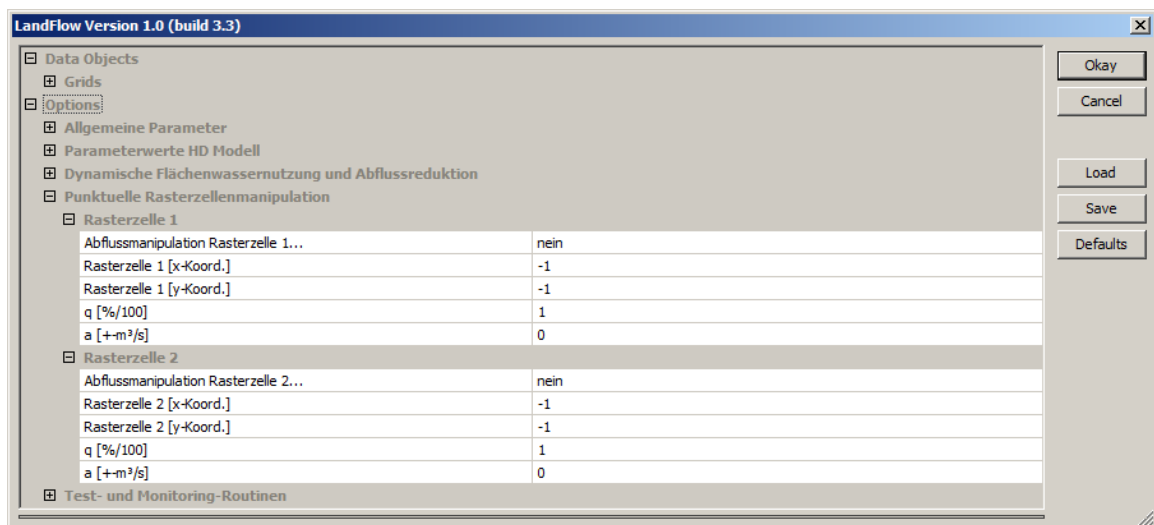


Abbildung 3.3-9: Eingabemaske LandFlow-Modul. Punktueller Abflussmanipulation.

Zum einen können die anhand des (erweiterten) HD-Modells berechneten Abflüsse beider Rasterzellen für den gesamten Simulationsprozess statisch in der Form

$$(11) \quad Abfluss_{\text{verändert}} = (Abfluss_{\text{berechnet}} \cdot p) + a$$

verändert werden ( $\rightarrow$  *berechneten Abfluss verändern*). Wobei es sich bei  $p$  um einen prozentualen Faktor [%/100] und bei  $a$  um ein additives Offset [ $\pm m^3/s$ ] handelt, um die der jeweils berechnete Abfluss pro Simulationsschritt verändert wird.

Zum anderen kann das Abflussverhalten dieser beiden Rasterzellen auch absolut vorgegeben werden. Für die Rasterzelle findet die Berechnung des resultierenden Abflusses dann nicht mehr über das erweiterte HD-Modell statt, sondern wird für den gesamten Simulationsprozess statisch in der Form

$$(12) \quad Abfluss_{\text{vorgegeben}} = (Rasterzellen_{\text{Speicher}} \cdot p) + a$$

vorgegeben ( $\rightarrow$  *Abfluss manuell vorgeben*). Wobei sich der Speicher der Rasterzelle aus allen vertikalen Zuflüssen (*Surface Runoff* und *Drainage*) sowie den horizontalen Zuflüssen (Zuflüsse aus Nachbarzellen) der vorangegangenen Zeitschritte zusammensetzt. Pro Simulationsschritt können nun über den Parameter  $p$  ein fester prozentualer Abfluss [%/100] des Speicherinhaltes und/oder ein fester positiver oder negativer Zu-/Abflussbetrag  $a$  [ $\pm m^3/s$ ] vorgegeben werden.

**Test- und Monitoring-Routinen:** Vom LandFlow-Modul werden die wesentlichen Einstellungsparameter und andere nützliche Informationen des Simulationsprozesses gespeichert und eine

Reihe von Simulationsergebnissen kontinuierlich in Logdateien mitgeschrieben (**Monitoring**), jeweils abgelegt im festgelegten Speicherordner (siehe Abbildung 3.3-10).

In dieser Eingabemaske können bis zu drei **Evaluierungspunkte** ( $x$ -,  $y$ -Koordinate) vorgegeben und benannt werden, deren simulierte Tagesmittelwerte [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] während des gesamten Simulationsverlaufs mitgeschrieben und als Textdateien gespeichert werden ( $\rightarrow$ *Evaluierungspunkt 1 - 3*). Zum anderen muss an dieser Stelle die Ausgangsrasterzelle des untersuchten Flusseinzugsgebietes eingetragen werden ( $\rightarrow$ *Ausgangsrasterzelle*), damit ein *Monitoring* des Gesamtabflusses aus dem Flusseinzugsgebiet heraus durchgeführt werden kann (manuelle Bestimmung der Koordinaten der Ausgangsrasterzelle muss über das *BasinShare*- und *HGGrid*- Raster erfolgen).

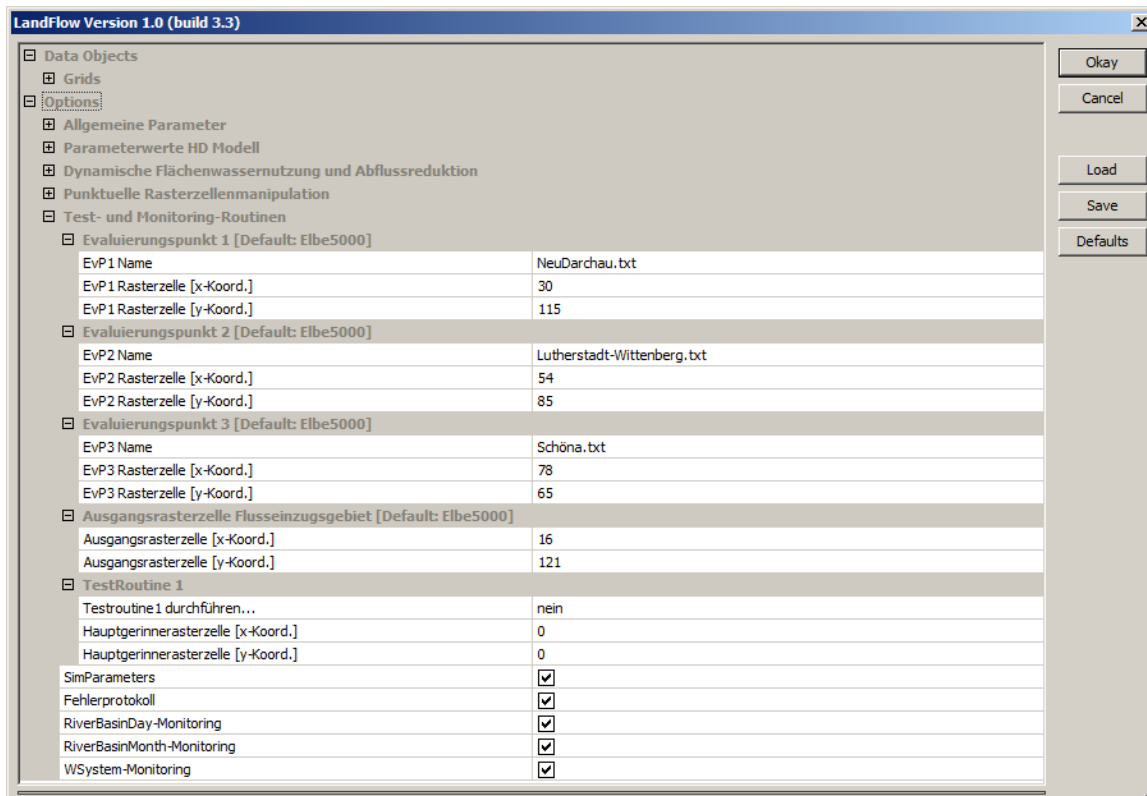


Abbildung 3.3-10 : Eingabemaske LandFlow-Modul. Test- und Monitoring-Routinen.

Über die Aktivierung einer **Testroutine** ( $\rightarrow$ *TestRoutine 1*) wird die Möglichkeit geboten, zu einer angegebenen Hauptgerinnerasterzelle ( $x$ -,  $y$ -Koordinate) verschiedene Simulationswerte monatlich zu speichern. Es kann hier zwischen zwei Methoden gewählt werden. Zum einen kann nur das zugehörige Teileinzugsgebiet dieser Hauptgerinnerasterzelle betrachtet werden ( $\rightarrow$ *nur Teileinzugsgebiet der HG-Rasterzelle*) oder der gesamte Teil des Flusseinzugsgebietes der in diese Hauptgerinnerasterzelle mündet ( $\rightarrow$ *Flusseinzugsgebiet bis zu der HG-Rasterzelle*). Nach Angabe der Koordinaten der spezifischen Hauptgerinnerasterzelle werden für das betrachtete Einzugsgebiet dann jeweils die monatlichen Absolutbeträge [ $\text{m}^3/\text{Monat}$ ] des Wasserflusses, der vertikalen Zuflüsse, der beabsichtigten Entnahmen, sowie der tatsächlich vorgenommenen und nicht berücksichtigten Entnahmen in der Datei „*TestRoutine1.txt*“ gespeichert.

Es kann in dieser Eingabemaske auch ausgewählt werden, ob die Einstellungsparameter und weitere Informationen zum Simulationsprozess ( $\rightarrow$ *SimParameters*), oder das *Monitoring* zu den mittleren Tages- oder Monatswerten innerhalb des Flusseinzugsgebietes ( $\rightarrow$ *RivBasinDay-Monitoring* und  $\rightarrow$ *RivBasinMonth-Monitoring*) und zum *DTM*-Gesamtsystem ( $\rightarrow$ *WSystem*-



*Monitoring*) durchgeführt und als Textdatei gespeichert werden sollen. Alle diese Informationen können als wertvolle Hilfe bei der Analyse, Fehlerabschätzung und späteren Interpretation der Simulationsergebnisse dienen.

Wesentliches Ergebnis des *LandFlow*-Moduls ist die **Abflussbilanz des Hauptstroms** mit den Tagesmittelwerten des simulierten Wasserabflusses [m<sup>3</sup>/s] je Hauptgerinnerasterzelle des betrachteten Hauptstroms über den gesamten Simulationsverlauf. Diese Abflussbilanz wird im Ordner *RivBalance* in Form von Textdateien des Formats [*RivWaterBalance\_Jahr-Tag.txt*] gespeichert. Eine Übersicht und genaue Erläuterung aller Notationen der Ergebnis-, Log- und Monitoringdateien des *LandFlow*-Moduls findet sich in Tabelle A-1 im Anhang.

### 3.3.3 Zusammenfassung der Modularchitektur und der Ergebnisdaten der *RivFlow*-Anwendung

In der folgenden Abbildung 3.3-11 sei noch einmal die Struktur der *RivFlow*-Anwendung mit ihren einzelnen Modulen, sowie den Eingabe- und Ausgabedaten und wesentlichen Ergebnissen veranschaulicht.

Eingabedaten	Module	Ausgabedaten
↳ DTM (grid)	<b>GridManipulation</b>	→ DTM (grid) – bearbeitet
↳ DTM (grid)	<b>RiverGridGeneration</b>	→ HGGrid (grid)
↳ DTM (grid) ↳ HGGrid (grid) ↳ „statisches Entnahmeraster“ (grid)	<b>RiverBasin</b>	→ Grad (grid) → Direc (grid) → HGGrad (grid) → RivSpeed (grid) → Coordinates (grid) → BasinShare (grid) → NumInFlowCells (grid) → statWUse (grid) - anteilig → mittlere HG Geschwindigkeit (txt)
↳ DTM (grid)	<b>GridCombination</b>	→ ‚kombinierte Daten‘ (txt)
↳ DTM (grid) ↳ Grad (grid) ↳ BasinShare (grid) ↳ HGGrid (grid) ↳ HGGrad (grid) ↳ „Referenzverlauf Flussbilanz“ (grid) ↳ NumInFlowCells (grid) ↳ statWUse (grid) ↳ Fluss-Speicher (grid) ↳ Oberflächenabfluss-Speicher (grid) ↳ Grundwasserabfluss-Speicher (grid) ↳ NCache (txt) ↳ Ordnerpfad: ‚WUse Data‘ (grids)	<b>LandFlow</b>	→ Fluss-Speicher (grid) → Oberflächenabfluss-Speicher (grid) → Grundwasserabfluss-Speicher (grid) → Wasserabflussvolumen (grid) → SumRunOffDrainage (grid) → DynWUse (grid) → „Abflussbilanz“ (txt) → „Evaluierungspunkte“ (txt) → „Test- und Monitoringdaten“ (txt)

Abbildung 3.3-11 : Modularchitektur und die Ergebnisdaten der *RivFlow*-Anwendung. <Fett> kennzeichnen die für die Abflusssimulation in jedem Fall notwendigen Daten. (grid) steht für Rasterdaten und (txt) für Daten im Textformat.

### 3.4 Adaption und Erweiterung des *HD*-Modells für höhere Auflösungen

Um das *HD*-Modell daraufhin zu untersuchen, ob es sich auch zur Simulation von Wasserabflussprozessen in einer höheren räumlichen Auflösung eignet, bedarf es zunächst einer erneuten Parametrisierung des zugrundeliegenden naturwissenschaftlichen Modells, d.h. der erneuten Bestimmung der Modellparameterwerte  $c_G$  und  $c_O$  sowie der Anzahl der Speicher  $n_G$  für die höhere Auflösung. Diese Notwendigkeit erklärt sich zum einen durch die auflösungsabhängigen Algorithmen des *HD*-Modells, zum anderen durch die wechselseitige Beeinflussung der drei verschiedenen Abflussprozesse des *HD*-Modells über die Fläche des Flusseinzugsgebietes, mit einer nun räumlich und zeitlich höheren Simulationsauflösung. Dieser Parametrisierungsprozess wird im Folgenden detailliert und nachvollziehbar beschrieben, um auch in Bezug auf andere Auflösung reproduzierbar angewendet werden zu können.

Über das *HD*-Modell wird die Verweildauer (*Lagtime*) von Wasser in einer Gitterbox in Hinsicht auf die jeweilige Abflussart berechnet (siehe Abschnitt 3.1.2.4). Eine Gitterbox der ursprünglichen Größe 50 km x 50 km (ursprüngliche *HD*-Modell-Auflösung) mit der Lagtime  $\tau$  untergliedert sich bei einer Steigerung der Auflösung auf z.B. 5 km in nun hundert Gitterboxen der Größe 5 km x 5 km. Jede dieser Gitterboxen hat jetzt aber eine eigene, vom jeweiligen Gradienten abhängige *Lagtime* (siehe Abbildung 3.4-1). Aus Kontinuitätsgründen muss gelten, dass der jeweilige Zu- und Abfluss einer 50-km-Rasterzelle dem Zufluss in eine entsprechende Fläche aus 5-km-Rasterzellen hinein und auch dem Abfluss aus dieser heraus näherungsweise entsprechen muss.

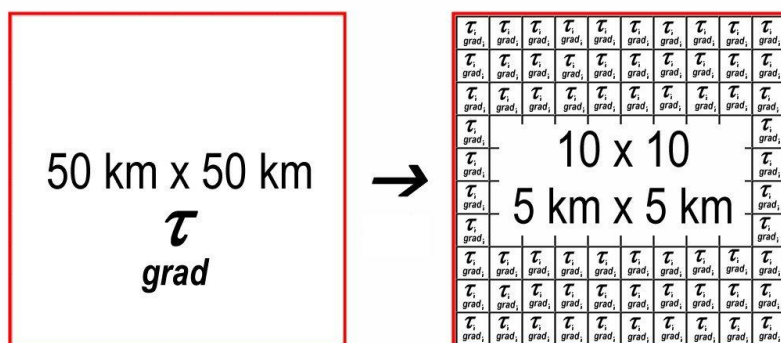


Abbildung 3.4-1: Steigerung der Auflösung 50-km-Rasterzellen auf 5-km-Rasterzellen. Jede der Rasterzellen hat eine spezifische *Lagtime*  $\tau$ , die in erster Linie durch den Gradienten  $grad$  zur niedrigsten Nachbarzelle bestimmt wird.

Das Ergebnis der 50 km-Parametrisierung kann jedoch nur mittelbar als Ausgangspunkt der Parametrisierung für eine höhere Auflösung dienen. Zum einen, da die ursprüngliche 50-km-Parametrisierung des *HD*-Modells manuell durch das *Anfitten* an reale Messwerte erfolgte und somit keine direkte numerische Parametrisierungsgrundlage darstellt, die für höhere Auflösungen adaptiert werden könnte. Zum anderen, weil die erneute Parametrisierung des *HD*-Modells für eine 5-km-Auflösung mit Eingangsdaten einer (teils) höheren Auflösung (dies betrifft in jedem Fall die Auflösung des Geländemodells) durchgeführt werden wird und daher von vornherein auch repräsentativere Parametrisierungswerte für die 5-km-Auflösung vermuten lässt.

## Parametrisierungsprozess

Wie bereits für die 50-km-Auflösung erfolgt die Parametrisierung des *HD*-Modells für eine höhere Auflösung auch über den manuellen Abgleich simulierter und gemessener Werte des Abflussvolumens des Hauptstroms eines Flusseinzugsgebietes. Für diese Parametrisierung ist ein Flusseinzugsgebiet zu wählen, dessen Hauptstrom möglichst wenig künstliche Eingriffe in die Abflussprozesse aufweist (z.B. sozioökonomische Einflussfaktoren wie Wasserentnahmen oder Wasserregulierungsmaßnahmen) und dessen Abfluss nicht durch starke klimatische Schwankungen in einzelnen Flussabschnitten beeinflusst wird. Der Fluss sollte ferner ein Einzugsgebiet aufweisen, dessen Größe eine repräsentative Parametrisierung in Bezug auf andere Flusseinzugsgebiete zulässt (dieser Umstand soll als erfüllt gelten, solange es sich um eines der hundert größten Flusseinzugsgebiete der Erde handelt). Die Simulationen erfolgen mit Hilfe der *RivFlow*-Anwendung (siehe Kapitel 3.3), in deren Primärmodul *LandFlow* das *HD*-Modell implementiert wurde.

Die aus den vertikalen Zuflüssen (*Surface Runoff* und *Drainage*) resultierenden Oberflächen- und Grundwasserabflüsse einer Rasterzelle, können über die jeweilige *Lagtime* direkt numerisch bestimmt werden. Die für den Abgleich der simulierten und gemessenen Abflussvolumen eigentlich relevanten horizontalen Rasterzellenabflüsse (Gerinneabfluss) ergeben sich aber als Resultat der kombinierten Abflussprozesse in jeder einzelnen Rasterzelle und als Folge der langfristigen, schrittweise aufeinander folgenden Interaktionen der horizontalen Abflüsse aller Rasterzellen des Flusseinzugsgebiets untereinander – bei zeitlich variierenden vertikalen Eingangsdaten (Simulationsprozess im *LandFlow*-Modul). Die Komplexität der Schrittfolgen und die dabei parallel anfallende Datenmenge der verschiedenen Speicher lassen eine funktionale und programmatische Bestimmung des resultierenden horizontalen Abflusses über die gesamte Fläche – wenn überhaupt – daher nur unter einem sehr großen Aufwand möglich erscheinen. Die Parametrisierung wird daher nicht automatisiert durchgeführt werden können.

Wie bei der ursprünglichen Parametrisierung des *HD*-Modells wird deshalb auch hier der Ansatz der iterativen Parametrisierung verfolgt. Die Modellparameterwerte und die optimale Anzahl der Speicher werden dabei durch einen iterativen, manuellen Abgleich simulierter und gemessener Tagesflusswerte optimiert, um so letztendlich die optimale Parametrisierung zu ermitteln. Dies bedeutet, dass für jede untersuchte Kombination an Parametrisierungswerten eine Simulation des Abflussvolumens über eine gewisse Zeitdauer (es werden hierfür mindestens drei Jahre angesetzt) durchgeführt werden muss. Diese Simulationen dienen nur der Bestimmung der optimalen Parametrisierung des hydrologischen *HD*-Modells, deshalb werden hier auch nur die geophysikalischen Eingangswerte (vertikale Zuflüsse und Gradienten) berücksichtigt, sozioökonomische Einflüsse finden hier zunächst keine Beachtung.

### 3.4.1 Die Evaluationskriterien des Parametrisierungsprozesses

Um nun die Güte einer bestimmten Parametrisierung zu evaluieren, werden für jede Parametrisierung an mehreren Orten des untersuchten Flusssystems (*Evaluierungspunkte*), an denen jeweils auch Messreihen zum Abflussvolumen vorliegen müssen, die simulierten Tagesmittelwerte des Abflussvolumens (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) des Simulationszeitraumes mit den entsprechenden Messwerten in Hinsicht auf die zeitliche und formale Übereinstimmung verglichen. Dieser Vergleich wird zunächst visuell zwischen den abgebildeten simulierten Abflussvolumen der Evaluierungspunkte (*Simulationsskurve*) und den zugehörigen Messdaten (*Messkurve*) durchgeführt.

Zur Validierung des visuellen Vergleichs und der weiteren Präzisierung der Parametrisierung soll anschließend auch noch eine statistische Analyse der Simulationsdaten erfolgen.

Die Evaluierung jeder Parametrisierung erfolgt dabei vor allem auf Basis des Vergleiches von eindeutig identifizierbaren Abflussmaxima (**Referenzpeaks**), die einander sowohl in der Mess- als auch in allen jeweiligen Simulationskurven zugeordnet werden können. Abflussmaxima einer Simulationskurve jedoch, die mehrere nah beieinanderliegende Peaks aufweisen, eignen sich nur dann als Referenzpeak, wenn diese Peaks für verschiedene Parametrisierungen im Verhältnis zueinander keinen größeren zeitlichen Fluktuationen unterliegen oder etwaige Aufspaltungen in weitere mehrfache Peaks durchlaufen.

Eine Abschätzung darüber, ob eine bestimmte Simulationskurve der Messkurve am nächsten kommt, kann nicht absolut, sondern nur qualitativ getroffen werden. Denn zum einen wird die manuelle Parametrisierung nur anhand einer diskreten Wertemenge durchgeführt und liefert deshalb auch nur eine diskrete Menge vergleichbarer Ergebnisse. Zum anderen werden viele, im Verlauf des realen Abflussprozess auftretende Einfluss- und Störfaktoren durch das rein hydrologische *HD*-Modell gar nicht oder nur ungenau abgebildet, finden sich in den Messwerten aber sehr wohl berücksichtigt.<sup>23</sup> Auch können bereits die Eingangsdaten der Abflusssimulation (*DTM*-Raster, vertikale Zuflüsse etc.) unterschiedliche Fehlervarianzen oder Ungenauigkeiten aufweisen, sodass auch die optimale Parametrisierung nicht zu einer genauen Übereinstimmung von simulierter Kurve mit der Messkurve führen wird.

Es gilt zu beachten: Ein Abflussmodell mittlerer Komplexität kann und soll keine Simulationsergebnisse hoher Präzision liefern, muss aber eine hinreichende Modellgenauigkeit aufweisen, mit der – bei variierten Eingangsdaten – resultierende tendenzielle Änderungen der Wasserflussmengen noch korrekt abgebildet werden können.

In Hinblick auf die Genauigkeitsabschätzung (Evaluierung) einer Simulationskurve sollen die folgenden Kriterien und Prioritäten gelten (Tabelle 3.4-1).

Priorität	Kriterien für die Genauigkeitsabschätzung (Evaluierung)
1.	Der Grad der zeitlichen Überstimmung von (identifizierbaren) Referenzpeaks in sowohl der Simulations- als auch Messkurve.
2.	Übereinstimmung der <i>Low-Flow</i> -Bereiche von Simulations- und Messkurve
3.	Die Ähnlichkeit des Kurvenverlaufs von Simulations- und Messkurve (z.B. Anzahl und Abfolge der Peaks, Fluktuationen etc.)
4.	Das Maß der gegenseitigen Übereinstimmung der Referenzpeaks in Bezug auf das Abflussvolumen von Simulations- und Messkurve

Tabelle 3.4-1 : Bewertungskriterien der Genauigkeitsabschätzung und deren Priorität.

<sup>23</sup> Es gilt zu beachten, dass es sich nur bei den erhobenen Messwerten um die effektiven Wasserabflussvolumen handelt – als Ergebnis der natürlichen Zuflüsse und Abflüsse, künstlichen Entnahmen und Einleitungen sowie aller anderen das Abflussvolumen beeinflussende Faktoren. Die an dieser Stelle simulierten Abflussvolumen basieren bisher nur auf den vertikalen, niederschlagsbedingten Zuflüssen und den Gradienten des Geländemodells, berücksichtigen aber keine künstlichen Entnahmen/Einleitungen oder andere das Wasserabflussvolumen beeinflussende Faktoren.

Die zeitliche Übereinstimmung der Referenzpeaks wird als das primäre Kriterium der Evaluation betrachtet, da auch die Algorithmen des *HD*-Modells auf die Bestimmung der zeitlichen Komponente des Wasserabflusses abzielen. Sozioökonomische Einflüsse werden im Verlauf des Parametrisierungsprozesses nicht berücksichtigt, ihr Einfluss auf das zeitliche Abflussverhalten kann im Fall eines nur wenig regulierten Hauptstroms aber auch als gering angesehen werden, sodass eine Beeinträchtigung des Parametrisierungsprozesses durch die fehlende Berücksichtigung weitgehend ausgeschlossen werden kann. Das zweite Kriterium ist eine gute zeitliche Übereinstimmung der *Low-Flow*-Bereiche von Simulations- und Messkurve, also den jahreszeitlichen Perioden mit sehr geringen Wasserdurchflussraten. Auch die grundsätzliche Übereinstimmung der Kurvenverläufe stellt ein wichtiges Gütekriterium für Abflussmodell und Parametrisierung dar.

Während des Parametrisierungsprozesses kann hingegen nicht unmittelbar abgeschätzt werden, worin genau generelle Abweichungen in der Höhe des Abflussvolumens bzw. einzelne signifikante Abweichungen bei der Form der Simulationskurve oder der Referenzpeaks begründet liegen. Es kann sich hierbei zum einen um systematische Fehler handeln, die durch ungenaue Modelleingangsdaten verursacht werden (z.B. vertikale Zuflüsse oder Gradienten), oder aber sie beruhen auf Ungenauigkeiten in den naturwissenschaftlichen Modellen. Zum anderen kann die Ursache dieser Abweichungen aber auch in den während der Parametrisierung bisher nicht berücksichtigten sozioökonomischen Einflussfaktoren, wie z.B. einer Wasserentnahme, begründet liegen. Im Verlauf des Parametrisierungsprozesses muss somit erst einmal davon ausgegangen werden, dass eine Kombination aus beiden Ursachen vorliegen kann, eine genauere Bestimmung an dieser Stelle aber nicht möglich ist. Die Übereinstimmung im Abflussvolumen muss aus diesen Gründen daher als das schwächste Kriterium in Hinblick auf die Genauigkeitsabschätzung einer Parametrisierung betrachtet werden.

Weisen die Evaluierungspunkte für unterschiedliche Parametrisierungen eine optimale Übereinstimmung der Simulationskurven mit den Messwerten auf, soll derjenige Evaluierungspunkt ausschlaggebend für die Bestimmung der optimalen Parametrisierung sein, der am dichtesten an der Mündung des Hauptstroms des Flusseinzugsgebietes gelegen ist. Dieses begründet sich im Wesentlichen durch die Zielsetzung dieser Arbeit – die Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten zu simulieren – und der Annahme, dass je genauer die Wasserabflussmengen aus einem Flusseinzugsgebiet heraus simuliert werden, desto besser auch die überwiegende Zahl der Abflussprozesse innerhalb des Flusseinzugsgebietes abgebildet ist.

Auf Basis wiederholter Simulationen und unter stetiger Variation der verschiedenen Parametrisierungswerte und Anzahl der Speicher sowie der anschließenden Evaluierung anhand obiger Kriterien erfolgt so in einer hinreichenden Anzahl iterativer Schritte ein *Anfitten* der Datenkurven des simulierten Abflussvolumens an die Messkurve eines jeden betrachteten Evaluierungspunktes (Messstelle).

### 3.4.2 Parametrisierungsprozess für eine 5-km-Auflösung

Die Adaption des *HD*-Modells an eine höhere Auflösung wurde im Rahmen dieser Arbeit für eine 5-km-Auflösung und in einer dreiteiligen Schrittfolge durchgeführt (siehe Tabelle 3.4-2). Der **erste Schritt** bestand in einer groben Eingrenzung des Bereiches der Parametrisierungswerte. Hierfür wurden nur wenige Simulationen mit dem *HD*-Modell durchgeführt, die sich jedoch über ein breites Spektrum an Parametrisierungswerten erstreckten. Über einen visuellen Abgleich der Simulations- und Messkurven gelangte man so zu einer groben Einschätzung des Wertebereichs.

reiches, in dem die optimalen Parametrisierungswerte für eine 5-km-Auflösung zu vermuten sein werden. Im **zweiten Schritt** wurden dann Parametrisierungen des ursprünglichen *HD*-Modells innerhalb dieses eingegrenzten Wertebereiches durchgeführt und versucht, die besten Parametrisierungswerte für die 5-km-Auflösung zu identifizieren. Obwohl die Simulationsergebnisse unter visueller Betrachtung im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit als noch brauchbar erschienen, konnte keine optimale Parametrisierung genauer bestimmt, sondern nur der Bereich der infrage kommenden Parametrisierungswerte stark eingeschränkt werden. Es wurde daraufhin versucht, mögliche geophysikalische Mechanismen zu identifizieren, die bei der Adaption des *HD*-Modells für höhere Auflösungen eine zusätzliche Rolle im hydrologischen Abflussprozess spielen, im *HD*-Modell berücksichtigt werden können und dessen Modellgenauigkeit potenziell verbessern. Als wesentliches Ergebnis kam es zu einer Modifizierung der Gerinneabflussprozesse, die durch ein erweitertes *HD*-Modell umgesetzt wurde. Im **dritten Schritt** wurde dann auch das erweiterte *HD*-Modell für eine 5-km-Auflösung parametrisiert und die Ergebnisse in Hinblick auf die optimalen Parametrisierungswerte hin evaluiert. Abschließend wurden noch einmal die wesentlichen Parametrisierungsergebnisse des ursprünglichen und des erweiterten *HD*-Modells zusammengefasst.

---

**a) Eingrenzung des Parametrisierungsbereiches**

- Simulationen über ein breites Modellparameterspektrum
- visueller Vergleich von Simulations- und Messkurven

**b) Erster Parametrisierungsansatz – das ursprünglichen *HD*-Modell**

- Simulationen innerhalb des eingegrenzten Wertebereichs
- Evaluierung der verschiedenen Parametrisierungen → Eine optimale Parametrisierung des *HD*-Modells für eine 5-km-Auflösung konnte nicht bestimmt werden.

**c) Zweiter Parametrisierungsansatz – das erweiterte *HD*-Modell**

- Simulationen innerhalb des eingegrenzten Wertebereichs
  - Evaluierung der verschiedenen Parametrisierungen → Optimale Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells für eine 5-km-Auflösung
- 

*Tabelle 3.4-2 : Schrittfolge bei der erstmaligen Adaption des *HD*-Modells an eine höhere Auflösung.*

Die Adaption des *HD*-Modells und die zugrundeliegenden Parametrisierungen für eine räumliche Auflösung von 5 km werden am Flusseinzugsgebiet der Elbe durchgeführt. Die Wahl des Elbeeinzugsgebietes als Grundlage der Parametrisierungen bedingt sich zum einen durch die gute Datenlage, was die Anzahl der Messstationen und die Dauer der zeitlichen Datenerfassung bezüglich der Erhebung der Abflussflussvolumen (Tagesmittelwerte) angeht. Zum anderen zeichnet den Flussverlauf der Elbe eine gewisse Kontinuität bezüglich der Landschaftseigenschaften, des menschlichen Eingriffs und des Klimageschehens aus. So durchläuft die Elbe keine verschiedenen Klimazonen und die Oberflächenbeschaffenheit variiert nicht zwischen Extremen wie Feuchtgebieten und Wüstenlandschaften. Auch die künstlichen Eingriffe in den Flussverlauf des Hauptstroms sind i.A. begrenzt (TÖCKNER et al. 2009: 533). Ab der deutschen Staatsgrenze verzeichnet der Elbe-Hauptstrom bis zum Erreichen des Sperrwerks in Geesthacht bei Hamburg keine größeren wasserbautechnischen Eingriffe in der Form von Staustufen bzw. Dämmen oder signifikante Wasserabzweigungen für z.B. Bewässerungslandwirtschaft, die das Abflussvolumen

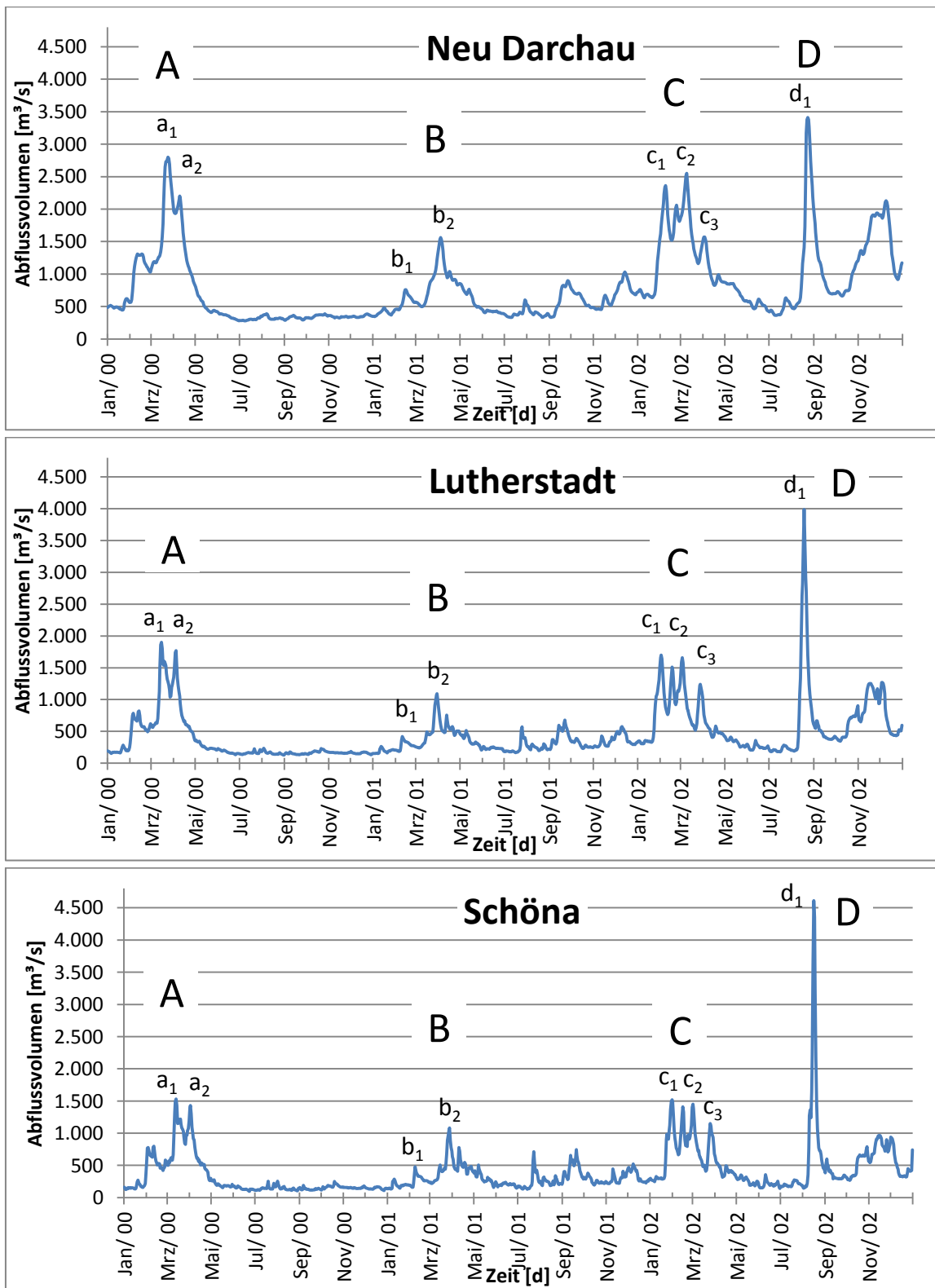
massiv beeinflussen würden. Die Elbe wird außerdem zu den hundert größten Flüssen der Erde gezählt, eine Übertragbarkeit der Parametrisierung des *HD*-Modells auf andere Flusseinzugsgebiete sollte damit gewährleistet sein. In Unterkapitel 4.2.1 finden sich eine ausführlichere Beschreibung und Karten des Elbeeinzugsgebietes.

Als Evaluierungspunkte am Flussverlauf der Elbe werden die deutschen Orte **Schöna** (an der tschechischen Grenze), **Lutherstadt Wittenberg** (Mittellauf) und **Neu Darchau** (nahe bei Geesthacht) ausgewählt. An jedem dieser Orte befindet sich eine Messstation, die Tageswerte zum Abflussvolumen erhebt. Diese drei Orte sind außerdem etwa gleichmäßig über den deutschen Teil des Elbe-Hauptstroms verteilt (siehe Abbildung 4.2-1). Dieses lässt eine Evaluierung der Ergebnisse über den ganzen Flussverlauf zu und würde zugleich potenzielle systematische Abweichungen über den Streckenverlauf sichtbar machen. Die Daten zu den Messstationen werden von der *Flussgebietsgemeinschaft Elbe* (FGG) im Internet bereitgestellt (siehe Abschnitt 3.1.2.5). Der Evaluierungspunkt Neu Darchau liegt kurz vor Geesthacht wo die tideunabhängige Mittel-Elbe durch ein Sperrwerk zur zeitabhängigen Unterelbe ab dem Hamburger Hafen abgegrenzt wird.

Die Abflusssimulation im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf die tideunabhängigen Abschnitte eines Flusseinzugsgebietes, womit Neu Darchau den wichtigsten Evaluierungspunkt in Hinblick auf den simulierten Gesamtwasserabfluss des Hauptgerinnes aus dem Elbe-Flusseinzugsgebiet heraus darstellt. Die Übereinstimmung der simulierten Abflusskurven und der Messwerte an der Stelle Neu Darchau sind daher auch das bestimmende Evaluierungskriterium in Hinblick auf den Gesamtabflussprozess innerhalb des Elbe-Flusseinzugsgebietes. In Bezug auf den Parametrisierungsprozess wird den Simulationskurven von Neu Darchau also die entscheidende Bedeutung beigemessen.

Als Simulationszeitraum für den Parametrisierungsprozess wird die Zeit vom 01. Januar 2000 bis 31. Dezember 2002 (1096 Tage) gewählt. Dabei wird die Simulation in Zeitschrittlängen von 900 Sekunden (15 Minuten) durchgeführt und der Abfluss wird auf eine maximale Geschwindigkeit von 6 km/h begrenzt. Diese Begrenzung erfolgt, um das Auftreten überhöhter Flussgeschwindigkeiten zu verhindern, die durch potenzielle Artefakte im *DTM*-Raster hervorgerufen werden könnten.

Die Abbildung 3.4-2 zeigt die realen Messkurven der drei Evaluierungspunkte Neu Darchau, Lutherstadt Wittenberg und Schöna für den gewählten Simulationszeitraum. Die gekennzeichneten **Abflussmaxima** (A, B, C, D) mit ihren jeweiligen **Referenzpeaks** sind in allen folgenden Simulationen dieses Zeitraums überwiegend abgrenzbar und zu identifizieren (Ausnahmen hiervon werden gesondert erläutert) und sollen die Evaluierungsgrundlage bezüglich der Genauigkeitsabschätzungen der jeweiligen Parametrisierungen bilden. In sowohl den Simulationskurven als auch in der Messkurve ist der Referenzpeak d1, der der Flutwelle des Elbehochwassers von 2002 entspricht, am deutlichsten ausgeprägt. Alle verbleibenden Abflusspeaks lassen sich in den verschiedenen Simulationskurven nicht immer eindeutig identifizieren oder fluktuieren stark in ihrer Form.



Abbildungen 3.4-2 : Messkurven des Abflussvolumens an den Evaluierungspunkten Neu Darchau, Lutherstadt Wittenberg und Schöna für den Zeitraum vom 1. Januar 2000 bis 31. Dezember 2002, Tagesmittelwerte in  $\text{m}^3/\text{s}$ .



### 3.4.2.1 Eingrenzungen des Parametrisierungsbereiches

Im ersten Parametrisierungsschritt werden mit der *RivFlow*-Anwendung 1096-tägige Simulationen für den gewählten Simulationszeitraum durchgeführt, in denen für den Gerinneabfluss der Modellparameter  $c_G$  und die Anzahl der Speicherkaskaden  $n_G$ , und damit die rasterzellenspezifische Lagtime  $\tau_G$  des Gerinneabflusses variiert werden. Hierdurch soll zunächst ein ungefährer Eindruck der Abhängigkeit des Abflussvolumens von den Parametern  $c_G$  und  $n_G$ , sowie deren wechselseitige Beeinflussung erlangt werden. Für den Oberflächenabfluss werden die Parametrisierungswerte des *HD*-Modells in der 50 km-Auflösung übernommen [ $c_0=0,357$ ,  $n_0=1$ ] und der Grundwasserabfluss weist keinen auflösungsabhängigen Modellparameter auf (siehe Abschnitt 3.1.2.4).

Bei jeweiligem Festhalten eines der Parameterwerte  $c_G$  bzw.  $n_G$  werden die in Tabelle 3.4-3 angegebenen Werte für  $n_G$  und  $c_G$  durch alterniert. Die Anzahl der Speicher  $n_G$  werden schrittweise von  $n_G=5$  (ursprüngliche 50-km-Parametrisierung) auf einen Speicher reduziert. Bei der Wahl der Werte für  $c_G$  wird sich erst einmal an dem ursprünglichen  $c_G$  Wert der 50-km-Parametrisierung orientiert und dieser in beide Richtungen um jeweils zwei Zehnerpotenzen variiert.

$n_G$	1; 2; 3; 4; 5
$c_G$	$9,92 \times 10^{-1}$ ; $9,92 \times 10^{-2}$ ; $9,92 \times 10^{-3}$ ; $9,92 \times 10^{-4}$ ; $9,92 \times 10^{-5}$

Tabelle 3.4-3 : Die im ersten Schritt gewählten Parametrisierungswerte für  $n_G$  und  $c_G$ .

Als Ergebnis ergeben sich 25 simulierte Kurven des Abflussvolumens in  $m^3/s$  für jeden der drei Evaluierungspunkte an der Elbe. Stellvertretend sind in Abbildung 3.4-3 die Ergebnisse für Neu Darchau aufgeführt.

Eine Parametrisierung kann nach den aufgestellten Evaluationskriterien dann als optimal angesehen werden, wenn ihre Werte im Vergleich zur Messkurve die bestmögliche zeitliche Übereinstimmung der Referenzpeaks, der *Low-Flow*-Bereiche und einen möglichst ähnlichen Kurvenverlauf aufweisen. Auch die Übereinstimmung im Volumen soll betrachtet werden, wenn auch nur als schwach gewichtetes Evaluationskriterium. Nach dem visuellen Vergleich der Simulations- und Messkurven an den drei Evaluierungspunkten kann der Schluss gezogen werden (siehe als Beispiel Abbildung 3.4-3), dass der optimale Wert für den Modellparameter  $c_G$  (für alle  $n_G$  Werte), innerhalb der Bereiche II bis III, also zwischen  $c_G=9,92 \times 10^{-2}$  (gute Volumenübereinstimmung) und  $c_G=9,92 \times 10^{-3}$  (gute zeitliche Übereinstimmung) liegen muss. Auch ähneln sich innerhalb dieses Bereiches der Verlauf von Simulations- und Messkurve am ehesten und gleiche Abflussmaxima lassen sich visuell zumindest grob identifizieren und einander ungefähr zuordnen. Die *Low-Flow*-Bereiche weisen in den Bereichen II-III ebenfalls die beste zeitliche Übereinstimmung auf.

Die Variation der Anzahl der Speicher  $n_G$  lässt bei dieser visuellen Betrachtung zunächst keinen sichtbaren Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Simulationskurven erkennen. Es ist aber zu beobachten, dass bei festgehaltenem Modellparameterwert  $c_G$  das Abflussvolumen mit geringerer werdender Anzahl an Speichern  $n_G$  etwas absinkt (siehe z.B. Abbildung 3.4-3, Bereich III) und sich den Werten der Messkurve annähert, weshalb im weiteren Parametrisierungsprozess nur noch die Speicherzahl  $n_G=1$  sowie  $n_G=2$  betrachtet werden sollen, welche im Mittel die geringeren Abflussvolumen aufweisen und somit dichter an den Messwerten liegen.

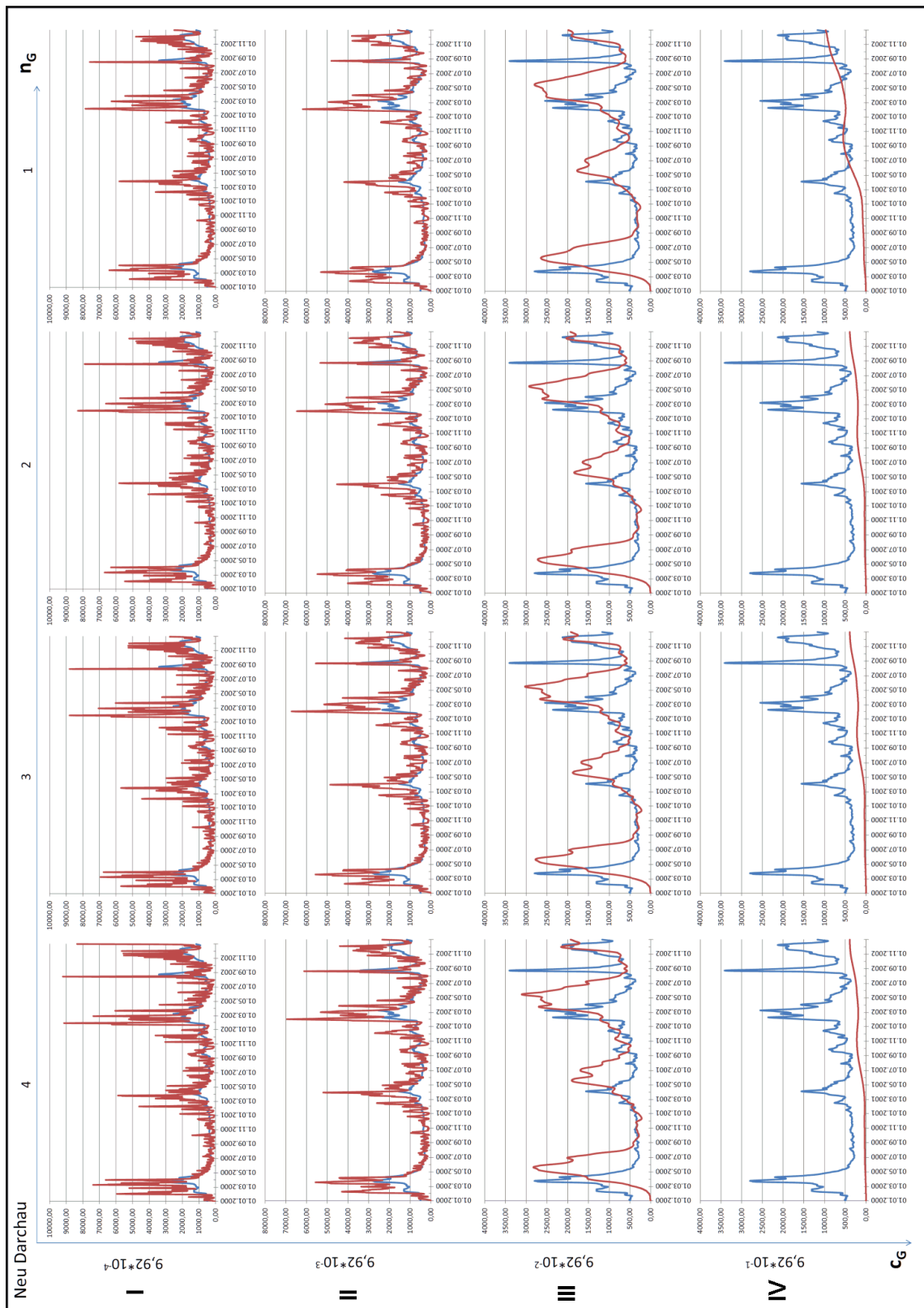


Abbildung 3.4-3: Gegenüberstellung von Simulations- und Messkurven des Abflussvolumens in  $m^3/s$  zur Eingrenzung des Parametrisierungsbereiches, hier am Beispiel Neu Darchau für die Parameterwerte  $n_G=1$  bis  $n_G=4$  und  $c_G=9,92 \times 10^{-4}$  bis  $c_G=9,92 \times 10^{-1}$ .

### 3.4.2.2 Erster Parametrisierungsansatz – Parametrisierung des ursprünglichen HD-Modells

Nach dieser ersten groben Betrachtung gilt es im zweiten Parametrisierungsschritt die Modellparameterwerte des Gerinneabflusses  $c_G$  und die Anzahl der Speicher  $n_G$  im eingegrenzten Intervall  $c_G = [9,92 \times 10^{-2}, 9,92 \times 10^{-3}]$  zu variieren. Die Simulationskurve soll so in Hinsicht auf die Übereinstimmung mit der Messkurve und unter Berücksichtigung der Evaluierungskriterien optimiert werden. Eine testweise Variation der Parametrisierungswerte des Oberflächenabflusses zeigte keine nennenswerten Änderungen, die im Rahmen des Parametrisierungsprozesses ins Gewicht fallen, weshalb mit  $c_o = 0,357$  und  $n_o = 1$  die Werte der 50-km-Parametrisierung beibehalten werden.

---

$n_G$  1 ; 2

$c_G$  (0,9) ; (0,5) ; 0,0225 ; 0,02 ; 0,0175 ; 0,015 ; 0,0125 ; 0,01 ; 0,009 ; 0,0075 ; 0,005

*Tabelle 3.4-4 : Gewählte Parametrisierungswerte für  $n_G$  und  $c_G$  im ersten Parametrisierungsansatz. Die in Klammern aufgeführten Parametrisierungswerte dienten nur der Eingrenzung, wurden jedoch nicht weiter betrachtet.*

Erneut werden Simulationen für den Zeitraum vom 01. Januar 2000 bis 31. Dezember 2002 durchgeführt, jeweils für die in Tabelle 3.4-4 angegebenen Werte der Speicherzahl  $n_G$  und der Modellparameter  $c_G$ . Die Wahl der Werte erfolgte iterativ und in Hinblick auf das bereits eingegrenzte Intervall. Das Ergebnis sind 18 Simulationsdatensätze für jeden der drei Evaluierungspunkte, die abgebildet und ausgewertet werden.

