



Diplomarbeit

Klimabedingte Veränderungen der Fließwasserdynamik von
ausgewählten deutschen Flusslandschaften und die
naturschutzfachliche Bedeutung

Von
Stefanie Prange

Betreuer
Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig (Hochschule Neubrandenburg)
Dr. Katrin Vohland (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung)

Datum: 5. Februar 2009

urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2008 - 0274 - 4



Kurzfassung

Auswirkungen des Klimawandels gibt es in vielen verschiedenen Bereichen (z. B. Nahrungsmittel, Gesundheit), so auch bei Fließgewässern. Änderungen der Fließwasserdynamik auf Grund von Niederschlags- und Temperaturänderungen können erhebliche Einflüsse auf die dort herrschende Ökologie nach sich ziehen. Um das Ausmaß der Veränderungen abschätzen zu können, wurden Zukunftssimulationen für ausgewählte deutsche Flusslandschaften, die sich in bzw. in der Nähe von FFH-Gebieten (FFH – Fauna Flora Habitat) befinden, durchgeführt. Hierfür wurde im Vorfeld eine Klassifizierung deutscher Flüsse vorgenommen. Die Simulationen wurden mit dem zeitlich kontinuierlich arbeitenden Modell SWIM (Soil and Water Intergrated Model) durchgeführt. SWIM ist ein räumlich gegliedertes Einzugsgebietmodell auf der regionalen Skala und ermöglicht die Analyse und Modellierung der Einflüsse von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf Hydrologie und Wasserqualität. Das für die Simulationen verwendete Klimaszenario beruht auf dem A1B SRES-Szenario des Weltklimarates. Die Simulationen haben ergeben, dass sich der Durchfluss in Zukunft, speziell im Sommer, verringern wird und ein höheres Risiko für Niedrigwasser besteht. Durch die mit den Änderungen verbundenen Schwankungen des Sauerstoffgehalts, der Wassertemperatur und der Fließgeschwindigkeit sind die im Gewässer lebenden Arten erheblich beeinflusst, unter anderem auch Arten, die laut Anhang II der FFH-Richtlinie gefährdet und damit zu schützen sind. Aber auch die Uferbereiche (Auenlandschaften), die einen dynamischen und artenreichen Lebensraum bilden, sind betroffen, da der Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser gefährdet ist. Mit speziell entwickelten Werkzeugen, Methoden und Maßnahmen können diese Auswirkungen des Klimawandels jedoch vermindert oder vermieden werden.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei Dr. Katrin Vohland des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) und Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig der Hochschule Neubrandenburg für die Betreuung dieser Diplomarbeit. Des Weiteren soll ihnen für viele Anregungen und Unterstützung gedankt sein, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besondere Dank gilt auch Dr. Fred Hattermann und Tobias Conradt, die mich während der Anfertigung der Diplomarbeit jederzeit fachlich unterstützt haben. Außerdem danke ich den anderen Mitarbeitern des PIK, zu denen unter anderem Marlies Gumpenberger, Martin Mathaj und Oliva Roithmeier gehören, die mir eine Arbeit in einer freundlichen Atmosphäre ermöglichten.

Über allem stehen natürlich meine Eltern Kersten und Georg Breitzke sowie mein Mann Daniel Prange, ohne die dieses Studium nie möglich gewesen wäre. Durch ihre moralische und finanzielle Unterstützung ermöglichten sie mir $4 \frac{1}{2}$ schöne Studienjahre. Großer Dank gebührt meinem Mann auch, da er stets ein offenes Ohr für mich hatte.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Potsdam, 09. Februar 2009

Stefanie Prange

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Vorbemerkung	1
1.2 Aufgabenstellung	3
1.2.1 Beschreibung	3
1.2.2 Ziel der Arbeit	3
1.2.3 Unterteilung in Feinziele	3
1.3 Trendanalyse	4
2 Klimawandel	5
2.1 Allgemeines zum Klimawandel	5
2.2 Klimawandel und seine Auswirkungen auf Fließgewässer	8
2.2.1 Temperatur- und Niederschlagsveränderungen	8
2.2.2 Einfluss von Temperaturveränderungen	8
2.2.3 Einfluss von Niederschlagsveränderungen	8
2.2.4 Änderungen des Durchflusses	9
2.3 Annahmen und vermutete Ergebnisse	10
3 Rahmenbedingungen für die Modellierung	11
3.1 Einteilung der Flüsse	11
3.2 Untersuchungsgebiete	17
3.2.1 Auswahl der Fließgewässer	17
3.2.2 Beschreibung der ausgewählten Gebiete und deren naturschutzfachliche Bedeutung	19
3.2.2.1 Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch	19
3.2.2.2 Hamel – Hamel und Nebenbäche	19
3.2.2.3 Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach	20
3.2.2.4 Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal	20
3.2.2.5 Bära – Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron	20
3.3 Auswahl der Werkzeuge	21
3.3.1 SWIM	21
3.3.2 ArcGIS	21
3.3.3 GRASS	21
3.3.4 Excel	21
4 Datenmaterial und Modellierung	22
4.1 Das Modell	22
4.2 Datenmaterial	24
4.2.1 Landnutzung	24
4.2.2 Höhenmodell	25
4.2.3 Bodentypen	25
4.2.4 Subbasin-Karte	25
4.2.5 Gewässernetz	25

4.2.6	Daten von FFH-Gebieten	25
4.2.7	Klimastationen und Klimadaten	25
4.2.8	Pegelstationen und Pegeldaten	26
4.3	Umsetzung	26
5	Modellvalidierung	33
6	Ergebnisse der Simulationen	37
6.1	Änderungen der Wasserodynamik	37
6.1.1	Veränderungen des Durchflusses	37
6.1.1.1	Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch	37
6.1.1.2	Hamel – Hamel und Nebenbäche	41
6.1.1.3	Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach	44
6.1.1.4	Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal	47
6.1.1.5	Bära – Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron	50
6.1.2	Schwellwerte	53
6.1.2.1	Berechnung der Schwellwerte	53
6.1.2.2	Häufigkeiten der Hoch- und Niedrigwasser	54
6.1.3	Zusammenfassung	55
6.2	Deutung	57
6.3	Vergleich mit den vermuteten Ergebnissen	63
6.4	Schlussfolgerungen	63
7	Zusammenfassung und Ausblick	66
	Quellenverzeichnis	70
	Anhang I: Kreisläufe in SWIM	76
	Anhang II: Kalibrierung der Untersuchungsgebiete	79
	Anhang III: Schwellwertdiagramme	82
	Anhang IV: Pardé-Koeffizienten der Untersuchungsgebiete	85
	Anhang V: Karten der ausgewählten Gebiete	88
	Anhang VI: Manual: Aufbau eines SWIM-Modells	91

Abbildungsverzeichnis

1	Veränderungen der Flussdynamik	2
2	Globale Oberflächenerwärmung	5
3	Niederschlagsveränderungen (SRES A1B): Winter (links), Sommer (rechts)	7
4	Beispiele für Durchflussänderungen (blau: 2071-2100; schwarz: 1961-1990)	9
5	Hierarchie der Neuseeländischen Flussklassifizierung REC	12
6	Histogramm: Hangneigungen der Flüsse in Deutschland	15
7	Höhenlage und Hangneigungen der Flüsse	15
8	Niederschlag- und Temperaturtrend im Zeitraum 1951–2003	16
9	Lage der ausgewählten Untersuchungsgebiete	18
10	SWIM-Komponenten und deren Beziehungen	22
11	benötigte Karten für SWIM	27
12	Bearbeitung der Teileinzuggebiete	28
13	Flussdiagramm	32
14	Durchflussunterschiede am Beispiel Mülsenbach	33
15	Verschiedene Landnutzungen für das Gebiet Mülsenbach	34
16	Einfluss von Landnutzung auf den Durchfluss für 1996-2004 im Gebiet Mülsenbach	35
17	Simulation 1971–1980 für den Ketzerbach	36
18	Ketzerbach: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich	37
19	Ketzerbach: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1987–2004)	39
20	Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1987–2004 im Gebiet des Ketzerbaches	39
21	Ketzerbach: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss	40
22	Hamel: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich	41
23	Hamel: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1980–2006)	42
24	Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1980–2006 im Gebiet der Hamel	42
25	Hamel: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss	43
26	Wilde Gera: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich	44
27	Wilde Gera: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1951–2005)	45
28	Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1951–2005 im Gebiet der Wilden Gera	45
29	Wilde Gera: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss	46
30	Mülsenbach: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich	47
31	Mülsenbach: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1995–2006)	48
32	Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1995–2006 im Gebiet des Mülsenbaches	48
33	Mülsenbach: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss	49

34	Bära: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich	50
35	Bära: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1984–2007)	51
36	Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1984–2006 im Gebiet der Bära	51
37	Bära: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss	52
38	Mülzenbach: Anzahl der Risiko behafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser .	54
39	Änderung (Pardé-Koeffizient) zwischen der Referenzperiode und des Szenario-abschnittes 2050–2060 der einzelnen Gebiete	56
40	Elbe: Mittlerer täglicher Abfluss für die Referenzperiode und die hundert Szenarienrealisationen	57
41	Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fischreichtum	60

Tabellenverzeichnis

1	SRES-Szenarien	6
2	Einflussnehmende Faktoren auf Fließgewässer	11
3	WRRL-Kriterien: System A	13
4	Vergleich verschiedener Modelle für die Einteilung von Fließgewässern	14
5	Ausgewählte Gebiete	17
6	Landnutzungsarten in SWIM	24
7	Pegelstationen	26
8	Dateien, die vom SWIM/GRASS Interface erstellt werden	28
9	Parameter für die Kalibrierung	30
10	Formeln für die Schwellwertberechnung	53
11	Schwellwerte der einzelnen Gebiete in m^3/s	54
12	Veränderungen des Durchflusses	55

Abkürzungsverzeichnis

BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BÜK	Bodenübersichtskarte
CLC	CORINE Land Cover
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FFH	Fauna-Flora-Habitat
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
IFAG	Institut für Angewandte Geodäsie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PIK	Potsdam - Institut für Klimafolgenforschung
REC	River Environment Classification
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
STAR	Statistisches Regionalmodell
SWIM	Soil and Water Integrated Model
UBA	Umweltbundesamt
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WWF	World Wide Fund For Nature

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkung

Das Thema Klimawandel ist heute kaum noch aus den Nachrichten und Schlagzeilen der Massenmedien weg zu denken. So ist dort zu sehen bzw. zu lesen, dass die Folgen des Klimawandels und die damit verbundenen Temperatur- und Niederschlagsveränderungen verschiedene Einflüsse auf die unterschiedlichsten Bereiche nach sich ziehen. So ist zum Beispiel der Sektor der Nahrungsmittel betroffen, da die Ernteerträge zurückgehen können. Weiterhin ist die Gesundheit gefährdet, da durch häufiger auftretende Extremereignisse wie Stürme, Hitzewellen und Überschwemmungen auch die Anzahl der Verletzungen und Krankheiten steigt. Außerdem sind Ökosysteme durch den Klimawandel, verbunden mit anderen Faktoren wie Landnutzungsänderungen und Änderungen von Wasserdynamiken, gefährdet, was auch für natürliche zu schützende Lebensräume, in denen eine einzigartige Artenvielfalt (Biodiversität) zu finden ist, gilt.

Viele natürliche Lebensräume verschlechtern bzw. verändern sich scheinbar unaufhörlich, zum einen durch das Einwirken des Menschen und zum anderen auch auf Grund des Klimawandels. Das hat zur Folge, dass die dort lebenden Tier- und Pflanzenarten und die Lebensräume selbst bedroht sind und daher besonderen Schutz bedürfen. Ein länderübergreifendes ökologisches Netzwerk besonderer Schutzgebiete, die „Natura 2000“, umfasst Schutzgebiete, die aus der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie, voller Titel: Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen) und der Vogelschutzrichtlinie resultieren. Sie hat das Ziel, gefährdete Arten und Lebensraumtypen zu schützen.

Im Anhang I der FFH-Richtlinie sind die zu schützenden natürlichen Lebensraumtypen aufgeführt. Für deren Erhaltung müssen besondere Schutzgebiete ausgewiesen werden. Unter anderem gehören zu den zu schützenden Lebensraumtypen „Fließgewässer – Abschnitte von Wasserläufen mit natürlicher bzw. naturnaher Dynamik (kleine, mittlere und große Fließgewässer) deren Wasserqualität keine nennenswerte Beeinträchtigung aufweist“ [FFH-Richtlinie: Anhang I Nr. 32]. Damit Fließgewässer biologisch und auch hydraulisch wirksam sind, benötigen sie eine bestimmte Breite. Die Uferstreifen gehören zwar physikalisch und wasserrechtlich gesehen nicht zum Gewässer selbst, sind jedoch aus geografischer und ökologischer Sicht ein unverzichtbarer Bestandteil [Gerdes T. (2003 S.2)].

Die natürlichen Randbereiche, zu denen auch Auen gehören, haben vielfältige Funktionen und damit einen erheblichen Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt ihrer Umgebung. Zum einen dienen Auen als natürlicher Wasserspeicher. Durch die natürlichen Gegebenheiten der Aue wird das Wasser zurückgehalten und dadurch die Fließgeschwindigkeit gebremst. Das Gewässer kann sich gleichmäßig über die Randbereiche verteilen und stellt somit einen natürlichen Hochwasserschutz für die flussabwärts liegenden Ortschaften dar. Außerdem wird bei einem Hochwasser die Versickerung begünstigt. Das Wasser wird durch unterschiedliche Bodenschichten gefiltert und gereinigt, bevor es in das Grundwasser gelangt. Zum anderen weisen Auenlandschaften spezielle klimatische Besonderheiten auf (vermehrt Nebel, Auftreten lokaler Windsysteme). Viele Arten haben sich an diese besonderen Verhältnisse angepasst und kommen nur hier vor. Veränderungen der Wasserdynamik ziehen auch Veränderungen in diesen einzigartigen Lebensräumen nach sich. Aus diesen Gründen ist es wichtig, den Erhaltungszustand von Fließgewässern zu verbessern [Gerdes T. (2003 S.4f)].

Die Wasserodynamik ist stark vom Klima abhängig. Demzufolge wird es auf Grund des klimatischen Wandels auch Änderungen in der Wasserodynamik geben [European Environment Agency (2008 S.130)]. Es sind jahreszeitliche Veränderungen für die Lufttemperatur und die Niederschlagsmuster zu erwarten [European Environment Agency (2008 S.16)]. Die Sommer werden deutlich heißer und trockener. Auch im Winter sind ansteigende Temperaturen zu erwarten, das heißt, sie werden milder. Jedoch wird hier, im Gegensatz zum Sommer, mehr Niederschlag erwartet [European Environment Agency (2008 S.46ff)]. Demzufolge werden die Sommer länger anhalten und die Winter kürzer werden [European Environment Agency (2008 S.70)]. Die Folgen dieser Veränderungen sind öfter auftretende Extremereignisse, wie Trockenheiten und Überflutungen [European Environment Agency (2008 S.134ff)], sowie Veränderungen in der Hydrologie und Wasserqualität [European Environment Agency (2008 S.141)].

Die klimatischen Veränderungen beeinflussen demnach die Wasserodynamik. Zum einen verändert sich die Saisonalität. Beispielsweise verschieben sich die Flutspitzen im Laufe der Zeit in Richtung Winter. Das heißt, die Flutspitzen treten früher im Jahr auf. Zum anderen gibt es Veränderungen der Fließgeschwindigkeiten, was die Lebenszyklen von Arten in Fließgewässern beeinflusst, da sie zum Beispiel auf bestimmte Strömungsgeschwindigkeiten angewiesen sind. Die Veränderungen der Fließgeschwindigkeit führen des Weiteren zu Sedimentverlagerung/-transport, was Veränderungen des Flussbettes nach sich zieht. Zusätzlich verändert sich die Durchflussmenge des Wassers. Ein vermehrtes oder verringertes Wasseraufkommen kann die Uferbereiche, wie am Beispiel der Auen beschrieben, beeinflussen. Abbildung 1 stellt die Veränderungen der Wasserodynamik dar. Außerdem kann es auf Grund von häufigeren und länger anhaltenden Extremen zum Verlust von Lebensraum kommen, welches eine große Rolle beim Verlust von Biodiversität spielt.

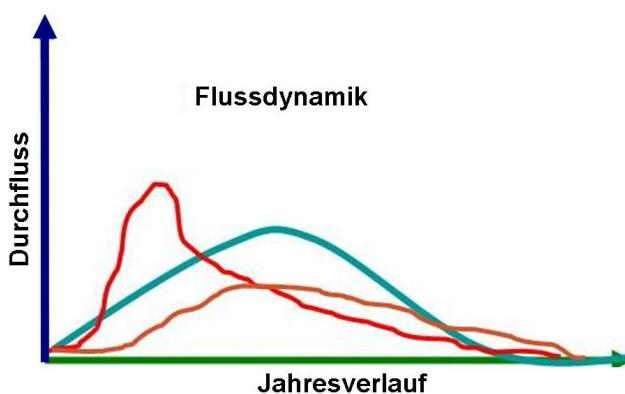


Abbildung 1: Veränderungen der Flussdynamik
(blau - Normalzustand, rot - Verschiebung der Flutspitze und stärkere Durchflussmenge, orange - verringerte Durchflussmenge) (Quelle: Katrin Vohland)

Um die klimabedingten Veränderungen an Fließgewässern so gering wie möglich zu halten, ist es wichtig, sie rechtzeitig zu erkennen und festzustellen, welches Ausmaß sie haben können. So können Maßnahmen zum Schutz der natürlichen Lebensraumtypen und der Biodiversität eingeleitet werden. Damit Aussagen über zukünftige Entwicklungen getroffen werden können, ist es notwendig, die Veränderungen mit Hilfe speziell entwickelter Modelle zu simulieren und zu analysieren.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, klimabedingte Veränderungen der Abflüsse in FFH-Gebieten und die naturschutzfachliche Bedeutung zu ermitteln. Hierfür wird das am PIK (Potsdam - Institut für Klimafolgenforschung) entwickelte Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model) verwendet [Krysanova, et al. (2000)]. Um allgemeine Aussagen über zukünftige Entwicklungen in deutschen FFH-Gebieten mit Fließgewässern treffen zu können, soll eine Trendanalyse an Flüssen ausgewählter FFH-Gebiete erstellt werden. Außerdem soll aufgezeigt werden, welche Schlussfolgerungen sich aus diesen Entwicklungen bezüglich der Flora und Fauna ergeben.

1.2 Aufgabenstellung

1.2.1 Beschreibung

Aus den vorherigen Ausführungen ist folgende Aufgabenstellung abzuleiten: In dieser Arbeit sollen mögliche regionale klimabedingte Auswirkungen auf Flora und Fauna in FFH-Gebieten, die durch Veränderungen der Fließwasserdynamik bedingt sind, aufgezeigt werden. Für die Simulation der Fließwasserdynamik wird das Modell SWIM verwendet. Mit Hilfe von SWIM sollen dann mögliche Trends und Veränderungen der Wasserdynamik ermittelt werden.

1.2.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit soll es sein, allgemeine Aussagen für deutsche Flüsse in oder in der Nähe von FFH-Gebieten zu treffen. Diese Aussagen sollen klimabedingte Veränderungen in der Wasserdynamik aufzeigen, aus denen zukünftige Entwicklungen abgeleitet werden können. So kann dann festgestellt werden, ob die Schutzziele für die FFH-Gebiete gefährdet sind. Beispielsweise können sich Lebensraumtypen so stark verändern, dass ein völlig neuer Lebensraum entsteht, der nicht mehr zu den zu schützenden Lebensraumtypen zählt.

Weiterhin soll festgestellt werden, ob die im Fluss oder an den Uferbereichen lebenden Tier- und Pflanzenarten durch mögliche Veränderungen in der Wasserdynamik beeinträchtigt werden. Hier spielen beispielsweise häufiger auftretende und länger anhaltende Extremereignisse eine Rolle.

1.2.3 Unterteilung in Feinziele

Für die Umsetzung der Aufgabenstellung ist eine Untergliederung in Feinziele erforderlich. Das erste Ziel besteht darin, eine Einteilung von Flüssen entsprechend der Höhenlage und den klimatischen Besonderheiten (Niederschlag) vorzunehmen, um die späteren Ergebnisse auf andere Gebiete übertragen zu können. Nach der Klassifizierung kann dann eine Weiterbearbeitung (Simulation der Durchflüsse) der Flüsse erfolgen.

Der nächste Schritt ist, Trends der Fließwasserdynamik in einem entsprechenden Zeitraum unter Beachtung unterschiedlicher Klimarealisationen zu analysieren. So können mögliche zukünftige Entwicklungen ermittelt werden.

Des Weiteren sollen die Häufigkeiten von Hoch- und Niedrigwasser untersucht werden. So können Aussagen darüber getroffen werden, ob Extreme wie Trockenheiten und Überflutungen zukünftig häufiger oder seltener auftreten.

1.3 Trendanalyse

Um einen möglichen zukünftigen Trend für die Wasserdynamik zu ermitteln, wird diese mit Hilfe eines Klimaszenarios für den Zeitraum 2010-2060 simuliert. Das Klimaszenario enthält hundert Realisierungen, das heißt hundert verschiedene Möglichkeiten, die innerhalb dieses Szenarios auftreten können. Die Ergebnisse der Simulationen werden dann mit vergangenen Daten verglichen. So kann festgestellt werden, ob sich beispielsweise die Saisonalität ändert, indem die Flutspitzen früher auftreten, oder ob sich die Durchflussmenge verändert. Durch Festlegen eines Schwellwertes, welcher die Anzahl von risikobehafteten Tagen für Hoch- bzw. Niedrigwasser kennzeichnet, können Aussagen darüber getroffen werden, ob die Anzahl der risikobehafteten Tage zu- bzw. abnimmt. Das heißt, es kann festgestellt werden, ob Extreme wie Hoch- und Niedrigwasser bzw. Überflutungen und Trockenheiten häufiger auftreten. Anhand dieser Aussagen können dann Schlussfolgerungen für Flora und Fauna getroffen werden.

Nachdem für alle Realisierungen eine Simulation durchgeführt wurde, können die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Auf diese Weise kann anschließend festgestellt werden, ob sich bei allen Simulationen ähnliche Trends abzeichnen oder ob die Entwicklungen in unterschiedliche Richtungen gehen.

2 Klimawandel

2.1 Allgemeines zum Klimawandel

Um den Klimawandel näher betrachten zu können, muss zuerst der Begriff Klima näher erläutert werden. Wichtig ist, dass Klima nicht mit Wetter gleichzusetzen ist. Als Klima wird der mittlere Atmosphärenzustand an einem Ort bezeichnet. Dieser Zustand wird durch physikalische Größen und meteorologische Erscheinungen (Durchschnittstemperaturen, Niederschlagssummen, mittlere Sonneneinstrahlung und Windrichtungen), die über einen längeren Zeitraum beobachtet werden, beschrieben. Das Wetter hingegen gibt den momentanen Atmosphärenzustand innerhalb einer Stunde bzw. an einem Tag an [Ludwig (2007 S.10f)].

Der Klimawandel bezieht sich auf die Veränderungen des Klimas, welche direkt oder indirekt auf das Wirken des Menschen zurückzuführen sind. Die Eigenschaften des Erdklimas werden über einen längeren Zeitraum beobachtet und untersucht, um so Rückschlüsse ziehen zu können [IPCC (2007 S.30)]. Der Klimawandel wird auf den Treibhauseffekt der Erde zurückgeführt, der durch den Menschen verursacht wurde. Veränderungen wird es bei Temperatur- und Niederschlagsmustern sowie beim Meeresspiegel geben.

Da der Klimawandel unterschiedliche Ausmaße annehmen kann, wurden verschiedene SRES-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios) entwickelt. Diese Szenarien berücksichtigen die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert. Hier werden Faktoren wie das Bevölkerungswachstum, ökonomische und soziale Entwicklungen, technologische Veränderungen, Ressourcenverbrauch und Umweltmanagement näher betrachtet. Die verschiedenen Szenarien werden in vier Hauptgruppen unterteilt und sind in Tabelle 1 kurz erläutert [IPCC (2007 S.44)].

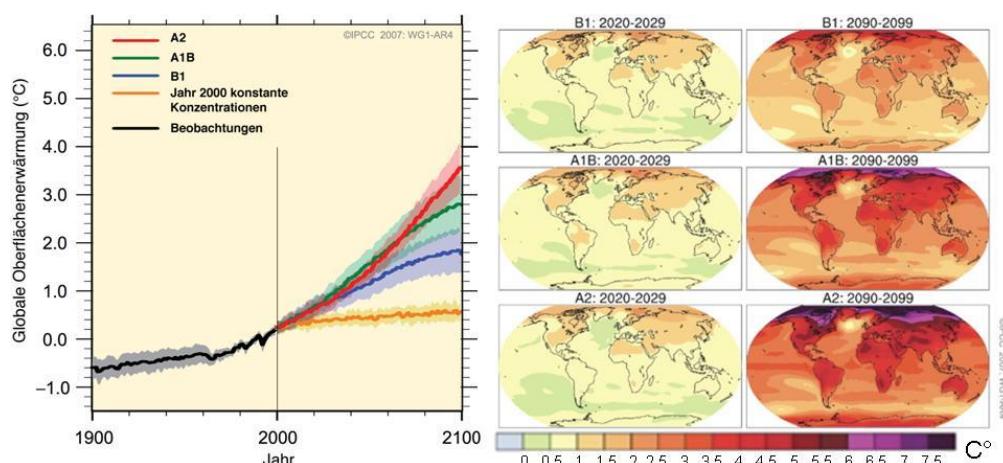


Abbildung 2: Globale Oberflächenerwärmung
(Quelle: IPCC (2007 S.46))

In Abbildung 2 ist zu sehen, wie sich die globale Oberflächentemperatur unter der Berücksichtigung von verschiedenen Szenarien entwickelt. Hier ist zu erkennen, dass es in jedem Fall einen Anstieg der Temperaturen geben wird. Der Temperaturanstieg befindet sich durchschnittlich, je nach Szenario, zwischen 1,5 und 4,5°C. Rechts in Abbildung 2 ist zu erkennen, dass es in einzelnen Gebieten, speziell im Norden, einen deutlich stärkeren Temperaturanstieg

geben kann als der Durchschnitt angibt. Beim A1B und A2 Szenario kommt es hier beispielsweise zu einem Anstieg um bis zu 8°C. Das Ausmaß der globalen Oberflächenerwärmung ist, nach den SRES-Szenarien, abhängig von der Entwicklung unserer Gesellschaft, was bedeutet, dass auf die zukünftige Entwicklung des Klimas Einfluss genommen werden kann.

SRES Erläuterung

A1	Bei diesen Szenarien wird von einem starken Wirtschaftswachstum ausgegangen. Die Weltbevölkerung erreicht Mitte des 21. Jahrhunderts ihr Maximum und nimmt danach wieder ab. Außerdem wird von einer schnellen Einführung neuer und effizienter Technologien ausgegangen. Es wird berücksichtigt, dass sich regionale Unterschiede bei Einkommen weitgehend angleichen. Die A1-Szenarien werden in drei weitere Untergruppen eingeteilt: A1Fl – Nutzung fossiler Brennstoffe, A1T – Nutzung nicht-fossiler Energieträger, A1B – fossile und nicht-fossile Energieträger in einer ausgewogenen Mischung.
A2	Bei diesen Szenarien wird von einer sehr heterogenen Welt ausgegangen. Hier bleiben lokale Besonderheiten bestehen. Die Geburtenrate ist weiterhin regional sehr unterschiedlich. Daher wächst die Weltbevölkerung zunehmend weiter. Es gibt eine primär regionale ökonomische Entwicklung. Im Gegensatz zu den anderen Hauptgruppen sind das Wachstum des Bruttonsozialproduktes und die technologische Entwicklung regional unterschiedlicher und auch langsamer.
B1	Diese Szenarien sind den A1-Szenarien ähnlich, da sie auch global orientiert sind. Hier gibt es einen schnelleren Wandel der wirtschaftlichen Struktur. Der Materialverbrauch wird verringert und es werden Ressourcen schonende Technologien eingesetzt. Die Entwicklung ist auf eine ausgewogene Wohlstandsverteilung und eine globale Lösung des Nachhaltigkeitsproblems ausgerichtet.
B2	Hier stehen lokale Lösungen der wirtschaftlichen, sozialen und umweltorientierten Nachhaltigkeitsfragen im Vordergrund. Es kommt zu einem ständigen Wachstum der Weltbevölkerung, jedoch nicht in dem Maße wie bei den A2-Szenarien. Die wirtschaftliche Entwicklung bewegt sich auf einem mittleren Niveau. Anders als bei den A1- und B1-Szenarien ist hier der technologische Wandel weniger schnell und regional unterschiedlicher. Die Wohlstandsverteilung und der Umweltschutz spielen auf lokaler und regionaler Ebene eine Rolle.

Tabelle 1: SRES-Szenarien
(Quelle: IPCC (2000 S.4f))

In Abbildung 3 sind erwartete Niederschlagsveränderungen (SRES A1B) für den Zeitabschnitt 2080–2099 relativ zu 1980–1999 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es je nach Region unterschiedliche Veränderungen geben wird. In den jetzt schon trockenen Gebieten, wie dem Mittelmeerraum oder Teilen Afrikas, wird die Trockenheit weiter zunehmen. In den höheren Breiten und den Tropen hingegen wird mehr Niederschlag fallen. Hierbei ist zu sagen, dass die simulierten Klimaszenarien vom verwendeten Klimamodell abhängig sind. Es gibt viele verschiedene Klimamodelle, die auf unterschiedlichen Methoden und Ansätzen beruhen. Aus diesem Grund unterscheiden sich simulierte Klimaszenarien von verschiedenen Modellen teilweise erheblich [Orlowsky (2007 S.1ff)].

Neben den Temperatur- und Niederschlagsveränderungen ist, laut dem Bericht des IPCC von 2007, bis zum Jahr 2095 auch mit einem Anstieg des Meeresspiegels von 18–59 cm zu rechnen [IPCC (2007 S.45)]. Da das Abschmelzen des Kontinentaleises nicht genau genug abgeschätzt werden kann, wird dieses nicht im IPCC-Bericht berücksichtigt. Es wird befürchtet, dass dieses Eis sehr schnell verschwinden könnte, da sich Schmelzwasser zwischen Boden und Eis ansammeln kann. Das würde dazu führen, dass die Eisflächen ins Meer abrutschen. Das Abtauen der Eisfläche von Grönland würde zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 7 Meter führen [IPCC (2007 S.65)].

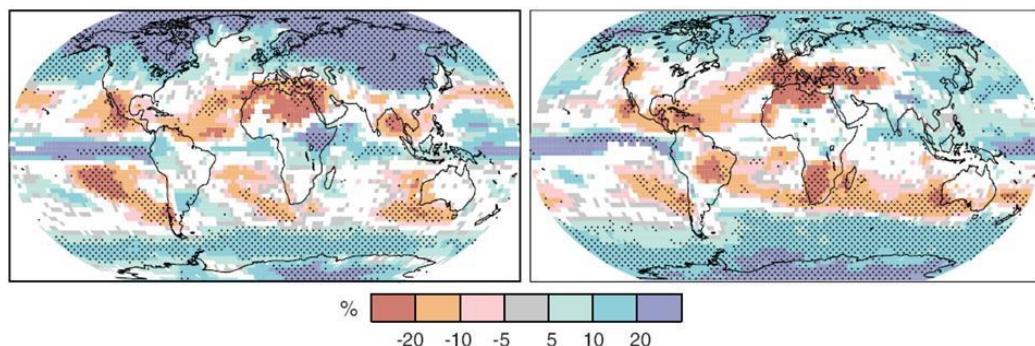


Abbildung 3: Niederschlagsveränderungen (SRES A1B): Winter (links), Sommer (rechts)
(Quelle: IPCC (2007 S.47))

Wissenschaftler erwarten für das 21. Jahrhundert weitreichende Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Erdsysteme beziehungsweise auf Sektoren, die für den Menschen und die Umwelt relevant sind.

Im Bereich Wasser werden, nach dem 4. Bericht des IPCC von 2007, Abfluss und Verfügbarkeit in einigen tropischen Feuchtregionen und in höheren Breiten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zunehmen. In tropischen Trockengebieten und mittleren Breiten hingegen wird eine Verstärkung der Wasserknappheit erwartet. Die gespeicherten Wassermengen in Gletschern und Schneedecken werden abnehmen. Auch die Wasserverfügbarkeit wird abnehmen, besonders in stark besiedelten Gebieten [IPCC (2007 S.48)].

Im Bereich der Ökosysteme wird deren Widerstandsfähigkeit mit einer hohen Wahrscheinlichkeit stark überschritten, da sie durch die Kombination von Klimaänderungen und andern Faktoren des globalen Wandels (z. B. Landnutzungsänderungen) stark beansprucht werden. Die negativen Folgen für Wasser und Nahrungsmittel können dazu führen, dass 20–30 % der Tier- und Pflanzenarten vom Aussterben bedroht sind [Umweltbundesamt (2007 S.3)].

Im Sektor Nahrungsmittel wird es laut IPCC-Bericht Veränderungen in den Ernteerträgen geben. In höheren Breiten wird es zu einem Anstieg der Ernteerträge kommen, solange Temperaturerhöhungen von 1–3°C nicht überschritten werden. Wird diese Grenze doch überschritten, gehen die Erträge wieder zurück. In niederen Breiten gehen die Ernteerträge bereits bei kleinen Temperaturerhöhungen zurück [IPCC (2007 S.48)].

Auch der Bereich Gesundheit ist betroffen. Mangelnde Ernährung hat negative Auswirkungen, besonders auf die Entwicklung von Kindern. Auf Grund von häufiger auftretenden Stürmen, Überschwemmungen und Hitzewellen und den damit verbundenen Dürren und Bränden wird

im Allgemeinen mit deutlich mehr Verletzungen, Krankheiten und Todesfällen gerechnet [Umweltbundesamt (2007 S.3)].

Am stärksten betroffen sind Industrien, Siedlungen und Gesellschaften, die sich in Küstenregionen und Flusschwemmgaben befinden, da ihre Ökonomien mit klimasensitiven Ressourcen verbunden sind [Umweltbundesamt (2007 S.3)].

2.2 Klimawandel und seine Auswirkungen auf Fließgewässer

2.2.1 Temperatur- und Niederschlagsveränderungen

Der Klimawandel und die damit verbundenen Temperatur- und Niederschlagsänderungen nehmen Einfluss auf die Struktur des Gewässers und deren Funktionalität. Das Ausmaß des Einflusses richtet sich nach der Stärke der Klimaveränderungen. Veränderungen der Temperatur- bzw. Niederschlagsmuster ziehen unterschiedliche Folgen nach sich, die im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden.

2.2.2 Einfluss von Temperaturveränderungen

Die wichtigste Wärmequelle für Fließgewässer ist die direkte Sonneneinstrahlung. Die Intensität der Erwärmung des Wassers ist von der Wassertiefe, dem Austausch mit dem Grundwasser und der Beschattung abhängig [Zimmermann, et al. (2008 S.296)]. Eine Temperaturerhöhung würde zu erheblichen Veränderungen führen. Beispielsweise werden Lebenszyklen der dort lebenden Art durch solche Änderungen beeinflusst bzw. gestört. Zum Beispiel laichen einige Fischarten erst dann, wenn die Wassertemperaturen einen bestimmten Wert erreichen [Petersen, et al. (2004 S.205ff)]. Das führt zu einer Gefährdung oder sogar zum Sterben dieser Arten. Die Folge davon ist, dass sich die Zusammensetzung der Arten verändert. Diese wird jedoch noch durch einen weiteren Punkt beeinflusst. Durch die Temperaturerhöhung wird das Einwandern von Arten aus wärmeren Regionen begünstigt. Das zieht eine Veränderung des Nahrungsgefüges nach sich [Zimmermann, et al. (2008 S.296f)].

Darüber hinaus werden Organismen mit zunehmender Temperatur aktiver, was zu einem höheren Verbrauch von Sauerstoff führt. Außerdem verringert sich die Löslichkeit von Sauerstoff bei zunehmenden Temperaturen. Aus diesen Gründen kommt es besonders in Warmwasserperioden zu Sauerstoffdefiziten [Zimmermann, et al. (2008 S.296)]. Das wirkt sich ebenfalls nachteilig auf die im Wasserkörper lebenden Arten aus.

Wie bereits im Vorfeld beschrieben wurde, haben Temperaturveränderungen einen erheblichen Einfluss auf den jahreszeitlichen Verlauf, was besonders im Sommer bzw. Winter zu bemerken ist.

2.2.3 Einfluss von Niederschlagsveränderungen

Hochwasser

Die Zunahme der Niederschläge im Winter verursacht einen Anstieg der Jahresabflüsse. Im Frühjahr hingegen wird auf Grund der steigenden Temperaturen mit einer stärkeren und früher auftretenden Schneeschmelze gerechnet. Das kann zu erhöhtem Hochwasserrisiko in den Frühlingsmonaten führen. Dieses Risiko wird verstärkt, wenn die Schneeschmelze zusammen mit Niederschlagsereignissen auftritt. Hochwasser haben nicht nur schwerwiegende Folgen für das Gewässer, sondern auch für die angrenzenden Lebensräume, da die dort lebenden

Arten weggespült bzw. entfernt werden. Eine Regenerierung nimmt teilweise sehr viel Zeit in Anspruch. Nach einem Hochwasser bleiben viele kleine Gewässer zurück, welche von Arten als Lebensraum genutzt werden können. Mit ansteigenden Temperaturen stellen diese Habitate ein Gesundheitsrisiko dar, da sie beispielsweise Brutstätten für Mücken sind, die Krankheiten wie Malaria übertragen können [Zimmermann, et al. (2008 S.297)].

Niedrigwasser

Da in den Sommermonaten mit immer mehr niederschlagsfreien Zeiträumen gerechnet werden muss, steigt das Risiko für Niedrigwasser und Trockenheiten. Das hat zur Folge, dass sich der Wasserlebensraum durch austrocknende Flächen am Uferbereich verkleinert, was zum Verlust von Lebensraum führt [Koop, et al. (2005 S.79f)]. Die ausgetrockneten Flächen bieten jedoch wertvolle Brutstandorte für einige Vogelarten und Lebensräume für wirbellose Fauna [Koop, et al. (2005 S.84)]. Außerdem kann lang anhaltendes oder dauerhaftes Niedrigwasser den Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser in Auen gefährden. Damit sind diese dynamischen Lebensräume, die eine einzigartige Artenvielfalt bieten, bedroht [UFZ (ohne Jahr, S.110)].

2.2.4 Änderungen des Durchflusses

Bereits in der Vergangenheit waren Veränderungen im Abfluss weltweit zu beobachten. Diese Veränderungen wurden im Zusammenhang mit Änderungen von Niederschlagsmustern und Temperaturen beobachtet. Beispielsweise gab es in Schweden über das 20. Jahrhundert hinweg einen Anstieg des Durchflusses von 5 % [European Environment Agency (2008 S.131)].

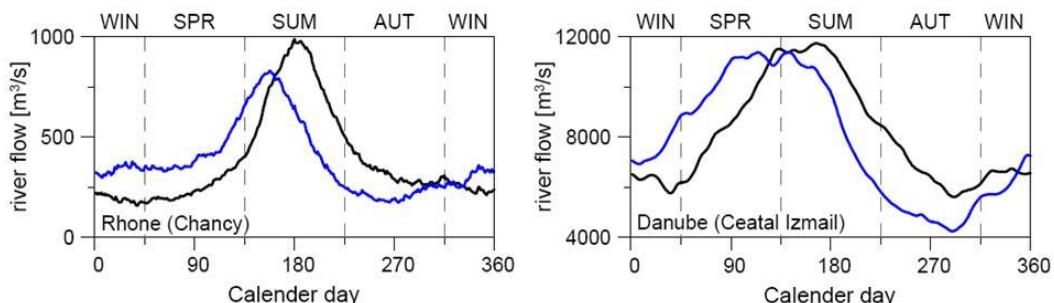


Abbildung 4: Beispiele für Durchflussänderungen (blau: 2071-2100; schwarz: 1961-1990)
(Quelle: European Environment Agency (2008 S.133))

Modelle und Untersuchungen, die sich ebenfalls mit Veränderungen der Wasserdynamik beschäftigten zeigen, dass viele Flüsse von Veränderungen betroffen sind. In Abbildung 4 sind Durchflussänderungen am Beispiel der Rhône und der Donau zu sehen. Hier ist eine Änderung der Durchflussmenge deutlich erkennbar. Die zukünftigen Entwicklungen gehen hier in Richtung feuchtere Winter und trockenere Sommer. Des Weiteren ist hier gut die Veränderung der Saisonalität zu erkennen. Die Flutspitzen verschieben sich in Richtung Jahresanfang.

Aus diesen Punkten lässt sich herleiten, welche Ergebnisse für die in dieser Arbeit untersuchten Gebiete erwartet werden können. Diese Annahmen werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

2.3 Annahmen und vermutete Ergebnisse

In allen Gebieten werden ähnliche, aber auf Grund der verschiedenen Höhenlagen unterschiedliche klimawandelbedingte Veränderungen erwartet. In den Alpen gab es im 20. Jahrhundert bereits einen Anstieg der Durchschnittstemperatur um 1,8°C. In den nächsten Jahren wird ein weiterer Anstieg erwartet [Niedermaier, et al. (ohne Jahr S. 5f)]. Das führt zum Schrumpfen und Abschmelzen von Gletschern [Niedermaier, et al. (ohne Jahr S. 15f)]. Des Weiteren wird es zu weniger Schneefall aber einer höheren Verdunstung kommen [European Environment Agency (2008 S.12 und S.130)]. Die Niederschläge werden im Winter stark zunehmen und im Sommer stark abnehmen [Niedermaier, et al. (ohne Jahr S. 7f)]. Das führt zu einem Absinken des Grundwassers [Hattermann, et al. (2007 ohne Seite)].

Das alles kann im Alpengebiet zu erheblichen Veränderungen der Wasserdynamik führen. Es wird hier ein stark sinkender Durchfluss bis hin zur Austrocknung als Ergebnis erwartet. Langfristig kann sich das Risiko für Niedrigwasser und länger andauernde Austrocknung durch die Abnahme des Schmelzwassers der Gletscher verschärfen. Aufgrund von kürzer werdenden Wintern und länger werdenden Sommern wird eine Änderung der Saisonalität erwartet. Es wird damit gerechnet, dass sich die Flutspitzen in Richtung Anfang des Jahres verschieben. Durch die höheren Temperaturen findet eine schnellere Schnee- und Gletscherschmelze statt, was eine höhere Flutspitze im Frühjahr erwarten lässt, die wiederum zu Hochwasser führen kann [Niedermaier, et al. (ohne Jahr S.13f)].

Für die Gebiete im Mittelgebirge werden ähnliche Veränderungen wie in den alpinen Gebieten erwartet, jedoch auf Grund der Höhenlage nicht in einem so starken Ausmaß. Das heißt auch hier kann es zu einem Rückgang des Durchflusses mit steigendem Niedrigwasser-Risiko kommen. Außerdem wird hier mit einer leichten Veränderung der Saisonalität gerechnet.

Auch im Tiefland kommt es zu höheren Temperaturen und einer damit verbundenen stärkeren Verdunstung. In Verbindung mit weniger Niederschlag kommt es auch hier zu einem Absinken des Grundwasserspiegels. Des Weiteren gibt es hier keine natürlichen Wasserspender in Form von Schnee oder Eis. Aus diesen Gründen wird ein ganzjährig sinkender Durchfluss erwartet. In den Tieflandgebieten wird auch, wie bei den anderen Gebieten, mit einer Veränderung der Saisonalität gerechnet.