**Visueller Vergleich:** Bei einem ersten visuellen Vergleich der Abflusspeaks der Simulationskurven mit den entsprechenden Referenzpeaks der Messkurve zeigt sich, dass bei langsam zunehmender zeitlicher Übereinstimmung die Fluktuation der simulierten Abflussvolumen und die Höhe der Abflusspeaks unverhältnismäßig stark ansteigen. Die Form der simulierten Kurve beginnt sich im Vergleich zur Messkurve insgesamt stark zu verändern, es bilden sich vermehrt scharfe Peaks (Fluktuationen) über den Kurvenverlauf aus. Wie den hierfür stellvertretenden Abbildungen 3.4-4 bis 3.4-6 des Evaluierungspunktes Neu Darchau entnommen werden kann, tritt für keine Parametrisierung eine zugleich sowohl zeitliche, als auch volumenmäßige Übereinstimmung der Abflusspeaks von Mess- und Simulationskurven auf – es liegt vielmehr ein *trade-off* vor, eine gegenläufige Drift der zeitlichen und volumenmäßigen Übereinstimmung (Unschärfe). Zudem kommt es bei manchen Peaks zu einer Aufspaltung in mehrere Peaks oder dicht beieinander liegende Peak-Spitzen fluktuieren in ihrer relativen Höhenrangfolge. Eine eindeutige Zuordnung dieser Peaks zu den Referenzpeaks der Messkurven und eine Aussage über den Grad der Übereinstimmung sind so vielfach nicht möglich.

Obwohl sich mit kleiner werdenden Parametrisierungswerten auch im *Low-Flow*-Bereich Fluktuationen ausbilden, stimmen die Werte des Niedrigabflusses im Mittel gut mit den Messwerten überein. Über einen rein visuellen Vergleich der Simulations- und Messkurven lassen sich die optimalen Parametrisierungswerte aber nicht bestimmen oder viel weiter eingrenzen. In einer Analyse der Simulationskurven soll im nächsten Schritt der Grad der Übereinstimmung einzelner Referenzpeaks anhand ihrer Koordinaten genauer untersucht werden.

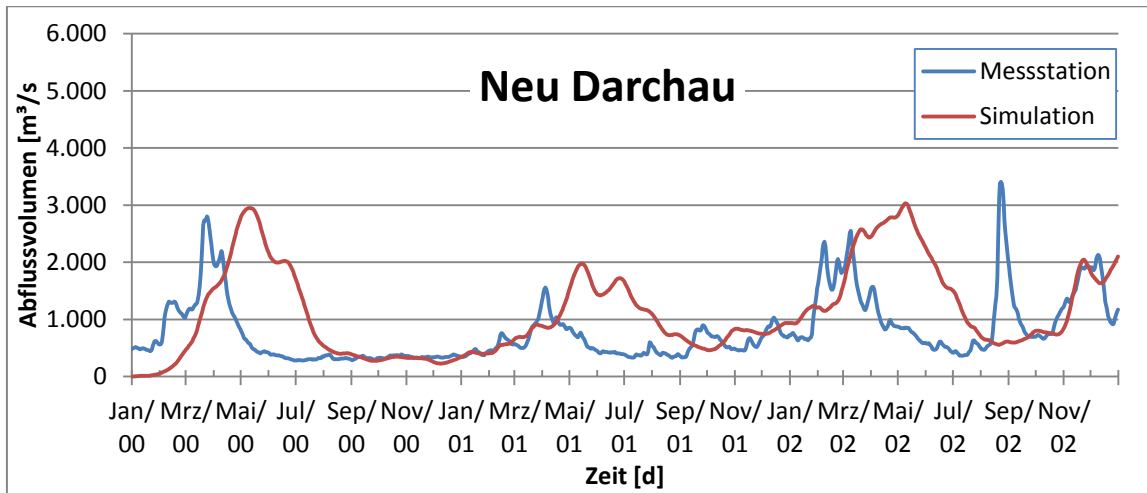


Abbildung 3.4-4: Vergleich der Simulations- und Messkurve des Abflussvolumens der Jahre 2000 bis 2002 am Evaluierungspunkt Neu Darchau für die Parametrisierung  $[n_G=2, c_G=0,09$  und  $n_O=1, c_O=0,357]$ .

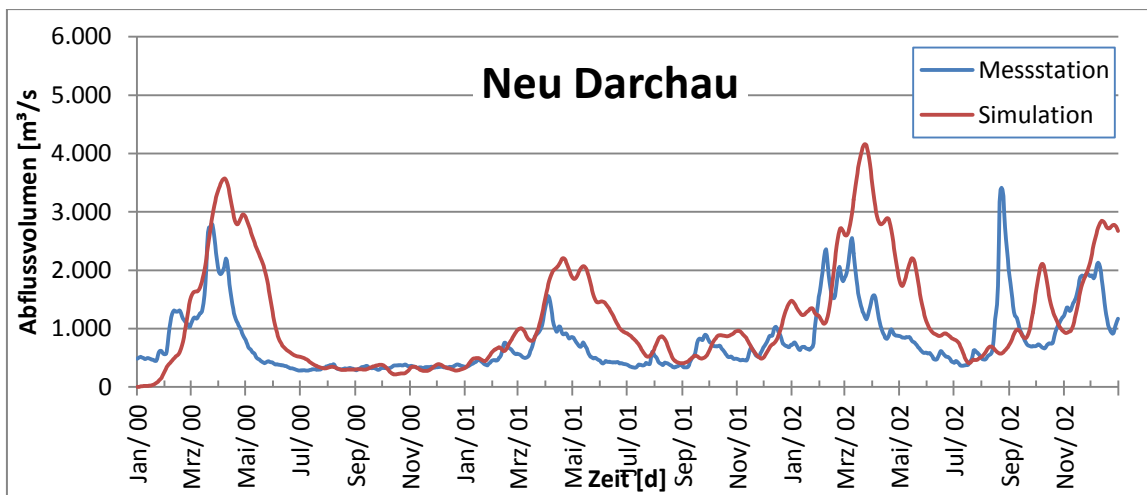


Abbildung 3.4-5: Vergleich der Simulations- und Messkurve des Abflussvolumens der Jahre 2000 bis 2002 am Evaluierungspunkt Neu Darchau für die Parametrisierung  $[n_G=2, c_G=0,05$  und  $n_O=1, c_O=0,357]$

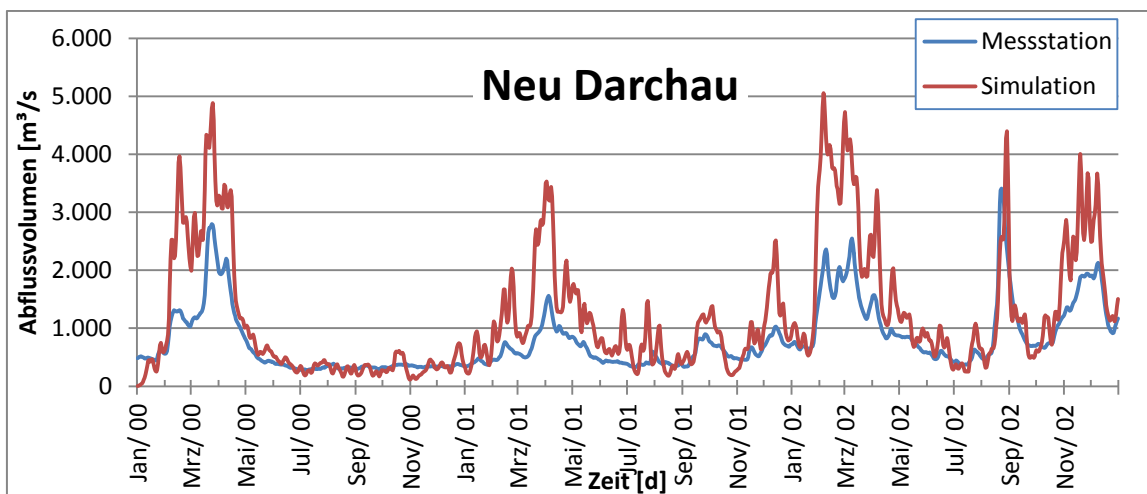


Abbildung 3.4-6: Vergleich der Simulations- und Messkurve des Abflussvolumens der Jahre 2000 bis 2002 am Evaluierungspunkt Neu Darchau für die Parametrisierung  $[n_G=2, c_G=0,01$  und  $n_O=1, c_O=0,357]$

**Exkurs I – Flutpeak Teil 1:** Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Überlegungen angestellt, ob der Abflusspeak *d1* des Elbehochwassers in besonderer Weise als Referenzpeak für die Evaluierung geeignet ist. In der Realität hängt die Ausprägung des Abflussvolumens einer Flutwelle in hohem Maße von der realen Beschaffenheit und insbesondere dem Querschnitt des Flussbettes sowie dem Vorhandensein etwaiger Polder, Überflutungsflächen und Hochwasserschutzanlagen ab. Dies erklärt auch, weshalb die real gemessene Flutwelle (Peak *d1*) bei Schöna das größere Wasservolumen aufweist, da der Verlauf der Elbe hier durch das Elbsandsteingebirge extrem verengt wird, während sich das Wasser flussabwärts (Lutherstadt, Neu Darchau) bereits mehr verteilen konnte (ggf. auch wegen etwaiger Deichbrüche) und der Abflusspeak dadurch in der Höhe abnimmt. Bei einem Abflussmodell mittlerer Komplexität können diese Einflussfaktoren aber nur unzureichend berücksichtigt werden – eine 5-km-Auflösung lässt so z.B. nur wenig Schlüsse auf spezifische Flussverlaufsdetails zu. Es kann somit grundsätzlich also nicht davon ausgegangen werden, dass die hier durchgeführten Abflusssimulationen den Peak einer Flutwelle genauer als andere Abflusspeaks bestimmen wird. Wie genau sich der zeitliche und volumenmäßige Verlauf einer Flutwelle in Abhängigkeit von der Simulationsauflösung ändert und inwiefern das *HD*-Modell überhaupt in der Lage ist dies abzubilden, ist ein eigener Forschungsgegenstand, der hier nicht näher vertieft werden kann. Ein solcher, sehr scharf abgegrenzter Flutwellenpeak bedeutet zugleich aber auch eine gewisse Unabhängigkeit von langfristigen sozioökonomischen Einflussfaktoren, was ihn im Rahmen der Evaluierung eines naturwissenschaftlichen Modells wieder interessanter macht. Bei der Genauigkeitsabschätzung der Parametrisierungen soll der Flutpeak *d1* zwar nicht als einer der Referenzpeaks berücksichtigt werden, wo es später aber sinnvoll erscheint, kann die separate Betrachtung des simulierten Abflussverhaltens des Flutpeaks noch als ein möglicher phänomenologischer Erklärungsansatz dienen.

**Koordinatenvergleich:** In Hinsicht auf den Vergleich der Abflussmaxima können in den Simulationskurven von Lutherstadt Wittenberg und Schöna die einander entsprechenden Referenzpeaks überwiegend identifiziert werden, eine größere Ausnahme hiervon bilden jedoch die Simulationskurven des Evaluierungspunktes Neu Darchau. Für Neu Darchau weisen die Referenzpeaks *a2* und *b1* bei verschiedenen Parametrisierungen stärkere Fluktuation auf, können daher nicht immer eindeutig identifiziert und bei der Evaluation auch nicht berücksichtigt werden (siehe auch Abbildung 3.4-7). Der Referenzpeak *c3* lässt sich für die verschiedenen Parametrisierungen zwar identifizieren, weist aber teilweise erhebliche Schwankungen auf. Die einzelnen Koordinaten der Referenzpeaks wurden aus den Simulationskurven mit Hilfe des Analyseprogrammes *OriginPro* manuell ausgelesen, wobei die x-Koordinate dem Zeitpunkt innerhalb des Simulationszeitraums (Einheit: Tag) und die y-Koordinate dem Abflussvolumen (Einheit:  $\text{m}^3/\text{s}$ ) entspricht.

Die Bestimmung von optimalen Parametrisierungswerten gestaltet sich über den Vergleich der Koordinaten der Referenzpeaks von Simulations- und Messkurve des Evaluierungspunktes Neu Darchau als sehr schwierig. Für  $n_G=1$  und  $n_G=2$  gilt, dass die Referenzpeaks *b2*, *c1* und *c2* für Parametrisierungswerte im Bereich von  $c_G=0,0225$  bis  $c_G=0,0175$  die geringsten zeitlichen Abweichungen zur Messkurve aufweisen und sich diese Abweichungen mit kleiner werdenden  $c_G$  dann wieder erhöhen, während für die Peaks *a1* und *c3* erst im Bereich von  $c_G=0,015$  bis  $c_G=0,0125$  und *d1* erst im Bereich von  $c_G=0,01$  bis  $c_G=0,009$  die besten Übereinstimmungen aufweisen. Abhängig vom  $c_G$  Wert weist ein Teil der Referenzpeaks immer eine zeitliche Abweichung von mehreren Tagen auf. Die zeitlichen Übereinstimmungen der Referenzpeaks variieren

bei verschiedenen Parametrisierungswerten also in unterschiedliche Richtungen. Siehe zur Veranschaulichung auch Abbildung 3.4-7.

Die Referenzpeaks *a2* und *b1* können wie bereits erläutert gar nicht erst berücksichtigt werden, was die Aussagekraft dieser Evaluation über den Koordinatenvergleich weiter verringert. Eine weiterführende statistische Analyse auf Basis der nun noch weiter eingeschränkten Datengrundlage erscheint daher nicht mehr sinnvoll. Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Koordinatenvergleichs kann eine optimale Parametrisierung für den Evaluierungspunkt Neu Darchau nicht bestimmt werden, sondern nur eine Eingrenzung auf einen „optimalen“ Bereich von  $c_G=0,0225$  bis  $c_G=0,0125$  vorgenommen werden, siehe Abbildung 3.4-7. Die Höhe der simulierten Referenzpeaks von Neu Darchau wird in diesem Parametrisierungsbereich um etwa 138 % bis 231 % [ $n_G=1$ ] bzw. 141 % bis 250 % [ $n_G=2$ ] überschätzt, der Flutpeak *d1* ist um 95 % bis 126 % [ $n_G=1$ ] bzw. 105 % bis 140 % [ $n_G=2$ ] abweichend berechnet.

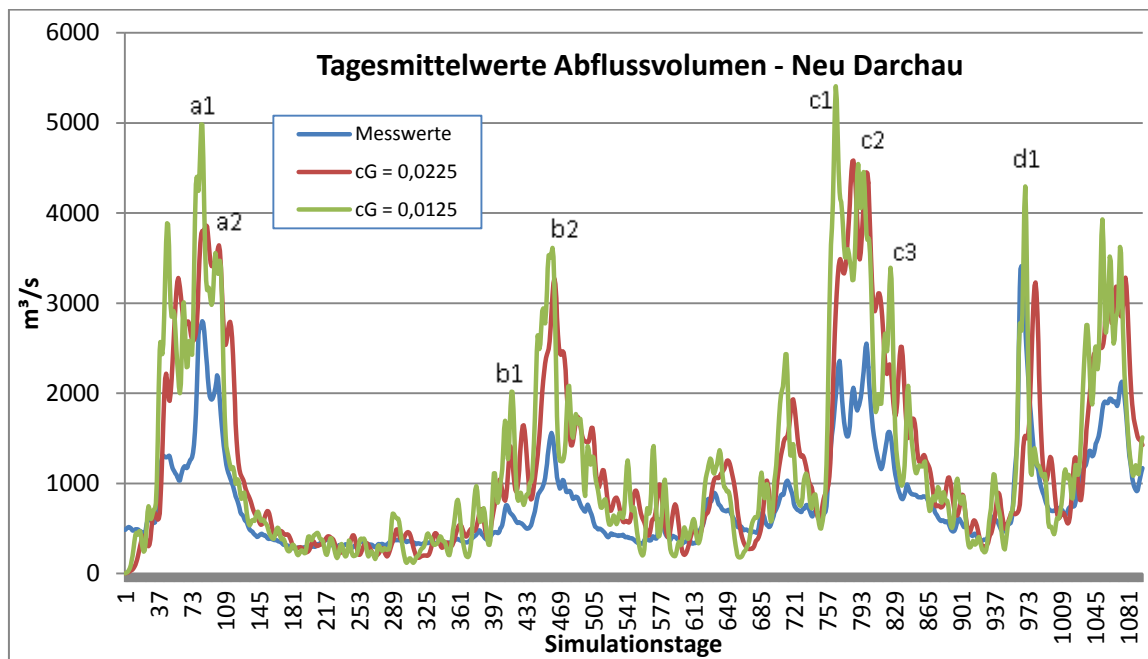


Abbildung 3.4-7: Visueller Vergleich der Abweichungen von Simulations- und Messkurven innerhalb der Grenzen des optimalen Parametrisierungsbereiches des Modellparameters  $c_G$  für den Evaluierungspunkt Neu Darchau (hier für  $n_G=1$  und über den Zeitraum der Jahre 2000 bis 2002).

Im Fall der Evaluierungspunkte Lutherstadt Wittenberg und Schöna ergeben sich eindeutige Ergebnisse. Für Lutherstadt Wittenberg (Abbildung 3.4-8) können die besten zeitlichen Übereinstimmungen mit der Parametrisierung [ $n_G=1$  und  $c_G=0,0075$ ] bzw. [ $n_G=2$  und  $c_G=0,01$ ] und für Schöna (Abbildung 3.4-9) mit [ $n_G=1$  und  $c_G=0,0075$ ] bzw. [ $n_G=2$  und  $c_G=0,009$ ] erreicht werden. Die zeitlichen Abweichungen betragen für diese Parametrisierungen für alle Referenzpeaks zwischen null und zwei Tagen. Die Höhe der Referenzpeaks übersteigt auch im Fall der Simulationen zu Lutherstadt Wittenberg und Schöna die Messwerte erheblich, im Allgemeinen um Faktoren von 179 % bis 320 %. Der Referenzpeak *b1* ist an beiden Orten sogar um 437 % bis 520 % zu groß berechnet. Die Höhe der Flutpeaks *d1* nimmt einen Wert im Bereich von 117 % bis 143 % der Messwerte an.

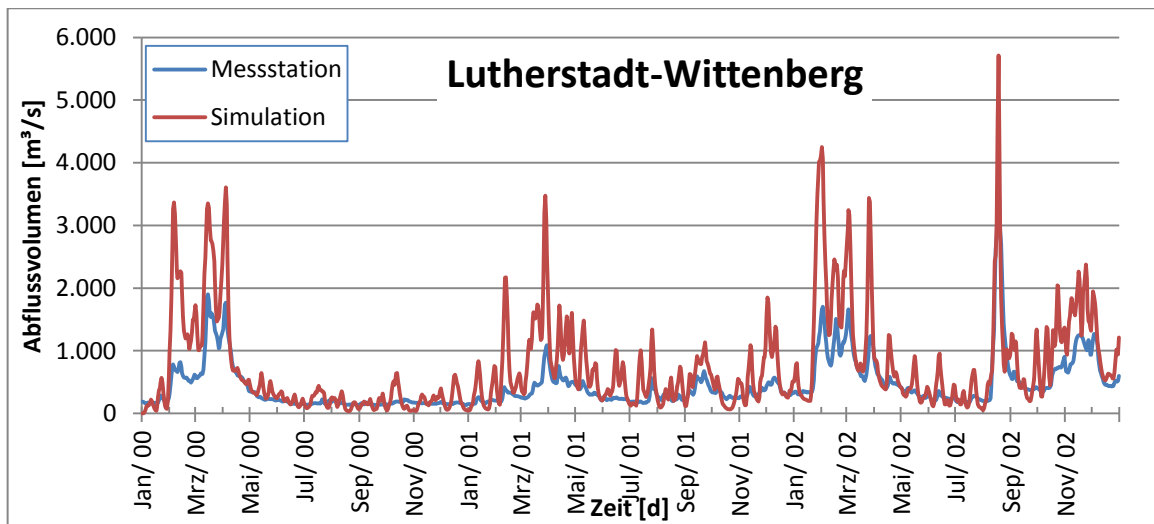


Abbildung 3.4-8: Vergleich der Simulations- und Messkurve des Abflussvolumens der Jahre 2000 bis 2002 am Evaluierungspunkt Lutherstadt Wittenberg für die Parametrisierung [ $n_G=1$ ,  $c_G=0,0075$  und  $n_O=1$  und  $c_O=0,357$ ]

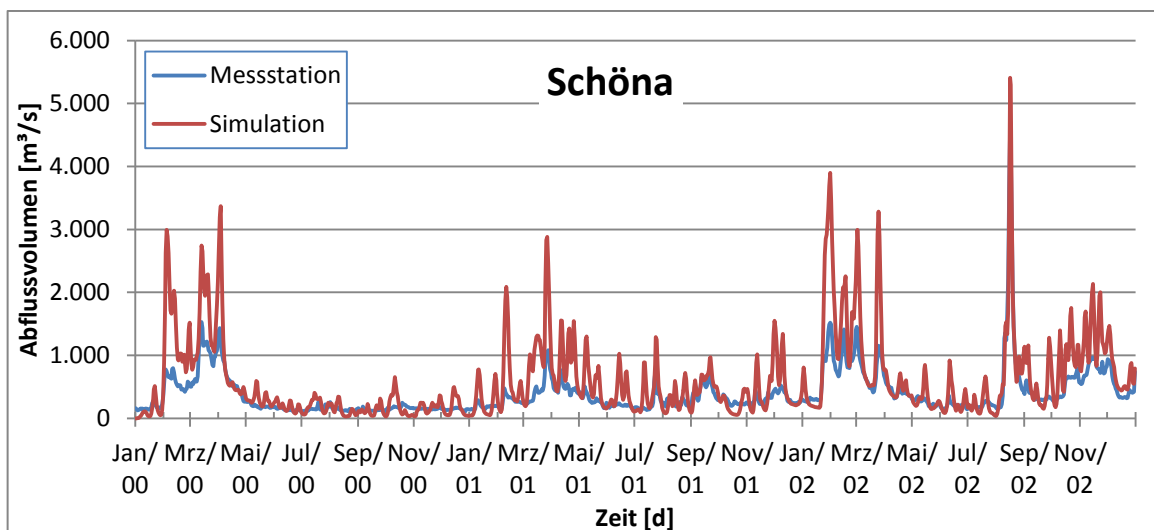


Abbildung 3.4-9: Vergleich der Simulations- und Messkurve des Abflussvolumens der Jahre 2000 bis 2002 am Evaluierungspunkt Schöna für die Parametrisierung [ $n_G=2$ ,  $c_G=0,009$  und  $n_O=1$ ,  $c_O=0,357$ ]

**Fazit:** Ausgehend von den Erwartungen an ein Abflussmodell mittlerer Komplexität liefern einzelne Parametrisierungen des ursprünglichen *HD*-Modell für die höhere räumliche 5-km-Auflösung durchaus brauchbare Ergebnisse in Hinsicht auf die zeitliche Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Abflusswerte. Die Abweichungen im Abflussvolumen sind hoch, stellen an dieser Stelle aber auch kein verwertbares Evaluationskriterium dar. Einige Simulationsergebnisse für den Evaluierungspunkt Neu Darchau können aufgrund stark ausgeprägter Fluktuationen nicht verwendet werden und die simulierten Referenzpeaks von Neu Darchau weisen teils stärkere zeitliche Abweichungen und Variationen untereinander auf als es für die anderen beiden Evaluierungspunkte der Fall ist. Es kann für Neu Darchau deshalb nur ein optimaler Parametrisierungsbereich bestimmt werden, dessen Parametrisierungswerte ebenso wie die Werte der optimalen Parametrisierungen für Lutherstadt Wittenberg und Schöna in Tabelle 3.4-5 zu finden sind.

	Parametrisierungswert(e) $c_G$	Höhenabweichung der Referenzpeaks (ohne d1)	Höhenabweichung des Flutpeaks d1
<b>Neu Darchau</b>	0,0225 bis 0,0125 ( $n_G=1$ ; $n_G=2$ )	138 % bis 250 % (ohne a2, b1)	95 % bis 140 %
<b>Lutherstadt Wittenberg</b>	0,01 ( $n_G=2$ ) und 0,0075 ( $n_G=1$ )	179 % bis 320 % (b1: 437 % bis 520 % )	117 % bis 143 %
<b>Schöna</b>	0,009 ( $n_G=2$ ) und 0,0075 ( $n_G=1$ )		

*Tabelle 3.4-5: Optimale Parametrisierungswerte des HD-Modells jeweils bezogen auf die drei Evaluierungspunkte und der aus diesen Parametrisierungen resultierenden Bereich der Höhenabweichungen der Referenzpeaks.*

Aufgrund der Feststellung, dass Neu Darchau für die Simulation des Wasserhaushaltes des Elbe-Einzugsgebietes als maßgeblicher Evaluierungspunkt anzusehen ist, sein Parametrisierungsbereich aber zugleich keine Schnittmenge mit den jeweils optimalen Parametrisierungen für Lutherstadt Wittenberg und Schöna aufweist, ist die Bestimmung genau einer optimalen Parametrisierung für das HD-Modell an dieser Stelle nicht möglich. Überlegungen, die diskrete Schnittmenge der ermittelten optimalen Parametrisierungen von Lutherstadt Wittenberg und Schöna [ $n_G=1$  und  $c_G=0,0075$ ] als optimale Parametrisierung des HD-Modells in einer 5-km-Auflösung anzusetzen, wurden insofern verworfen, als dass die Simulationskurven am Evaluierungspunkt Neu Darchau für diese Parametrisierungswerte zu den Messwerten eine zeitliche Abweichungen im Bereich von mehreren Tagen aufweisen.

Obwohl eine optimale Parametrisierung des HD-Modells für die 5-km-Auflösung nicht bestimmt werden kann, zeigen die Ergebnisse dennoch die grundsätzliche Adaptabilität des HD-Modells an eine höhere Auflösung. Die zeitlichen Abweichungen – bei einer im Vergleich zur ursprünglichen 50-km-Parametrisierung nun räumlich und zeitlich höheren Simulationsauflösung – bewegen sich nur im Bereich einiger Tage, was zumindest gute monatliche Mittelwerte vermuten lässt und der Zielsetzung des aggregierten Modellsystems genügen sollte. Bei einer aus dem optimalen Parametrisierungsbereich von Neu Darchau willkürlich gewählten Parametrisierung wie z.B. [ $n_G=2$  und  $c_G=0,0125$ ] ergeben sich für die Simulationskurven aller Evaluierungspunkte im Mittel nur Abweichungen von etwa 1 bis 2 Tagen. Trotz der erheblich ausgeprägten Fluktuationen über den Kurvenverlauf (insbesondere für Neu Darchau) und der dadurch teils eingeschränkten zeitlichen Auflösung, kann das HD-Modell mit einer solchen Parametrisierung bereits die an ein Abflussmodell mittlerer Komplexität gestellten Erwartungen weitestgehend erfüllen.

Dennoch soll im weiteren Verlauf geprüft werden, ob die zeitliche Auflösung des HD-Modells nicht noch verbessert, vor allem aber die Fluktuationen über den Kurvenverlauf vermindert werden können und sich damit eine bessere Übereinstimmung in Kurvenform und -verlauf erzielen lässt. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Verbesserung der Simulationsergebnisse von Neu Darchau und der Bestimmung einer optimalen Parametrisierung. Im nächsten Schritt gilt es deshalb zu untersuchen, ob Einflussfaktoren identifiziert werden können, die nicht auf der 50-km-Skala, wohl aber auf einer kleineren Skala eine zusätzliche Rolle spielen und deshalb bei der Berechnung der Ablaufprozesse einer höheren Auflösung berücksichtigt werden müssten. Ein naheliegender Schritt ist, mit diesen Überlegungen zunächst beim eigentlichen Untersuchungsgegenstand einer Abflussanalyse anzusetzen – dem Gerinnenetzwerk.



### 3.4.2.3 Gerinne- vs. Hauptgerinneabfluss – eine Erweiterung des HD-Modells

**Theoretische Betrachtung:** Vor dem Hintergrund, dass das ursprüngliche *HD*-Modell für die Berechnung von Ablaufprozessen auf Rasterzellen mit einer Auflösung von 50 km konzipiert wurde, erscheint die Betrachtung nur einer Form von generalisiertem Gerinneabfluss als vollkommen ausreichend. Eine 50-km-Rasterzelle vereint in sich sowohl die kleineren Gerinnenetzwerke (kleinere Abflussvolumen und niedrigere Flussgeschwindigkeiten) als auch etwaige Teile des eigentlichen Flussnetzwerkes (größere Abflussvolumen und höhere Flussgeschwindigkeiten), im Folgenden als Hauptgerinne bezeichnet. Verläuft durch eine solche 50-km-Rasterzelle nun ein Hauptgerinne, also ein Teil des eigentlichen Flussnetzwerkes, so fließt dessen Wasser nun rechnerisch über die gesamte Fläche der 50-km-Rasterzelle und mit einer erheblich geringeren Geschwindigkeit als im realen Fluss ab. Eine Unterscheidung zwischen reinem Gerinnenetzwerk und ausschließlichem Hauptgerinnenetzwerk ist bei einer 50-km-Auflösung nicht möglich und die Parametrisierung über eine generelle Form von Gerinneabfluss daher sinnvoll.

Bei einer 5-km-Auflösung stellt sich die Situation anders dar. Mit einer Vergrößerung der Auflösung auf 5 km und damit auch der Erhöhung der Anzahl der Rasterzellen pro Fläche, treten deutlichere Unterschiede zwischen den Rasterzellen in Hinsicht auf den bisherigen Gerinneabfluss auf. Bestimmte Rasterzellen lassen sich nun als solche Zellen verorten, die ein großes Einzugsgebiet haben (der Abfluss vieler anderer Rasterzellen mündet in diese Rasterzelle) und die deshalb einen besonders hohen Wasserzufluss aufweisen (→**Hauptgerinnerasterzelle**). Auf der anderen Seite gibt es Rasterzellen, die gar keine oder nur geringe Zuflüsse aus einer kleinen Anzahl anderer Zellen erhalten (→**Gerinnerasterzelle**). Zur Verdeutlichung siehe auch Abbildung 3.4-10.

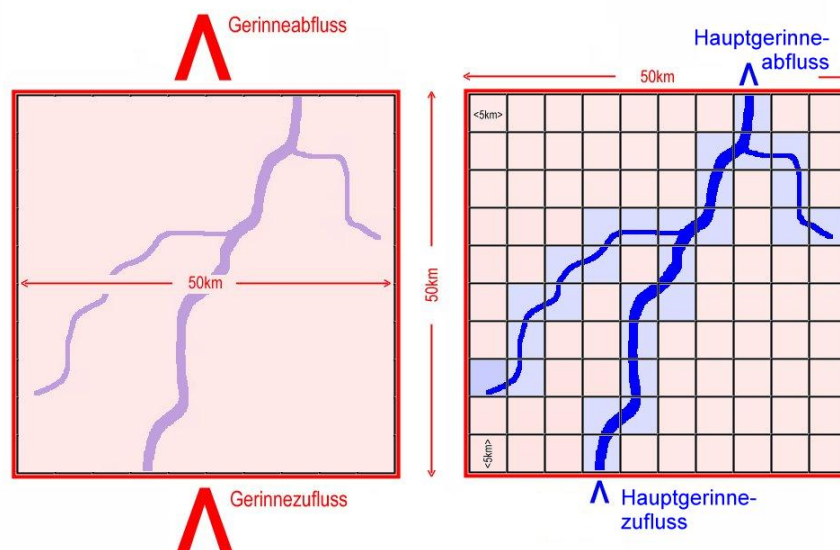


Abbildung 3.4-10 : Unterscheidbarkeit von Gerinnerasterzellen (rosa) und Hauptgerinnerasterzellen (hellblau) bei höherer Auflösung.

Auf der 2.500 km<sup>2</sup> Fläche der ursprünglichen 50-km-Rasterzelle sammelt sich nun der überwiegende Anteil des Wassers in den 5-km-Hauptgerinnerasterzellen und muss damit über eine viel kleinere Fläche und mit einer höheren Geschwindigkeit abfließen. Physikalisch kann dieses Phänomen mit der notwendigen Kontinuität des Volumenstroms  $Q$  erklärt werden. Diejenige Wassermenge, die vorher eine 50 km breite Rasterzelle in einer bestimmten Zeit  $t$  durchflossen hat,

muss nun im Mittel in derselben Zeit die gleiche Strecke über die schmalere Hauptgerinnerasterzellen zurücklegen.

Im Fall von Flüssigkeiten ist der Volumenstrom  $Q$  definiert als

$$(13) \quad Q = \frac{dV}{dt} = v \cdot A,$$

wobei  $v$  die mittlere Fließgeschwindigkeit darstellt und  $A$  die Querschnittsfläche des Stroms ist. Bei einer konstanten Dichte gilt für den Volumenstrom von Flüssigkeiten die Kontinuitätserhaltung

$$(14) \quad Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2.$$

Ändert sich für einen Volumenstrom der Querschnitt  $A$ , so resultiert dies auch in einer Änderung seiner Geschwindigkeit  $v$ .

Betrachten wir unseren Fall stark vereinfacht, so bedeutet dies, dass eine Wassermenge  $V$ , die über eine Breite  $A_1 = 50 \text{ km}$  in einer Zeit  $t$  eine Strecke von 50 km abfließt (entspricht dem Durchfluss einer 50-km-Rasterzelle), dieselbe Strecke in der gleichen Zeit  $t$  auf einer Breite von nur 5 km zurücklegen muss.<sup>24</sup>

Weil bei höheren Auflösung also eine stärkere Fokussierung der Wasserdurchflussmengen auf die Hauptgerinnerasterzellen stattfindet, müssen diese im Gegensatz zu den übrigen Gerinnerasterzellen kleinere Speicherverweildauern (Retentionskoeffizienten), also höhere Geschwindigkeiten aufweisen, damit das Gesamtsystem im Mittel noch dem Kontinuitätsgesetz genügt. Deshalb sind unterschiedliche Parametrisierungen für Gerinne- und Hauptgerinnerasterzellen anzusetzen.

**Exkurs II – Bestimmung einer Hauptgerinnerasterzelle:** In Hinblick auf die Kriterien, wie eine Hauptgerinnerasterzelle von einer Gerinnerasterzelle abzugrenzen ist, wurden im Rahmen dieser Arbeit drei verschiedene Methoden in Erwägung gezogen.

*Methode 1:* Die Bestimmung einer Hauptgerinnerasterzelle über deren Einzugsgebiet, d.h. über die Höhe der Anzahl derjenigen Rasterzellen, die zum Wasserzufluss in die zu bestimmende Rasterzelle beitragen (Schwellenwert ist zu definieren).

*Methode 2:* Die Hauptgerinnerasterzellen werden im DTM-Raster über einen georeferenzierten Abgleich aller Rasterzellen mit den Referenzvektoren des jeweiligen Flusssystems bestimmt.

*Methode 3:* Die Bestimmung von Hauptgerinnerasterzellen erfolgt über den Wert des Wasserabflussvolumens (des letzten Zeitschritts) jeder Rasterzelle (Schwellenwert muss definiert werden).

Alle drei Methoden haben Vor- und Nachteile. **Methode 1** erfordert zunächst die einmalige Identifizierung des Einzugsgebietes für jede Rasterzelle (entsprechende Funktionen wurden in der RivFlow-Anwendung implementiert). Im nächsten Schritt ist ein Schwellenwert festzulegen, ab welcher Anzahl von Einzugsgebiets rasterzellen eine Hauptgerinnerasterzelle vorliegen soll. Die-

<sup>24</sup> Diese Überlegung liefert eine plausible physikalische Erklärung dafür, weshalb das bisherige Abflussmodell für höhere Auflösungen angepasst werden sollte. Diese Überlegung kann aufgrund der starken Vereinfachungen in der Betrachtungsweise aber nicht zu einer direkten numerischen Lösung führen. Für den Querschnitt werden bei dieser Betrachtung z.B. nur die jeweiligen Breiten der Rasterzellen angesetzt. Ein mit abnehmender Breite eintretendes Aufstauen (Wassersäule/-pegel) wird so nicht berücksichtigt. Ebenso wird die Distanz abweichen, die eine Wassermenge  $V$  über das Hauptgerinne in der Zeit  $t$  zurücklegen muss, um die Fläche der ursprünglichen 50-km-Rasterzelle zu verlassen, da der Weg nicht zwangsläufig geradlinig über 50 km verlaufen wird.

ser Schwellenwert hängt individuell von der gewählten Auflösung, der Größe des Flusseinzugsgebietes und der gewünschten Feingliederung des untersuchten Flussnetzwerkes ab. **Methode 2** ist am schnellsten und einfachsten zu bewerkstelligen. Grundlage kann zum einen ein statischer, global vorliegender Datensatz (siehe Abschnitt 3.1.2.5) oder aber ein bereits aufbereitetes und evaluiertes DTM sein, über das dann ein Hauptgerinneraster generiert werden kann (siehe Unterkapitel 3.3.2.1 - RiverGridGeneration). Die Umsetzung von **Methode 3** gestaltet sich am komplexesten. Hier erfolgt die Bestimmung einer Hauptgerinnerasterzelle für jeden Zeitschritt kontinuierlich neu und zwar unter der Berücksichtigung des Wasserabflussvolumens der jeweiligen Rasterzelle während des letzten Zeitschritts. Hierbei handelt es sich um die sicherlich beste, an die naturwissenschaftlichen Mechanismen angepasste Bestimmungsmethode, die aber in der Umsetzung aufwendiger ist und längere Rechenzeiten und einen weiteren Speicher zum Vorhalten der Wasserabflussvolumen des jeweils letzten Zeitschritts erfordert. Sie ermöglicht es dafür, jeden Zeitschritt aufs Neue zu bestimmen, ob für eine Rasterzelle gerade die Kriterien einer Fluss-rasterzelle erfüllt sind. Theoretisch könnte man so auch temporär fast ausgetrocknete Flussabschnitte simulieren, in dem man bei wenig Wasserabflussvolumen die Parametrisierung einer Gerinnerasterzelle ansetzt und sobald das Wasserabflussvolumen steigt, die Rasterzelle wieder als Hauptgerinnerasterzelle parametrisiert. Entscheidend für Methode 3 ist aber auch die Festsetzung eines repräsentativen Schwellenwertes und dessen Evaluierung.

Implementiert wurde in die RivFlow-Anwendung zunächst nur **Methode 2**. Simulationen mit einem manuell erstellten, detaillierten Flussnetzwerk des Elbeinzugsgebiets und einem einfacheren, auf Referenzvektoren beruhenden Flussnetzwerk haben in einem direkten Vergleich zunächst aber auch keine signifikanten Unterschiede im Kurvenverlauf der Simulationen gezeigt. Kontinuierlich neubestimmte Flussnetzwerke (Methode 3) könnten in Gebieten mit starken saisonalen oder regionalen Klimageschehen vielleicht zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen. Aufgrund der Komplexität wurde Methode 3 zunächst nicht implementiert, eine spätere Implementierung zur potenziellen Präzisierung der Ergebnisse wird aber ausdrücklich empfohlen.

**Erweiterung des HD-Modells:** Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde das HD-Modell für Anwendungen mit höherer Auflösung in der Form erweitert, als dass für die Gerinnerasterzellen und die identifizierten Hauptgerinnerasterzellen jeweils eine separate Parametrisierung des Gerinneabfluss-Algorithmus des HD-Modells vorgenommen wird (siehe Abbildung 3.4-11).

Damit liegt für jede Rasterzelle also entweder ein Gerinneabfluss oder aber ein Hauptgerinneabfluss vor, jeweils mit den Retentionskoeffizienten  $k_G$  oder  $k_{HG}$  und den zugehörigen Parametrisierungswerten. Nach den Formeln in Abschnitt 3.1.2.4 ergibt sich so:

Retentionskoeffizient Gerinneabfluss:

$$(15) \quad k_G = \frac{c_G}{(n_G \cdot 2)} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}} \cdot \frac{[d]}{[km]} = p_G \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}}$$

Retentionskoeffizient Hauptgerinneabfluss:

$$(16) \quad k_{HG} = \frac{c_{HG}}{(n_{HG} \cdot 2)} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}} \cdot \frac{[d]}{[km]} = p_{HG} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}}$$

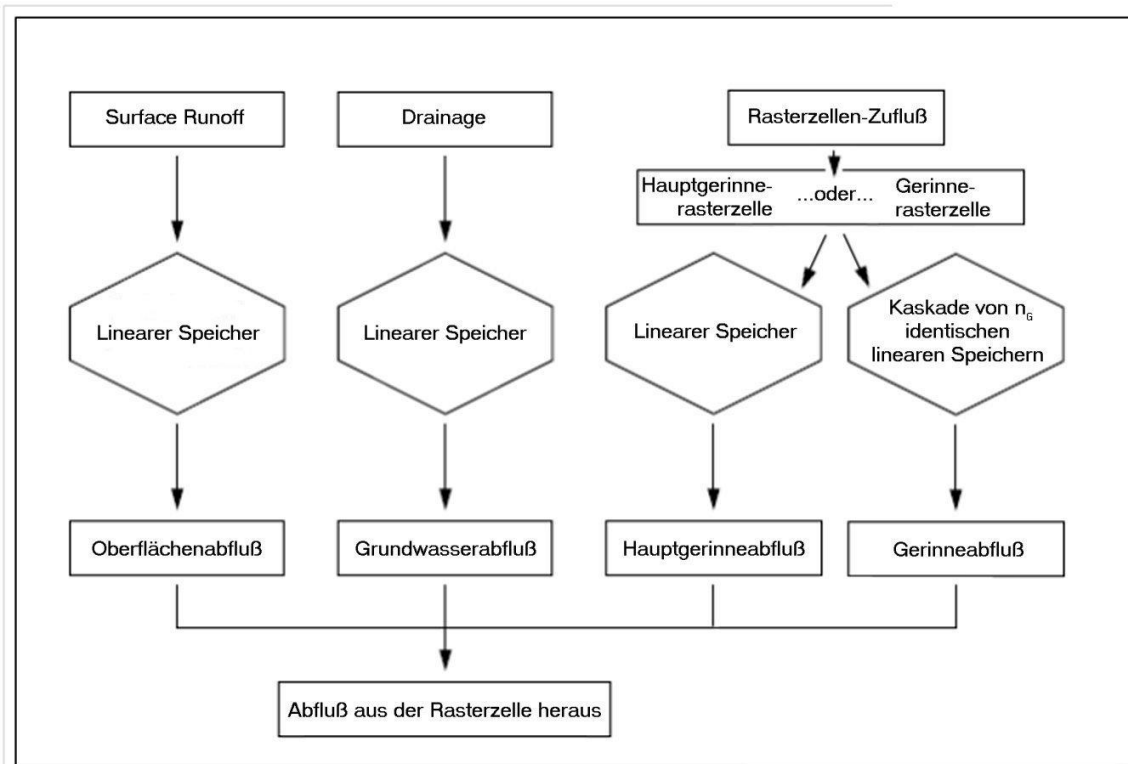


Abbildung 3.4-11 : Schematische Darstellung des erweiterten HD-Modells.

Die Hauptgerinnerasterzellen werden im Rahmen dieses Parametrisierungsansatzes statisch über den Abgleich mit einem georeferenzierten Vektordatensatz der weltweiten Flussnetzwerke bestimmt (siehe geographische Referenzdaten, Abschnitt 3.1.2.5) und über das *RiverGrid-Generation-Modul der RivFlow-Anwendung* in Form eines Hauptgerinnerasters ( $\rightarrow$  HG-Raster) erstellt. Berücksichtigt wurden hierbei die beiden Hauptströme des Elbeeinzugsgebietes, die Elbe und Moldau.

Die Ergebnisse der anhand des ursprünglichen *HD-Modells* durchgeführten Parametrisierungen des Gerinneabflusses können für das erweiterte *HD-Modell* nicht verwendet werden. Mit der separaten Berücksichtigung des Hauptgerinnenetzwerkes beschreibt der Gerinneabfluss nun nur noch die Abflussprozesse des Gerinnenetzwerkes und eben nicht mehr anteilig auch die des Hauptgerinnes. Über den zeitlichen Verlauf der Abflusssimulation interagieren Gerinne- und Hauptgerinneabflussprozesse und tragen letztendlich gemeinsam zur Ausbildung der Wassermengen des Flussnetzwerkes und dem daraus resultierenden Abfluss aus dem Flusseinzugsgebiet bei. Für das erweiterte *HD-Modell* ist daher eine erneute Parametrisierung des Gerinne- und Hauptgerinneabflusses durchzuführen.

#### 3.4.2.4 Zweiter Parametrisierungsansatz – die Parametrisierung des erweiterten HD-Modells

Im Hauptgerinne kann es in der Realität zu großen saisonalen Schwankungen in den Abflussmengen und – hydrologisch bedingt – damit auch zu größeren Unterschieden in der Fließgeschwindigkeit kommen. Anhand der Algorithmen des *HD-Modells* werden die Speicherverweildauern und damit die Abflussgeschwindigkeiten aber nur über den Abflussgradienten bestimmt, andere hydrologische Einflussfaktoren können in Hinsicht auf die Geschwindigkeit nicht berücksichtigt werden. Etwaigen saisonalen Schwankungen der Abflussgeschwindigkeit im Hauptge-

rinne können mit dem *HD*-Modell somit auch nicht Rechnung getragen werden, was in diesem Abflussmodell mittlerer Komplexität aber auch nicht vorgesehen ist.

Im Rahmen des Parametrisierungsansatzes des erweiterten *HD*-Modells werden deshalb erst einmal die mittlere Fließgeschwindigkeit (Jahresmittel) für das Hauptgerinne des Elbeeinzugsgebietes abgeschätzt und diese als ein Richtwert verwendet, anhand dessen zunächst nur die Parametrisierung des Hauptgerinneabflusses und die Bestimmung der optimalen Parametrisierungswerte  $c_{HG}$  und  $n_{HG}$  durchgeführt werden.

**Parametrisierung des Hauptgerinneabflusses:** In der Literatur konnten keine Quellen identifiziert werden, die eine wissenschaftlich belegte mittlere Fließgeschwindigkeit für den gesamten deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes bis Geesthacht angeben, hingegen wird immer darauf verwiesen, dass die Geschwindigkeit je nach Wasserführung und hydrologischer Beschaffenheit des Flussbettes zeitlich und räumlich erheblich abweichen kann (IKSE 2005: 212ff.). In diversen Informationsportalen im Internet wird für den deutschen Teil des (tidenunabhängigen) Elbeeinzugsgebietes zumeist eine mittlere Fließgeschwindigkeit von etwa 3 km/h aufgeführt, welche aber nie eindeutig belegt wird.<sup>25</sup> Im Rahmen dieser Arbeit soll die mittlere Fließgeschwindigkeit deshalb einmalig über die Fließzeiten in der Elbe bei einem Mittelwasserstand bestimmt werden. Die jeweiligen Flussabschnitte, zu denen diese Daten vorliegen, können IKSE (2005: 214) entnommen werden und sind in Tabelle 3.4-6 aufgeführt.

Flussabschnitt	Länge des Flussabschnittes in Kilometern	Fließzeiten in Stunden bei...		
		(in Klammern die mittlere Geschwindigkeit in km/h )		
		Mittlerem Niedrigwasserstand	Mittelwasserstand	Mittlerem Hochwasserstand
Jaroměř (CZ) bis zur deutsche Grenze	291,2	88 (3,3)	63 (4,6)	53 (5,5)
Deutsche Grenze bis Geesthacht	585,9	239 (2,5)	197 (3,0)	125 (4,7)

Tabelle 3.4-6: Fließzeit der Elbe bei verschiedenen Wasserständen nach IKSE (2005: 214)

Es zeigt sich nun, dass die Fließgeschwindigkeit im tschechischen Teil des Elbeeinzugsgebiets für den Mittelwasserstand einen Wert von etwa 4,6 km/h aufweist, was vor allem auf das dortige große Flussgefälle zurückzuführen ist (IKSE 2005: 212). Für die Elbe im deutschen Teil des Einzugsgebietes ergeben sich hingegen Fließgeschwindigkeiten, die je nach Wasserstand zwischen 2,5 km/h und 4,7 km/h betragen und bei einem Mittelwasserstand einen Wert von etwa 3 km/h annehmen.

Da zum einen der überwiegende Anteil des Einzugsgebietes der Elbe in Deutschland verortet ist und auch der Betrachtungsfokus dieser Arbeit auf dem deutschen Teil des Flusseinzugsgebietes liegt (u.a. die Evaluierungspunkte), soll an dieser Stelle als Richtwert der Parametrisierung des Hauptgerinneabflusses eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 3 km/h gelten.

<sup>25</sup> Siehe z.B. *Gewässerinformation Elbe* unter <http://www.kurs-elbe.de/gewaesserinformation-elbe.html> und *tagesschau.de-Hintergrund* unter: <http://www.tagesschau.de/inland/elbe140.html> (zuletzt Zugriff: 30.01.2015).

Um nun diejenigen Parametrisierungswerte  $c_{HG}$  und  $n_{HG}$  zu bestimmen, die für alle Hauptgerinnerasterzellen des Elbeinzugsgebietes näherungsweise zu einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 3 km/h führen, werden, unter Variation des Modellparameterwertes  $c_{HG}$  und der Annahme eines linearen Hauptgerinnespeichers ( $n_{HG}=1$ ), mit Hilfe der *RivSpeed*-Funktion der *RivFlow*-Anwendung die jeweiligen Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Hauptgerinnerasterzellen und ein rechnerischer Mittelwert berechnet (siehe exemplarische Werte für  $c_{HG}$  in Tabelle 3.4-7). Einige wenige Hauptgerinnerasterzellen weisen über den Flussverlauf dabei sporadisch sehr hohe Geschwindigkeitswerte auf, die vermutlich von Artefakten des Höhenmodells herrühren und keiner natürlichen Ursache zugeordnet werden können. Um den Einfluss dieser Ausreißer auf die Berechnung der Mittelwerte zu begrenzen, wurde die Geschwindigkeit jeder Rasterzelle im Rahmen dieser Betrachtung auf maximal 4 km/h begrenzt.

Modellparameterwert $c_{HG}$ des Hauptgerinnes	Überwiegende Fließgeschwindigkeit der Hauptgerinnerasterzellen...	vereinzelt auftretende Höchstwerte von maximal...	rechnerischer Mittelwert der Fließgeschwindigkeit (über den gesamten Verlauf des Hauptgerinnes. Deckelung der Geschwindigkeit bei $v_{max} = 4$ km/h)
0,009	≈ 2 km/h	≈ 6,2 km/h	≈ 2,6 km/h
0,007	≈ 2,6 km/h	≈ 7,9 km/h	≈ 3 km/h
0,005	≈ 3,6 km/h	≈ 11 km/h	≈ 3,7 km/h

*Tabelle 3.4-7: Ungefährer Wertebereich für die Fließgeschwindigkeiten der Hauptgerinnerasterzellen des Elbe-Einzugsgebietes und der rechnerische Mittelwert (bei Begrenzung der Fließgeschwindigkeit einzelner HG-Rasterzellen auf max. 4 km/h) über den gesamten Verlauf des Hauptgerinnes für den entsprechenden Parameterwert  $c_{HG}$  (bestimmt über die RivFlow-Anwendung, Funktion RivSpeed).*

Als derjenige Modellparameter  $c_{HG}$ , für den sich über den gesamten Hauptgerinnerverlauf im Mittel eine Geschwindigkeit im Bereich von etwa 3 km/h ergibt, wurde so  $c_{HG} = 0,007$  bestimmt.

Für den Oberflächenabfluss gilt wie zuvor die Annahme, dass sein Einfluss auf die zeitliche Komponente des Gesamtabflussprozesses als vergleichsweise gering einzuschätzen ist und er deshalb nicht als variabler Teil in den Parametrisierungsprozess einbezogen wird, sondern die bisherigen Werte der 50-km-Parametrisierung  $c_0=0,357$  und  $n_0=1$  verwendet werden können. Der eigentliche Parametrisierungsprozess des erweiterten *HD*-Modells – in Form einer iterativen Optimierung der Simulationsergebnisse – erfolgt somit nur über die Variation der Parametrisierungswerte des Gerinneabflusses, bei den ansonsten festen Parametrisierungswerten des Hauptgerinne- und Oberflächenabflusses.

**Parametrisierung des Gerinneabflusses:** Mit den nun festgelegten Parametrisierungswerten des Hauptgerinneabflusses [ $n_{HG}=1$  und  $c_{HG}=0,007$ ] werden im nächsten Schritt unter wechselseitiger Variation der Parametrisierungswerte des Gerinneabflusses ( $n_G$  und  $c_G$ ) Simulationen auf Basis des erweiterten *HD*-Modells durchgeführt, bei denen nun zwischen Gerinnerasterzellen und Hauptgerinneasterzellen unterschieden werden kann. Tabelle 3.4-8 listet die Parametrisierungswerte des Gerinneabflusses auf, für die jeweils Simulationen durchgeführt werden. Im Rahmen dieses zweiten Parametrisierungsansatzes werden mit dem erweiterten *HD*-Modell etwas über hundert Simulationen durchgeführt und ausgewertet.

$n_G$  1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5

$c_G$  (0,11) ; (0,1) ; (0,095) ; (0,09) ; (0,085) ; (0,08) ; (0,075) ; (0,07) ;  
(0,065) ; 0,06 ; 0,055 ; 0,05 ; 0,045 ; 0,035 ; 0,03 ; 0,025 ; 0,02 ;  
0,015 ; 0,01 ; (0,005)

Tabelle 3.4-8: Gewählte Parametrisierungswerte  $n_G$  und  $c_G$  im zweiten Parametrisierungsansatz. Die  $c_G$  Werte in Klammern wurden nicht für alle  $n_G$  Werte simuliert.

**Visueller Vergleich:** Der erste visuelle Vergleich von Simulations- und Messkurven wird am Beispiel des Evaluierungspunktes Neu Darchau durchgeführt. Für jede Speicherzahl  $n_G$  lassen sich einige Parameterwerte  $c_G$  ausmachen, deren Simulationskurven beim visuellen Vergleich im Mittel eine gute zeitliche Übereinstimmung zu der Messkurve aufweisen. Exemplarisch für solche Parametrisierungen sind im Folgenden zwei Simulationskurven für Neu Darchau mit den Parametrisierungen [ $n_G=2$  und  $c_G=0,06$ ] in Abbildungen 3.4-12 und [ $n_G=3$  und  $c_G=0,065$ ] in Abbildung 3.4-13 abgebildet.

Bei der Betrachtung dieser Simulationskurven fällt sofort ins Auge, dass die Fluktuation über den Kurvenverlauf sehr viel geringer ausfallen und sich der Kurvenverlauf mehr zu ähneln scheint, als es für die Simulationen mit dem ursprünglichen *HD*-Modell im ersten Parametrisierungsansatz der Fall war (vergleiche z.B. Abbildung 3.4-6 und 3.4-7). Auch sind alle definierten Referenzpeaks grundsätzlich über den gesamten Bereich der simulierten Parametrisierungen (siehe Tabelle 3.4-8) zu identifizieren. Die Höhe der vom erweiterten *HD*-Modell simulierten Referenzpeaks weicht nach wie vor erheblich von den Messwerten ab. Die *Low-Flow*-Bereiche der Simulationskurven stimmen im Mittel gut mit dem entsprechenden Verlauf der Messkurve überein.

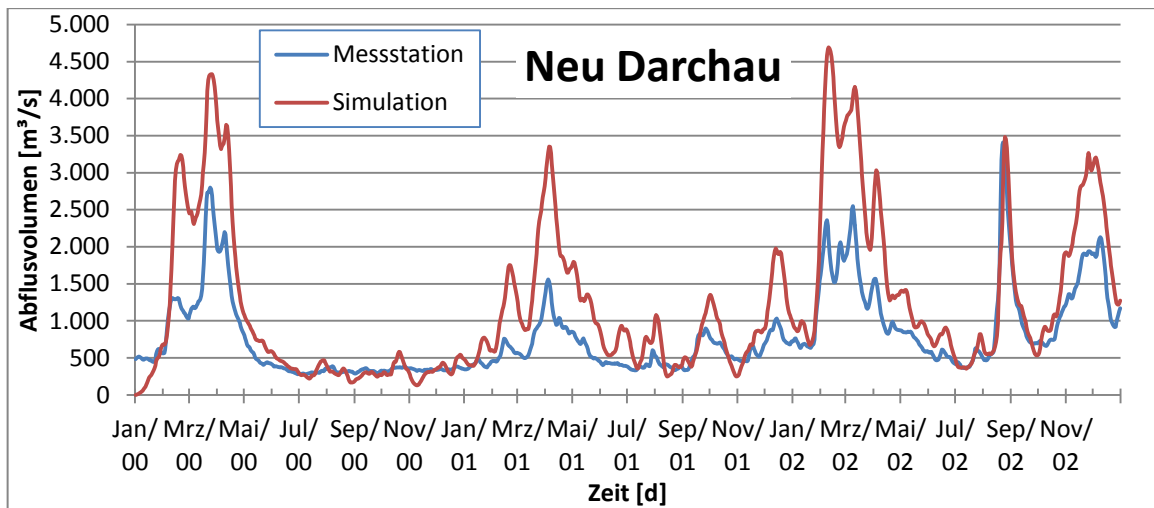


Abbildung 3.4-12: Abflussvolumen am Evaluierungspunkt Neu Darchau, simuliert mit dem erweiterten *HD*-Modell für die Parametrisierungswerte  $n_G=2$  und  $c_G=0,06$ .

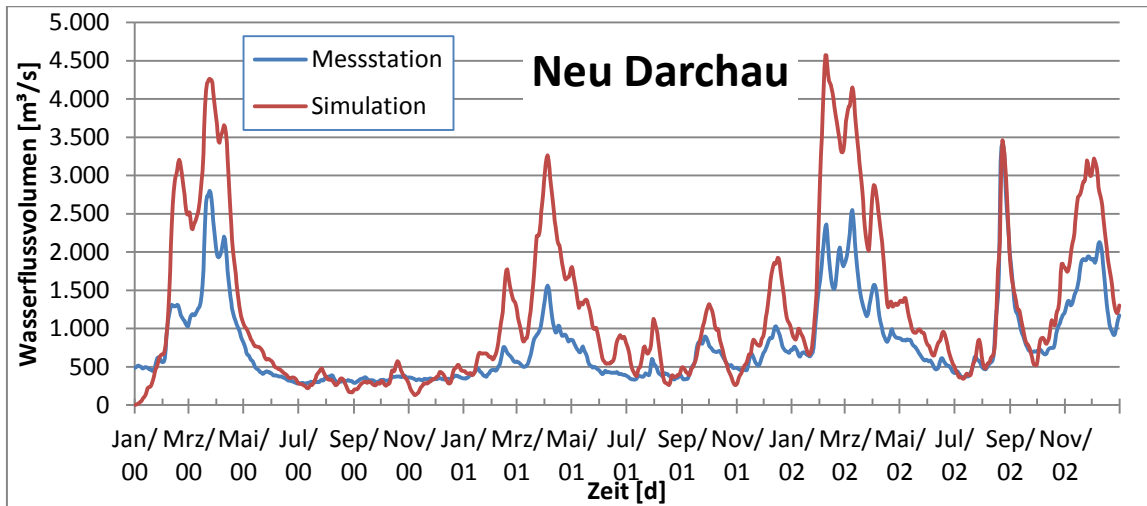


Abbildung 3.4-13: Abflussvolumen am Evaluierungspunkt Neu Darchau, simuliert mit dem erweiterten HD-Modell für die Parametrisierungswerte  $n_G=3$  und  $c_G=0,065$ .

Wie sich auch schon im Verlauf der vorangegangenen Schritte gezeigt hat, kann die optimale Parametrisierung über den alleinigen visuellen Vergleich von Simulations- und Messkurven nur näherungsweise, aber nicht mit letzter Bestimmtheit ermittelt werden. Dieses liegt zum einen an der nur diskreten Anzahl durchgeführter Simulationen. Zum anderen an einer Vielzahl unsystematischer Abweichungen im Verlauf einer mehrjährigen, simulierten Abflusskurve (im Vergleich zur entsprechenden Messkurve) sowie an den bereits beschriebenen *Trade-off*-Effekten in Hinblick auf die Übereinstimmung des simulierten Abflussvolumens und das zeitliche Verhalten. Im Gegensatz zu dem Parametrisierungsansatz des ursprünglichen *HD*-Modells eignen sich die Simulationsdaten nun aber aufgrund der geringeren Fluktuationen und der besser identifizierbaren Referenzpeaks für eine gründlichere statistische Analyse.

**Statistische Evaluierung:** Im Folgenden soll eine statistische Analyse der Simulationsergebnisse des zweiten Parametrisierungsansatzes durchgeführt werden. Die Abweichungen zwischen Simulations- und Messkurve können auch hier nur auf Basis der diskreten Simulations- und Messpunkte analysiert werden. Hierfür werden die Referenzpeaks der simulierten und gemessenen Abflusskurven anhand ihrer ausgelesenen Koordinatenpaare auf die jeweiligen Abweichungen hin untersucht, um – unter Berücksichtigung der aufgestellten Bewertungskriterien – die Parametrisierungswerte der optimalen Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells zu bestimmen.

Die Mathematik bietet eine Vielzahl statistischer Methoden zur Parameter-Optimierung von Modellen, wie z.B. multiple Regressionen, ANOVA (Analysis of Variation), F- und p-Test oder „Methode der Fehlerquadrate“, die auf der Basis von Simulationskurven einer nur diskreten Punktemenge durchgeführt werden können. Diese Methoden erfordern zumeist einen hohen Analyseaufwand, würden aber im Fall der Charakteristika der vorliegenden Simulationsdaten – z.T. sehr komplexe und variierende Kurvenverläufe, bei einem zeitlich stark schwankenden Wertebereich der Simulationsergebnisse – nur zu Ergebnissen mit einer begrenzten Aussagekraft führen. Für die vorliegenden Simulationsergebnisse soll deshalb eine einfach anwendbare und für diese Datencharakteristika besonders geeignete **statistische Analyse auf Basis der „Abweichungsbeträge“** durchgeführt werden. Hierfür wurde für jede Parametrisierung zunächst der Differenzbetrag der x- bzw. y-Koordinaten jedes Referenzpeaks der Simulationskurve, mit den entsprechenden Koordinaten des zugehörigen Referenzpeaks der Messkurve gebildet (zu den Referenzpeaks siehe Abbildung 3.4-2). Wobei die Abweichung der x-Koordinaten  $dx$  der zeitli-



chen Abweichung in Tagen und die Abweichung der y-Koordinate  $dy$  der Höhenabweichung des jeweiligen simulierten Referenzpeaks (Einheit  $m^3/s$ ) entspricht.

Im Rahmen der statistischen Analyse soll die Summe der Abweichungsbeträge aller Referenzpeaks eines simulierten Abflussmaximums als dessen statistische Abweichung  $dX$  bzw.  $dY$  gelten und die Summe der statistischen Abweichungen der Abflussmaxima A, B und C soll die statistische Gesamtabweichung  $D_X$  bzw.  $D_Y$  der jeweiligen Parametrisierung repräsentieren (siehe Tabelle 3.4-9).

---

**Abweichungsbeträge:**

Betrag der Koordinatenabweichung  $dx$  und  $dy$  zwischen jedem simulierten Referenzpeak  $(x_s, y_s)$  und dem entsprechenden gemessenen Referenzpeak  $(x_m, y_m)$

$$dx = |x_s - x_m| ,$$

$$dy = |y_s - y_m|$$

**Statistische Abweichung der Abflussmaxima:**

Für jedes Abflussmaximum wird die Summe über die Abweichungsbeträge aller seiner  $j$  Referenzpeaks gebildet

$$dX = \sum_j dx_j , \quad dY = \sum_j dy_j$$

**Statistische Gesamtabweichung der Parametrisierung:**

Summe der Beträge der Abflussmaxima A, B und C

$$D_X = dX_A + dX_B + dX_C ,$$

$$D_Y = dY_A + dY_B + dY_C$$

---

*Tabelle 3.4-9: Grundlagen der statistischen Analyse*

Es sei noch einmal angemerkt, dass es sich bei den ermittelten Gesamtabweichungen um statistische Mittelwerte auf Basis der Referenzpeaks handelt, die aber nicht notwendigerweise auch Rückschlüsse auf die tatsächliche Abweichung beliebiger Punkte auf der Simulationskurve zulassen.

Die Gesamtabweichung jeder Parametrisierung wird nach der Speicherzahl  $n_G$  und dem Evaluierungspunkt sortiert, jeweils gegen die verschiedenen Modellparameterwerte  $c_G$  aufgetragen (siehe Abbildung 3.4-14). Für jede Speicherzahl und jeden Evaluierungspunkt finden sich also ein Diagramm mit zwei Datenreihen, die die zeitliche Gesamtabweichung  $D_X$  (Einheit: Tage) und die Gesamtvolumenabweichung  $D_Y$  (Einheit:  $m^3/s$ ) als Summe der Einzelabweichungen der Referenzpeaks der Abflussmaxima A, B und C, für die jeweils simulierten Modellparameterwerte  $c_G$  abbilden.

Bei genauer Betrachtung ist in allen Diagrammen erkennbar, dass die jeweilige Abfolge der Punkte beider Datenreihen einen systematischen Verlauf aufzeigt. Ausgehend von den festgelegten Kriterien der Genauigkeitsabschätzung einer Simulation, wird mit Hilfe der Diagramme zunächst das wichtigste Bewertungskriterium, die zeitliche Gesamtabweichung der verschiedenen Parametrisierungen analysiert.

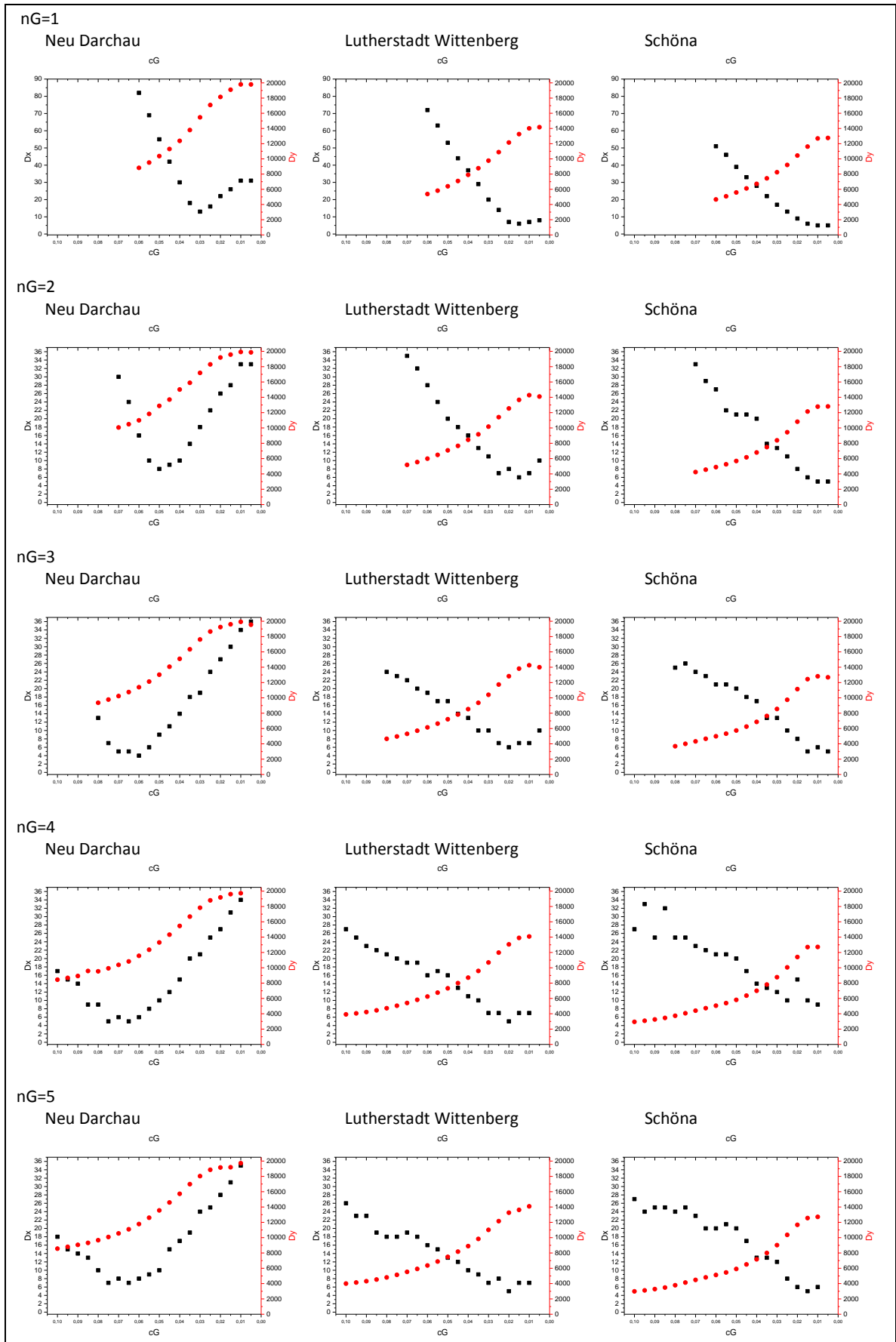


Abbildung 3.4-14: Statistische Gesamtabweichungen. Zeitabweichung  $D_x$  (schwarze Quadrate) und Volumenabweichung  $D_y$  (rote Punkt) jeweils gegen die Parametrisierung  $c_G$  aufgetragen.

*Zeitliche Gesamtabweichung:* In den Diagrammen ergeben sich für den Evaluierungspunkt Neu Darchau für alle Speicherzahlen  $n_G$  deutlich ausgeprägte Minima im Verlauf der Datenpunkte von  $D_x$ , die sich mit steigender Speicherzahl  $n_G$  zu höheren Parameterwerten  $c_G$  hin verschieben. Im Fall von Lutherstadt Wittenberg und Schöna ist zu beobachten, dass die Minima von  $D_x$  für kleinere Werte von  $c_G$  erreicht werden und für alle Speicherzahlen  $n_G$  dicht beieinander liegen. Auch ist der Punkteverlauf hier zum Teil unstetiger und weist deutlich abweichende Werte auf. Tabelle 3.4-10 gibt auf Grundlage der statistischen Analyse zu jedem Evaluierungsort und jeder Speicherzahl  $n_G$  denjenigen Wert des Modellparameters  $c_G$  wieder, für den die geringste zeitliche Gesamtabweichung  $D_x$  erreicht wurde. Für den Fall gleicher  $D_x$ -Werte wurde einheitlich immer der entsprechend größere Parameterwert  $c_G$  in der Tabelle aufgeführt. In Klammern findet sich die zugehörige Abweichung  $D_x$  in Tagen.

	$n_G = 1$	$n_G = 2$	$n_G = 3$	$n_G = 4$	$n_G = 5$
<b>Neu Darchau</b>	0,03 (13)	0,05 (8)	0,06 (4)	0,075 (5)	0,075 (7)
<b>Lutherstadt- Wittenberg</b>	0,015 (6)	0,015 (7)	0,02 (6)	0,02 (5)	0,02 (5)
<b>Schöna</b>	0,01 (5)	0,01 (5)	0,015 (5)	0,01 (9)	0,015 (5)

Tabelle 3.4-10: Die Parameterwerte  $c_G$ , die in Bezug auf den Evaluierungsort und die Speicherzahl  $n_G$  den jeweils geringsten  $D_x$ -Wert (in Klammern) ergeben.

Betrachten wir Neu Darchau nach wie vor als den maßgeblichen Evaluierungspunkt in Hinblick auf die Evaluation der Abflussprozesse innerhalb des Flusseinzugsgebietes der Elbe und den resultierenden Gesamtabfluss über das Hauptgerinne, grenzt dies die Auswahl der optimalen Parametrisierungen des erweiterten *HD*-Modells auf diejenigen Parametrisierungswerte der Simulationskurven von Neu Darchau ein, die jeweils die besten zeitlichen Überstimmungen zu den Messkurven aufweisen. Dieses sind laut Tabelle 3.4-10 die fünf Parametrisierungen:

**$P_1$  : [ $n_G=1$  und  $c_G=0,03$ ]**  
 **$P_2$  : [ $n_G=2$  und  $c_G=0,05$ ]**  
 **$P_3$  : [ $n_G=3$  und  $c_G=0,06$ ]**  
 **$P_4$  : [ $n_G=4$  und  $c_G=0,075$ ]**  
 **$P_5$  : [ $n_G=5$  und  $c_G=0,075$ ]**

Die jeweiligen zeitlichen Gesamtabweichungen ( $D_x$ -Werte) der Evaluierungspunkte Lutherstadt Wittenberg und Schöna für diese fünf ausgewählten Parametrisierungen, können der Tabelle 3.4-11 entnommen werden. Anhand der statistischen Abweichungen  $D_x$  von Lutherstadt Wittenberg und Schöna kann keine dieser Parametrisierungen in besonderer Weise favorisiert werden, da sie zusammengenommen im Mittel immer ungefähr gleich groß ausfallen. An allen Evaluierungspunkten zeigt sich aber, dass für alle Parametrisierungen die Abweichungsbeträge  $dx$  der Referenzpeaks  $b1$  und z.T. auch  $a1$  bestimmend für die statistische Abweichung  $D_x$  sind. Im Mittel beträgt die Abweichung für einen Referenzpeak von Lutherstadt-Wittenberg und Schöna mehrere Tage, rechnet man die Abweichung der Peaks  $b1$  bzw.  $a1$  heraus, liegen die Werte der mittleren Abweichung im Bereich von nur noch 1,2 bis 2 Tage. Im Fall von Neu Darchau ist der Referenzpeak  $b1$  für 50 % bis 100 % der Zeitabweichung  $D_x$  verantwortlich. Es kann im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht die Frage beantwortet werden, ob die durchgängig hohen Abweichungen der Referenzpeaks  $b1$  und  $a1$  in besonderer Weise durch das Abflussmodell oder die

Eingangsdaten bedingt werden bzw. auf nicht berücksichtigte Einflussfaktoren zurückzuführen sind.

Parametrisierung					
	P <sub>1</sub> n <sub>G</sub> =1, c <sub>G</sub> =0,03	P <sub>2</sub> n <sub>G</sub> =2 , c <sub>G</sub> =0,05	P <sub>3</sub> n <sub>G</sub> =3 , c <sub>G</sub> =0,06	P <sub>4</sub> n <sub>G</sub> =4 , c <sub>G</sub> =0,075	P <sub>5</sub> n <sub>G</sub> =5 , c <sub>G</sub> =0,075
Lutherstadt- Wittenberg	20	20	19	20	18
Schöna	17	21	21	25	25

Tabelle 3.4-11: Statistische Gesamtabweichung  $D_x$  der Evaluierungspunkte Lutherstadt Wittenberg und Schöna für die jeweiligen Parametrisierungswerte.

*Volumenübereinstimmung:* Hieran anschließend sollen für die drei Evaluierungspunkte in Tabelle 3.4-12 auch die statistischen Gesamtabweichungen des Abflussvolumen  $D_y$  der ausgewählten Parametrisierungen aufgelistet werden, wie sie auch der Abbildung 3.4-14 entnommen werden können. Es zeigt sich, dass an allen drei Evaluierungspunkten  $D_y$  für die Parametrisierung  $P_4$  den kleinsten Wert annimmt.

Parametrisierung					
	P <sub>1</sub> n <sub>G</sub> =1, c <sub>G</sub> =0,03	P <sub>2</sub> n <sub>G</sub> =2 , c <sub>G</sub> =0,05	P <sub>3</sub> n <sub>G</sub> =3 , c <sub>G</sub> =0,06	P <sub>4</sub> n <sub>G</sub> =4 , c <sub>G</sub> =0,075	P <sub>5</sub> n <sub>G</sub> =5 , c <sub>G</sub> =0,075
Neu Darchau	15.464	12879	11394	9931	10087
Lutherstadt- Wittenberg	9766	7082	6149	5045	5140
Schöna	8245	5688	4986	4061	4131

Tabelle 3.4-12 : Statistische Gesamtabweichung im Abflussvolumen  $D_y$  an den drei Evaluierungspunkten Neu Darchau, Lutherstadt Wittenberg und Schöna für die jeweiligen Parametrisierungswerte.

Der genaue Kurvenverlauf und die Übereinstimmung der *Low-Flow*-Bereiche der ausgewählten Parametrisierungen können aus Komplexitätsgründen nicht in einer einfachen statistischen Analyse betrachtet werden, sondern wurden nur visuell am Beispiel der simulierten Kurven für Neu Darchau untersucht. Bei der Betrachtung der entsprechenden Simulationskurven fiel auf, dass die Simulationskurven für  $P_4$  und  $P_5$  nahezu identisch sind und beide im Vergleich den besten *Low-Flow*-Bereich aller fünf Simulationskurven aufweisen. In Bezug auf den Kurvenverlauf zeigen  $P_2$  und  $P_3$  beim direkten visuellen Vergleich insgesamt die wohl beste Übereinstimmung in der Ausprägung der Peaks von Simulations- und Messkurve, wobei die Simulationskurven zu  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  und  $P_5$  alle gut mit der Gestalt der Messkurve von Neu Darchau übereinstimmen. Der simulierte Kurvenverlauf von  $P_1$  wird hingegen durch vermehrte Fluktuationen und deutlich wahrnehmbare Abweichungen vom Verlauf der Messkurve gekennzeichnet.

**Fazit:** Nachdem unter dem primären Kriterium der zeitlichen Übereinstimmung und unter Maßgabe des Evaluierungspunktes Neu Darchau die fünf Parametrisierungen eingegrenzt und alle unter den Kriterien der Genauigkeitsabschätzung betrachtet wurden, soll mit der abschließen-

den Gewichtung dieser Kriterien aus diesen fünf Parametrisierungen nun die optimale Parametrisierung für die 5-km-Auflösung des erweiterten *HD*-Modells bestimmt werden.

Die Parametrisierungen  $P_3$  weist für Neu Darchau mit 4 Tagen die kleinste statistische Zeitabweichung  $D_x$  auf, dicht gefolgt von  $P_4$  mit 5 Tagen (siehe Tabelle 3.4-10). Für  $P_1$  und  $P_3$  weisen die Simulationskurven an den Evaluierungspunkten Lutherstadt Wittenberg und Schöna zusammengenommen im Mittel die kleinste Abweichung  $D_x$  auf. In Hinsicht auf die statistische Volumenabweichung  $D_y$  findet sich für alle Evaluierungspunkte das Minimum bei  $P_4$ , gefolgt von  $P_5$  und  $P_3$  (siehe Tabelle 3.4-11). Abgesehen von  $P_1$  weisen die Simulationskurven aller anderen Parametrisierungen – im Vergleich zur Messkurve – eine in etwa gleich gute Übereinstimmung im Kurvenverhalten auf. Bei  $P_4$  und  $P_5$  zeigt sich eine etwas bessere Übereinstimmung der *Low-Flow*-Bereiche, während die Referenzpeaks der Simulationskurven von  $P_2$  und  $P_3$  ein wenig besser mit der Gestalt der Referenzpeaks der Messkurve übereinstimmen.

Die Parametrisierungen  $P_3$  und  $P_4$  schneiden für den Evaluierungspunkt Neu Darchau in jeweils zwei der Bewertungskriterien am besten ab, die Entscheidung für eine optimale Parametrisierung muss also zwischen diesen beiden Parametrisierungen gefällt werden. Wird nun die festgelegte Gewichtung der Kriterien (1. Zeitabweichung, 2. *Low-Flow*-Bereich, 3. Kurvenverlauf und 4. Volumenabweichung) befolgt, so muss in diesem Fall  $P_3$  als die optimale Parametrisierung gelten. Auch Lutherstadt Wittenberg und Schöna weisen für  $P_3$  geringere statistische Zeitabweichungen auf als für die Parametrisierung  $P_4$ .

In Hinblick auf den Gerinneabfluss ergibt sich die statistisch optimale Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells für eine Auflösung von 5 km also für die Speicherzahl  $n_G=3$  und den Modellparameterwert  $c_G=0,06$ .

**Exkurs III – Flutpeak Teil 2:** Die Abweichungen des Flutpeaks  $d1$  werden nicht als Bewertungskriterien der Parametrisierungen herangezogen. Dennoch soll an dieser Stelle das Verhalten des Flutpeaks für die fünf ausgewählten Parametrisierungen  $P_1$  bis  $P_5$  einmal genauer betrachtet werden. Für jede der Parametrisierungen und zu jedem der Evaluierungspunkte gibt die nachfolgende Tabelle E1 jeweils die Zeit- und Volumenabweichung des simulierten Flutpeaks zum entsprechenden Messwert an.

	Parametrisierung				
	$P_1$ $n_G=1, c_G=0,03$	$P_2$ $n_G=2, c_G=0,05$	$P_3$ $n_G=3, c_G=0,06$	$P_4$ $n_G=4, c_G=0,075$	$P_5$ $n_G=5, c_G=0,075$
<b>Neu Darchau</b>	+2   +1299	+1   +464	0   +234	0   -264	-1   -218
<b>Lutherstadt Wittenberg</b>	+3   +400	+2   -637	+1   -865	+1   -1159	+1   -1159
<b>Schöna</b>	+2   -334	2   -1442	+1   -1668	+1   -1931	+1   -1922

*Tabelle E1: Zeitabweichungen (erster Eintrag) und Volumenabweichung (zweiter Eintrag) der simulierten Flutpeaks  $d1$  jeder Parametrisierung im direkten Vergleich zu den Messwerten. Es handelt sich hier nicht um den Abweichungsbetrag, sondern um die positive oder negative Koordinatenabweichung.*

*Bei den fünf betrachteten Parametrisierungen, erreicht auch der Flutpeak für  $P_3$  und  $P_4$  die beste zeitliche Übereinstimmung mit den Messwerten. Auch in Lutherstadt Wittenberg und Schöna*

wird der Flutpeak nur um einen Tag zu spät simuliert. Der Flutpeak in Neu Darchau wird nur um etwa 234 m<sup>3</sup>/s zu hoch simuliert, was eine geringe Abweichung im Vergleich zu den bisherigen Überschätzungen bei der Simulation des Abflussvolumens der Referenzpeaks ist. Für Lutherstadt Wittenberg und Schöna werden die Abflusswerte hingegen deutlich zu niedrig simuliert, ein Phänomen, was so nur bei dem Flutpeak auftritt. Die bei der realen Ausbildung einer Flutwelle wirkenden Mechanismen – die bei dieser Abflussmodellierung so nicht berücksichtigt werden – könnten aber eine durchaus plausible Erklärung für diese beim Flutpeak auftretende Diskrepanz zwischen modellierten und gemessenen Werten darstellen.

Im Rahmen dieses Parametrisierungsansatzes wurde die optimale Parametrisierung des erweiterten HD-Modells über die Variation der Parametrisierungswerte des Gerinneabflusses ermittelt, bei festen Parametrisierungswerten des Oberflächen- und des Hauptgerinneabflusses. Für den Oberflächenabfluss wurden die Werte der ursprünglichen Parametrisierung des HD-Modells für eine 50 km-Auflösung beibehalten. Im Fall des Hauptgerinneabflusses wurden die Parametrisierungswerte über eine feste mittlere Fließgeschwindigkeit des Hauptgerinnes bestimmt. Die Bestimmung der optimalen Parametrisierungswerte  $P_3$  erfolgte somit auf Basis dieser festen Werte, die damit ebenso Bestandteil der resultierenden, optimalen Parametrisierung des erweiterten HD-Modells sind.

Im Folgenden soll daher auch noch kurz betrachtet werden, wie sich die Simulationsergebnisse im Vergleich zur der statistisch ermittelten optimalen Parametrisierung  $P_3$ , bei leichten Variationen der Parametrisierungswerte des Oberflächen- und Hauptgerinneabflusses verhalten. Hierfür wurden vier weitere Simulationen mit festen Parametrisierungswerten des Gerinneabflusses bei wechselseitiger Variation des Hauptgerinne- und Oberflächenabflusses (wie in Tabelle 3.4-13) durchgeführt.

Simulation	Gerinneabfluss	Hauptgerinneabfluss	Oberflächenabfluss
<b>vEHD5-1</b>	$n_G = 3$ , $c_G = 0,06$	$n_{HG} = 1$ , $c_{HG} = 0,007$	$n_O = 1$ , $c_O = 0,3$
<b>vEHD5-2</b>	$n_G = 3$ , $c_G = 0,06$	$n_{HG} = 1$ , $c_{HG} = 0,007$	$n_O = 1$ , $c_O = 0,4$
<b>vEHD5-3</b>	$n_G = 3$ , $c_G = 0,06$	$n_{HG} = 1$ , $c_{HG} = 0,009$	$n_O = 1$ , $c_O = 0,357$
<b>vEHD5-4</b>	$n_G = 3$ , $c_G = 0,06$	$n_{HG} = 1$ , $c_{HG} = 0,005$	$n_O = 1$ , $c_O = 0,357$

Tabelle 3.4-13: Variation der Parameterwerte von Hauptgerinne- und Oberflächenabfluss, bei festen Parametrisierungswerten des Gerinneabflusses.

Im Vorfeld wurde der Einfluss einer Variation der Parameterwerte des Oberflächenabflusses bereits als nur gering – in Hinblick auf das Gesamtabflussverhalten und die Parametrisierung des Gesamtmodells – eingestuft. Dieser Eindruck bestätigt sich auch nach dem visuellen Vergleich der Ergebnisse der Simulationskurven zu **vEHD5-1** und **vEHD5-2** mit der bisherigen Simulationskurve der optimalen Parametrisierung  $P_3$ . Für Neu Darchau zeigen die Referenzpeaks keine zeitlichen Unterschiede. Im Fall von Lutherstadt Wittenberg und Schöna sieht es ähnlich aus, hier kommt es jeweils höchstens bei einem (Schöna) bzw. höchstens bei zwei (Lutherstadt Wittenberg) Referenzpeaks zu einer (vermutlich fluktuationsbedingten) Abweichung um einen Tag. Im Volumen ist für alle drei Evaluierungspunkte immer nur eine sehr kleine positive ( $c_O=0,3$ ) bzw. negative ( $c_O=0,4$ ) Abweichung des Volumens innerhalb eines Bereiches von etwa 10 bis 20 m<sup>3</sup>/s zu beobachten.

In Hinsicht auf die Parametrisierungswerte des Hauptgerinnes ist eine Variation der Parameterwerte  $c_{HG}$  gleichbedeutend mit einer Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne (siehe auch Tabelle 3.4-7). Wie zu erwarten war, kommt es dementsprechend beim direkten visuellen Vergleich der Simulationskurven **vEHD5-3** und **vEHD5-4** mit der ursprünglichen P<sub>3</sub>-Simulationskurve an allen Evaluierungspunkten zu einer zeitlichen Abweichung der Referenzpeaks im Bereich von ein bis drei Tagen, die Volumenabweichungen liegen für die Referenzpeaks jeweils im Bereich von zehn bis hundert m<sup>3</sup>/s. Abbildung 3.4-15 zeigt exemplarisch die Simulationskurven **vEHD5-3** und **vEHD5-4** im direkten Vergleich miteinander für den Evaluierungspunkt Neu Darchau.

Für Lutherstadt Wittenberg und Schöna fällt auf, dass sich für  $c_{HG}=0,005$  – also eine höhere Fließgeschwindigkeit des Hauptgerinnes – die statistische Zeitabweichung im Vergleich zu den Simulationsergebnissen der optimalen P<sub>3</sub>-Parametrisierung verbessert. Dies kann als ein Indiz dafür gewertet werden, dass die während des gesamten Parametrisierungsprozesses zu beobachtende zeitliche Diskrepanz zwischen optimalen Parametrisierungsergebnissen für Lutherstadt Wittenberg und Schöna auf der einen Seite und Neu Darchau auf der anderen Seite, zu einem wesentlichen Teil auf jeweils unterschiedlich große Fließgeschwindigkeiten des Hauptgerinnes zurückzuführen ist. Diese Differenz in der Fließgeschwindigkeit ist zwar in den Messwerten berücksichtigt, kann aber durch dieses Abflussmodell mittlerer Komplexität nicht differenziert simuliert werden.

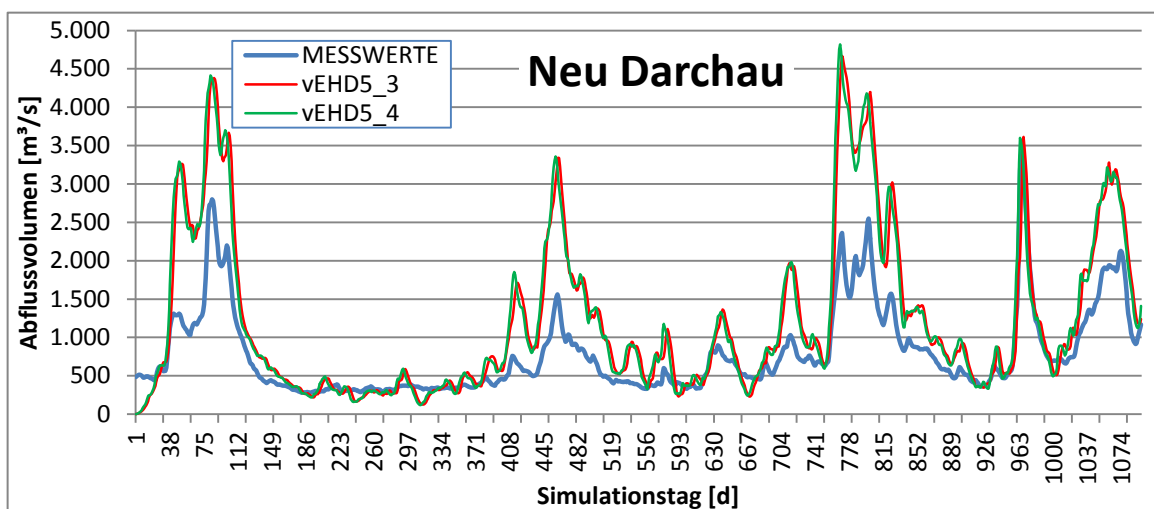


Abbildung 3.4-15: Abflussvolumen der Simulationskurven vEHD5-3 und vEHD5-4 für Neu Darchau.

Obwohl die optimierte Parametrisierung P<sub>3</sub> für ein Hauptgerinne mit einer festen mittleren Fließgeschwindigkeit von etwa 3 km/h erfolgte, liegt die Vermutung nahe, dass für ein Flusseinzugsgebiet mit einer deutlich höheren oder niedrigeren mittleren Fließgeschwindigkeit die Anpassung des Parameterwertes  $c_{HG}$  – bei ansonsten gleichbleibender Parametrisierung P<sub>3</sub> – zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse führen könnte. Unter hydrologischen Gesichtspunkten könnte das erweiterte HD-Modell über den Modellparameterwert  $c_{HG}$  so potenziell vermutlich noch geringfügig an spezifische Charakteristika eines Flusseinzugsgebietes angepasst werden.

Für ein Flusseinzugsgebiet mit einer Auflösung von 5 km und bei Annahme einer mittleren Fließgeschwindigkeit des Hauptgerinnes von etwa 3 Km/h ergibt sich über die Parametrisierungswerte in Tabelle 3.4-14 eine optimale Parametrisierung des erweiterten HD-Modells.

---

Optimale Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells  
für eine 5-km-Auflösung

---

<b>Gerinneabfluss:</b>	$n_G = 3$	$p_G = 0,01$
	$c_G = 0,06$	
<b>Hauptgerinneabfluss:</b>	$n_{HG} = 1$	$p_{HG} = 0,0035$
	$c_{HG} = 0,007$	
<b>Oberflächenabfluss:</b>	$n_O = 1$	$p_O = 0,1787$
	$c_O = 0,357$	

---

*Tabelle 3.4-14: Optimale Parametrisierung des erweiterten HD-Modells für eine 5-km-Auflösung.*

Mit dem erweiterten *HD*-Modell und seiner Parametrisierung für eine Auflösung von  $dx = 5 \text{ km}$  ergeben sich nach Abschnitt 3.1.2.4 sowie den Formeln (15) und (16) für die Berechnung der Retentionskoeffizienten zusammengefasst die folgenden Algorithmen:

**Oberflächenabfluss:**

$$(17) \quad k_O = 17,87 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}}, \quad \text{Anzahl der Speicher: } n_O = 1$$

**Grundwasserabfluss:**

$$(18) \quad k_B = 300 \cdot \frac{dx}{dx_p}, \quad \text{mit } dx_p = 50 \text{ km}$$

**Hauptgerinneabfluss:**

$$(19) \quad k_{HG} = \frac{0,007}{2 \cdot 1} \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}},$$

Anzahl der Speicher:  $n_{HG} = 1$

**Gerinneabfluss:**

$$(20) \quad k_G = \frac{0,06}{2 \cdot 3} \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}} = 0,01 \cdot \frac{[d]}{[km]} \cdot \frac{dx}{\left(\frac{dh}{dx}\right)^{0,1}},$$

Anzahl der Speicher:  $n_G = 3$

### 3.4.3.5 Das ursprüngliche und das erweiterte *HD*-Modell

Obwohl sich im Verlauf der Parametrisierung des ursprünglichen *HD*-Modells bereits abzeichnete, dass die Adaption an höhere Auflösungen möglich ist und die erzielten Simulationsergebnisse der Anforderung an ein Abflussmodell mittlerer Komplexität grundsätzlich zu genügen scheinen, wurden Defizite in den Simulationsergebnissen sichtbar. So weisen die Simulationenkurven



bei zunehmender zeitlicher Übereinstimmung mit den Messwerten erhebliche Fluktuationen über den Kurvenverlauf und vermehrte Peaks mit großen Höhenabweichungen auf. Für Neu Darchau konnten einige Referenzpeaks der Simulationskurve nicht den entsprechenden Messwerten zugeordnet werden und auf Basis der verbliebenen Referenzpeaks war die Bestimmung einer optimalen Parametrisierung für den Evaluierungspunkt Neu Darchau nicht möglich. Es wird angenommen, dass je höher die Simulationsauflösung gewählt wird, eine Separierung des Simulationsprozesses in Gerinne- und Hauptgerinneabfluss umso wichtiger wird.

Mit der Erweiterung des *HD*-Modells wurde schließlich der bei einer höheren Auflösung notwendigen Unterscheidung zwischen Gerinne- und Hauptgerinneabfluss Rechnung getragen. Die optimale Parametrisierung wurde zu [ $c_G=0,06$ ,  $n_G=3$  und  $c_{HG}=0,007$  und  $n_{HG}=1$ ] bestimmt. Die Simulationskurven zeigen nun eine bessere zeitliche Übereinstimmung, weisen erheblich weniger Fluktuationen über den Kurvenverlauf auf und auch die Kurvengestalt ähnelt nun deutlicher der jeweiligen Messkurve. Im Mittel beträgt die statistische Abweichung für einen Referenzpeak von Neu Darchau nur 0,6 Tage. Für Lutherstadt Wittenberg und Schöna ergibt sich eine mittlere Abweichung von etwa 2,4 bis 3 Tagen. Die Unterschiede im Abflussvolumen sind zwischen Simulations- und Messkurven zwar nach wie vor erheblich, eine Abschätzungen der tatsächlichen Abweichungen kann aber erst nach der Berücksichtigung sozioökonomischer Einflussfaktoren und der Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes vorgenommen werden. Auf dieser Grundlage konnten für alle drei Evaluierungspunkte nun optimale Parametrisierungen bestimmt werden. Bestimmend für die Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells in einer 5-km-Auflösung waren am Ende schließlich die optimierten Parametrisierungswerte des maßgeblichen Evaluierungspunktes Neu Darchau.

Abbildung 3.4-16 zeigt für Neu Darchau die Simulationskurve der optimalen Parametrisierung P3 des erweiterten *HD*-Modells im Vergleich zu dem optimalen Parametrisierungsbereich des ursprünglichen *HD*-Modells (siehe Abschnitt 3.4.2.2) und den entsprechenden Messwerten des Evaluierungspunktes. Die Abbildungen 3.4-17 und 3.4-18 zeigen für Lutherstadt Wittenberg und Schöna die Simulationskurve der optimalen Parametrisierung P3 des erweiterten *HD*-Modells im Vergleich zur entsprechenden Messkurve.

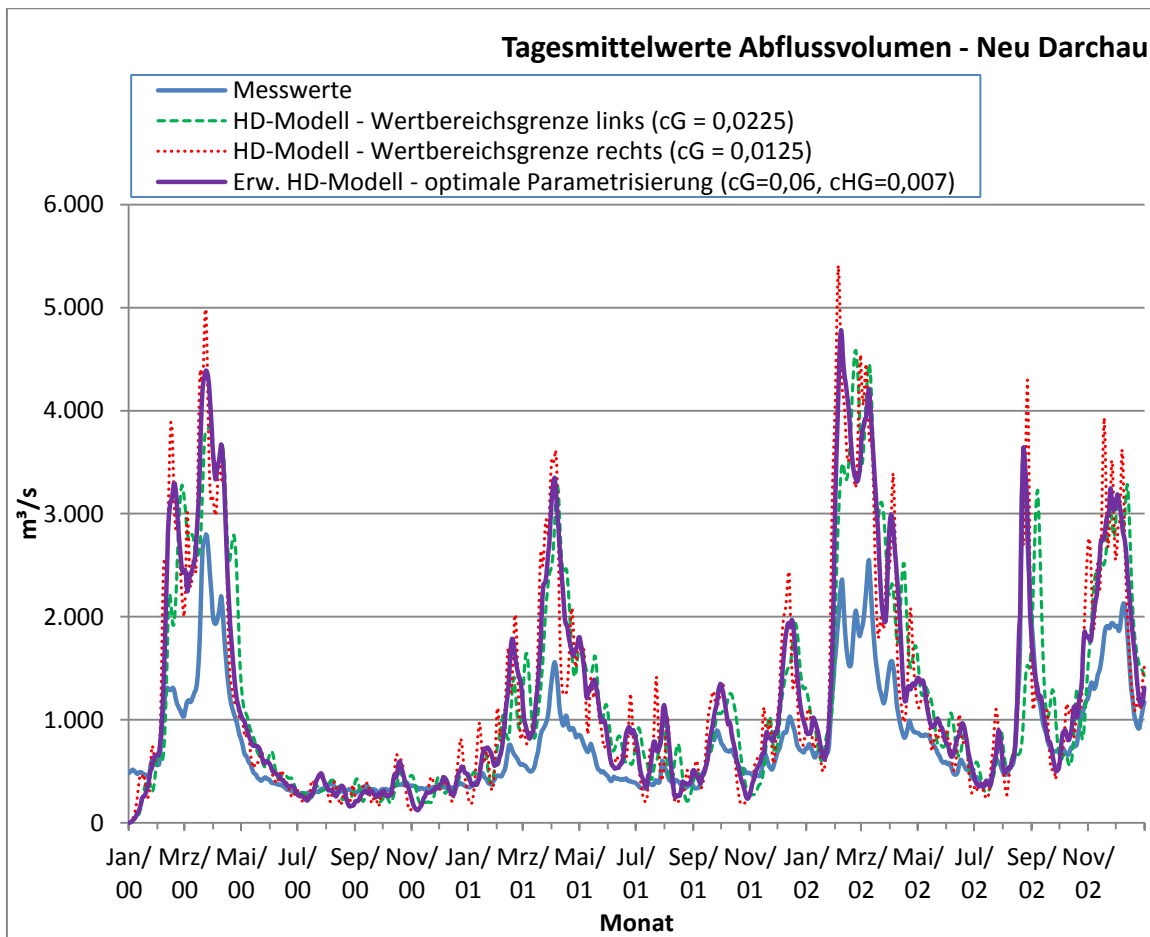


Abbildung 3.4-16: Simulationskurve der optimalen Parametrisierung P3 [ $c_G=0,06$ ,  $n_G=3$  und  $c_{HG}=0,007$  und  $n_{HG}=1$ ] des erweiterten HD-Modells im Vergleich zum optimalen Parametrisierungsbereich des ursprünglichen HD-Modells und der Messkurve am maßgeblichen Evaluierungspunkt Neu Darchau – Parametrisierungen für die 5-km-Auflösung.

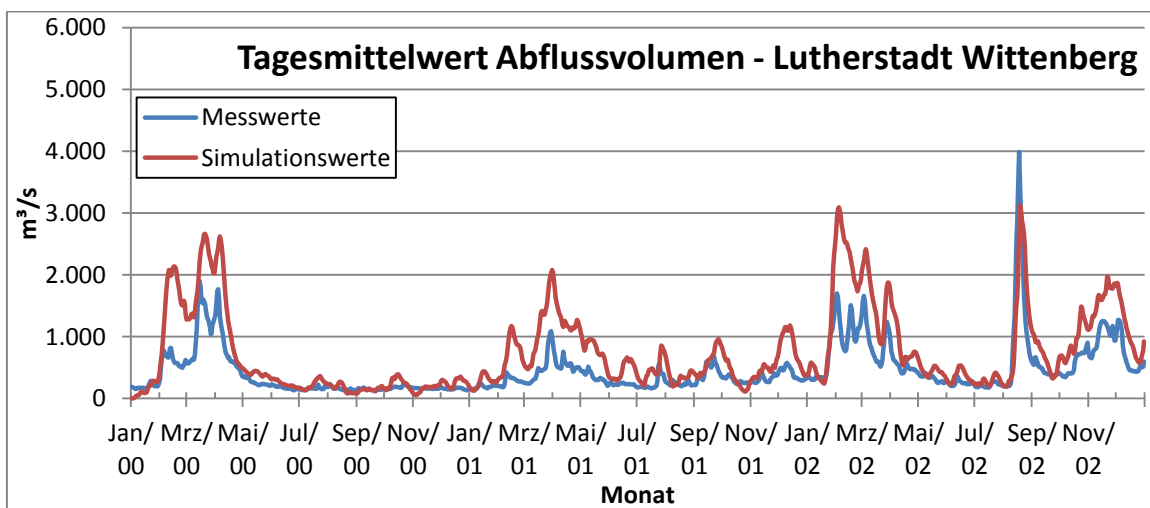


Abbildung 3.4-17: Messkurve und Simulationskurve der optimalen Parametrisierung [ $c_G=0,06$ ,  $n_G=3$  und  $c_{HG}=0,007$  und  $n_{HG}=1$ ] des erweiterten HD-Modells für die 5 km-Auflösung am Evaluierungspunkt Lutherstadt Wittenberg.

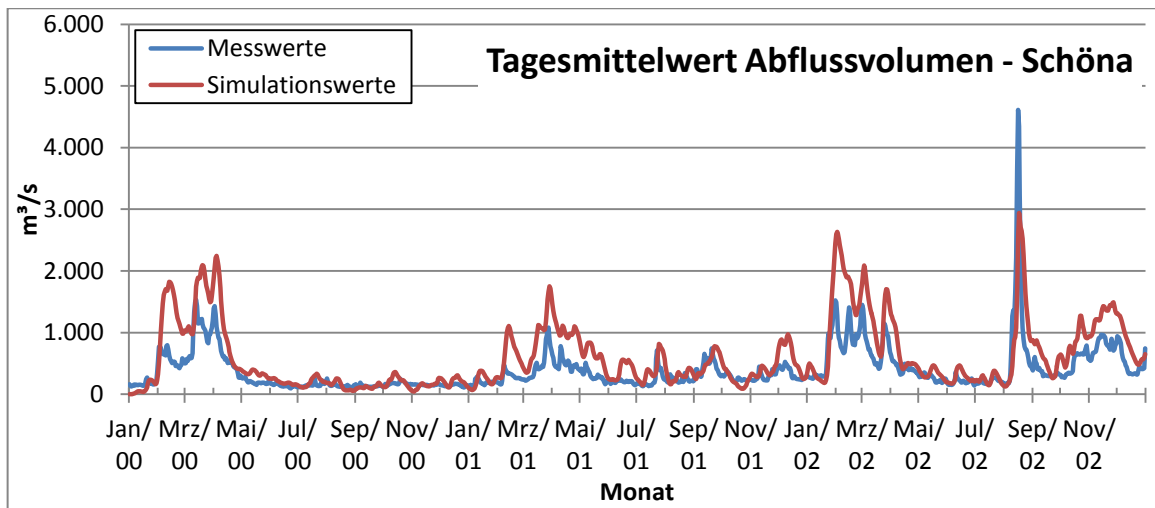


Abbildung 3.4-18: Messkurve und Simulationskurve der optimalen Parametrisierung [ $c_G=0,06$ ,  $n_G=3$  und  $c_{HG}=0,007$  und  $n_{HG}=1$ ] des erweiterten HD-Modells für die 5-km-Auflösung am Evaluierungspunkt Schöna.