3 Rahmenbedingungen für die Modellierung

3.1 Einteilung der Flüsse

Um Untersuchungsgebiete für die Modellierung auswählen zu können, muss zu Beginn der Betrachtung eine Einteilung der Flüsse vorgenommen werden. Es gibt verschiedene Faktoren, die die Fließgewässer auf verschiedene Weise beeinflussen. Zu den am häufigsten für Modelle verwendeten Faktoren gehören unter anderem Klima, Topografie, Geologie, Landnutzung und Geländeformen. In der folgenden Tabelle 2 ist ein Überblick dieser Faktoren und der Einflüsse auf Fließgewässer dargestellt.

Faktor	abhängige Prozesse/Faktoren	Einfluss auf Fließgewässer
Klima	Das Klima bestimmt unter anderem Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und die Mengen an Verdunstung und Niederschlag in einem Gebiet	Durch das Klima wird die Saisonalität des Abflusses, die Häufigkeit von Hoch- bzw. Niedrigwassern und die Wassertemperatur, mit der auch die Wasserqualität zusammenhängt, beeinflusst.
Topografie (Höhenlage)	Von der Topografie wird bestimmt, wie Niederschlag gespeichert wird (Schnee, Gletscher, Seen). Auch das Auftreten von Erosion und Sedimenttransport ist von ihr abhängig.	Auch hier werden die Saisonalität der Abflüsse und das Auftreten von Hochwassern beeinflusst. Des Weiteren ist das Ausmaß von Erosion und Sedimenttransport unter anderem auch von der Topografie abhängig.
Geologie	Hier laufen hydrologische Prozesse ab, beispielsweise Grundwasserspeicherung/-verlust. Außerdem werden hier Erosionsraten und chemische Verwitterung bedingt.	Die Geologie beeinflusst das Ausmaß von Niedrigwassern, den Sedimenttransport sowie die Chemie des Wassers (Nährstoffstatus, pH-Wert, gelöste und frei schwebende organische Substanzen).
Landnutzung	Zu den Prozessen, die von der Landnutzung abhängig sind, gehören die Oberflächenerosion des Bodens. Die Menge des vom Boden abfließenden Wassers ergibt sich aus dem Regen und dem Oberflächenabfluss mit den darin enthaltenen Nährstoffen und Sedimenten.	Die Landnutzung beeinflusst die Häufigkeit und die Dauer von Niedrig- bzw. Hochwassern. Auch die chemische Zusammensetzung, bezogen auf Nährstoffe und organische Substanzen, des Wassers ist auf die Landnutzung zurück zu führen
Geländeform (Hangneigung)	Hier werden lokale hydraulische Prozesse wie Erosion und Ablagerung gesteuert.	Die Geländeform prägt die Form des Flussbettes und beeinflusst so unter anderem die Wassertiefe und die Geschwindigkeit des Wassers. Es beeinflusst weiterhin die Stärke von Fluten sowie die Bedingungen der Uferbereiche.

Tabelle 2: Einflussnehmende Faktoren auf Fließgewässer

(Quelle: Snelder T., Biggs B., Weatherhead M. (2004 S.15))

Diese Faktoren können auf verschiedene Weise in Zusammenhang gebracht werden. In dem Neuseeländischen Modell River Environment Classification (REC) von Snelder, Biggs und Weatherhead wurde eine vollständig hierarchische Klassifizierung von Fließgewässern entwickelt. Die Faktoren, die Einfluss auf große Gebiete haben, stehen in der Rangordnung ganz oben, während Faktoren, die nur einen lokalen Einfluss haben, weiter unten in der Hierarchie stehen [Snelder, et al. (2004 S.8f)]. Dies ist in der folgenden Abbildung 5 noch einmal verdeutlicht. Sinnvoll ist es jedoch, auch die Beziehungen zwischen den einzelnen Faktoren zu betrachten. Dies ist beispielsweise auch an einem Modell des französischen oberen Rheins angewendet worden. Hier wurden quantitative Variablen, die Einfluss auf das Fließgewässer haben, zu Gruppen zusammengefasst. Diese Gruppen wurden dann hierarchisch angeordnet. Die Faktoren innerhalb einer Gruppe wurden über statistische Auswertungen in Zusammenhang gebracht [Schmitt, et al. (2007 S.1729ff)].

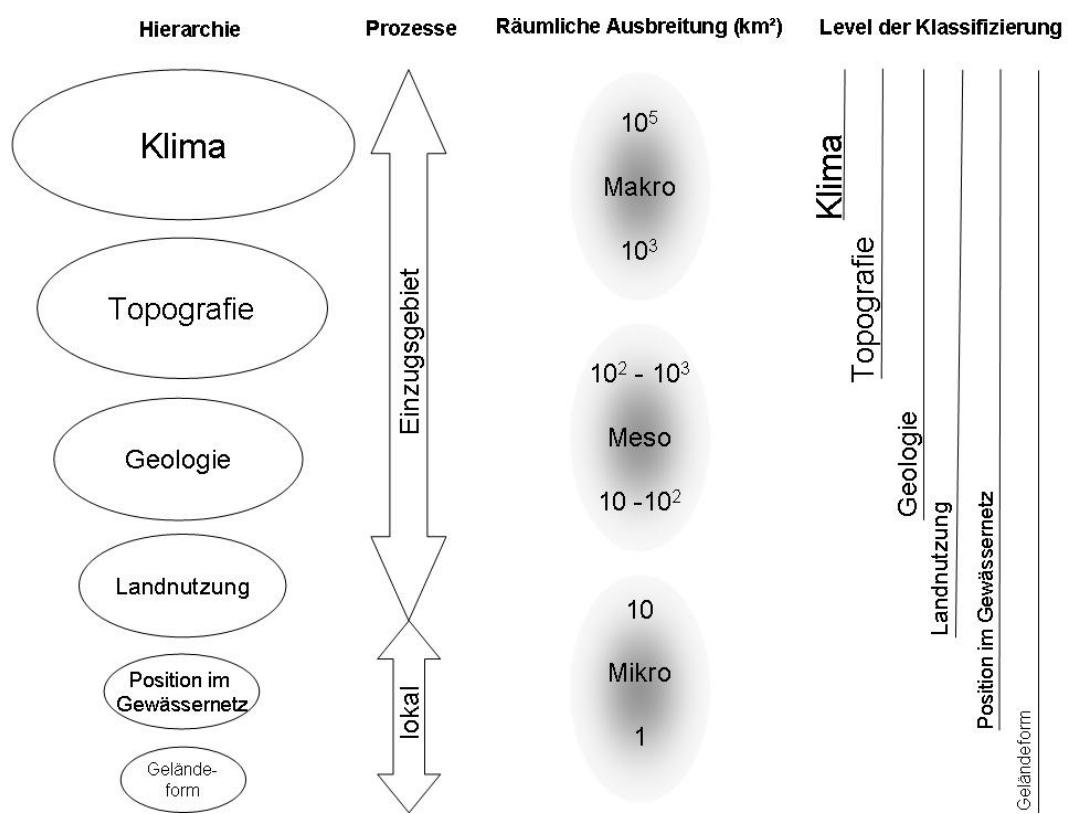


Abbildung 5: Hierarchie der Neuseeländischen Flussklassifizierung REC
(Quelle: Snelder T., Biggs B., Weatherhead M. (2004 S.15))

Nun stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien die Flüsse ausgewählt werden sollen. Da in der vorliegenden Arbeit Fließgewässer in FFH-Gebieten untersucht werden sollen, wurde zuerst die FFH-Richtlinie zur Bestimmung von Kriterien herangezogen. In Anhang I dieser Richtlinie sind die zu schützenden Fließgewässertypen aufgelistet. Hierzu gehören unter anderem „Alpine Flüsse mit Ufergehölzen“ oder „Flüsse der planaren bis montanen Stufe mit Vegetation [...]\“. Demnach ist hier eine Unterteilung der Höhenlage zu finden. Weitere Kriterien zur Einteilung von Flüssen sind hier jedoch nicht zu finden.

Eine weitere Richtlinie, die bei der Ermittlung der Kriterien hilfreich sein kann ist die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, voller Titel: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik), die von der Europäischen Union erarbeitet wurde. Die WRRL wird bezüglich der Flusskriterien an verschiedenen Stellen deutlich konkreter als die FFH-Richtlinie. In Art. 5 Abs. 1 heißt es:

„Jeder Mitgliedsstaat sorgt dafür, dass für jede Flussgebietseinheit oder für den in sein Hoheitsgebiet fallenden Teil einer internationalen Flussgebietseinheit eine Analyse ihrer Merkmale [...] gemäß den Anhängen II und III durchgeführt [...] werden.“

In der WRRL sind zwei Systeme zu finden, mit denen Flüsse typisiert werden können. In System A wird Europa zuerst in verschiedene Ökoregionen unterteilt. Deutschland wird in sieben Ökoregionen eingeteilt. Die Übergangs- und Küstengewässer werden in die Ökoregionen Nord- bzw. Ostsee gegliedert. Die für diese Arbeit relevanten Ökoregionen sind die der Flüsse und Seen. Hier wird Deutschland in zentrales Flachland, westliches Flachland, zentrales Mittelgebirge, westliches Mittelgebirge und Alpen untergliedert. Um im System A die Flüsse noch besser einstufen zu können, gibt die WRRL hier noch drei weitere Faktoren an: Höhenlänge, Größe (auf der Grundlage des Einzugsgebietes) und die Geologie. Die folgende Tabelle 3 veranschaulicht, wie weit diese drei Kriterien laut WRRL untergliedert werden.

Kriterium	weitere Unterteilung
Höhenlage	höhere Lage: > 800 m mittlere Lage: 200 m bis 800 m Tiefland: < 200 m
Größe (des Einzugsgebietes)	klein: 10 bis 100 km ² mittelgroß: > 100 bis 1000 km ² groß: > 1000 bis 10000 km ² sehr groß: > 10000 km ²
Geologie	kalkig silikatisch organisch

Tabelle 3: WRRL-Kriterien: System A
(Quelle: WRRL Anhang II 1.2.1)

Das System B bietet eine alternative Beschreibung der Fließgewässer mit physikalischen und chemischen Kriterien, die die Struktur und Zusammensetzung der dort lebenden Arten beschreiben. Die dort angegebenen Kriterien werden jedoch nicht feiner untergliedert. Zu den obligatorischen Faktoren gehören Höhe, geografische Breite, geografische Länge, Geologie und Größe. Optionale Faktoren sind Entfernung von der Quelle des Flusses, Strömungsenergie, durchschnittliche Wasserbreite /-tiefe /-gefälle, Form und Gestalt des Hauptflussbettes, Flussabfluss-(Durchfluss-)klasse, Talform, Feststofffracht, Säurebindungsvermögen, durchschnittliche Zusammensetzung des Substrats, Chlorid, Schwankungsbereich der Lufttemperatur, durchschnittliche Lufttemperatur und Niederschlag.

Die Tabelle 4 stellt noch einmal die betrachteten Modelle mit ihren Vor- und Nachteilen gegenüber, die für die jeweiligen Klassifizierungen der Fließgewässer herangezogen worden sind. Außerdem ist hier aufgelistet, wie die Modelle aufgebaut sind und welche Kriterien beim jeweiligen Modell zum Tragen gekommen sind. Ebenfalls geht aus dieser Tabelle hervor, welche Eigenschaften der betrachteten Modelle für die hier angewendete Einteilung der Flüsse herangezogen worden sind. Im Folgenden wird nun erläutert, wie die Einteilung der Flüsse vorgenommen wurde und welche Gebiete für die Untersuchungen ausgewählt wurden.

Modell / Richtlinie	FFH-Richtlinie	WRRL	REC	Studie am französischen Rhein
Kriterien für die Klassifizierung	indirekte Einteilung nach Höhenlage (Auflistung der zu schützenden Fließgewässertypen in Anhang I)	Ökoregionen, Höhenlage, Größe des Einzugsgebiets, Geologie, optionale Faktoren (Klimaparameter, Parameter für Gewässermorphologie)	Klima, Topografie, Landnutzung, Position im Gewässer, Geländeform (Hangneigung)	sehr viele, z. B. Niederschlag, Geologie, Höhenlage, Hangneigung
Aufbau / Struktur	nicht vorhanden	nur Auflistung von Kriterien, keine erkennbare Struktur	streng hierarchisch (nach Größe des Einflusses des jeweiligen Kriteriums)	zusammengefasste quantitative Variablen zu Gruppen, hierarchische Anordnung dieser Gruppen, Kriterien innerhalb einer Gruppe über statistische Auswertungen in Zusammenhang gebracht
positiv	Höhenlage als Kriterium	viele Kriterien mit teilweise schon angegebenen Klassen	gut strukturiert, logisch aufgebaut, viele Kriterien	sehr viele Parameter die nicht nur hierarchisch gegliedert sind, sondern auch untereinander in Zusammenhang stehen
negativ	zu wenig Kriterien für die Einteilung von Flüssen	keine Struktur, daher nicht erkennbar, wie wichtig welche Kriterien (Gewichtung) für eine Einteilung von Flüssen sind	Hierarchiestruktur nicht auf andere Länder übertragbar, da Gewichtung der Faktoren nicht überall gleich ist	etwas unübersichtlich auf Grund der vielen Kriterien
verwendet	Kriterium Höhenlage	Höhenlage mit den hier angegebenen Klassen, Berücksichtigung des Klimas und der Flussmorphologie	Als Kriterium für die Flussmorphologie wird die Hangneigung des Flusses herangezogen, eine kleine hierarchische Struktur	Zusammenhang von Parametern: für die Auswahl der Flüsse werden Höhenlage und Hangneigung in Zusammenhang gesetzt

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Modelle für die Einteilung von Fließgewässern

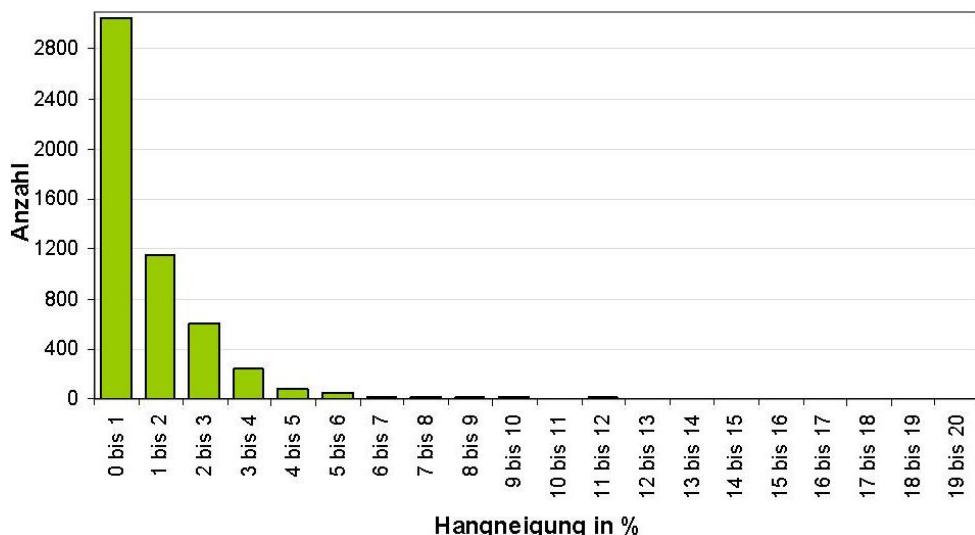


Abbildung 6: Histogramm: Hangneigungen der Flüsse in Deutschland
 (Datengrundlage: Höhenmodell (IFAG), Gewässernetz (UBA), Karte der FFH-Gebiete (BfN))
 (Quelle: Eigene Darstellung)

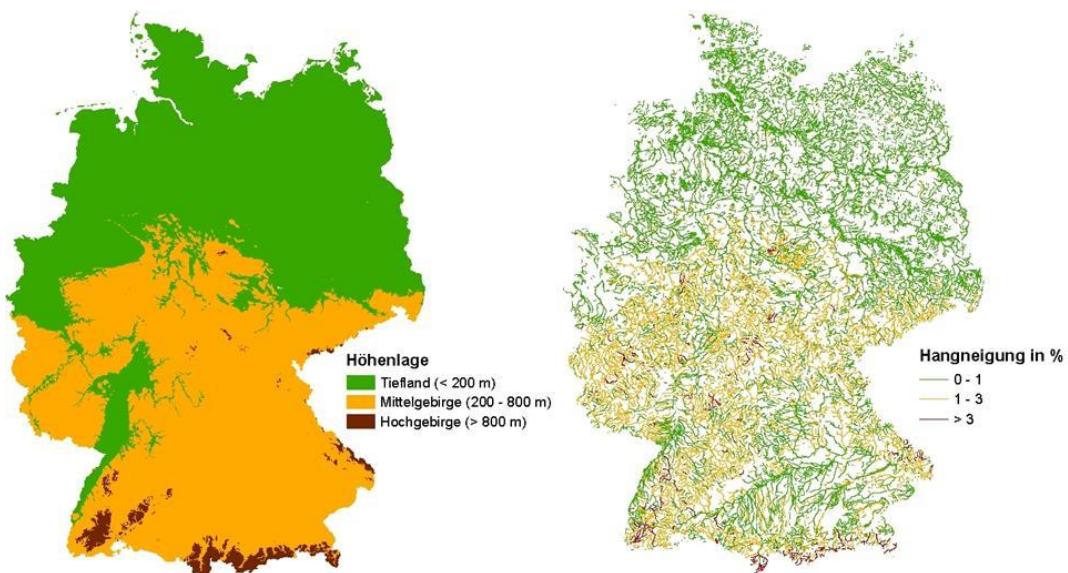


Abbildung 7: Höhenlage und Hangneigungen der Flüsse
 aus deutschem Höhenmodell und Gewässernetz generiert
 (Datengrundlage: Höhenmodell (IFAG), Gewässernetz (UBA))
 (Quelle: Eigene Darstellung)

In allen beschriebenen Modellen wurde die Höhenlage als Kriterium herangezogen. Daher wird diese auch hier als Merkmal für die auszuwählenden Gebiete verwendet. Außerdem ist sie ein wichtiges Kriterium, da mit ihr auch die natürlichen Wasserspeicher (Gletschereis, Schnee) verbunden sind. Die Höhenlage wird, wie bei der WRRL, in drei Gruppen eingeteilt: Hochgebirge mit Höhen über 800 m, Mittelgebirge mit Höhen von 200 bis 800 m und Tiefland mit Höhen unter 200 m.

In Zusammenhang mit der Höhenlage wurde auch die Geländeform betrachtet. Hier im Speziellen die Hangneigung, da von ihr die Geschwindigkeit des Wassers abhängt. Außerdem hat die Hangneigung einen großen Einfluss auf Erosion und Ablagerung, was nicht nur

Auswirkungen auf das Flussbett selbst hat sondern auch auf das angrenzende Ufer. Das Histogramm (Abbildung 6) stellt die Häufigkeiten der Hangneigungen von Flüssen dar. Hier ist zu erkennen, dass der Großteil der Flüsse eine Hangneigung von 1 % oder weniger aufweist. Ein Drittel der Flüsse weisen Hangneigungen von 1 % bis 3 % auf. Mit noch höheren Hangneigungen nimmt dann die Anzahl der Flüsse rapide ab. Flüsse mit hohen Hangneigungen treten dann nur noch vereinzelt auf. In Abbildung 7 ist der Zusammenhang zwischen Höhenlage und Hangneigung der Flüsse zu erkennen. Im Tiefland treten Hangneigungen bis 1 % auf. In den Mittelgebirgen sind Flüsse mit Hangneigungen von 1 % bis 3 % zu finden. Flüsse mit Hangneigungen größer als 3 % sind in den Hochgebirgen angesiedelt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Einteilung der Flüsse ist das Klima. Da Deutschland nicht in verschiedene Klimazonen eingeteilt ist, wird hier der Trend beobachtet, der angibt, wie sich das Klima im Zeitraum 1951–2003 entwickelt hat. Die hier beobachteten Kriterien sind die Niederschläge und die Temperaturen. In Abbildung 8 ist dargestellt, wie sich diese Kriterien von 1951 bis 2003 entwickelt haben. Beim Niederschlag ist zu erkennen, dass es in fast ganz Deutschland erheblich feuchter wird. In Ostdeutschland ist der Niederschlag jedoch zurückgegangen. Dieser Unterschied zwischen den Entwicklungen in den neuen Bundesländern und dem Rest Deutschlands ist bei der Auswahl mit zu berücksichtigen, da der Niederschlag einen erheblichen Einfluss auf das Abflussverhalten hat.

Trendanalysen zeigen, dass es bereits in ganz Deutschland einen Anstieg der Temperatur gegeben hat. Doch auch hier gibt es Schwankungen. In großen Teilen von Deutschland kam es zu einem Temperaturanstieg von ca. 1 °C. In einigen Gebieten, speziell im Norden von Bayern und Baden-Württemberg, gab es jedoch einen stärkeren Anstieg. Auch diese Unterschiede sind bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete zu berücksichtigen, da das Ausmaß von Trockenheiten bzw. Niedrigwasser der Fließgewässer mit den Temperaturen in Verbindung steht.

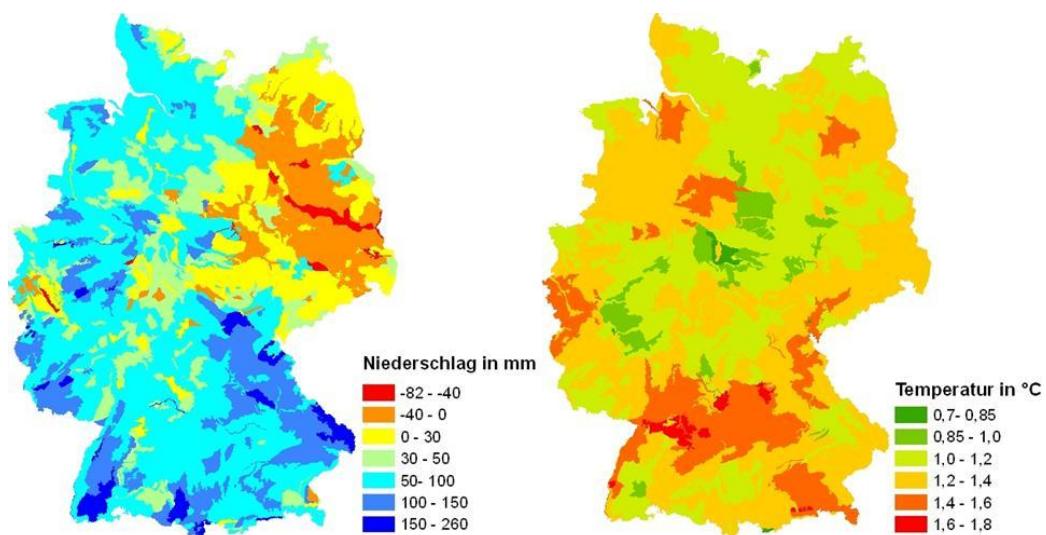


Abbildung 8: Niederschlag- und Temperaturtrend im Zeitraum 1951–2003

Niederschlags- und Temperaturtrends von einzelnen Klimastationen,

auf Karte von deutschen Landschaftstypen interpoliert

(Datengrundlage: Klimastationen (DWD), Karte deutscher Landschaftstypen (BfN))

(Quelle: Eigene Darstellung)

Um die Ergebnisse der Untersuchungsgebiete vergleichen zu können, wurden Flüsse gewählt, die ähnliche Längen aufweisen. Die Längen der Flüsse befinden sich im Bereich von 16 bis 25 km.

Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass Flüsse ausgewählt werden, die in oder an FFH-Gebieten liegen, da mögliche klimabedingte Veränderungen der Wasserdynamik die Schutzziele der FFH-Gebiete gefährden können.

3.2 Untersuchungsgebiete

3.2.1 Auswahl der Fließgewässer

Nach den zuvor genannten berücksichtigten Kriterien wurden dementsprechende Fließgewässer ausgewählt. Zuerst wurden die 16 bis 25 km langen Flüsse selektiert. Dann wurden die Tiefland-Flüsse näher betrachtet. Hier wurde speziell auf die Flüsse geachtet, die eine Hangneigung kleiner als 1 % haben, da diese charakteristisch für das Tiefland sind. Anschließend wurde geprüft, welche Flüsse, auf die diese Kriterien zutreffen, in bzw. an FFH-Gebieten liegen. So wurde die Anzahl der möglichen auszuwählenden Flüsse stark minimiert und es konnten im Tiefland zwei Fließgewässer ausgewählt werden, da es dort zwischen Ost und West Schwankungen im Niederschlagstrend gibt. Wie bereits beschrieben, wird es im Osten eher trockener und im Westen feuchter. Für das Ost-Tiefland wurde der Ketzerbach mit dem FFH-Gebiet „Täler südöstlich Lommatzsch“ ausgewählt. Beim West-Tiefland fiel die Wahl auf die Hamel mit dem dazugehörigen FFH-Gebiet „Hamel und Nebenbäche“.

Fluss (Pegel)	Länge	Höhe in m		Gefälle	FFH-Gebiet	Klima
Ketzerbach (SN) (Piskowitz 1)	25 km	158	Tief- land	0,5 %	Täler südöstlich Lommatzsch	trockeneres Ostdeutsch- land
Hamel (NI) (Afferde F)	18 km	105	Tief- land	0,75 %	Hamel und Ne- benbäche	feuchtere Teile Deutsch- lands
Wilde Gera (TH) (Arnstadt)	22 km	477	Mittel- gebirge	2 %	Wilde Gera bis Plaue und Rei- chenbach	mittlere Temperatur- erhöhung
Mülsenbach (SN) (Niedermülsen 1)	16 km	346	Mittel- gebirge	1,5 %	Mittleres Zwickauer Muldetal	starke Tem- peraturerhö- hung
Bära (BW) (Fridingen)	24 km	805	Hoch- gebirge	4 %	Donautal und Hochfläche von Tuttlingen bis Beuron	feuchter werdend und mittlere Temperatur- erhöhung

Tabelle 5: Ausgewählte Gebiete

Anschließend wurden zwei Flüsse im Mittelgebirge mit Hangneigungen von 1% bis 3% ausgewählt. Auch hier wurden im Vorfeld 16 bis 25 km lange Flüsse selektiert. Um die Anzahl der infrage kommenden Flüsse zu minimieren wurden im Mittelgebirge ebenfalls nur Flüsse herangezogen, die sich in bzw. an FFH-Gebieten befinden. Hier wurden zwei Flüsse ausgewählt, da es im Mittelgebirgsraum die größten Schwankungen im Temperaturtrend gibt. Der Fluss Wilde Gera mit dem FFH-Gebiet „Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach“ befindet sich in einer Region mit einem mittleren Temperaturanstieg. Der Mülsenbach mit dem dazugehörigen FFH-Gebiet „Mittleres Zwickauer Muldetal“ befindet sich in einem Gebiet mit einer starken Temperaturerhöhung.

Abschließend wurde ein Gebiet im Hochgebirge ausgewählt. Hier wurde wie bei der Auswahl für die Gebiete des Tieflands und des Mittelgebirges vorgegangen. Für das Hochgebirge sind Hangneigungen größer als 3% charakteristisch. Bei dem ausgewählten Gebiet handelt es sich um die Bära mit dem FFH-Gebiet „Donautal und Hochfläche von Tuttlingen bis Beuron“.

In Tabelle 5 sind die ausgewählten Gebiete mit ihren Eigenschaften dargestellt. Die Lage der einzelnen Gebiete ist in Abbildung 9 veranschaulicht.

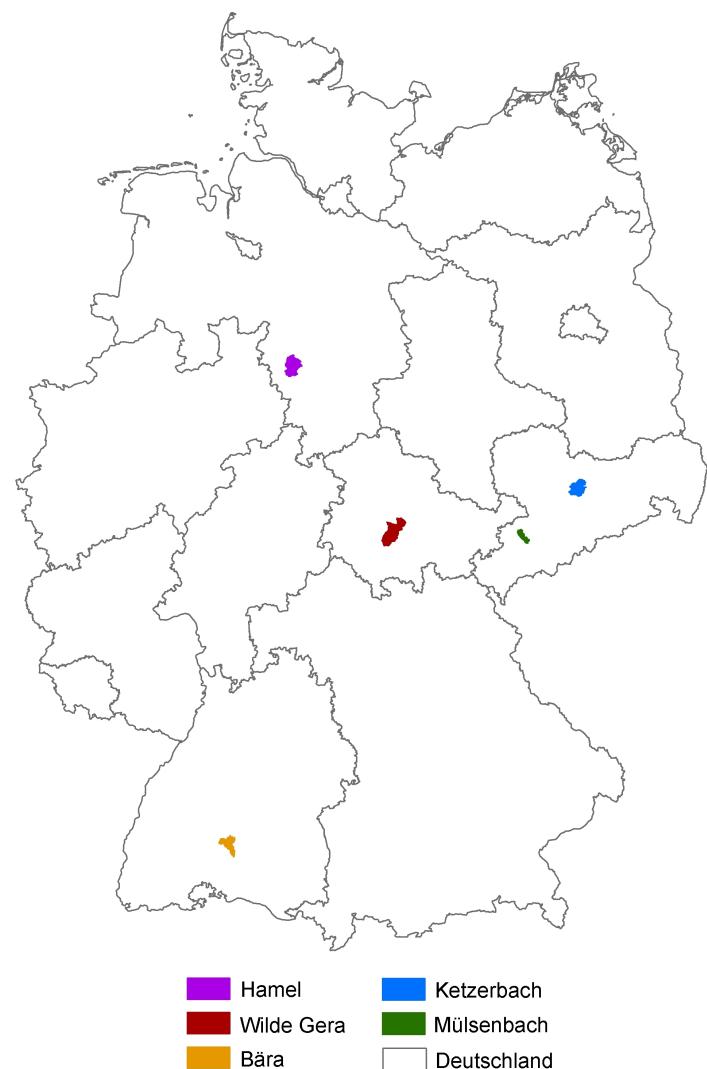


Abbildung 9: Lage der ausgewählten Untersuchungsgebiete
(Quelle: Eigene Darstellung)

3.2.2 Beschreibung der ausgewählten Gebiete und deren naturschutzfachliche Bedeutung

3.2.2.1 Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch

Das in Sachsen befindliche und artenreiche FFH-Gebiet „Täler südöstlich Lommatzsch“ hat eine Größe von 635 ha. [Europäischen Union (2004 S.58)] Charakteristisch für dieses Gebiet sind Talhänge im Mittelsächsischen Lößhügelland, die überwiegend nach Süden ausgerichtet sind. Dieses FFH-Gebiet zeichnet sich durch Flachland-Mähwiesen, Trockengebüsche, Eichen-Trockenwälder, Streuobstwiesen, offen gelassene Altsteinbrüche, einzelne Felsen und sehr gut ausgeprägten Halbtrockenrasen aus. Die umliegenden landwirtschaftlich genutzten Flächen gefährden dieses Gebiet durch den Einsatz von Schädlingsbekämpfungsmitteln und Nährstoffeinträge (Dünger). Des Weiteren gibt es hier für Sachsen seltene Pflanzengesellschaften, die vom Aussterben bedroht sind [Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung]. Unter anderem sind hier Bachmuscheln, europäische Biber und Schwarzstörche als zu schützende Arten zu finden. [BfN-Datenbank]

Der Ketzerbach, der durch das FFH-Gebiet „Täler südöstlich Lommatzsch“ fließt, befindet sich im trockener werdenden Ostdeutschland. Er ist ein Nebenfluss der Elbe und weist eine Länge von ca. 25 km auf. Mit einer durchschnittlichen Höhe von 158 m gehört er zu den Tieflandflüssen.

Das Einzugsgebiet des Ketzerbaches besteht aus lößbedeckten Landschaften. Lößlehmböden bieten günstige Voraussetzungen um den Abfluss zu verzögern und da sie leicht verformbar sind, schneidet sich der Ketzerbach teilweise mehrere Meter tief in die Landschaft ein [Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004 S.57)]. Landwirtschaftliche Nutzflächen machen weit über 50 % des Ketzerbach-Einzuggebietes aus. Lößlehm neigt bei so einer ungünstigen Bodenbedeckung zu sehr starker Erosion, speziell bei lang anhaltenden Niederschlägen [Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004 S.57)].

3.2.2.2 Hamel – Hamel und Nebenbäche

Das FFH-Gebiet „Hamel und Nebenbäche“ befindet sich in Niedersachsen und weist eine Größe von 253 ha auf. In dem Gebiet befindet sich ein relativ naturnaher Fluss mit mehreren Nebenbächen. Die dort befindliche Gewässeraue wird noch regelmäßig vom Hochwasser überschwemmt. Das Gebiet zeichnet sich durch das Vorkommen eines Süßwasserfisches aus, der Groppe. In diesem FFH-Gebiet wird das Ziel verfolgt, die Repräsentanz dieser Art zu verbessern [BfN-Datenbank].

Durch verschiedene Einflüsse ist dieses Gebiet gefährdet, dazu gehören unter anderem Gewässerbegründung und Wasserverschmutzung, Fremdholzeinmischung in die Auenwälder, Entwässerung sowie intensive Grünlandnutzung [BfN-Datenbank].

Die Hamel selbst ist ein ca. 18 km langer Nebenfluss der Weser. Mit einer durchschnittlichen Höhe von 105 m gehört sie zu den Tieflandflüssen. Die Hamel wird von verschiedenen Nebenflüssen gespeist und verfügt über ein lehmhaltiges Flussbett sowie eine gute Wasserqualität [Krüger].

3.2.2.3 Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach

Das FFH-Gebiet „Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach“ befindet sich am Nordhang des Thüringer Waldes und weist eine Größe von 536 ha auf. Der naturnahe Flusslauf der Wilden Gera gehört zu den Quellflüssen der Gera und zeichnet sich durch Auenlandschaften, einige Nebenbäche und angrenzende wertvolle Lebensräume (Berg- u. Flachland-Mähwiesen, Borstgrasrasen, Silikatfelsen, Laubwälder) aus. In diesem FFH-Gebiet sind großflächige naturnahe Laub- und Laubmischwälder, strukturreiche Ufer sowie weitgehend unbeeinflusste Bachläufe mit Wassermoosen aufzufinden. Außerdem repräsentiert dieses Gebiet naturnahe Bergbäche mit Ufervegetation, artenreiches Grünland und wassergefüllte Erdfälle [BfN-Datenbank].

Das Gebiet der Wilden Gera ist durch das Vorkommen bedeutender Tierarten gekennzeichnet. Unter anderem kommt hier der Schmetterling *Maculinea nausithous* (Dunkler Wiesenknopf-Ameisenbläuling) vor [BfN-Datenbank]. Er bewohnt Feucht- und Auwiesen. Standorte die häufig überflutet werden oder zu feucht sind, werden von dieser Art jedoch gemieden [Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen]. Dieser Schmetterling gehört laut Anhang II der FFH-Richtlinie zu den zu schützenden Tierarten.

Der Fluss Wilde Gera, die sich im Einzugsgebiet der Elbe befindet, ist ca. 22 km lang und weist eine durchschnittliche Höhe von 477 m auf. Damit gehört die Wilde Gera zu den Mittelgebirgsflüssen. Dieses Gewässer befindet sich in einem Gebiet, wo es einen Trend zur mittleren Temperaturerhöhung gibt.

3.2.2.4 Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal

Das „Mittlere Zwickauer Muldetal“ befindet sich ebenfalls, wie das Gebiet des Ketzerbaches, in Sachsen. Es weist eine Größe von 2033 ha auf [Europäischen Union (2004 S.61)]. Dieses Gebiet ist durch naturnahe Gewässerabschnitte und Waldgebiete gekennzeichnet. In der strukturreichen Tallandschaft mit stellenweise ausgeprägten Auenstrukturen sind bedeutende Arten, unter anderem Eisvögel und Fledermaus-Winterquartiere, zu finden [BfN-Datenbank]. Durch die Lage des Mülsenbaches wird jedoch nur ein kleiner Teil dieses FFH-Gebietes beeinflusst.

Der Mülsenbach hat eine Länge von ca. 16 km und gehört mit einer durchschnittlichen Höhe von 346 m zu den Mittelgebirgsflüssen. Er befindet sich in einem Gebiet, wo eine starke Temperaturerhöhung zu erwarten ist. Der Mülsenbach fließt in die Zwickauer Mulde und gehört damit ebenfalls zum Einzugsgebiet der Elbe.

3.2.2.5 Bära – Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron

Das FFH-Gebiet „Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron“ mit einer Fläche von 5417 ha zeichnet sich durch Auenwälder mit Erlen, Eschen und Weiden aus. Aber auch andere zu schützende Lebensräume wie zum Beispiel Fließgewässer mit flutender Wasservegetation, feuchte Hochstaudenflure, Kalkfelsen mit Felsspaltenvegetation, Höhlen, Waldmeister- und Orchideen-Buchenwälder sowie Schlucht- und Hangmischwälder sind hier zu finden. Des Weiteren beheimatet dieses Gebiet eine Vielzahl von zu schützenden Arten. Zu ihnen gehören unter anderem Steinbeißer, Bechsteinfledermaus, Spanische Flagge und der Biber [Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg].

Die Bära, die durch das FFH-Gebiet „Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron“ fließt, weist eine durchschnittliche Höhe von 805 m auf und gehört damit zu den Hochgebirgsflüssen. Sie ist ein Nebenfluss der Donau und entsteht durch den Zusammenfluss der Unteren und Oberen Bära. Dieser Fluss hat eine Länge von ca. 24 km.

3.3 Auswahl der Werkzeuge

3.3.1 SWIM

Das Modell SWIM wird am PIK verwendet, um Einflüsse des Klimawandels und von Landnutzungsänderungen auf Hydrologie und Wasserqualität zu analysieren und zu modellieren. Da in diesem Modell auch der Abfluss von Fließgewässern berücksichtigt wird, kann es auch im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt werden.

3.3.2 ArcGIS

Für den Aufbau eines SWIM-Modells ist das Erstellen von vier Grundkarten erforderlich. Am PIK steht für die Bearbeitung und für das Erstellen von Karten die Software ArcGIS von ESRI (Environmental Systems Research Institute) zur Verfügung. Hiermit werden die Daten sehr gut grafisch dargestellt.

3.3.3 GRASS

GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) ist ein frei verfügbares Geoinformationssystem. Es wird benötigt, da SWIM über eine Schnittstelle mit GRASS verbunden ist. Über diese Schnittstelle werden die Dateien erstellt, die das SWIM-Projekt für das jeweilige Untersuchungsgebiet bilden.

3.3.4 Excel

Diese Software war der Autorin bereits vertraut. So konnte auf eine lange Einarbeitungszeit in ein anderes Programm verzichtet werden. Excel verfügt über mathematische, statistische, Sortier-, Filter- und Diagrammfunktionen, die ausreichend sind, um die erhaltenen Daten aus dem SWIM-Modell hinsichtlich der Veränderungen der Wasserodynamik untersuchen zu können.

4 Datenmaterial und Modellierung

4.1 Das Modell

Die Analyse der klimabedingten Veränderungen der Wasserdynamik wird mit Hilfe von SWIM durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein räumlich gegliedertes Einzugsgebietsmodell für die regionale Skala, welches zeitlich kontinuierlich arbeitet [Hattermann, et al. (2007 ohne Seite)]. SWIM ist ein umfangreiches GIS-basiertes Werkzeug, welches über eine Schnittstelle zu dem frei verfügbaren Geoinformationssystem GRASS verfügt. SWIM ermöglicht die Analyse und Modellierung der Einflüsse von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf Hydrologie und Wasserqualität. Das Modell arbeitet auf drei unterschiedlichen Auflösungsstufen, dem gesamten Einzugsgebiet, den Teileinzugsgebieten und den Hydrotopen. Hydrotope sind räumlich zusammenhängende Elementarflächen eines Teilgebietes mit gleicher Landnutzung und Bodenart [Krysanova, et al. (2000 S.3)].

SWIM besteht aus verschiedenen Komponenten: Hydrologische Prozesse (Niederschlag, Schneeschmelze), Pflanzenwachstum (Simulation der natürlichen Vegetation und Kulturpflanzen, Datenbank mit Parametern für jeden Pflanzentyp), Nährstoffdynamik (Stickstoff- und Phosphatkreisläufe), Erosion und Sedimenttransport. Alle Komponenten interagieren miteinander und werden von Klimadaten und Landnutzungsmanagement als externe Wirkungen beeinflusst (Abbildung 10) [Krysanova, et al. (2000 S.28)].

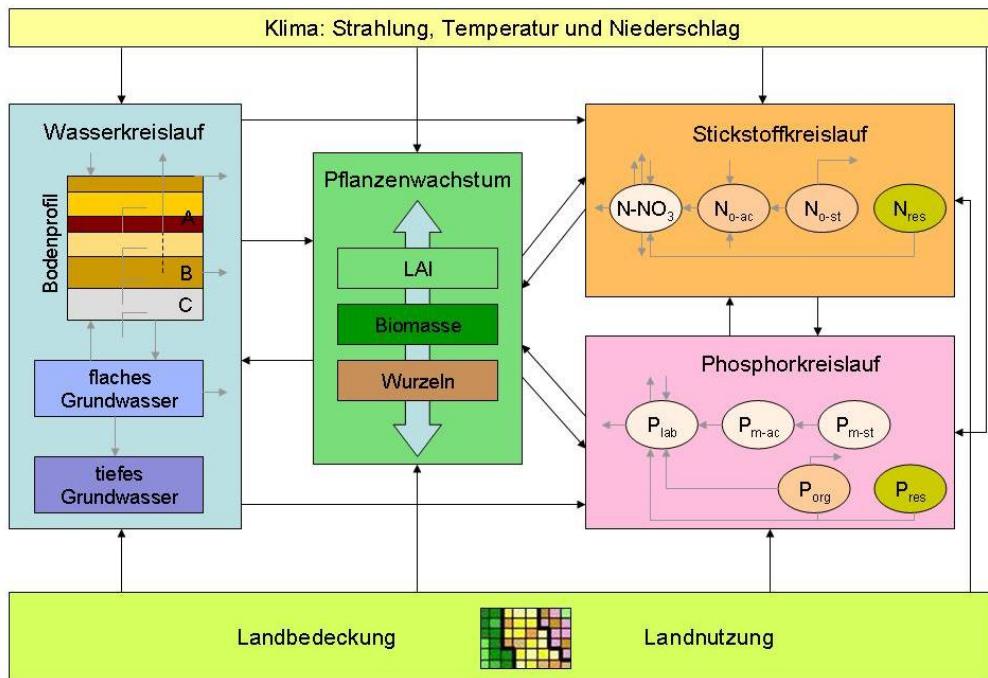


Abbildung 10: SWIM-Komponenten und deren Beziehungen
(Quelle: Krysanova (2000 S.17))

Das hydrologische Modul (Anhang 1: Wasserkreislauf in SWIM) ist aus vier Teilsystemen aufgebaut: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone, das obere sowie das untere Grundwasser [Hattermann, et al. (2007 ohne Seite)]. Das Bodenprofil ist in verschiedene Schichten unterteilt. Die Versickerung von Wasser durch das Bodenprofil speist das obere Grundwasser (Grundwasserneubildung). Der Wasserabfluss vom oberen Grundwasser in die Umgebung

und damit auch in die umliegenden Fließgewässer wirkt sich dann auf den Abfluss dieser Fließgewässer aus. Der Wasserhaushalt für die Bodenschichten enthält folgende Prozesse: Niederschlag, Evapotranspiration (Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt), Versickerung, Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss. Das obere Grundwasser wird von Grundwasserneubildung, kapillaren Aufstieg des Wassers ins Bodenprofil und Versickerung in das tiefere Grundwasser beeinflusst [Krysanova, et al. (2000 S.16)].