## 4. Anwendung des aggregierten Modellsystems

In Kapitel 4.1 werden die für die Anwendung des aggregierten Modellsystems notwendigen Voraussetzungen und die Abfolge der einzelnen Anwendungsschritte erläutert und in einer methodisch einheitlichen Vorgehensweise zusammengeführt. Hieran anschließend wird in Kapitel 4.2 die unmittelbare Anwendung des aggregierten Modellsystems anhand einer Referenzsimulation des Flusseinzugsgebiets der Elbe getestet und die Simulationsergebnisse werden in Hinblick auf die gesteckten Ziele analysiert. In Kapitel 4.3 wird das aggregierte Modellsystem mit seiner Grunddatenbasis am Flusseinzugsgebiet des Nils – einem der komplexesten Einzugsgebiete der Erde – auf seine Grenzen und die unter diesen Umständen verbliebene Aussagekraft hin geprüft.

### 4.1 Methodische Vorgehensweise bei der Anwendung des aggregierten Modellsystems

Mit Hilfe des aggregierten Modellsystems soll ermöglicht werden, den Wasserhaushalt eines beliebigen Flusseinzugsgebiets szenariobasiert zu simulieren und aus den Ergebnissen tendenzielle Aussagen über die zukünftige Wasserverfügbarkeit innerhalb des Einzugsgebiets abzuleiten. Nachdem Grundlagen und Funktionsweisen der einzelnen Bestandteile des aggregierten Modellsystems (Daten, Modelle, Computeranwendungen) beschrieben und wichtige prozedurale Schritte (*DTM*-Aufbereitung, Parametrisierung) in den letzten Unterkapiteln (siehe auch Abbildung 4.1-1) erklärt worden sind, soll nun exemplarisch eine methodische Vorgehensweise beschrieben werden, die eine einheitliche Anwendung des aggregierten Modellsystems auf ein beliebiges Flusseinzugsgebiet ermöglicht.

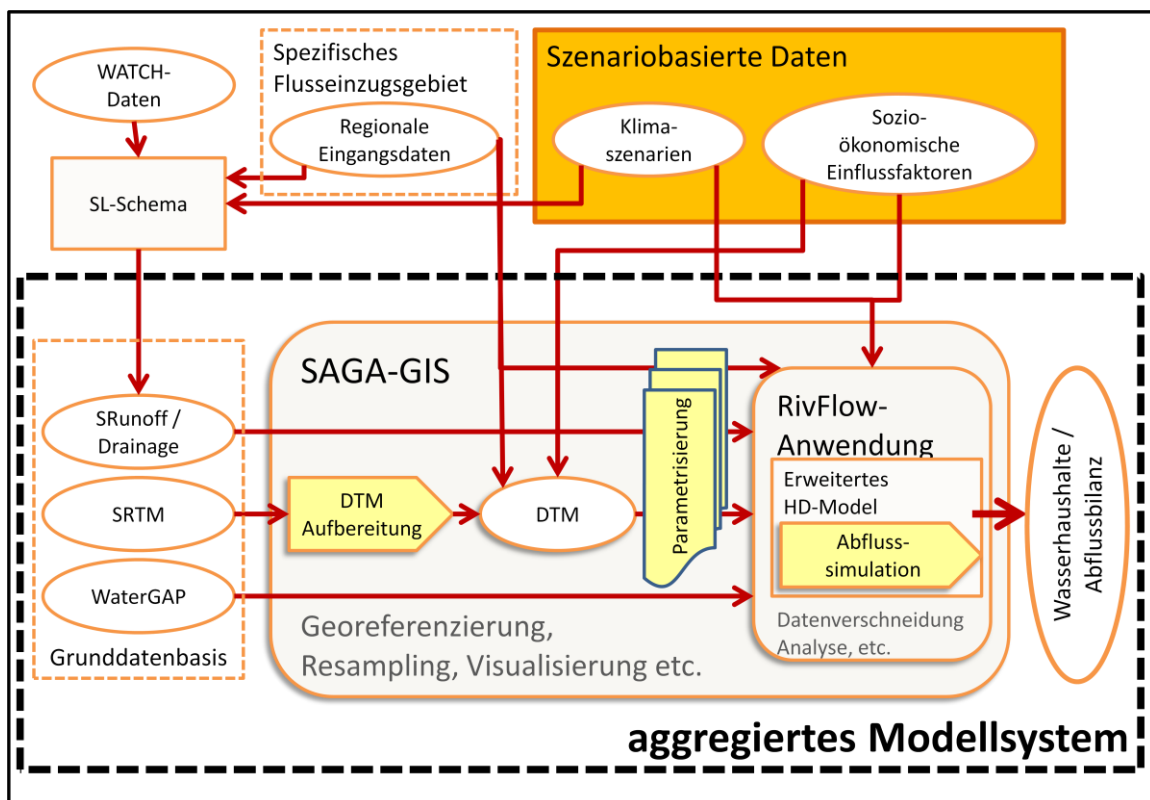


Abbildung 4.1-1: Das aggregierte Modellsystem – schematische Darstellung 3.

Diese Vorgehensweise umfasst fünf wesentliche Schritte. Drei dieser Schritte (Schritt 2 - 4) beziehen sich dabei auf die unmittelbare Anwendung des aggregierten Modellsystems und sind Schwerpunkt dieser Arbeit, siehe auch Abbildung 4.1-2.

**Schritt 1:** Ausgangspunkt einer jeden Anwendung ist eine konkrete Forschungsfrage in Bezug auf den Wasserhaushalt eines spezifischen Flusseinzugsgebietes. Diese Forschungsfrage kann entweder unmittelbar durch die Ergebnisse der szenariobasierten Simulation des Wasserhaushaltes beantwortet werden (Beispiel: Wie variiert das Abflussverhalten für bestimmte klimatische Veränderungen) oder die weitere Auswertung der Simulationsergebnisse hilft die Forschungsfrage zu beantworten (Beispiel: Korrelation von Änderungen im Wasserhaushalt mit sozioökonomischen Fragestellungen).

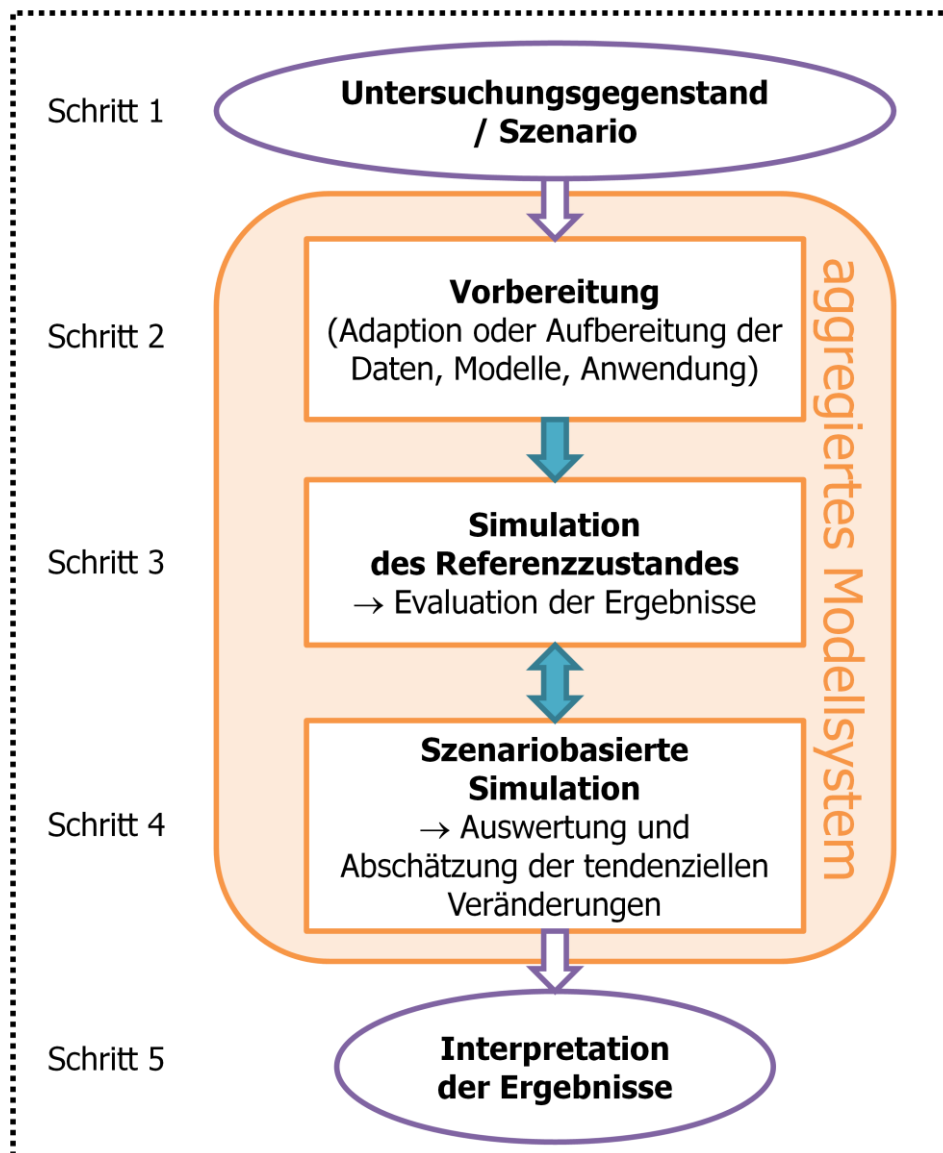


Abbildung 4.1-2: Methodisches Vorgehen bei der Anwendung des aggregierten Modellsystems.

Das der Forschungsfrage zugrundeliegende Szenario und die dafür benötigten Eingangsdaten müssen recherchiert bzw. erhoben werden. Um den Einfluss einzelner Szenariofaktoren am Ende überhaupt abschätzen zu können, sollte das Szenario von seinen Einflussvariablen nicht zu komplex gestaltet oder aber die Einflussvariablen zumindest (teilweise) voneinander entkoppelt zu simulieren sein. Die zur Beantwortung der Forschungsfrage nötige Simulationsgenauigkeit

(zeitliche und räumliche Auflösung, zulässige Abweichung etc.) ist im Vorfeld abzuschätzen. Ebenso ist zu prüfen, ob die dem aggregierten Modellsystem zugrunde liegende Grunddatenbasis (bzw. ggf. zusätzlich berücksichtigte präzisere regionale Eingangsdaten und Einflussfaktoren oder das Abflussmodell mittlerer Komplexität) den spezifischen Anforderungen an die Simulationsgenauigkeit überhaupt gerecht werden können.

**2. Schritt:** Hier gilt es die Eingangsdaten und die Parameter des aggregierten Modellsystems auf die vorgesehene Simulation abzustimmen. Hierzu zählen die Erstellung, Aufbereitung und szenariobasierte Modifikation des Geländemodells für die gewünschte Auflösung und dessen Evaluation. Bei einer veränderten Auflösung ist eine erneute Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells nötig. Alle Eingangsdaten müssen georeferenziert sein und an die gewünschte Auflösung sowie das geforderte Datenformat angepasst werden.

**3. Schritt:** Die Durchführung der Referenzsimulation im dritten Schritt dient dazu die Genauigkeit der Simulationsergebnisse abzuschätzen, die das aggregierte Modellsystem in Bezug auf das spezifische Flusseinzugsgebiet und dessen Wasserhaushalt zu liefern in der Lage ist. Vor allem sollen auf diesem Weg aber auch etwaige systematische Abweichungen identifiziert werden. Zwingende Voraussetzung für die Genauigkeitsabschätzung ist die Verfügbarkeit realer Messreihen (Vergleichswerte) in Hinblick auf die Wasserflussmengen des Hauptstroms. Diese Messreihen sollten idealerweise in einer zeitlichen Auflösung von Tagen oder Monaten und für einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren vorliegen. Zu bevorzugen sind solche Messreihen, die bis in die Gegenwart reichen und sich zeitlich mit den übrigen Eingangsdaten decken. Anhand der Grunddatenbasis und etwaiger zusätzlicher, präziserer Eingangsdaten (jedoch keine Szenario-daten) wird dann der Referenzzustand des Wasserhaushaltes innerhalb eines Zeitraum (Vergangenheit bis Gegenwart) simuliert, für den auch Messwerte vorliegen. Auf Basis des Vergleichs von Simulationsdaten und Messwerten wird die Genauigkeit des aggregierten Modellsystems in Bezug auf das vorliegende Flusseinzugsgebiet abgeschätzt. Insbesondere sollen systematische Abweichungen identifiziert werden. Diese werden zumeist durch vereinfachte Modellannahmen, ungenaue Eingangsdaten oder nicht berücksichtigte, kontinuierliche Einflussfaktoren hervorgerufen. Sie können auch zu Abweichungen in der relativen Größe der Simulationsergebnisse führen, schmälern dann aber aufgrund des systematischen Auftretens die Aussagekraft tendenzieller (szenariobasierter) Änderungen nicht. An dieser Stelle stellt sich auch heraus, ob einige Eingangsdaten nicht genau genug sind und präzisere Daten verwendet werden müssen oder ob zusätzliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind, um überhaupt zu hinreichend genauen Simulationsergebnissen zu gelangen.

**Schritt 4:** Ist zwischen den Ergebnissen der Simulation des Referenzzustandes und der entsprechenden Messreihe über den gesamten Simulationszeitraum eine gute tendenzielle Übereinstimmung gegeben, die zugleich auch der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung der jeweils zu beantwortenden Forschungsfrage genügt, dann können im nächsten Schritt szenariobasierte Simulationen durchgeführt werden. Ausgehend von der obigen Simulationsumgebung des Referenzzustandes (d.h. selbe Datengrundlage, Parametrisierung, Modifikationen, Einflussfaktoren etc.) wird eine szenariobasierte Anpassung der Datengrundlage und Einflussfaktoren vorgenommen und auf dieser Basis eine szenariobasierte Simulation durchgeführt. Szenariobasierte Daten und variierte Einflussfaktoren, von denen bekannt ist, dass sie eine Korrelation aufweisen, können in einer Simulation gleichzeitig berücksichtigt werden. Voneinander entkoppelte Einflussfaktoren oder szenariobasierte Daten sollten hingegen getrennt voneinander variiert und simuliert werden, um die Wirkung jedes Einflussfaktors bzw. der Daten separat voneinander abschätzen zu können. Die Ergebnisse der szenariobasierten Simulationen können

dann direkt mit der entsprechenden Simulation des Referenzzustandes verglichen, die jeweiligen Abweichungen bestimmt und ggf. zu möglichen Ursachen (z.B. variiertes Einflussfaktor oder szenariobasierte Daten) in Beziehung gesetzt werden. Unter Berücksichtigung etwaiger systematischer Abweichungen bei der Simulation der Wasserhaushalte des Flusseinzugsgebietes (Schritt 3) sollte es schließlich möglich sein, anhand der Gegenüberstellung der szenariobasierten Simulationsergebnisse und der Ergebnisse der Referenzsimulation Aussagen über die tendenziell zu erwartenden, szenariobasierten Änderungen im Wasserhaushalt des Flusseinzugsgebiets zu treffen. Diese tendenziellen Aussagen sollten schlussendlich und soweit möglich noch einmal auf ihre Genauigkeit hin abgeschätzt werden (auch hinsichtlich der Genauigkeit der Referenzsimulation im direkten Vergleich mit den Messwerten).

**Schritt 5:** Die Ergebnisse bzw. Aussagen, die durch die Anwendung des aggregierten Modellsystems gewonnen werden, müssen in einem letzten Schritt in Hinblick auf die durch den Anwender eingangs definierte Forschungsfrage und unter den zugrundeliegenden geophysikalischen und/oder sozioökonomischen Gesichtspunkten ausgewertet und interpretiert werden. An diesem Punkt sollte dann auch abgeschätzt werden können, ob die Qualität der Ergebnisse bereits für die Beantwortung einer spezifischen Forschungsfrage ausreicht bzw. gut genug ist, um – als ein Bestandteil – Eingang in ein breiter angelegtes Forschungsvorhaben zu finden, an dessen Ende erst die Beantwortung einer Forschungsfrage erfolgen kann.



## 4.2 Evaluierung des aggregierten Modellsystems am Flusseinzugsgebiet der Elbe

In diesem Kapitel soll das im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte aggregierte Modellsystem in einer methodischen Anwendung auf das Flusseinzugsgebiet der Elbe getestet werden – sowohl auf seine Handhabung, als auch auf die erzielte Simulationsgenauigkeit. Die Ergebnisse einer vereinfachten, ausschließlich auf der Grunddatenbasis fußenden Referenzsimulation werden hierfür in Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit kritisch analysiert.

### 4.2.1 Das Flusseinzugsgebiet der Elbe

Die Elbe entspringt im Riesengebirge (Tschechien) in einer Höhe von 1386,3 m und weist bis zu ihrer Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven eine Länge von 1094,3 km auf. Die Flusskilometer werden auf tschechischer und deutscher Seite jeweils getrennt voneinander gezählt; in Tschechien von der Quelle (Elbe-km Null) bis zur deutsch-tschechischen (Elbe-km 367,3), und in Deutschland von der Grenze zu Tschechien (Elbe-km Null) bis zur Mündung in die Nordsee (Elbe-km 727). Im Folgenden wird die deutsche Zählweise verwendet. Der Verlauf der Elbe wird i.A. in drei Abschnitte unterteilt, die *Obere Elbe* (Quelle bis zum Elbe-km 96 in Deutschland), die *Mittlere Elbe* (Elbe-km 96 bis zum Sperrwerk in Geesthacht bei Elbe-km 585,9) und die tidenabhängige *Untere Elbe* (Geesthacht bis Cuxhaven). Das Gesamteinzugsgebiet der Elbe umfasst 148.268 km<sup>2</sup> und etwa 24,6 Mio. Einwohner. 65,54 % der Fläche liegen in Deutschland (entspricht 97.175 km<sup>2</sup>) und ca. 18,6 Mio. Menschen leben im deutschen Teil des Einzugsgebietes (SIMON 2004: 31ff.). Laut SIMON (2004: 34f.) handelt es sich bei der Elbe um einen Fluss des Regen-Schnee-Typs, dessen Abflussverhalten erheblich durch die Schneeschmelze beeinflusst wird. Auch trage die Bodenbedeckung des Elbeeinzugsgebietes wesentlich zum Wasserrückhalt bei. Die Elbe kann als ein Fluss angesehen werden, der noch überwiegend über ein natürliches Flussbett verfügt. So weist der Elbestrom auf der deutschen Seite bis Geesthacht keinerlei Stau- oder Speicherbecken auf, im kürzeren tschechischen Abschnitt dafür aber eine Anzahl von 25 Stauanlagen (TÖCKNER et al. 2009). Auch wenn das zeitliche Abflussverhalten des Elbstroms in Deutschland nicht direkt durch wasserbauliche Maßnahmen reguliert wird, so weisen die Zuflüsse innerhalb des gesamten Elbeeinzugsgebietes über 275 Talsperren auf, die sich insbesondere auf die Teileinzugsgebiete der Oberen und Mittleren Elbe konzentrieren (SIMON 2004: 46).

Eine umfassende Beschreibung der Charakteristika des Flusseinzugsgebietes der Elbe und eine fundierte Betrachtung einzelner Flussabschnitte finden sich in IKSE (2005). Die Abbildung 4.2-1 zeigt das Flusseinzugsgebiet der Elbe, eingezeichnet ist hier auch die Lage der Evaluierungspunkte Neu Darchau, Lutherstadt Wittenberg und Schöna sowie das Sperrwerk Geesthacht. Abbildung 4.2-2 gibt einen Überblick der Talsperren innerhalb des Elbeeinzugsgebietes.



Abbildung 4.2-1: Flusseinzugsgebiet der Elbe (IKSE 2004).



Abbildung 4.2-2: Talsperren im Elbeeinzugsgebiet (IKSE 2004).

## 4.2.2 Die Referenzsimulation

Grundlage der Simulation sind das bereits aufbereitete Geländemodell (*DTM*-Raster) des Elbe-Flusseinzugsgebietes, die 5-km-Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells und die Grunddatenbasis, bestehend aus den *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten des *SL*-Schemas sowie den sozio-ökonomischen Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells.

Da für diese Arbeit nur *WaterGAP*-Daten bis zum Jahr 2000 zur Verfügung standen, wird die Referenzsimulation für den Zeitraum von 1. Januar 1996 bis 31. Dezember 2000 durchgeführt. Die Simulation beschränkt sich auf die Abflussprozesse innerhalb des Flusseinzugsgebiets. Zum einen kann das aggregierte Modellsystem so für einen von der Parametrisierung abweichenden Simulationszeitraum getestet werden, zum anderen wird die Rechenzeit minimiert, wenn der Wasserabfluss nicht über das gesamte *DTM*-Raster berechnet wird. In Tabelle 4.2-1 sind alle übrigen, der Simulation zugrunde liegenden Parametereinstellungen zu finden. Alle Simulatio-

nen beginnen an dieser Stelle mit nicht-initiierten Speichern, d.h. in den ersten ca. 30 Tagen ist in den Simulationskurven noch das Einschwingen der Speicher zu beobachten.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Simulationszeitraum	1996 bis 2000	$n_G$	3
Simulation mit Speicherwerten initialisieren?	Nein	$n_{HG}$	1
Simulationstage [d]	1827	$n_O$	1
Simulationsschrittlänge [s]	900	$c_G$	0.06
Geschwindigkeitsobergrenze [km/h]	6	$c_{HG}$	0.007
Evaluierungspunkte: (x, y)	Neu Darchau: (30, 115)	$c_O$	0.357
	Lutherstadt Wittenberg: (54, 85)	$p_B$	300
	Schöna: (78, 65)		
Ausgangsrasterzelle des Flusseinzugsgebietes: (x, y)	Geesthacht: (22, 199)		

Tabelle 4.2-1: Für die Simulation des Elbeeinzugsgebiets verwendete Parametereinstellungen in der RivFlow-Anwendung

Am Anfang der Evaluierung soll zunächst nur die Simulation der natürlichen Abflussprozesse innerhalb des Elbeeinzugsgebietes stehen, d.h. die sozioökonomische Wassernutzung wird zunächst nicht berücksichtigt. Die hierfür benötigten Eingangsdaten wurden bereits im Rahmen der Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells erzeugt und entsprechend aufbereitet. Abbildung 4.2-3 zeigt die mit dem *RivBasin*-Modul berechneten Grenzen (Gewässerscheiden) des Flusseinzugsgebietes der Elbe auf Basis des verwendeten *DTM*-Rasters mit den jeweiligen Teileinzugsgebieten, welche in Hinblick auf die jeweils zugehörige Hauptgerinnerasterzelle farblich abgestuft sind. Die Mündungsrasterzelle des Einzugsgebietes ist das Elbe-Sperrwerk in Geesthacht bei Hamburg. Bei einer Rasterzellenauflösung von 5.000 Metern befinden sich 5.623 Rasterzellen innerhalb der Grenzen des Flusseinzugsgebietes. Auch bei einem Vergleich mit Abbildung 4.2-1 zeigt sich, dass die Grenzen des Elbeeinzugsgebietes mit wenigen Ausnahmen sehr gut berechnet wurden und mit dem tatsächlichen Verlauf überwiegend übereinstimmen. Im Bereich des Dreiländerecks zwischen Deutschland, Tschechien und Polen ist das Einzugsgebiet der Elbe aber z.B. etwas zu groß berechnet worden. Es ist hier anzunehmen, dass durch Ungenauigkeiten des Geländemodells ( $\rightarrow$ *DTM*-Raster) im Bereich des Isergebirges/Zittauer Gebirges das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße nicht wie eigentlich vorgesehen in die Oder mündet, sondern als Abfluss in das Elbeeinzugsgebiet berücksichtigt wurde. Für eine detailliertere Untersuchung des Elbeeinzugsgebietes können diese potenziellen Fehler mit Hilfe der in Kapitel 3.2 vorgestellten Methoden im *DTM*-Raster bereinigt werden. Im Sinne einer vereinfachten Betrachtung können diese Unstimmigkeiten hier aber zunächst vernachlässigt werden.

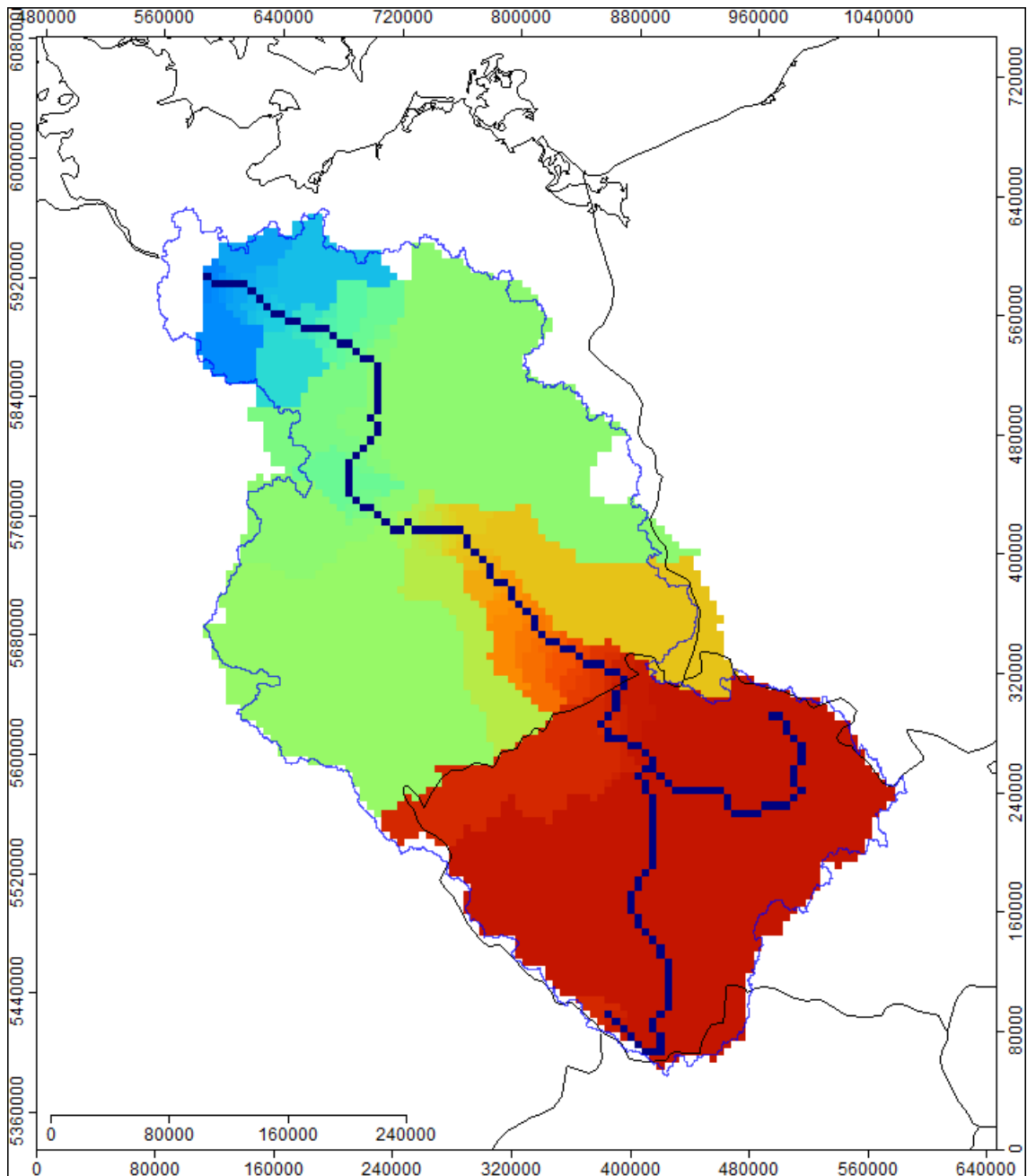


Abbildung 4.2-3: Flusseinzugsgebiet der Elbe mit den Teileinzugsgebieten in farblicher Abstufung und den Hauptströmen in dunkelblau. In hellblau die Umgrenzung des Flusseinzugsgebietes der Elbe nach HydroSHEDS-Daten.<sup>26</sup>

#### 4.2.2.1 Natürlicher lateraler Wasserhaushalt

Mit Hilfe des *LandFlow*-Moduls wird als erster Schritt eine Simulation der ausschließlich natürlichen Abflussprozesse (keine sozioökonomischen Einflüsse) innerhalb des Flusseinzugsgebietes der Elbe, d.h. des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes, durchgeführt. Eine solche fünfjährige Simulation des Elbeeinzugsgebietes dauert mit der vorliegenden EDV etwa 12 Stunden. Abbildung 4.2-4 zeigt für den gesamten Simulationszeitraum exemplarisch die Tagesmittelwerte des simulierten Abflussvolumens in  $\text{m}^3/\text{s}$  für den Evaluierungspunkt Neu Darchau und stellt diese Ergebnisse den Messwerten des entsprechenden Zeitraumes gegenüber.

<sup>26</sup> HydroSHEDS-Daten des WWF, abrufbar unter: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

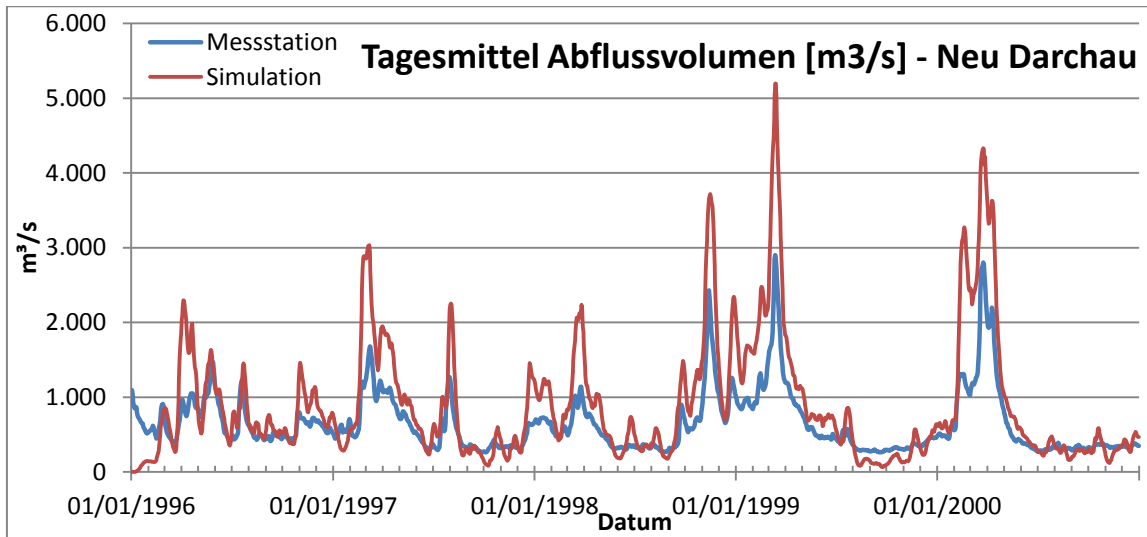


Abbildung 4.2-4: Natürlicher lateraler Wasserhaushalt: Simulierte und gemessene Tagesmittelwerte des Abflussvolumens in  $\text{m}^3/\text{s}$  für die Jahre 1996 bis 2000.

Wie auch schon im Verlauf der Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells (Kapitel 3.4) deutlich wurde, fallen die simulierten Abflussmaxima des natürlichen Wasserabflusses erheblich größer als die Messwerte aus. Die *Low-Flow*-Bereiche (Abschnitte sehr geringer Durchflussraten) stimmen aber trotz einiger Fluktuationen recht gut mit der Messkurve überein. Dieser Umstand wird auch bei der Betrachtung der Monatsmittelwerte des Abflussvolumens in  $\text{m}^3/\text{s}$  in Abbildung 4.2-5 deutlich, die Abweichungen der Abflussmaxima werden hier durch das Mittel noch etwas relativiert.

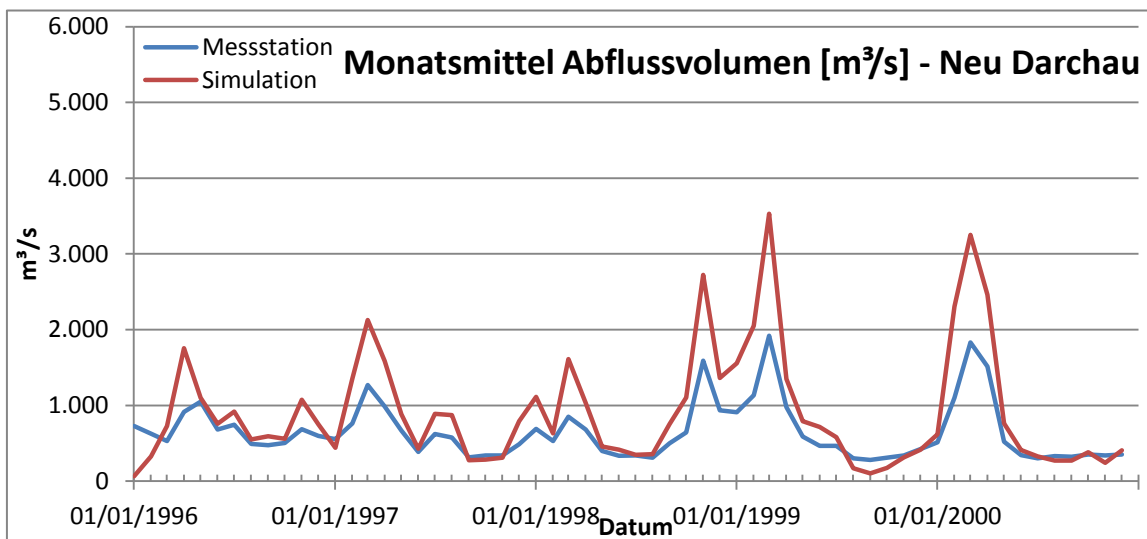


Abbildung 4.2-5: Natürlicher lateraler Wasserhaushalt: Simulierte und gemessene Monatsmittelwerte des Abflussvolumens in  $\text{m}^3/\text{s}$  für die Jahre 1996 bis 2000.

Ein Vergleich der Summe des gemessenen und simulierten Abflussvolumens für den fünfjährigen Simulationszeitraum kann Tabelle 4.2-2 für den Evaluierungspunkt Neu Darchau entnommen werden. Insgesamt zeigt sich hier, dass die anhand des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes simulierte Abflussmenge um einen Betrag von  $4,1 \times 10^{10}$  größer als die über denselben Zeitraum gemessene Abflussmenge ist, was in etwa einer Überschätzung des simulierten Abflusses um 39,8 % entspricht.

**Natürlicher lateraler Wasserhaushalt:** Simulationszeitraum 1996 – 2000 (5 Jahre),  
Evaluierungspunkt Neu Darchau

Simuliertes Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]	Gemessenes Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]	Abweichung [m <sup>3</sup> ]
1,44 x 10 <sup>11</sup>	1,03 x 10 <sup>11</sup>	4,10 x 10 <sup>10</sup> (39,8 %)

*Tabelle 4.2-2: Natürlicher lateraler Wasserhaushalt: Abweichung des simulierten vom gemessenen Abflussvolumen in m<sup>3</sup>/s am Evaluierungspunkt Neu Darchau für den fünfjährigen Simulationszeitraum.*

Außerdem kann anhand der vom *LandFlow*-Modul erzeugten Monitoringdaten für die Simulation des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes des Elbeinzugsgebietes geprüft werden, ob die simulierte Wasserbilanz innerhalb des Einzugsgebietes stabil ist, d.h. ob der Simulationsprozess des Wasserhaushaltes in sich geschlossen ist und nicht intendierte Wasserverluste ausgeschlossen werden können. Hierfür muss – nachdem die Speicher eingeschwungen sind – im zeitlichen Mittel genauso viel Wasser durch die Ausgangsrasterzelle des Flusseinzugsgebietes abfließen, wie durch vertikale und ggf. punktuelle Zuflüsse hinzukommt. Trägt man die Werte der im Verlauf der Simulation erzeugten Monitoringdatei „*Monitoring\_RivBasin.txt*“ gegen die Zeit auf (siehe Abbildung 4.2-6), so ist deutlich zu erkennen, dass sich die Kurven des Tagesabflusses und die 25-tägige Trendlinie (gleitender Mittelwert) der vertikalen Zuflüsse des Flusseinzugsgebietes einander immer wieder angleichen. Dieses Verhalten belegt, dass die Wasserbilanz des Flusseinzugsgebietes im Rahmen der Simulation mit dem *LandFlow*-Modul im zeitlichen Mittel stabil ist. Die Kurve des „Flusseinzugsgebietsspeichers“ entspricht der Gesamtsumme des Wassers im Flusseinzugsgebiet (Wasserfluss und Wasserspeicher) für den jeweiligen Simulationstag. Der Umstand einer stabilen Wasserbilanz wird auch durch einen Vergleich der für den gesamten fünfjährigen Simulationszeitraum akkumulierten Abflüsse aus dem Flusseinzugsgebiet (1,504 x 10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>) mit den vertikalen Zuflüssen innerhalb selbigen Gebietes (1,509 x 10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>) bestätigt, deren Differenz genau dem in den Speichern des Flusseinzugsgebietes verbliebenen Wassers von etwa 5 x 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> am Ende des Simulationszeitraumes entspricht. Außerdem kann in dieser Abbildung zu Beginn des Simulationszeitraumes auch sehr gut das Einschwingen der Speicher beobachtet werden, das im Wesentlichen nach etwa 30 Tagen abgeschlossen ist.

Obwohl bei den bisherigen Simulationen des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes noch keine sozioökonomischen Einflussfaktoren berücksichtigt wurden – eine genaue Einschätzung der Simulationsgenauigkeit und Rückschlüsse auf mögliche Abweichungsursachen daher noch verfrüht wären – soll an dieser Stelle dessen ungeachtet analysiert werden, ob eine Systematik in der bisherigen Abweichung der Simulationskurve des natürlichen Wasserabflusses von den entsprechenden Messwerten des Evaluierungspunktes Neu Darchau liegt. Hierfür wird untersucht, ob zwischen den simulierten und gemessenen Tagesmittelwerten ein einfacher funktionaler Zusammenhang der Form

$$(21) \quad \text{Messwert} = \text{Simulationswert} \cdot p + a ,$$

hergestellt werden kann, anhand dessen die beiden Kurven in eine bessere Übereinstimmung (Deckung) gebracht werden können, wobei  $p$  ein Variationsparameter und  $a$  ein Offsetwert sein soll.

Abbildung 4.2-7 verdeutlicht, dass für eine Reduktion des Abflusses um 35 % ( $p = 0,65$ ) und einem Offsetwert von  $a = +100$ , eine deutlich bessere Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Werte erreicht wird.

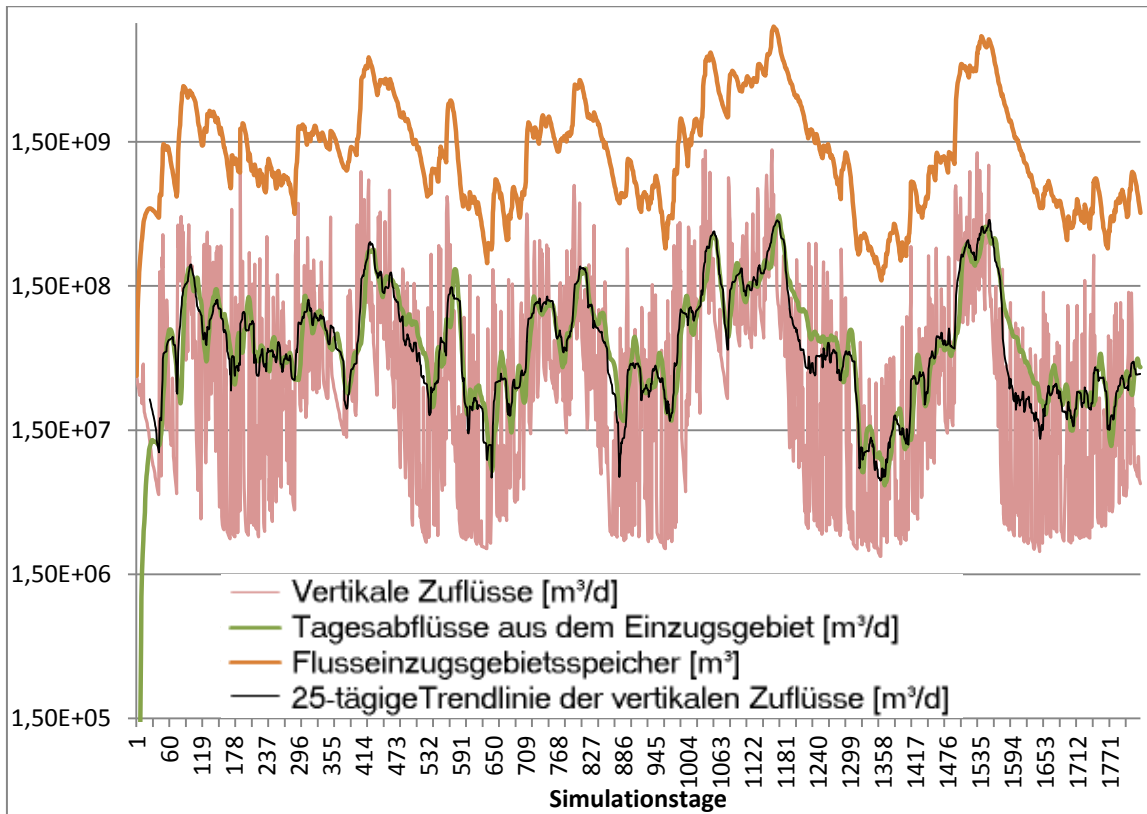


Abbildung 4.2-6: Monitoringdaten der fünfjährigen Simulation des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes für die Wasser(abfluss)volumen innerhalb des Flusseinzugsgebiets.

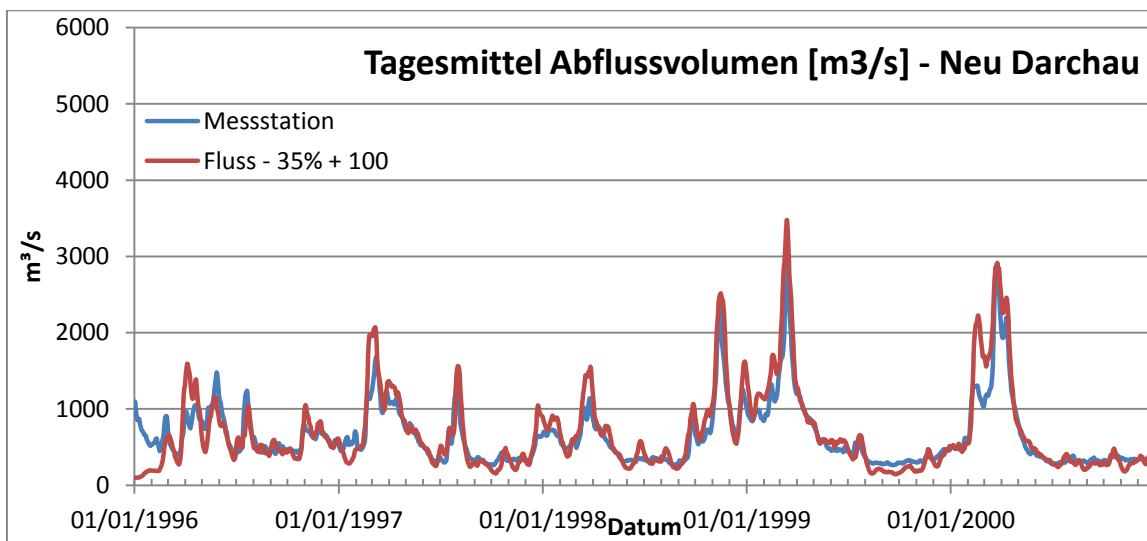


Abbildung 4.2-7: Ergebnis der Abweichungsanalyse, bei um 35% reduzierten, und gleichzeitig um einen Offset von hundert erhöhten Simulationenwerten.

Diese Erkenntnis legt an dieser Stelle den Schluss nahe, dass zumindest eine systematische Abweichung vorliegt, welcher über die gesamte Simulationszeit die gleiche Ursache zugrunde liegen muss. Ob diese Ursache jedoch in bisher nicht berücksichtigten sozioökonomischen Einflussfaktoren (z.B. Wasserentnahmen) oder aber in systematischen Fehlern und den Vereinfachungen der zugrunde liegenden Modelle bzw. Eingangsdaten begründet liegt, wird im nächsten Abschnitt untersucht werden. Hierfür wird der gesamte laterale Wasserhaushalt des Elbeeinzugsgebietes simuliert.



#### 4.2.2.2 Gesamter lateraler Wasserhaushalt

Für die Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes müssen sowohl die geophysikalischen als auch die sozioökonomischen Einflussfaktoren der Grunddatenbasis berücksichtigt werden. Mit Hilfe des *GridCombination*-Moduls (siehe Abschnitt 3.3.2.1) und auf Basis der verschiedenen Kategorien der Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells werden für den Simulationszeitraum von 1996 bis 2000 hierfür monatliche Rasterdatensätze über die gesamte Wasserentnahme (*withdrawal*) innerhalb des Elbeeinzugsgebiets in der Einheit  $\text{m}^3/\text{s}$  erzeugt. Die auf den *WaterGAP*-Daten basierende Summe der dynamischen Entnahmen im Elbeeinzugsgebiet (nur bis Geesthacht) beläuft sich für den Simulationszeitraum (5 Jahre) auf  $5,27 \times 10^{10} \text{ m}^3$ .

Um die geeignetste Methode zur Wasserentnahme über die Fläche zu identifizieren, werden auf Grundlage der dynamischen Wasserentnahme und bei einem Vorlauf von 30 Tagen (ohne Entnahmen) drei Simulationen des gesamten lateralen Wasserhaushaltes für den Zeitraum von 1996 bis 2000 für das Elbeeinzugsgebiet bis Hamburg durchgeführt. Jede der drei möglichen Arten der Wasserentnahme im Rahmen der dynamischen Flächenwassernutzung (siehe Abschnitt 3.3.2.2) werden nun einmal separat simuliert; also die „*anteilige Entnahme aus den Hauptgerinnerasterzellen*“, die „*anteilige Entnahme aus den Rasterzellen eines Teileinzugsgebiets*“ und die „*1:1 Entnahme aus den Rasterzellen*“.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse jeder dieser drei Entnahmemethoden sind nur unmerkliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Abflussmaxima der Simulations- und Messkurven erkennbar gewesen, aber die drei Kurven weisen in den Bereichen niedriger Durchflussraten (*Low-Flow*-Bereiche) sichtbare Abweichungen voneinander auf. Das Auftreten dieser Abweichungen ist vor allem durch die getroffene Entnahmekonvention bedingt, nach der nicht mehr Wasser dem Abfluss einer Rasterzelle entnommen werden darf, als effektiv an Abflussmenge simuliert wird (siehe hierfür die Diskussion in Abschnitt 3.3.2.2).

Wie sich herausstellt bedeutet dies, dass bei anteiliger Entnahme aus den Hauptgerinnerasterzellen dem Flusseinzugsgebiet in der Summe zwar am meisten Wasser entnommen werden kann – weil das Hauptgerinne vergleichsweise viel Wasser führt –, der simulierte Wasserfluss des Hauptgerinnes in den *Low-Flow*-Bereichen dann aber teilweise auch fast auf den Wert Null absinkt. Bei den anderen beiden Entnahmemethoden sinkt der simulierte Wasserfluss in den *Low-Flow*-Bereichen des Hauptgerinnes weniger stark. Das hat seine Ursache aber insbesondere darin, dass ein erheblicher Anteil der Entnahmen über die Fläche des Gerinnes erfolgt. Hier wird der simulierte Abfluss einzelner Gerinnerasterzellen aber viel häufiger geringer als die beabsichtigten Entnahmen ausfallen und ein größerer Anteil der Entnahmen kann somit von vornherein nicht vorgenommen werden. Auf Basis der Auswertung der jeweiligen Monitoringdaten (*Monitoring\_monthWUseRivBasin.txt*) zeigt Tabelle 4.2-3 für jede simulierte Entnahmemethode die Summe der im Simulationszeitraum tatsächlich vorgenommenen Entnahmen (in Klammern der prozentuale Anteil an der eigentlich beabsichtigten Entnahmemenge) sowie die Menge an Wasser, welche aufgrund der Entnahmekonvention nicht entnommen und damit auch nicht als Entnahme berücksichtigt werden konnte.

Entnahmemethode	vorgenommene Entnahme in m <sup>3</sup>	nicht berücksichtigte Entnahme in m <sup>3</sup>
anteilig aus den HG-Rasterzellen	5,2 x 10 <sup>10</sup> ( 91% )	5,18 x 10 <sup>9</sup>
anteilig aus den Rasterzellen der Teileinzugsgebiete	4,07 x 10 <sup>10</sup> ( 71% )	1,65 x 10 <sup>10</sup>
1:1 Entnahme aus den Rasterzellen	2,98 x 10 <sup>10</sup> ( 52% )	2,74 x 10 <sup>10</sup>

Tabelle 4.2-3: Menge der vorgenommenen und der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen innerhalb des Elbeeinzugsgebietes (bis Hamburg) während des Simulationszeitraums von 1996 bis 2000 für die jeweilige Entnahmemethode. In Klammern der prozentuale Anteil der vorgenommenen Entnahme an einer eigentlich beabsichtigte Entnahme von  $5,72 \times 10^{10} \text{ m}^3$ .

Unter der Annahme, dass die Wassernutzungsdaten des WaterGAP-Modells die Wasserentnahmen für das gesamte Elbeeinzugsgebiet in einer guten Näherung wiedergeben, soll für die weitere Betrachtung nun diejenige Entnahmemethode gewählt werden, welche die bestmögliche Ausschöpfung dieses Entnahmevermögens ermöglicht. Mit einem erreichten Entnahmeanteil von etwa 90 % (der eigentlich beabsichtigten Entnahmen) handelt es sich in diesem Fall um die Methode der anteiligen Entnahmen aus den Hauptgerinnerasterzellen. Für die Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes mit einer dynamischen Flächenwassernutzung (anteiliger Entnahme aus den Hauptgerinnerasterzellen) zeigt Abbildung 4.2-8 die Simulationskurve des Abflussvolumens am Evaluierungspunkt Neu Darchau.

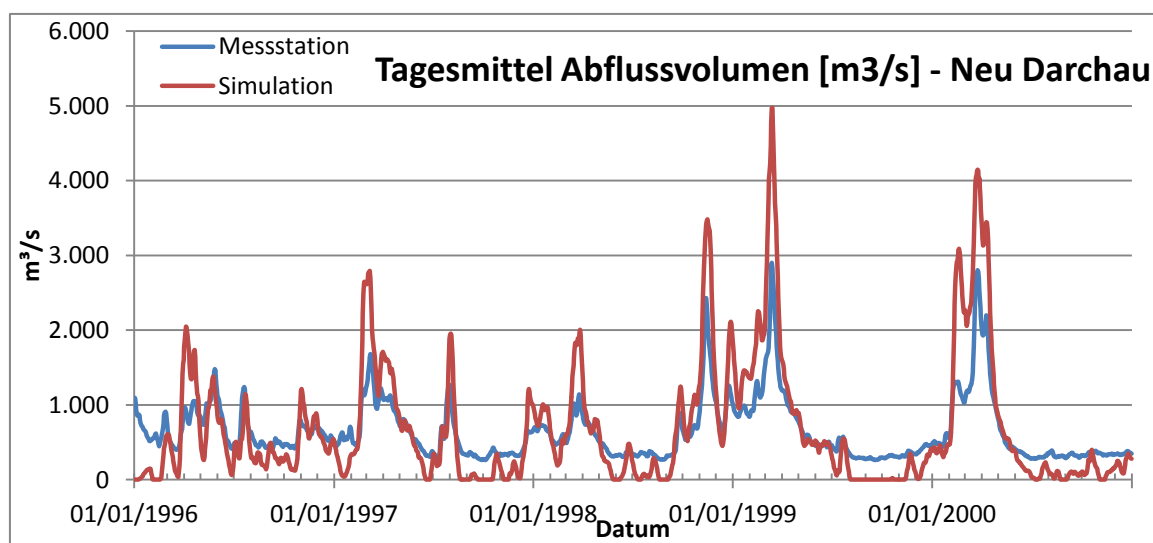


Abbildung 4.2-8: Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes mit dynamischer Flächenwassernutzung bei anteiliger Entnahme aus den Hauptgerinnerasterzellen. Simulations- und Messkurve des Abflussvolumens am Evaluierungspunkt Neu Darchau.

Deutlich zu erkennen ist das Absinken der *Low-Flow*-Bereiche im Vergleich zu Abbildung 4.2-4. Der eigentliche Zusammenhang von vertikalen Zuflüssen, der Wasserentnahme und dem resultierenden Abfluss aus dem Elbeeinzugsgebiet wird durch die im Simulationsverlauf gespeicherten Monitoringdaten sehr gut verdeutlicht, die in Abbildung 4.2-9 gegen die Zeit aufgetragen sind.

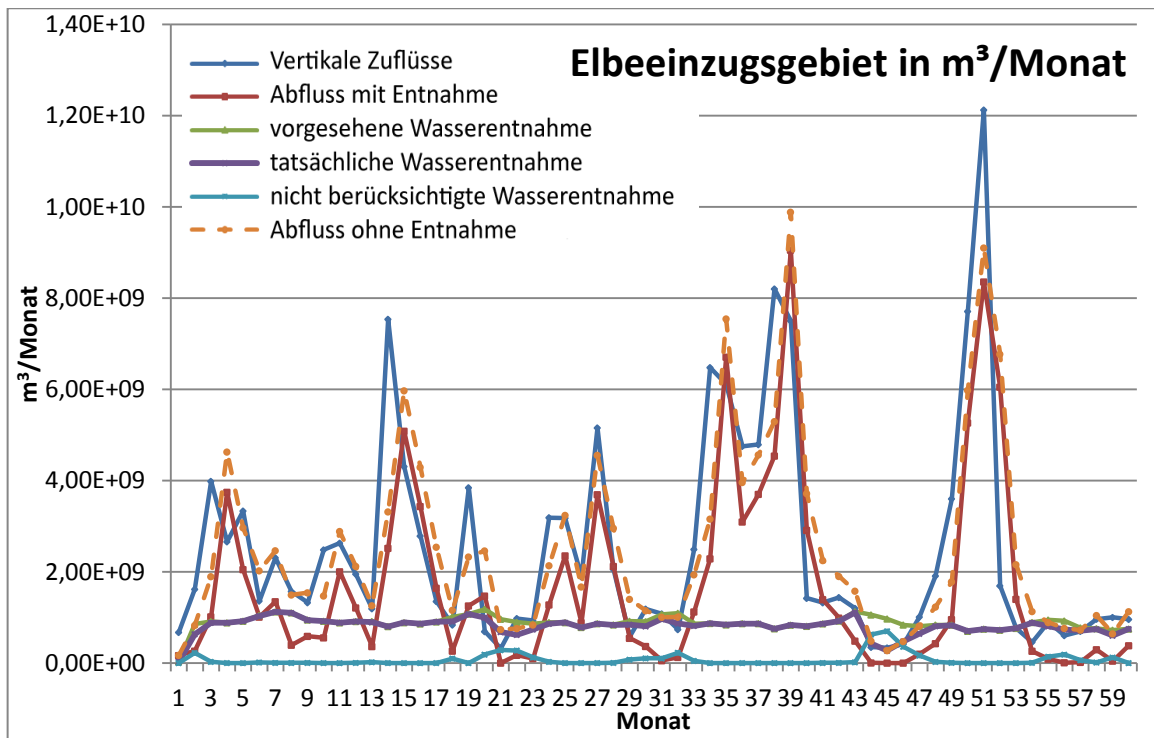


Abbildung 4.2-9: Monatliche Gegenüberstellung der verschiedenen Prozesswerte [ $\text{m}^3/\text{Monat}$ ] der Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Elbeeinzugsgebietes im Zeitraum von 1996 bis 2000 (Graphen der vorgesehenen und tatsächlichen Wasserentnahme zumeist deckungsgleich).

Die hier abgebildete Wasserbilanz des Elbeeinzugsgebietes lässt erkennen, dass die monatlichen Werte der vorgesehenen Flächenwasserentnahmen im Vergleich zu den vertikalen monatlichen Zuflüssen innerhalb des Einzugsgebietes im Mittel sehr viel geringer ausfallen. Aufgrund der jahreszeitlichen Schwankungen der Zuflüsse und der daraus auch resultierenden Abflussschwankungen im Hauptgerinne treten dennoch Abschnitte mit sehr niedrig simulierten Abflussraten auf (siehe gestrichelte Kurve des natürlichen *Abflusses ohne Entnahmen*), sodass für einige Abschnitte die eigentlich vorgesehene Wasserentnahme das verfügbare Abflussvolumen übersteigen würden. In diesen Abschnitten kann deshalb nur eine reduzierte Wassermenge tatsächlich entnommen werden, womit eine bestimmte Wassermenge jeweils bei der Entnahme nicht berücksichtigt werden kann. Der Vergleich der zwei Kurven der monatlichen Abflussmengen aus dem Elbeeinzugsgebiet – einmal ohne die Berücksichtigung von Entnahmen, einmal mit Berücksichtigung einer anteiligen Entnahme aus den Hauptgerinnerasterzellen – verdeutlicht noch einmal den eigentlichen Einfluss der dynamischen Flächenwasserentnahme und die resultierenden Unterschiede zwischen natürlichem und gesamtem lateralem Wasserhaushalt in Bezug auf das Elbeeinzugsgebiet für den Simulationszeitraum von 1996 bis 2000. Für die Summe der Abweichung des simulierten Abflussvolumens des gesamten lateralen Wasserhaushaltes von den im Simulationszeitraum gemessenen Abflussmengen am Evaluierungspunkt Neu Darchau, siehe Tabelle 4.2-4.

Bei Betrachtung des gesamten lateralen Wasserhaushaltes wird deutlich, dass die Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Abflussmengen eines fünfjährigen Simulationszeitraumes unter gleichzeitiger Verrechnung der (aufgrund der Entnahmekonvention) nicht berücksichtigten Entnahmen am Evaluierungspunkt Neu Darchau nur eine Abweichung von etwa  $3 \times 10^9 \text{ m}^3$  aufweist.

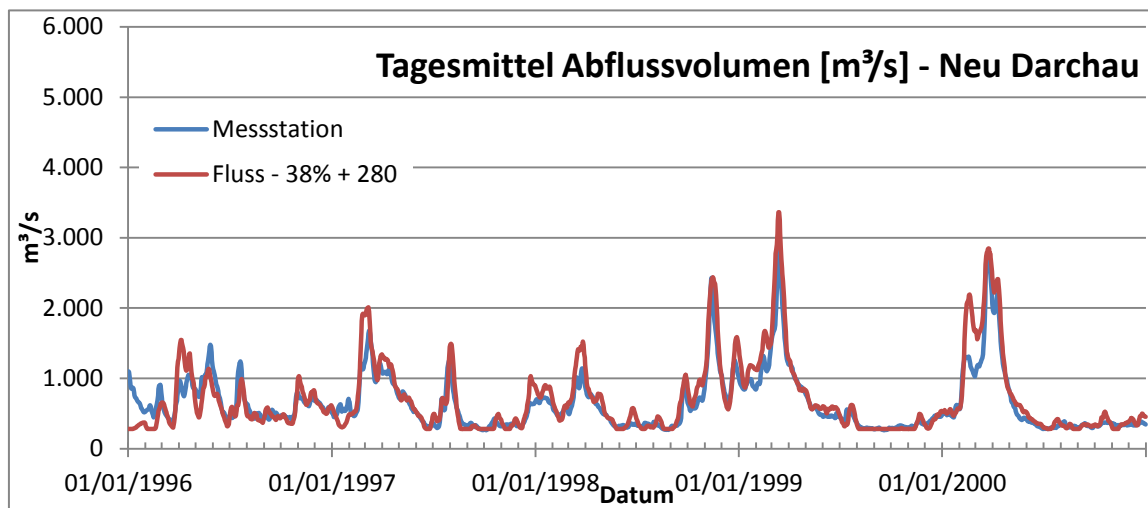
**Gesamter lateraler Wasserhaushalt:** Simulationszeitraum 1996 – 2000 (5 Jahre),  
Evaluierungspunkt Neu Darchau

Simuliertes Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]	Gemessenes Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]	Abweichung [m <sup>3</sup> ]
1,08 x 10 <sup>11</sup>	1,03 x 10 <sup>11</sup>	5 x 10 <sup>9</sup> (4,9 %)
...nach Verrechnung der nicht berücksichtigten Entnahmen von 2 x 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>		3 x 10 <sup>9</sup> (2,9 %)

*Tabelle 4.2-4: Gesamter lateraler Wasserhaushalt: Abweichung des simulierten vom gemessenen Abflussvolumen des Fünfjahreszeitraums am Evaluierungspunkt Neu Darchau. Außerdem verbleibende Abweichung nach Abzug aller in der Simulation nicht berücksichtigter Entnahmen des Flusseinzugsgebietes bis Neu Darchau.*

Dies entspricht nur noch einer Überschätzung des simulierten Abflussvolumens in Höhe von etwa 2,9 % der tatsächlich gemessenen Abflussmenge. Beim direkten Vergleich mit der Simulationskurve des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes in Abbildung 4.2-4 werden die Abflussmaxima am Evaluierungspunkt Neu Darchau für den gesamten lateralen Wasserhaushalt nun zwar mit einer etwas geringeren Höhe simuliert, die Werte sind aber nachwievor erheblich größer als die Messwerte. Außerdem erweisen sich die simulierten Abflusswerte im *Low-Flow*-Bereich als zu klein.

Nach Durchführung einer erneuten Abweichungsanalyse für die Abflussvolumen der Simulationskurve des gesamten lateralen Wasserhaushaltes am Evaluierungspunkt Neu Darchau kann eine systematische Abweichung des Abflussvolumens zwischen Simulations- und Messkurve angenommen werden, die ungefähr in der Größenordnung einer *38-prozentigen* Überschätzung der Werte der Abflussmaxima und einer gleichzeitigen Unterschätzung der *Low-Flow*-Bereiche um etwa 280 m<sup>3</sup>/s liegt, siehe auch Abbildung 4.2-10.



*Abbildung 4.2-10: Ergebnis der Abweichungsanalyse; bei um 38 % reduzierten, und gleichzeitig um einen Offset von 280 m<sup>3</sup>/s erhöhten Simulationswerten des Abflussvolumens (Tagesmittel) am Evaluierungspunkt Neu Darchau.*

Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass für die Simulation des natürlichen und des gesamten lateralen Wasserhaushaltes am Evaluierungspunkt Neu Darchau die Abflussmaxima und der allgemeine Kurvenverlauf der Mess- und Simulationskurve in zeitlicher Hinsicht gut übereinstimmen, eine merkliche zeitliche Abweichung also nicht vorliegt. In Hinblick auf das Abflussvolumen scheint hingegen über den gesamten Simulationsverlauf eine wesentliche systematische Abweichung vorzuliegen. Diese Abweichung kann entweder in Ungenauigkeiten der

Grunddatenbasis sowie der zugrunde liegenden Modelle begründet liegen oder aber auf bisher nicht berücksichtigten Einflussfaktoren beruhen. Im Folgenden soll versucht werden, die mögliche Ursache dieser systematischen Abweichung einzugrenzen.

**Analyse der systematischen Abweichung:** Da es sich um eine systematische Abweichung der Höhe des Abflussvolumens handelt, können die *SRTM*-Daten und das *HD*-Modell als Ursache ausgeschlossen werden, da beide in erster Linie die zeitliche und räumliche Wasserverteilung bei einer Abflusssimulation verantworten und die Simulationskurven in zeitlicher Hinsicht gut mit den Messwerten übereinstimmen. Die gute Übereinstimmung der simulierten Abflussmengen des gesamten lateralen Wasserhaushaltes zu den gemessenen Werten (siehe Tabelle 4.2-4) ist zumindest Beleg dafür, dass sowohl die absolute Menge der Wasserentnahmen (*WaterGAP*), als auch der vertikalen Wasserzuflüsse (*Surface Runoff* und *Drainage*) über den Fünfjahreszeitraum insgesamt die richtige Größenordnung aufweisen.

Wäre die Ursache dieser systematischen Abweichungen in der Grunddatenbasis begründet, so würden die zu beobachtenden Abweichungen im *Low-Flow*-Bereich (zu niedrige Abflussvolumen) und bei den Abflussmaxima (zu hohe Abflussvolumen) eher dafür sprechen, dass entweder die vertikalen Wasserzuflüsse (*Surface Runoff* und *Drainage*) oder aber die Wasserentnahmen (*WaterGAP*) in bestimmten Zeiträumen überschätzt und zu anderen Zeitpunkten unterschätzt sind. Die *WaterGAP*-Daten erscheinen als Ursache hier nur wenig überzeugend, denn sollte die systematische Abweichung maßgeblich durch die Wassernutzungsdaten verursacht werden, dann müssten die bisherigen Entnahmewerte zu Zeiten der simulierten Abflussmaxima um ein Vielfaches zu gering und in den Bereichen des *Low-Flows* gleichzeitig zu groß berechnet sein. Dieses würde starke Schwankungen in der Wassernutzung voraussetzen, die für das Elbeinzugsgebiet nur wenig plausibel erscheinen.

In Hinsicht auf die verwendete Grunddatenbasis verbleiben also nur die vertikalen Zuflüsse (*Surface Runoff* und *Drainage*) als mögliche Ursache der systematischen Abweichung. Die im Rahmen der Simulation der Wasserhaushalte des Elbeinzugsgebiets verwendeten *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Daten wurden über das *SL*-Schema (siehe Abschnitt 3.1.2.3) auf Basis von *EU WATCH*-Klimadaten erzeugt. Es gilt nun also die Möglichkeit abzuklären, ob die Werte des *Surface Runoffs* und/oder der *Drainage* für Zeiten hoher Niederschlagsmengen zu groß und für Zeiten niedriger Niederschlagsmengen zu gering ausfallen. Da die *Drainage* die Höhe des Grundwasserabflusses steuert und bei einer für alle Rasterzellen einheitlichen Speicherverweildauer von 30 Tagen nur einen sehr trägen Einfluss auf die Abflussprozesse des Wasserhaushaltes – insbesondere auf die des Hauptgerinnes – aufweist, zeigte die prozentuale Variation der *Drainage*-Werte in Hinsicht auf die Absenkung der simulierten Abflussmaxima nicht die erhoffte Wirkung. Das Hauptaugenmerk soll daher zunächst auf der Variation des *Surface Runoffs* und damit auf dem schnelleren Oberflächenabfluss liegen. Im Rahmen dieser Betrachtung werden nun Simulationen des gesamten lateralen Wasserhaushaltes durchgeführt, bei denen der *Surface Runoff* prozentual verringert (Maxima absenken) und zugleich ein für alle Rasterzellen einheitlicher Offsetwert auf den *Surface Runoff* addiert wird (*Low-Flow*-Bereich erhöhen). Es sollte hierbei darauf geachtet werden, dass die absolute Menge des *Surface Runoffs* über den fünfjährigen Simulationszeitraum annähernd konstant bleibt. Ergibt sich bei diesen Simulationen, dass durch bestimmte systematische Variationen des *Surface Runoffs* die vorher identifizierte systematische Abweichung zu den Messwerten erheblich verringert werden kann oder nicht länger auftritt, sind als mögliche Ursache der systematischen Abweichung die *Surface-Runoff*-Daten bzw. der hieraus resultierende Oberflächenabfluss anzunehmen.

Abbildung 4.2-11 zeigt den Evaluierungspunkt Neu Darchau für eine solche Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes mit variiertem *Surface Runoff*. Hierfür wurde der *Surface Runoff* je Rasterzelle und Zeitschritt um 50 % reduziert und gleichzeitig pro Rasterzelle ein einheitlicher Offsetwert von  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$  auf den *Surface Runoff* addiert, was bei 5.623 Rasterzellen im Mittel einer Offsetmenge des *Surface Runoffs* von etwa  $360 \text{ m}^3/\text{s}$  über die gesamte Fläche des Einzugsgebietes entspricht (die Addition des Offsetwertes erfolgt erst nach der prozentualen Reduktion). Die Menge der prozentualen Abflussreduktion des *Surface Runoffs* entspricht dabei über den Fünfjahreszeitraum in etwa der Menge Wasser, die dem *Surface Runoff* in den fünf Jahren gleichmäßig verteilt als Offsetwert hinzugefügt wird. Die Abbildung des so korrigierten gesamten lateralen Wasserhaushaltes zeigt eine nun deutlich bessere Übereinstimmung in den Höhen der Abflussvolumen von Simulations- und Messkurve. Es treten zwar immer noch vereinzelte Abweichungen auf, eine genauere Simulation der Abflussvolumen erscheint in Anbetracht der Voraussetzungen – Verwendung eines Abflussmodells mittlerer Komplexität, eine rudimentäre Grunddatenbasis und eine Simulationsauflösung von 5 km – aber kaum mehr möglich zu sein.<sup>27</sup>

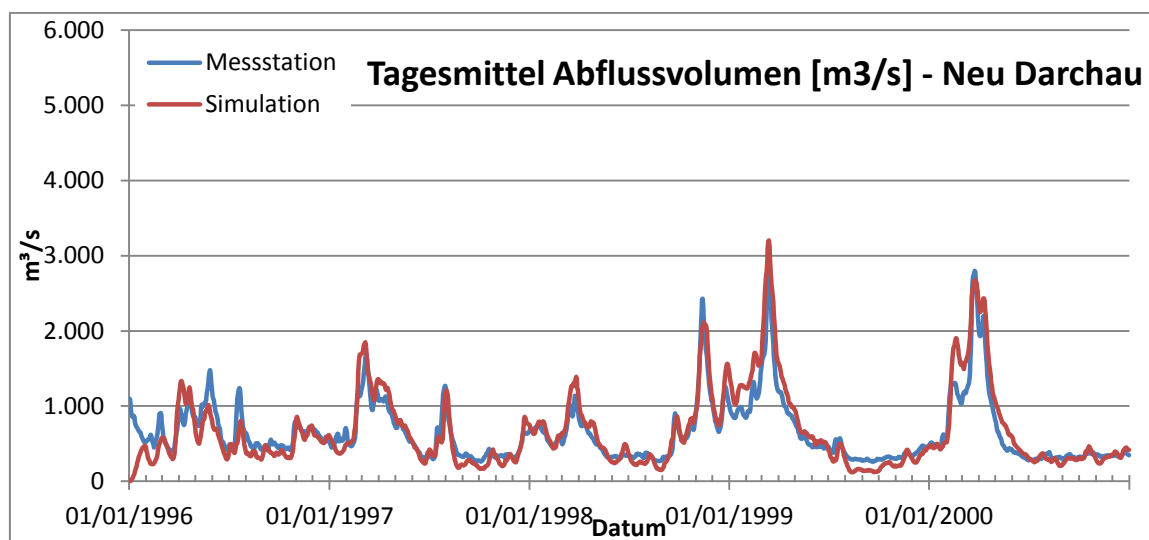


Abbildung 4.2-11: Korrigierter gesamter lateraler Wasserhaushalt (Reduzierung der systematischen Abweichung über 50-prozentige Reduktion des *Surface Runoffs* je Rasterzelle und Zeitschritt, bei einem gleichzeitigen *Surface-Runoff-Offsetwert* von  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Rasterzelle) – Tagesmittel des Abflussvolumens am Evaluierungspunkt Neu Darchau.

Auf Grundlage dieser Analyseergebnisse liegt also die Vermutung nahe, dass die systematischen Unterschiede in den Simulationskurven des gesamten lateralen Wasserhaushaltes – zumindest teilweise – mit einer systematischen Abweichung der Abflussmengen des Oberflächenabflusses begründet werden können. Diese kann zum einen durch Ungenauigkeiten in der Grunddatenba-

<sup>27</sup> Im Rahmen dieser Analyse wurde auch untersucht, wie sich eine prozentuale Reduktion des *Surface Runoffs* und die gleichzeitige Addition eines Offsetwertes auf die *Drainage* – wobei die Erhöhung der *Drainage* in der Summe mengenmäßig genau der *Surface Runoff*-Reduktion entspricht – in Hinblick auf die simulierten Abflussvolumen auswirkt. Wäre hierdurch eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messkurve erzielt worden, so wäre dieses ein mögliches Indiz dafür, dass *Surface Runoff* und *Drainage* in ihren Anteilen falsch berechnet sein könnten. Zwar konnte eine leichte Erhöhung des *Low-Flow*-Bereiches beobachtet werden, allerdings war diese in Hinsicht auf das Abflussvolumen im Hauptgerinne sehr viel schwächer ausgeprägt, als es für den vorher durchgeführten Offset auf den *Surface Runoff* der Fall war. Die *Drainage* wird daher nicht als Ursache der beobachteten systematischen Abweichung angesehen.

sis (*Surface Runoff*) hervorgerufen werden, zum anderen ihre Ursache aber auch in bisher nicht berücksichtigten künstlichen Einflussfaktoren auf den Oberflächenabfluss haben.

Grundsätzlich besteht also zum einen die Möglichkeit, dass die Werte des *Surface Runoff* durch die Algorithmen des *SL*-Schemas in den *Low-Flow*-Bereichen und Maxima nicht hinreichend genau modelliert wurden oder durch Ungenauigkeiten in den klimatischen Eingangsdaten (*WATCH*-Daten) beeinflusst worden sind.

Zum anderen können die zahlreichen Talsperren im Einzugsgebiet eine weitere mögliche Erklärung für die Abweichung im Oberflächenabfluss liefern. Etwa 275 Talsperren beeinflussen im oberen und mittleren Flusseinzugsgebiet der Elbe den effektiven Wasserabfluss. Obwohl diese Talsperren nach SIMON (2004: 47) das natürliche Wasserangebot im Mittel zwar nicht verändern, können sie Unterschiede im natürlichen Abfluss ausgleichen. Dieses bedeutet, dass sie zu Zeiten hoher Abflussvolumen Wasser speichern, welches sie in Zeiten niedriger Abflussvolumen wieder abgeben. Auf diese Weise kann auch ein gewisser Mindestabfluss garantiert werden. Nach SIMON (2004: 48) konnte nach der Fertigstellung der meisten Talsperren im Jahr 1965 eine merkliche Erhöhung des mittleren niedrigsten Jahresabflusses und insbesondere eine Erhöhung des Niedrigwasserabflusses in abflussarmen Monaten (u.a. August und September) beobachtet werden. Dieser Umstand korrespondiert mit der Tatsache, dass die zu niedrig simulierten *Low-Flow*-Bereiche überwiegend auch in den Monaten Juli bis Oktober liegen. Talsperren ändern also das natürliche Wasserdargebot nicht absolut, können aber das für den Gerinne- und Hauptgerinneabfluss zur Verfügung stehende Wasser zeitlich „umverteilen“ und somit Abflussmaxima dämpfen und den Niedrigwasserabfluss erhöhen.

Der Einfluss von Talsperren ist in der Grunddatenbasis nicht enthalten und konnte im Rahmen dieser Referenzsimulation auch nicht extra erhoben werden, bleibt damit im Simulationsprozess also unberücksichtigt. Die durchgeführte Variation der *Surface-Runoff*-Werte entspricht aber zu einem gewissen Grad einer „Wasserumverteilung“, wie sie auch durch die Talsperren bewirkt wird. Diese „Wasserumverteilung ist zwar nicht wie bei einer Talsperre punktuell verortet, sondern über die gesamte Fläche gemittelt, durch die Variation des *Surface Runoffs* werden aber das Wasserdargebot des Oberflächenabflusses und damit auch das dem Gerinne- und Hauptgerinneabfluss zur Verfügung stehende Wasser zeitlich variiert. Auf diese Weise werden Abflussmaxima gedämpft und der *Low-Flow*-Bereich mit der entsprechenden Wassermenge gleichermaßen erhöht. Es erscheint somit möglich, dass mit der Variation des *Surface Runoffs* mittelbar ein potenzieller Einfluss der Talsperren im Elbeeinzugsgebiet simuliert wird (künstlicher Einflussfaktor), anhand dessen die Simulationsgenauigkeit letztlich erhöht werden kann.

Am Ende bleibt festzuhalten, dass die Hauptursache der systematischen Abweichung aller Voraussicht nach in den Abflusswerten des Oberflächenabflusses begründet ist. Es kann jedoch nach wie vor nicht mit Bestimmtheit gesagt werden, zu welchem Anteil die Abweichung des Oberflächenabflusses durch ungenaue Werte des *Surface Runoffs* verursacht wird und welchen Anteil daran der tatsächliche Einfluss von Talsperren im Elbeeinzugsgebiet hat. Hierfür wären detailliertere Analysen nötig, die im Rahmen dieser Arbeit aber nicht geleistet werden können.

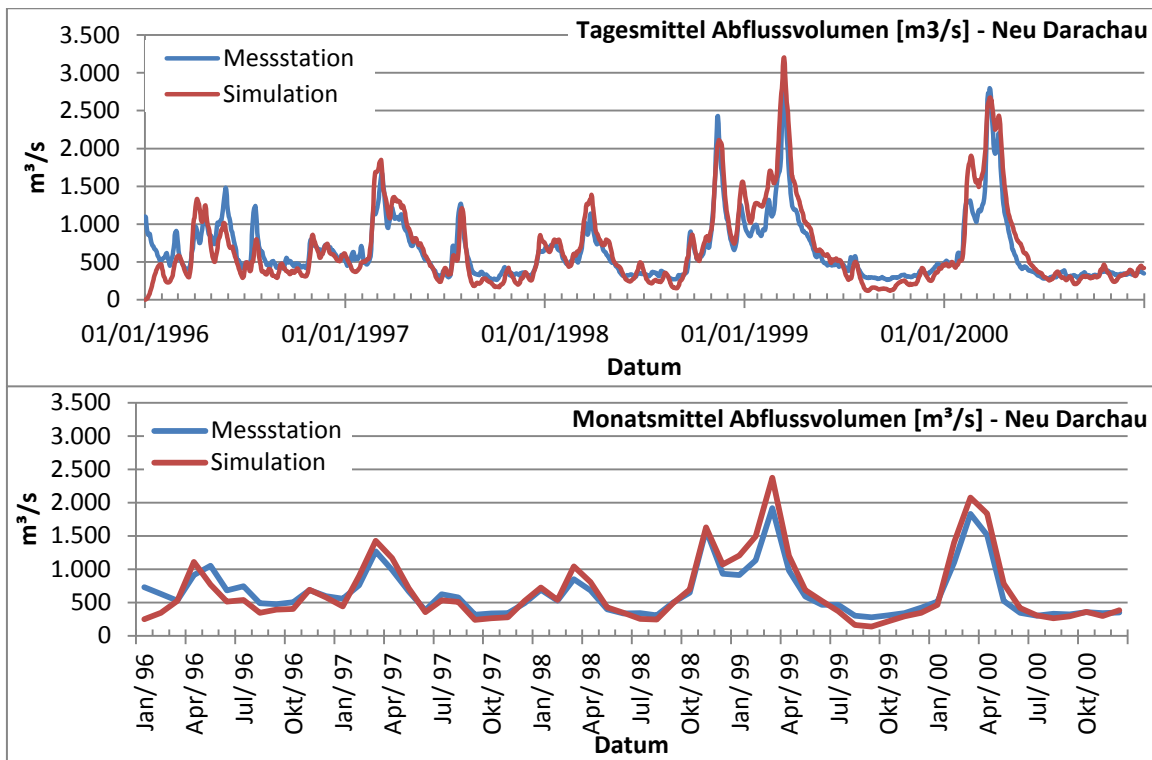


Abbildung 4.2-12: Der in Hinsicht auf systematische Abweichungen korrigierte gesamte laterale Wasserhaushalt (50-prozentige Reduktion des Surface Runoffs je Rasterzelle und Zeitschritt, bei einem gleichzeitigen Surface-Runoff-Offsetwert von  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Rasterzelle) des Elbeinzugsgebietes. Tages- und Monatsmittelwerte des Abflussvolumens bei Neu Darchau in  $\text{m}^3/\text{s}$ .

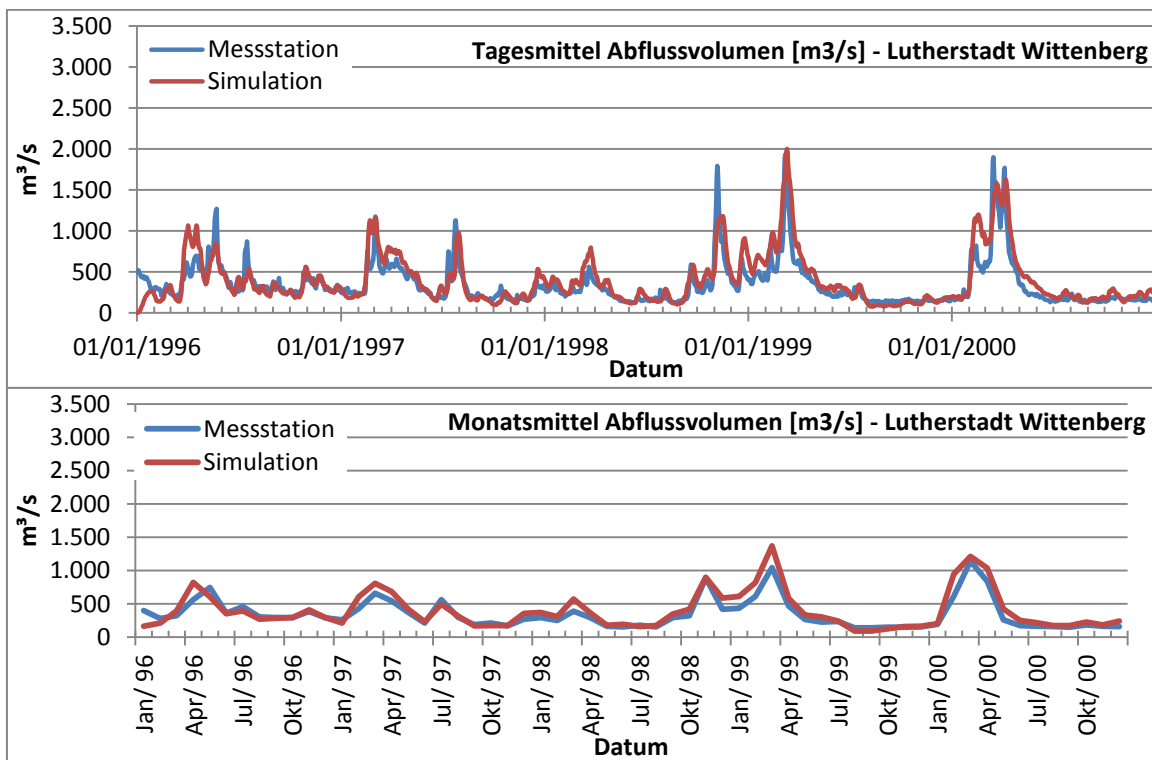


Abbildung 4.2-13: Der in Hinsicht auf systematische Abweichungen korrigierte gesamte laterale Wasserhaushalt (50-prozentige Reduktion des Surface Runoffs je Rasterzelle und Zeitschritt, bei einem gleichzeitigen Surface-Runoff-Offsetwert von  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Rasterzelle) des Elbeinzugsgebietes. Tages- und Monatsmittelwerte des Abflussvolumens bei Lutherstadt Wittenberg in  $\text{m}^3/\text{s}$ .



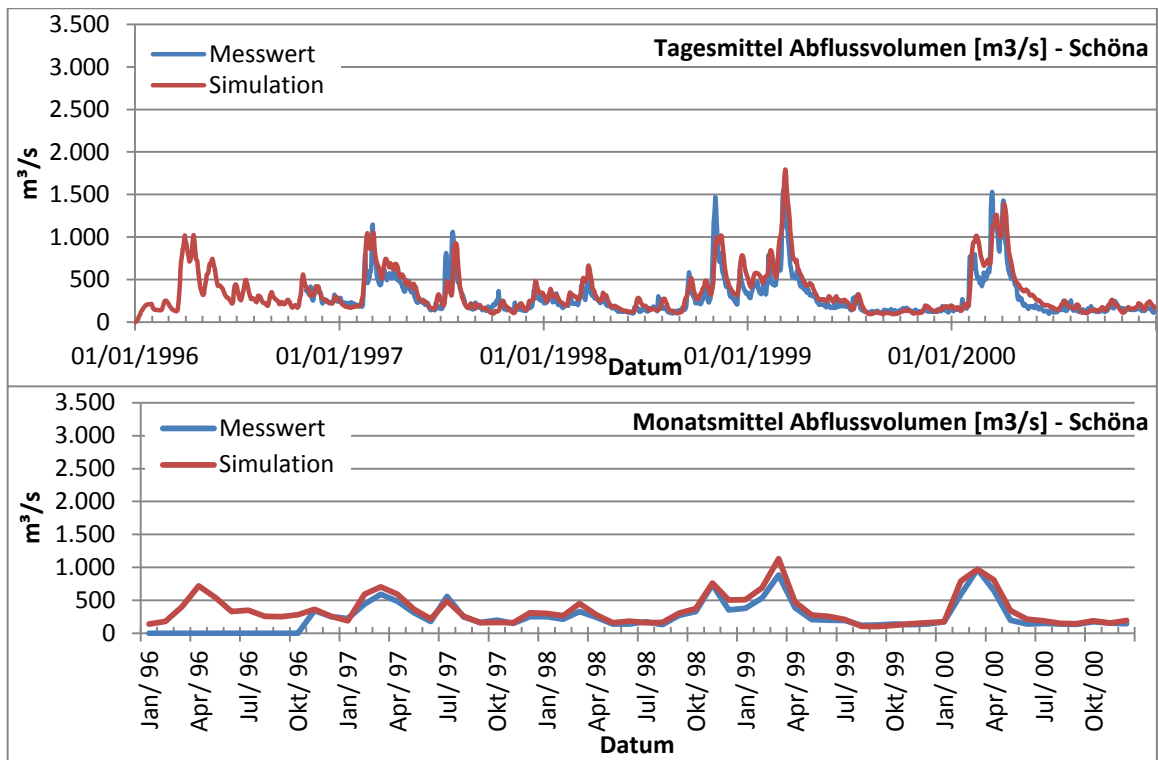


Abbildung 4.2.14: Der in Hinsicht auf systematische Abweichungen korrigierte gesamte laterale Wasserhaushalt (50-prozentige Reduktion des Surface Runoffs je Rasterzelle und Zeitschritt, bei einem gleichzeitigen Surface-Runoff-Offsetwert von  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Rasterzelle) des Elbeinzugsgebietes. Tages- und Monatsmittelwerte des Abflussvolumens bei Schöna in  $\text{m}^3/\text{s}$ . Für den Zeitraum Januar bis September 1996 lagen für Schöna keine Messwerte vor.

Die Abbildungen 4.2-12 bis 4.2-14 zeigen nun die Simulationskurven der Tages- und Monatsmittelwerte der drei Evaluierungspunkte, die auf der Referenzsimulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Elbeinzugsgebietes und einer Korrektur der systematischen Abweichung (*Surface-Runoff-Variation*: 50-prozentige Reduktion des *Surface Runoffs* je Rasterzelle und Zeitschritt, bei einem gleichzeitigen *Surface-Runoff-Offsetwert* von  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Rasterzelle) beruhen. Je nach betriebenem Aufwand könnte der Grad der systematischen Abweichung iterativ noch weiter minimiert werden. Die verbliebenen Abweichungen können nicht mit letzter Sicherheit einer möglichen Ursache zugeordnet werden. Bei den jeweils im Frühjahr auftretenden Abweichungen besteht die Vermutung, dass es sich potenziell um systematische Abweichungen handeln könnte, die durch die zeitgleich auftretende Schneeschmelze bedingt werden.

Alle Simulationskurven weisen zu den Messkurven im Mittel eine gute zeitliche Deckung und – trotz vereinzelter Abweichungen – auch eine viel bessere Übereinstimmung im Abflussvolumen auf. Insbesondere bei den monatlichen Mittelwerten liegt insgesamt eine gute Übereinstimmung zu den Messwerten vor. Hinsichtlich der verbliebenen und auch absehbaren Abweichung, müssen noch einmal die Voraussetzungen und der Anspruch an ein Abflussmodell mittlerer Komplexität sowie die Zielsetzung des aggregierten Modellsystems in Erinnerung gerufen werden (siehe Kapitel 1). Grundlage des aggregierten Modellsystems und Ausgangspunkt der bisherigen Referenzsimulationen waren stets nur ein globales und deshalb nicht sehr komplexes 0,5-Grad-Abflussmodell, welches erst an eine höhere Auflösung adaptiert wurde, sowie eine Grunddatenbasis (nur Berücksichtigung der notwendigen Antriebsdaten), deren Werte überwiegend nur in einer niedrigen 0,5-Grad-Auflösung vorliegen. Im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit können daher die Endergebnisse der durchgeführten Referenzsimulation des gesamten

lateralen Wasserhaushaltes des Elbeinzugsgebietes und auch die erreichte Übereinstimmung zu den Messwerten als sehr gut angesehen werden.

**Abflussbilanz:** Ein wesentliches Ergebnis des aggregierten Modellsystems ist die Abflussbilanz des betrachteten Hauptstromes. Die Abflussbilanz auf Basis des simulierten gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Elbeinzugsgebietes gibt für den gesamten Simulationszeitraum die Tagesmittelwerte des Abflussvolumens pro Sekunde für jede Hauptgerinnerasterzelle des Elbe-Hauptstroms wieder (siehe exemplarischen Datenausschnitt Abbildung 4.2-15). Jede Rasterzelle ist dabei mit ihren Koordinatenwerten im *DTM*-Raster und dem jeweiligen Flusskilometerwert angegeben.

Jahr: 1996 Tag: 130		
Koordinate	Flusskilometer	m <sup>3</sup> /s
(98,62)	2,500	3,73244
(98,61)	7,500	5,34345
(98,60)	12,500	13,6879
(99,60)	17,500	18,3479
(100,59)	24,571	45,37
(100,58)	29,571	44,7818
(101,57)	36,642	44,6527
...	...	...

Abbildung 4.2-15: Aufbereiteter Datenausschnitt der Ausgabedatei der Wasserflussbilanz für Tag 130 im Jahr 1996.

Es gilt an dieser Stelle zu beachten, dass die über das *Modul RiverGridGeneration* für eine 5-km-Auflösung errechneten Flusskilometerangaben (jeweils für den Mittelpunkt einer Rasterzelle) von den realen Elbe-Flusskilometerangaben in der Literatur abweichen und niedriger ausfallen. Dieses liegt darin begründet, dass in einer 5-km-Auflösung einige Details des Flussverlaufes zwangsläufig verloren gehen und insbesondere kurvige Flussabschnitte und kleinere Fluss Schleifen bei der Bestimmung der Flussstrecke teilweise nicht berücksichtigt werden können. Abbildung 4.2-16 verdeutlicht diesen Umstand, indem die Länge eines exemplarischen Flussabschnittes der Elbe (in diesem Fall von der Moldau-Mündung bei Melnik bis etwa Schöna) mit Hilfe von GoogleMaps einmal detailliert und einmal immer nur in festen 5-km-Abständen vermessen wurde (was näherungsweise der Berechnungsgrundlage des *RiverGridGeneration-Moduls* bei einer 5-km-Rasterzellenauflösung entspricht). Es ist in der unteren Abbildung zu erkennen, dass einige Flusskurven und -schleifen auf diese Weise nicht mehr aufgelöst werden können. Diese Messung über feste 5-km-Abstände ergab für diesen Teil des Elbeverlaufes eine Länge von 90 km, wohingegen die tatsächliche Distanz etwa 110 km beträgt (IKSE 2005). Es ergibt sich somit näherungsweise ein Abweichungsfaktor von  $f = 1,2$ .

Je nach Kurvenverlauf des jeweils betrachteten Teilabschnittes eines Flusses werden die im Rahmen einer 5-km-Auflösung errechneten Flusskilometerangaben i.A. unterschiedliche Abweichungsfaktoren zu den tatsächlichen Elbe-Flusskilometerangaben aufweisen. Für einen sehr kurvigen Flussverlauf wird der Abweichungsfaktor höher als für einen geraden Verlauf des Flusses ausfallen.

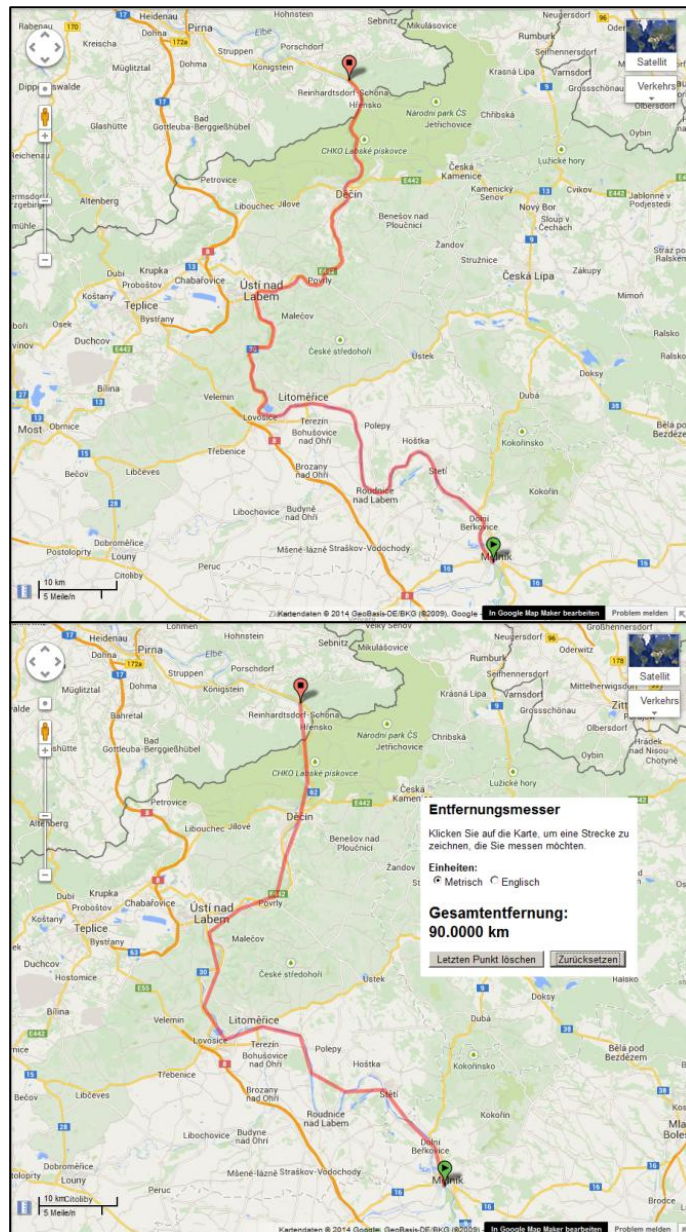


Abbildung 4.2-16: Detaillierter Elbverlauf (oben) und der Verlauf als Ergebnis einer Messung in 5-km-Abständen (unten). Kartenmaterial: GoogleMaps.

Im Fall der vorliegenden Abflussbilanz der Elbe erweist sich der ermittelte Abweichungsfaktor von  $f = 1,2$  aber als trotzdem genau genug, um mit ihm eine zufriedenstellende Korrektur der errechneten Flusskilometerangaben der Rasterzellen des Hauptstromverlaufes der Elbe vornehmen zu können. Hierfür werden die Flusskilometerwerte der Abflussbilanz um den Abweichungsfaktor korrigiert und dann auf den Nullpunkt der Flusskilometerskala bei Schöna skaliert, siehe Tabelle 4.2-5. Hiernach ergeben sich dann für den tschechischen Teil der Elbe negative Flusskilometerwerte.

Rasterzellen-Koordinate (x,y)	errechneter Flusskilometer [km]	korrigierter Flusskilometer [km]	Evaluierungspunkt (in Klammern der tatsächliche Elbe-Flusskilometerwert)
(78,65)	346.705	0	Schöna (Elbe-km: 0)
...	...	...	...
(54,85)	554.470	207.765	Lutherstadt Wittenberg (Elbe-km: 214,1)
...	...	...	...
(30,115)	876.661	529.956	Neu Darchau (Elbe-km: 536,4)
...	...	...	...
(22,119)	934.602	587.897	Geesthacht (Elbe-km: 585,9)

Tabelle 4.2-5: Korrektur der Flusskilometerangaben der Abflussbilanz der Elbe.

Abbildung 4.2-17 zeigt exemplarisch die Abflussbilanz der Elbe für jeweils den Monatsersten des Jahres 2000 als Tagesmittel des Abflussvolumens in  $\text{m}^3/\text{s}$  je Hauptgerinnerasterzelle in der Einheit korrigierter Elbe-Kilometer.

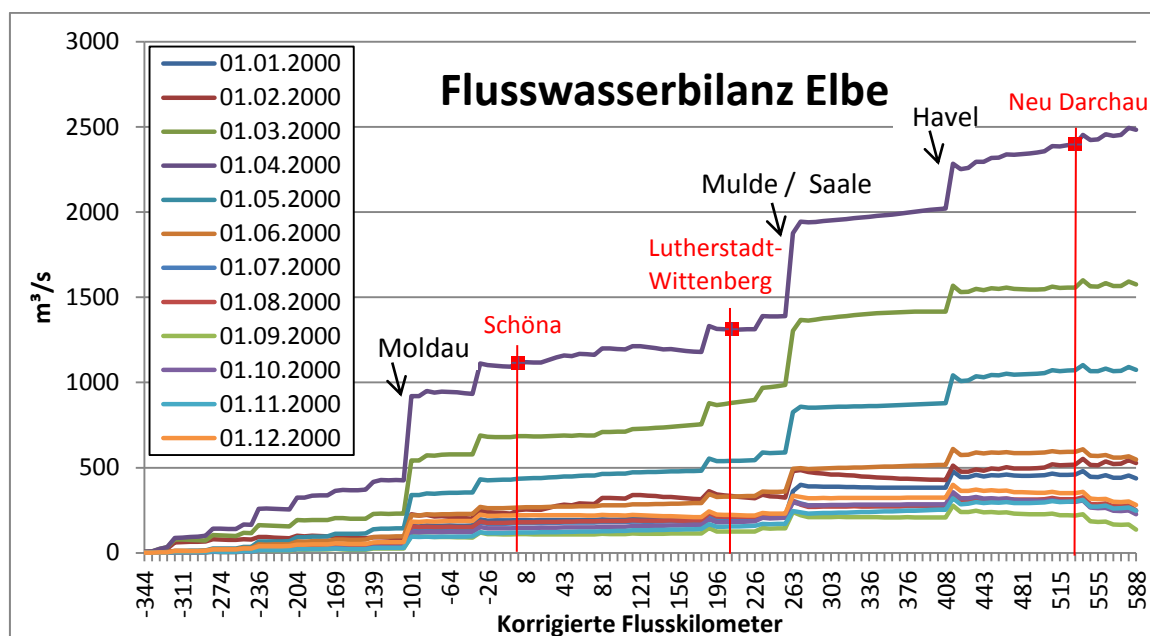


Abbildung 4.2-17: Abflussbilanz der Elbe für den ersten Tag eines jeden Monats des Jahres 2000. Tagesmittelwerte des Abflussvolumens in  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Es heben sich in der Abflussbilanz auch deutlich die größeren Zuflüsse der Seitenarme der Elbe ab. Exemplarisch werden hier die Moldau, die Mulde und Saale sowie die Havel betrachtet. Abbildung 4.2-18 zeigt die zeitliche Änderung der Zuflüsse dieser Seitenarme jeweils anhand der Abflussvolumen für den ersten Tag eines jeden Monats des Jahres 2000.

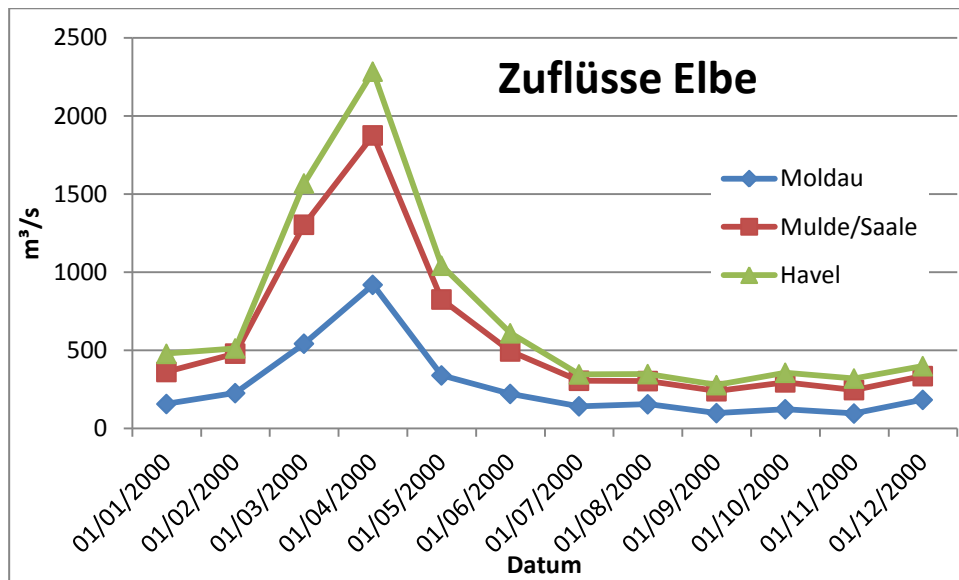


Abbildung 4.2-18 : Zeitlicher Verlauf ausgewählter Zuflüsse in den Elbe-Hauptstrom (Tagesmittel).

Beim Vergleich mit Literaturwerten nach BERGEMANN (2012) fällt auf, dass in der Abflussbilanz die Mündung der Moldau recht genau verortet ist (tatsächliche Mündung bei Elbe-Kilometer - 110). Die Mündungen der Mulde (Elbe-Kilometer 260) und Saale (Elbe-Kilometer 291) liegen eigentlich etwa 31 Kilometer auseinander, können hier hingegen nicht separat von einander aufgelöst werden. Auch die Mündung der Havel (Elbe-Kilometer 438) liegt um ca. 25 Kilometer zu weit elbauf. Diese Abweichungen liegen zum einen in Ungenauigkeiten bei der Korrektur der Flusskilometerangaben begründet, zum anderen zeigt sich bei einer genaueren Betrachtung des Gerinnenetzwerkes im DTM-Raster aber auch, dass im Fall der Mulde und der Saale beide Flüsse über dicht beieinander liegende Rasterzellen in den Elbhauptstrom münden (Ungenauigkeit im DTM-Raster). Bei der Havel könnte auch der Havel-Seiten-Kanal zu einer verfälschten Verortung im DTM-Raster geführt haben.