Das Stickstoffmodul (Anhang 1: Stickstoffkreislauf in SWIM) arbeitet auf der Datenbasis von Nitratstickstoffen, aktiver und stabiler organischer Stickstoffe sowie organischer Stickstoffe aus Pflanzenrückständen. Auch hier gibt es Abläufe, die den Stickstoffhaushalt beeinflussen. Zu ihnen gehören Düngung, Niederschlag, Mineralisierung (Abbau organischer Verbindungen zu anorganischen Stoffen), Denitrifikation (der im Nitrat gebundene Stickstoff wird mit Hilfe von Bakterien zu molekularem Stickstoff umgewandelt), Aufnahmefähigkeit der Pflanzen, Auswaschung durch den Oberflächen- bzw. Zwischenabfluss, Versickerung ins Grundwasser sowie der Rückgang durch Erosion [Krysanova, et al. (2000 S.16)].

Der Phosphorkreislauf (Anhang 1: Stickstoffkreislauf in SWIM) ist ähnlich wie der Stickstoffkreislauf. Hier besteht die Grundlage aus unbeständigen Phosphaten, aktiven und stabilen mineralischen Phosphaten, organischen Phosphaten und auch Phosphaten aus Pflanzenrückständen. Auch hier sind die Düngung, die Mineralisierung, die Aufnahmefähigkeit durch Pflanzen und Minderung durch Erosion beeinflussende Faktoren. Die Auswaschung durch Oberflächenabflüsse und das Versickern ins Grundwasser spielen beim Stickstoffkreislauf eine deutlich größere Rolle als hier, da Phosphate hauptsächlich durch Erosion transportiert werden [Krysanova, et al. (2000 S.16)].

Das Modul, welches das Pflanzenwachstum beschreibt, ist eine wichtige Schnittstelle zwischen dem hydrologischen Modul und den Nährstoffmodulen. Für die Ermittlung des Pflanzenwachstums wird eine landwirtschaftliche Datenbasis verwendet. Mit dieser Datenbasis können verschiedene Kulturarten (z. B. Weizen, Gerste, Mais usw.) aber auch natürliche Vegetationsbestände wie Wald und Grasland dynamisch modelliert werden [Hattermann, et al (2007 ohne Seite)].

Um ein SWIM-Modell auszuführen sind verschiedene Daten erforderlich. Zur Vorbereitung des Modells werden verschiedene Karten benötigt, dazu gehören unter anderem ein Höhenmodell, Landnutzungs- und Bodenkarte, eine Karte der Teileinzugsgebiete und Punktdaten (Lage der Klima- und Pegelstationen). Des Weiteren werden Klimadaten für die Vorbereitung benötigt. Das heißt, es werden vollständige Datensätze (Lufttemperatur, Niederschlag, Strahlung, Luftfeuchte) von realen Klimastationen benötigt. Außerdem werden zusätzlich reale Niederschlagsstationen herangezogen. Mit diesen Klimadaten kann dann eine Klimainterpolation durchgeführt werden. Darüber hinaus gehen Boden- und Vegetationsparameter mit in das Modell ein. Für die Interpretation der Ergebnisse sind Durchfluss- und Grundwasserdaten, Gewässergütemessdaten sowie weitere Einflussgrößen (z. B. Ernteerträge) erforderlich.

Nachdem alle Daten vorhanden sind, kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Das heißt, dass der Einfluss von bestimmten Parametern (einzelnen oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht wird. Anschließend wird mit Hilfe der in der Sensitivitätsanalyse gewonnenen Kenntnisse eine Kalibrierung vorgenommen. Ziel der Kalibrierung ist es, dass

das Modell möglichst effizient arbeitet und die simulierten Daten annähernd der Realität entsprechen. Nach der Kalibrierung können verschiedene Klimarealisierungen in das Modell eingebracht werden, um so mögliche zukünftige Situationen zu simulieren.

Nach der Modellierung werden verschiedene Daten ausgegeben. Dazu gehören unter anderem Durchflussmengen und Nährstoffkonzentrationen (Stickstoff- und Phosphorverbindungen) am Gebietsauslass und in ausgewählten Teileinzugsgebieten. Als GIS-Ausgabe erhält man Wasser- und Stoffkreislaufkomponenten sowie Erträge pro Subbasin bzw. Hydrotop.

Nähere Informationen zu SWIM (z. B. Entstehungsgeschichte, Berechnungen, Aufbau) sind im Handbuch zu finden [Krysanova, et al. (2000)].

4.2 Datenmaterial

4.2.1 Landnutzung

Die Landnutzungsarten werden aus der CLC-Karte (CORINE Land Cover (Stand 2000)) gewonnen. Das CORINE-Projekt (Coordination of Information on the Environment) ist EUweit und verfolgt das Ziel einheitliche und damit vergleichbare Daten der Bodenbedeckung für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union bereitzustellen. Um mit SWIM arbeiten zu können, müssen die in der CLC-Karte vorhandenen Landnutzungsarten jedoch zu 15 Gruppen zusammengefasst werden. In der folgenden Tabelle 6 ist eine Auflistung der in SWIM verwendeten Landnutzungsarten dargestellt.

Nr.	Englische Bezeichnung (von SWIM verwendet)	Deutsche Bezeichnung
1	water	Gewässer
2	settlement	Siedlung
3	industry	Industrie
4	road	Verkehrsflächen
5	cropland	Ackerland / Kulturlände
6	set-aside	stillgelegte Flächen
7	grassland, extensive use (meadow)	Gras-/Weideland, extensive Nutzung (Wiese)
8	grassland, intensive use (pasture)	Gras-/Weideland, intensive Nutzung (Weideland)
9	forest mixed	Mischwald
10	forest evergreen	Nadelwald
11	forest deciduous	Laubwald
12	wetland nonforested	unbewaldetes Feuchtgebiet
13	wetland forested	bewaldetes Feuchtgebiet
14	heather (grass + brushland)	Heide (Gras und Niederholz)
15	bare soil	offene Flächen ohne / mit geringer Vegetation

Tabelle 6: Landnutzungsarten in SWIM
(Quelle: Krysanova, et al. (2000 S.162))

4.2.2 Höhenmodell

Bereits im Vorfeld der SWIM-Projekte wurde ein Höhenmodell für die Einteilung der Flüsse benötigt, um die Höhen und die Hangneigungen der Flüsse zu ermitteln. Aber auch SWIM benötigt Höhenangaben. Für die ausgewählten Gebiete wurde ein Rasterdatensatz (250 x 250 m) vom IFAG (Institut für Angewandte Geodäsie) verwendet.

4.2.3 Bodentypen

Da SWIM für das Anlegen eines Projektes auch die Bodentypen in dem Untersuchungsgebiet benötigt, müssen auch hierfür die Daten vorliegen. Die Grundlage für die Bodendaten bildet die BÜK 1000 (Bodenübersichtskarte) vom BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Diese Karte liegt ebenfalls als Shape-Datei für ArcGIS am PIK vor. Die BÜK 1000, mit dem Maßstab 1 : 1 000 000, enthält 72 fortlaufend nummerierte Bodeneinheiten, auf die auch die von SWIM verwendeten Bodentypen basieren.

4.2.4 Subbasin-Karte

Für die Teileinzugsgebiete des Gewässernetzes in Deutschland steht am PIK ebenfalls eine Karte vom UBA (Umweltbundesamt) zur Verfügung. Diese Karte wird benötigt, um die Teileinzugsgebiete der ausgewählten Gebiete zu extrahieren und dann in SWIM einzulesen. Da die ausgewählten Gebiete jedoch sehr klein sind, ist manchmal nur ein Teileinzugsgebiet vorhanden. Daher müssen sie je nach Größe des Gebietes weiter unterteilt werden.

4.2.5 Gewässernetz

Eine weitere wichtige Karte, die benötigt wird, ist eine Karte vom Gewässernetz in Deutschland vom UBA, welche am PIK vorliegt. Diese wurde für die Einteilung der Fließgewässer und die anschließende Auswahl der Untersuchungsgebiete genutzt. Außerdem wird so der Verlauf der jeweiligen Gewässer ersichtlich, der gegebenenfalls beim SWIM/GRASS-Interface angegeben werden muss.

4.2.6 Daten von FFH-Gebieten

Um Gewässer auswählen zu können, die in bzw. an FFH-Gebieten liegen, wird eine Karte benötigt, in der die Lage dieser Gebiete abgebildet ist. Diese Karte des BfNs liegt mit einer entsprechenden Datenbank, in der Informationen zu den einzelnen FFH-Gebieten abgelegt sind, am PIK vor.

4.2.7 Klimastationen und Klimadaten

Für SWIM werden Klimadaten benötigt, damit sie auf die Mittelpunkte der Teileinzugsgebiete interpoliert werden können. Um Stationen auswählen zu können, die in dem bearbeiteten Gebiet liegen, muss jedoch die Lage der verschiedenen Klimastationen in Deutschland bekannt sein. Im PIK liegt eine Karte vom DWD (Deutscher Wetterdienst) als Punkte-Shape mit über 2000 Klimastationen in Deutschland vor. Die dazugehörigen Klimadaten vom DWD sind in einzelnen Dateien ebenfalls vorhanden. In ihnen sind von 1951 bis 2006 in Tagesschritten unter anderem Daten zum Niederschlag, der Temperatur, der Sonneneinstrahlung und dem Wind aufgelistet. Mit den interpolierten Klimadaten kann dann die Kalibrierung und Validierung des SWIM-Modells geschehen.

Weiterhin werden für die Simulation in die Zukunft Szenario-Daten benötigt. Hierfür wurden Daten des Modells STAR (Statistisches Regionalmodell) verwendet. Mit diesem Modell wurde ein räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes transientes A1B Szenario berechnet. Transient bedeutet hier, dass es sich um ein sich ständig änderndes Klima, auf Grund der kontinuierlichen Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre handelt [Gerstengarbe, et al. (2008 S.1f)]. STAR ist in der Lage, beliebig viele Realisierungen für ein Szenario zu berechnen. Für diese Arbeit wurden hundert Realisierungen verwendet. Das heißt hundert zufällig erzeugte Stichproben für das A1B Szenario [Gerstengarbe, et al. (2008 S.5f)].

4.2.8 Pegelstationen und Pegeldaten

Für die Kalibrierung mit SWIM müssen Durchfluss-Daten vorliegen. Hierfür wird ein Pegel im Auslass des Gebietes benötigt. Informationen über die Lage von Pegeln mit Durchflussmessungen erhält man von den jeweiligen Landesämtern und aus dem DGJ (Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch). Die entsprechenden Daten dieser Pegel können ebenfalls nach Rücksprache von den entsprechenden Ämtern zur Verfügung gestellt werden. Die verfügbaren Pegeldaten sind jedoch unterschiedlich beschaffen. Die einzelnen Pegeldaten decken unterschiedliche Zeitabschnitte ab und beinhalten teilweise Fehljahre. In der folgenden Tabelle 7 ist ersichtlich, welche Pegeldaten von welchem Amt zur Verfügung gestellt worden sind, welchen Zeitraum sie abdecken und wo es Fehljahre gibt.

Gewässer	Pegel	Amt	Zeitraum	Fehljahre
Ketzerbach	Piskowitz 1	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie	1971–2004	1981–86
Hamel	Afferde F	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz	1980–2006	–
Wilde Gera	Arnstadt	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie	1950–2005	–
Mülsenbach	Niedermülsen 1	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie	1966–2006	1982–84, 1991–94
Bära	Fridingen	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg	1984–2007	–

Tabelle 7: Pegelstationen

4.3 Umsetzung

Für die Erstellung eines SWIM-Modells werden vier Ausgangskarten benötigt. Die Karten der jeweiligen Teileinzugsgebiete, in denen sich die Flüsse befinden, erhält man, indem man die entsprechenden Subbasins aus der Teileinzugsgebietskarte von Deutschland extrahiert. Stehen die Karten der Teileinzugsgebiete zur Verfügung, können dann die anderen drei benötigten Karten (Landnutzung, Böden, Höhenmodell) für alle Gebiete erstellt werden. In Abbildung 11 sind diese Schritte noch einmal verdeutlicht.

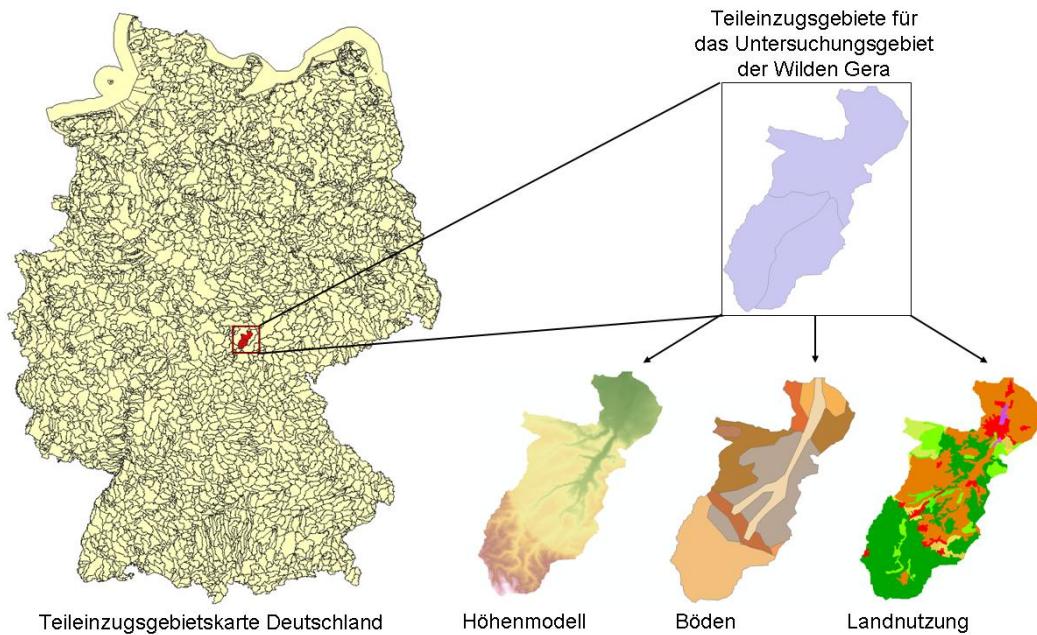


Abbildung 11: benötigte Karten für SWIM

Es ist wichtig, dass alle vier Karten im gleichen Koordinatensystem vorliegen, ist dies nicht der Fall, müssen sie entsprechend transformiert werden. Anschließend können diese Karten in das GRASS-Format konvertiert werden. Hierfür müssen die einzelnen Karten in ASCII-Dateien umgewandelt werden, deren Header so angepasst werden müssen, dass GRASS die Karten einlesen kann. Auf der Grundlage, dass alle Karten für ein Gebiet vorliegen, kann nun in GRASS ein Projekt für jedes Gebiet angelegt werden. Anschließend können die vier Karten in GRASS eingelesen werden.

Da die ausgewählten Gebiete sehr klein sind, ist die Anzahl der Teileinzugsgebiete, die sich aus der Subbasin-Karte ergibt, nicht ausreichend. Aus diesem Grund müssen die Gebiete weiter unterteilt werden. In GRASS können auf Grundlage des Höhenmodells neue Teileinzugsgebiete berechnet und in einer neuen Karte abgelegt werden. Die Anzahl bzw. Feinheit der Teileinzugsgebiete kann durch die Angabe eines Schwellwertes gesteuert werden. Dieser Schwellwert gibt die minimale Größe der neuen Teileinzugsgebiete in Pixeln an.

Die nun entstandene Karte wird jetzt als ASCII-Datei exportiert, da die Aufteilung der neuen Teileinzugsgebiete nicht zufriedenstellend ist und in ArcGIS überarbeitet werden muss. Der Unterschied zwischen den in GRASS berechneten Teileinzugsgebieten und der überarbeiteten Karte in ArcGIS ist in der folgenden Abbildung 12 zu sehen.

Die neue Karte der Teileinzugsgebiete kann nun in eine Rasterkarte umgewandelt werden. Da für einen späteren Zeitpunkt die Mittelpunkte der Teileinzugsgebiete benötigt werden, können diese an dieser Stelle ermittelt werden. Jetzt kann die neue Karte der Teileinzugsgebiete ins GRASS-Format umgewandelt werden und anschließend wieder in GRASS eingelesen werden.

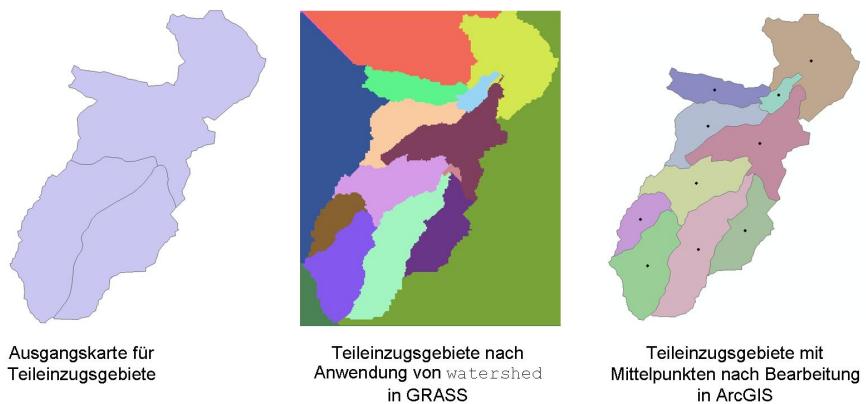


Abbildung 12: Bearbeitung der Teileinzuggebiete

Da die 4 Karten an den Rändern kleine Unterschiede in der Anzahl der Pixel aufweisen, müssen diese maskiert werden um eine einheitliche Größe zu erhalten. Hierfür wird eine Umgebung aufgerufen, in der Kartenalgebra angewendet werden kann. Um die Karten zu maskieren, muss eine bestimmte Folge von Befehlen ausgeführt werden.

Jetzt ist die Grundlage für ein SWIM-Modell geschaffen und das SWIM/GRASS Interface kann aufgerufen werden. Hier muss zu Beginn ein neues Projekt angelegt werden. Ist dies geschehen, erscheint ein Menü in dem verschiedene Punkte nach einander abgearbeitet werden müssen. Nachdem alles fehlerfrei ist, werden vom Interface die gebietsspezifischen Dateien angelegt, aus denen ein SWIM-Modell besteht. Die Dateien und deren Bedeutung sind in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

Datei	Bedeutung/Inhalt
file.cio	Auflistung der Namen aller Dateien, die vom Modell genutzt werden
gebiet.str	Teileinzugsgebiete und die darin befindlichen Hydrotope mit ihrer Landnutzung und ihren Bodentypen
gebiet.fig	Kommandos, wie der Fluss durch das Einzugsgebiet verläuft
gebiet.proj	enthält Statusinformationen des Projektes
str.cio	enthält Dateinamen, die die Struktur der Teileinzugsgebiete beschreiben
gebiet.cod	Anzahl der Teileinzugsgebiete, Anzahl der Simulationsjahre, das Startjahr und Print Codes
gebiet.bsn	enthält Parameter, die für Kalibrierung und Berechnungen innerhalb des Modells erforderlich sind
name#.sub	enthält Parameter (Fläche), die die einzelnen Teileinzugsgebiete näher beschreiben (# - entsprechende Nummer des Teileinzugsgebiets)
name#.gw	enthält Parameter, die das Grundwasser näher beschreiben
name#.rte	enthält Informationen, die die Eigenschaften des Flussbettes beschreiben

Tabelle 8: Dateien, die vom SWIM/GRASS Interface erstellt werden.
(Quelle: Krysanova, et al. (2000 S.128f))

Jetzt kann für jedes Gebiet ein SWIM-Projekt aufgebaut werden. Am einfachsten ist es, wenn ein bereits bestehendes Projekt kopiert wird und die gebietsspezifischen Dateien ausgetauscht werden. Anschließend müssen die vom SWIM/GRASS Interface erzeugten bsn- und cod-Dateien an das entsprechende Gebiet angepasst werden. Des Weiteren muss die Datei soil.cio geändert werden. In diese Datei müssen die im Gebiet vorkommenden Bodentypen eingetragen werden. Außerdem muss die runoff.dat angepasst werden. Hier müssen die Pegeldaten für das entsprechende Gebiet eingetragen werden.

Um das Projekt zu vervollständigen, fehlen noch zwei Klimadateien. Diese werden mit Hilfe einer Klimainterpolation erstellt. Dazu werden Klima- und Niederschlagsstationen herausgesucht, die sich innerhalb oder in der Nähe des Gebietes befinden. Diese Stationen werden mit ihren Koordinaten und ihren Höhen benötigt. Des Weiteren werden die Mittelpunkte der Teileinzugsgebiete, ebenfalls mit ihren Koordinaten und Höhen herangezogen. Mit einem entsprechenden Tool werden die gemessenen Daten der realen Klimastationen zu den Mittelpunkten der Teileinzugsgebiete interpoliert. Das Ergebnis dieser Interpolation wird in zwei weitere Dateien geschrieben „clim1.dat“ und „clim2.dat“, die in das entsprechende SWIM-Projekt kopiert werden müssen.

Jetzt kann das Modell ausgeführt werden. Eine ausführlichere Beschreibung für die Vorbereitung eines SWIM-Modells ist in Anhang VI zu finden. Nachdem die erste Simulation abgeschlossen ist, fällt auf, dass sich die Gütemaße nicht im akzeptablen Wertebereich befinden. Das heißt, das Modell arbeitet nicht realistisch. Die Gütemaße geben an, wie effizient das Modell arbeitet. Der Effizienzwert, der nach Nash & Sutcliffe ermittelt wird [Krysanova, et al. (2000 S.196)], kann Werte vom negativen Bereich (sehr schlecht, nach unten offen) bis 1 (sehr gut) annehmen. Ein Modell arbeitet effizient, wenn dieser Wert größer als 0,7 ist. Ebenfalls muss der Wert der Wasserbilanz betrachtet werden. Dieser gibt an, wie viel mehr bzw. weniger Wasser als in der Realität sich während der Simulation im Modell befindet. Sein Betrag sollte kleiner als 10% sein.

Um zu erreichen, dass sich das Modell gut an die Realität anpasst, muss es kalibriert werden. Hierfür muss im Vorfeld eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Das heißt, dass der Einfluss von bestimmten Parametern (einzelnen oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht wird. Um diese Einflüsse zu ermitteln, wird immer nur ein Parameter geändert und dann die Auswirkungen auf das Modell beobachtet. Anschließend wird dieser Wert auf den Ausgangswert zurückgesetzt und mit einem anderen Parameter auf die gleiche Weise fortgefahrene. So erfährt man, wie stark sich Änderungen von Parametern auf das Modell auswirken. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen kann nun die Kalibrierung des Modells vorgenommen werden. Eine Übersicht der Parameter, die für die Kalibrierung verwendet wurden, ist in der folgenden Tabelle 9 zu finden.

Datei	Bedeutung
abf0	Alpha-Faktor für das Grundwasser. Dieser Parameter charakterisiert den Grundwasserrückgang (Die Menge an Grundwasser, die pro Zeiteinheit wieder ins Gewässer fließt).
thc	Korrekturfaktor für die potenzielle Evapotranspiration

Datei	Bedeutung
gwq0	anfänglicher Grundwasserabfluss
cnum 1,2,3	Curve Number Bedingungen: Die Curve-Number-Methode ist eine effiziente Methode um die niederschlagsbedingte Menge des Direktabflusses in einem bestimmten Gebiet zu ermitteln
roc 2,4	Routing-Koeffizienten für die Berechnung des Wellenablaufs auf der Fließstrecke
bff	Wirkungsfaktor für die Zwischenabflußberechnung bei gesättigtem Bodenspeicher
chwc0	Koeffizient für die Korrektur der Flussbettbreite für alle Abschnitte. Die Breite des Flussbettes wurde vom SWIM/GRASS-Interface abgeschätzt.
sccor	Korrekturfaktor für die gesättigte Leitfähigkeit des Bodens

Tabelle 9: Parameter für die Kalibrierung
(Quelle: Krysanova, et al. (2000 S.137ff))

Alle Gebiete wurden für den Zeitraum 1996–2004 kalibriert. Diese Jahre wurden für die Kalibrierung verwendet, da sie relativ aktuell sind und somit besser für die Simulationen in die Zukunft geeignet sind als Zeiträume die weiter in der Vergangenheit liegen und gegebenenfalls veränderte Kriterien (Landnutzungsänderungen) aufweisen.

Bei zwei der fünf ausgewählten Untersuchungsgebiete ist während der Kalibrierung jedoch ein Problem aufgetreten. Bei den Gebieten der Bära und des Ketzerbaches konnten die angestrebten Gütemaße nicht ganz bei der Kalibrierung erreicht werden. Dies kann daran liegen, dass die ausgewählten Gebiete sehr klein sind. Um genauere Ergebnisse erzielen zu können, wären lokale Daten (Boden, Klima, Landnutzung etc.), die speziell für diese Gebiete gelten, erforderlich. Um genau festzustellen, wie gut der Abfluss für den kalibrierten Zeitraum simuliert wurde und wie weit er vom realen Abfluss abweicht, wurden Diagramme erstellt. In diesen Diagrammen ist der reale und der simulierte Abfluss in einem Durchschnittsjahr dargestellt. Die Diagramme sowie die Gütemaße und die entsprechenden Gebietsgrößen sind in Anhang II wiedergegeben.

Betrachtet man die Diagramme in Anhang II etwas genauer, dann stellt man fest, dass der Niedrigwasserabfluss bei allen Gebieten gut simuliert wurde. Die Hochwasserabflüsse sind nicht immer so gut simuliert wie die Niedrigwasserabflüsse, jedoch ausreichend, um mit ihnen weiter arbeiten zu können. Wichtig für das weitere Vorgehen ist ebenfalls, wie sich die simulierten Abflüsse verhalten, wenn ein anderer Zeitabschnitt als der für die Kalibrierung für die Modellierung verwendet wird.

Ist die Kalibrierung abgeschlossen, müssen nun die einzelnen Modelle der jeweiligen Gebiete validiert werden. Hierfür werden die Durchflüsse für unterschiedliche Zeiträume simuliert. So kann festgestellt werden, ob das Modell konstant effizient arbeitet oder ob es starke Abweichungen zu dem Kalibrierungszeitraum gibt.

Für die Validierung müssen die Klimadateien für die entsprechenden Zeiträume neu interpoliert werden. Auch die runoff.dat muss mit den zu dem Zeitabschnitt passenden Pegeldaten versehen werden. In der *.cod Datei müssen das Startjahr und die Anzahl der Jahre, die simuliert werden sollen, entsprechend angepasst werden. Ist dies geschehen, können verschiedene Durchläufe gemacht werden, für die dann ebenfalls Diagramme mit einem Durchschnittsjahr für den entsprechenden Zeitraum zum Vergleich erstellt werden können.

Bei der Auswertung wurde deutlich, dass es bei vier Gebieten Auffälligkeiten gibt. Bei der Hamel, dem Mülsenbach und der Wilden Gera liegen die simulierten Pegeldaten für die Zeitabschnitte die vor 1990 liegen deutlich unter den realen. Beim Ketzerbach ist auffällig, dass im Abschnitt 1971–1980 keine Flutspitzen simuliert werden. Auf diese Probleme und die Validierung selbst wird im Kapitel 5 näher eingegangen.

Nach der abgeschlossenen Modellvalidierung können dann die unterschiedlichen Klimarealisierungen in das Modell integriert werden. Hierfür werden die zwei benötigten Klimadateien aus Daten von hundert Klimarealisierungen interpoliert. Für jede einzelne Realisierung wird ein Modelldurchlauf gemacht. So erhält man für jedes Gebiet Ergebnisse für hundert verschiedene Klimarealisierungen.

Um diese Fülle von Daten auswerten zu können, müssen diese in Excel eingelesen werden. Da dies einen erheblichen Zeitaufwand bedeuten kann, wurden hier Makros geschrieben, mit denen das Einlesen automatisiert wurde. Die Daten wurden in Elfjahres-Blöcken (2010–2020, 2020–2030, 2030–2040, 2040–2050, 2050–2060) eingelesen. Für jeden dieser Zeitabschnitte wurden die Daten aller hundert Realisierungen eingelesen. Anschließend wurde für jede Realisierung und den entsprechenden Zeitabschnitt ein Durchschnittsjahr berechnet. Diese hundert Durchschnittsjahre wurden dann in einem extra Tabellenblatt zusammengeschrieben, in dem dann für jeden Tag dieser Durchschnittsjahre ein Durchschnittswert, sowie ein Minimumwert und ein Maximumwert ermittelt wurden. Das Makro erstellt anschließend noch ein kleines Übersichtsdiagramm, welches die beiden Extremwertreihen und den Durchschnittswert darstellt. Um jedoch eine geeignete Darstellung zu erhalten, wurden für diese Datenreihen noch einmal von Hand übersichtlichere Diagramme erstellt, auf die in Abschnitt 6.1.1 näher eingegangen wird.

Da mögliche Durchflussänderungen durch Änderungen der Verdunstung, der Niederschläge, der Grundwasserneubildung und des Direktabflussanteils bedingt sein können, müssen auch diese Daten ausgewertet werden. Da für diese Faktoren auch hier für alle fünf Gebiete Ergebnisse von hundert Realisierungen vorliegen, wurde ebenfalls ein Makro zum Einlesen geschrieben. Bei diesem Makro werden pro Realisierung die Jahre von 2010 bis 2060 eingelesen. Anschließend wird ein Durchschnittsjahr über den gesamten Zeitraum berechnet und ein Durchschnittsjahr für den Zeitraum 2050–2060. Die Ergebnisse des letzteren Zeitabschnittes werden dann in einem neuen Tabellenblatt zusammengeschrieben. Für jedes dieser Durchschnittsjahre wird dann eine Summe aus den einzelnen Tagen berechnet. Anschließend wird wieder ein Mittelwert, ein Minimum und ein Maximum ermittelt. In einem Diagramm werden dann die Werte aus dem Zeitabschnitt 2050–2060 den Werten aus den Simulationen der Referenzabschnitte (Bsp. Ketzerbach 1987–2004) gegenübergestellt. Auf diese Weise können eventuelle Verschiebungen (z. B. weniger Niederschlag, steigende Verdunstung) festgestellt werden. Auch diese Diagramme werden in Abschnitt 6.1.1 näher erläutert.

Für die Ermittlung der Anzahl von Risikotagen von Hoch- bzw. Niedrigwasser war es nötig, Schwellwerte zu bestimmen. Wie die Schwellwerte berechnet worden sind, ist in Abschnitt 6.1.2 nachzulesen. Da für die Schwellwertanalyse auch alle Jahre der hundert Realisierungen betrachtet werden, wurde auch hier ein Makro für die Auswertung geschrieben. Anschließend wurden für jedes Gebiet zwei Diagramme erstellt. Das erste Diagramm zeigt für jeden Elfjahres-Block die minimale, durchschnittliche und maximale Anzahl der Tage, die den unteren Schwellwert unterschreiten, also die Tage mit Niedrigwasserrisiko. Das zweite Diagramm zeigt äquivalent zum ersten Diagramm die Anzahl der Tage mit Hochwasserrisiko. Diese Diagramme werden ebenfalls in Abschnitt 6.1.2 näher erläutert.

Auf dieser Datengrundlage und mit Hilfe der erstellten Diagramme können nun Aussagen über mögliche Veränderungen der Wasserdynamik getroffen werden. In Abbildung 13 ist der gesamte Ablauf noch einmal als Flussdiagramm dargestellt.

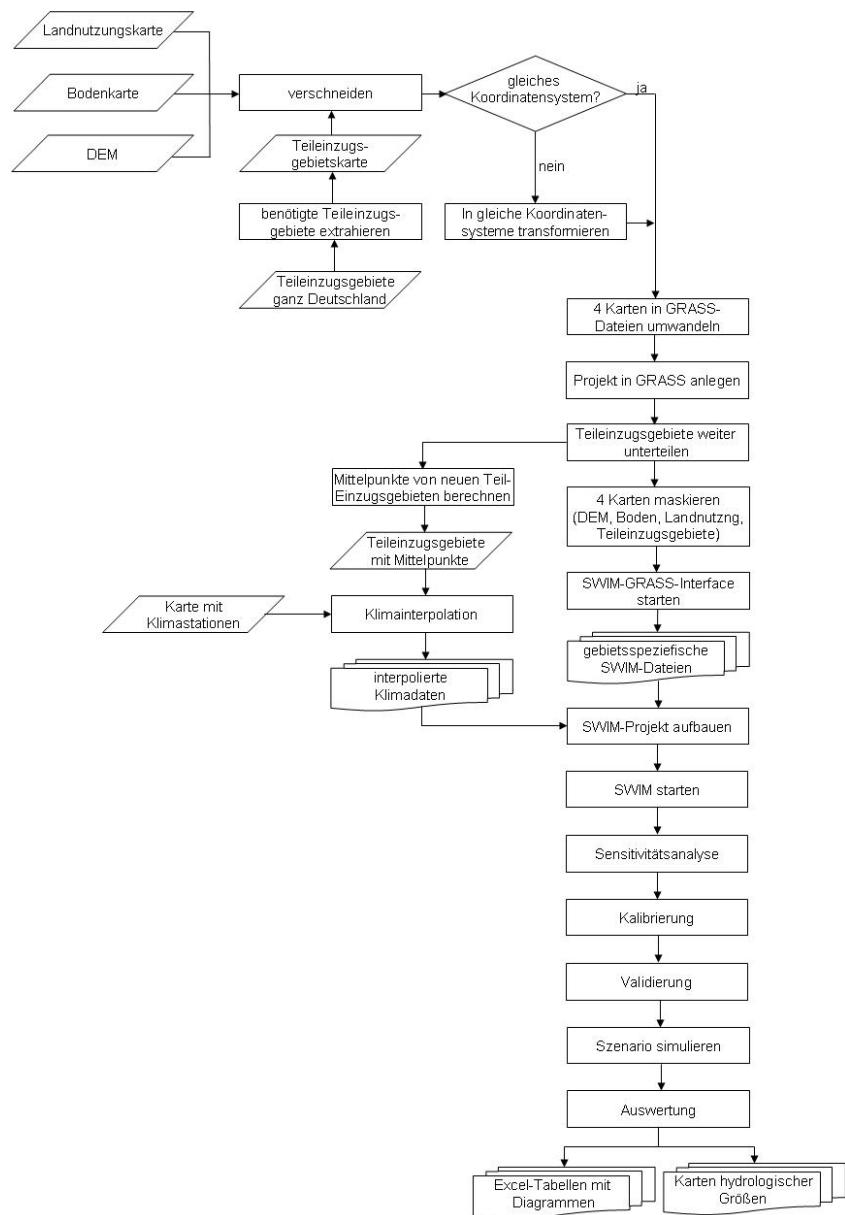


Abbildung 13: Flussdiagramm

5 Modellvalidierung

Bei der Modellvalidierung wird untersucht, ob das Modell das bearbeitete Gebiet realistisch und zufriedenstellend repräsentiert. Dabei ist zu beachten, dass es grundsätzlich keine vollständige Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität gibt. Das hat verschiedene Ursachen. Zum einen ist das Modell aus einer Vereinfachung der Realität hervorgegangen und enthält demnach auch weniger Einflussgrößen, was dazu führt, dass es sich anders verhält. Zum anderen ist jede Messung in der Realität immer mit Fehlern behaftet, was ebenfalls Ursache für Abweichungen zwischen dem Modellergebnis und den Messgrößen sein kann. Somit lässt sich feststellen, dass eine Übereinstimmung der Simulation und des Modells nur innerhalb einer vorgegebenen Toleranz möglich ist. Der Toleranzbereich bei SWIM ist durch die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Gütemaße bestimmt.

Bei der Validierung wird also geprüft, ob sich das Modell genügend genau an die Realität annähert. Der Vergleich zwischen System und Modell kann meist nur punktuell an einer begrenzten Anzahl von Parametereinstellungen vorgenommen werden. Das ist auch bei SWIM der Fall. Für die hydrologische Validierung ist es notwendig, Parameter aus einer speziellen Kalibrierungsdatei (Gebiet.bsn) zu konfigurieren, um den simulierten Durchfluss weitestgehend an den realen Durchfluss anzupassen. Zur Beurteilung wie genau ein Modell arbeitet, ist es wichtig, für jedes Gebiet Simulationen mit unterschiedlichen Zeitabschnitten durchzuführen.

Die Simulationen in den unterschiedlichen Zeitabschnitten haben einige Auffälligkeiten ergeben. Bei der Wilden Gera, dem Mülsenbach und der Hamel ist in den Jahren vor 1990 ein deutlich geringerer Durchfluss als in der Realität simuliert worden. Dieser Sachverhalt wird noch einmal in der Abbildung 14 dargestellt.

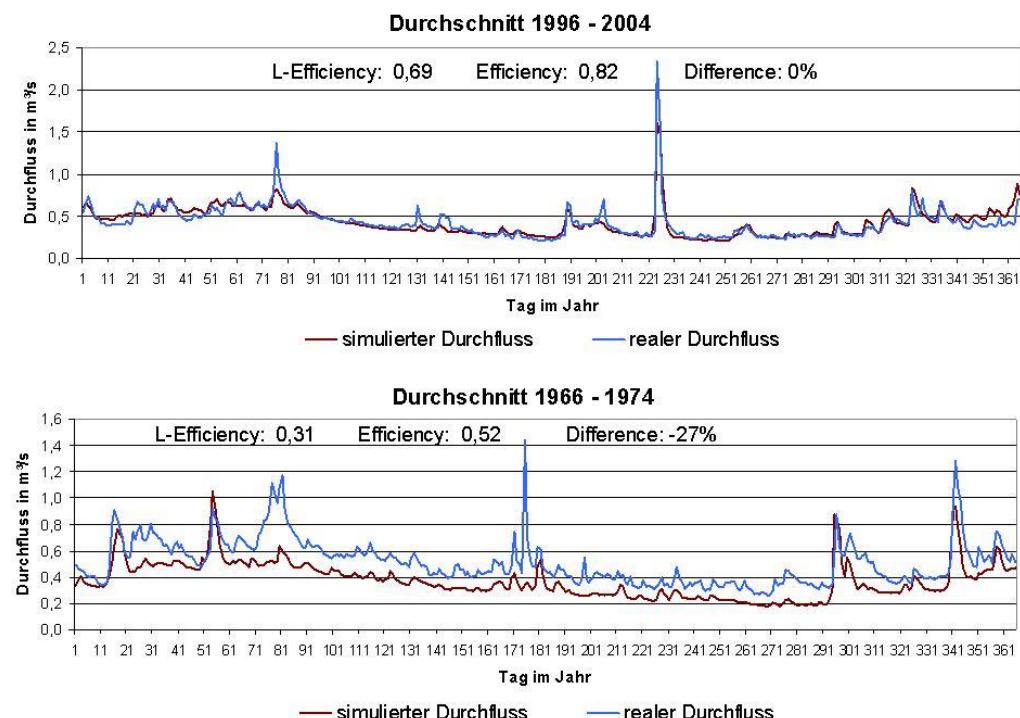


Abbildung 14: Durchflussunterschiede am Beispiel Mülsenbach

Die Ursachen für dieses Phänomen könnten Landnutzungsänderungen sein, die im Laufe der Zeit stattgefunden haben. Der Einfluss von Landnutzung ist in kleinen Einzugsgebieten deutlich höher als in großen Einzugsgebieten [Klaghofer (ohne Jahr S.60)]. Wälder haben beispielsweise eine hohe Transpirationsleistung und somit auch einen hohen Wasserverbrauch. Außerdem haben Waldböden eine sehr hohe Infiltrationsrate, das heißt: der Niederschlag versickert schnell im Boden und es fließt weniger Wasser ab. Daraus folgt, dass der Durchfluss im Fließgewässer geringer ist, da weniger Wasser über den Oberflächenabfluss oder das Grundwasser in den Fluss gelangt. Um das zu belegen, wurden mit SWIM noch einmal verschiedene Durchläufe mit unterschiedlichen Landnutzungen durchgeführt.

In Abbildung 15 sind die unterschiedlichen Landnutzungen dargestellt, die für diesen Test verwendet wurden. Die eigentlichen Modelle sind mit der Landnutzung des Jahres 2000 kalibriert. Des Weiteren liegt am PIK eine Karte über die Landnutzungen von 1990 vor. Zwischen der Landnutzung von 1990 und der von 2000 gibt es jedoch nur geringe Unterschiede. Die dritte gewählte Landnutzung ist fiktiv. Hier wurde bewusst mehr Wald anstelle von landwirtschaftlichen Flächen und Siedlungen gewählt.

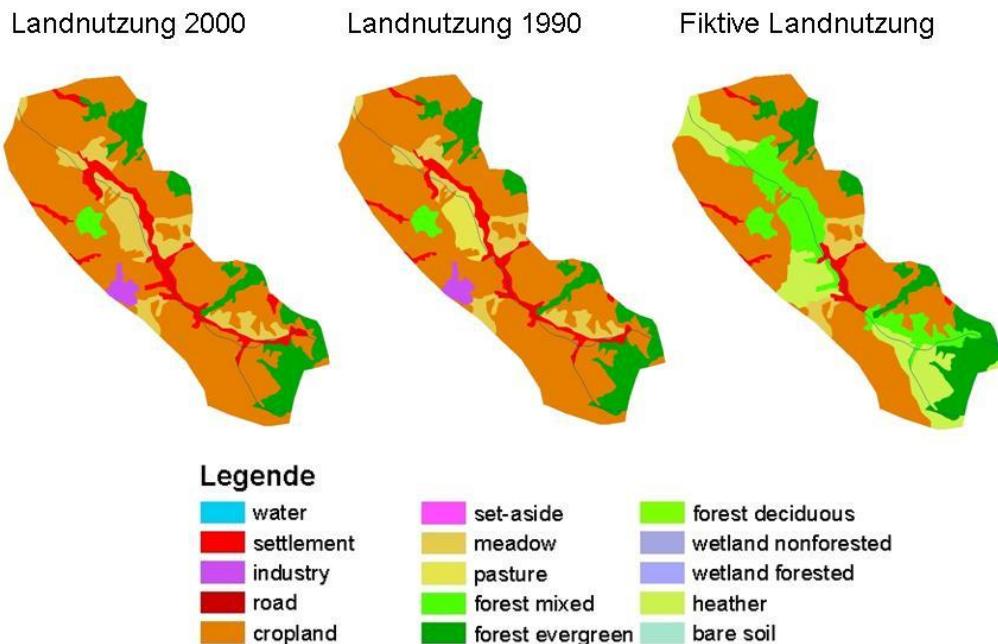


Abbildung 15: Verschiedene Landnutzungen für das Gebiet Mülsenbach

In Abbildung 16 sind die Auswirkungen der verschiedenen Landnutzungen in den Simulationen im Vergleich zu den realen Pegeldaten abgebildet. Auf Grund der geringen Unterschiede zwischen den Landnutzungen von 2000 und 1990 war zu erwarten, dass die Durchflüsse dieser Simulationen ähnlich sein würden. Tatsächlich sind sie sogar beinahe identisch. Ganz anders hingegen verhält sich der simulierte Durchfluss der fiktiven Landnutzung. Hier ist zu sehen, dass der Durchfluss deutlich unter den beiden anderen simulierten und den realen Pegeldaten liegt, was auf die größere Anzahl an Waldflächen zurückzuführen ist. Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass es vor 1990 möglicherweise erhebliche Landnutzungsänderungen gegeben hat.

Diese Auffälligkeit kann jedoch darüber hinaus von zusätzlichen kleineren Faktoren beeinflusst sein. Beispielsweise können Besitzer von Kleingärten Wasser für die Bewässerung entnommen haben. Eine weitere Möglichkeit könnte sein, dass Klärwerke das geklärte Wasser inzwischen wieder zurück ins Gewässer leiten.