Diese Ungenauigkeiten im Geländemodell wirken sich auf den zeitlichen Verlauf der Abflussprozesse aber nur marginal aus und beeinflussen die Höhe der Abflussvolumen an den Evaluierungspunkten wohl gar nicht, ebenso wenig wie die bisherigen Ergebnisse dieser Referenzsimulation. Für eine genauere Betrachtung des Elbeinzugsgebietes – insbesondere der Zuflüsse zum Hauptstrom – kann es aber zukünftig notwendig sein, das DTM-Raster anhand präziserer Informationen oder einer höheren Auflösung noch genauer in Hinsicht auf die Seitenarme der Elbe aufzubereiten.

Zusammenfassend konnte durch diese Referenzsimulation der Elbe zum einen die Anwendung des aggregierten Modellsystems auf Basis der Grunddatenbasis erfolgreich getestet werden. Zum anderen konnte belegt werden, dass die Simulationsergebnisse in Hinblick auf den zeitlichen Verlauf und die Abflussvolumen eine Übereinstimmung zu den Referenzmesswerten der Evaluierungspunkte aufweisen, die in jeder Hinsicht die denkbaren Anforderungen an ein Abflussmodell mittlerer Komplexität erfüllen und auch der Zielsetzung dieser Arbeit genügen. Diese Referenzsimulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Elbeinzugsgebietes eignet sich daher als Ausgangspunkt für weitere szenariobasierte Simulationen.

## 4.3 Methodische Anwendung auf ein komplexes Fallbeispiel: Das Flusseinzugsgebiet des Nils

Nach der erfolgreichen Evaluation am Flusseinzugsgebiet der Elbe soll das aggregierte Modellsystem und die Grunddatenbasis nun testweise auch auf ein sehr viel komplexeres Flusseinzugsgebiet angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem Flusseinzugsgebiet des Nils hierfür eines der komplexesten der weltweiten Haupteinzugsgebiete ausgewählt.<sup>28</sup> Diese Anwendung des aggregierten Modellsystems erfolgt unter ausschließlicher Verwendung der Grunddatenbasis. Eine fundierte wissenschaftliche Betrachtung des Nileinzugsgebietes – neben der dafür nötigen Erhebung präziserer Eingangsdaten, vor allem aber der Identifizierung und Berücksichtigung zusätzlicher Einflussfaktoren und -prozesse – ist im Rahmen dieser Arbeit nicht umsetzbar und im Sinne der Fragestellungen und Zielsetzung auch nicht vorgesehen gewesen. Von vornherein liegt daher auch die Vermutung nahe, dass die resultierenden Simulationsergebnisse für das sehr viel komplexere Nileinzugsgebiet eine geringere Genauigkeit wie für die Elbe aufweisen werden. Die Intention hinter dieser testweisen Anwendung besteht nun vor allem darin, die Grenzen des Abflussmodells mittlerer Komplexität und der zugrundeliegenden Grunddatenbasis auszureizen. So soll untersucht werden, mit welcher Genauigkeit das aggregierte Modellsystem in seiner Grundform und unter extremen Umständen überhaupt noch die Wasserhaushalte simulieren kann und welche Aussagen auf Basis nur dieser Ergebnisse noch getroffen werden können. Dieses gilt gerade auch in Hinblick auf die Durchführung szenariobasierter Simulationen.

### 4.3.1 Das Flusseinzugsgebiet des Nils

Umfangreiche Übersichtsliteratur zu den geophysikalischen und sozioökonomischen Eigenschaften sowie Mechanismen des Nileinzugsgebietes liegt u.a. mit AWULACHEW et al. (2012), SUTCLIFFE & PARKS (1999) und MELESSE (2011) vor. Auffällig ist, dass für zahlreiche dieser Eigenschaften die Literaturwerte voneinander abweichen (u.a. Flusslänge, Grenzen des Einzugsgebietes, Bevölkerung etc.). An dieser Stelle soll daher nur ein allgemeiner Überblick wesentlicher Charakteristika des Nils gegeben werden, der in den folgenden Abschnitten – wo nötig – aber noch vertieft werden wird. Der Nil gilt als längster Fluss der Welt und hat von seiner Quelle (Weißer Nil) bis zum Nildelta und der Mündung in das Mittelmeer eine Länge von etwa 6.850 km (KARYABWITE 1999: 9). Das Flusseinzugsgebiet des Nils umfasst eine Fläche von etwa 3,1 Mio. km<sup>2</sup>, davon ca. 81.500 km<sup>2</sup> Seen und 70.000 km<sup>2</sup> Sumpf oder Feuchtgebiete und hat damit einen Anteil von etwa 10 % an der Fläche der afrikanischen Landmasse (KINYANGI et al. 2012: 30f.). In seinen Grenzen beherbergt es ungefähr 238 Mio. Menschen, wobei dieser Wert in anderen Literaturquellen sowohl nach unten als auch nach oben abweicht.<sup>29</sup> Abbildung 4.3-1a zeigt die Abgrenzungen der Flusseinzugsgebiete des nordöstlichen Afrikas auf Basis der *Transboundary Freshwater Dispute Database* der Oregon State University (Stand 2010).<sup>30</sup>

Abbildung 4.3-1b zeigt das Flusseinzugsgebiet des Nils mit seinen Zuflüssen und dem Höhenprofil nach KARYABWITE (1999: 14).

<sup>28</sup> "The Nile basin, because of its size and variety of climates and topographies, constitutes one of the most complex of all major river basins" (KARYABWITE 1999/2000: 9).

<sup>29</sup> Datenquelle: Webseite der *Nile Basin Initiative - Understanding the Nile*, abrufbar unter: <http://www.nilebasin.org/index.php/about-us/the-river-nile> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

<sup>30</sup> Weiterführende Informationen zur *Transboundary Freshwater Dispute Database* finden sich unter: <http://www.transboundarywaters.orst.edu/database/index.html> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

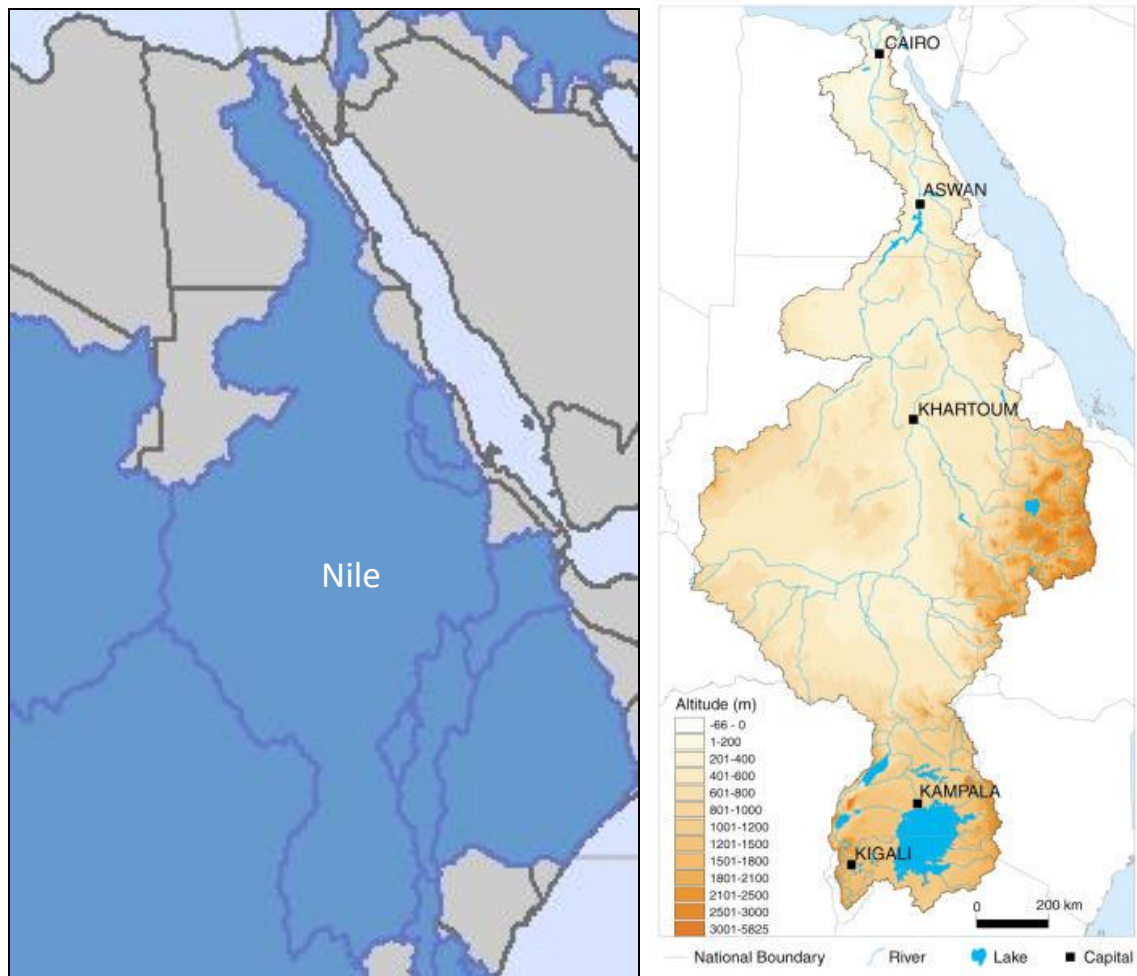


Abbildung 4.3-1a und b : Die Grenzen des Flusseinzugsgebietes des Nils sowie andere Einzugsgebiete des nordöstlichen Afrikas (linke Abb.) und Einzugsgebiet mit den Zuflüssen und Höhenwerten (rechte Seite). (Quellen: Oregon State University / KARYABWITE (1999))

Das Flusseinzugsgebiet des Nils untergliedert sich in ausgedehnte Flächen, die in ihrer Topographie, dem Klima und den wasserspezifischen Umweltbedingungen (hydro-ecology) teils stark voneinander abweichen (DEMISSIE et al. 2012: 48). Abbildung 4.3-2 zeigt den südlichen Teil des Nileinzugsgebietes (äquatoriale Hochebene), welcher zahlreiche miteinander verbundene Seen und Feuchtgebiete umfasst und daher eher langsame Wasserflüsse sowie hohe Verdunstungsraten aufweist (KARYABWITE (1999: 14ff.)). Die Niederschlagsmenge variiert im Einzugsgebiet von einem Wert nahe Null im Bereich der Sahara, bis zu Werten von 1.200 bis 1.600 mm/Jahr im Bereich der äthiopischen und äquatorialen Hochebene. Das Flusseinzugsgebiet des Nils umfasst außerdem zahlreiche Staudämme und Stauseen, die stellenweise unmittelbar das zeitliche Abflussverhalten und die verfügbaren Wassermengen an den Hauptströmen beeinflussen (CONNIFF et al. 2012: 22), siehe auch Abbildung 4.3-3 und 4.3-4. Der mittlere Jahresabfluss des Nils in den Nasser-Stausee (Ägypten) wird auf etwa 84,5 km<sup>3</sup> geschätzt (AWULACHEW et al. 2012: 2). Zu diesem Abflussvolumen trägt zu etwa 57 % der Blaue Nil, zu 29 % der Weiße Nil und zu 14 % der Atbara Fluss bei (KINYANGI et al. 2012: 30f.). Die Karte in Abbildung 4.3-4 fasst einige wesentliche sozioökonomische Faktoren und Eigenschaften des Flusseinzugsgebietes des Nils zusammen.



Abbildung 4.3-2: Äquatoriale Ebene – Südlicher Teil des Nileinzugsgebietes mit Seen und Feuchtgebieten (KARYABWITE 1999: 15).

Name	Country	Year of Completion	Utilisation	River	Original Storage Capacity Km <sup>3</sup>	Present Storage Capacity Km <sup>3</sup>	Height m
Owen Falls	Uganda	1954	storage, hydroelectric plant	Victoria Nile			2,700,000,000
Aswan High	Egypt	1970		Nile			168,900,000
Jebel Aulia	Sudan	1937	Regulate Flow	White Nile	3.22	2.54	
Sennar	Sudan	1925	Irrigation, hydroelectric power	Blue Nile	0.93	0.37	
Roseires	Sudan	1966	irrigation	Blue Nile	3.35	2.23	
Khashm El Girba	Sudan	1964	irrigation	Atbara	1.30	0.56	

Abbildung 4.3-3: Auswahl an Staudämmen im Nileinzugsgebiet (KARYABWITE 1999: 30).



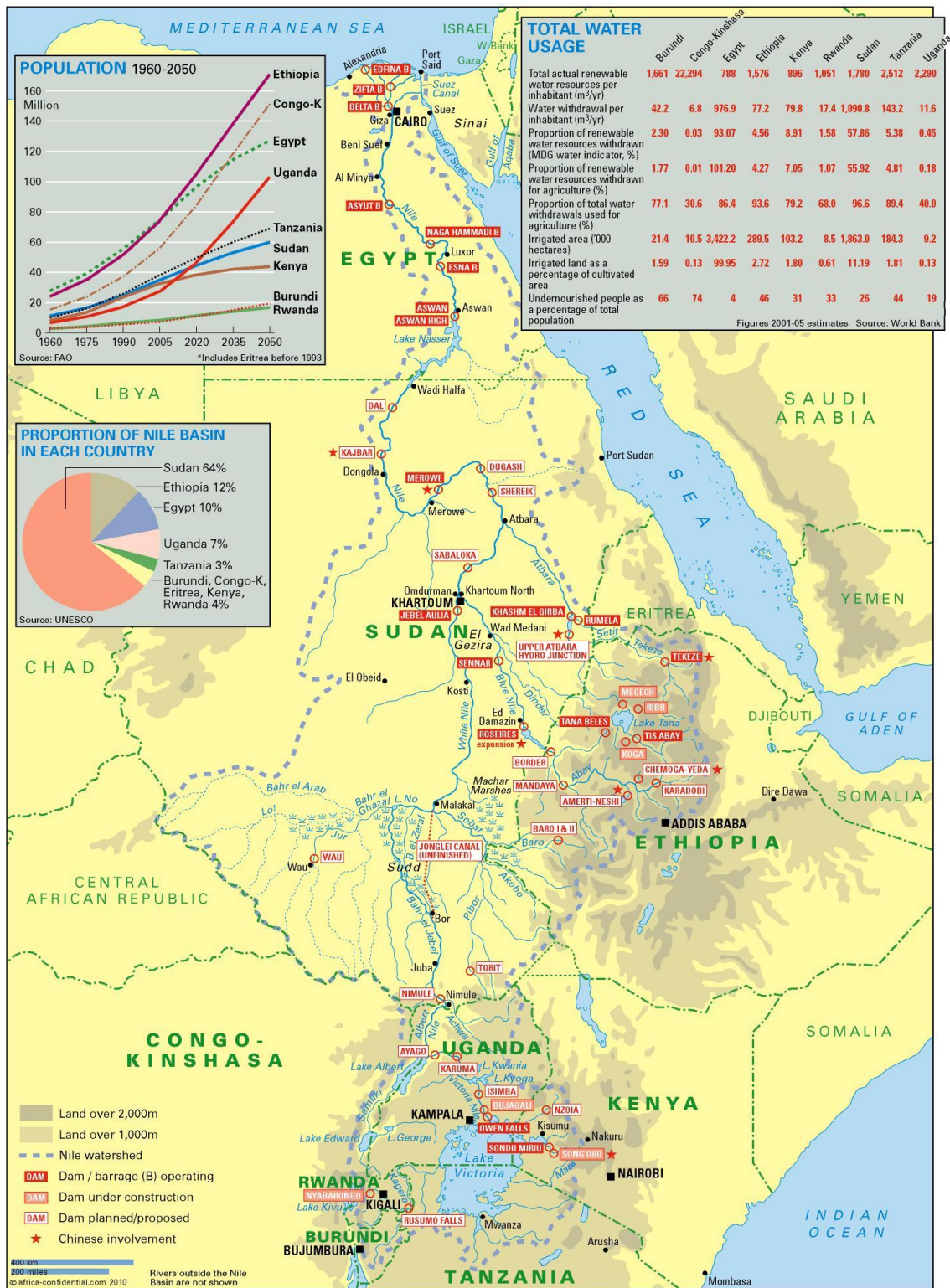


Abbildung 4.3-4: Flusseinzugsgebiet des Nils: Bevölkerung, Staudämme, Wassernutzung und physische Geographie (Quelle: Africa Confidential, 2010).

### 4.3.2 Vorbereitung und Aufbereitung der Eingangsdaten

Zunächst wird aus den vorliegenden *SRTM*-Daten des nordöstlichen Afrikas ein Höhendatensatz der Region des Flusseinzugsgebietes des Nils extrahiert, welches unter Verwendung von geographischen Referenzvektoren des Nil-Flusssystem und dem in Kapitel 3.2 beschriebenen methodischen Vorgehen zu einem Geländemodell aufbereitet wird (siehe *DTM*-Raster in Abbildung 4.3-5a). Anhand des *DTM*-Rasters werden mit der *RivFlow*-Anwendung anschließend die notwendigen Eingangsdaten für das *LandFlow*-Modul generiert, u.a. ein Raster des Hauptgerinnenetzwerkes (*HG*-Raster, Abbildung 4.3-5b) und ein Raster der Grenzen des Flusseinzugsgebietes, siehe Abbildung 4.3-6. Letztere Abbildung verdeutlicht auch noch einmal die gute Übereinstimmung (Deckung) der geographischen Referenzvektoren des Nil-Flusssystem (schwarz) mit dem über das Geländemodell berechneten Hauptgerinneverlaufes (weiß). Auch ein visueller Vergleich der Fläche des Nileinzugsgebiets in Abbildung 4.3-1a/b mit den errechneten Grenzen in Abbildung 4.3-6 zeigt eine hohe Übereinstimmung der Flusseinzugsgebietsfläche und spricht für die Qualität des aufbereiteten *DTM*-Rasters.

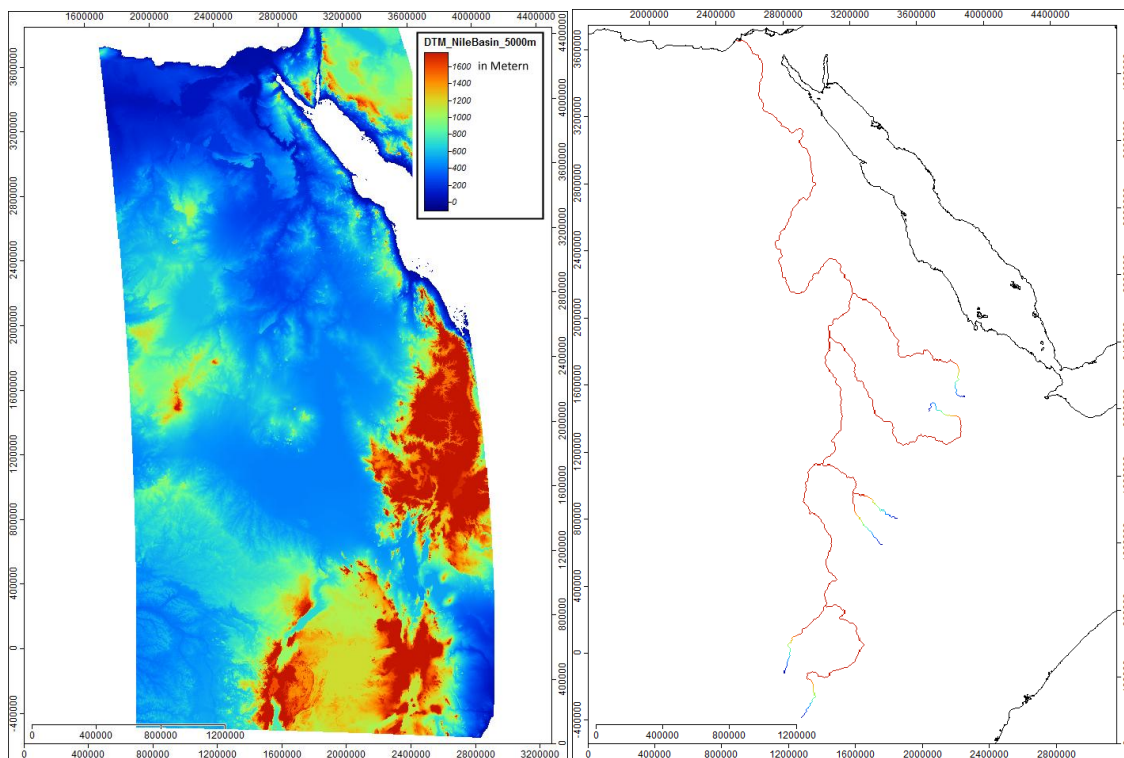


Abbildung 4.3-5a und b: Auf der rechten Seite das aufbereitete Geländemodell (*DTM*-Raster) des nordöstlichen Afrikas im Bereich des Flusseinzugsgebietes des Nils und links das Hauptgerinnenetzwerk des Nileinzugsgebietes (*HG*-Raster), welches der Simulation zugrunde liegt (farbliche Abstufung ist eine Visualisierungsmethode des *SAGA-GIS* und soll hier keine Aussage machen).

In Bezug auf aktuelle hydrologische und meteorologische Beobachtungsdaten stellt sich die Ausgangssituation am Nil recht kompliziert dar. Ein Großteil der zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Afrika installierten Messstationen existiert nicht mehr bzw. ist nicht mehr in Betrieb [Hagemann(1998:91f.)]. Nur sechs bis sieben Länder (vor allem im Süden des Kontinents) sollen zurzeit überhaupt systematisch meteorologische Daten erfassen. Wie auch schon im Abschnitt 3.1.2.5 beschrieben, konnten im Rahmen dieser Arbeit keine öffentlich zugänglichen aktuellen Messreihen zum Abflussvolumen des Nils gefunden werden. Zurückgegriffen wird deshalb auf ältere Daten der *Global River Discharge Database*, deren Messreihen zum Teil aber auch grös-

re Lücken und widersprüchliche Angaben aufweisen. Für den Nil wurden drei Messstationen identifiziert, deren Messwerte im Zeitraum von 1979 bis 1982 als plausibel angesehen werden können und die deshalb im Rahmen dieser Referenzsimulation des Nils als Evaluierungsgrundlage gelten sollen. Bei diesen Evaluierungspunkten handelt es sich um Dongola (Nil im nördlichen Sudan), Khartoum (Sudan, Blauer Nil kurz vor der Mündung) und Malakal (Südsudan, Weißer Nil), siehe auch Abbildung 4.3-7. Als Ausgang des Flusseinzugsgebietes des Nils soll zunächst die Mündungsrasterzelle in das Mittelmeer bei Alexandria betrachtet werden. Ab dem Assuan-Staudamm kann der weitere Wasserabfluss des Nils (stromabwärts durch Ägypten) dann als weitestgehend reguliert angesehen werden.

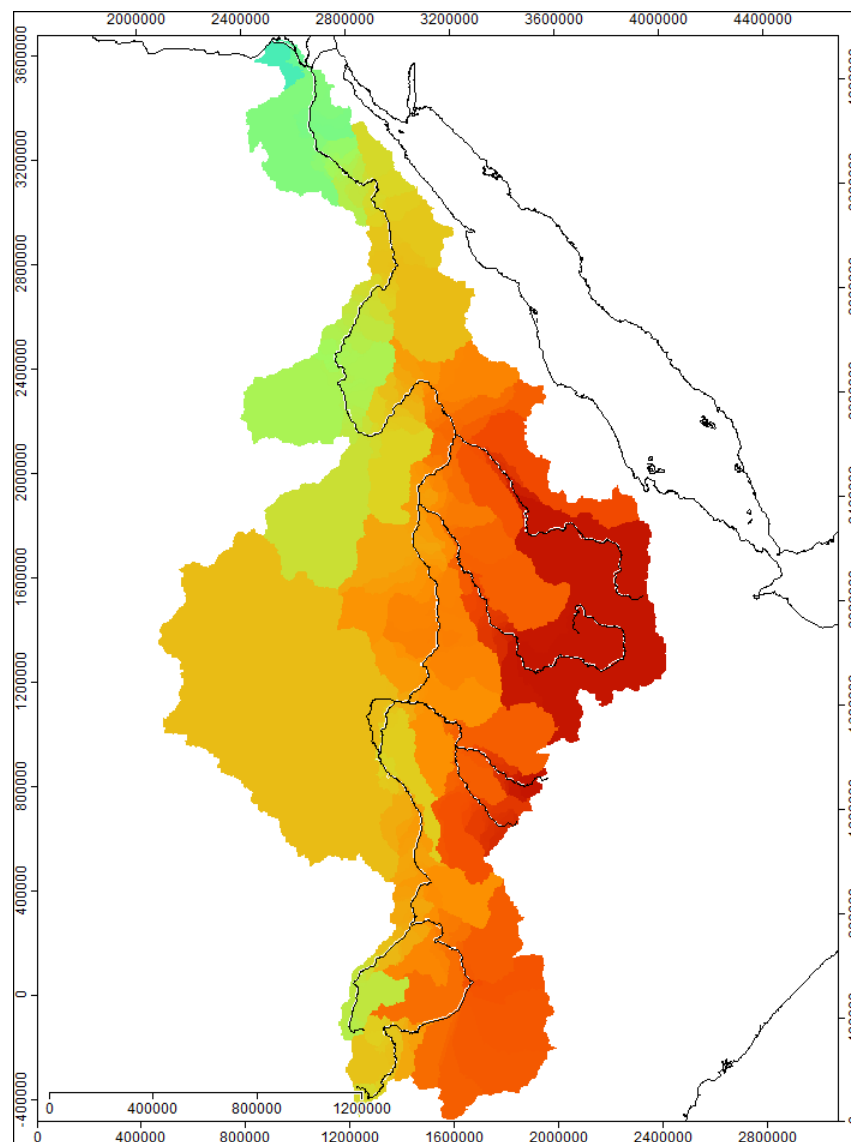


Abbildung 4.3-6: Über das DTM-Raster berechneter Verlauf des Hauptgerinnenetzwerkes (weiß) und der zum Vergleich darüber gelegte Nil-Referenzvektor (schwarz), sowie die errechneten Grenzen (Gewässerscheiden) des Nileinzugsgebietes (die Teileinzugsgebiete der Hauptgerinnen-rasterzellen sind farblich unterschiedlich gekennzeichnet).

In einem weiteren Schritt werden mit Hilfe der Module des SAGA-GIS und der RivFlow-Anwendung die *Surface-Runoff-* und *Drainage-Daten*, wie auch die Wassernutzungsdaten (*WaterGAP*) für das Flusseinzugsgebiet des Nils aus der globalen Grunddatenbasis extrahiert (Zeit-

raum 1979 bis 1982) und an das Rasterformat des DTM-Rasters des Nileinzugsgebietes angepasst.

Zum Abschluss dieses Abschnitts wird mit Abbildung 4.3-7 eine Übersicht des betrachteten Flusseinzugsgebietes des Nils gegeben. In dieser Abbildung sind das Hauptgerinne des Nils mit den wichtigen Nebenarmen sowie die großen Oberflächengewässer (beide weiß) abgebildet. Außerdem sind die Staatsgrenzen (grau), die großen urbanen Zentren (rot-schwarz) und die betrachteten Evaluierungspunkte eingezeichnet.

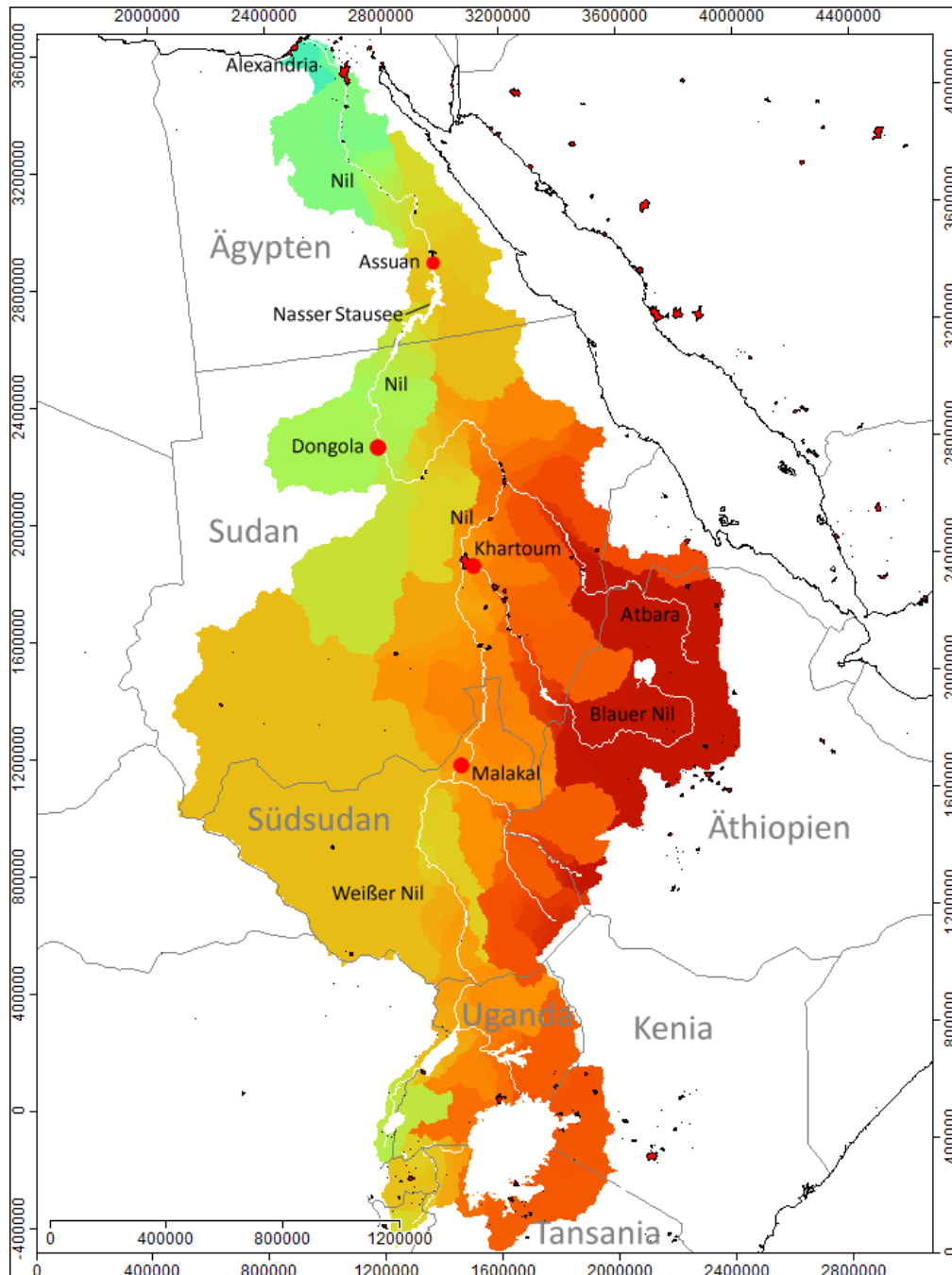


Abbildung 4.3-7 : Errechnetes Hauptgerinne (weiß) und Einzugsgebiet des Nils (farbig gekennzeichnete Teileinzugsgebiete). Auf Basis der geographischen Referenzdaten wurden außerdem die Oberflächengewässer (ebenfalls weiß), urbane Ballungsräume (rot-schwarz) und die Ländergrenzen abgebildet. Eingezeichnet sind auch die für die Simulation wesentlichen Orte.

### 4.3.3 Referenzsimulation

Auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt aufbereiteten Eingangsdaten und den in Tabelle 4.3-1 angegebenen Parametereinstellungen werden nun mit der *RivFlow*-Anwendung die Simulationen des natürlichen und des gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Flusseinzugsgebietes des Nils durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden anschließend auf systematische Abweichungen hin untersucht und ihre Genauigkeit wird abgeschätzt. Es gilt noch einmal zu beachten, dass für diese Simulationen nur die Grunddatenbasis des aggregierten Modellsystems herangezogen wird. Präzisere regionale Klimadaten oder sozioökonomische Einflussfaktoren (insbesondere die Wasserregulierung der Hauptströme durch Staudämme) werden nicht berücksichtigt.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Simulationszeitraum	1979 bis 1981 (natürlicher Wasserabfluss) 1980 bis 1981 (gesamter Wasserabfluss)	n <sub>G</sub>	3
Simulation mit Speicherwerten initialisieren?	Bruttowasserhaushalt: nein Nettowasserhaushalt: ja	n <sub>HG</sub>	1
Simulationstage [d]	1096 (natürlicher Wasserabfluss) 731 (gesamter Wasserabfluss)	n <sub>O</sub>	1
Simulationsschrittlänge [s]	2700	c <sub>G</sub>	0.06
Geschwindigkeitsobergrenze [km/h]	6	c <sub>HG</sub>	0.007
Evaluierungspunkte (x, y):	Dongola: (222, 566)	c <sub>O</sub>	0.357
	Khartoum: (280, 487)	p <sub>B</sub>	300
	Malakal: (272, 342)		
Ausgangsrasterzelle des Flusseinzugsgebietes: (x, y)	bei Alexandria: (166, 843)		

Tabelle 4.3-1: Für die Simulation des Nileinzugsgebietes verwendete Parametereinstellungen in der *RivFlow*-Anwendung

### Simulation des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes

Unter Verwendung des *LandFlow*-Moduls wird zunächst für den Zeitraum von 1979 bis 1981 eine Simulation der natürlichen Abflussprozesse innerhalb des Flusseinzugsgebiets des Nils, d.h. des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes durchgeführt. Eine solche dreijährige Simulation des Nileinzugsgebietes dauert mit der vorliegenden EDV etwa 48 bis 50 Stunden, was auch den Größenunterschied des Einzugsgebietes des Nils zum Elbeeinzugsgebiet (Verhältnis ca. 21:1) unterstreicht. Abbildung 4.3-8 zeigt für den gesamten Simulationszeitraum exemplarisch die Tages- und Monatsmittelwerte des simulierten Abflussvolumens an den drei Evaluierungspunkten Dongola, Khartoum und Malakal in m<sup>3</sup>/s und stellt diese Ergebnisse den Messwerten (Monatsmittelwerte) des entsprechenden Zeitraumes gegenüber. Die Speicher werden bei dieser Simulation nicht mit vorhandenen Werten initiiert, sondern müssen erst einschwingen, ein Umstand der in Abbildung 4.3-9 in den ersten 90 Tagen auch gut zu erkennen ist.

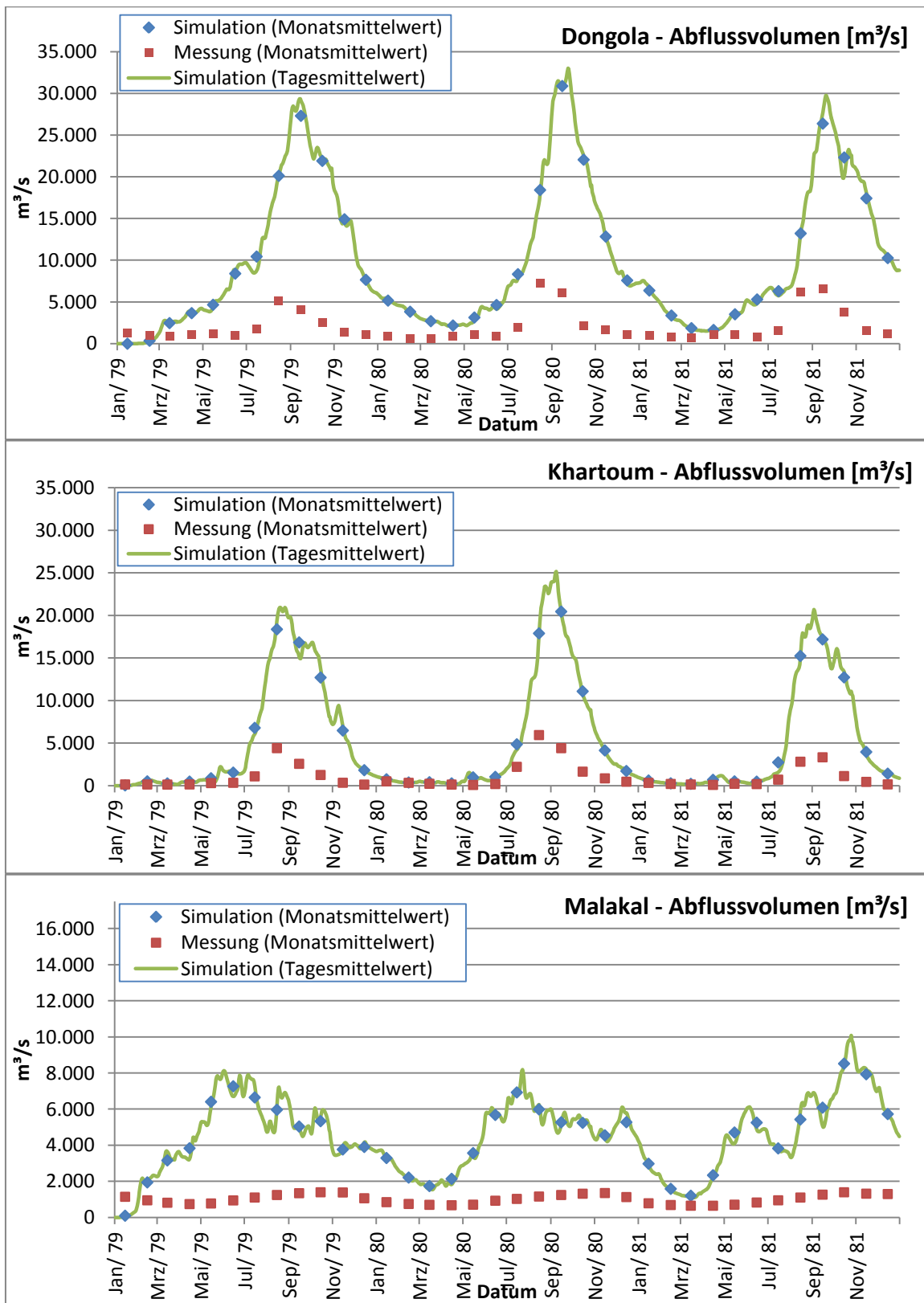


Abbildung 4.3-8: Simulation des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes für die Jahre 1979 bis 1981. Abgebildet jeweils die Simulations- und Messwerte für die Evaluierungspunkte Dongola, Khartoum und Malakal. Für eine bessere Betrachtung hat die y-Achse von Malakal eine andere Skalierung.

An den Kurven lässt sich z.T. auch gut der unterschiedliche Einfluss der Teileinzugsgebiete des Nils auf den resultierenden Gesamtabfluss ablesen. Während sich bei Dongola (am dichtesten zum Assuan-Staudamm gelegen) bereits alle der drei großen Hauptströme (Weißer Nil, Blauer

Nil und Atbara) zum Nil vereint haben, beschreibt der Evaluierungspunkt Khartoum das gesamten Abflussvolumen aus dem Teileinzugsgebiet des Blauen Nils und Malakal das Abflussvolumen an der oberen Hälfte des Weißen Nils. Werden einmal nur die Messwerte dieser Evaluierungspunkte betrachtet, so weist der Weiße Nil im Vergleich die geringsten Abflussvolumen auf. Deutlich wird auch, dass der Blaue Nil den maßgeblichen Wasseranteil zum Hauptstrom des Nils beisteuert, ein Umstand der auch durch die Ähnlichkeit der Messkurvenverläufe von Khartoum und Dongola bestätigt wird (was sich auch mit den Literaturwerten deckt, siehe oben). Der zeitliche Verlauf des Abflussvolumens zeigt dabei sehr hohe Abflusswerte für die Sommer- und Herbstmonate, während der Blaue Nil im Winter und Frühjahr nur sehr wenig Wasser führt (zeitweise im Monatsmittel unter  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  am Evaluierungspunkt Khartoum). Betrachtet man die Simulationskurven, so weichen diese in der Höhe des Abflussvolumens alle in einem erheblichen Maße von den Messwerten ab. Die Simulationskurve des Weißen Nils weist im Vergleich zu den Messwerten auch eine deutlichere Verschiebung der Abflussmaxima und eine stärkere Fluktuation des simulierten Abflussvolumens (sowohl Tages- als auch Monatsmittelwerte) auf. Eine Ursache hierfür können die ausgedehnten Feuchtgebiete und Oberflächengewässer im Bereich des oberen Weißen Nils sein, deren abflussverzögernde und dämpfende Speicherwirkung durch das erweiterte *HD*-Modell und die Grunddatenbasis nicht hinreichend berücksichtigt werden kann, weshalb der Abfluss in diesen Gebieten insgesamt zu schnell simuliert wird. Die Ursachen der insgesamt starken Überschätzung des simulierten Abflussvolumens gilt es in den folgenden Abschnitten zu analysieren.

Aufgrund der großen Fläche des Nileinzugsgebietes und den regional jeweils stark voneinander abweichenden Einflussfaktoren (Gelände, Klima und Bodenbeschaffenheit etc.) soll ein besonderer Fokus der weiteren Analyse auf dem klar abgrenzbaren Teileinzugsgebiet des Blauen Nils liegen, welches den dominanten Einfluss auf die Abflussprozesse des unteren Nils ausübt. Der für den Blauen Nil maßgebliche Evaluierungspunkt ist Khartoum, dicht an der Mündung zum Nil hin gelegen.

Ein Vergleich der Summe der gemessenen und simulierten Abflussvolumen für den dreijährigen Simulationszeitraum kann für den Evaluierungspunkt Khartoum der Tabelle 4.3-2 entnommen werden. Insgesamt zeigt sich hier, dass die simulierte Abflussmenge des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes erheblich überschätzt ist und um einen Betrag von  $3,93 \times 10^{11} \text{ m}^3$  größer als die über denselben Zeitraum gemessene Abflussmenge ausfällt. Dieses entspricht einer Überschätzung des simulierten Abflusses um über 396 %.

**Natürlicher lateraler Wasserhaushalt:** Simulationszeitraum 1979 – 1981 (3 Jahre), Evaluierungspunkt Khartoum

<i>Simuliertes Abflussvolumen [<math>\text{m}^3</math>]</i>	<i>Gemessenes Abflussvolumen [<math>\text{m}^3</math>]</i>	<i>Abweichung [<math>\text{m}^3</math>]</i>
$4,93 \times 10^{11}$	$9,92 \times 10^{10}$	$3,93 \times 10^{11}$ (396 %)

*Tabelle 4.3-2: Natürlicher lateraler Wasserhaushalt: Abweichung des simulierten vom gemessenen Abflussvolumen in  $\text{m}^3/\text{s}$  am Evaluierungspunkt Khartoum für den dreijährigen Simulationszeitraum.*

Abschließend wird für den natürlichen lateralen Wasserhaushalt nun noch die Wasserbilanz des gesamten Flusseinzugsgebietes während des dreijährigen Simulationszeitraumes betrachtet, deren Abgeschlossenheit durch Abbildung 4.3-9 bestätigt wird. Nachdem die Speicher eingeschwungen sind, fließt im Mittel genauso viel Wasser durch die Ausgangsrasterzelle des Flusseinzugsgebietes ab (Tagesabflüsse) wie im zeitlichen Mittel durch vertikale Zuflüsse (130-tägige

Trendlinie) hinzukommt. Die Kurve des Flusseinzugsgebietspeichers entspricht wiederum der Gesamtsumme des Wassers, welches sich zum jeweiligen Zeitpunkt noch im Flusseinzugsgebiet befindet (Abfluss und Wasserspeicher). Vergleicht man für den dreijährigen Simulationszeitraum nun noch die Gesamtsumme der vertikalen Zuflüsse ( $9,892 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ) mit der Summe aus dem Gesamtwasserabfluss ( $9,336 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ) und derjenigen Wassermenge, die am letzten Simulationstag in den Speichern des Flusseinzugsgebietes verblieben ist ( $5,56 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ), so wird auch hierdurch die Ausgeglichenheit der Wasserbilanz des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes bestätigt.

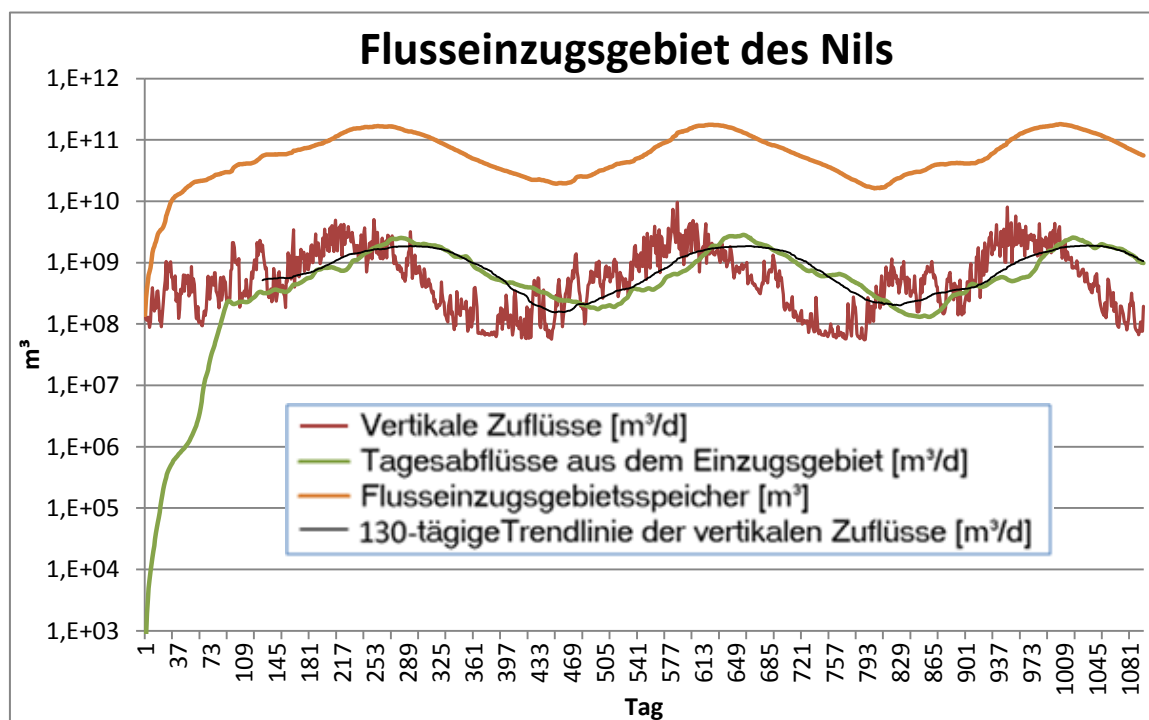


Abbildung 4.3-9: Monitoringdaten der dreijährigen Simulation des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes für die Abflussvolumen [ $\text{m}^3$ ] je Tag bzw. das Speichervolumen [ $\text{m}^3$ ] innerhalb des Flusseinzugsgebietes des Nils.

### Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes

Unter Berücksichtigung der für das Nileinzugsgebiet aufbereiteten Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells wird im nächsten Schritt auch die Wasserentnahme berücksichtigt und damit nun der gesamte laterale Wasserhaushalt des Flusseinzugsgebietes des Nils – unter Berücksichtigung der gesamten zur Verfügung stehenden Grunddatenbasis – simuliert. Diese Simulation wird aus Rechenzeitgründen nur für einen Zeitraum von zwei Jahren (1980 bis 1981) durchgeführt, dafür werden aber die Speicher zu Beginn initiiert (mit Ergebnisdaten einer Simulation bis zum 31. Januar 1979). Die Speicher sind somit schon eingeschwungen und es bedarf keiner Vorlaufzeit vor einer ersten Wasserentnahme mehr. Die Zeit für eine zweijährige Simulation konnte so auf etwa 36 bis 38 Stunden reduziert werden. Die Ergebnisse des gesamten lateralen Wasserhaushaltes werden im Folgenden zunächst nur über den Evaluierungspunkt Khartoum (und damit dem Teileinzugsgebiet des Blauen Nils) analysiert. Die simulierten Abflussvolumen (Tages- und Monatsmittelwerte) des Evaluierungspunktes Khartoum sind in Abbildung 4.3-10 den entsprechenden Messwerten (Monatsmittelwerte) gegenübergestellt. Vergleicht man diese Simulationsergebnisse mit den entsprechenden Ergebnissen der Simulation des natürlichen lateralen Wasserhaushaltes (Abbildung 4.3-8), so sind trotz der nun durchgeführten Wasserentnahmen



visuell zunächst keine signifikanten Unterschiede erkennbar. Dieses hängt damit zusammen, dass die Wasserentnahmen klein gegenüber der hohen Abweichung von Simulations- und Messwerten sind.

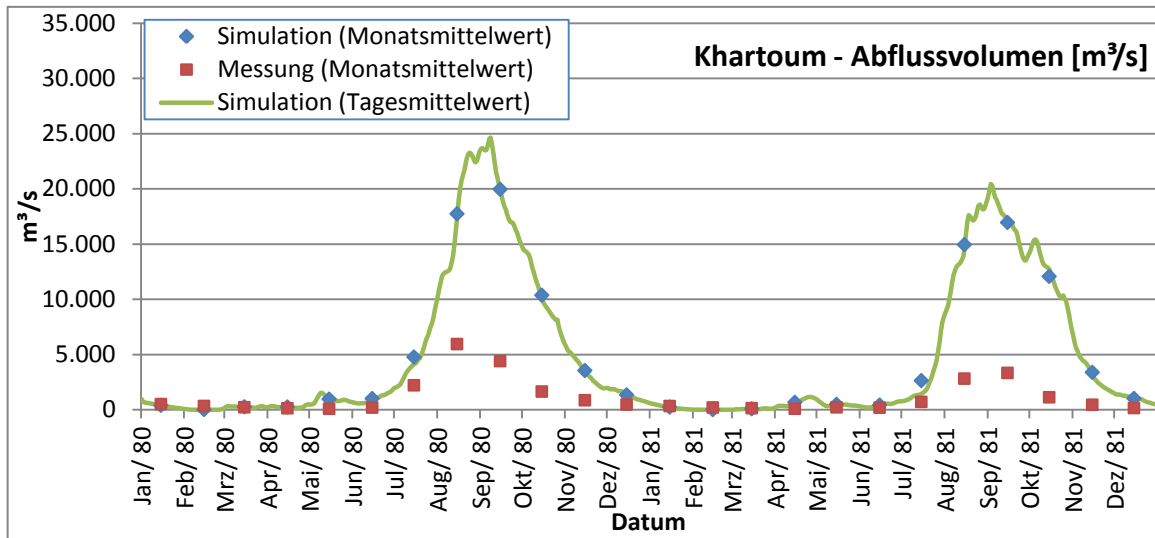


Abbildung 4.3-10: Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes (Berücksichtigung von Wasserentnahmen) für die Jahre 1980 bis 1981. Abgebildet sind die Simulations- und Messwerte des Abflussvolumens für den Evaluierungspunkt Khartoum.

Für das Teileinzugsgebiet des Blauen Nils wird anhand der Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells für die Jahre 1980 und 1981 in Summe eine Wasserentnahme von  $1,72 \times 10^{10} \text{ m}^3$  vorgesehen. Bedingt durch die Entnahmekonvention der Abflusssimulation (tatsächliche Wasserentnahme muss kleiner gleich dem Abfluss sein, siehe Abschnitt 3.3.2.2) können über den Zweijahreszeitraum tatsächlich aber nur  $1,68 \times 10^{10} \text{ m}^3$  entnommen werden.  $3,17 \times 10^8 \text{ m}^3$  können bei der Entnahme somit nicht berücksichtigt werden, was aber nur einem Anteil von 2 % an der eigentlich vorgesehenen Wasserentnahme entspricht. Dafür sinkt aber das Abflussvolumen am Evaluierungspunkt Khartoum nun zeitweise fast auf einen Wert von Null.

Eine fundierte Analyse der Genauigkeit der Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells kann im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Auf Basis der nur im begrenzten Umfang vorliegenden Literaturangaben soll aber zumindest grob abgeschätzt werden, ob die Größenordnung der verwendeten Wassernutzungsdaten stimmt. Betrachtet man hierfür die vorgesehenen Wasserentnahmen für das gesamte Flusseinzugsgebiet des Nils (siehe hierzu auch Abbildung 4.3-11), die sich für den Simulationszeitraum (1980-1981) auf eine Summe von  $9,29 \times 10^{10} \text{ m}^3$  belaufen und teilt diese durch die bekannte Bevölkerungsanzahl im Flusseinzugsgebiet des Jahres 1990 von etwa 130 Mio. Menschen (KARYABWITE 1999: 33), dann ergibt sich im Mittel eine Wasserentnahme von etwa  $357 \text{ m}^3$  pro Einwohner und Jahr.<sup>31</sup> Vergleicht man diesen gemittelten Wert mit den länderspezifischen Angaben zur Wasserentnahme des Jahres 2001 in Abbildung 4.3-4, so wird dieser Wert in vielen Ländern weit unterschritten, in zwei Ländern (Ägypten,

<sup>31</sup> Der Wert der Bevölkerungsanzahl innerhalb des Nileinzugsgebietes im Jahr 1990 ist in Bezug auf den Simulationszeitraum (1980-1981) der zeitlich nächste, verfügbare Literaturwert. Es ist anzunehmen, dass dieser Wert Anfang der 1980er Jahre eher noch geringer ausfiel (siehe auch Abbildung 4.3-4), womit der gemittelte Wert der Wasserentnahme pro Einwohner und Jahr eigentlich noch höher ausfallen würde.

Sudan) aber auch um mehr als das Doppelte übertroffen.<sup>32</sup> Eine genaue und differenziertere Betrachtung und Genauigkeitsabschätzung ist aufgrund des Fehlens genauer Referenzwerte für die 1980er Jahre – wie u.a. die genauen länderspezifischen Bevölkerungsanteile am Flusseinzugsgebiets des Nils und Werte zu den genauen Flusswasserentnahmen – an dieser Stelle nicht möglich. Eine Abweichung der Wassernutzungsdaten des *WaterGAP*-Modells kann somit zwar nicht ausgeschlossen werden, insgesamt kann auf Grund obiger Betrachtung aber angenommen werden, dass zumindest die Größenordnung der Wasserentnahmewerte stimmig ist. Als maßgebliche Ursache für die erheblich zu hoch simulierten Abflussvolumen scheidet eine potenzielle Ungenauigkeit des *WaterGAP*-Modells damit aus.

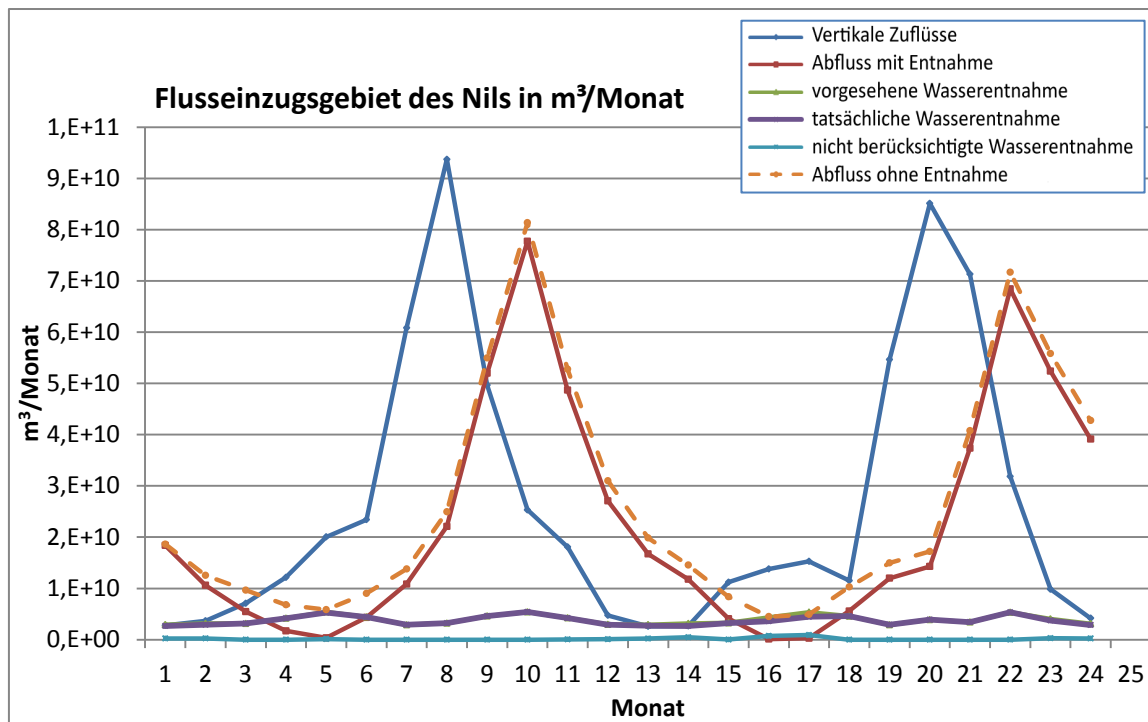


Abbildung 4.3-11: Monatliche Gegenüberstellung der verschiedenen Prozesswerte [ $m^3/\text{Monat}$ ] der Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Nileinzugsgebietes im Zeitraum von 1980 bis 1981 (Graphen der vorgesehenen (grün) und tatsächlichen Wasserentnahme (lila) zumeist deckungsgleich).

### Analyse der Abweichung im Abflussvolumen

Mögliche Hinweise in Hinblick auf die Ursachen der stark überhöhten Simulationswerte des Abflussvolumens konnten in der Fachliteratur gefunden werden.

KARYABWITE (1999: 29) zufolge fließt nur ein Bruchteil des Niederschlags im Nileinzugsgebiet über das Gerinne und das Flussnetzwerk schließlich auch in das Meer ab. Ein großer Teil versickere oder gehe durch Evapotranspiration verloren oder wird Feuchtgebieten zugeführt. Nach JOHNSTON (2012: 61) sollen vom Gesamtniederschlag im Einzugsgebiet etwa 70 % durch Evapotranspiration über das natürliche Ökosystem und weitere 10 % durch Evaporation über regenge-speiste Landwirtschaft verloren gehen und der Wasserabflussgenerierung in Form von *Runoff* (Summe aus *Surface Runoff* und *Drainage*) nicht mehr zur Verfügung stehen. Ungefähr 8 % des gesamten Wassers im Nileinzugsgebiet sollen darüber hinaus durch die Verdunstung von Ober-

<sup>32</sup> Es lag keine ältere Datengrundlage vor. Aber auch in diesem Fall ist davon auszugehen, dass die länderspezifischen Wasserentnahmen pro Einwohner und Kopf in den 1980er Jahren eher noch geringer ausfielen.

flächengewässern (Seen, Dämme, Schwemmland etc.) verloren gehen. Der jährliche Abfluss des Nils am Assuan Staudamm betrage so am Ende weniger als 5 % der Jahresniederschlagsmenge im gesamten Flusseinzugsgebiet (JOHNSTON 2012: 71).

Auch HAGEMANN (1997: 93) stellt fest, dass die durch das *HD*-Modell simulierten Abflussvolumen in vielen Einzugsgebieten Afrikas stark überschätzt sind und eine Beurteilung der Güte dieser Simulationsergebnisse nicht möglich sei – er vermutet die Ursache in einer signifikanten Unterschätzung der simulierten Evapotranspiration. Die genauen Ursachen und die Höhe der Unterschätzung sind für die hier vorliegenden Eingangsdaten jedoch nicht bekannt. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass mögliche Ursachen in der unzureichenden Berücksichtigung einer zusätzlichen, durch Bewässerung oder Nilüberschwemmungen hervorgerufenen Evapotranspiration liegen könnten. Auch Ungenauigkeiten in den Daten zur Vegetationsbedeckung können nicht ausgeschlossen werden, die ihren Eingang in das *SL*-Schema finden. Auch gilt zu bedenken, dass die Eingangsdaten *Surface Runoff* und *Drainage* nur in einer Auflösung von  $0,5^\circ$  vorliegen und hierin eine mögliche Ursache für Abweichungen begründet liegen kann. Für den Nil ergibt sich der *Runoff* als Differenz zweier großer Eingangsgrößen (Evapotranspiration und Niederschlag), siehe hierzu auch Formel (21) und HAGEMANN et al. (2013: 271). Es kann daher festgestellt werden, dass sich bereits kleine Fehler in den simulierten Werten der Evapotranspiration oder auch des Niederschlags (beides sind Eingangsdaten des *SL*-Schemas) stark auf den simulierten *Runoff* (*Surface Runoff* und *Drainage*) auswirken werden.

Unter der Annahme also, dass die Evapotranspiration im Flusseinzugsgebiet systematisch unterschätzt wird und der *Runoff* als Folge systematisch viel zu hoch simuliert ist, soll nun eine Simulation durchgeführt werden bei der, über eine prozentuale Reduzierung der *Surface Runoff*- und *Drainage*-Werte, der zur Verfügung stehende *Runoff* systematisch verringert wird. Weil die genauen Ursachen und die Höhe der potenziellen Unterschätzung der Evapotranspiration nicht bestimmt sind, wird diese Simulation für den Zeitraum von 1980 bis 1981 mit einer testweisen 75-prozentigen Reduzierung der *Surface-Runoff*- und *Drainage*-Werte durchgeführt. Wasserentnahmen werden bei dieser Simulation auch berücksichtigt, wobei aber ein Mindestabfluss von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  vorgegeben wird, bei dessen Unterschreitung keine Wasserentnahmen mehr vorgenommen werden (dieser Wert entspricht ungefähr dem niedrigsten Messwert im *Low-Flow*-Bereich des Evaluierungspunktes Khartoum während dieses Simulationszeitraumes). Diese Simulation dient dazu, einen ungefähren Eindruck von der Höhe der systematischen Abweichung zu bekommen, die durch die potenzielle Unterschätzung der Evapotranspiration hervorgerufen wird. Abbildung 4.3-12 zeigt die Simulationsergebnisse für die Evaluierungspunkte und stellt diese den entsprechenden Messwerten gegenüber.

Nach der systematischen Korrektur der vorliegenden *Runoff*-Eingangsdaten zeigen die Simulationsergebnisse nun eine sehr viel bessere Übereinstimmung des simulierten Abflussvolumens mit den entsprechenden Messwerten. Der Verlauf der Simulationsergebnisse und die simulierten Abflussvolumen bei Dongola und Khartoum stimmen im Mittel nun verhältnismäßig gut mit den Messwerten (Monatsmittel) überein, wobei sowohl die Simulations- als auch die Messwerte im Vergleich mal zu hoch oder zu niedrig ausfallen. Ohne den vorgegebenen Abflussschwellenwert würde der Abfluss des Blauen Nils durch die Wasserentnahmen aber nun häufiger auf null reduziert werden. Nur im Fall des Evaluierungspunktes Malakal sind die Abweichungen offensichtlicher, wobei aber den besonderen regionalen Begebenheiten (großflächige Feuchtgebiete und Seen) im Rahmen dieser Simulation auch nicht Rechnung getragen werden konnte.

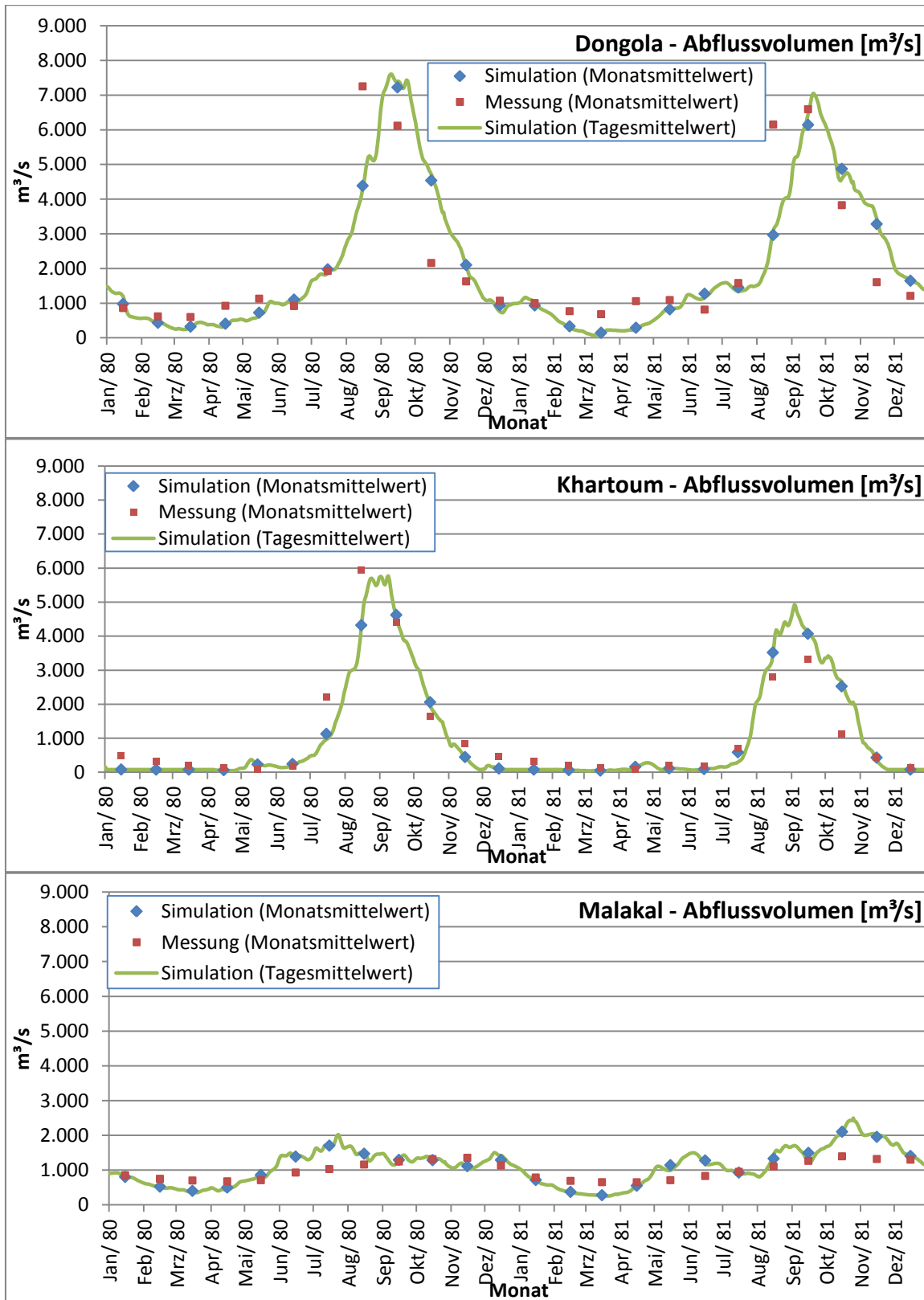


Abbildung 4.3-12: Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes mit einer 75-prozentigen Runoff-Korrektur für die Jahre 1980 bis 1981. Abgebildet sind die Simulations- und Messwerte des Abflussvolumens für die Evaluierungspunkte Dongola, Khartoum und Malakal.

Die Abflussmaxima von Simulations- und Messwerten weisen für alle Evaluierungspunkte (insbesondere für Dongola und Malakal) zum Teil noch zeitliche Abweichungen auf, welche aber vielfältige Ursachen haben können. Keine Berücksichtigung im Rahmen dieser Simulation fand z.B. der Einfluss von Staudämmen. Es befinden sich mehrere Staudämme in den Hauptströmen

des Nileinzugsgebietes, durch die sowohl zeitliche Verzögerungen im Abflussverhalten als auch eine Dämpfung von Abflussmaxima und eine Erhöhung des *Low-Flow*-Bereiches bewirkt werden könnten. Die *Runoff*-Korrektur wie auch der vorgegebene Abflussschwellenwert von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  (unterhalb dessen keine Entnahmen vorgenommen werden) führen nun dazu, dass sich die Summe der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen ( $3,24 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ) innerhalb des Flusseinzugsgebietes des Nils für den Simulationszeitraum auf einen Betrag von etwa einem Drittel der eigentlich vorgesehen Entnahmen ( $9,29 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ) erhöht hat (siehe auch Abbildung 4.3-13). Die vorgesehenen Wasserentnahmen innerhalb des Nileinzugsgebietes machen nach der systematischen *Runoff*-Korrektur nun auch einen deutlich höheren Anteil (ungefähr 58 %) an der Gesamtsumme der vertikalen Zuflüsse (korrigierte *Runoff*-Werte) des Simulationszeitraumes aus.

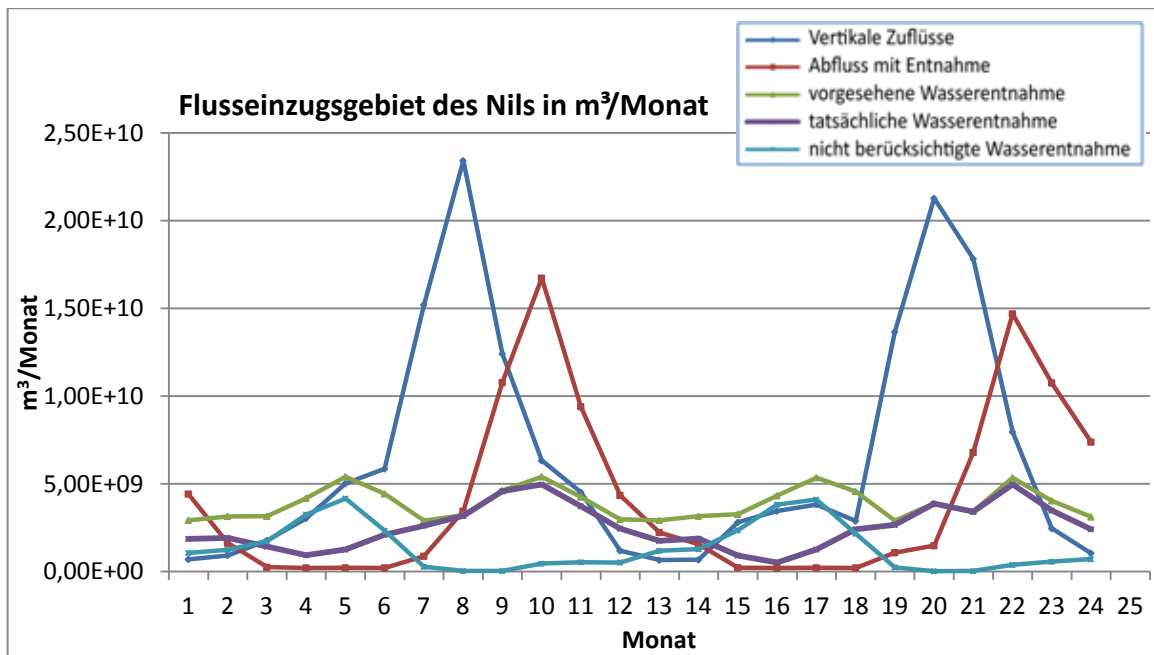


Abbildung 4.3-13: Monatliche Gegenüberstellung der verschiedenen Prozesswerte [ $\text{m}^3/\text{Monat}$ ] der Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes des Nileinzugsgebietes im Zeitraum von 1980 bis 1981 unter Berücksichtigung der *Runoff*-Korrektur.

**Gesamter lateraler Wasserhaushalt mit *Runoff*-Korrektur:** Simulationszeitraum 1980 – 1981, Evaluierungspunkt Khartoum (Teileinzugsgebiet des Blauen Nils)

Simuliertes Abflussvolumen [ $\text{m}^3$ ]	Gemessenes Abflussvolumen [ $\text{m}^3$ ]	Abweichung [ $\text{m}^3$ ]
$6,68 \times 10^{10}$	$7,03 \times 10^{10}$	$3,49 \times 10^9$ (5 %)
...nach Verrechnung nicht berücksichtigte Entnahmen von $4,77 \times 10^9 \text{ m}^3$		$8,27 \times 10^9$ (11,8 %)

Tabelle 4.3-3: Gesamter lateraler Wasserhaushalt mit *Runoff*-Korrektur: Abweichung des simulierten vom gemessenen Abflussvolumen am Evaluierungspunkt Khartoum. Außerdem die verbleibende Abweichung nach Abzug aller in der Simulation nicht berücksichtigten Entnahmen innerhalb des Teileinzugsgebietes des Blauen Nils bis Khartoum.

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Abflussvolumen am Evaluierungspunkt Khartoum (Tabelle 4.3.3) zeigt, dass mit der vorgenommenen *Runoff*-Korrektur die Summe des simulierten Abflussvolumens in dem zweijährigen Simulationszeitraum nun um 5 % abweicht. Berücksichtigt man auch die nicht getätigten Wasserentnahmen in dieser zweijährigen Abflussbilanz, so steigt die Abweichung auf etwa 11 % an. Es scheint jedoch i.A. fragwürdig, ob auch in

der Realität die vorgesehenen Wasserentnahmen immer in voller Höhe dem Flusseinzugsgebiet entnommen werden können.

Für den Evaluierungspunkt Dongola wird in der Literatur (JOHNSTON 2012: 74) ein mittleres jährliches Abflussvolumen von  $88,1 \text{ km}^3$  angegeben (Beobachtungszeitraum 1869-1992). Für den Zeitraum von 1970 bis 1984 betrug dieser mittlere Jahreswert jedoch nur  $69 \text{ km}^3$ . Die verwendeten Referenzmesswerte des Evaluierungspunktes Dongola belaufen sich in der Summe für den Zeitraum von 1980 bis 1981 auf einen mittleren Jahreswert von  $68 \text{ km}^3$  und die Simulationsergebnisse des gesamten lateralen Wasserhaushaltes mit *Runoff*-Korrektur ergeben für diesen zweijährigen Simulationszeitraum ein mittleres jährliches Abflussvolumen von  $65 \text{ km}^3$  (die nicht berücksichtigten Wasserentnahmen sind hier nicht verrechnet). Festzuhalten bleibt also, dass die *Runoff*-Korrektur in dem hier betrachteten Fall eher noch etwas geringer ausfallen müsste. Um welchen Faktor die Werte der simulierten Evapotranspiration aber tatsächlich abweichen hängt zum einen von den spezifischen regionalen Gegebenheiten jedes Teileinzugsgebietes ab und wäre zum anderen über einen viel längeren Simulationszeitraum zu ermitteln. Hierbei handelt es sich jedoch um Fragen, die an dieser Stelle nicht eingehender behandelt werden können, sondern nur über fundierte Analysen und einer Verbesserung der zugrunde liegenden Eingangsdaten und der Berücksichtigung zusätzlicher Einflussfaktoren zu beantworten sind. Für die im Folgenden angestellten Betrachtungen wird deshalb weiter eine systematische *Runoff*-Korrektur von 75 % angenommen, welche im Monatsmittel insgesamt zu einer – in Anbetracht der komplexen Mechanismen des Nileinzugsgebietes und der nur rudimentären Grunddatenbasis – guten Übereinstimmung der Simulationsergebnisse und Messwerte führt.

In einer Überschlagrechnung soll auf dieser Basis nun exemplarisch berechnet werden, um wie viel die simulierte Evapotranspiration in etwa höher ausfallen müsste, um der hier durchgeführten 75-prozentigen *Runoff*-Korrektur zu entsprechen. Nach HAGEMANN et al. (2013: 271) gilt die Annahme, dass die langfristige Speicherung von Bodensickerwasser und Schnee vernachlässigt werden kann (Änderungen gehen langfristig gegen Null). Für den *Niederschlag* ( $N$ ), die *Evapotranspiration* ( $E$ ) und den *Runoff* ( $R$ ) gilt im längerfristigen Mittel daher folgender Zusammenhang:

$$(21) \quad E = N - R .$$

Die *WATCH-Forcing*-Daten (*WFD*) geben im Zeitraum von 1979 bis 1999 für das Nileinzugsgebiet eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von etwa  $1.840 \text{ km}^3$  an (entspricht etwa  $58.332 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $5.520 \text{ km}^3$  in drei Jahren). Die in dieser Arbeit verwendeten simulierten *Runoff*-Daten des *SL*-Schemas (als Summe des *Surface Runoffs* und der *Drainage*) belaufen sich für das Einzugsgebiet und den Simulationszeitraum von 1979 bis 1981 in der Summe auf etwa  $989 \text{ km}^3$ , womit sich nach obiger Formel für die *Evapotranspiration* ein Wert von  $4.531 \text{ km}^3$  ergibt. Nachdem die systematische *Runoff*-Korrektur durchgeführt wurde und damit eine im Mittel verhältnismäßig gute Übereinstimmung der Simulations- und Messwerte erreicht werden konnte, beträgt die Summe des *Runoffs* im Flusseinzugsgebiet für den gleichen Simulationszeitraum noch  $247 \text{ km}^3$ . Dieses bedeutet für den dreijährigen Simulationszeitraum nun rechnerisch einen um ca. 16,4 % größeren Wert für die Evapotranspiration in Höhe von  $5.273 \text{ km}^3$ . Um denselben Effekt wie eine systematische 75-prozentige *Runoff*-Korrektur zu erzielen, müsste die simulierte Evapotranspiration für das Nileinzugsgebiet im jährlichen Mittel um einen Wert von etwa  $247 \text{ km}^3$  größer ausfallen, wäre zuvor dann also um ca. 14,1 % unterschätzt gewesen.

Die genauen Ursachen für die Unterschätzung der Evapotranspiration sowie die Zeitverzögerungen in den Abflussmaxima können im Rahmen dieser Arbeit nicht näher bestimmt werden und der *Runoff*-Korrekturfaktor von 75 % kann – wie bereits festgestellt – nur als ein grober Richtwert angesehen werden. Der überwiegende Teil der noch verbliebenen Abweichungen weist aller Voraussicht nach aber eine Systematik auf, die in selber Form auch bei einer szenariobasierten Simulation auftreten wird. Die bisherige Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes mit seiner 75-prozentigen Korrektur des *Runoffs* genügt unter diesen Annahmen damit grundsätzlich den Anforderungen an eine Referenzsimulation. Hierauf aufbauend kann eine szenariobasierte Simulation und eine Analyse der aus dem Szenario resultierenden tendenziellen Veränderungen durchgeführt werden.

#### **4.3.4 Szenariobasierte Simulationen**

Zum Abschluss der Betrachtung des Wasserhaushaltes des Flusseinzugsgebietes des Nils werden nun noch zwei szenariobasierte Simulationen durchgeführt. Deren Ergebnisse sollen mit der Referenzsimulation verglichen und auf die tendenziellen Änderungen hin untersucht werden.

Ägypten ist eines der Länder der Erde, das nur über sehr wenig erneuerbares Frischwasser verfügt (30 m<sup>3</sup> pro Jahr und Einwohner) und deshalb zu 97 % vom Nilwasser abhängig ist, das von außerhalb seines Territoriums stammt (ALWARDT 2011). Ägypten unterliegt damit einer extremen Abhängigkeit von den Oberliegerstaaten des Nils (u.a. Sudan, Äthiopien, Uganda, Tansania, Kenia etc.) in Bezug auf deren Wasserverbrauch und etwaige wasserbauliche Maßnahmen (Staudämme etc.). Die Bedeutung des Wassers als lebensnotwendige Ressource und das hohe Maß der Abhängigkeit vieler Anrainerstaaten vom Nilwasser, aber auch mögliche klimatische und sozioökonomische Veränderungen bergen große Konfliktpotenziale innerhalb des Flusseinzugsgebietes des Nils. Für weiterführende Literatur siehe u.a. KEITH et. al (2013) und LINK et al. (2012).

##### **Szenario I - Staudamm**

Der Oberlauf des Blauen Nils verläuft auf dem Staatsgebiet von Äthiopien, womit dieses Land potenziell die Kontrolle über einen erheblichen Anteil des Nilwassers ausüben könnte. Sowohl Äthiopien als auch der Sudan planen den Bau zahlreicher Staudämme im Flusseinzugsgebiet des Nils (CONNIFF 2012: 22). In einem einfachen Szenario wird deshalb nun simuliert werden, welchen Einfluss der Bau eines hypothetischen Staudamms am Blauen Nil in Höhe der äthiopisch-sudanesischen Grenze hätte – sowohl für die Wasserverfügbarkeit im Blauen Nil (Evaluierungspunkt Khartoum) als auch im Nil-Hauptstrom (Evaluierungspunkt Dongola) und damit für den Zufluss zum Assuan-Stausee Ägyptens (siehe Abbildung 4.3-14). Dieser szenariobasierte Staudamm soll nun konstant pro Zeitschritt nur noch 75 % des eigentlichen Wasserabflussvolumens des Blauen Nils passieren lassen (25 % des Wassers werden zurückgehalten).

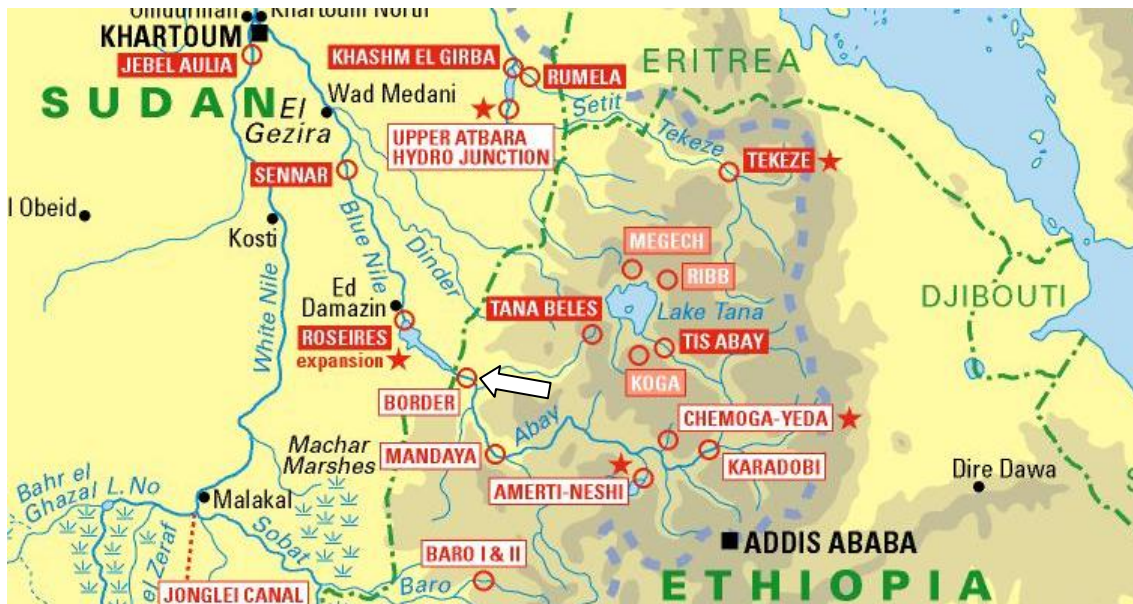


Abbildung 4.3-14: Teileinzugsgebiet des Blauen Nils, seine Zuflüsse und Standort (siehe Pfeil) des szenariobasierten Staudammes (Ausschnitt aus Abbildung 4.3-4, Legende und Quelle siehe dort).

Hierzu wird nun eine Simulation des gesamten lateralen Wasserhaushaltes (unter Berücksichtigung der systematischen *Runoff*-Korrektur) für den obigen Referenzzeitraum von 1980 bis 1981 durchgeführt. In deren Verlauf wird nun mit dem *LandFlow*-Modul der *RivFlow*-Anwendung eine punktuelle Rasterzellenmanipulation an der Hauptgerinnerasterzelle ( $x=348$ ,  $y=388$ ) des Blauen Nils in Höhe der äthiopisch-sudanischen Grenze in der Form vorgenommen, als dass pro Zeitschritt nur noch 75 % des Wassers durchgeleitet wird (siehe hierfür auch Abschnitt 3.3.2.2 - Punktuelle Abflussmanipulation). Abbildung 4.3-15 zeigt für die beiden Evaluierungspunkte Dongola und Khartoum die Monatsmittelwerte des Abflussvolumens, jeweils für die Referenzsimulation (siehe hierzu das vorherige Unterkapitel) und die szenariobasierte Simulation. Auf die Abflussvolumen des Evaluierungspunktes Malakal am Weißen Nil haben die szenariobasierten Änderungen am Blauen Nil keinen Einfluss.

Die aus der szenariobasierten Simulation resultierenden tendenziellen Änderungen des Abflussvolumens im Vergleich zu den Monatsmittelwerten der Referenzsimulation finden sich für beide Evaluierungspunkte – sowohl als Differenzbetrag, wie auch prozentual – in Abbildung 4.3-16.

Für Monate mit einem besonders geringen Abflussvolumen sind kaum szenariobasierte Abweichungen festzustellen. Hier liegen die Referenz- und Szenariowerte im Teileinzugsgebiet des Blauen Nils dicht beieinander und Wasserentnahmen werden einheitlich nur bis zum Abflussschwellenwert von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  vorgenommen, womit sich oft nur sehr kleine oder manchmal auch gar keine szenariobasierten Abweichungen ergeben (für die Monate Januar 1980 und 1981 ist das Monatsmittel des Referenz- und des Szenariowertes im Teileinzugsgebiet des Blauen Nils gleich groß und liegt bei  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dafür muss aber zumindest die Summe der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen innerhalb des Flusseinzugsgebietes für die szenariobasierte Simulation angestiegen sein, was durch die Monitoringdaten auch bestätigt wird. Betrug die Summe der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen für die Referenzsimulation noch  $3,24 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , so beträgt sie für das gesamte Flusseinzugsgebiet der szenariobasierten Simulation nun  $3,36 \times 10^{10} \text{ m}^3$  (Anstieg um ca. 4 %). Betrachtet man die nicht berücksichtigten Wasserentnahmen einmal separat für das Teileinzugsgebiet des Blauen Nils, so steigen sie dort von  $4,77 \times 10^9 \text{ m}^3$  (Referenzsimulation) auf  $5,52 \times 10^9 \text{ m}^3$  (szenariobasierte Simulation) an – dies entspricht einem Anstieg um ca. 16 %.



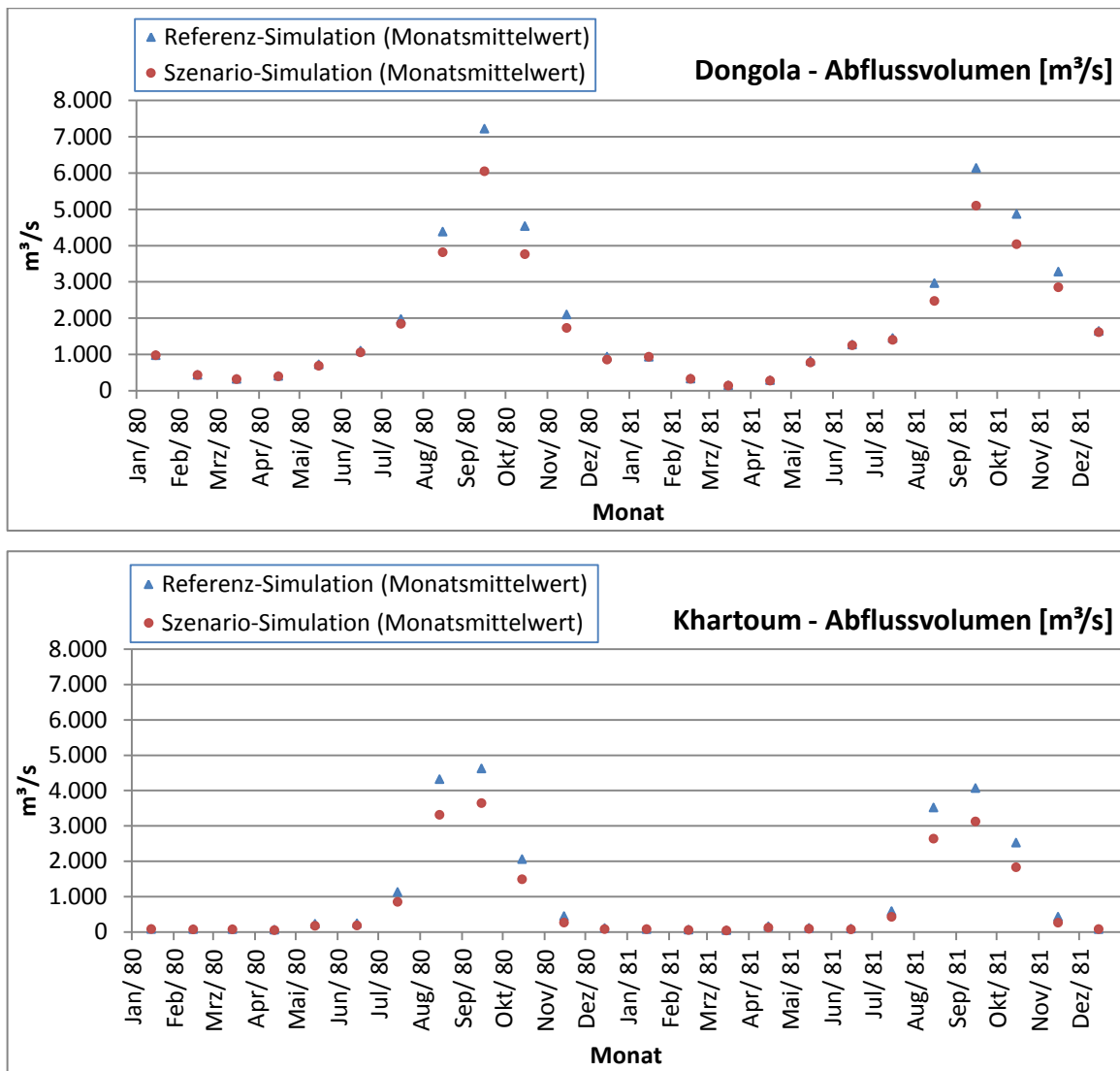


Abbildung 4.3-15: Gegenüberstellung der Monatsmittelwerte des Abflussvolumens der Referenzsimulation und der entsprechenden Simulationenwerte des Staudamm-Szenarios, sowohl für den Evaluierungspunkt Dongola als auch für Khartoum.

Auch ist zu beobachten, dass das Abflussvolumen des Blauen Nils nicht konstant um 25 % reduziert ist. Dieser Umstand ist im Januar vor allem durch die fehlende szenariobasierte Abweichung (verursacht durch den Abflussschwellenwert, siehe oben) bedingt, in andern Monaten ist er vermutlich auf Speicherprozesse am Staudamm oder aber Zuflüsse des Blauen Nils zurückzuführen, die unterhalb des szenariobasierten Staudammes liegen. Diese Zuflüsse schwanken auch in ihrem Abflussvolumen und haben je nach Monat einen unterschiedlichen Anteil am Gesamt-abflussvolumen aus dem Teileinzugsgebiet beim Evaluierungspunkt Khartoum – je nach Monat relativieren oder verstärken diese den Einfluss des szenariobasierten Staudamms in Bezug auf das Gesamtabflussvolumen. Die hier möglicherweise auftretenden Wechselwirkungen bedürfen noch genauerer Untersuchungen.

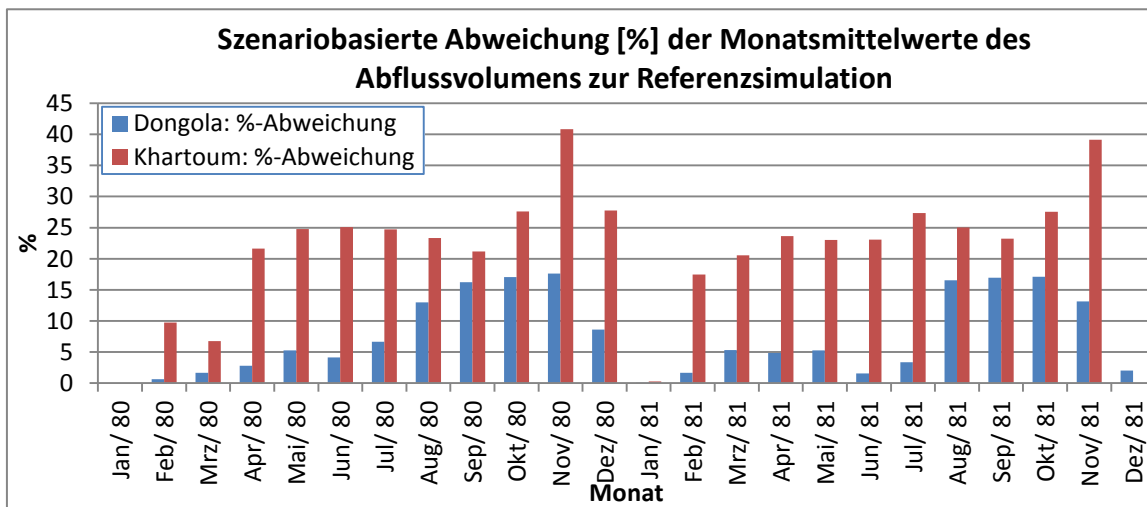
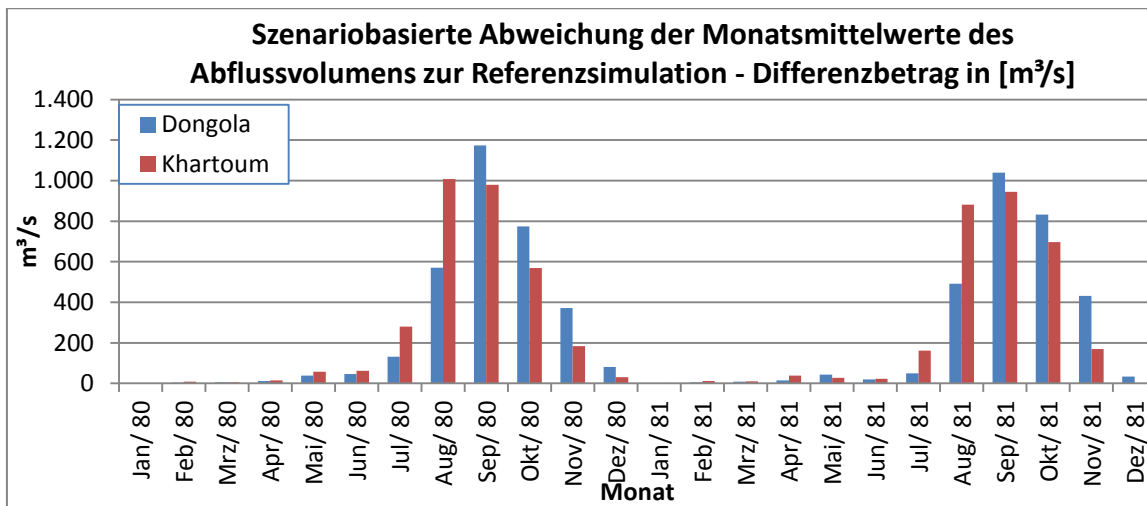


Abbildung 4.3-16: Szenariobasierte Abweichung der Monatsmittelwerte des Abflussvolumens zur Referenzsimulation als Differenzbetrag und in Prozent.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass in der Jahressumme des Abflussvolumens am Evaluierungspunkt Dongola im Mittel für den Zeitraum von 1980 bis 1981 eine tendenzielle Verringerung um etwa 8 km<sup>3</sup> (ca. 12 %) zu verzeichnen ist – eine Wassermenge die nun auch nicht mehr in den Assuan-Staudamm fließen und Ägypten zur Verfügung stehen wird.

Zusammenfassend können diese Beträge der szenariobasierten Änderung als ein belastbares Ergebnis angesehen werden. Aufgrund der direkten Rasterzellenmanipulation kann nämlich davon ausgegangen werden, dass wegen der ansonsten gleichen Grunddaten- und Modellbasis sowie den selben auftretenden systematischen Abweichungen, die szenariobasierten Änderungen des Abflussvolumens (relative Differenz zwischen jeweiligem Referenz- und Szenariowert) nur auf den hypothetischen Staudamm zurückzuführen sind. Was die absoluten Werte für die Referenz- und die szenariobasierte Simulation angeht, so wurden nach der *Runoff*-Korrektur zwar grundsätzlich gute Übereinstimmungen der Simulations- und Messwerte erzielt, aufgrund verbleibender Abweichungen haben die Ergebniswerte der szenariobasierten Simulation in der Höhe ihrer Beträge aber nur eine tendenzielle Aussagekraft.

## Szenario II – Verdopplung der Wasserentnahmen im Nileinzugsgebiet

Innerhalb der Länder des Nileinzugsgebietes ist ein stetiges Bevölkerungswachstum zu verzeichnen (siehe auch Abbildung 4.3-4). Die zunehmende Verstädterung und Industrialisierung in den Nil-Anrainerstaaten, aber auch der Ausbau der Bewässerungslandwirtschaft (AWULACHEW et al. 2012: 3f.) werden den Wasserverbrauch innerhalb des Einzugsgebietes in den nächsten Jahrzehnten aller Voraussicht nach ansteigen lassen. Im Sinne einer groben Abschätzung soll deshalb simuliert werden, zu welchen Änderungen im Abflussvolumen eine Verdopplung der Wasserentnahmen führen würde. Diese szenariobasierte Simulation wird auf derselben Grundlage wie die bisherige Referenzsimulation zum Nil durchgeführt (Zeitraum: 1980-1981, 75-prozentige *Runoff*-Korrektur etc.) mit dem einzigen Unterschied, dass die gesamten Wasserentnahmen (*WaterGap*-Daten) verdoppelt werden. Abbildung 4.3-17 zeigt für den Evaluierungspunkt Dongola die Gegenüberstellung der Monatsmittelwerte der Referenzsimulation und der hier durchgeführten szenariobasierten Simulation.

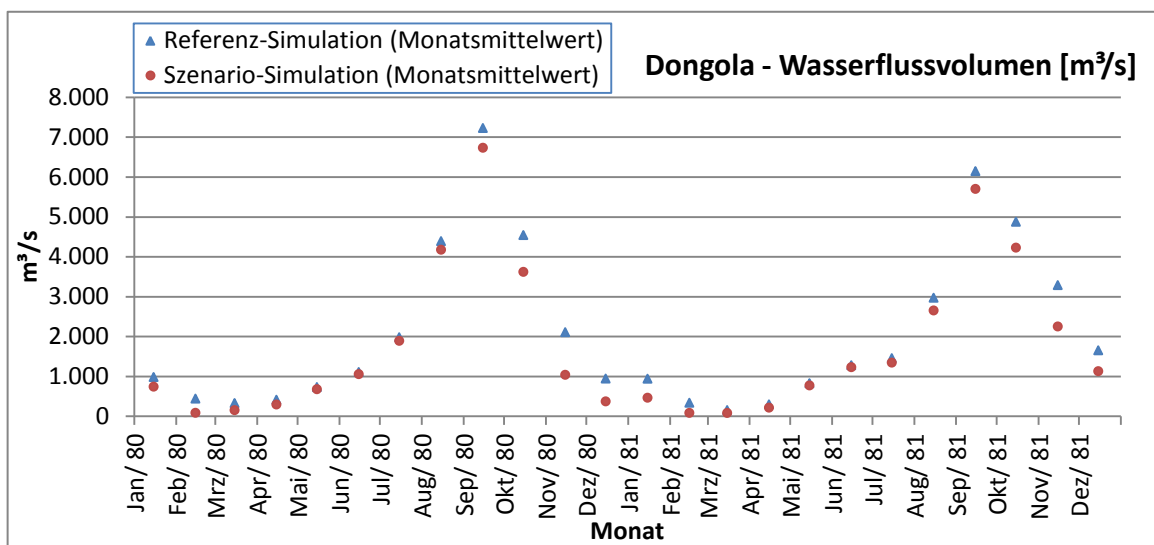


Abbildung 4.3-17: Gegenüberstellung der Monatsmittelwerte des Abflussvolumens der Referenzsimulation und des Entnahme-Szenarios für den Evaluierungspunkt Dongola.

Im zweijährigen Simulationszeitraum beläuft sich die Summe der szenariobasierten Wasserentnahmen nun auf etwa  $1,86 \times 10^{11} \text{ m}^3$ . Sie übersteigt damit die *Runoff*-korrigierten vertikalen Zuflüsse desselben Zeitraums ( $1,59 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ) um etwa  $2,6 \times 10^{10} \text{ m}^3$ . Es verwundert nicht, dass bedingt durch die Entnahmekonvention nun insbesondere die Menge der nicht berücksichtigten Entnahmen innerhalb des Flusseinzugsgebietes ansteigt und zwar um einen Betrag von  $5,6 \times 10^{10} \text{ m}^3$  (was einer Steigerung von 172 % gegenüber der Referenzsimulation entspricht). Insgesamt wird am Evaluierungspunkt Dongola nun nur noch ein mittleres Jahresabflussvolumen von  $54 \text{ km}^3$  simuliert, was einer Reduzierung um ca. 17 % ( $11 \text{ km}^3$ ) gegenüber den simulierten Werten der Referenzsimulation entspricht (nicht berücksichtigte Entnahmen nicht eingerechnet).

Obwohl dieses Szenario wegen des zugrundeliegenden Simulationszeitraumes aus heutiger Sicht keine unmittelbare Aussagekraft für die Zukunft aufweist (zumindest nicht was die Höhe der simulierten Werte angeht), verdeutlicht es doch sehr gut die potenziellen Auswirkungen einer Steigerung der Wasserentnahmen. Einmal mehr wird damit die Notwendigkeit szenariobasierter Analysen unterstrichen, die helfen könnten, zukünftige Konfliktpotenziale rechtzeitig zu identifizieren. Das aggregierte Modellsystem empfiehlt sich hierfür als ein wirkungsvolles Analysetool.



## 5. Ergebniszusammenfassung und Ausblick

Im Angesicht klimatischer Veränderungen und einem stetigen sozioökonomischen Wandel in vielen der Weltregionen ist global eine zunehmende Beeinflussung der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten zu beobachten – sowohl in Hinblick auf die zukünftige Verfügbarkeit von Wasser als auch auf dessen Nutzung und Verteilung. Diese Beeinflussung kann in Konfliktpotenzialen resultieren oder diese zumindest begünstigen. Wichtiger denn je erscheint es daher, ein Analysetool zur Verfügung zu haben, welches hilft, den Wasserhaushalt eines Flusseinzugsgebiets zu analysieren und auf dessen Grundlage szenariobasierte Simulationen durchgeführt werden können, anhand derer tendenzielle Aussagen zu möglichen Entwicklungen innerhalb dieses Wasserhaushaltes getroffen werden können.

Um einen Beitrag zur Schließung der bestehenden Forschungslücke zu leisten, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein aggregiertes Modellsystem zur szenariobasierten Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten unter Berücksichtigung klimatischer und sozioökonomischer Einflüsse entwickelt.

### 5.1 Die Beantwortung der Forschungsfragen

Die in Bezug auf die Entwicklung des aggregierten Modellsystems definierten Forschungsziele (Kapitel 1.2) und die damit einhergehenden Anforderungen an die Analysemethodik und das aggregierte Modellsystem haben im Vorfeld vier wesentliche Forschungsfragen aufgeworfen (Kapitel 1.4), die im Verlauf dieser Arbeit bearbeitet und im Folgenden zusammenfassend beantwortet werden.