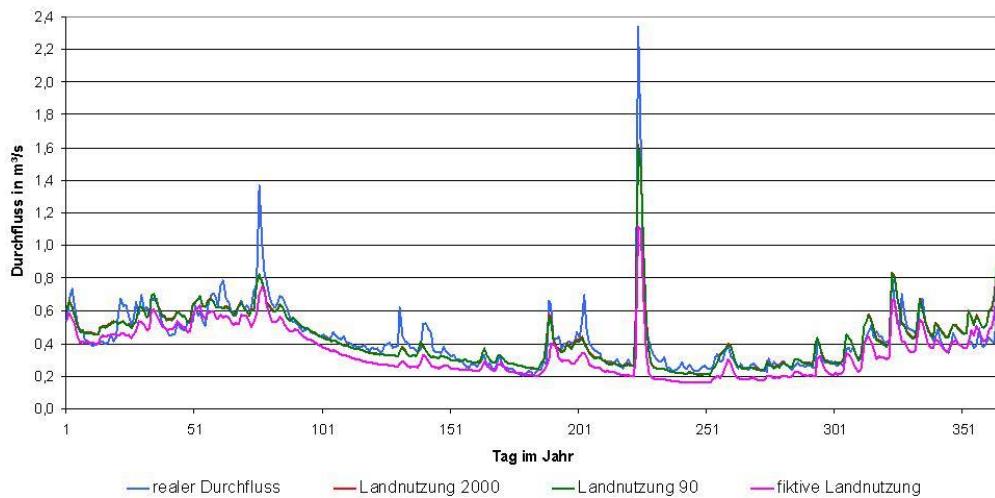


Abbildung 16: Einfluss von Landnutzung auf den Durchfluss für 1996-2004 im Gebiet Mülsenbach

Es ist davon auszugehen, dass es auch in Zukunft Landnutzungsänderungen geben wird. Diese werden in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, da das Klima als veränderliche Variable ausreichend ist, um klimabedingte Veränderungen in der Fließwasserdynamik zu ermitteln.

Eine weitere Auffälligkeit während der Validierung trat beim Ketzerbach auf. Hier werden in den Jahren 1971–1980 keine Flutspitzen simuliert, wie in Abbildung 17 zu sehen ist. Rücksprachen mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie haben ergeben, dass die Flutspitzen in den realen Pegeldaten durch Starkniederschläge hervorgerufen worden sind. Diese Starkniederschläge sind in den Klimadateien der verwendeten Klimastationen zu finden. Auch die interpolierten Klimadateien enthalten Starkniederschläge an entsprechender Stelle. Unter den Ergebnis-Dateien, die nach einer SWIM-Simulation ausgegeben werden, befindet sich ebenfalls eine Datei, welche die täglichen Niederschläge in dem Einzugsgebiet enthält (ebenfalls in Abbildung 17 dargestellt). Auch hier sind Starkniederschläge erfasst. Der Versuch, die Flutspitzen durch Veränderung der Kalibrierungsparameter zu erhalten, ist fehlgeschlagen. Die Ursachen für diese Auffälligkeit konnten so nicht geklärt werden.

Dennoch könnte die Ursache für diese Auffälligkeit in den Niederschlägen liegen. In das Modell fließt für jeden Tag der Niederschlag mit ein, also der Niederschlag, der in 24 Stunden fällt. Starkniederschläge finden oft jedoch in viel geringerer Zeit statt. Da der Boden in so kurzer Zeit nicht so viel Wasser aufnehmen kann, fließt mehr Wasser in das Gewässer ab, was in der Realität wiederum zu Hochwasser führt. Im Modell ist gegebenenfalls die Zeitkomponente das Problem, da hier nicht mit einfließt, über welchen Zeitraum der Starkniederschlag tatsächlich stattgefunden hat; im Modell dauert er 24 Stunden. In dieser Zeitspanne ist der Boden möglicherweise in der Lage, die Wassermengen aufzunehmen, da die Versickerung vom Durchlässigkeitsvermögen der einzelnen Bodenarten abhängig ist [Stadt

Bottrop – Umweltamt – Umweltplanung und -vorsorge (2008 S.11)]. In den Ergebnissen einer SWIM-Simulation kann man unter anderem auch die Grundwasserneubildung sehen. In diesen Daten ist an den entsprechenden Stellen (zum Datum des Starkniederschlages) ein Anstieg der Grundwasserneubildung zu verzeichnen. Wird SWIM auf große Einzugsgebiete (wie z. B. die Elbe) angewandt, fallen punktuelle Starkniederschläge nicht so sehr ins Gewicht. Arbeitet man jedoch mit so kleinen Gebieten wie in dieser Arbeit, fallen lokale Extremerscheinungen stärker auf.

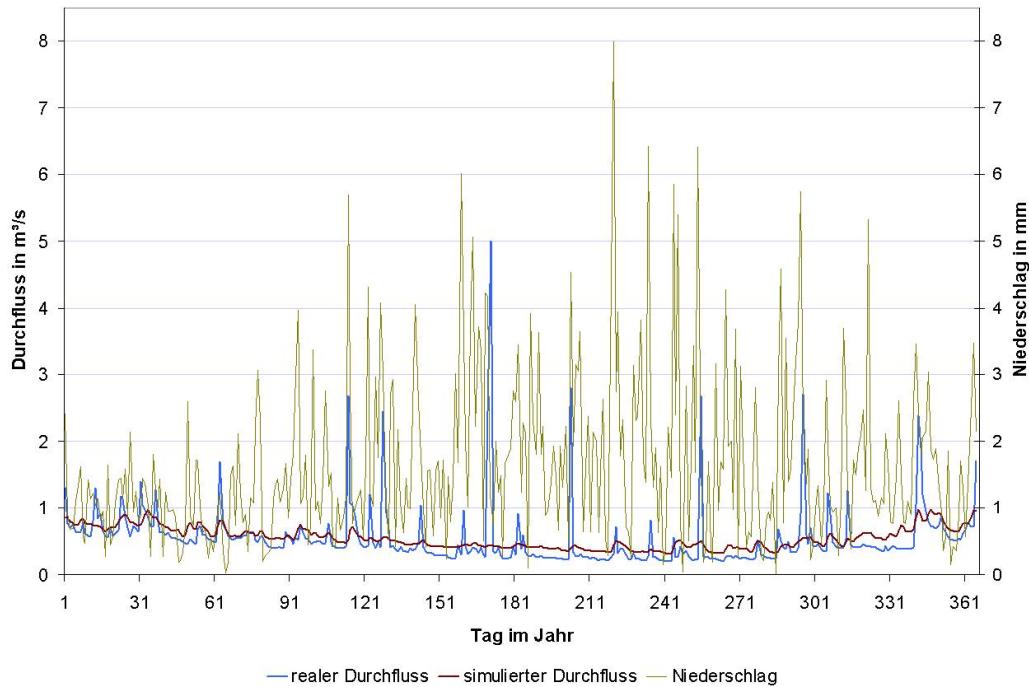


Abbildung 17: Simulation 1971–1980 für den Ketzerbach

Die Gebiete wurden für den Zeitraum 1996–2004 kalibriert. Wie bereits in Abschnitt 4.3 beschrieben, werden die Niedrigwasser in allen Gebieten sehr gut simuliert. Die Hochwasser sind nicht so gut wiedergegeben, jedoch ausreichend für weitere Untersuchungen. Für genauere Simulationen wären Daten speziell für so kleine Gebiete notwendig. Da der Kalibrierungszeitraum zeitnah ist, können unter den gegebenen Bedingungen (Landnutzung und Boden von 2000) Simulationen für die Zukunft vorgenommen werden.

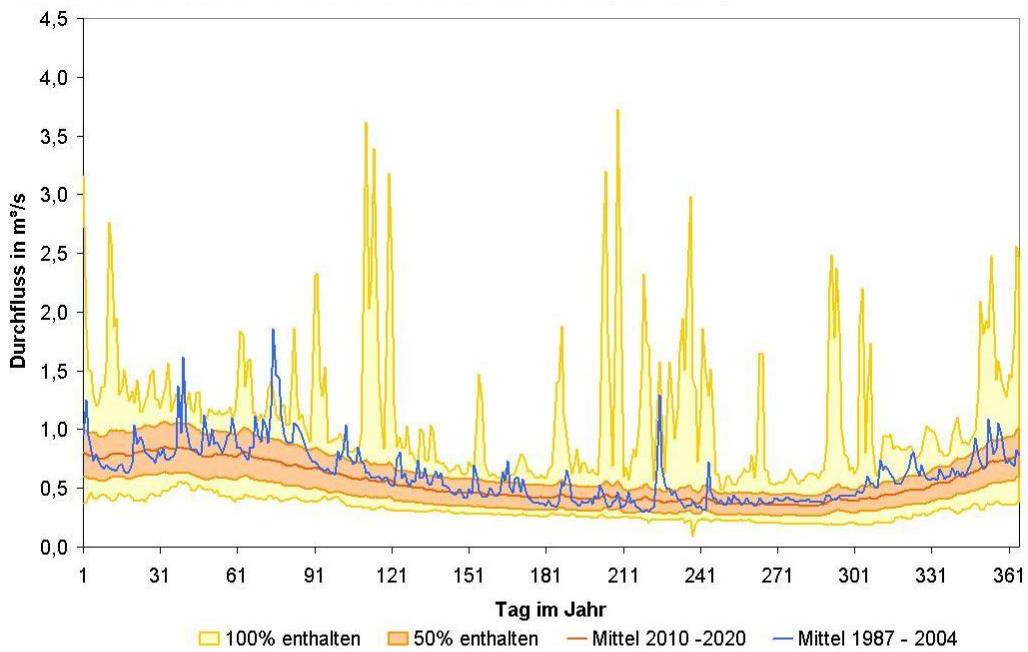
6 Ergebnisse der Simulationen

6.1 Änderungen der Wasserdynamik

6.1.1 Veränderungen des Durchflusses

6.1.1.1 Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch

Szenario 2010-2020 und mittlerer Abfluss der Referenz (1987-2004)



Szenario 2050-2060 und mittlerer Abfluss der Referenz (1987-2004)

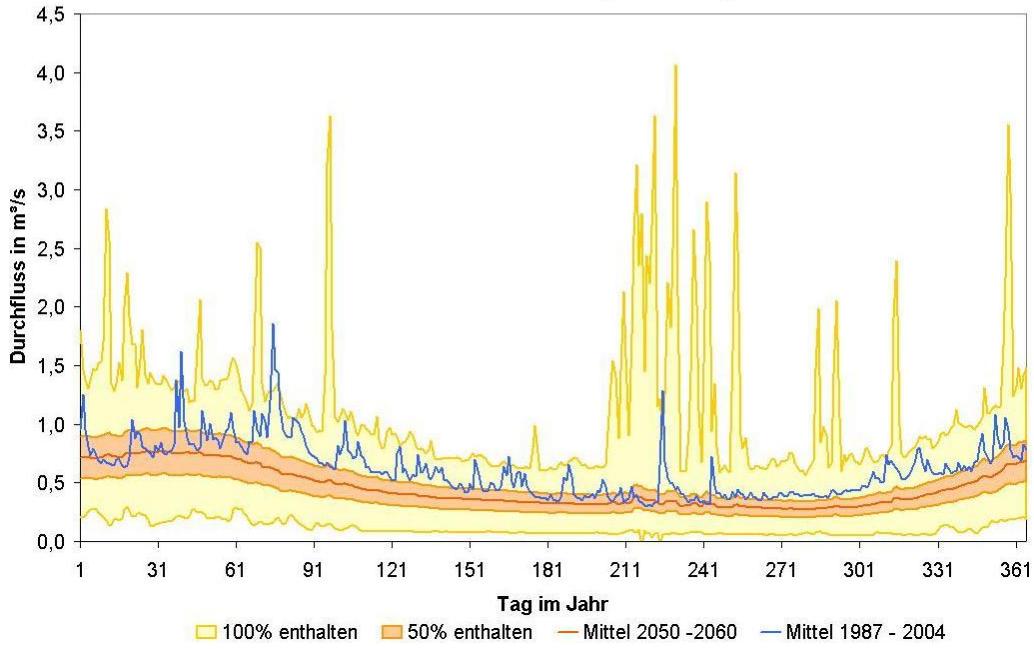


Abbildung 18: Ketzerbach: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich

In Abbildung 18 sind Szenariodiagramme für zwei unterschiedliche Zeitabschnitte (2010–2020 und 2050–2060) dargestellt. Der gelbe Bereich zeigt pro Tag den Minimum- und Maximum-Durchfluss für den jeweiligen Zeitraum von allen hundert Realisierungen des Szenarios an. Es ist also der Bereich, der durch alle hundert Realisierungen aufgespannt wird. Die rote Linie gibt den Mittelwert pro Tag der Realisierungen für den entsprechenden Zeitraum an. Im roten Bereich sind mindestens 50 Prozent der Realisierungen enthalten. Er ist definiert durch 25 % des Mittelwertes, die auf den Mittelwert aufaddiert bzw. von ihm abgezogen wurden. Um Veränderungen zu erkennen, wurde zusätzlich das Durchschnittsjahr für eine Referenzperiode, für die reale Pegeldaten verwendet wurden, hinzugefügt. Dieses Vergleichsjahr ist durch die blaue Kurve gekennzeichnet.

In den eben erklärten Szenariodiagrammen sind deutliche Unterschiede zwischen beiden Zeitabschnitten erkennbar. Besonders auffällig ist die Minimumkurve. Sie ist im Zeitabschnitt 2050–2060 deutlich niedriger als 2010–2020. Das Risiko für Niedrigwasser scheint hier deutlich anzusteigen. In diesem Gebiet kann es sogar zu vorübergehenden Austrocknungen kommen. Ob die Anzahl der Hochwasser zurückgeht oder zunimmt, kann erst in der Schwellwertanalyse betrachtet werden, da es in den beiden Diagrammen kaum einen Unterschied zwischen den Anzahlen der Flutspitzen gibt. Der rote Bereich (50 % enthalten) und der Mittelwert in dem Diagramm von 2010–2020 fällt gut mit dem Durchschnittsjahr der Referenzperiode zusammen. In dem Diagramm von 2050–2060 ist dies jedoch nicht der Fall. Hier ist sichtbar, dass der rote Bereich sowie die Mittelwertskurve deutlich unter der Referenzperiode liegen. Daraus lässt sich ableiten, dass in diesem Gebiet in Zukunft mit einem dauerhaft niedrigeren Durchfluss zu rechnen ist.

Um die Entwicklung des Durchflusses näher einschätzen zu können, wurden in einem zusätzlichen Diagramm, welches in Abbildung 19 dargestellt ist, die Mittelwertskurven der fünf verschiedenen Zeitabschnitte (2010–2020, 2020–2030, 2030–2040, 2040–2050, 2050–2060) gegenübergestellt. Zum Vergleich wurde noch einmal die Referenzperiode, die schon aus den anderen Diagrammen bekannt ist, dargestellt.

In dem Mittelwert-Diagramm ist zu erkennen, dass der Durchfluss mit der Zeit deutlich absinkt, speziell im Frühjahr und Herbst. Im Winter ist der Rückgang etwas geringer. Im Sommer ist zwar ein Rückgang erkennbar, jedoch überlagern sich die Kurven auch stark. Die Flutspitze der Referenzperiode im Sommer ist durch das Elbehochwasser von 2002 hervorgerufen. Die Referenzperiode hat einen durchschnittlichen Durchfluss von $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$. Beim simulierten Durchfluss der Referenzperiode beträgt der mittlere Durchfluss $0,61 \text{ m}^3/\text{s}$. In dem Zeitabschnitt 2010–2020 der Simulation geht er auf $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ zurück. 2050–2060 beträgt der Durchfluss nur noch $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$. Da sich dieses Gebiet in einem Teil Deutschlands befindet, der einen negativen Niederschlagstrend aufweist, war hier ein Rückgang des Durchflusses zu erwarten. In Abbildung 20 sind der reale und der simulierte Durchfluss gegenübergestellt. Lediglich die Flutspitzen zum Anfang des Jahres sind zu niedrig.

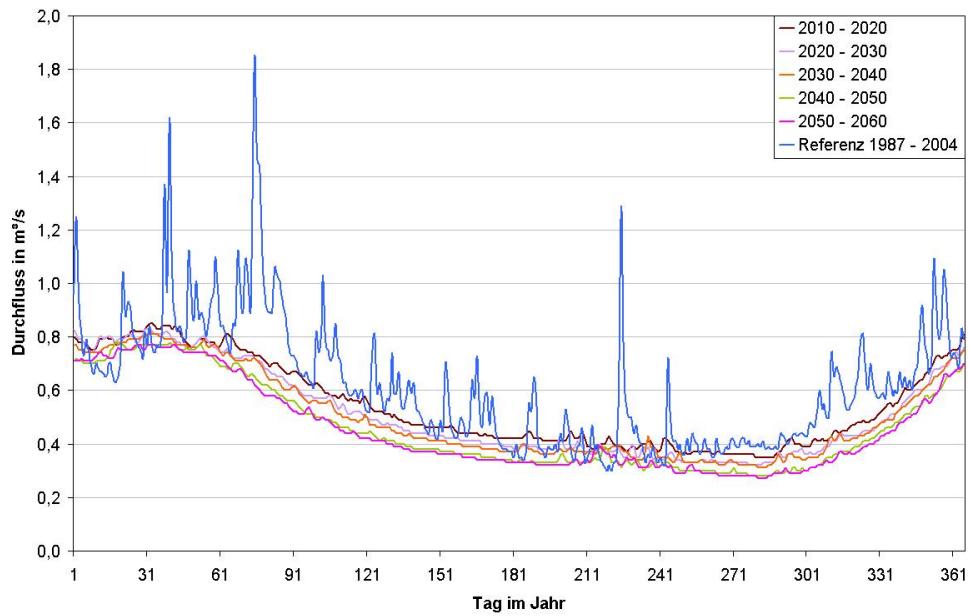


Abbildung 19: Ketzerbach: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1987–2004)

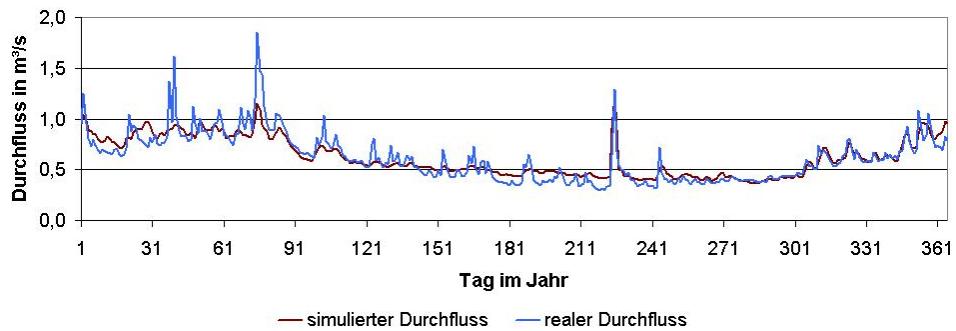


Abbildung 20: Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1987–2004 im Gebiet des Ketzerbaches

Der Rückgang des Durchflusses ist jedoch nicht nur durch den Rückgang des Niederschlags begründet. Auch andere hydrologische Größen wie die Verdunstung, die Grundwasserneubildung und der direkte Abfluss (Oberflächen- und Zwischenabfluss) spielen eine Rolle. Alle vier Faktoren sind in Abbildung 21 dargestellt. Auf der linken Seite sind Box-Whisker-Plots abgebildet. In diesen Diagrammen werden die Minimum- und die Maximumwerte der Referenz und dem Szenarioabschnitt 2050–2060 dargestellt. Der gelbe Bereich wird durch 25 % bzw. 75 % des Bereiches zwischen den beiden Extremwerten aufgespannt. Die grüne Linie gibt den Mittelwert der Referenz und des Szenarioabschnittes für die jeweilige hydrologische Größe an. Auf der rechten Seite dieser Abbildung sind Karten dargestellt. Es wird immer die Karte der Referenzperiode und die von dem Zeitabschnitt 2050–2060 des Szenarios gegenübergestellt. So erhält man einen Eindruck, wie sich die hydrologischen Größen in den einzelnen Teileinzugsgebieten (Niederschlag) bzw. Hydrotopen (Verdunstung, Grundwasserneubildung, direkter Abfluss) verändern. Für diese Darstellungen wurden neben den simulierten Szenariodataen die simulierten Daten der Referenzperiode von SWIM verwendet.

Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, geht der Niederschlag um ca. 50 mm zurück, was sich auch in der dazugehörigen Karte gut widerspiegelt. Bei der Verdunstung ist ebenfalls ein Rückgang (um ca. 15 mm) zu verzeichnen. Der Oberflächen-/Zwischenabfluss geht nur minimal, um ca. 7 mm, zurück. Ein wesentlicher Grund für den Rückgang des Durchflusses in diesem Gebiet ist auch der starke Rückgang der Grundwasserneubildung. Hier ist in der Simulation ein Rückgang von ca. 30 mm feststellbar.

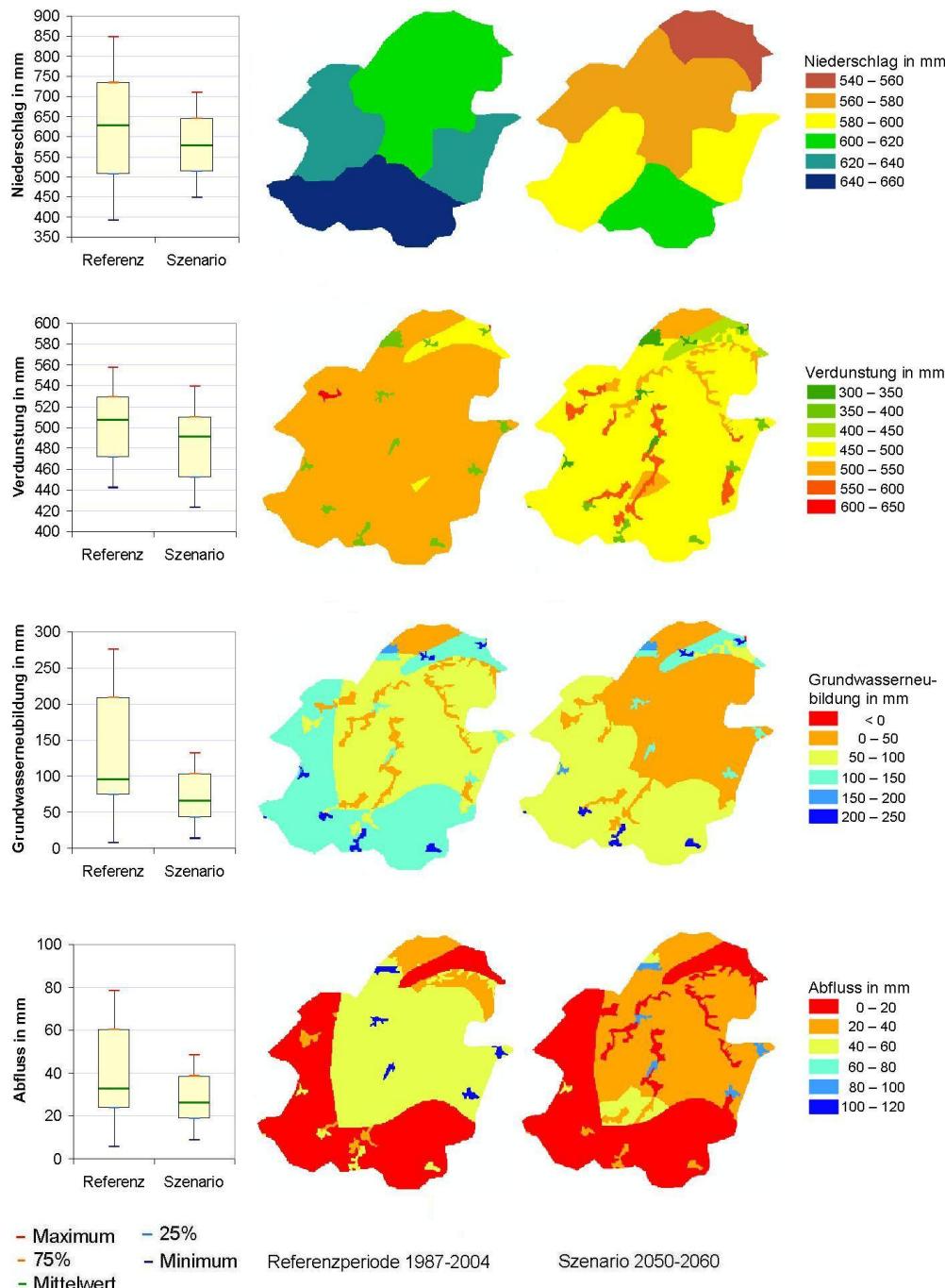


Abbildung 21: Ketscherbach: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss

6.1.1.2 Hamel – Hamel und Nebenbäche

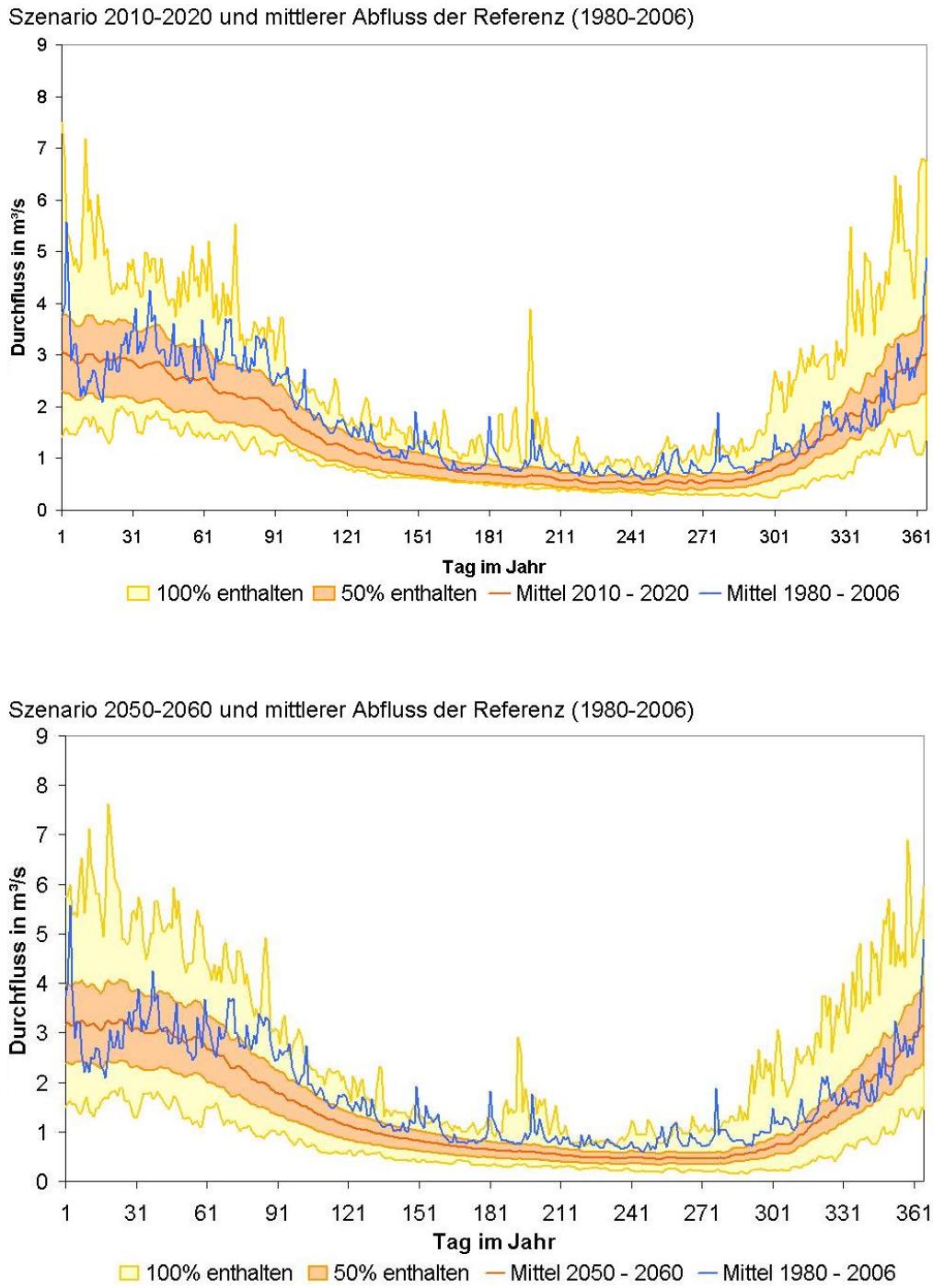


Abbildung 22: Hamel: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich

Abbildung 22 zeigt die zwei Szenariodiagramme der Hamel. Die beiden Diagramme unterscheiden sich kaum. Es fällt lediglich auf, dass die Minimumkurve von 2050–2060 im Sommer etwas tiefer ist als in dem Zeitraum 2010–2020. Auffallend ist auch, dass sich die Mittelwertskurve von 2010–2020 schon deutlich unter der Kurve der Referenzperiode befindet, dann aber bis 2050–2060 kaum noch abnimmt. Bei genauerer Betrachtung des Winterabschnittes fällt auf, dass die Maximumkurve 2050–2060 eine höhere Amplitude besitzt als die von 2010–2020. Weitere markante Unterschiede sind nicht zu erkennen.

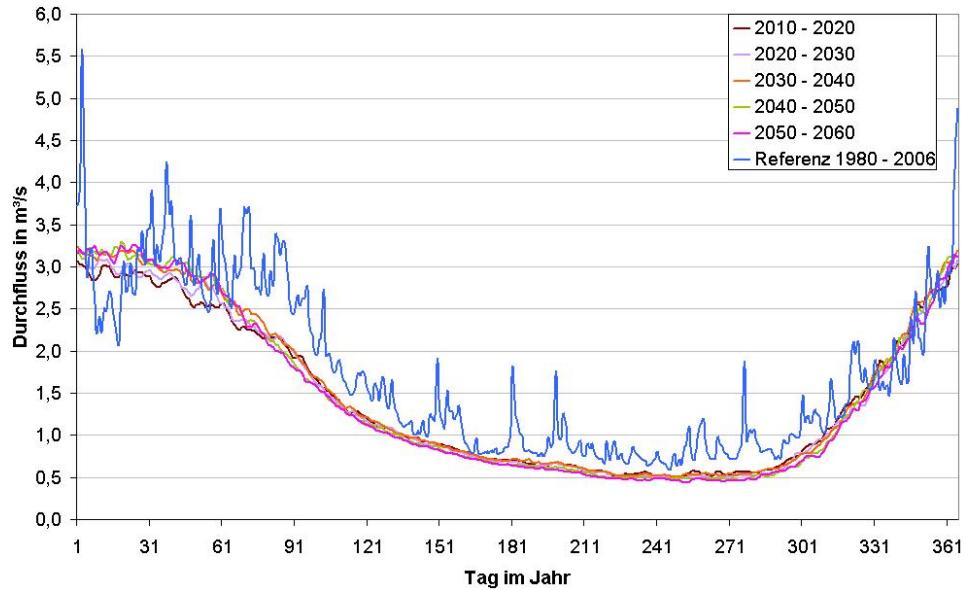


Abbildung 23: Hamel: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1980–2006)

Bei Betrachtung des Mittelwert-Diagramms in Abbildung 23 ist zu erkennen, dass der Durchfluss im Sommer minimal zurückgeht. Im Winter hingegen steigt er im Laufe der Zeit an. Hier fällt auch auf, dass die Kurve der Referenzperiode deutlich über allen Mittelwertskurven liegt. Der durchschnittliche Durchfluss der realen Pegeldaten von 1980–2006 liegt bei $1,72 \text{ m}^3/\text{s}$, der des simulierten Durchflusses jedoch nur bei $1,49 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Zeitabschnitt 2010–2020 des Szenarios liegt er nur noch bei $1,44 \text{ m}^3/\text{s}$. Bis zum Zeitabschnitt 2050–2060 geht er nur noch unmerklich zurück, und beträgt $1,43 \text{ m}^3/\text{s}$.

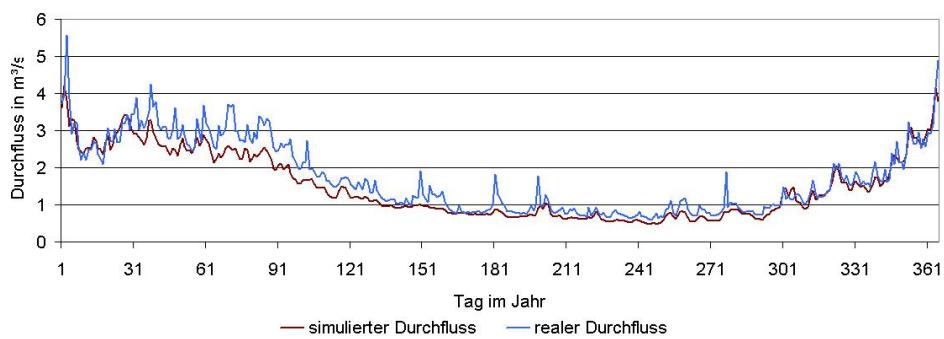


Abbildung 24: Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1980-2006 im Gebiet der Hamel

Dieser starke Unterschied zwischen der realen und der simulierten Referenz ist gegebenenfalls durch eine Abweichung im Modell hervorgerufen. An dieser Stelle ist es sinnvoll, den simulierten und realen Durchfluss der Referenzperiode genauer zu vergleichen. Für diesen Zweck dient das Diagramm in Abbildung 24. Der simulierte Sommerdurchfluss passt mit dem realen sehr gut zusammen. Der Unterschied der durchschnittlichen Durchflüsse ist mit dem Durchfluss im Frühjahr zu begründen. Hier ist der simulierte deutlich niedriger als der reale Durchfluss. Auf Grund des gut simulierten Sommerdurchflusses in der Referenzperiode kann davon ausgegangen werden, dass der Sommerabfluss im Szenario ebenfalls gut simuliert wurde, demnach ist dann mit einem Rückgang des Durchflusses im Sommer zu rechnen. Im

Frühjahr wird der Durchfluss jedoch nicht so stark zurückgehen, wie in Abbildung 23 bei Betrachtung der Referenzkurven und der Mittelwertkurven zu sehen ist.

Wie beim Ketzerbach wurden auch hier die hydrologischen Größen betrachtet, die Einfluss auf die Durchflussänderungen in diesem Gebiet haben (Abb. 25). Hier ist der Rückgang des Durchflusses unter anderem durch den Rückgang des Niederschlags um ca. 20 mm begründet. Bei der Verdunstung ist eine Verminderung um ca. 10 mm zu verzeichnen. In Einzelfällen kann sie jedoch auch über dem Mittel der Referenzperiode liegen, was in dem entsprechenden Box-Whisker-Plot-Diagramm zu sehen ist. Die Grundwasserneubildung und der direkte Abfluss gehen nur minimal um ca. 5 mm zurück.

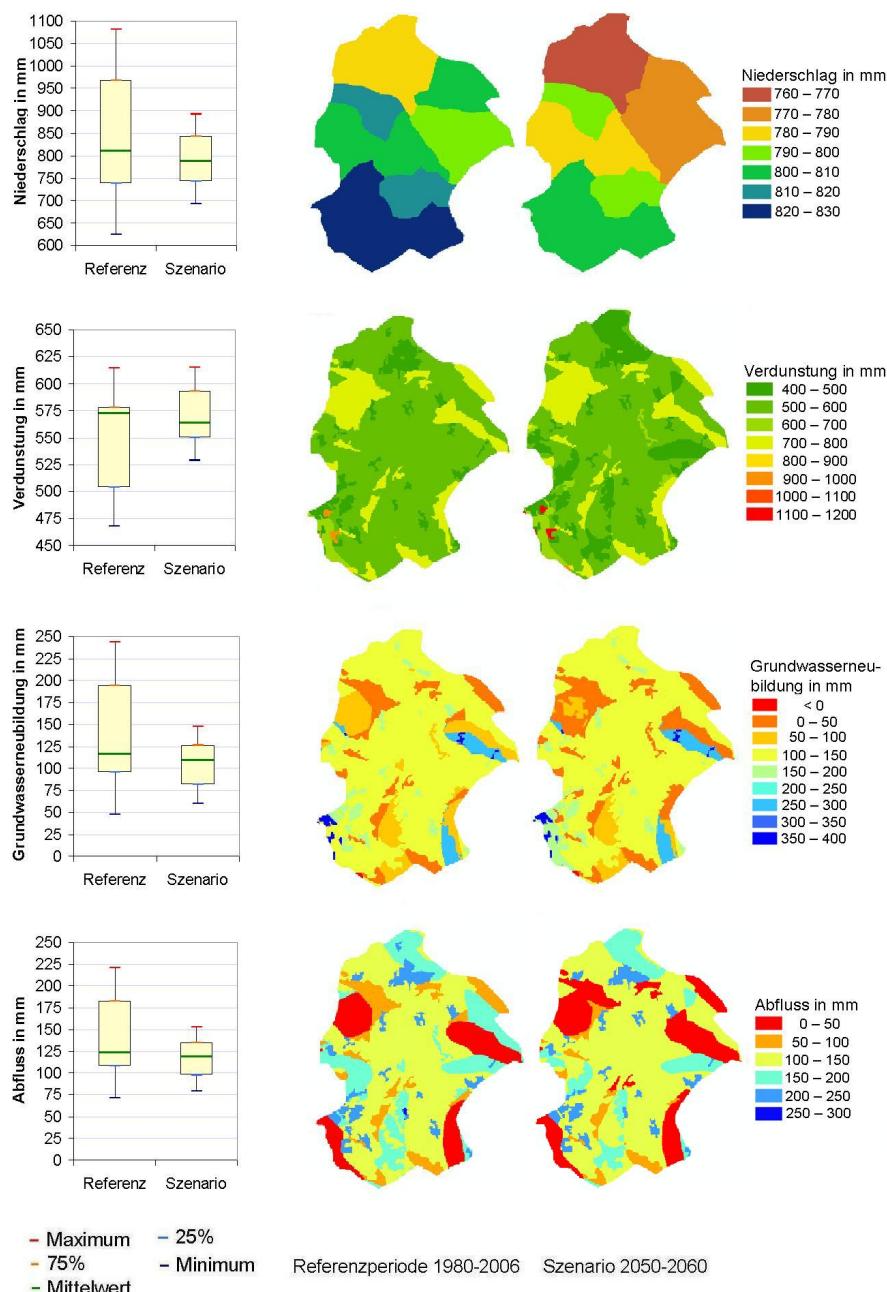


Abbildung 25: Hamel: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss

6.1.1.3 Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach

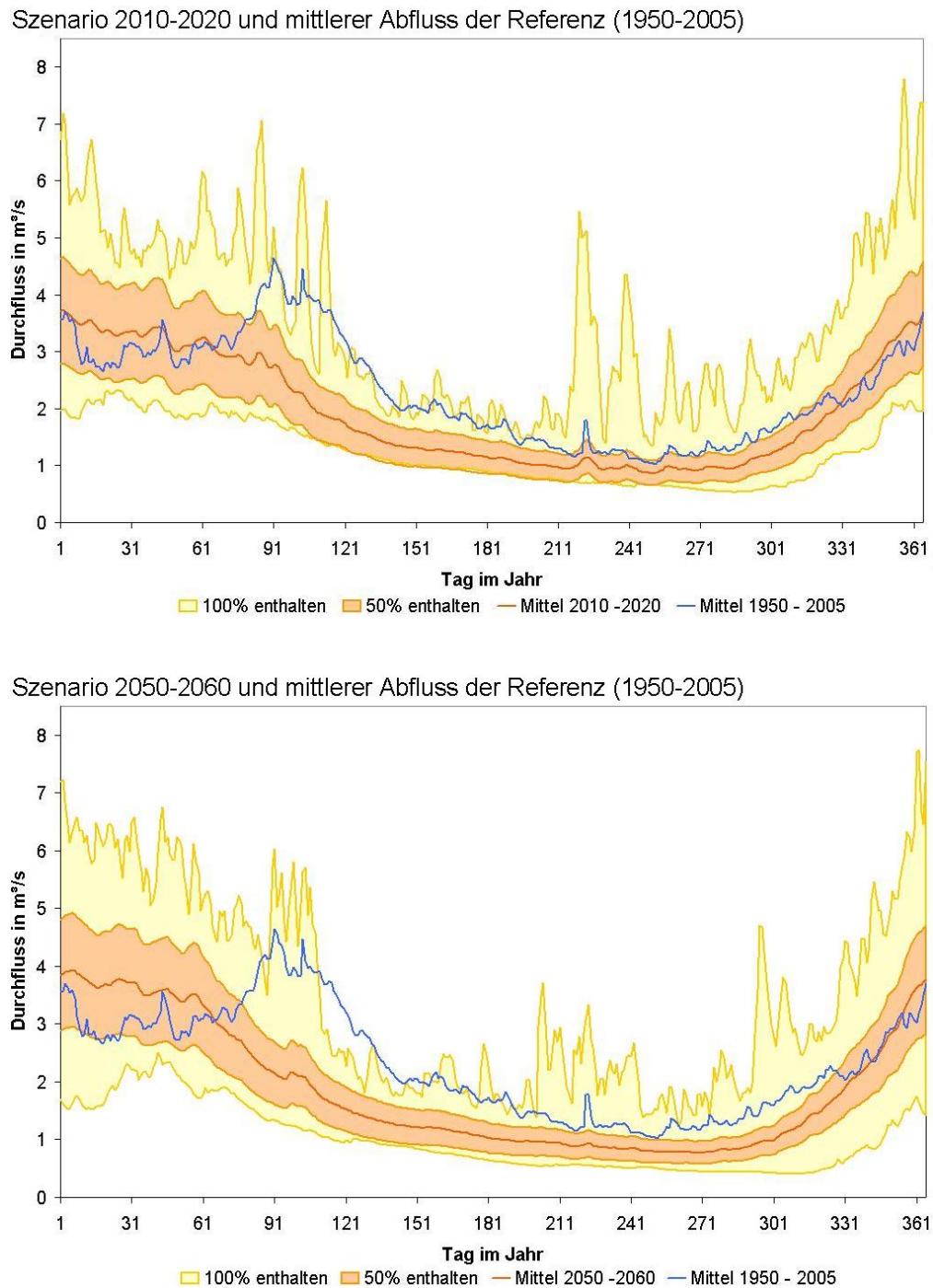


Abbildung 26: Wilde Gera: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich

Die Szenariodiagramme der Wilden Gera in Abbildung 26 sehen sich sehr ähnlich. Dennoch ist auch hier anhand des roten Bereiches (50 % enthalten) sowie der Minimumskurve und der Durchschnittskurve zu sehen, dass der Durchfluss im Sommer zurückgeht. Die Maximumkurve ist 2050–2060 im Winter höher als 2010–2020. Das gilt ebenfalls für die Durchschnittskurve und damit auch dem roten Bereich (50 % enthalten). Das lässt vermuten, dass der Durchfluss im Winter steigt. Eine Veränderung der Flutspitzen des Frühjahrshochwassers ist in diesen Diagrammen nicht zu erkennen.

Das Mittelwert-Diagramm in Abbildung 27 zeigt ein ähnliches Bild wie das der Hamel (Abb. 23). Im Sommer geht der Durchfluss etwas zurück, im Winter hingegen nimmt er deutlich zu. Auch in diesem Gebiet ist besonders auffällig, dass bereits die Mittelwertskurve von 2010–2020 deutlich unterhalb der Referenzperiode verläuft. Bei Betrachtung der realen und der simulierten Referenzperiode (Abb. 28) ist feststellbar, dass es in diesem Gebiet ebenfalls wie bei der Hamel Unstimmigkeiten gibt. In der Referenzperiode der realen Pegeldaten beträgt der durchschnittliche Durchfluss $2,33 \text{ m}^3/\text{s}$. In der simulierten Referenzperiode beträgt er nur $1,88 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Zeitabschnitt 2010–2020 beträgt der Durchfluss durchschnittlich noch $1,94 \text{ m}^3/\text{s}$. 2050–2060 geht der Durchfluss noch weiter zurück auf $1,85 \text{ m}^3/\text{s}$.

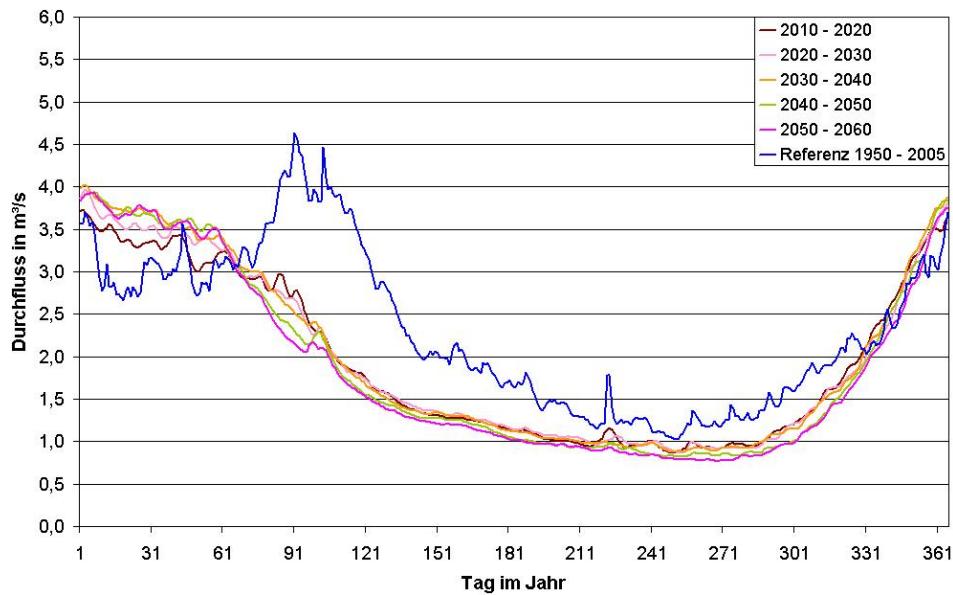


Abbildung 27: Wilde Gera: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1951–2005)

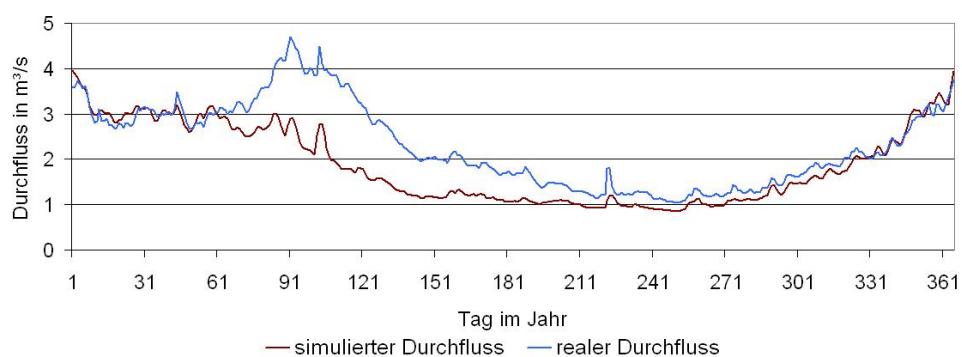


Abbildung 28: Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1951–2005 im Gebiet der Wilden Gera

Auch in diesem Gebiet ist es sinnvoll, den simulierten und realen Durchfluss genauer zu vergleichen (Abb. 28). Der simulierte Durchfluss ist im Sommer etwas niedriger als der reale Durchfluss und würde im Mittelwert-Diagramm ungefähr mit der Durchschnittskurve von 2010–2020 zusammenfallen. Demnach geht der Durchfluss im Sommer vermutlich tatsächlich zurück, jedoch nicht so stark wie im Vergleich reale Referenzperiode und Szenarioabschnitt 2010–2020. Der deutliche Unterschied zwischen den durchschnittlichen Durchflüssen ist in

der Simulation des Frühjahrsdurchflusses begründet. In der simulierten Referenzperiode ist das Frühjahrshochwasser kaum bis gar nicht wiedergegeben. Bei noch genauerer Betrachtung dieser Daten wurde festgestellt, dass in der simulierten Referenzperiode zwar Frühjahrshochwasser in einem gleichen Ausmaß wie bei der realen Referenzperiode simuliert worden sind, diese jedoch deutlich kürzer anhalten. Dieses Problem hängt mit den bereits beschriebenen Landnutzungsänderungen in der Vergangenheit zusammen und macht die Schwellwertanalyse bezüglich des Risikos für Hochwasser in diesem Gebiet schwierig. Im Winter gibt es kaum Unterschiede zwischen der simulierten und realen Referenzperiode. Demnach ist im Winter tatsächlich von einem Anstieg des Durchflusses auszugehen.

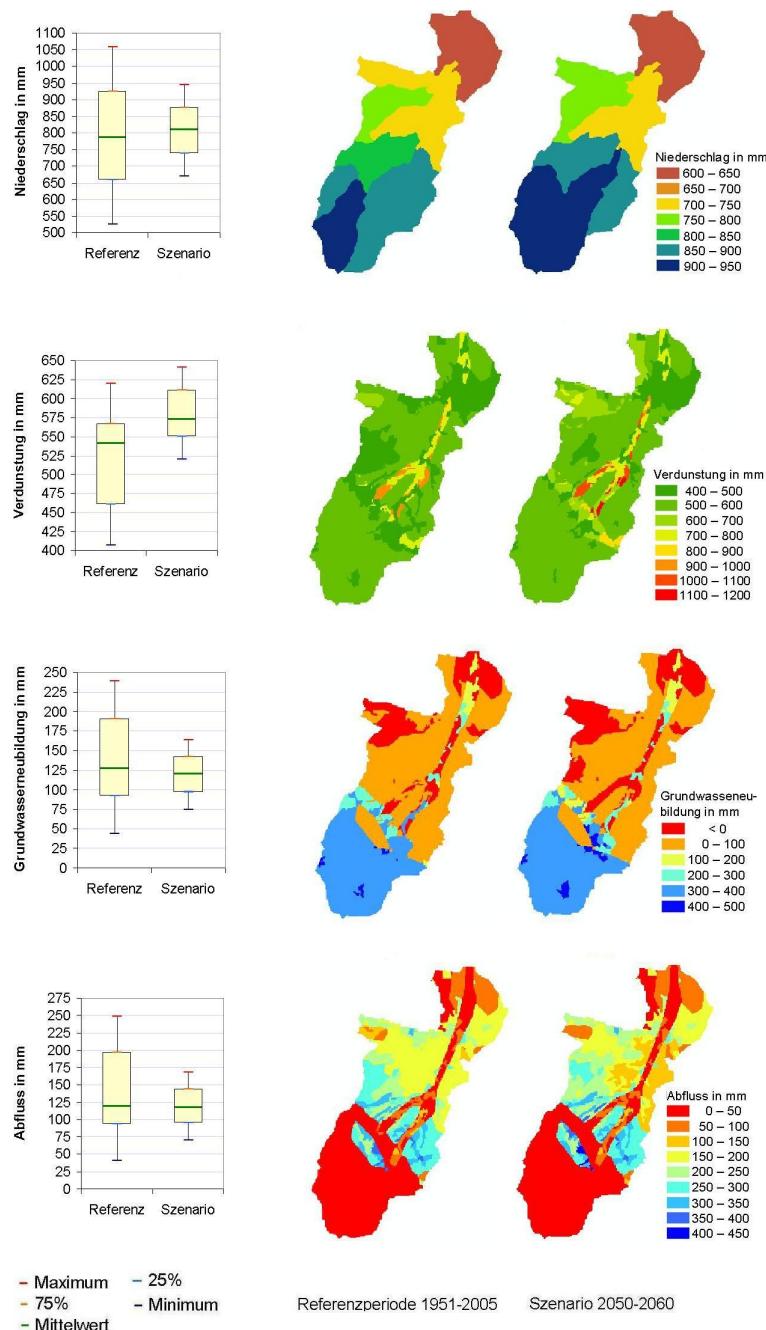


Abbildung 29: Wilde Gera: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss

Den Rückgang des Durchfluss der Wilden Gera kann man sehr gut anhand des Verhaltens der hydrologischen Größen, die in Abbildung 29 dargestellt sind, erklären. In diesem Gebiet ist zwar ein Anstieg des Niederschlags um 25 mm zu verzeichnen, jedoch steigt in diesem Gebiet auch der Verbrauch von Wasser an. Im Szenarioabschnitt 2050–2060 wird ca. 30 mm mehr Wasser verdunstet als in der Referenzperiode. Außerdem ist ein geringer Rückgang der Grundwasserneubildung (ca. 7 mm) und des direkten Abflusses (ca. 1,5 mm) feststellbar.

6.1.1.4 Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal

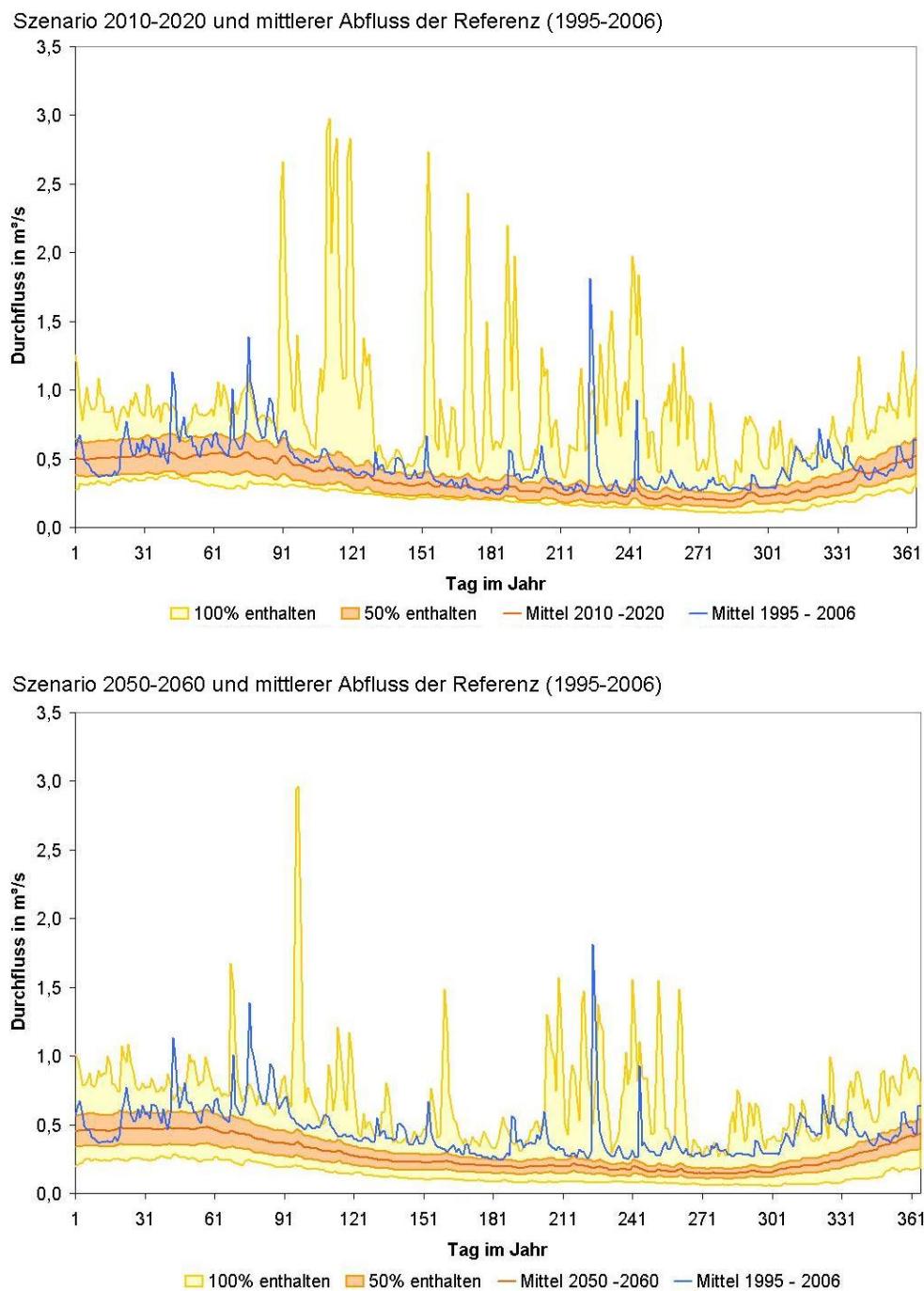


Abbildung 30: Mülsenbach: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich

Die Szenariodiagramme zum Mülsenbach-Gebiet in Abbildung 30 sind beide sehr verschieden. Es fällt sofort ins Auge, dass die Flutspitzen der Maximumkurve deutlich in ihrer Anzahl und Amplitude zurückgehen. Hier ist anzunehmen, dass sich das Hochwasserverhalten auffällig verändern wird. Der rote Bereich (50 % enthalten), die Mittelwertkurve und die Minimumkurve von 2050–2060 sind im Vergleich zu 2010–2010 deutlich niedriger. Vermutlich wird hier das Risiko für Niedrigwasser deutlich zunehmen. Dies wird jedoch zu einem späteren Zeitpunkt bei der Schwellwertanalyse näher untersucht. Die Flutspitze (ca. Tag 220–230) in der Referenzperiode 1995–2006 ist durch das Elbehochwasser von 2002 hervorgerufen.

In dem Diagramm mit den Mittelwertkurven aller Zeitabschnitte (Abbildung 31) ist sichtbar, dass die Durchflüsse aller fünf Zeitabschnitte im Durchschnitt deutlich unter dem der Referenzperiode 1995–2006 liegen. Die Referenzperiode hat einen mittleren Durchfluss von $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ im Jahr. Dieser Wert gilt auch für die simulierte Referenz. Im Simulationszeitraum 2010–2020 geht er bereits auf $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$ zurück. Im Szenarioabschnitt 2050–2060 beträgt er nur noch $0,28 \text{ m}^3/\text{s}$. Da es sich um tägliche Mittelwerte handelt, sind die Frühjahrshochwasser (Tag 70–80) nur schwer erkennbar. Eine Verschiebung dieser Hochwasser ist hier nicht erkennbar. Es ändert sich lediglich das Ausmaß und damit möglicherweise die Dauer. Der simulierte und beobachtete Durchfluss der Referenzperiode ist in Abbildung 32 dargestellt.

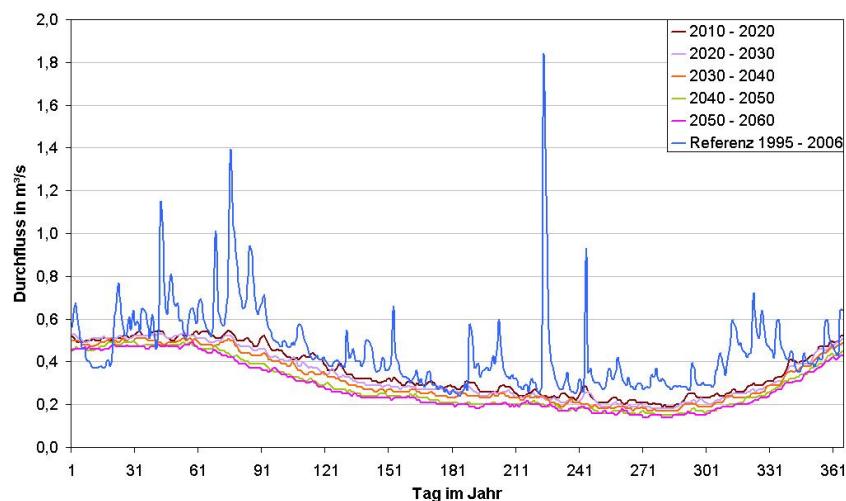


Abbildung 31: Mülsenbach: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1995–2006)

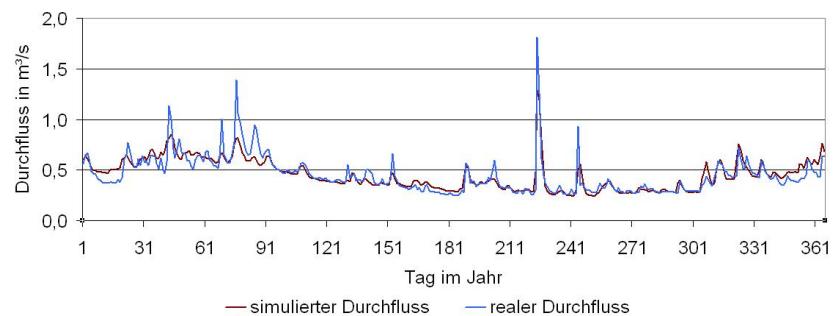


Abbildung 32: Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1995–2006 im Gebiet des Mülsenbaches

Bei Betrachtung der hydrologischen Größen, die in Abbildung 33 dargestellt sind, fällt ein Rückgang des jährlichen Niederschlags um ungefähr 90 mm auf. Im Vergleich zu den anderen Gebieten ist dies sehr hoch. Der Rückgang der Verdunstung ist mit 10 mm minimal. Die zur Verdunstung gehörende Szenario-Karte in Abbildung 33 zeigt jedoch neben Hydroopen mit zurückgehender Verdunstung auch Hydrootope, bei denen ein Anstieg der Verdunstung zu verzeichnen ist, was durch verschiedenen Landnutzungsarten bedingt sein kann. Der Unterschied zwischen Karte und Diagramm ist darin begründet, dass für die Karten die Werte der einzelnen Hydrootope und für die Diagramme die Mittelwerte des gesamten Gebietes herangezogen werden. Der deutliche Rückgang des Durchflusses in diesem Gebiet ist neben dem zurückgehenden Niederschlag auch durch die stark zurückgehende Grundwasserneubildung (um ca. 60 mm) begründet. Auch der Rückgang des Oberflächen-/Zwischenabflusses um ca. 35 mm spielt hier eine wesentliche Rolle.

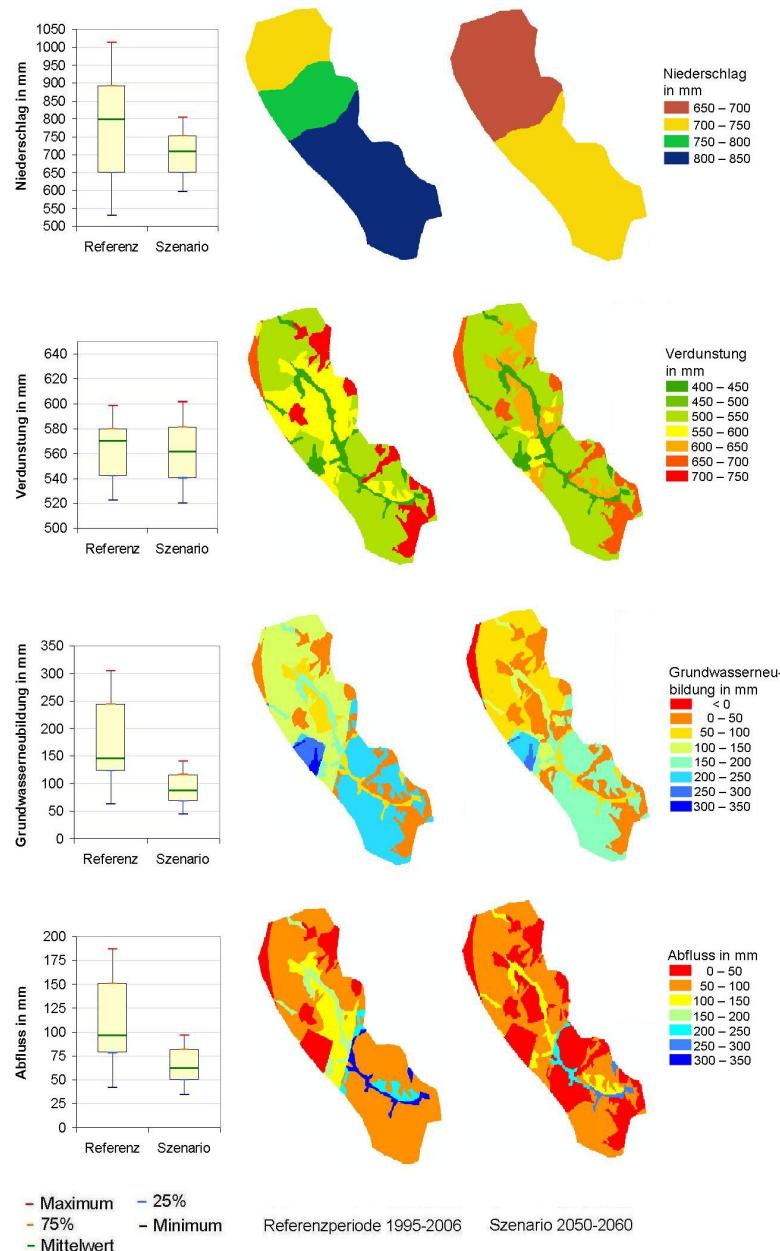


Abbildung 33: Mülzenbach: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss

6.1.1.5 Bära – Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron

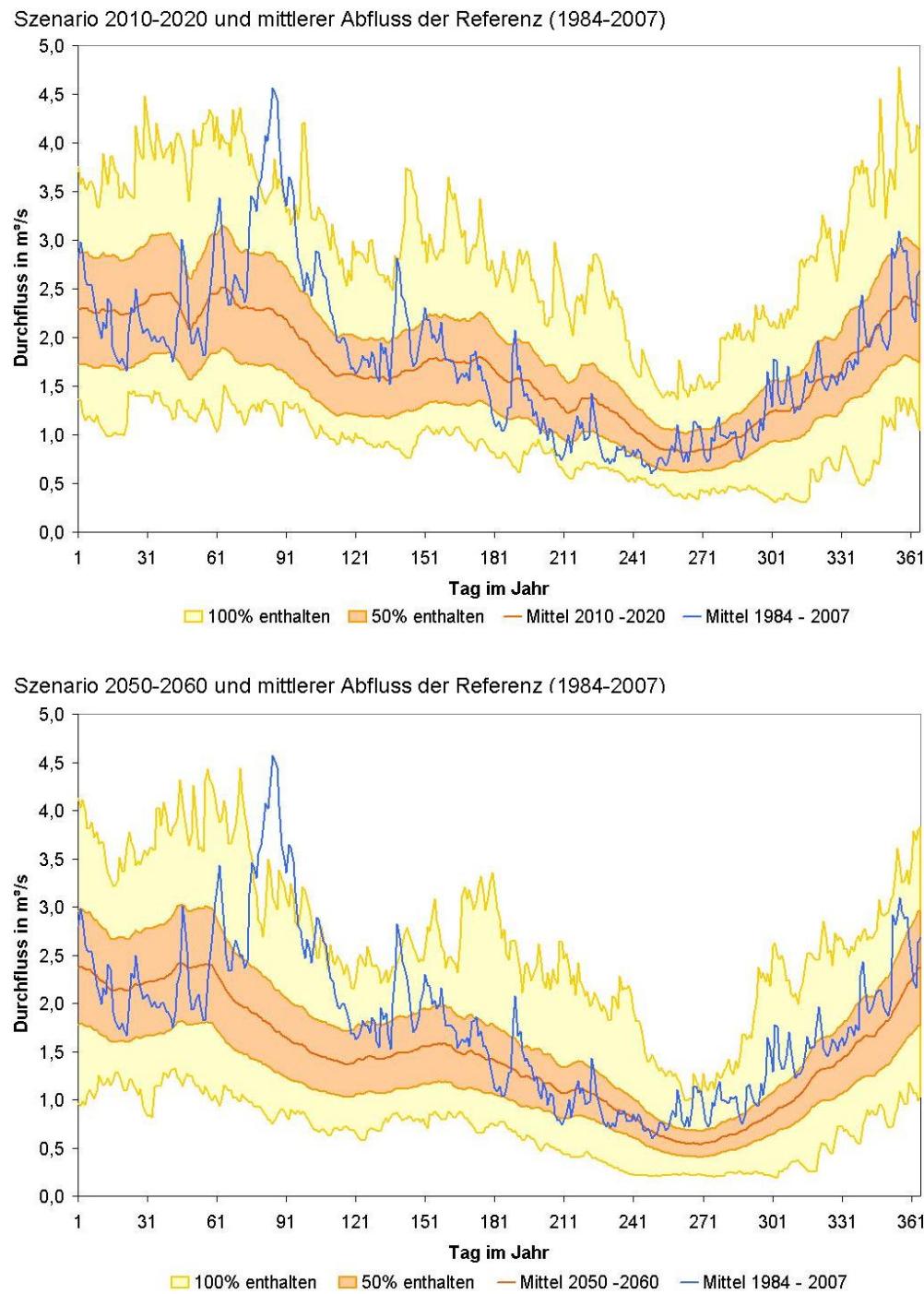


Abbildung 34: Bära: Szenario 2010–2020 und 2050–2060 im Vergleich

Das Gebiet der Bära verhält sich ähnlich wie die anderen Flüsse. Die Diagramme in Abbildung 34 sehen auf den ersten Blick ähnlich aus, speziell was die obere Extremwertkurve betrifft. Daraus lässt sich schließen, dass es keine oder nur eine geringe Änderung im Hochwasserverhalten geben wird. Die untere Extremwertkurve von 2050–2060 ist im Vergleich zu der von 2010–2020 deutlich niedriger. Daher neigt dieses Gebiet wahrscheinlich zu häufiger auftretenden Niedrigwasser. Genaueres hierzu wird die Schwellwertanalyse zeigen. Betrachtet man die roten Bereiche (50 % enthalten) und die Kurven der Durchschnitte der

Zeitabschnitte in Bezug auf die Referenzperiode (1984–2007), dann stellt man fest, dass diese im Zeitabschnitt 2050–2060 deutlich niedriger sind. Das heißt, der Durchfluss in diesem Gebiet kann in Zukunft dauerhaft deutlich niedriger sein als heute.

In Abbildung 35 sind, alle mittleren Durchflüsse der fünf Zeitabschnitte dargestellt. Hier ist sehr gut erkennbar, dass der Durchfluss im Laufe der Zeit deutlich zurückgeht. In der Referenzperiode 1984–2007 ist der reale und simulierte Durchfluss durchschnittlich $1,80 \text{ m}^3/\text{s}$ stark. Im Szenarioabschnitt 2010–2020 beträgt er noch $1,70 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Zeitabschnitt 2050–2060 geht der Durchfluss zurück bis auf $1,46 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Rückgang fällt besonders stark im Frühjahr im Zusammenhang mit dem Frühjahrshochwasser auf. Es ist zu sehen, dass sich diese Flutspitzen leicht nach links verschieben in Richtung Anfang des Jahres. Somit verändert sich in diesem Gebiet neben dem sinkenden Durchfluss auch das saisonale Verhalten der Wasserdynamik. Auch für die Bära sind noch einmal zum Vergleich in Abbildung 36 der simulierte und der beobachtete Durchfluss in einem Diagramm dargestellt.

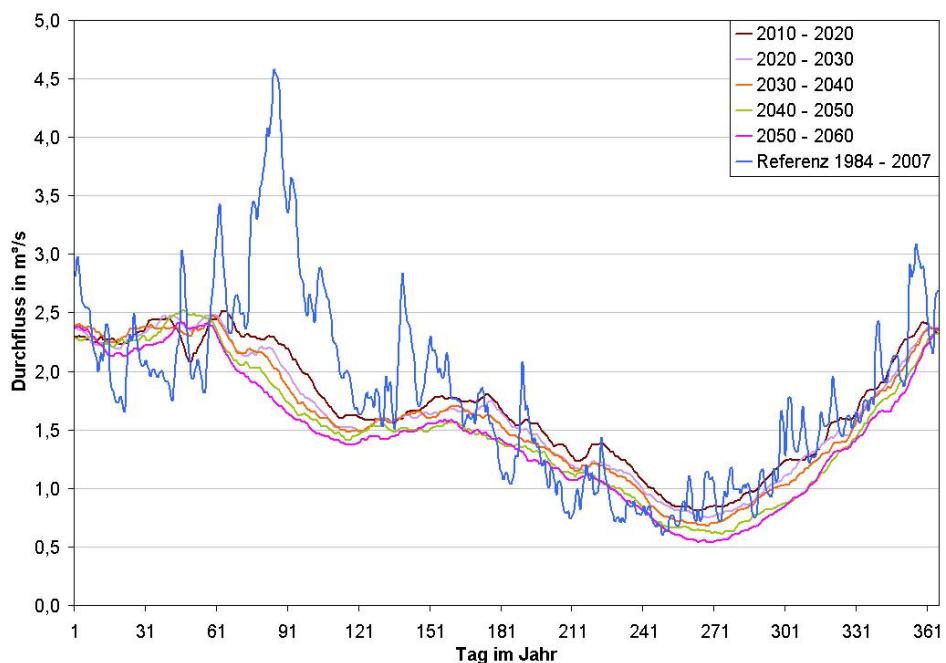


Abbildung 35: Bära: Mittel der Szenario-Abschnitte und mittlerer Abfluss der Referenz (1984–2007)

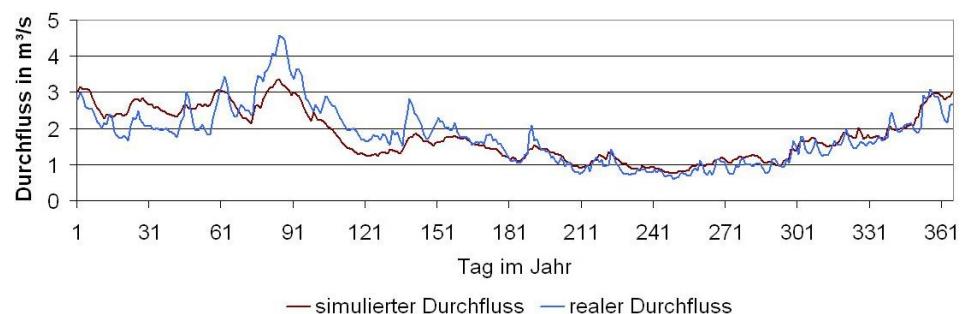


Abbildung 36: Vergleich des realen und simulierten Durchflusses von 1984–2006 im Gebiet der Bära

Wie bei den anderen Gebieten können diese Veränderungen mit den Änderungen des Niederschlages, der Verdunstung, der Grundwasserneubildung und dem direkten Abfluss in Zusammenhang gebracht werden. Diese Faktoren sind in Abbildung 37 als Diagramme und Karten dargestellt. Während der jährliche Niederschlag im Vergleich zur Referenzperiode 1984–2006 um ca. 30 mm zurückgeht, steigt die Verdunstung um ca. 50 mm an. Dadurch gehen die Grundwasserneubildung (um etwa 30 mm) und der direkte Abfluss (um etwa 55 mm) zurück. Die Referenzperiode ist bei den hydrologischen Größen in diesem Gebiet um ein Jahr kürzer, da hierfür die Daten der Simulation mit SWIM zugrunde liegen. Die Klimadaten, die für so eine Simulation benötigt werden, reichen nur bis zum Jahr 2006.

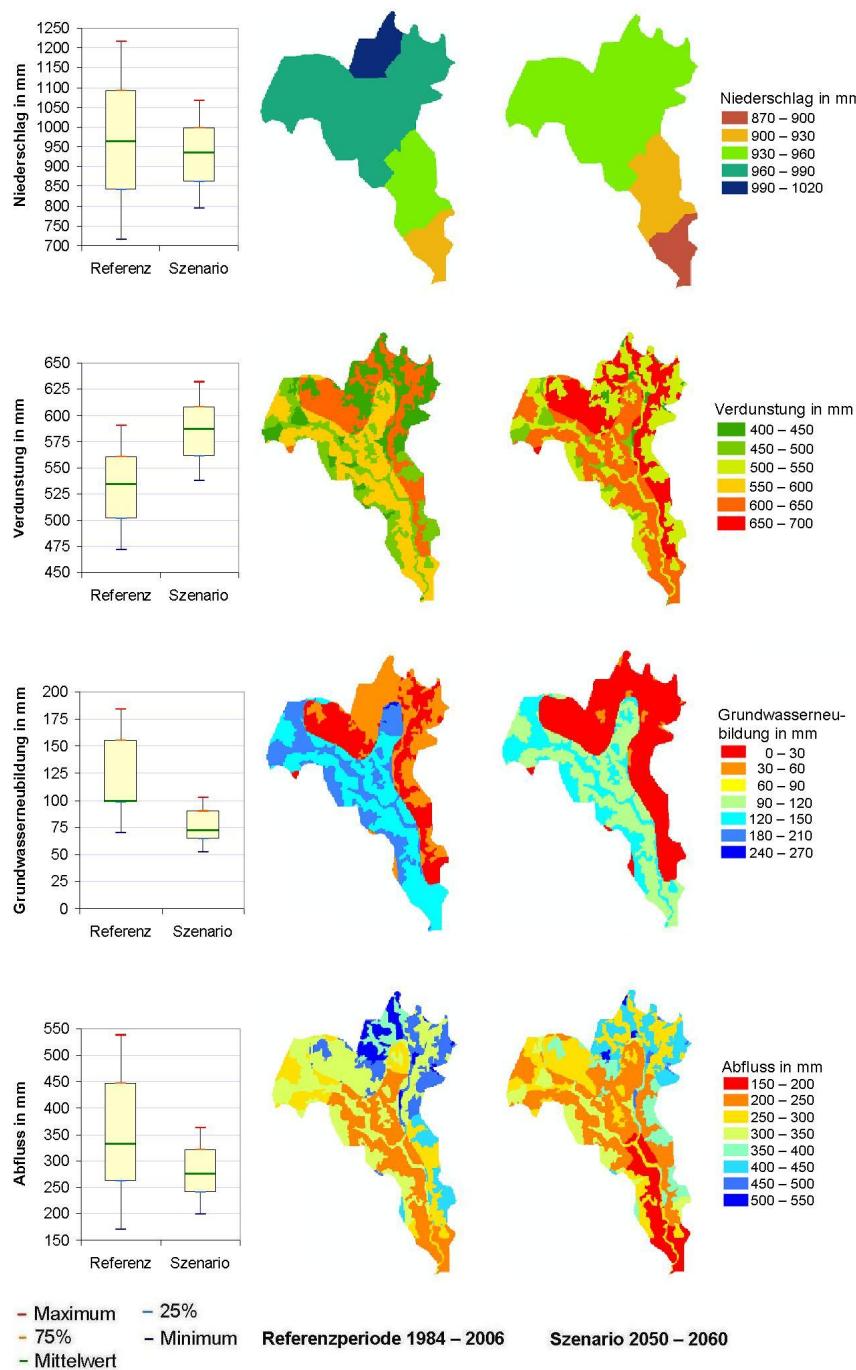


Abbildung 37: Bära: Veränderungen von Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und direktem Abfluss

6.1.2 Schwellwerte

6.1.2.1 Berechnung der Schwellwerte

Um festzustellen, ob sich die Anzahl von Risikotagen für Niedrig- bzw. Hochwasser verändert, müssen Grenzen, sogenannte Schwellwerte, bestimmt werden. Auf diese Weise können die Tage gezählt werden, die die Schwellwerte über- (Hochwasser) bzw. unterschreiten (Niedrigwasser).

Für die Ermittlung der jeweiligen Schwellwerte wurden nicht die realen, sondern die simulierten Daten der Referenzperiode herangezogen. Da SWIM ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit ist, sind die Simulationen leicht fehlerbehaftet. Das heißt, die simulierten Daten des Referenzzeitraums weichen von den realen Pegeldaten ab, weisen jedoch den gleichen Fehler wie die simulierten Szenariodata auf. Ein kurzes Beispiel soll darstellen, welchen Unterschied das Verwenden der realen Pegeldaten ausmachen würde. Wenn der Durchfluss im Modell beispielsweise immer höher als in der Realität simuliert würde, dann wäre der Grenzwert für Hochwasserrisikotage, der mit den realen Pegeldaten gebildet wird, zu niedrig, um ihn auf simulierte Zukunftsszenarien anzuwenden.

Zur Berechnung der Schwellwerte wurde eine Methode zur Zeitabschätzung im Projektmanagement verwendet, die Drei-Zeiten-Schätzung, die ein wichtiger Bestandteil der Netzplantechnik PERT (Program Evaluation and Review Technique) ist. Dies ist eine Methode mit der Erwartungswerte auf Basis einer Wahrscheinlichkeitsverteilung (Beta-Verteilung) ermittelt werden können. Die Drei-Zeiten-Schätzung hat drei Wertangaben als Grundlage. In die Berechnung wird ein pessimistischer (P), ein optimistischer (O) und ein mittlerer wahrscheinlicher Wert (W) mit einbezogen [Jenny (2001 S.357ff)]. Der Erwartungswert (EW) wird dann wie folgt berechnet:

$$EW = \frac{O + 4W + P}{6}$$

oberer Schwellwert	unterer Schwellwert
$Oben = \frac{MaxMax + 4MitMax + MinMax}{6}$	$Unten = \frac{MinMin + 4MitMin + MaxMin}{6}$
$Oben$ = oberer Schwellwert	$Unten$ = unterer Schwellwert
$MaxMax$ = Maximalwert aus der Maximareihe der Referenzperiode	$MinMin$ = Minimalwert der Minimareihe der Referenzperiode
$MitMax$ = Mittelwert aus der Maximareihe der Referenzperiode	$MitMin$ = Mittelwert der Minimareihe der Referenzperiode
$MinMax$ = Minimalwert aus der Maximareihe der Referenzperiode	$MaxMin$ = Maximalwert der Minimareihe der Referenzperiode

Tabelle 10: Formeln für die Schwellwertberechnung

Zu Beginn wurde für jedes simulierte Jahr der Referenzperiode das Minimum und das Maximum des Durchflusses bestimmt. Anschließend wurde für jede der beiden Reihen das Minimum, der Mittelwert und das Maximum gebildet. Diese sechs Werte bilden die Grundlage für die Berechnung des oberen und des unteren Schwellwertes. Die Berechnung basiert auf der obigen Formel. Wie mit dieser Formel die beiden Schwellwerte errechnet wurden, ist in Tabelle 10 abgebildet.

Auf diese Weise konnte für jedes der fünf Gebiete ein unterer und ein oberer Schwellwert festgelegt werden. In der folgenden Tabelle 11 sind die entsprechenden Werte für jedes Gebiet dargestellt.

	Ketzerbach	Hamel	Wilde Gera	Mülsenbach	Bära
unten	0,31	0,36	0,6	0,14	0,33
oben	4,84	14,61	16,44	4,41	8,34

Tabelle 11: Schwellwerte der einzelnen Gebiete in m^3/s

6.1.2.2 Häufigkeiten der Hoch- und Niedrigwasser

Das Auftreten risikobehafteter Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser zeigt in allen Gebieten ähnliche Tendenzen. Für den unteren Schwellwertbereich (Niedrigwasserrisiko) gilt, dass die Anzahl der risikobehafteten Tage ansteigt (Abb. 38 links). Jedoch ist der Anstieg im Mittel- und Hochgebirge deutlicher als im Tiefland. Die Anzahl der Risikotage für Hochwasser (Abb. 38 rechts) ist für die Hochgebirgsregion rückläufig. Das gilt ebenfalls für den Mülsenbach, einem Gebiet im Mittelgebirge mit starker Temperaturerhöhung. Für die Wilde Gera, den anderen Mittelgebirgsfluss, und die beiden Tieflandflüsse ist kaum eine Veränderung der Anzahl der Tage, die durchschnittlich erreicht werden, erkennbar. Hier ist der Trend eher gleichbleibend. Die Schwellwertdiagramme für die jeweiligen Gebiete sind in Anhang III abgebildet. Die Säulen in diesen Diagrammen (vgl. Abb. 38) zeigen die Anzahl der Tage die mindestens (grün), durchschnittlich (gelb) und maximal (blau) erreicht werden, sowie Trendlinien zu den verschiedenen Säulenbereichen.

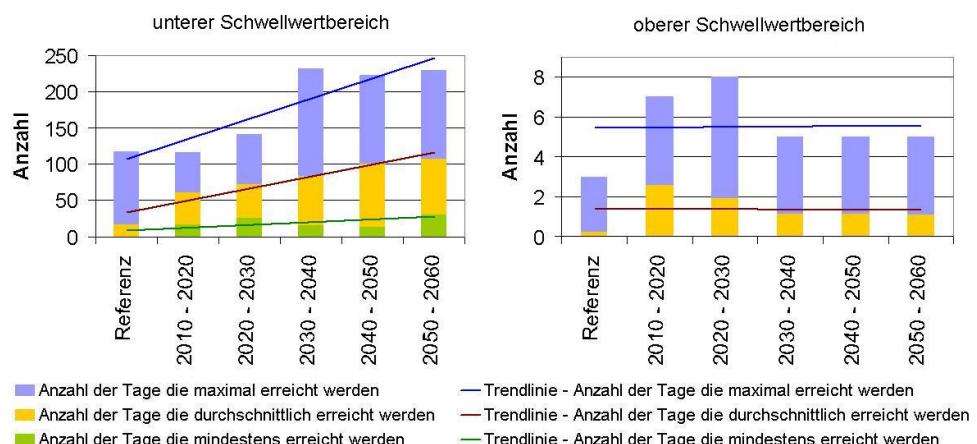


Abbildung 38: Mülsenbach: Anzahl der Risiko behafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser

6.1.3 Zusammenfassung

	Ketzerbach	Hamel	Wilde Gera	Mülsenbach	Bära
Durchfluss der Referenz in m^3/s	0,62	1,72	2,33	0,45	1,80
Durchfluss 2050–2060 in m^3/s	0,45	1,43	1,85	0,28	1,46
Durchflussänderung in Prozent	27,4	20,3	20,6	37,7	18,8
Beschreibung der Durchflussveränderung					
	geht ganzjährig zurück, Gefahr der kurzzeitigen Austrocknung	im Winter ansteigend, im Sommer zurückgehend	im Winter ansteigend, im Sommer zurückgehend	geht ganzjährig zurück	geht ganzjährig zurück, Verschiebung der Frühjahrshochwasser in Richtung Jahresanfang
Veränderungen der hydrologischen Größen					
Niederschlag in mm	−47,94	−22,14	+25,39	−88,83	−27,88
Verdunstung in mm	−16,64	−9,20	+31,46	−8,84	+52,53
Grundwasserneubildung in mm	−30,62	−7,00	−6,64	−57,93	−27,04
Direktabfluss in mm	−6,50	−4,48	−1,26	−34,31	−55,66
Trends für die Anzahl der Risikotage					
unterer Schwellwertbereich	↑	↑	↑	↑	↑
oberer Schwellwertbereich	↓	↔	↔	↓	↓

Tabelle 12: Veränderungen des Durchflusses

Die Analyse und Auswertung der Simulationen für die verschiedenen Gebiete hat gezeigt, dass es wahrscheinlich in jedem Fall Veränderungen geben wird. In Tabelle 12 sind noch einmal alle Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst. In allen Gebieten ist ein deutlicher Trend für einen Rückgang des Durchflusses erkennbar. Hier gibt es jedoch saisonale Unterschiede in den einzelnen Gebieten. Während der Durchfluss bei dem Ketzerbach, dem Mülsenbach und der Bära ganzjährig zurückgeht, nimmt der Durchfluss bei den restlichen Gebieten lediglich im Frühjahr/Sommer ab. Im Winter ist bei der Hamel und der Wilden Gera ein Trend für einen Anstieg des Durchflusses feststellbar.