- A) **Wie kann das geforderte Modellsystem programmatisch umgesetzt werden, um den interdisziplinären Anforderungen einer einfachen Handhabung und einer potenziellen Erweiterbarkeit der Anwendung gerecht zu werden?** Um diese Forderungen zu erfüllen, zugleich aber auch den Raum für potenzielle Erweiterungen um zusätzliche Modelle und Daten zu bieten, wurde als Anwendungsschnittstelle und Simulationsumgebung ein **Geographisches Informationssystem (GIS)** gewählt, das als **Desktop-Anwendung** unter Windows lauffähig ist. Zentrales Element des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten ist dabei die als GIS-Modul programmierte **RivFlow-Anwendung** (Kapitel 3.3). In dieser ist zum einen das Abflussmodell mittlerer Komplexität (erweitertes **HD-Modell**) programmatisch umgesetzt, zum anderen dient es der Bearbeitung, Erstellung und Kopplung aller an den Abflussprozessen beteiligten geophysikalischen und sozioökonomischen Daten, bietet Analysemethoden und protokolliert die Ergebniswerte.
- B) **Welche prozeduralen Schritte muss das aggregierte Modellsystem zur Simulation regionaler Wasserhaushalte im Einzelnen umfassen? Welche naturwissenschaftlichen und sozioökonomischen Prozesse und Basisdaten spielen hierbei eine zwingende Rolle?** Die notwendigen Prozesse und prozeduralen Schritte, die eine Anwendung des aggregierten Modellsystems auf ein Flusseinzugsgebiet im Einzelnen umfasst, wurden über den gesamten Verlauf des Entwicklungsprozesses identifiziert, ausgearbeitet, soweit möglich programmatisch in der **RivFlow-Anwendung** umgesetzt und abschließend in Form einer **methodischen Vorgehensweise** in Kapitel 4.1 beschrieben. Besonders hervorzuheben in dieser Schrittfolge sind der **DTM-Aufbereitungsprozess**, der Parametrisierungsansatz des erweiterten **HD-Modells**, die Referenzsimulation und Evaluierung zur Abschätzung der Simulationsgenauigkeit sowie

die szenariobasierte Simulation des Wasserhaushaltes eines Flusseinzugsgebietes und die hieraus resultierenden Aussagen zu den tendenziellen Änderungen im Abflussvolumen. Die notwendige Grunddatenbasis (**Antriebsdaten**) einer jeden Anwendung des aggregierten Modellsystems besteht aus den drei Datenkategorien: *SRTM-Daten*, *Surface-Runoff-* und *Drainage-Daten* sowie Angaben zur flächenbasierten Wassernutzung. Die in dieser Arbeit als Grunddatenbasis verwendeten globalen Datensätze können, sofern verfügbar, künftig durch präzisere Daten ersetzt oder ggf. durch regionale Daten ergänzt werden.

- C) **Können globale Abflussmodelle dahingehend adaptiert werden, dass man zu einem Abflussmodell mittlerer Komplexität gelangt und welche Prozesse/Effekte müssen in Hinblick auf eine höhere Auflösung zusätzlich bedacht werden?** Als zentralen Bestandteil des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten bedarf es eines hydrologischen Abflussmodells, welches in der Lage ist, die lateralen Abflussprozesse auf einer regionalen Skala in Auflösungen von etwa 1 bis 5 km zu simulieren. Von seinen Voraussetzungen und unter Verwendung einer global vorliegenden Grunddatenbasis soll es potenziell weltweit auf alle Flusseinzugsgebiete angewendet werden können. Ein Abflussmodell mit dieser Auflösung und Einbettung in einem aggregierten Modellsystem stand der Wissenschaft bisher nicht zur Verfügung. Um nun zu einem solchen **Abflussmodell mittlerer Komplexität** zu gelangen, wurde im Rahmen dieser Arbeit das *HD-Modell* – ein globales Abflussmodell – erfolgreich an eine höhere Auflösung adaptiert (Kapitel 3.4). Auf der nun kleineren Skala müssen die bisherigen Gerinneabflussprozesse differenzierter betrachtet werden, was durch die Erweiterung des *HD-Modells* um einen zusätzlichen Hauptgerinneabflussprozess berücksichtigt wurde (Abschnitt 3.4.2.3). Nach der Entwicklung und exemplarischen Anwendung eines methodischen Parametrisierungsansatzes, wurde das erweiterte *HD-Modell* erfolgreich für eine 5-km-Auflösung parametrisiert (Abschnitt 3.4.2.4). Die Parametrisierungsergebnisse des erweiterten *HD-Modells* zeigen deutliche Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen *HD-Modell*, unterstreichen die erfolgreiche Anpassung an eine höhere Auflösung und die Eignung des erweiterten *HD-Modells*, laterale Abflussprozesse auf einer regionalen Skala zu simulieren – in einer nun höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung.
- D) **Welche Simulationsergebnisse und -genauigkeit können bei einer einfachen exemplarischen Anwendung des aggregierten Modellsystems im Rahmen dieser Arbeit erzielt werden und sind diese ausreichend, um eine belastbare oder tendenzielle Aussage über Änderungen der regionalen Wasserverfügbarkeit (Wasserhaushalte) innerhalb der untersuchten Flusseinzugsgebiete treffen zu können?** Zum einen hängt die Simulationsgenauigkeit im Bereich der Klimawissenschaften in einem hohen Maße von der Anzahl der berücksichtigten Einflussfaktoren und der Qualität der zugrunde liegenden Modelle und einfließenden Eingangsdaten ab. Zum anderen können Modelle die Realität generell aber immer nur näherungsweise und häufig nur in einer erheblich vereinfachten Form abbilden. Modell- und Datenfehler können aufgrund oftmals sehr komplexer Prozesse und vieler Variablen vergleichsweise hoch ausfallen, sind nur schwer abzuschätzen oder Ursachen zuzuordnen und bedingen sich häufig sogar untereinander. **Eine Abschätzung der Simulationsgenauigkeit ist deshalb zumeist nur in qualitativer, nicht aber in quantitativer Form möglich.**

Diese Einschränkungen gelten auch in Bezug auf die erreichbare Genauigkeit des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten. Die Simulationsgenauigkeit des Modellsystems kann dabei nicht absolut beurteilt werden, sondern wird sowohl mit dem Untersuchungsraum und der Qualität der hierfür vorliegenden Ein-

gangsdaten variieren als auch in einem besonderen Maße von der Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung regionaler Einflussfaktoren im Verlaufe des Simulationsprozesses abhängen. Die räumliche Auflösung der Simulationsergebnisse des aggregierten Modellsystems kann dabei höchstens der Auflösung des zugrundeliegenden Geländemodells (*DTM*-Raster) – bei gleichzeitiger Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modell für diese Auflösung – entsprechen. Die zur Beantwortung einer Forschungsfrage letztendlich notwendige Simulationsgenauigkeit (zeitliche und räumliche Auflösung, zulässige Abweichung etc.) ist im Vorfeld ebenso abzuschätzen, wie zu prüfen ist, ob die verfügbare Datenbasis, die berücksichtigten Einflussfaktoren und das Abflussmodell mittlerer Komplexität diesen Anforderungen überhaupt gerecht werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden **zwei exemplarische Anwendungen** des aggregierten Modellsystems am Flusseinzugsgebiet der Elbe und des Nils durchgeführt. Dem Modellsystem lag dabei das erweiterte *HD*-Modell in einer 5-km-Parametrisierung zugrunde. **Zeitliche Übereinstimmung:** Die Simulationsergebnisse unter ausschließlicher Verwendung der Grunddatenbasis zeigen im Fall der Elbe eine gute zeitliche Simulationsauflösung im Bereich einiger Tage. Im Flusseinzugsgebiet des Nils liegt die zeitliche Abweichung der Simulationsergebnisse im Bereich von etwa einem Monat, die zeitliche Simulationsauflösung ist damit deutlich geringer. Es liegt hier aber die Vermutung nahe, dass die Ursache dieser Abweichung eher in den zahlreichen Staudämmen der Hauptströme als im erweiterten *HD*-Modell begründet liegt. Zum anderen lagen die Messdaten für den Nil auch nur als Monatsmittelwerte vor, die zudem in Hinblick auf ihre Genauigkeit zum Teil mit Vorsicht zu betrachten sind (siehe Abschnitt 3.1.2.5), und die Simulation wurde nur für einen Zweijahreszeitraum durchgeführt. **Übereinstimmung im Abflussvolumen:** In Bezug auf das simulierte Abflussvolumen weisen sowohl die Elbe als auch der Nil große Abweichungen auf. Der überwiegende Teil dieser Abweichungen kann jedoch als systematische Abweichungen bestimmt und deren Auftreten auch plausibel begründet werden. Im Fall des Elbeeinzugsgebietes liegt so die Vermutung nahe, dass eine hohe Anzahl an Talsperren und Stauseen in den oberen Bereichen der Teileinzugsgebiete eine Dämpfung von Abflussmaxima und eine generelle Erhöhung des *Low-Flow*-Bereiches verantwortet, welches zu einer zeitlichen Umverteilung der jeweiligen Abflussmengen führt. Für das Flusseinzugsgebiet des Nils muss als wesentliche Ursache von einer Unterschätzung der *Evapotranspiration* und einer damit einhergehenden Überschätzung des *Runoffs* (Eingangsdaten *Surface Runoff* und *Drainage*) ausgegangen werden. **Simulationsgenauigkeit:** Nach entsprechender Berücksichtigung der systematischen Abweichungen im Simulationsprozess (identifizierte systematische Abweichung werden soweit möglich herausgerechnet) können für die Elbe nun sehr gute Übereinstimmungen der Simulations- und Messkurven erzielt werden, die zwar immer noch vereinzelte Abweichungen aufweisen, im Fall eines Abflussmodelles mittlerer Komplexität und einer ausschließlichen Berücksichtigung der Grunddatenbasis aber kaum besser ausfallen könnten. Die Abweichung macht in Bezug auf die Summe der gemessenen Abflussvolumen des Evaluierungspunktes Neu Darchau für den Fünfjahreszeitraum 4,9 % bzw. 2,9 % (nicht berücksichtigte Entnahmen eingerechnet) aus. Im Fall des Nils treten zum Teil weiterhin zeitliche Abweichungen im Bereich von einem Monat auf (der potenzielle Einfluss von Staudämmen auf das zeitliche Abflussverhalten der Hauptströme konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden). Die im Rahmen der Simulation durchgeführte *Runoff*-Korrektur (über eine grobe 75-prozentige Reduzierung) führt nun aber zu verhältnismäßig guten Übereinstimmungen in den Simulations- und Messwerten, vor allem wenn man die eigentliche Komplexität des Nil-

einzugsgebietes und die nur rudimentäre Datenbasis dieser Simulation bedenkt. Die Abweichung beträgt in Bezug auf die Summe der Abflussvolumen des Evaluierungspunktes Khartoum für den Zweijahreszeitraum 5 % bzw. 11,8 % (nicht berücksichtigte Entnahmen eingerechnet). **Szenariobasierte Simulation:** Für den Nil wurden auch zwei szenariobasierte Simulationen durchgeführt. Zum einen wurde an der sudanesisch-äthiopischen Grenze ein hypothetischer Staudamm simuliert, an dem konstant 25 % des Abflussvolumens abgezweigt wurden. Die Beträge der szenariobasierten Änderung (siehe Abbildung 4.3-16) können dabei als ein belastbares Ergebnis angesehen werden, während die absoluten Ergebniswerte nur eine tendenzielle Aussagekraft haben. Mit der tendenziellen Änderung des mittleren Jahresabflusses um 8 km<sup>3</sup> (etwa 12 %) am Evaluierungspunkt Dongola liegt am Ende aber ein Ergebnis vor, das einen guten Eindruck über den potenziellen Einfluss eines hypothetischen Staudammes am sudanesisch-äthiopischen Grenzgebietes des Blauen Nils und die tendenziellen Folgen für das Abflussvolumen stromabwärts gibt. Zum anderen wurde eine szenariobasierte Simulation durchgeführt bei der die Wasserentnahmen im Nileinzugsgebiet verdoppelt wurden. Die Simulationsergebnisse für den Evaluierungspunkt Dongola (Abbildung 4.3-17) zeigen, dass es hierdurch zu einer tendenziellen Reduktion des simulierten mittleren Jahresabflusses um mind. 17 % (entspricht etwa 11 km<sup>3</sup>) gegenüber den Werten der Referenzsimulation kommt. Auch den Assuan-Stausee würden so mindestens 11 km<sup>3</sup> weniger Wasser im Jahr erreichen.

Bei Berücksichtigung von präziseren Eingangsdaten, zusätzlichen Einflussfaktoren auf der kleineren Skala oder etwa der Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells für eine höhere Auflösung, wird die räumliche und zeitliche Simulationsauflösung des aggregierten Modellsystems noch weiter gesteigert werden können.

## 5.2 Resümee dieser Arbeit

Mit der Entwicklung des aggregierten Modellsystems zur Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten können im Rahmen dieser Arbeit **drei entscheidende neue Forschungsergebnisse** präsentiert werden:

**Zuerst** wurde das globale 0,5 Grad *HD*-Modell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie erstmalig an eine hohe räumliche Auflösung angepasst und hierfür um den zusätzlichen Abflussmechanismus des Hauptgerinnes erweitert. Je höher die gewählte Simulationsauflösung ist, desto wichtiger erscheint diese Separierung in Gerinne- und Hauptgerinneabflussprozesse. Das aus dieser Anpassung resultierende Abflussmodell mittlerer Komplexität (**erweitertes *HD*-Modell**) wurde erfolgreich für eine 5-km-Auflösung parametrisiert und ist potenziell weltweit auf alle Flusseinzugsgebiete anwendbar. Die Parametrisierungsergebnisse belegen eine gute, theoretisch erreichbare zeitliche Simulationsauflösung, die im Mittel nur um 0,6 bis 3 Tage von den Messwerten abweicht. Die Simulation kann dabei in sehr kurzen Zeitschritten (900-sekündige Dauer bei der Elbe) durchgeführt werden, wo das ursprüngliches *HD*-Modell Zeitschrittlängen von 24 Std. bzw. 6 Std. aufweist.

**Zweitens** wurde das erweiterte *HD*-Modell mit der Konzeption und Programmierung der **RivFlow-Anwendung** in eine GIS-Umgebung integriert, womit es erstmalig auf einem handelsüblichen Computer unter Windows als Desktopanwendung lauffähig ist. Im Gegensatz zu den bisherigen globalen Abflussmodellen, können über die *RivFlow*-Anwendung nun sowohl hydrologische Prozesse als auch sozioökonomische Einflussfaktoren berücksichtigt werden und im Verlauf



einer Abflusssimulation direkt miteinander interagieren. Die einfache Bedienung über eine grafische Benutzeroberfläche wird dem interdisziplinären Anwendungsspektrum gerecht. Während des Simulationsprozesses protokolliert die *RivFlow*-Anwendung eine umfangreiche Anzahl an Sekundärdaten (*Monitoring*) und bietet darüber hinaus erweiterte Analysefunktionen, wodurch die Grundlage einer Genauigkeitsabschätzung und Ergebnisinterpretation erheblich erweitert wird. Die Einbettung in das SAGA GIS und die Programmierung in C++ ermöglichen eine unkomplizierte Einbindung zusätzlicher Eingangsdaten sowie die Datenvisualisierung und lassen viel Raum für die programmatische Erweiterung um zusätzliche Einflussfaktoren, funktionale Prozesse oder eine Verknüpfung mit anderen Modellschnittstellen.

**Als dritter Punkt** wird mit der ausgearbeiteten **methodischen Vorgehensweise** bei der Anwendung des aggregierten Modellsystems die ideale Abfolge der einzelnen Bearbeitungs- und Anwendungsschritte hin zu der szenariobasierten Analyse eines Wasserhaushaltes sichergestellt und die einheitliche Anwendung auf potenziell alle weltweiten Flusseinzugsgebiete gewährleistet. In diesem Rahmen wird die Aufbereitung von *SRTM*-Daten zu einem Geländemodell (*DTM*-Raster) detailliert beschrieben und auch der eigens entwickelte Parametrisierungsansatz für das erweiterte *HD*-Modell präzise und nachvollziehbar vorgestellt, um so dem Anwender des aggregierten Modellsystems auch die Untersuchung anderer Flusseinzugsgebiete in einer ggf. höheren Auflösung zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten sowohl mit den erstellten *DTM*-Raster der Elbe und des Nils sehr gute Ergebnisse erzielt als auch eine optimale Parametrisierung des erweiterten *HD*-Modells für die 5-km-Auflösung vorgenommen werden.

**Zusammenfassend** kann festgestellt werden, dass mit dem aggregierten Modellsystem ein wirkungsvolles Analysetool zur szenariobasierten Simulation der regionalen Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten entwickelt wurde, mit einer in der regionalen Anwendung sowohl räumlich als auch zeitlich höheren Auflösung als bisher verwendete globale hydrologische Abflussmodelle, bei gleichzeitiger Einbeziehung von sozioökonomischen Einflussfaktoren und einer vergleichsweise einfachen Handhabung. Mit dem aggregierten Modellsystem wird zwar nicht die Genauigkeit eines spezifischen, auf ein spezielles Flusseinzugsgebiet abgestimmten, Flussmodells erreicht werden können, dafür ist es aber anhand seiner methodischen Vorgehensweise und Grunddatenbasis potenziell weltweit auf alle Flusseinzugsgebiete anwendbar und darauf ausgelegt, benutzerspezifisch erweitert zu werden.

### 5.3 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Wie bereits angeführt liegen dem aggregierten Modellsystem ein Abflussmodell mittlerer Komplexität und eine Grunddatenbasis in einer Auflösung von größtenteils nur 0,5 Grad zugrunde. Die Simulationsgenauigkeit muss somit von vornherein als limitiert angesehen werden. Ein naheliegender Schritt zur Verbesserung der Simulationsgenauigkeit liegt zum einen in der Verwendung von zukünftig potenziell vorhandenen, höher aufgelösten und präziseren Eingangs- bzw. Antriebsdaten für die Grunddatenbasis des aggregierten Modellsystems oder der anwendungsspezifischen Berücksichtigung von zusätzlichen regionalen Eingangsdaten und Einflussfaktoren. Für letzteres würden sich z.B. die Daten von hochauflösenden regionalen Klimamodellen (*Regional Climate Model*, RCM) oder regional erhobene geophysikalische bzw. sozioökonomische Daten und Einflussfaktoren anbieten. Zum anderen haben sich im Rahmen dieser Arbeit aber auch einige Verbesserungspotenziale in Hinblick auf den zugrundeliegenden Simulationsprozess angedeutet, deren zukünftige Umsetzung zu einer weiteren Verbesserung der Simulati-

ongenauigkeit führen könnte. In Bezug auf diesen weiteren Forschungsbedarf sind hervorzuheben:

- **Implementierung der Bestimmung einer Hauptgerinnerasterzelle über das Abflussvolumen (siehe Exkurs II):** In jedem Zeitschritt könnten die Rasterzellen über ihr Abflussvolumen des letzten Zeitschrittes und einem definierten Schwellenwert jeweils aufs Neue zu einer Gerinne- oder aber Hauptgerinnerasterzelle bestimmt werden. Auf diese Weise wäre es u.a. möglich temporär fast ausgetrocknete Flussabschnitte zu simulieren, in denen bei geringem Abflussvolumen die Parametrisierung einer Gerinnerasterzelle angesetzt wird, sobald das Abflussvolumen aber steigt, die Rasterzelle wieder als Hauptgerinnerasterzelle parametrisiert wird.
- **Parametrisierung des Hauptgerinneabflusses:** Die bisherige Parametrisierung des Hauptgerinneabflusses erfolgte über das *Anfitten* an eine durchschnittliche Fließgeschwindigkeit der Elbe in Höhe von 3 km/h. Diese Durchschnittsgeschwindigkeit wurde über den gesamten deutschen Elbverlauf ermittelt und gibt schon für die Elbe das Geschwindigkeitsbild in den einzelnen Flussabschnitten nicht realistisch wieder. Für das sehr viel komplexere Flusseinzugsgebiet des Nils werden die potenziellen Abweichungen der auf Grundlage dieser Parametrisierung bestimmten Geschwindigkeit im Hauptgerinne noch höher ausfallen. Es gilt deshalb Überlegungen anzustellen, ob es zukünftig möglich ist, bestimmten Flussabschnitten oder Flussbettcharakteristika eine unterschiedliche Parametrisierung zuzuordnen um so die Genauigkeit der Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit könnte auch darin bestehen, die Fließgeschwindigkeit direkt funktional mit der Höhe des Abflussvolumens im Hauptgerinne zu verknüpfen.
- **Berücksichtigung der Abflusseigenschaften von Oberflächengewässern:** Über die gesonderte Berücksichtigung der Abflusseigenschaften von Oberflächengewässern – wie z.B. (Stau-)Seen – im Rahmen des Simulationsprozesses des Abflussmodells mittlerer Komplexität könnte die zeitliche Komponente des Abflussverhaltens noch besser simuliert und die zeitliche Simulationsgenauigkeit damit potenziell erhöht werden.
- **Evapotranspiration:** Im Flusseinzugsgebiet des Nils kann davon ausgegangen werden, dass die systematischen Abweichungen des simulierten Abflussvolumens auf eine Unterschätzung der simulierten Werte der Evapotranspiration zurückgeführt werden können. Die Höhe der systematischen Abweichung konnte im Rahmen dieser Arbeit nur exemplarisch bestimmt werden. Es wäre aber von Interesse zu analysieren, inwiefern – und ob überhaupt – eine generelle und genauere Bestimmung dieser Systematik möglich ist oder ob eine Korrektur nur über eine Verbesserung der Simulation der Evapotranspiration bzw. *Surface-Runoff* und *Drainage*-Daten im *SL*-Schema, damit also über die Verbesserung der Grunddatenbasis möglich ist.

Der Motivation dieser Arbeit liegt die Annahme zugrunde, dass die rechtzeitige Identifikation möglicher Wasserengpässe in einem Flusseinzugsgebiet und ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Ursachen einen wichtigen Beitrag zur Konfliktprävention und der Lösung möglicher Wasserdispute leisten können. Mit der szenariobasierten Simulation der Wasserhaushalte von Flusseinzugsgebieten in einer regionalen Auflösung, der gleichzeitigen Berücksichtigung von relevanten geowissenschaftlichen und sozioökonomischen Einflussfaktoren im Verlauf der Abflusssimulation und mit seiner einfachen Handhabung sowie Erweiterbarkeit stellt das aggregierte

gierte Modellsystem hierfür die notwendigen Grundlagen bereit. Die Art seiner Konzeption und die wissenschaftlichen Verbesserungen des aggregierten Modellsystems (siehe Kapitel 5.1 und 5.2) ermöglichen dabei die potenzielle Anwendung auf jedes Flusseinzugsgebiet, womit auch der wissenschaftliche Zugang zu bisher nur wenig erforschten Flusseinzugsgebieten verbessert wird. Die dem aggregierten Modellsystem zugrundeliegende *RivFlow*-Anwendung wird mit Abschluss dieser Arbeit der Wissenschaft frei zur Verfügung gestellt. Der Quellcode der *RivFlow*-Anwendung wurde unter den Bedingungen der *Free Open Source Software* als Teil der SAGA GIS Software veröffentlicht.

Wie im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt wurde, konnte das aggregierte Modellsystem erfolgreich in Hinblick auf die gesteckten Zielsetzungen und Erwartungen (Kapitel 1) evaluiert werden, und zwar sowohl in einer exemplarischen Anwendung auf die Elbe als auch auf das sehr viel komplexere Flusseinzugsgebiet des Nils. Die hier nur anhand der Grunddatenbasis erzielte Simulationsgenauigkeit eröffnet bereits ein breites Spektrum zukünftiger Anwendungsmöglichkeiten, wie z.B. die Simulation der tendenziellen Auswirkung von punktuellen Wasserentnahmen, der Vervielfachung von Wassernutzung oder von prozentualen Veränderungen des *Runoffs*. Die fundierte wissenschaftliche Analyse eines spezifischen Flusseinzugsgebietes wird in der Regel aber eine sehr viel komplexere und auf einer wissenschaftlichen Fragstellung fußende Szenario-bildung erfordern. Dafür müssen zumeist – immer abhängig von der angestrebten Simulationsgenauigkeit – zusätzliche oder präzisere regionale Eingangsdaten und Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Diese können in den meisten Fällen dann aber problemlos über die GIS-Schnittstelle des aggregierten Modellsystems, in jedem Fall aber programmtechnisch über die *RivFlow*-Anwendung, in die Abflusssimulation integriert werden. Auch kann es anwendungsspezifisch sinnvoll erscheinen, die szenariobasierte Simulation in einer höheren Auflösung und auf Basis eines detaillierter aufbereiteten Geländemodells durchzuführen.

Die hauptsächlich intendierte Nutzung des aggregierten Modellsystems liegt in der szenariobasierten Simulation von Wasserabflussvolumen, vor allem in Hinblick auf die regionale Wasserverfügbarkeit und daraus möglicherweise resultierenden inner- oder zwischenstaatlichen Konfliktpotenzialen um Wasserressourcen (siehe auch Kapitel 2.4). Denkbare Anwendungsbereiche für das aggregierte Modellsystem sind so z.B. grenzüberschreitende Flusseinzugsgebiete, in denen mittel- bis langfristig mit klimatischen Veränderungen zu rechnen ist, in denen Flussregulierungsmaßnahmen geplant sind oder ein starker Anstieg im Wasserverbrauch prognostiziert wird (u.a. das Euphrat- und Tigris-Gebiet, Indus, Ganges und der Nil). Auch die Untersuchung von gletschergespeisten Flusssystemen in Bezug auf die Folgen des prognostizierten Klimawandels (abschmelzende Gletscher) für die zukünftigen Wasserabflussvolumen könnte ein interessantes Anwendungsfeld darstellen (Beispiele hierfür sind Indien und Pakistan).

In allen diesen Fällen kann das aggregierte Modellsystem potenziell einen wertvollen Beitrag zum Verständnis der geophysikalischen und sozioökonomischen Wechselwirkungen im Wasserhaushalt eines Flusseinzugsgebietes leisten und die wissenschaftliche Analyse der Ursachenmechanismen und resultierenden Folgen für den Wasserhaushalt eines Flusseinzugsgebietes substantiell unterstützen.

Daneben gibt es noch eine Reihe anderer interessanter Anwendungsmöglichkeiten für das aggregierte Modellsystem – immer die hierfür zusätzlich erforderlichen regionalen Eingangsdaten und ggf. programmtechnische Erweiterungen der *RivFlow*-Anwendung vorausgesetzt. Beispiele für solche Anwendungsbereiche sind z.B. die differenziertere Betrachtung der Verfügbarkeit von

Trink-, Prozess- und Abwasser (wechselseitige Beeinflussung der Wasserqualität), von Boden-erosionen anhand prognostizierter, saisonaler Abflussverstärkung und die Abschätzung punktu-eller Wasserabflussvolumen in Hinblick auf geplante Wasserkraftwerke oder andere industrielle Wasserentnahmen. Gegebenenfalls kann über eine Veränderung des Abflussvolumens in Fluss-deltas auch auf die Gefahr einer zunehmenden Intrusion von Salzwasser geschlossen werden. Eine wechselseitige funktionale Verknüpfung und Analyse der Abflussvolumen mit der Lufttem-peratur könnte an einem Fluss Rückschlüsse auf die Menge und den Temperaturzustand des zur Verfügung stehenden Kühlwassers für Kraftwerke zulassen. Für jede dieser Anwendungen gilt es dabei einzeln abzuschätzen, ob die räumliche und zeitliche Auflösung des aggregierten Modell-systems hinreichend genau ist und welche zusätzlichen regionalen Eingangsdaten und Einfluss-faktoren zu berücksichtigen sind, um zu einem aussagekräftigen Ergebnis zu gelangen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass zukünftig sowohl Wissenschaftlern als auch Ent-scheidungsträgern mit diesem aggregierten Modellsystem ein wirkungsvolles und erweiterbares Analysetool für die wissenschaftliche Untersuchung von Flusseinzugsgebieten, die tendenzielle Abschätzung der Entwicklung regionaler Wasserhaushalte und für die darauf aufbauende Be-wertung möglicher Konfliktpotenziale und Präventionsmechanismen an die Hand gegeben ist – stets den Bogen spannend zwischen den geophysikalischen und sozioökonomischen Aspekten der regionalen Verfügbarkeit von Wasser in einem Flusseinzugsgebiet.

## 6. Literaturverzeichnis

- ALCAMO, Joseph, DÖLL, Petra, HENRICH, Thomas, KASPAR, Frank, LEHNER, Bernhard, RÖSCH, Thomas und Stefan SIEBERT (2003): *Development and testing of WaterGAP 2 global model of water use and availability*, Hydrological Sciences, 48 (3), Juni 2003.
- ALWARDT, Christian (2011): *Wasser als Globale Herausforderung – Die Ressource Wasser*, zeitgleich erschienen als IFAR Working Paper 17 und CLISEC Research Paper, 11. Mai 2011.
- AMNESTY INTERNATIONAL (2009): *Troubled Waters – Palestinians Denied Fair Access to Water*, Amnesty International Publications.
- AWULACHEW, Sleshi Bekele, SMAKHTIN, Vladimir, MOLDON, David und Don PEDEN (Hrsg.) (2012): *The Nile River Basin – Water, Agriculture, Governance and Livelihoods*, International Water Management Institute, Routledge, New York.
- BBU (2006): „*Virtuelles Wasser*“ - *Wo kommt unser Wasser*, Reader zur Wasser Berlin 2006, Freiburger Arbeitskreis Wasser im Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz e.V. (BBU).
- BERGEMANN, Michael (2012): *Gesamtliste der Fließgewässer im Elbeinzugsgebiet*, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg, abrufbar unter: [http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl\\_files/Download-Archive/Fachberichte/Allgemein/Fliessgw.pdf](http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl_files/Download-Archive/Fachberichte/Allgemein/Fliessgw.pdf) (letzter Zugriff: 30.01.2015).
- BMZ (2006): *Sektorkonzept Wasser*, BMZ Konzeptpapier 143, Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, September 2006.
- BMZ (1995): *Überlebensfrage Wasser – eine Ressource wird knapp*, Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Entwicklungspolitik Materialien 94.
- BRZOSKA, Michael und Jürgen SCHEFFRAN (2013): *Climate and war: no clear-cut schism*, Nature, Vol. 498, S. 171, 13. Juni 2013.
- BRZOSKA, Michael (2009): *The securitization of climate change and the power of conceptions of security*, S+F (27. Jg.) 3/2009, S. 137-145.
- BUND (2007): *Grundwasser – Guter Zustand bis 2015!*, Hintergrund, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., März 2007.
- CAN (2007): *National Security and the Threat of Climate Change*, CNA Corporation.
- CHATTERJI, Manas, ARLOSOROFF, Saul und Gauri GUHA (Hrsg.) (2002): *Conflict Management of Water Resources*, Ashgate Publishing.
- CIMMERY, Vern (2010a): *User Guide for SAGA - Volume 1*, Vers. 2.0.5, August 2010, abrufbar unter: <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20-%20Documentation/SAGA%20%20User%20Guide/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).
- CIMMERY, Vern (2010b): *User Guide for SAGA – Volume 2*, Vers. 2.0.5, November 2010, abrufbar unter: <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20-%20Documentation/SAGA%20%20User%20Guide/> (letzter Zugriff: 30.01.2015).

- CONCA, Ken (2006): *Governing Water - Contentious Transnational Politics and Global Institution Building*, The MIT Press, Cambridge.
- CONNIFF, Karen, MOLDEN, David, PEDEN, Don und Seleshi B. AWULACHEW (2012): *Nile water and agriculture*, in: AWULACHEW, Sleshi Bekele, SMAKHTIN, Vladimir, MOLDON, David und Don PEDEN (Hrsg.): *The Nile River Basin – Water, Agriculture, Governance and Livelihoods*, International Water Management Institute, S. 5-29, Routledge, New York.
- CONRAD, Olaf (2006): *SAGA – Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen*, Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen.
- DE LANGE, Norbert (2013): *Geoinformatik: in Theorie und Praxis*, 3. Auflage, Springer Spektrum.
- DEMISSIE, Salomon S., AWULACHEW, Seleshi B., MOLDEN, David und Aster D. YILMA (2012): *Spatial characterization of the Nile Basin for improved water management*, in: AWULACHEW, Sleshi Bekele, SMAKHTIN, Vladimir, MOLDON, David und Don PEDEN (Hrsg.): *The Nile River Basin – Water, Agriculture, Governance and Livelihoods*, International Water Management Institute, S. 47-60, Routledge, New York.
- DÖLL, Petra, ALCAMO, Joseph, HENRICHs, Thomas, KASPAR, Frank, LEHNER, Bernhard, RÖSCH, Thomas und Stefan SIEBERT (2001): *The Global Integrated Water Model WaterGAP 2.1*, in: Döll, Petra und Alcamo, Joseph (Hrsg.): *EuroWasser - Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change*, Kapitel 2, The Kassel World Water Series, Report No. 5, Center for Environmental Systems Research, Universität Kassel, Dezember 2001, abrufbar unter: [http://www.usf.uni-kassel.de/cesr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=134&Itemid=72](http://www.usf.uni-kassel.de/cesr/index.php?option=com_content&task=view&id=134&Itemid=72) (letzter Zugriff: 30.01.2015).
- DÜMENIL, L und E. TODINI (1992): *A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model*, in: KANE, J. P. (Hrsg.) (1992): *Advances in theoretical hydrology – a tribute to James Dooge*, S. 129-157, Elsevier Science, Amsterdam.
- DSW (2013): *Wie viele Menschen werden in Zukunft auf der Erde leben?*, Deutsche Stiftung Weltbevölkerung Infoblatt, Hannover, Oktober 2013, abrufbar unter: [http://www.weltbevoelkerung.de/uploads/tx\\_aedswpublication/FS\\_Entw\\_Projekt\\_web.pdf](http://www.weltbevoelkerung.de/uploads/tx_aedswpublication/FS_Entw_Projekt_web.pdf) (letzter Zugriff: 30.01.2015).
- FALKENMARK, Malin (1989): *The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed*, *Ambio*, Vol. 18, No. 2 (1989), S. 112-118.
- FARR, Tom G., WERNER, Marian, OSKIN, Michael, BURBANK, Douglas und Douglas ALSDORF (2007): *The Shuttle Radar Topography Mission*, *Rev. Geophys.*, 4, RG2004, 33PP, abrufbar unter: [http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_paper.pdf](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf) (letzter Zugriff: 30.01.2015).
- GÖTZ, Roland (2009): *Klimawandel in Russland*, Diskussionspapier FG 8, Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP) Berlin, April 2009.
- GTZ (2008): *Klimawandel und Sicherheit, Herausforderungen für die deutsche Entwicklungszusammenarbeit*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.

- HAGEMANN, Stefan, LOEW, Alexander und A. ANDERSON (2013): *Combined evaluation of MPI-ESM land surface water and energy fluxes*, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Vol. 5, S. 259-286.
- HAGEMANN, Stefan und L. DÜMENIL GATES (2003): *Improving a subgrid runoff parameterization scheme for climate models by the use of high resolution data derives from satellite observations*, Climate Dynamics (2003), 21, S. 349-359, Springer Verlag.
- HAGEMANN, Stefan (2002): *An Improved Land Surface Parameter Dataset for Global and Regional Climate Models*, Report No. 366, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Januar 2002.
- HAGEMANN, Stefan (1997): *Entwicklung einer Parametrisierung des lateralen Abflusses für Landflächen auf der globalen Skala*, Dissertation, Hamburg.
- HENDL, Manfred und Herbert LIEDTKE (Hrsg.) (2002): *Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie*, 3. Auflage, Justus Perthes Verlag Gotha, Nachdruck 2002.
- HENNERMANN, K. (2006): *Kartographie und GIS - Eine Einführung*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- IKSE (2005): *Die Elbe und ihr Einzugsgebiet - Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick*, Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg.
- IPCC (2014): *Summary for Policymakers*, in: FIELD, C.B., BARROS, V.R., DOKKEN, D.J., MACH, K.J., MASTRANDREA, M.D., BILIR, T.E., CHATTERJEE, M., EBI, K.L., ESTRADA, Y.O., GENOVA, R.C., GIRMA, B., KISSEL, E.S., LEVY, A.N., MACCRACKEN, S., MASTRANDREA, P.R. und L.L. WHITE (Hrsg.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects*, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 1-32, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013): *Summary for Policymakers*, in: STOCKER, T.F., QIN, D., PLATTNER G.-K., TIGNOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. und P.M. MIDGLEY (Hrsg.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, S. 3-29, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JOHNSTON, Robyn (2012): *Availability of water for agriculture in the Nile Basin*, in: AWULACHEW, Sleshi Bekele, SMAKHTIN, Vladimir, MOLDON, David und Don PEDEN (Hrsg.): *The Nile River Basin – Water, Agriculture, Governance and Livelihoods*, S. 61-83, International Water Management Institute, Routledge, New York.
- KARYABWITE, Diana Rizzolio (1999/2000): *Sharing in the Nile River Valley*, Project GNV011, UNEP/DEWA/GRID, Geneva.
- KEITH, Bruce, ENOS, James, GARLICK, Benjamin, SIMMONS, Giancarlo, COPELAND, Daniel und Mario CORTIZO (2013): *Limits to Population Growth and Water Resource Adequacy in the Nile River Basin, 1994-2100*, Center for Nation Reconstruction and Capacity Development, United States Military Academy, West Point, New York, Juli 2013.
- KINYANGI, James, PEDEN Don, HERRERO, Mario, TSIGE, Aster, OUNA, Tom und An NOTENBAERT (2012): *The Nile Basin, people, poverty and vulnerability*, in: AWULACHEW, Sleshi Bekele, SMAKHTIN,

- Vladimir, MOLDON, David und Don PEDEN (Hrsg.): *The Nile River Basin – Water, Agriculture, Governance and Livelihoods*, S. 30-46, International Water Management Institute, Routledge, New York.
- LI, Zhilin, ZHU, Qing und Christopher GOLD (2005): *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, CRC Press.
- LINK, P. Michael, BRZOSKA, Michael, MAAS, Achim, NEUNECK, Götz und Jürgen SCHEFFRAN (2013): *Possible implications of climate engineering for peace and security*, Bulletin of the American Meteorological Society, 94: ES13-ES16.
- LINK, P. Michael, PIONTEK, Franziska, SCHEFFRAN, Jürgen und Janpeter SCHILLING (2012): *On Foes and Fows: Vulnerabilities, Adaptive Capacities and Transboundary Relations in the Nile River Basin in Times of Climate Change*, L'Europe en formation, no. 365, Herbst 2012.
- LONGLEY, Paul A., GOODCHILD, Michael F., MAGUIRE, David J. und David W. RHIND (2011): *Geographic Information - System & Science*, 3. Auflage, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- MANIAK, Ulrich (2010): *Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure*, Springer, Heidelberg.
- MELESSE, Assefa M. (Hrsg.) (2011): *Nile River Basin - Hydrology, Climate and Water Use*, Springer.
- MIN, Seung-Ki, ZHANG, Xuebin, ZWIERS, Francis W. und Gabriele C. HEGERL (2011): *Human contribution to more-intense precipitation extremes*, Nature, Vol. 470, S. 378-381, 17. Februar 2011.
- O'CALLAGHAN, John F., MARK, David M. (1984): *The extraction of drainage networks from digital elevation data*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28:323-344.
- PACHOVA, Nevelina I. , NAKAYAMA, Mikiyasu und Libor JANSKY (ed.) (2008): *International Water Security – Domestic Threats and Opportunities*, United Nations University Press, Tokyo, März 2008.
- PALL, Pardeep, AINA, Tolu, STONE, Dáithí A., STOTT, Peter A., NOZAWA, Toru, HILBERTS, Arno G. J., LOHMANN, Dag und Myles R. ALLEN (2011): *Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risks in England and Wales in autumn 2000*, Nature, Vol. 470, S. 382-386, 17. Februar 2011.
- REICHLER, Thomas und Junsu KIM (2008): *How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate?*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 89, Issue, S. 303-311, März 2008.
- RIJSBERMAN, Frank R. (2004): *Water Scarcity: Fact or Fiction?*, in: *New Directions for a diverse planet*, Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, 26. Sept. – 1. Okt. 2004, Brisbane (Australien), abrufbar unter: [http://www.cropscience.org.au/icsc2004/pdf/1994\\_rijsbermanf.pdf](http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/pdf/1994_rijsbermanf.pdf) (letzter Zugriff: 30.01.2015).
- SAGER, Wilhelm. (2008): *Fluss ohne Mündung: Klimawandel - Wassermangel - Sicherheit*, Bouvier Verlag, Bonn.
- SCHEFFRAN, Jürgen, BRZOSKA, Michael, KOMINEK, Jasmin, LINK, P. Michael und Janpeter SCHILLING (2012): *Climate Change and Violent Conflict*, Science, Vol. 336, No. 6083, S. 869-871, 18. Mai 2012.



- SCHEFFRAN, Jürgen und Antonella BATTAGLINI (2011): *Climate and conflicts: the security risks of global warming*, Regional Environmental Change, Volume 11, Supplement 1, S. 27-39, März 2011.
- SHREVE, Ronald L. (1967): *Infinite Topologically Random Channel Networks*, The Journal of Geology, Vol. 75, No. 2, S. 178-186, März 1967.
- SIMON, Manfred (2004): *Die Elbe und ihr Einzugsgebiet*, in: OHLIG, Christoph (Hrsg.): *Wasserhistorische Forschungen. Schwerpunkt Hochwasserschutz / Elbe*, Schriften der DWhG, Band 4, Siegburg.
- SOLOW, Andrew R. (2013): *Global warming: A call for peace on climate and conflict*, Nature, Vol. 497, S. 179–180, 9. Mai 2013.
- SPIEGEL (1990): *Nur noch plätschern*, Der Spiegel 1/1990, S. 111-112, Januar 1990.
- STACKE, Tobias und Stefan HAGEMANN (2012): *Development and evaluation of a global dynamical wetlands extent scheme*, Hydrology and Earth System Science, 16, 2915-2933.
- STAUFFER, Thomas R. (1996): *Water and War in the Middle East: The Hydraulic Parameters of Conflict*, Information Paper Number 5, The Center for Policy Analysis of Palestine, Washington D.C, Juli 1996.
- SUTCLIFFE, J. V. und Y. P. PARKS (1999): *The Hydrology of the Nile*, IAHS Special Publication no. 5, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- TOCKNER, Klement, ROBINSON, Christopher T. and Urs UEHLINGER (eds.) (2009): *Rivers of Europe, Chapter 14*, 1. Auflage, Academic Press/Elsevier.
- WBGU (2007): *Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung - Globale Umweltveränderungen, Springer-Verlag, Berlin.
- WRI (2002): *Tomorrow's Markets - Global Trends, and Their Implications for Business*, World Resource Institute.
- WWAP (2009): *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*, World Water Assessment Programme, UNESCO/Earthscan, Paris/London.



# Anhang

Tabelle A-1 : Übersicht der gespeicherten Simulationsergebnisse, sowie Log- und Monitoringdaten des LandFlow-Moduls. Abgelegt im gewählten Speicherpfad.

Speicherdatei /-ordner	Inhalt	
<b>SimParameters.txt</b>	Parametereinstellungen und Informationen zur Simulation	
<b>ErrorLog.txt</b>	Fehlermeldungen des Simulationsprozesses	
<b>Abflussbilanz des Hauptstroms</b> RivBalance-Ordner	Für jeden Simulationstag eine Textdatei mit den Angaben zu allen Hauptgerinnerasterzellen-Koordinaten (x, y) des Hauptstroms [Spalte 1], den zugehörigen Flusskilometerangaben [Spalte 2] und dem dort simulierten Tagesmittelwert des Abflussvolumens in m <sup>3</sup> /s [Spalte 3]	
<b>Grids-Ordner</b>	Speicherordner der ausgegebenen Rasterdatensätze	
<b>Logdateien der Evaluierungspunkte 1-3</b> < name.txt >	<b>Datenspalte</b>	<b>Erklärung</b>
	1. Spalte	Simulationstag
	2. Spalte	Tagesmittelwert des Abflussvolumens in m <sup>3</sup> /s
<b>Monitoring_RivBasin.txt</b>	<b>Datenabkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
	Tag	Jeweiliger Simulationstag
	RivBasinDayIn	Vertikales Zuflussvolumen in das Flusseinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Tag
	RivDayOut	Abflussvolumen aus dem Flusseinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Tag
	RivBasIn	Fortlaufende Summe der Tageswerte des vertikalen Zuflussvolumens innerhalb des Flusseinzugsgebietes für den gesamten Simulationszeitraums in m <sup>3</sup>
	RivOut	Fortlaufende Summe der Tageswerte des Abflussvolumens aus dem Flusseinzugsgebiet für den gesamten Simulationszeitraum in m <sup>3</sup>
	RivBas	Gesamtes Wasservolumen innerhalb des Flusseinzugsgebietes in m <sup>3</sup> am jeweiligen Tag
	DiffInOut	Differenz aus RivBasIn und RivOut am jeweiligen Tag
	RivBasSink	Wassermenge in m <sup>3</sup> die in Senken des Flusseinzugsgebietes je Tag verloren geht.
	RivBasDayWithd	Wassermenge in m <sup>3</sup> die dem Abflussvolumen des Flusseinzugsgebietes je Tag entnommen wird
<b>Monitoring_WSystem.txt</b>	<b>Datenabkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
	Tag	Jeweiliger Simulationstag
	WSystemDayIn	Vertikales Zuflussvolumen in die Fläche des DTMs in m <sup>3</sup> je Tag
	WSystemDayOut	Abflussvolumen aus der Fläche des DTMs in m <sup>3</sup> je Tag
	WSystemIn	Fortlaufende Summe der Tageswerte des vertikalen Zuflussvolumens innerhalb der Fläche des DTMs für den gesamten Simulationszeitraums in m <sup>3</sup>

	<i>WSystemOut</i>	Fortlaufende Summe der Tageswerte des Abflussvolumens aus der Fläche des <i>DTMs</i> für den gesamten Simulationszeitraum in m <sup>3</sup>
	<i>WSystem</i>	Gesamtes Wasservolumen innerhalb der Fläche des <i>DTMs</i> in m <sup>3</sup> am jeweiligen Tag
	<i>DiffInOut</i>	Differenz aus <i>WSystemIn</i> und <i>WSystemOut</i> am jeweiligen Tag
	<i>WCache</i>	Summe des Wasservolumens des <i>NCache</i> in m <sup>3</sup> am Ende des Simulationstages
	<i>WSystemWithd</i>	Wassermenge in m <sup>3</sup> die dem Abflussvolumen des Flusseinzugsgebietes je Tag entnommen wird
<b>Monitoring_</b> <b>monthWUseRivBasin.txt</b>	<b>Datenabkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
	<i>Jahr</i>	Jeweiliges Datenjahr (Simulationsjahr)
	<i>Monat</i>	Jeweiliger Datenmonat des Simulationsjahres
	<i>RivBasinRDMonth</i>	Gesamtes vertikales Zuflussvolumen in das Flusseinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Monat
	<i>RivMonthOut</i>	Abflussvolumen (Flussausgangsrasterzelle) aus dem Flusseinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Monat
	<i>RivBasWUseMonth</i>	Summe der eigentlich vorgesehenen Wasserentnahmen innerhalb des Flusseinzugsgebietes in m <sup>3</sup> für den jeweiligen Datenmonat
	<i>RivBasResWUseMonth</i>	Summe der tatsächlich vorgenommenen Wasserentnahmen innerhalb des Flusseinzugsgebietes in m <sup>3</sup> für den jeweiligen Datenmonat
	<i>RivBasRemWUseMonth</i>	Summe der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen innerhalb des Flusseinzugsgebietes in m <sup>3</sup> für den jeweiligen Datenmonat
	<i>RivBasinRMonth</i>	Vertikale <i>Surface-Runoff</i> -Zuflüsse in das Flusseinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Monat
<i>RivBasinDMonth</i>	Vertikale <i>Drainage</i> -Zuflüsse in das Flusseinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Monat	
<b>TestRoutine1.txt</b>	<b>Datenabkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
	<i>Jahr</i>	Jeweiliges Datenjahr (Simulationsjahr)
	<i>Monat</i>	Jeweiliger Datenmonat des Simulationsjahres
	<i>pRivBasOutMonth</i>	Abflussvolumen aus dem Teileinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Monat
	<i>pRivBasRDMonth</i>	Vertikales Zuflussvolumen in das Teileinzugsgebiet in m <sup>3</sup> je Monat
	<i>pRivBasWUseMonth</i>	Summe der eigentlich vorgesehenen Wasserentnahmen innerhalb des Teileinzugsgebietes in m <sup>3</sup> für den jeweiligen Datenmonat.
	<i>pRivBasResWUseMonth</i>	Summe der tatsächlich vorgenommenen Wasserentnahmen innerhalb des Teileinzugsgebietes in m <sup>3</sup> für den jeweiligen Datenmonat
	<i>pRivBasRemWUseMonth</i>	Summe der nicht berücksichtigten Wasserentnahmen innerhalb des Teileinzugsgebietes in m <sup>3</sup> für den jeweiligen Datenmonat

## Danksagung

An erster Stelle habe ich den Betreuern meiner Arbeit zu danken. Sie waren es, die im Rahmen vieler Treffen des Advisory Panels und in zahlreichen bilateralen Gesprächen zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Jürgen Scheffran dafür, dass er bereit war, diese Arbeit als Erstgutachter zu betreuen, mich im Verlauf meiner Promotion immer unterstützt hat und mir fortwährend mit hilfreichen Hinweisen und konstruktiver Kritik zur Seite stand.

Großer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Götz Neuneck, zum einen, weil dieses Projekt ohne ihn nicht möglich gewesen wäre und er mir für die Arbeit an meiner Promotion – neben all den anderen IFAR-Projekten – stets genügend Zeit eingeräumt hat. Zum anderen möchte ich ihm für die gute Zusammenarbeit der letzten Jahre danken, die vielen Gespräche und Ratschläge sowie für die immer verlässliche und tatkräftige Unterstützung meines wissenschaftlichen Werdeganges.

Dr. Stefan Hagemann war für mich eine unentbehrliche Hilfe in allen meteorologischen und hydrologischen Fragen. Ihm verdanke ich viele Anregungen, fachliche Diskussionen und auch so manch erhellenden Moment.

Zu danken habe ich auch Dr. Olaf Conrad (Geographie, Uni Hamburg) für die großartige Unterstützung bei allen Fragen zu SAGA GIS, Dr. Tobias Stacke (MPI-M) für die stets prompte Beantwortung meiner zahlreichen Fragen und Dr. Martina Flörke (Uni Kassel) für die Bereitstellung der WaterGAP Daten.

Des Weiteren danke ich allen MitarbeiterInnen des IFSH – insbesondere dem Wissenschaftlichen Direktor Herrn Prof. Dr. Michael Brzoska, der Verwaltung (Britta Fisch und Jutta Stropahl), Frau Susanne Bund und der EDV (Carsten Walter, Max Paul) – für die Hilfe und Unterstützung sowie das gute Arbeitsklima in den letzten Jahren.

Im Verlauf meiner Promotion waren meine Freunde eine große Stütze und oftmals auch willkommene Ablenkung: Anne, Malte & Antonia, Torben, Kasia, Mark, Christian, Markus, Steff, Niklas, Hans Christian, der Stammtisch1516 und all diejenigen, die darüber hinaus hier genannt werden müssten... Danke Euch!

Mein ganz besonderer Dank gilt abschließend aber meiner Familie. Meine Eltern und meine Schwester waren in allen Lebenslagen stets ein großer Rückhalt. Ohne ihre Unterstützung, ihre hilfreichen Ratschläge und Aufmunterungen wäre dies alles nicht möglich gewesen.



## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Hamburg, den 4. Februar 2015

Christian Alwardt