Diese Durchflussveränderungen stehen in direktem Zusammenhang mit den Änderungen der hydrologischen Größen Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und Oberflächen-/Zwischenabfluss. Daher wurden diese Größen im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls betrachtet. In allen Gebieten, abgesehen von der Wilden Gera ist ein Rückgang des Niederschlags erkennbar. In den Gebieten des Ketzerbaches, der Hamel und des Mülsenbaches geht die Verdunstung leicht zurück. Bei der Wilden Gera und der Bära ist ein Anstieg der Verdunstung festgestellt worden. Das heißt, in diesen Gebieten steigt der Wasserverbrauch der dort angesiedelten Pflanzen. In allen Gebieten geht auf Grund von weniger Niederschlag und dem Verdunstungsverhalten die Grundwasserneubildung sowie der Direktabfluss zurück.

Um die Durchflussänderungen der einzelnen Gebiete zu vergleichen, wurde die Berechnung von Pardé-Koeffizienten als Methode herangezogen. Dies bewirkt eine Normierung, welche den direkten Vergleich verschiedener Jahrgangslinien miteinander ermöglicht [Belz, et al. (2007 S.175)]. Wie dieser Koeffizient berechnet wird, ist in Anhang IV erläutert. Der Pardé-Koeffizient wurde jeweils für die Referenzperiode und den Szenarioabschnitt 2050–2060 ermittelt. Anschließend wurde für jedes Gebiet die Differenz zwischen diesen Reihen gebildet. Ein positiver Wert zeigt einen Anstieg, ein negativer Wert einen Rückgang des Durchflusses. Diese Änderungen sind in Abbildung 39 dargestellt. Es ist zu sehen, dass alle Gebiete ähnliche Änderungen aufweisen. Als Anmerkung ist hier noch einmal zu erwähnen, dass für die Berechnungen der Szenarien Mittelwerte der hundert Realisierungen zugrunde liegen, daher sind in den Szenariokurven Extremwerte nicht gut erfasst, was die großen Änderungen im Frühjahr (Abb. 39) erklärt. Außerdem ist ein Anstieg im Gebiet der Bära im Sommer erkennbar. In Abbildung 35 zeigen alle Szenarioabschnitte im Sommer einen höheren Durchfluss als in der Referenzperiode. Dennoch ist hier, beim Vergleich der Szenarioabschnitte untereinander, ein Rückgang des Durchflusses zu sehen.

In Anhang IV sind zu jedem Gebiet die entsprechenden Pardé-Diagramme mit der Referenzperiode, dem Szenarioabschnitt 2050–2060 und der aus diesen beiden Reihen resultierenden Differenz dargestellt.

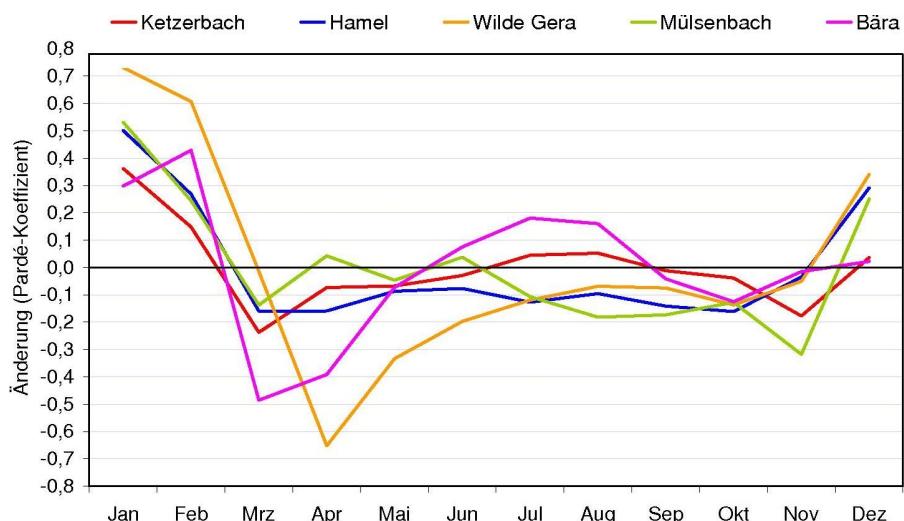


Abbildung 39: Änderung (Pardé-Koeffizient) zwischen der Referenzperiode und des Szenarioabschnittes 2050–2060 der einzelnen Gebiete

6.2 Deutung

Die Simulationen haben ergeben, dass es sehr wahrscheinlich Änderungen in der Wasserdynamik der hier betrachteten Flüsse geben wird. Dieses Ergebnis stimmt mit anderen weltweit stattfindenden Studien überein. Einige davon sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Bereits in der Vergangenheit gab es weltweit Veränderungen in der Abflussdynamik. Da diese Entwicklungen mit Änderungen von Temperatur und Niederschlagsmustern verbunden sind, ist davon auszugehen, dass es unter dem bereits erfolgenden und dem zukünftigen Klimawandel weitere Veränderungen geben wird. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4 auf Seite 9 dargestellt. Hier ist an den Flüssen Donau und Rhône zu sehen, dass sich das Abflussverhalten verändert. Bei diesen Flüssen verringert sich der Durchfluss im Sommer, im Winter hingegen steigt er an. Dieses Verhalten wurde ebenfalls bei den Untersuchungsgebieten der Hamel und der Wilden Gera festgestellt. Außerdem verschiebt sich die Saisonalität bei der Rhône und der Donau. Die Flutspitzen treten im Jahr deutlich früher auf, was auch auf das Untersuchungsgebiet der Bära zutrifft. Als weiteres Beispiel soll eine Simulation am Cle Elum (Washington, USA) genannt werden. In diesem Gebiet gibt es in der Simulation eine dramatische Verschiebung der Flutspitze von April-Juni zu Dezember-Februar. Darüber hinaus nimmt hier der Durchfluss im Frühjahr und Sommer im Vergleich zur Referenzperiode sehr stark ab, damit verbunden ist auch eine länger anhaltende Niedrigwasserperiode [Gibson, et al. (2005 S.852f)].

Bei einer Studie im Elbe-Gebiet (Abb. 40), bei der ein ähnliches Szenario mit hundert Realisationen, wie bei diesen Untersuchungen verwendet wurde, befinden sich im Sommer alle 100 Realisationen unter dem Referenzabfluss [Hattermann, et al. (2007)]. Der Ketzerbach, die Wilde Gera und der Mülsenbach gehören zum Einzugsgebiet der Elbe. In diesen drei Gebieten ist der Unterschied zwischen dem Referenzabfluss und dem Abfluss der 100 Realisationen nicht so stark ausgeprägt. Die Ursache hierfür kann sein, dass die analysierten naturnahen Gebiete sehr klein sind und erst weiter flussabwärts mit größeren Gewässern zusammenfließen. Veränderungen in den kleineren Teileinzugsgebieten summieren sich und beeinflussen so das Abflussverhalten des gesamten Einzugsgebietes.

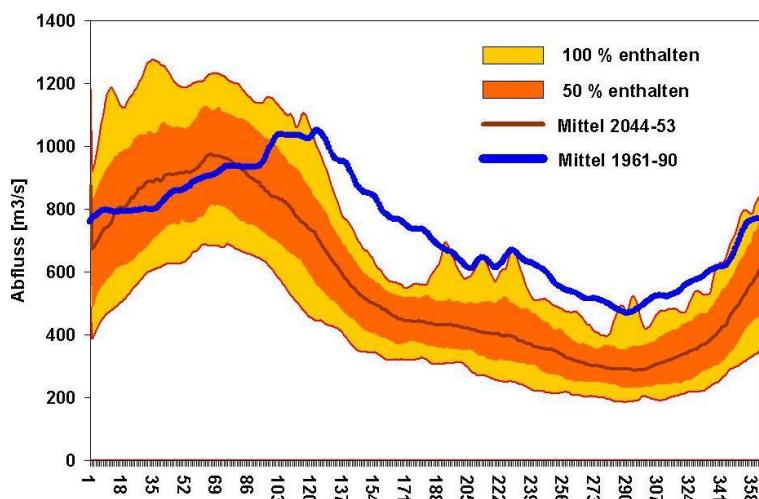


Abbildung 40: Elbe: Mittlerer täglicher Abfluss für die Referenzperiode und die hundert Szenarienrealisationen.

(Hattermann (2007))

Da im Vorfeld der Untersuchungen eine Klassifizierung der Flüsse vorgenommen wurde, stellt sich nun die Frage, ob die Faktoren wie Höhenlage oder die klimatischen Bedingungen einen Einfluss auf die Veränderungen des Durchflusses haben. In allen Gebieten geht der mittlere Durchfluss im Jahr zurück, jedoch ist kein Zusammenhang mit der Höhenlage feststellbar. Auffallend ist lediglich, dass sich die prozentualen Werte bei den beiden Gebieten im Tiefland und bei den Gebieten im Mittelgebirge erheblich unterscheiden. Im Tiefland wurden zwei Gebiete auf Grund der hier herrschenden unterschiedlichen Niederschlagstrends ausgewählt. Beim Ketzerbach, der sich in einem trockener werdenden Teil Deutschlands befindet, geht der durchschnittliche Durchfluss um ca. 27 % zurück. Bei der Hamel hingegen, die sich in einem feuchter werdenden Gebiet befindet, wurde ein Rückgang von ca. 20 % festgestellt. Daraus kann geschlossen werden, dass bei Flüssen in Gebieten mit einem negativen Niederschlagstrend der Durchfluss stärker zurückgehen wird als anderswo. Im Mittelgebirge wurde zwischen einer mittleren Temperaturerhöhung (Wilde Gera) und einer starken Temperaturerhöhung (Mülsenbach) unterschieden. Beim Mülsenbach wurde eine Minderung des Durchflusses um ca. 38 % festgestellt. Bei der Wilden Gera liegt der Rückgang bei ca. 20 %. Das lässt den Schluss zu, dass auch das Maß der Temperaturveränderung eine wesentliche Rolle bei Veränderungen der Abflussdynamik spielt. Ausschließlich im Hochgebirge wurde eine Veränderung der Saisonalität festgestellt. Bei der Bära verschiebt sich das Frühjahreshochwasser in Richtung Anfang des Jahres. Dies ist bei den beiden Mittelgebirgsflüssen nicht der Fall. In Bezug auf die Höhenlage sind die Anzahl der risikobehafteten Tage für Hochwasser interessant. Während im Tiefland und Mittelgebirge kaum eine Veränderung festzustellen ist, geht die durchschnittliche Anzahl der Tage im Hochgebirge stark zurück. Die durchschnittliche Anzahl der Risikotage für Niedrigwasser hingegen steigt in allen Gebieten ungefähr gleich stark.

Da sich in den Untersuchungen herausgestellt hat, dass es Veränderungen in der Wasserdynamik geben wird, stellt sich die Frage, welche Einflüsse diese mit sich bringen können. In vielen Teilen der Erde sind Rückgänge von Abflussraten Ursache für den Verlust von Arten und es wird wahrscheinlich weitere Verluste im Zusammenhang mit steigenden Temperaturen und weniger Niederschlag geben. Diese Verluste können gravierende Auswirkungen auf die biologische Vielfalt in Fließgewässern haben. Der Durchfluss ist eine Kennzahl für Überleben, Wachstum und Reproduktion. Mehrere Studien deuten darauf hin, dass ein zurückgehender Durchfluss und Trockenheiten Effekte auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften, die Größe des Bestandes sowie das Laichverhalten und Ansiedeln von Fischen haben [Xenopoulos, et al. (2005 S.1557)]. Die Auswirkungen des Klimawandels, die Kombination von zunehmender Verdunstung und reduziertem Niederschlag in Flusseinzugsgebieten sind demnach ein wichtiger Treiber für den Verlust von Arten [Xenopoulos, et al. (2005 S.1560)].

Veränderungen der Wasserdynamik wirken sich nicht nur auf einzelne Individuen aus, sondern haben auch Einfluss auf Populationen, Biozönosen (Lebensgemeinschaften verschiedener Arten) und auf ganze Ökosysteme. Auf der Ebene der Individuen können sich Veränderungen auf die Physiologie, und damit auch auf die Entwicklungsdauer auswirken. Diese Auswirkungen auf Individuen können Veränderungen in Populationsdynamiken hervorrufen. Hier ist besonders die Altersstruktur und die räumliche Verteilung betroffen, aber auch die Abundanz (Dichte einer Art auf einer bestimmten Fläche). Abundanzänderungen wiederum können räumliche und zeitliche Veränderungen der Zusammensetzung von Biozönosen hervorrufen. Durch veränderte Altersstrukturen kann sich der Fraßdruck in Lebensgemeinschaften ver-

schieben, was zu veränderten Räuber-Beute-Verhältnissen führen kann. Auf der Stufe der Ökosysteme kann es auf Grund veränderter Wasserdynamiken zu geänderten Vernetzungen mit der Umgebung kommen. Beispielsweise kann es zu Unterbrechungen der Fließgewässer kommen und zu veränderten Wechselwirkungen mit dem Grundwasserleiter. Außerdem ist der Stoff- und Energiefluss betroffen, da sich gewisse Funktionen in Ökosystemen, wie Abbau/Mineralisierung organischer Substanzen oder Interaktionen (Veränderte Nahrungsquellen und Räuber-Beute-Verhältnisse), verändern [Meyer (2006 S.65ff)].

Kritische Ereignisse im Zusammenhang mit dem Abfluss spielen eine tief greifende Rolle im Leben der Fische (Laichverhalten, Überleben von Larven, Wachstums- uns Besiedlungsmuster) [Bunn, et al. (2002 S.497)]. Wie sich veränderte Abflussdynamiken auf Fische auswirken soll hier kurz am Beispiel der Groppe (*Cottus gobio*) beschrieben werden. Dieser Fisch gehört laut Anhang II der FFH-Richtlinie zu den zu schützenden Arten. Sie ist eine bodenorientierte Fischart, die sauerstoffreiche Gewässer bevorzugt [Zbinden, et al. (2004 S.19)]. Die Groppe kommt in Gewässern mit einer Mindesttiefe von 5 cm zurecht, solange die Anforderungen hinsichtlich Substrat, Temperatur und Sauerstoff gegeben sind. Denn aus physikalisch-chemischer Sicht sind Temperatur und Sauerstoffgehalt des Wassers die zwei wichtigsten Faktoren für das Auftreten von Gruppen. Dieser Fisch bevorzugt Sommertemperaturen um 14–16°C, er erträgt jedoch auch Temperaturen von 20–24°C über einen Zeitraum von 2 Monaten. Außerdem ist die Groppe an einen hohen Sauerstoffgehalt des Wassers gebunden. Für die Eier, Larven und Jungfische kann Sauerstoffmangel negative Folgen haben. Eine Eutrophierung (Nährstoffanreicherung) kann die Bildung von Algen begünstigen, was das Futterangebot ebenso beeinflusst wie den Reproduktionserfolg [Zbinden, et al. (2004 S.21f)]. Durch ein großes Algenvorkommen gelangt weniger Licht in tiefere Schichten. Das hat zur Folge, dass es zu einer verminderten Photosynthese und einer damit verbundenen verringerten Sauerstoffproduktion kommt. Beim Abbau von sinkenden toten Algen wird Sauerstoff benötigt. Damit kommt es zu einem starken Sauerstoffmangel im Gewässer, was zum Fischsterben führt [Eyerer, et al. (2000 S.35)]. Außerdem stirbt ein Großteil der am Boden lebenden Tierwelt ab, womit die Nahrungsbasis der Fische negativ verändert wird [Sommer (1996 S.166)].

Verringert sich der Abfluss, geht auch die Strömungsgeschwindigkeit zurück. Dadurch kommt es verstärkt zu Sedimentation von Schwebstoffen, was sich negativ auf den Sauerstoffhaushalt auswirkt. Grundsätzlich führt ein Rückgang des Abflusses jedoch auch zu einem Verlust an benetzten Flächen. Da vorwiegend im Sommer mit einem zurückgehenden Durchfluss gerechnet wird, ist hier auch mit Temperaturschwankungen zu rechnen. In flacheren und nur noch zweitweise mit Wasser bedeckten Stellen im Gewässer findet eine deutliche Aufheizung sehr schnell statt. Höhere Temperaturen und stärkere Einstrahlung begünstigen das Wachstum von Algen, was wiederum Sauerstoffschwankungen zur Folge hat [Meyer (2006 S.64)]. Diese Veränderungen und Auswirkungen eines verminderten Durchflusses können sich negativ auf den Bestand der Groppe und anderer Fische auswirken, da tolerierte Höchsttemperaturen über einen längeren Zeitraum überschritten werden können und die Sauerstoffmenge eine kritische Grenze unterschreiten kann. Die Reaktionen und Ansprüche der Groppe sind denen der Forelle (*Salmo trutta fario*) und des Bachneunauges (*Lampetra planeri*) ähnlich [Zbinden, et al. (2004 S.22)].

Das Bauchneunauge gehört neben der Groppe ebenfalls laut Anhang II der FFH-Richtlinie zu den zu schützenden Arten. Sowohl die Groppe als auch das Bachneunauge sind in den hier untersuchten Gebieten zu finden (Groppe: Hamel, Wilde Gera, Bära; Bachneunauge: Hamel, Wilde Gera, Mülsenbach). Die folgende Abbildung 41 stellt den Zusammenhang zwischen jährlichem Durchfluss und Fischreichtum dar. Es ist erkennbar, dass der Fischreichtum mit sinkendem Durchfluss zurück geht. Der Grund hierfür kann, neben den bereits beschriebenen Faktoren auch sein, dass in trockeneren Zeiten die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln sinkt und es weniger Zufluchtsorte vor Raubtieren gibt [Bunn, et al. (2002 S.499)]. Eine geringe Besiedlung von Fischen kann zu einem Rückgang von Wasservogelarten führen, da ihnen eine wichtige Nahrungsgrundlage fehlt [Bunn, et al. (2002 S.498)].

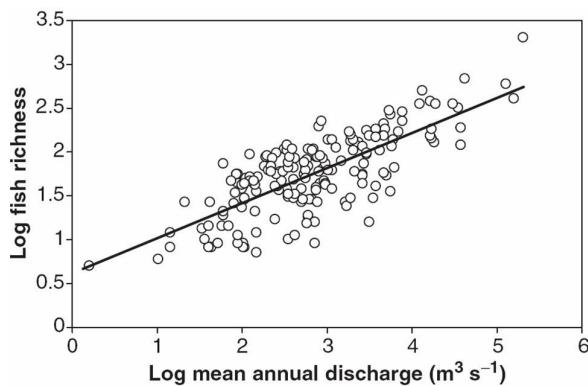


Abbildung 41: Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fischreichtum
(Xenopoulos (2005 S.1559))

Neben Fischen sind aber auch Muscheln von Auswirkungen veränderter Abflussdynamiken betroffen. Die Auswirkungen auf Muscheln sollen an Hand der Gemeinen Flussmuschel (*Unio crassus*) betrachtet werden, da diese im Ketzerbach, der Wilden Gera und dem Mülsenbach vorzufinden sind und sie laut FFH-Richtlinie eine schützenswerte und gefährdete Art ist. Die Flussmuschel braucht sauerstoffreiches Wasser, daher ist sie stark durch drohenden Sauerstoffmangel bedroht. Sauerstoffmangel ist jedoch nicht die einzige Bedrohung für diese Art. Sie benötigt für die Fortpflanzung Wirtsfische, zu denen unter anderem auch die Groppen gehören. Durch einen Rückgang und Verlust der Wirtsfische ist die Reproduktion der Muscheln gefährdet [Rüetschi (ohne Jahr, ohne Seite)]. Eine weitere Bedrohung der Muscheln besteht im Zusammenhang mit veränderten Fließgeschwindigkeiten. Niedrigwasser sind mit geringeren Fließgeschwindigkeiten verbunden [Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002 S.12)]. Eine Verringerung der Fließgeschwindigkeit führt zur Sedimentation (Ablagerung) von Bodenteilchen [Zentrum Geotechnik (ohne Jahr S.7)]. Unter der feinen Sedimentauflage können junge Muscheln im Kies ersticken [Vandré, et al. (2007 S.2)].

Auch Insekten sind von Veränderungen betroffen. Hier sollen als Beispiel die Libellen Grüne Flussjungfer (*Ophiogomphus cecilia*: Ketzerbach, Mülsenbach, Bära) und Große Moosjungfer (*Leucorrhinia pectoralis*: Ketzerbach) genannt werden. Libellen haben Larven, die an das Wasser gebunden sind. Charakteristisch für ihren Lebensraum sind Bäche mit mäßiger Fließgeschwindigkeit, geringer Wassertiefe und stellenweiser Beschattung durch Uferbäume. Wie auch die Fische und die Muscheln sind die Libellen durch eine Verminderung des Sauerstoffgehaltes gefährdet [NABU Laatzen e.V. (2006 S.4f)]. Außerdem sind die Libellen

durch anhaltende Trockenheit oder tieferen Grundwasserspiegel in Fließgewässern gefährdet, was die meisten Libellenlarven nicht oder nur kurze Zeit überleben. Die Folge davon sind starke Einbrüche des Bestandes [Osterwalder, et al. (2006 S.36)]. Jedoch sind die Libellen auch durch Ausspülungen und erhöhte Fließgeschwindigkeiten als Folgen von Hochwassern gefährdet [NABU Laatzen e.V. (2006 S.4f)].

Veränderte Wasserdynamik wirkt sich außerdem auf Amphibien aus. Fehlender Niederschlag und ein verringelter Durchfluss im Winter kann dazu führen, dass kleinere Gewässer bis zum Grund durchfrieren. Dies hat zur Folge, dass überwinternde Amphibien geschädigt oder sogar getötet werden. Dürren sowie geringere Niederschläge können dazu führen, dass Gewässer oder angrenzende Feuchtlebensräume austrocknen. Beide Faktoren können zu erheblichen Populationseinbrüchen führen [WWF Deutschland & TRAFFIC Europe-Germany (2007 S.5f)].

Unterschiedliche Fließwasserorganismen gehen mit niedrigen Wasserständen oder Trockenheiten auch unterschiedlich um und reagieren auf verschiedene Weise. Opportunistische Arten profitieren von einer Austrocknung des Gewässers. Diese Arten reagieren mit einer Zunahme der Besiedlungsdichte. Dies betrifft in erster Linie auf dem Land lebende Arten, da für sie neue Fläche zum Besiedeln erschließbar wird und damit auch neue Nahrungsquellen zur Verfügung stehen. Andere Arten, wie zum Beispiel die Köcherfliege, sind wiederum auf Niedrigwasser bzw. Austrocknung angewiesen um ihren Entwicklungszyklus zu beenden. Resistente Arten sind in der Lage diese Extremsituationen zu überdauern, da sie hohe Toleranzen gegenüber starken Temperaturschwankungen oder extremen Sauerstoffgehalten aufweisen. Daher nimmt die Individuendichte dieser Arten in solchen Situationen nur geringfügig ab. Arten, die mit Aus- oder Abwanderung auf Extreme reagieren, verfolgen eine resilente Strategie. Die Besiedlungsdichte geht kurzzeitig sehr stark zurück und erholt sich nur langsam [Meyer (2006 S.68ff)].

Neben den verschiedenen Tierarten sind auch Uferbereiche der Fließgewässer von veränderten Abflussdynamiken betroffen. Flussauen sind vom wechselnden Hoch- und Niedrigwasser abhängig, das zu einem dynamischen Lebensraum mit unterschiedlichsten Standortbedingungen in Verbindung mit einer hohen Artenvielfalt führt [UFZ (ohne Jahr, S.110)]. Die Simulationen der Hamel und der Wilden Gera haben gezeigt, dass es hier im Winter bzw. Frühjahr zu einem Anstieg des Durchflusses kommt, was die Wahrscheinlichkeit für Hochwasser während dieser Zeit erhöht. Die Flussauen werden daher wahrscheinlich weiterhin vom Wasser erreicht. Der Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser scheint in diesen Gebieten nicht gefährdet, da in den Sommermonaten mit einem niedrigeren Durchfluss zu rechnen ist. Hält das Hochwasser in den Auenwäldern jedoch zu lange an, kann es zu Schädigungen von Pflanzenarten in der Vegetationszeit führen. Des Weiteren sind Substratverlagerungen (Transport, Ablagerung) und Erosionen die Folgen von Hochwasser, was unter anderem zu mechanischen Schädigungen von Pflanzen führen kann [Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (ohne Jahr S.12ff)].

In den Gebieten des Ketzerbaches, des Mülsenbaches und der Bära haben die Simulationen ergeben, dass hier der Durchfluss ganzjährig zurückgeht. Auch die Schwellwertanalyse hat ergeben, dass das Risiko für Niedrigwasser steigt und das für Hochwasser eher gleichbleibend oder leicht zurückgehend ist. In diesen Gebieten ist der Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser gefährdet, was ebenfalls Auswirkungen nach sich zieht. Überschwemmungen bewirken eine natürliche Düngung durch Schweb- und Nährstoffe [UFZ (ohne Jahr, S.111)]. Bleibt

dies aus, verändern sich die Bedingungen für die dort vorkommenden Pflanzenarten und führen möglicherweise zum Absterben. Beispielsweise wird die Produktivität von Uferwäldern beeinflusst, wenn die Überflutung in der Wachstumsphase eintritt [Poff, et al. (1997 S.776)]. Die Auswirkungen für Pflanzen haben wiederum Folgen für die dort lebenden Tierarten, da sich für sie die Lebensbedingungen, unter anderem die Nahrungsquellen verändern, was teilweise auch zum Verlust von Arten führen kann. Eine weitere Folge von Niedrigwasser wäre, dass die Flächen an Uferbereichen durch ausgetrocknete Flächen zunehmen. Somit verkleinert sich der Lebensraum für die dort im Wasser lebenden Arten. [Kopp, et al. (2005 S.79)]. Der Verlust von Nass-Trocken-Zyklen in Auen und Feuchtgebieten hat erhebliche ökologische Auswirkungen, in dem diese Gebiete so sehr verändert werden, dass es das Ansiedeln von Arten begünstigt, die sonst nicht typisch für diese Lebensräume sind [Bunn, et al. (2002 S.500)]. Trotz der negativen Folgen von Niedrigwasser bieten die ausgetrockneten Flächen wertvolle Brutstandorte für einige Vogelarten. Außerdem bieten diese vegetationsfreien Flächen einen Lebensraum für die wirbellose Fauna, beispielsweise für Spinnen und Laufkäfer [Kopp, et al. (2005 S.84)].

Die Simulationen in den Gebieten haben ergeben, dass das Risiko für Niedrigwasser steigt, daher gibt es diesbezüglich auch mehr Gefahren für die Flora und Fauna. Das Risiko für Hochwasser bleibt unverändert oder geht geringfügig zurück. Es wird also auch in Zukunft weiterhin Hochwasser geben. Hochwasser bringen jedoch genauso wie Niedrigwasser Gefahren mit sich. Speziell kleine Flüsse, was auf die hier untersuchten Gebiete zutrifft, reagieren sehr schnell auf lokale extreme Niederschlagsereignisse, welche die Überschwemmungen hervorrufen [Poff (2002 S.1501)].

Überflutungen sind aus ökologischer Sicht bedeutsame Einflussgrößen. Sie können viele Organismen durch Wegschwemmen, Ausspülungen oder Verschüttungen direkt töten. Durch Hochwasser werden neue Habitate geschaffen, da es zum Transport und zur Verlagerung von Sedimenten, Erosionen, Holzablagerungen und zu einer veränderten Nährstoffverteilung kommt [Poff (2002 S.1500)]. Diese Habitate mit neuen Strukturen können zum Auswandern oder Sterben von Arten führen. Im Gegenzug besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass sich hier neue Arten ansiedeln können.

Die Form und Größe von Flüssen, die Verteilung der Lebensräume und die Stabilität der Lebensbedingungen sind durch die Wechselwirkungen zwischen Abflussdynamiken und lokaler Geologie und Landform festgelegt. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Abfluss und physikalischen Eigenschaften des Habitats sind wiederum ein wichtiger Faktor für die Verteilung, Reichtum und Vielfalt von Bach- und Flussorganismen. Ein übermäßiger Anstieg von physikalischen Störungen (Überschwemmungen, Trockenheiten), verursacht durch veränderte Wasserdynamiiken und Klimabedingungen sind ein Hauptfaktor für räumliche und zeitliche Veränderungen von Lebensgemeinschaften in Fließgewässern. Änderungen des Wasserpegels und häufiger auftretende Extremereignisse können sich auf das Überleben und Wachstum von Flora und Fauna auswirken [Bunn, et al. (2002 S.494f)]. Veränderte Wasserdyamiken beeinflussen die Tier- und Pflanzenarten, die sich in diesen Gewässern oder in deren Umgebung befinden.

6.3 Vergleich mit den vermuteten Ergebnissen

Die Ergebnisse aus den Simulationen weichen von den vermuteten Ergebnissen (Abschnitt 2.3) ab. Es wurde vermutet, dass es deutliche Unterschiede zwischen den Änderungen der Wasserdynamik auf Grund der Höhenlage geben wird. Dies ist jedoch nicht der Fall. Es sind lediglich Unterschiede bezüglich der Klimabedingungen aufgefallen. Im Tiefland kommt es beim Ketzerbach, der sich in einem trockener werdenden Teil Deutschlands befindet, zu einem stärkeren Rückgang als bei der Hamel, die sich in einem feuchter werdenden Gebiet befindet. Im Mittelgebirge verhalten sich die Flüsse ähnlich. In dem Gebiet mit der starken Temperaturerhöhung, dem Mülsenbach, geht der Durchfluss stärker zurück als bei der Wilden Gera, bei der ein Trend für mittlere Temperaturerhöhung vorherrscht.

Auch saisonal betrachtet gibt es kaum einen Zusammenhang zwischen den Veränderungen und der Höhenlage. Während der Durchfluss beim Ketzerbach (Tiefland), dem Mülsenbach (Mittelgebirge) und der Bära (Hochgebirge) ganzjährig zurückgeht, geht er bei der Hamel (Tiefland), und der Wilden Gera (Mittelgebirge) nur im Sommer zurück. In den Wintermonaten ist bei diesen zwei Gebieten ein Anstieg des Durchflusses simuliert worden. Eine entsprechende Verschiebung der Frühjahrsflutspitzen in Richtung Anfang des Jahres konnte nur bei der Bära festgestellt werden.

Des Weiteren wurde damit gerechnet, dass es bei den Hochgebirgsflüssen einen erheblichen Rückgang bis hin zur kurzzeitigen Austrocknung geben kann, auch dies ist bei diesen Simulationen nicht der Fall. Hier wurden bei einem Tieflandfluss, dem Ketzerbach, kurzzeitige Austrocknungen simuliert, was möglicherweise auf die klimatische Besonderheit in diesem Gebiet zurückzuführen ist.

Die Abweichungen zu den vermuteten Ergebnissen können darin begründet sein, dass sich die Erwartung auf ein komplexes Ökosystem bezieht und die Ergebnisse der Simulation jeweils nur für ein kleines Gebiet gültig ist. Das heißt, Einflüsse wie Landnutzung und Bodenarten sind nur aus dem betreffenden Gebiet vorhanden, somit werden keine eventuellen Zusammenhänge mit anderen Gebieten berücksichtigt.

6.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen in den fünf verschiedenen Gebieten haben ergeben, dass es sehr wahrscheinlich Veränderungen in der Wasserdynamik geben wird, die durch den Klimawandel bedingt sind. Diese Veränderungen ziehen Folgen für die dort lebenden Arten nach sich, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben. Die FFH-Richtlinie hat den Schutz von natürlichen Lebensräumen und die Erhaltung der Artenvielfalt zum Ziel. Diese Schutzziele werden jedoch durch langanhaltende Hochwasser oder Niedrigwasser, die durch den Klimawandel begünstigt werden, gefährdet.

In den Anhängen I und II der FFH-Richtlinie sind die zu schützenden Lebensraumtypen, Tier- und Pflanzenarten aufgelistet. Veränderte Wasserdynamiken und Extremereignisse können den Lebensraum so verändern, dass er nicht mehr zu den zu schützenden Lebensraumtypen gezählt werden kann. Durch die Besiedlung von besser angepassten Arten werden unter Umständen die zu schützenden Tier- und Pflanzenarten aus ihrem Lebensraum verdrängt.

Menschliche Einflüsse können die Auswirkungen des Klimawandels verstärken. Durch zunehmende Verbauung und Versiegelung der Böden werden höhere Abfluss- bzw. Hochwasserspitzen hervorgerufen. Mit fehlender Ufervegetation gibt es weniger Beschattung des Gewässers, was wiederum zur Erwärmung des Gewässers führen kann. Des Weiteren kann das Trockenfallen und die Erwärmung eines Fließgewässers durch die Entnahme von Wasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft begünstigt werden. Bei Flüssen mit großen Einzugsgebieten kommt es zu lokalen Wassererwärmungen, wo Kraftwerke oder Industrieanlagen Wasser zur Kühlung aus dem Gewässer entnehmen und wieder einleiten [WWF Schweiz (2007 S.4)].

Um die Lebensräume und deren besondere Artenvielfalt zu schützen, müssen beim Management von FFH-Fließgewässern Maßnahmen, Methoden und geeignete Instrumente entwickelt und genutzt werden, um dem klimabedingten Wandel neue ökologische Nischen zur Verfügung zu stellen und eine bestehende Artenvielfalt zu erhalten. Mit dem Ergreifen von politischen und verwaltungstechnischen Maßnahmen durch Länder und regionale Organisationen ist die Möglichkeit größer, die Veränderungen der Abflussdynamik in den Griff zu bekommen, als den Klimawandel zu beeinflussen [Xenopoulos, et al. (2005 S.1559)].

Der Einfluss des Klimawandels wird durch naturnahe Gewässer gemildert. Diese Fließgewässer werden durch Gehölze beschattet und stehen mit dem Grundwasser in Verbindung, dadurch bleiben sie kühler. Natürliche Gewässer sind vernetzt und können so Rückzugsmöglichkeiten für Fische in kühlere Gewässer zur Verfügung stellen. Auf Grund der Uferbeschaffenheit in diesen Gebieten können Hochwasserspitzen gedämpft werden [WWF Schweiz (2007 S.4)]. Aus diesem Grund sollten naturnahe und intakte Landschaften, wie es bei den FFH-Gebieten der Fall ist, geschützt werden. Hierzu gehören unter anderem Moor- und Feuchtgebiete sowie naturnahe Wälder. Mit neuen Erschließungsmaßnahmen (z. B. Skipisten) sollte ein vorsichtiger Umgang gepflegt werden, da durch sie Flora, Fauna und ökologische Funktionen gestört werden, was eine Veränderung der Wasserdynamik nach sich ziehen kann [Mohl (2008 S.15)]. Um mehr naturnahe Landschaften zu erhalten, können Maßnahmen der Renaturierung unternommen werden.

Die Klimaveränderung hat bereits so viel Einfluss genommen, dass es bereits Veränderungen in der Wasserdynamik gegeben hat. Um das künftige Ausmaß dieser Veränderungen zu reduzieren, ist es wichtig, dem Klimawandel direkt entgegenzuwirken, indem die Produktion von Treibhausgasen verringert wird. Unterstützend können spezielle Maßnahmen zur Minderung der Veränderungen beitragen. Dazu gehört unter anderem, dass Flüssen mehr Raum gegeben wird bzw. zusätzliche Überschwemmungsflächen geschaffen werden und damit vermieden wird, hochwassergefährdete Gebiete zu bebauen. Durch zusätzliche Bepflanzungen am Uferbereich kann die Beschattung der Gewässer gefördert werden, was zu einer geringeren Erwärmung des Wassers führt. Auch eine angepasste Landwirtschaft kann sich positiv auswirken. Hier sollte über sparsamere Bewässerungstechniken und angepasste Kulturen nachgedacht werden [WWF Schweiz (2007 S.4)]. Ein weiteres wichtiges Entwicklungsziel ist es, bei kritischen Mindestabflüssen Strukturen als Refugien bzw. als Bereiche für die Wiederbesiedlung zu schaffen. Hier gilt es besonders darauf zu achten, dass es eine durchgängige Niedrigwasserrinne gibt, die die Restwasserflächen miteinander verbindet und somit die Wanderung von Organismen ermöglicht [Meyer (2006 S.75)].

Des Weiteren sind neben den Maßnahmen weitere Studien erforderlich, da bisher weitestgehend ungeklärt ist, welche Faktoren bei Arten ein Abwandern, Ausweichverhalten oder Sterben hervorrufen und welches hier die kritischen Schwellwerte sind, die über- bzw. unterschritten werden müssen, um so ein Verhalten auszulösen [Meyer (2006 S.70f)].

Die WRRL verfolgt das Ziel, den Gewässerzustand zu verbessern und eine Verschlechterung zu vermeiden. Es sollen notwendige Maßnahmen durchgeführt werden, um einen guten Zustand der Oberflächengewässer zu erreichen [Korn, et al. (2005 S.15)]. Als Grundlage für diese Maßnahmen dient die Überwachung (Monitoring) der Gewässer, mit der langfristige Veränderungen bewertet werden können. Die Ergebnisse des Monitorings geben Aufschluss darüber, ob die durchgeführten Maßnahmen erfolgversprechend sind oder nicht [Maslowski, et al. (2007 S.6ff)].

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es sehr wahrscheinlich Veränderungen in der Wasserodynamik gibt. Dieses hat neben den negativen Folgen für Lebensraum, Flora und Fauna auch positive Aspekte für einige Arten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Klimawandel ist ein gegenwärtiges Problem, das sich auf verschiedene Bereiche auswirkt, so auch auf Fließgewässer und deren Umgebung, da die Wasserdynamik eng mit den klimatischen Bedingungen verbunden ist. So werden auf Grund von Temperatur- und Niederschlagsänderungen Veränderungen in der Saisonalität (Verschiebung von Flutspitzen) und der Durchflussmenge erwartet. Damit verbunden sind Änderungen der Lebensräume im Gewässer und an den Uferbereichen, was Folgen für die dort lebende Flora und Fauna nach sich zieht und die Wasserqualität beeinträchtigen kann.

Die WRRL hat zum Ziel, die Wasserqualität in Fließgewässern zu verbessern oder einen guten Zustand zu erhalten. Auf Grund der verschiedenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer und deren Umgebung ist dieses Ziel möglicherweise gefährdet. Ein ähnliches Problem gibt es bezüglich der Ziele der FFH-Richtlinie. Sie hat das Ziel, bedrohte Lebensraumtypen, Tier- und Pflanzenarten zu schützen. Da eine mögliche Veränderung der Wasserdynamik zum Abwandern oder sogar zum Sterben von Arten führt und die Einwanderung von exotischen Arten begünstigen kann, können sich die Lebensräume so verändern, dass sie nicht mehr zu einem zu schützenden Typ gehören. Auch hier sind demnach die Schutzziele möglicherweise gefährdet.

Um die möglichen Veränderungen der Wasserdynamik und die damit verbundenen Folgen besser abschätzen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit das Abflussverhalten von ausgewählten Flusslandschaften untersucht. Hierfür wurde das Modell SWIM verwendet, welches die Analyse und Modellierung der Einflüsse von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf Hydrologie und Wasserqualität ermöglicht.

Im Vorfeld der Modellierung musste eine Einteilung der Flüsse vorgenommen werden, um so eine aussagekräftige Auswahl von Flüssen treffen zu können. Hierfür wurden verschiedene Modelle und Richtlinien betrachtet und wesentliche Kriterien herausgearbeitet, die Einfluss auf das Abflussverhalten haben. So wurde die Höhenlage herangezogen und in drei Klassen eingeteilt (Tiefland, Mittelgebirge, Hochgebirge). Außerdem wurde die Hangneigung der Flüsse betrachtet, welche mit der Höhenlage eng in Zusammenhang steht. Da das Klima ein wichtiger Faktor ist, wurden Temperatur- und Niederschlagstrends im Zeitraum 1951–2003 berücksichtigt. Bezuglich der Temperatur ist aufgefallen, dass es Teile in Deutschland gibt, die einen Trend sehr starker Temperaturerhöhung aufweisen. In Bezug auf die Niederschlagstrends ist auffällig, dass der Osten Deutschlands trockener wird und im Rest Deutschlands ein Anstieg des Niederschlags zu verzeichnen ist. Um die Gebiete miteinander vergleichen zu können, wurden Flüsse mit Längen von 16 bis 25 km ausgewählt. Da ein besonderes Augenmerk in dieser Arbeit auf FFH-Gebiete gerichtet ist, wurde darauf geachtet, dass sich die ausgewählten Flüsse in oder in der Nähe von solchen Gebieten befinden.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Kriterien konnten so fünf unterschiedliche Gebiete ausgewählt werden. Der im Tiefland liegende Ketzerbach (Sachsen) befindet sich im trockener werdenden Ostdeutschland. Außerdem wurde im Tiefland die Hamel (Niedersachsen) ausgewählt, da sie sich in einem feuchter werdenden Teil Deutschlands befindet. Für das Mittelgebirge wurden ebenfalls zwei Gebiete auf Grund der klimatischen Besonderheiten ausgewählt. Die Wilde Gera (Thüringen) befindet sich in einem Gebiet mit mittlerer Temperaturerhöhung. Der Mülsenbach (Sachsen) hingegen befindet sich in einem Teil Deutschlands

mit einem Trend zur starken Temperaturerhöhung. Im Hochgebirge wurde nur ein Gebiet ausgewählt, da es hier keine auffälligen Unterschiede der Klimatrends gibt. Die Bära (Baden-Württemberg) befindet sich in einem feuchter werdenden Gebiet mit mittlerer Temperaturerhöhung.

Für jedes der ausgewählten Gebiete wurde ein SWIM-Modell erstellt. Hierfür sind neben dem Höhenmodell auch Landnutzungs- und Bodendaten in die Modellierung eingeflossen. In Anhang V sind für jedes Gebiet die Karten der Höhen-, Landnutzungs- und Bodendaten abgebildet. Für die Kalibrierung der Modelle waren zusätzlich gemessene Klima- und Pegeldaten nötig. Alle Gebiete wurden für den Zeitabschnitt 1996–2004 kalibriert.

Um zu prüfen ob das Modell realistisch und zufriedenstellend arbeitet, wurde eine Modellvalidierung durchgeführt. Da das Modell nur eine Vereinfachung der Realität ist, werden die Simulationen nie mit der Realität übereinstimmen. Für die Validierung wurden für unterschiedliche Zeitabschnitte Simulationen durchgeführt. Für die Wilde Gera, den Mülsenbach und die Hamel wurden die Durchflüsse in den Jahren vor 1990 deutlich niedriger simuliert als sie tatsächlich in der Realität waren. Nähere Untersuchungen dazu haben darauf hingewiesen, dass dies mit Landnutzungsveränderungen im Zusammenhang stehen könnte. Eine weitere Auffälligkeit ist beim Ketzerbach aufgetreten, hier wurden im Zeitabschnitt 1971–1980 keine Flutspitzen simuliert. Die mögliche Ursache für dieses Problem konnte nicht genau geklärt werden, gegebenenfalls ist die Zeitkomponente im Modell hier ein Problem, da der Niederschlag auf 24 Stunden verteilt wird und somit im Modell entsprechend Zeit hat zu versickern. In der Realität fallen Starkniederschläge jedoch in viel kürzeren Zeiträumen. Hier ist der Böden dann vielleicht nicht in der Lage, diese Mengen aufzunehmen. Somit fließt mehr Wasser über Oberflächenabfluss direkt ins Gewässer. Die Validierung hat im Gesamten ergeben, dass die Niedrigwasser in allen Fällen sehr gut simuliert wurden. Die Hochwasser sind im Vergleich zu den Niedrigwassern nicht so gut wiedergegeben, jedoch ausreichend, um weitere Untersuchungen durchführen zu können und mögliche Trends zu ermitteln.

Anschließend wurde die Wasserdynamik für alle Gebiete für den Zeitabschnitt 2010–2060 simuliert. Hierfür wurden Klimadaten auf Grundlage des A1B Szenarios des IPCC verwendet. Die ausgegebenen Daten wurden anschließend auf mögliche Änderungen und Trends hin untersucht. Des Weiteren wurde eine Schwellwertanalyse durchgeführt. Der Ermittlung der Schwellwerte liegt die Drei-Zeiten-Schätzung zu Grunde.

Die Analyse lässt erkennen, dass es in allen Gebieten Veränderungen in der Wasserdynamik geben wird. Überall ist ein deutlicher Trend zum Rückgang des Durchflusses erkennbar. Bei der Hamel und der Wilden Gera steigt der Durchfluss im Winter an und geht im Sommer zurück. Bei den restlichen Gebieten ist ein ganzjähriger Rückgang des Durchflusses simuliert worden. Da die Durchflussveränderungen in direktem Zusammenhang mit Änderungen von hydrologischen Größen wie Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung und Oberflächen-/Zwischenabfluss stehen, wurden auch diese näher untersucht. Hier ist in fast allen Gebieten ein Rückgang des Niederschlags simuliert worden. Beim Ketzerbach, der Hamel und dem Mülsenbach geht die Verdunstung leicht zurück. Bei der Wilden Gera und der Bära hingegen steigt die Verdunstung, das heißt in diesen Gebieten steigt zusätzlich der Wasserverbrauch der dort vorkommenden Pflanzen. Auf Grund des Niederschlags- und Verdunstungsverhaltens geht die Grundwasserneubildung und der direkte Abfluss zurück.

Die Schwellwertanalyse hat ergeben, dass in allen Gebieten das Risiko für Niedrigwasser ansteigt. Das Risiko für Hochwasser ist gleichbleibend oder leicht zurückgehend.

Bereits in der Vergangenheit gab es Veränderungen in der Abflussdynamik auf Grund von Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Weltweit durchgeführte Studien zeigen ähnliche Ergebnisse wie die, die sich bei den Simulationen der fünf ausgewählten Gebiete gezeigt haben. Der Rückgang der Abflussraten ist Ursache für den Verlust von Arten, da der Durchfluss eine wichtige Kennzahl für Überleben, Wachstum und Reproduktion ist. Es wird wahrscheinlich weitere Verluste im Zusammenhang mit steigenden Temperaturen und weniger Niederschlag geben. Die Auswirkungen des Klimawandels sowie die Kombination aus reduziertem Niederschlag und steigender Verdunstung sind wichtige Treiber für den Verlust an biologischer Vielfalt.

Durch einen verringerten Durchfluss und zusätzlich erhöhte Lufttemperaturen steigen ebenfalls die Wassertemperaturen. Damit wird das Algenwachstum begünstigt, was sich wiederum negativ auf den Sauerstoffhaushalt auswirkt. Viele Fische aber auch Muscheln und Insekten (Libellen) sind durch Sauerstoffmangel bedroht. Außerdem gibt es Fischarten wie zum Beispiel das Bachneunauge und die Groppe, die an bestimmte Wassertemperaturen gebunden sind und laut FFH-Richtlinie zu den zu schützenden Arten gehören. Sowohl das Bachneunauge als auch die Groppe kommen in den hier untersuchten Gebieten vor. Ein Anstieg der Wassertemperatur über einen bestimmten Zeitraum könnte schwerwiegende Folgen für diese Fische nach sich ziehen. Ein Rückgang des Fischbestandes könnte sich negativ auf die Fortpflanzung von Muscheln, zum Beispiel der Gemeinen Flussmuschel, auswirken, da sie auf Wirtsfische angewiesen ist, zu denen unter anderem auch die Groppe gehört. Amphibien sind im Winter durch fehlende Niederschläge und verringerten Durchfluss gefährdet, da kleinere Gewässer bis auf den Grund durchfrieren können. Überwinternde Amphibien können so geschädigt oder getötet werden. Im Sommer können die Feuchtlebensräume dieser Arten austrocknen, was ebenfalls einen Einbruch der Population hervorrufen kann.

Neben den verschiedenen Tierarten sind jedoch auch die Uferbereiche von den veränderten Abflussdynamiken betroffen. Die Simulationen des Ketzerbaches, des Mülsenbaches und der Bära haben ergeben, dass hier der Durchfluss ganzjährig zurückgeht. Dies gefährdet den Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser in den Auen, der sie zu einem dynamischen Lebensraum mit hoher Artenvielfalt macht. Diese Veränderungen können das Ansiedeln von Arten begünstigen, die nicht typisch für diesen Lebensraum sind. Durch Niedrigwasser und Dürre ausgetrocknete Uferflächen bieten jedoch wertvolle Brutstandorte.

Menschliche Einflüsse wie beispielsweise Versiegelungen und Bebauungen können die Auswirkungen des Klimawandels zusätzlich verstärken. Fehlende Ufervegetation führt zu einer noch stärkeren Erwärmung des Gewässers. Außerdem kann die Entnahme von Wasser für landwirtschaftliche Zwecke das Trockenfallen des Gewässers begünstigen.

Es ist wichtig, besondere Lebensräume und gefährdete Arten zu schützen, daher müssen geeignete Maßnahmen, Methoden und Instrumente entwickelt werden, um eine bestehende Vielfalt zu erhalten. Werkzeuge der Renaturierung spielen hier eine wichtige Rolle, da naturnahe Gewässer den Einfluss des Klimawandels mindern. Die Schaffung zusätzlicher Überschwemmungsflächen, um so dem Fluss mehr Raum zu geben, mindert das Hochwasserri-

siko. Des Weiteren sollte die Bebauung in hochwassergefährdeten Gebieten vermieden werden. Zusätzliche Bepflanzungen am Gewässer verringern die Erwärmung des Wassers. Auch die Landwirtschaft kann ihren Beitrag leisten, indem sie über sparsamere Bewässerungsmethoden und angepasste Kulturen nachdenkt. Weiterhin ist es wichtig Strukturen für eine Wiederbesiedlung zu schaffen, beispielsweise ist der Erhalt einer durchgängigen Niedrigwasserrinne, die Wanderungen von Arten ermöglicht, sehr wichtig. In erster Linie ist es jedoch wichtig, dem Klimawandel direkt entgegen zu wirken, indem der Ausstoß an Treibhausgasen reduziert wird.

Um zu prüfen, ob die durchgeführten Maßnahmen erfolgversprechend sind, sind Überwachungen (Monitoring) durchzuführen. Außerdem können so langfristige Veränderungen besser bewertet und eingeschätzt werden.

Um in Zukunft genauere Aussagen treffen zu können, sind weitere Untersuchungen in verschiedenen Gebieten bezüglich der Abflussdynamik notwendig. Hier sollten nicht nur die großen Einzugsgebiete sondern auch kleinere herangezogen werden, um die Auswirkungen auf bestimmte Lebensräume besser bestimmen zu können. Hierfür sind jedoch genauere und feiner aufgelöste Landnutzungs- und Bodendaten erforderlich. Des Weiteren sind flächendeckende Klimadaten erforderlich, um lokale Extremereignisse besser zu erfassen, da sich diese auf Flüsse mit kleinen Einzugsgebieten sehr stark auswirken. Da bisher weitestgehend unbekannt ist, welche Schwellwerte bezüglich der Fließgeschwindigkeiten, Wassertemperaturen und Sauerstoffmengen unter- bzw. überschritten werden müssen, damit es zu einem Abwandern, Sterben oder Ausweichverhalten von Arten kommt, sind hier ebenfalls weitere Analysen erforderlich.

Die Untersuchungen und Analysen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass sich die Wasserdynamik höchstwahrscheinlich verändern wird und das dies nicht ohne Folgen bleiben wird. Um die Auswirkungen des Klimawandels im Rahmen zu halten, sind daher Maßnahmen erforderlich, die ihnen entgegen wirken. So können besondere Lebensräume und Arten geschützt werden. Generell kann gesagt werden, dass die Durchflüsse in den meisten deutschen Kleingewässern zurückgehen werden und das Risiko für Niedrigwasser ansteigt. Das Ausmaß bzw. die Dauer ist jedoch von klimatischen Bedingungen und der Beschaffenheit der Umgebung abhängig. Die Arbeit zeigt die zunehmende Wichtigkeit von zuverlässigen Voraussagen über Umweltveränderungen.

Quellenverzeichnis

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Hrsg.): Auenvegetation: [http://www.waldbau.uni-freiburg.de/Download/pdf/451a_auen_oek_ws07.pdf]
letzter Aufruf: 16.12.2008

Belz J. U., Brahmer G., Buiteveld H., Engel H., Grabher R., Hodel H., Krahe, P., Lammersen R., Larina M., Mendel H.-G., Meuser A., Müller G., Plonka B., Pfister L., Van Vuuren W. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert: Analyse, Veränderungen, Trends Herausgeber: Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes ISBN: 978-90-70980-33-7

BfN-Datenbank (Stand 2006): FFH-Gebietsmeldungen von Deutschland

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung: Pflanzengenetische Ressourcen in Deutschland [http://www.genres.de/CF/pgrdeu/template_in_situ.cfm?page=wuchs&idLoc=1193]
letzter Aufruf: 05.08.2008

Bunn S. E., Arthington A. H. (2002): Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity
In: Environmental Management
Seiten 492-507
DOI: 10.1007/s00267-002-2737-0

Europäische Union (1992): RICHTLINIE 92/43/EWG DES RATES vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/consleg/1992/L/01992L0043-20070101-de.pdf>]
letzter Aufruf: 24.09.2008

Europäische Union (2000): RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik [http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/eu_wrrl_text_de.pdf]
letzter Aufruf: 24.09.2008

Europäische Union (2004): ENTSCHEIDUNG DER KOMMISSION vom 7. Dezember 2004 gemäß der Richtlinie 92/43/EWG des Rates zur Verabschiedung der Liste von Gebieten von gemeinschaftlicher Bedeutung in der kontinentalen biogeografischen Region [http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/natura2000/kontinentale_Liste_2004.pdf]
letzter Aufruf: 05.08.2008

European Environment Agency (Hrsg.), (2008): Impacts of Europe's changing climate: [http://eea.eionet.europa.eu/Public/irc/eionet-circle/airclimate/library?l=/public/2008_cc_report/eea_2008_reportpdf/_EN_1.0_&a=d]
letzter Aufruf: 12.05.2008

Eyerer P., Reinhardt H.-W. (2000): Okologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebauden: Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung
 Verlag: Birkhäuser
 ISBN: 3764362073

Gerdes T. (2003): Fließgewässerschutz - Schützen Uferstreifen wirklich?:
[\[http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/seminar/ws02-03/gerdes_uferstreifen.pdf\]](http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/seminar/ws02-03/gerdes_uferstreifen.pdf)
 letzter Aufruf: 08.05.2008

Gerstengarbe F.-W., Werner P. C., Orlowsky B., Wodinski M. (2008):
 Modellierung der regionalen Klimaentwicklung
 In: Gräfe, P. (Hrsg.): Schlussbericht zum Verbundvorhaben GLOWA-Elbe II
 „Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet – Risiken und Optionen“
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
 Kapitel 2, Seiten 40-90

Gibson C., Meyer J. L., Poff N. L., Hay L. E., Georgakakos A. (2005): Flow regime alterations under changing climate in two river basins: Implications for freshwater ecosystems
 In: River Research and Applications
 Seiten 849-950
 DOI: 10.1002/rra.855

Hattermann F., Conradt T., Bronstert A. (2007): Berechnung großskaliger Verdunstung unter den Bedingungen des globalen Wandels
 In: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg (Hrsg.): Verdunstung
 Beiträge zum Seminar Verdunstung am 10./11. Oktober 2007 an der Universität Potsdam
 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 21.07
 Seiten 231-245
 ISBN: 978-3-940173-05-8

IPCC (2000): IPCC Special Report - Emissions Scenarios
[\[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf\]](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf)
 letzter Aufruf: 23.06.2008

IPCC (2007): Climate Change 2007 - Synthesis Report
[\[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf\]](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)
 letzter Aufruf: 23.06.2008

Jenny B. (2001): Projektmanagement in der Wirtschaftsinformatik
 Verlag: vdf Hochschulverlag AG
 ISBN 3728127914

Klaghofer E.: Hochwasser und Landnutzung
 Schriftenreihe BAW, 19
 Seiten: 60-69
 Bundesamt für Wasserwirtschaft

Koop J., Bergfeld T., Keller M. (2005): Einfluss von extremen Niedrigwasser - Ereignissen auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen
 In: BfG-Veranstaltung 5/2005 „Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung“
 Seiten: 79-91

Korn N., Jessel B., Hasch B., Mühlinghaus R. (2005): Flussauen und Wasserrahmenrichtlinie - Bedeutung der Flussauen für die Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie - Handlungsempfehlungen für Naturschutz und Wasserwirtschaft
 Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
 ISBN: 3-7843-3927-1

Krüger A. (letztes Update 2001): Die Hamel
 [<http://www.fliegenfischer-seite.de/>]
 letzter Aufruf: 02.09.2008

Krysanova V., Wechsung F. (2000): SWIM (Soil and Water Integrated Model) - User Manual
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Report 69

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Kurzbeschreibung MaculineaNausithous [http://www.naturschutz-fachinformationssysteme-nrw.de/natura2000/arten/ffh-arten/arten/schmetterlinge/maculinea_nausithous_kurzb.htm]
 letzter Aufruf: 08.05.2008

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Natura 2000 - Gebietsinformation [http://rips-uis.lubw.baden-wuerttemberg.de/rips/natura2000/navigation/sachdat/texte/gemein_z.htm]
 letzter Aufruf: 02.09.2008

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (2002): Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg - Vom Wasserstand zum Durchfluss [http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/7970/vom_wasserstand_zum_durchfluss.pdf?command=downloadContent&filename=vom_wasserstand_zum_durchfluss.pdf]
 letzter Aufruf: 20.01.2009

Ludwig K.-H. (2007): Eine kurze Geschichte des Klimas: Von der Entstehung der Erde bis heute
 Verlag: Beck
 ISBN: 3406565573

Maslowski K., Pitschka B. (2007): Überwachung der Gewässer (Monitoring) [http://www.regierung.unterfranken.bayern.de/imperia/md/content/regufr/aktuelles/2007/3._regionalforum_unterer_main_berwachung_der_gew_sser.pdf]
 letzter Aufruf: 05.01.2009

Meyer E. (2006): Fließgewässer und Niedrigwasser - eine ökologische Perspektive
Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg
Seiten: 62-77

Mohl A. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf das österreichische
Gewässernetz - Herausforderungen und Lösungsansätze aus Sicht einer
Umwelt-NGO [<http://www.oewav.at/upload/medialibrary/Mohl.pdf>]
letzter Aufruf: 05.01.2009

NABU Laatzen e.V. (Hrsg.)(2006): Grüne Flussjungfern - Seltene Libellen in der
Laatzener Masch
In: Der Zaunkönig (Nr.4)

NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V. (Hrsg.) (2007): Gletscherschmelze
und Lebensraumschwund [http://www.nabu.de/m06/m06_12/06899.html]
letzter Aufruf: 23.06.2008

Niedermair M., Lexer M. J., Plattner G., Formayer H., Seidl R. (ohne Jahr):
Klimawandel & Artenvielfalt - Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse
und Alpenlandschaften? [<http://www.bundesforste.at/fileadmin/template/Publikationen/Studie%20Klimawandel%20und%20Artenvielfalt%20in%20D6sterreich.doc>]
letzter Aufruf: 23.06.2008

Orlowsky B. (2007): Setzkasten Vergangenheit - ein kombinatorischer Ansatz für
regionale Klimasimulationen
Dissertation an der Universität Hamburg

Osterwalder R., Vonwil G., Flöss I. (2006): Kontrollprogramm Natur und
Landschaft / Die Libellen im Kanton Aargau
In: Umwelt Aargau, Sondernummer 23

Petersen B., et al. (2004): Das europäische Schutzgebietssystem Natura 2000 -
Ökologie und Verbreitung von Arten der FFH-Richtlinie in Deutschland -
Band 2 Wirbeltiere
Verlag: Bundesamt für Naturschutz
ISBN: 3784336205

Poff N., Allan J. D., Bain M. B., Karr J. R., Prestegaard K. L., Richter B. D.,
Sparks R. E., Stromberg J. C. (1997): The Natural Flow Regime - A
paradigm for river conservations and restorations
In: BioScience 47
Seiten: 769-784

Poff N. (2002): Ecological response to and management of increased flooding
caused by climate change
In: Philosophical Transactions Of The Royal Society
Seiten: 1497-1510
DOI: 10.1098/rsta.2002.1012

Rüetschi J. :Gemeine Bachmuschel - *Unio crassus*
Herausgeber: WWF Schweiz
[http://assets.wwf.ch/custom/arten/Gemeine_Bachmuschel.pdf]
letzter Aufruf: 15.12.2008

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2004): Ereignisanalyse
- Hochwasser August 2002 in den Osterzgebirgsflüssen
[http://www.smul.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/veroeffentlichungen/verzeichnis/Wasser/Ereignisanalyse_neu.pdf]
letzter Aufruf: 02.09.2008

Schmitt L., Maire G., Nobelis P., Humbert J. (2007): Quantitative
morphodynamic typology of rivers - a methodological study based on the
French Upper Rhine basin
In: Earth Surface Processes and Landforms
Seiten: 1726-1746
DOI: 10.1002/esp.1596

Snelder T., Biggs B., Weatherhead M. (2004): New Zealand River Environment
Classification User Guide, Herausgeber: Ministry for the Environment
[http://www.niwa.co.nz/_data/assets/pdf_file/0017/38600/rec-user-guide.pdf]
letzter Aufruf: 26.06.2008

Sommer U. (1996): Algen, Quallen, Wasserfloh: Die Welt des Planktons
Verlag: Springer
ISBN: 3540603077

Stadt Bottrop - Umweltamt-Umweltplanung und -vorsorge (Hrsg.) (2008):
Regenwasserbewirtschaftung - Informationen für den Bürger
[http://www.bottrop.de/stadtleben/downloads/umwelt/Regenwasserbewirtschaftung_-_Informationen_f_r_den_B_rger.pdf]
letzter Aufruf: 14.01.2009

UFZ - Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Hrsg): Auenökologie - Auen als
Teil der Flusslandschaft [<http://www.ufz.de/data/108-1193087.pdf>]
letzter Aufruf: 16.12.2008

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2007): 4. Sachstandsberichts (AR4) des IPCC (2007)
über Klimaänderungen - Auswirkungen, Anpassungsstrategien,
Verwundbarkeiten - Kurzzusammenfassung [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/IPCC_Kernaussagen.pdf]
letzter Aufruf: 04.07.2008

Vandré R., Schmidt C., Bergner B (2007): LIFE-Natur Projekt zum Schutz der Flussperlmuschel und der Bachmuschel im Dreiländereck Bayern - Sachsen - Tschechien

Herausgeber: Bezirk Oberfranken

LIFE-Natur Projekt Nr. LIFE2002NAT/D/8458

[<http://www.regierung.oberfranken.bayern.de/b5/pdf/>

LIFENaturProjektGrossmuscheln.pdf]

letzter Aufruf: 20.01.2009

WWF Deutschland & TRAFFIC Europe-Germany (Hrsg.) (2007): Wärme

Winter, heiße Sommer: Wie geht es heimischen Arten?

[http://www.bildungscsent.de/fileadmin/www.bildungscsent.de/programme/Klima/Klima_Infoseite/warme_Winter_heisse_Sommer_heimische_Arten_wwf.pdf]

letzter Aufruf: 15.12.2008

WWF Schweiz (Hrsg.)(2007): Riverwatch - Klimawandel und Flüsse

[http://assets.wwf.ch/downloads/rw_factsheet_juli_07_2.pdf]

letzter Aufruf: 27.12.2008

Xenopoulos M. A., Lodge D. M., Alcamo J., Märker M., Schulze K., Van Vuuren D. (2005): Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal

In: Global Change Biology

Seiten: 1557-1564

DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001008.x

Zbinden S., Pilotto J., Durouvenoz V. (2004): Mitteilungen zur Fischerei NR. 77 -

Biologie, Gefährdung und Schutz der Groppe (Cottus gobio) in der Schweiz

Herausgeber: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL [<http://www.bafu.admin.ch/php/modules/shop/files/pdf/phpztchEn.pdf>]

letzter Aufruf: 15.12.2008

Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik

und Tunnelbau (ohne Jahr): Entstehung und Zusammensetzung von Boden

und Fels [<http://www.lrz-muenchen.de/~t5412cs/webserver/webdata/download/skript/vorl-g-b.pdf>]

letzter Aufruf: 15.12.2008

Zimmermann H., Schiemer F. (2008): Klimawandel: Funktionalität der

Fließgewässer in Gefahr

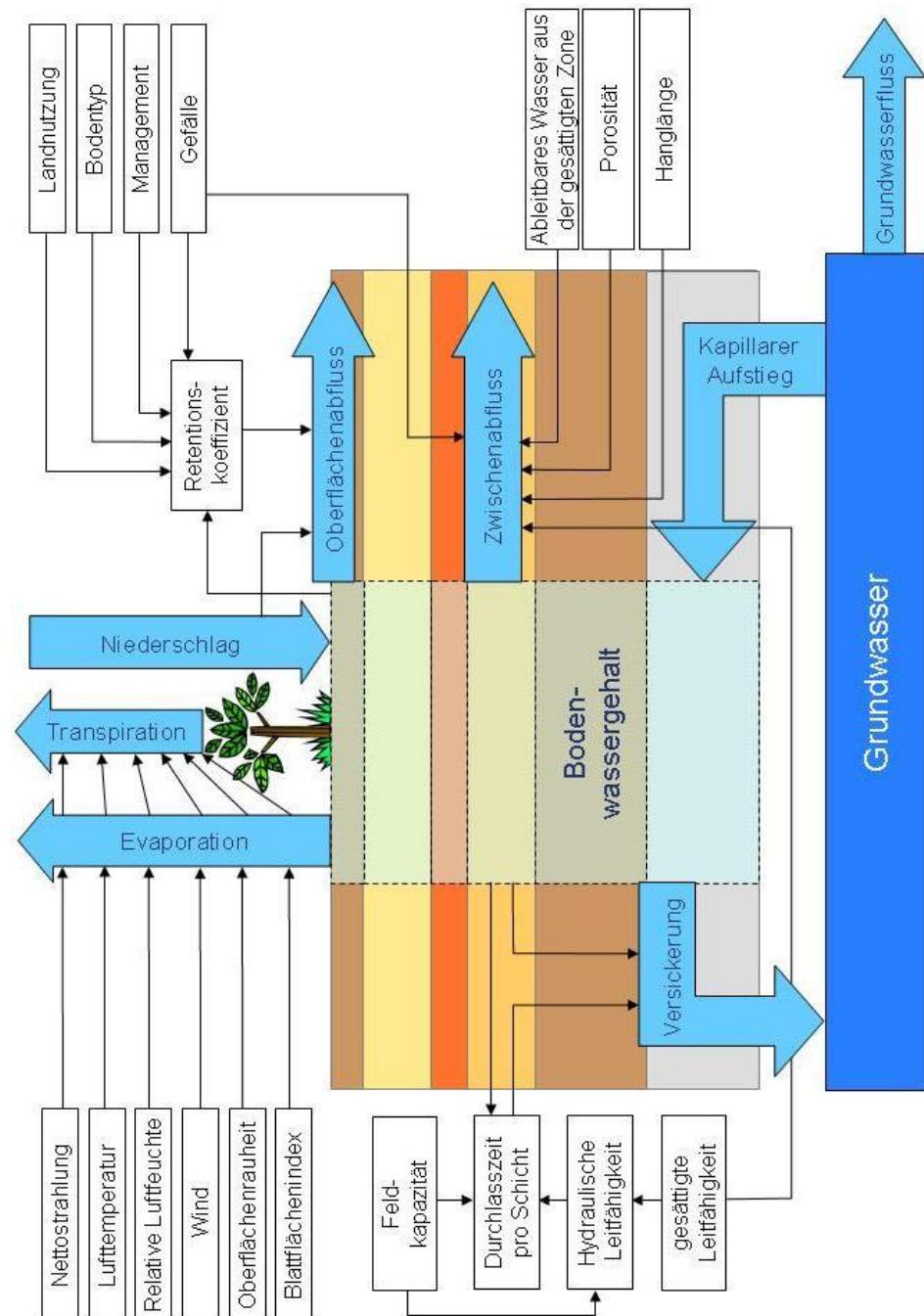
In: Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken - Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen

Seiten: 296-298

ISBN: 978-3980966849

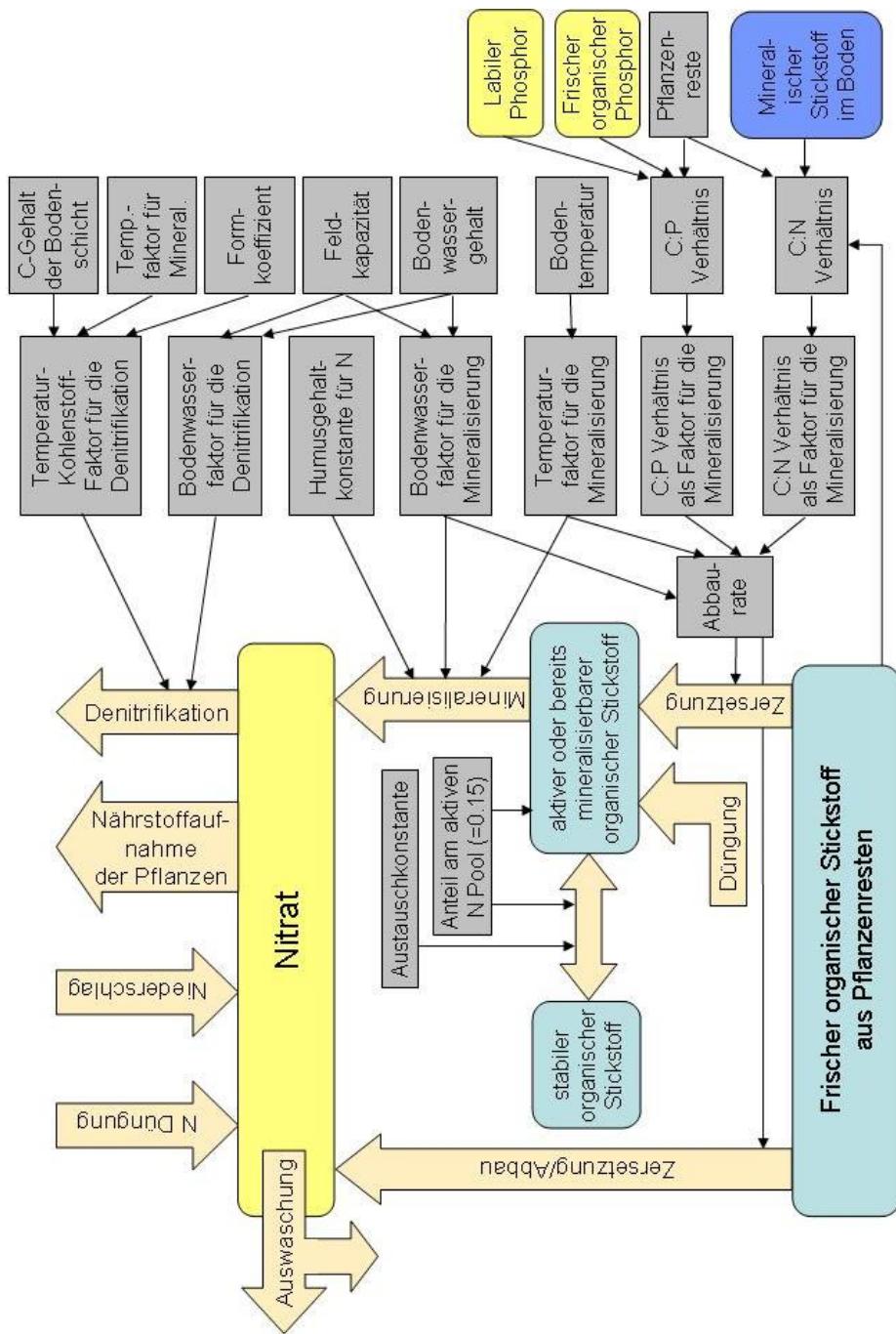
Anhang I: Kreisläufe in SWIM

Wasserkreislauf in SWIM



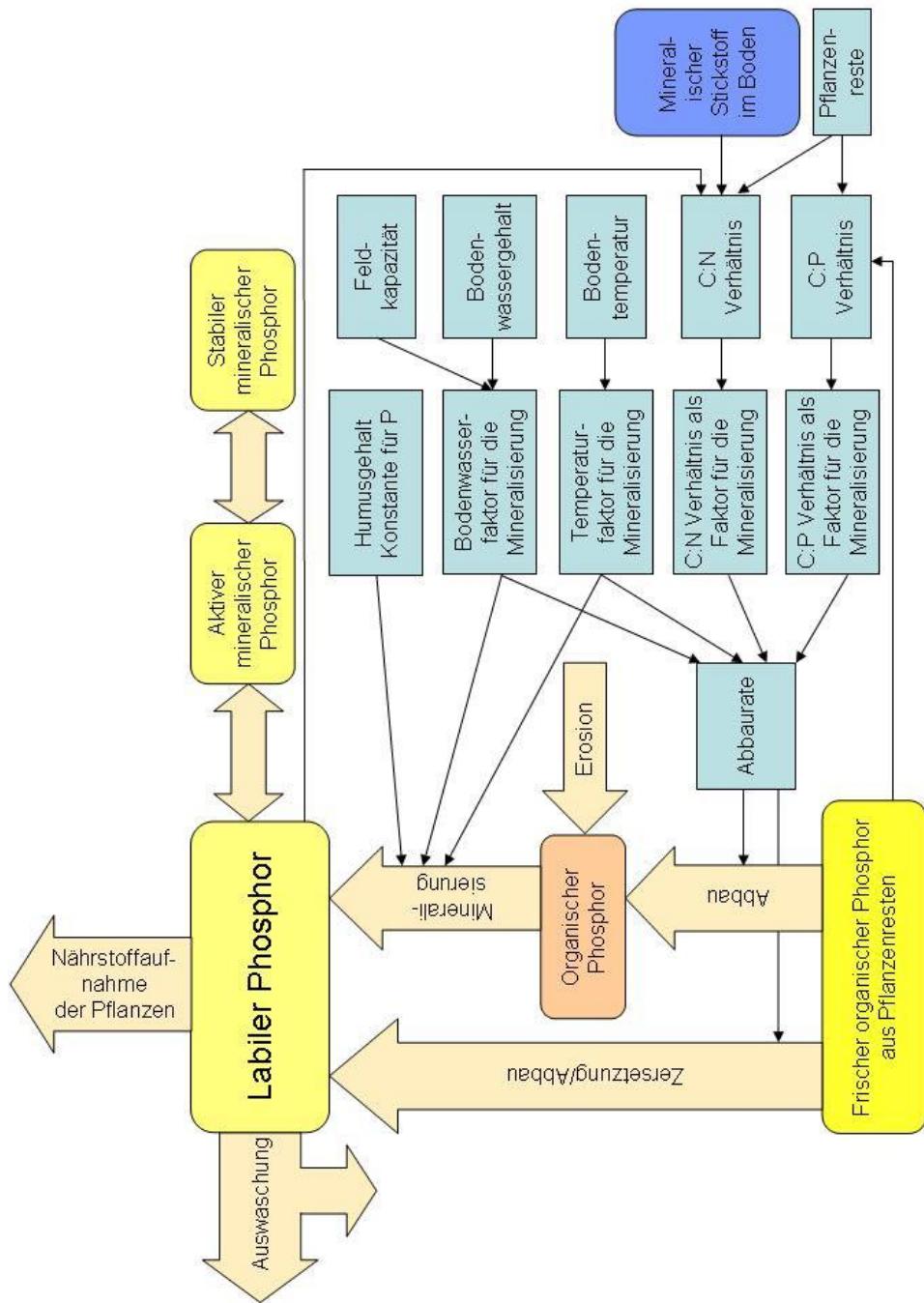
Wasserkreislauf in SWIM
(Präsentation Cornelia Hesse 2. November 2007)

Stickstoffkreislauf in SWIM



Stickstoffkreislauf in SWIM
(Präsentation Cornelia Hesse 2. November 2007)

Phosphorkreislauf in SWIM



Phosphorkreislauf in SWIM
(Präsentation Cornelia Hesse 2. November 2007)

Anhang II: Kalibrierung der Untersuchungsgebiete

Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch

Gebietsgröße: 166,811 km²

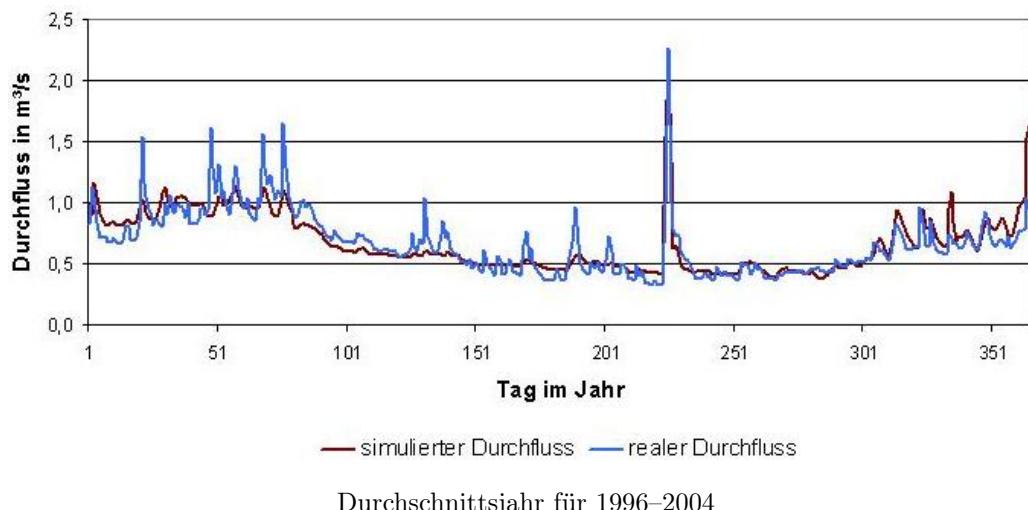
Kalibrierungszeitraum: 1996–2004

Gütemaße:

Bilanzabweichung: 0,0 %

L-Effizienz: 0,59

Effizienz: 0,69



Hamel – Hamel und Nebenbäche

Gebietsgröße: 206,162 km²

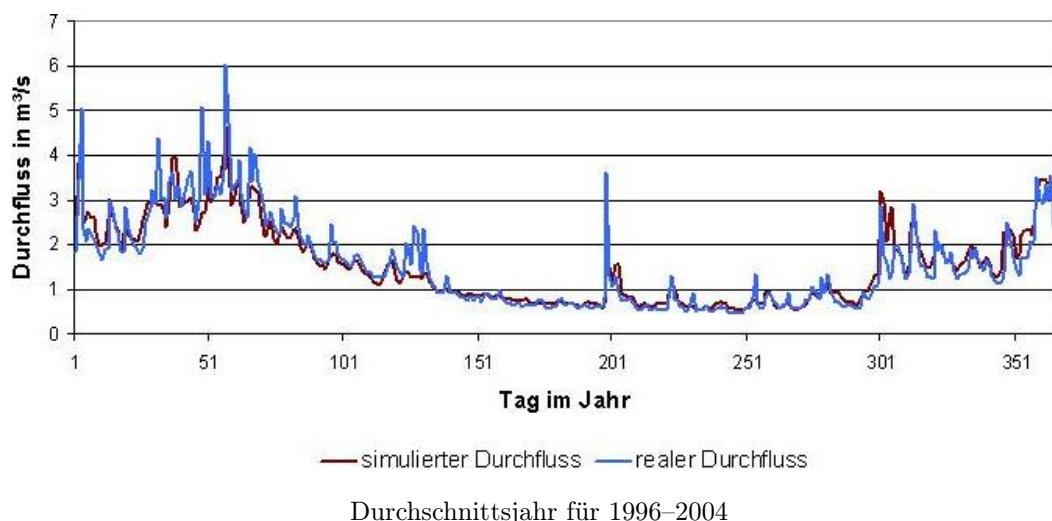
Kalibrierungszeitraum: 1996–2004

Gütemaße:

Bilanzabweichung: 0,0 %

L-Effizienz: 0,83

Effizienz: 0,72



Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach

Gebietsgröße: 255,510 km²

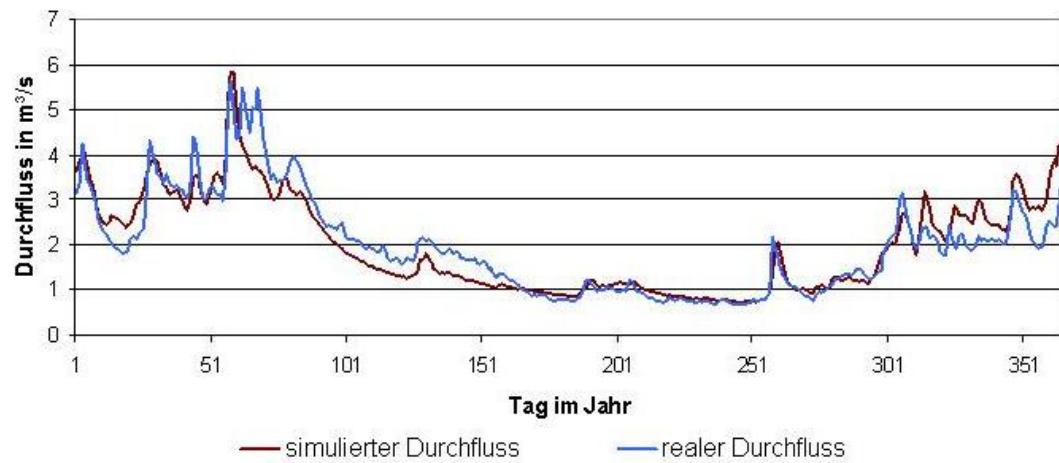
Kalibrierungszeitraum: 1996–2004

Gütemaße:

Bilanzabweichung: 0,0 %

L-Effizienz: 0,74

Effizienz: 0,80



Durchschnittsjahr für 1996–2004

Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal

Gebietsgröße: 62,916 km²

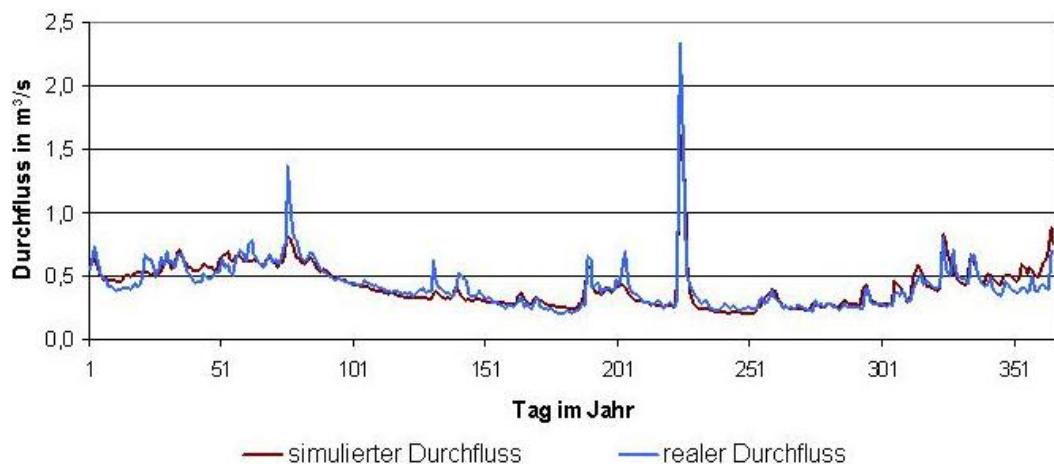
Kalibrierungszeitraum: 1996–2004

Gütemaße:

Bilanzabweichung: 0,0 %

L-Effizienz: 0,69

Effizienz: 0,82



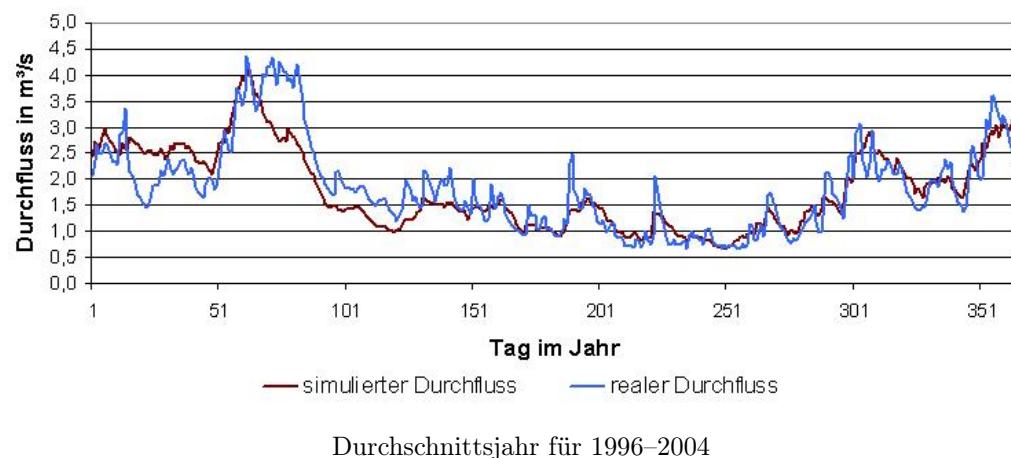
Durchschnittsjahr für 1996–2004

Bära – Donautal und Hochflächen von Tuttlingen bis Beuron**Gebietsgröße:** 134,569 km²**Kalibrierungszeitraum:** 1996–2004**Gütemaße:**

Bilanzabweichung: -2,0 %

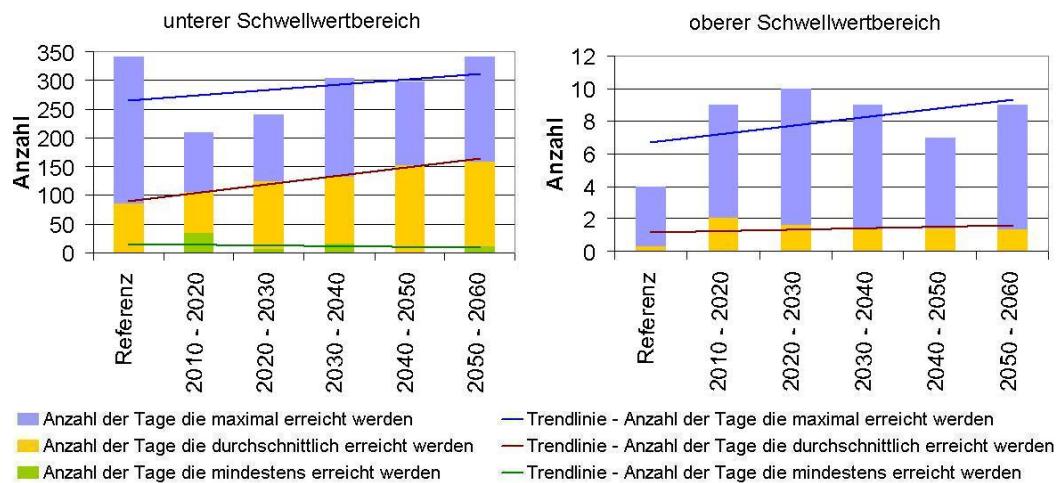
L-Effizienz: 0,75

Effizienz: 0,64



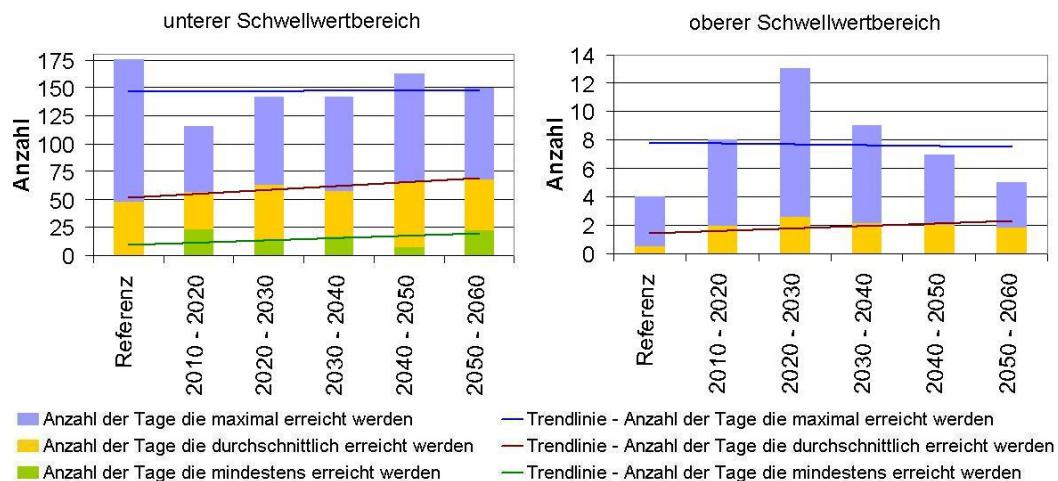
Anhang III: Schwellwertdiagramme

Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch



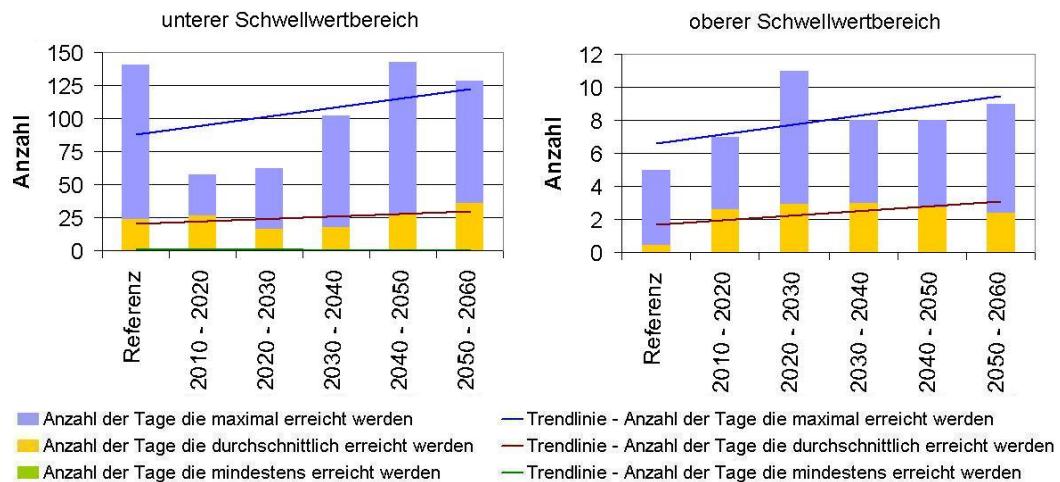
Ketzerbach: Anzahl der Risikobehafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser

Hamel – Hamel und Nebenbäche



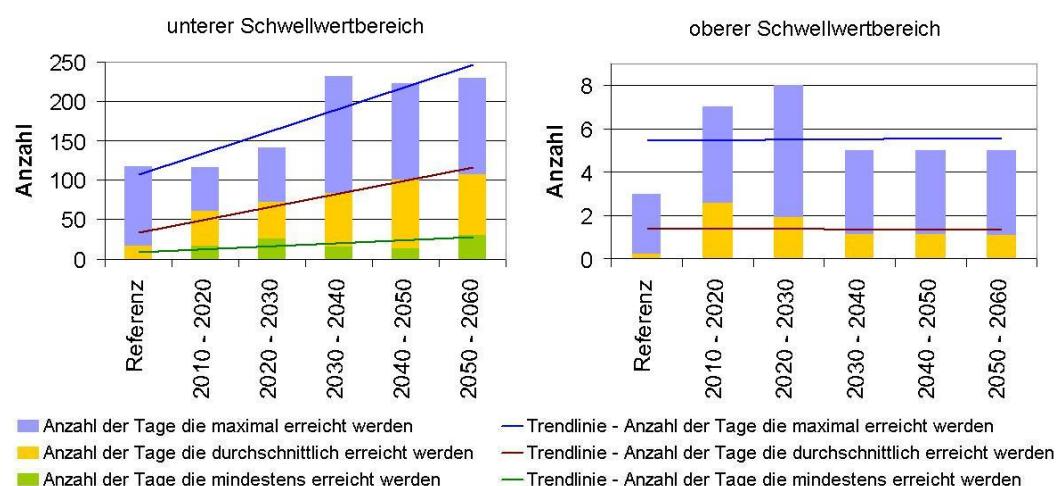
Hamel: Anzahl der Risikobehafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser

Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach



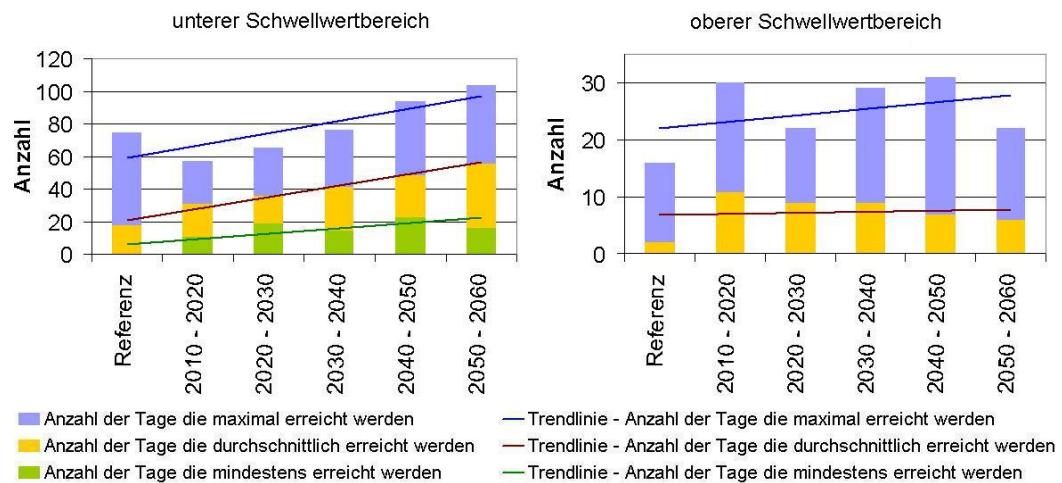
Wilde Gera: Anzahl der Risikobehafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser

Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal



Mülsenbach: Anzahl der Risikobehafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser

Bära – Donautal und Hochfläche von Tuttlingen bis Beuron



Bära: Anzahl der Risikobehafteten Tage für Hoch- bzw. Niedrigwasser

Anhang IV: Pardé-Koeffizienten der Untersuchungsgebiete

Berechnung des Pardé-Koeffizienten [Balz, et al. (2007 S.175)]

Der Pardé-Koeffizient bewirkt eine Normierung, welche den direkten Vergleich verschiedener Jahrgangslinien miteinander ermöglicht. Als Grundlage für die Berechnung dienen vieljährige mittlere Jahresabflüsse an einem Pegel. Er gibt das Verhältnis zwischen den einzelnen zwölf vieljährigen mittleren Monatsabflüssen und den entsprechenden vieljährigen mittleren Jahresabflüssen an.

Die Berechnung des Koeffizienten erfolgt mit folgender Formel:

$$k_i = \frac{\overline{mMQ_i}}{\overline{MQ}}$$

Dabei ist $\overline{mMQ_i}$ der vieljährig gemittelte monatliche Abfluss im Einzelmonat ($i = 1$ bis 12). Dieser wird wie folgt ermittelt:

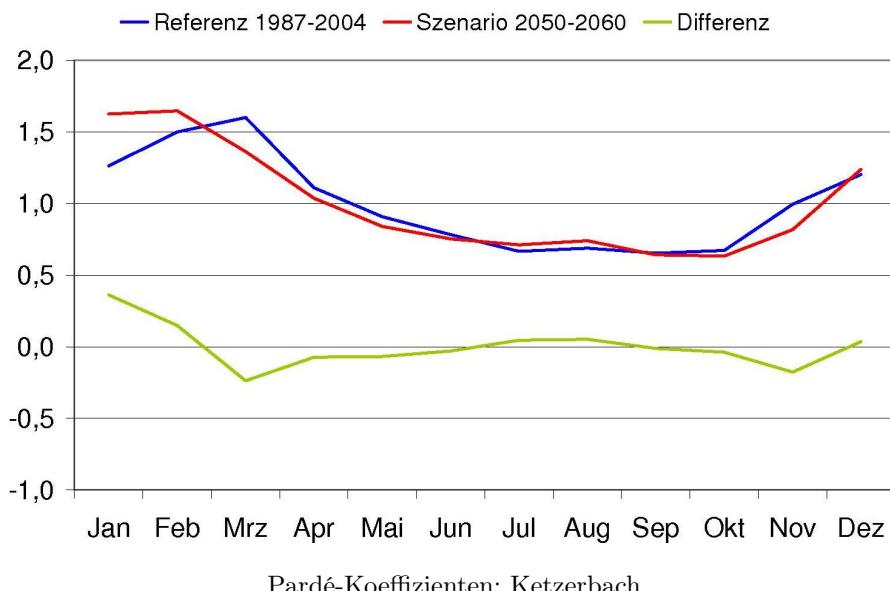
$$\overline{mMQ_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n mMQ_{i,j}$$

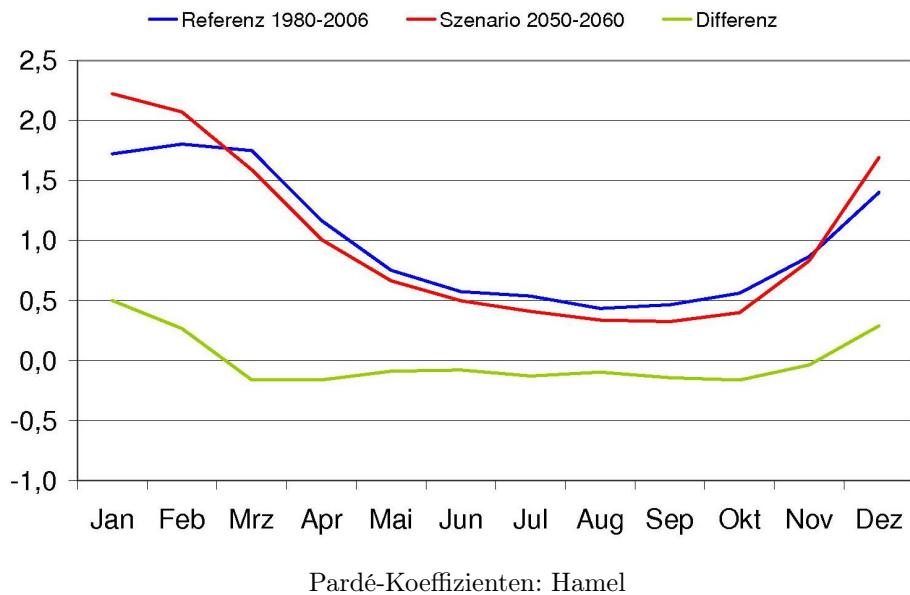
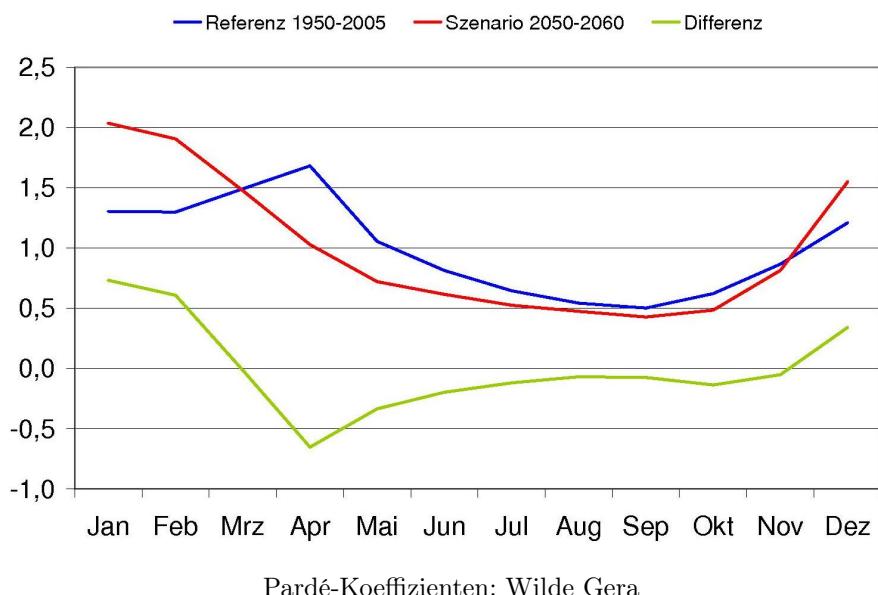
\overline{MQ} ist der vieljährlich gemittelte Abfluss und wird auf folgende Weise berechnet:

$$\overline{MQ} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n MQ_j$$

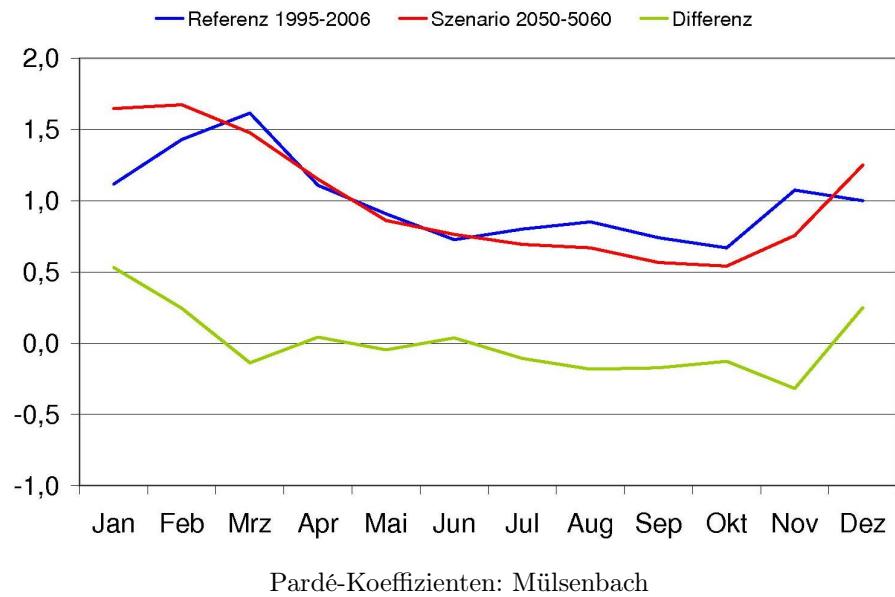
Das n steht für die Anzahl der Jahre in der untersuchten Periode.

Ketzerbach – Täler südöstlich Lommatzsch

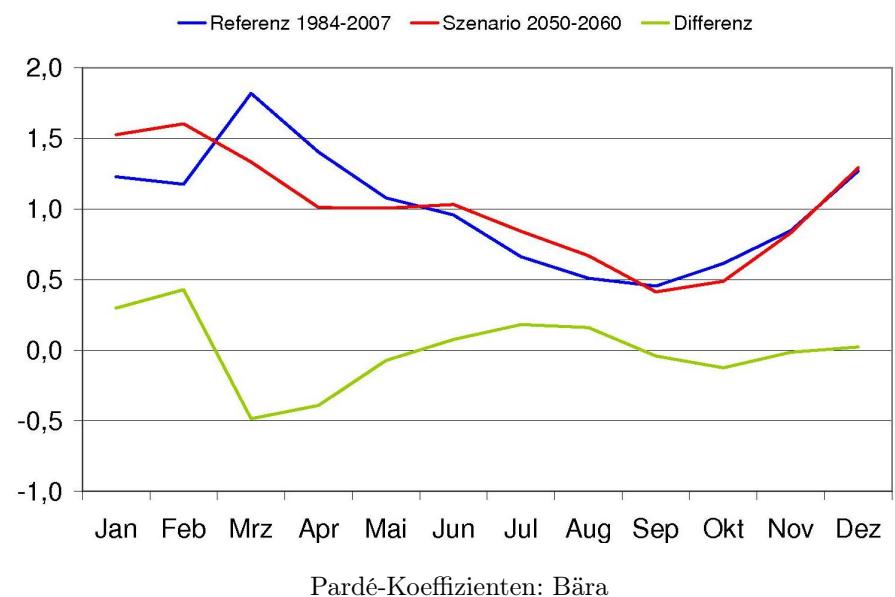


Hamel – Hamel und Nebenbäche**Wilde Gera – Wilde Gera bis Plaue und Reichenbach**

Mülsenbach – Mittleres Zwickauer Muldetal

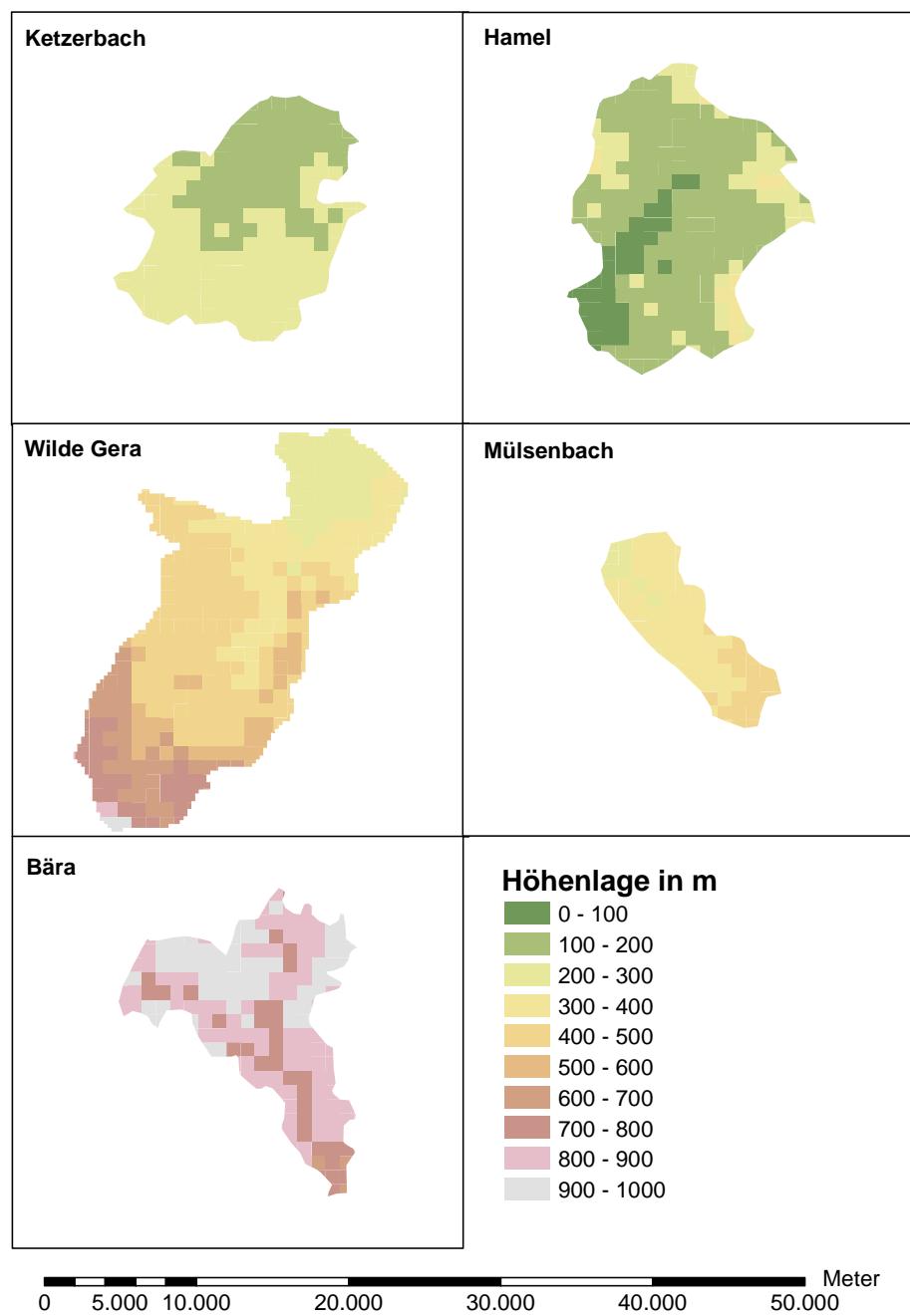


Bära – Donautal und Hochfläche von Tuttlingen bis Beuron



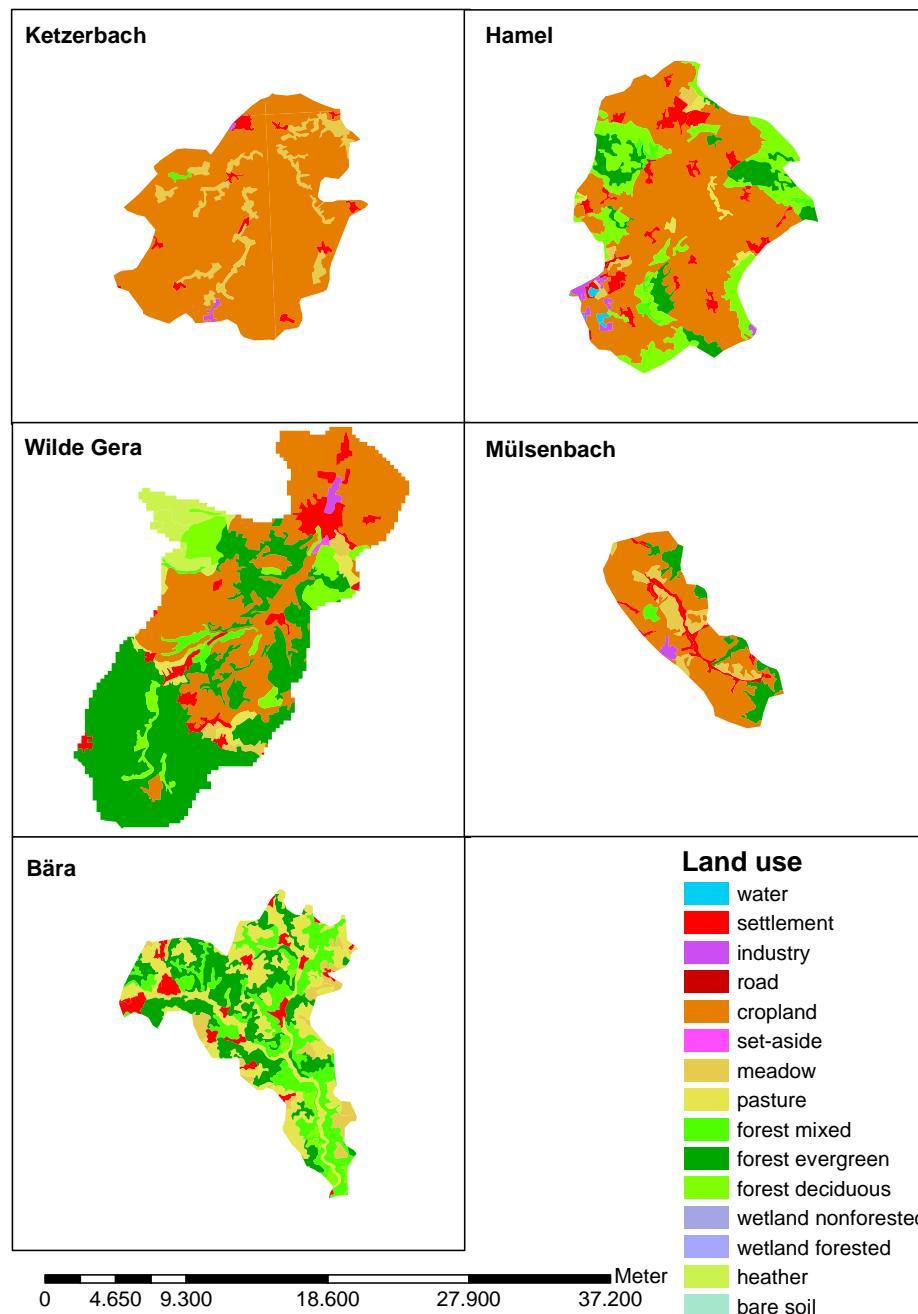
Anhang V: Karten der ausgewählten Gebiete

Höhenlage



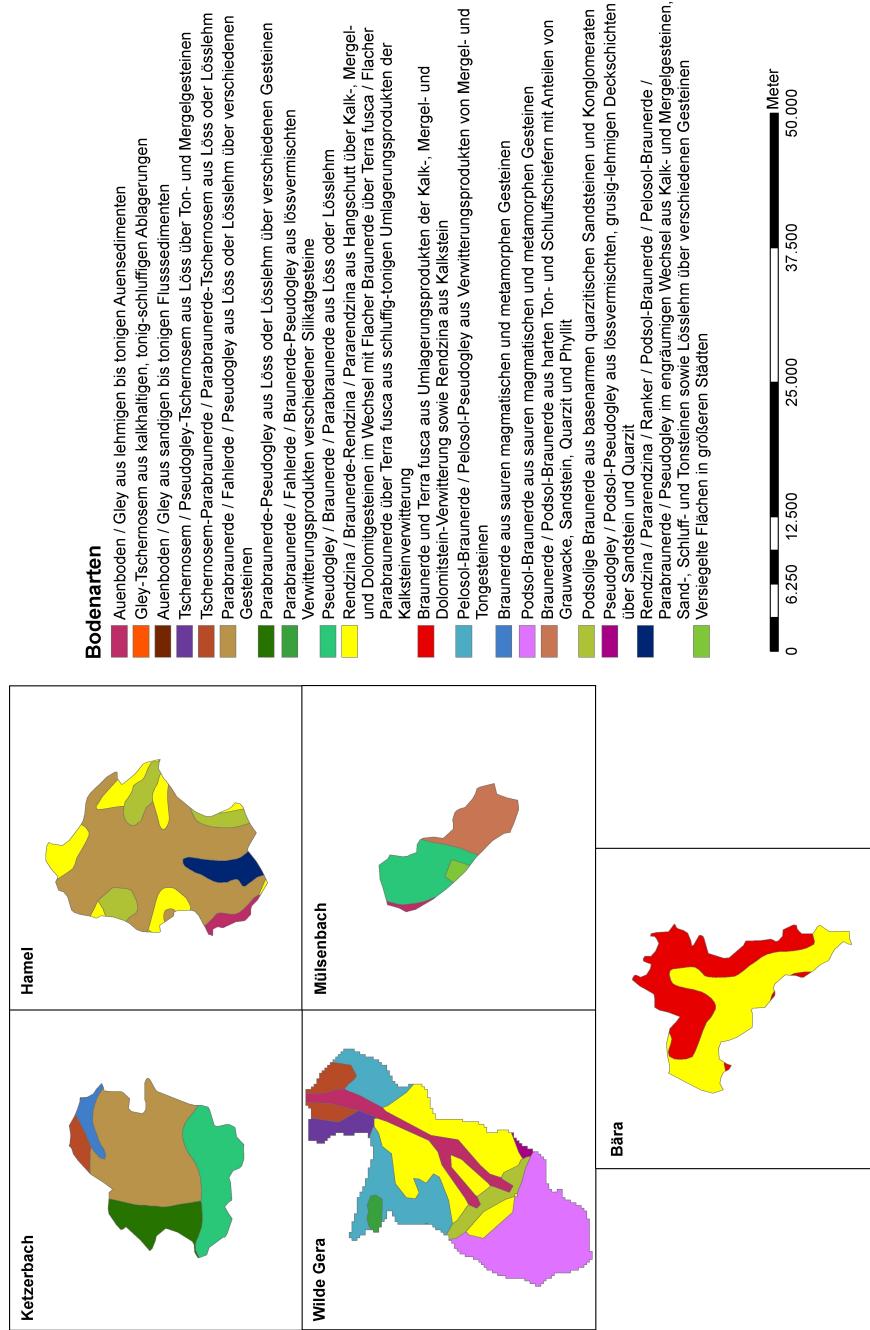
Höhen der ausgewählten Gebiete

Landnutzung



Landnutzung der ausgewählten Gebiete

Bodendaten



Bodenarten der ausgewählten Gebiete

Anhang VI: Manual: Aufbau eines SWIM-Modells

Für die Erstellung eines SWIM-Modells werden vier Ausgangskarten benötigt. Die Karten der jeweiligen Teileinzugsgebiete, in denen sich die Flüsse befinden, erhält man, indem man die entsprechenden Subbasins aus der Teileinzugsgebietskarte von Deutschland extrahiert. Stehen die Karten der Teileinzugsgebiete zur Verfügung, können dann mit der Clip-Funktion von ArcGIS die anderen drei benötigten Karten (Landnutzung, Böden, Höhenmodell) für alle Gebiete erstellt werden. Mit der Clip-Funktion kann mit Hilfe einer Maske, die in diesem Fall die Karte der jeweiligen Teileinzugsgebiete ist, aus anderen Karten ein Stück herausgeschnitten werden. In Abbildung 11 sind diese Schritte noch einmal verdeutlicht.

Die Karten, die auf diese Weise erstellt worden sind, liegen im Shape-Format (Vektordaten) vor. Im nächsten Schritt müssen diese Karten in das Raster-Format konvertiert werden. Auch hierfür stellt ArcGIS eine entsprechende Funktion zur Verfügung „Polygon to Raster“. Spätestens an diesem Punkt muss kontrolliert werden, ob sich alle Karten im gleichen Koordinatensystem befinden. Ist dies nicht der Fall, müssen die Karten mit der ArcGIS-Funktion „Project Raster“ in ein anderes Koordinatensystem transformiert werden. Um mit den Karten weiter arbeiten zu können, wurden die Rasterkarten dann in ASCII-Dateien umgewandelt. Hierfür wurde die Funktion „Raster to ASCII“ verwendet.

Da die Header der Karten, die jetzt im ASCII-Format vorliegen, zum ArcGIS-System gehören, müssen diese so umgewandelt werden, dass die Karten in GRASS eingelesen werden können. Wie die Header der unterschiedlichen Systeme aufgebaut sind und die jeweiligen Umrechnungen erfolgen, ist in Tabelle „Header von ArcGIS- und GRASS-ASCII-Dateien und deren Umrechnungen“ dargestellt. Die Karten wurden dann als *.grss Dateien abgespeichert.

ArcGIS	GRASS
ncols 314	north: 2788803.317
nrows 406	south: 2768503.317
xllcorner 4227846,3016025	east: 4243546.302
yllcorner 2768503,3168271	west: 4227846.302
cellsize 50	rows: 406
NODATA_value -9999	cols: 314

Umrechnung: ArcGIS zu GRASS	Umrechnung: GRASS zu ArcGIS
north = (cellsize * nrows) + yllcorner	ncols = cols
south = yllcorner	nrows = rows
east = (cellsize * ncols) + xllcorner	xllcorner = west
west = xllcorner	yllcorner = south
rows = nrows	cellsize = (north - south)/rows
cols = ncols	NODATA_value = 0

Header von ArcGIS- und GRASS-ASCII-Dateien und deren Umrechnungen

Auf der Grundlage, dass alle Karten für ein Gebiet vorliegen, kann nun in GRASS ein Projekt für das jeweilige Gebiet angelegt werden. Hierfür müssen der Name des Projektes (Location), der Name der Kartensammlung (Mapset) und der Pfad (Database), wo das Projekt liegen soll, angegeben werden. Anschließend wird das Koordinatensystem definiert, das sich aus den Koordinaten der Header in den grss-Dateien ergibt.

Ist das Projekt angelegt, können die vier grss-Dateien, die sich im ASCII-Format befinden, in GRASS eingelesen werden. Hier wird das GRASS-Kommando `r.in.ascii input=dem.grss output=dem` verwendet. Dieser Befehl muss auf alle vier Karten mit den entsprechenden Input- und Output-Angaben ausgeführt werden.

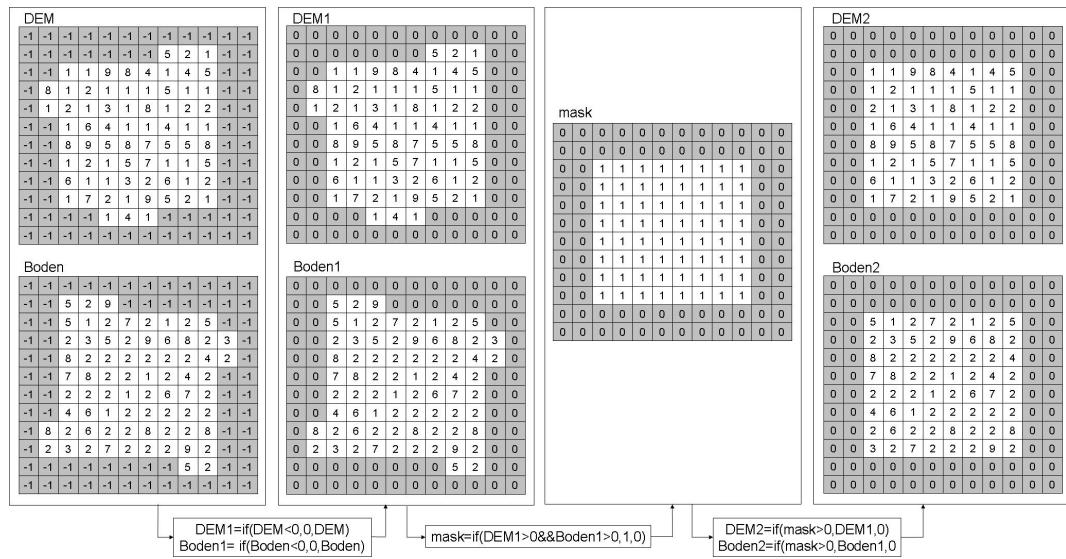
Da die ausgewählten Gebiete sehr klein sind, ist die Anzahl der Teileinzugsgebiete, die sich aus der Subbasin-Karte ergibt, nicht ausreichend. Aus diesem Grund müssen die Gebiete weiter unterteilt werden. Dies geschieht mit dem Kommando `r.watershed elevation=dem basin=subs threshold=value`. Mit diesem Kommando werden auf Grundlage des Höhenmodells neue Teileinzugsgebiete berechnet und in einer neuen Karte „subs“ abgelegt. Die Anzahl bzw. Feinheit der Teileinzugsgebiete kann durch die Angabe eines Schwellwertes „threshold“ gesteuert werden. Dieser Schwellwert gibt die minimale Größe der neuen Teileinzugsgebiete in Pixeln an.

Die nun entstandene Karte wird jetzt als ASCII-Datei exportiert, da die Aufteilung der neuen Teileinzugsgebiete nicht zufriedenstellend ist und in ArcGIS überarbeitet werden muss. Für den Export der Karte wird das Kommando `r.out.ascii map=subs >>subs.asc` verwendet. Um diese Karte als Rasterkarte mit der Funktion „ASCII to Raster“ in ArcGIS einlesen zu können, muss wieder der Header entsprechend angepasst werden. Nachdem die Rasterkarte mit „Raster to Polygon“ in ein Shape-File umgewandelt wurde, kann diese überarbeitet werden. Der Unterschied zwischen den in GRASS berechneten Teileinzugsgebieten und der überarbeiteten Karte in ArcGIS ist in Abbildung 12 zu sehen.

Die neue Karte der Teileinzugsgebiete kann nun wieder in eine Rasterkarte umgewandelt werden. Da für einen späteren Zeitpunkt die Mittelpunkte der Teileinzugsgebiete benötigt werden, können diese an dieser Stelle ermittelt werden (Abb. 12). Dies geschieht mit der ArcGIS-Funktion „Zonal Geometry“. Hier muss darauf geachtet werden, dass beim Geometrie Typ „Centroid“ angegeben wird. Das Ergebnis ist eine Rasterkarte, die so viele Punkte enthält wie es Teileinzugsgebiete gibt. Diese Mittelpunkt-Karte muss nun in eine Shape-Datei umgewandelt werden, um mit der Funktion „Add XY Coordinates“ die Koordinaten zu den Mittelpunkten hinzuzufügen.

Jetzt kann die neue Rasterkarte der Teileinzugsgebiete ins ASCII-Format konvertiert und ins GRASS-Format umgewandelt werden. Anschließend muss diese Karte wieder in GRASS eingelesen werden.

Da die 4 Karten an den Rändern kleine Unterschiede in der Anzahl der Pixel aufweisen, müssen diese maskiert werden um eine einheitliche Größe zu erhalten. Hierfür wird mit `r.mapcalc` eine Umgebung aufgerufen, in der Kartenalgebra angewendet werden kann. Um die Karten zu maskieren muss eine bestimmte Folge von Befehlen ausgeführt werden. Mit dem Kommando `dem1=if(dem<0,0,dem)` wird eine neue Karte „dem1“ erstellt, in die eine Null geschrieben wird, wenn der aktuelle Wert kleiner als Null ist. Ist der Wert größer als Null, wird der Wert der Eingangskarte „dem“ übernommen. Dieser Befehl muss auf die restlichen drei Karten angewendet werden. Anschließend wird eine weitere Karte mit dem Befehl `mask=if(sub1>0&&soil1>0&&dem1>0&&land1>0,1,0)` angelegt, die als Maske dienen soll. In die Masken-Karte wird eine 1 geschrieben wenn alle Eingangskarten an dieser Stelle einen Wert haben, der größer als Null ist. Ist dies nicht der Fall wird eine Null an diese Position geschrieben. Mit dem Befehl `dem2=if(mask>0,dem1,0)` wird wieder eine neue Karte berechnet. In diese Karte werden die Werte der Eingangskarte geschrieben, wenn der Wert an dieser Position in der Maske größer als Null ist. Andernfalls wird eine Null geschrieben. Auch dieser Befehl muss auf die anderen drei Karten angewendet werden. Auf diese Weise erhält man 4 gleich große Karten. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung „Kommandos in GRASS“ noch einmal grafisch dargestellt.



Kommandos in GRASS

Jetzt ist die Grundlage für ein SWIM-Modell geschaffen und das SWIM/GRASS Interface kann aufgerufen werden. Hier muss zu Beginn ein neues Projekt angelegt werden. Ist dies geschehen, erscheint ein Menü mit zehn Punkten (0–9). Hiervon müssen die Punkte 3–7 abgearbeitet werden. Bei den Punkten 3–5 (3. „Extract Basin Attributes“, 4. „Extract Hydrotop Structure“, 5. „Extract Topographic Attributes“) wird man aufgefordert, die entsprechenden Karten, die im Vorfeld angefertigt worden sind, anzugeben. Im Punkt 6 „Extract Groundwater Attributes“ wird gefragt, ob Grundwasserdaten vorhanden sind, die eingelesen werden können. Da für diese Gebiete keine Grundwasserinformationen vorliegen, kann hier mit „no“ geantwortet werden, um den Punkt abzuschließen. In Punkt 7 „Compute Routing Structure and Create .fig file“ wird ermittelt, wie das Wasser durch die Teileinzugsgebiete fließt. Wenn dies ohne Probleme funktioniert, bekommt man die Ausschrift „outlet subbasin is 1“.

Wenn Punkt 7 nicht ohne Probleme abläuft und eine andere Ausschrift erscheint, kann man angeben, dass man mit dem Ergebnis nicht übereinstimmt. In diesem Fall erscheint ein neues Menü, für das der Grafikmonitor von GRASS eingeschaltet sein muss. In diesem neuen Menü wählt man den Punkt „Edit Subbasin Aspect Using Graphic Monitor“. Hier kann durch Anklicken der Teileinzugsgebiete angegeben werden, wie das Gewässer durch das Gebiet verläuft. Nachdem alles fehlerfrei ist, werden vom Interface die gebietsspezifischen Dateien angelegt, aus denen ein SWIM-Modell besteht. Die Dateien und deren Bedeutung sind in Tabelle 8 dargestellt.

Jetzt kann das SWIM-Projekt aufgebaut werden. Am einfachsten ist es, wenn ein bereits bestehendes Projekt kopiert wird und die gebietsspezifischen Dateien ausgetauscht werden. Anschließend müssen die vom SWIM/GRASS Interface erzeugten bsn- und cod-Dateien bearbeitet werden. Aus der gebiet.cod wird die Anzahl der Teileinzugsgebiete kopiert und in die cod-Datei aus dem bereits bestehenden Projekt kopiert. Dann wird die Datei neu unter dem Gebiets-/Projektnamen abgespeichert. Mit der bsn-Datei wird genauso verfahren. Hier wird jedoch die Gebietsgröße kopiert. Des Weiteren muss die Datei soil.cio geändert werden. In diese Datei müssen die im Gebiet vorkommenden Bodentypen eingetragen werden. Außerdem muss die runoff.dat angepasst werden. Hier müssen die Pegeldaten für das entsprechende Gebiet eingetragen werden.

Um das Projekt zu vervollständigen, fehlen noch zwei Klimadateien. Diese werden mit Hilfe einer Klimainterpolaion erstellt. Hierbei wird wie folgt vorgegangen: Zuerst werden mit Hilfe von ArcGIS Klima- und Niederschlagsstationen herausgesucht, die sich innerhalb oder in der Nähe des

Gebietes befinden. Diese Stationen werden dann mit ihren Koordinaten und ihrer Höhe in die Datei stat-indat.prn geschrieben. Außerdem wird die stat-outdat.prn benötigt. In diese Datei werden die Mittelpunkte der Teileinzugsgebiete, ebenfalls mit ihren Koordinaten und Höhen geschrieben. Um die Höhe der Stationen und der Mittelpunkte zu ermitteln werden diese mit der ArcGIS-Funktion „Intersect“ mit dem Höhenmodell verschnitten. Des Weiteren muss im Vorfeld der Klimainterpolation die Datei allfiles.list angelegt werden. Diese Datei enthält die Pfade zu den Klimadaten der ausgewählten Klima- und Niederschlagsstationen.

Anschließend muss in einer Fortran-Datei „real-zu.f“ an verschiedenen Stellen die Anzahl der verwendeten Klimastationen angegeben werden. Nach dem Compilieren kann das realzu-Programm ausgeführt werden. Dieses Programm hat die Aufgabe, die Klimadaten der verwendeten Stationen in eine einzige Datei zu schreiben „data.sum“.

Im nächsten Schritt muss eine weitere Datei, die „interpol.par“ geändert werden. Da die Klimadateien Daten von 1951–2006 enthalten, muss in der interpol.par der Starttag angegeben werden. Dieser lässt sich leicht mit dem Befehl `length(seq(ISOdate(1951,1,1), ISOdate (1996,1,1), "day"))` in R ermitteln. In diesem Beispiel wäre der Starttag der 1. Januar 1996. Des Weiteren muss in dieser Datei angegeben werden, wie viele Tage in der Klimainterpolation berechnet werden sollen. Diese Anzahl kann man ebenfalls mit dem eben genannten Befehl ermitteln.

Jetzt erfolgt die eigentliche Klimainterpolation. Hierfür wird die Software „invd“ (inverse distance) verwendet. Dieses Programm interpoliert mit Hilfe der Dateien „data.sum“ und der „interpol.par“ die gemessenen Daten der realen Klimastationen zu den Mittelpunkten der Teileinzugsgebiete. Das Ergebnis dieser Interpolation wird in zwei weitere Dateien geschrieben „clim1.dat“ und „clim2.dat“, die in das entsprechende SWIM-Projekt kopiert werden müssen.

Bevor nun das SWIM-Modell das erste Mal gestartet werden kann, muss in der Datei „gebiet.cod“ das Startjahr der Simulation und die Anzahl der Jahre, die simuliert werden sollen, angegeben werden.

Jetzt kann das Modell ausgeführt werden.

