

**Anpassung von WaSiM-ETH und die
Erstellung und Berechnung von Landnutzungs-
und Klimaszenarien für die
Niederschlag-Abfluss-Modellierung am
Beispiel des Osterzgebirges**

Der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
eingereichte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium

Dr. rer. nat.

vorgelegt

von Dipl.-Geoökologin Hannaleena Annikki Pöhler
geboren am 25. Januar 1978 in München

Freiberg, den 29. Mai 2006

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts mit dem Namen EMTAL (Einzugsgebietsmanagement von Talsperren in Mittelgebirgslandschaften).

Mein erster Dank richtet sich an Prof. Dr. Jörg Matschullat und Dr. Volkmar Dunger für die sehr gute Betreuung, die immer für mich offenstehende Tür und die zahlreichen Anregungen und Diskussionen. Prof. Dr. Gerd Wessolek danke ich für die Bereitschaft, sich mit meiner Arbeit auseinanderzusetzen und dafür, dass er mir die Gelegenheit geboten hat, das Thema mit seiner Arbeitsgruppe zu diskutieren.

Herzlichen Dank möchte ich all meinen Kolleginnen und Kollegen und allen Diplomanden und anderweitig Beteiligten im Emtal-Projekt aussprechen, insbesondere aber meinen „Mitdoktorandinnen“ Annett Weiß, Sylvi Bianchin und Astrid Weigert, für die anregenden Diskussionen, die gute Zusammenarbeit und das freundschaftliche und herzliche Miteinander.

Allen meinen Freunden und Verwandten, die es mir mit geselligen Abenden, angeregten politischen oder sonstigen Diskussionen, Wanderungen oder ähnlichem möglich gemacht haben, auch immer wieder abzuschalten, spreche ich hiermit meinen Dank aus. Einen sehr wichtigen Anteil haben dabei meine Eltern und meine Schwester, die immer für mich da sind, wenn ich Unterstützung brauche.

Besonderer Dank aber gebührt meinen Mann André für seine Geduld, dafür, dass er immer für mich da ist und für so viele andere Dinge, die ich garnicht alle aufzählen kann.

Hannaleena Pöhler
Freiberg, den 29. Mai 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielstellung	1
1.2	Hydrologische Modellierung	2
1.2.1	Einführung	2
1.2.2	Stand der Wissenschaft	2
1.2.3	Theoretische Grundlagen des Modells WaSiM-ETH	6
1.2.4	Bewertung des Modells und der Modellierung	15
2	Ist-Standsanalyse	21
2.1	Gebietsbeschreibung	21
2.1.1	Das Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz	21
2.1.2	Das Einzugsgebiet der Zschopau	30
2.2	Anpassung des Modells	31
2.2.1	Geographische Daten	31
2.2.2	Klimatologische und meteorologische Daten	37
2.2.3	Hydrologische Daten	39
2.3	Ergebnisse und Diskussion	42
2.3.1	Kalibrierung und Validierung	42
2.3.2	Skalen	55
2.4	Zusammenfassung	63
3	Szenarien	65
3.1	Vorbemerkung	65
3.2	Landnutzungsszenarien	66
3.2.1	Stand der Forschung	66
3.2.2	Methodik und Ergebnisse	68
3.2.3	Zusammenfassung und Diskussion	85
3.3	Klimaszenarien	87
3.3.1	Stand der Forschung	87
3.3.2	Methoden	92
3.3.3	Ergebnisse	99
3.3.4	Diskussion	103
3.4	Zusammenfassung	105
4	Zusammenfassung	107
5	summary	111

6	Literatur	113
A	Anhang	125
A.1	Eingangsdaten in WaSiM-ETH - Ist-Stand	125
A.2	Eingangsdaten in WaSiM-ETH - Szenarien	129
A.3	Abflusstrends	133

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der Aufbau des Modells WaSiM-ETH	7
2.1	Das Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz im Osterzgebirge/Sachsen	22
2.2	Die mittleren Hochwasser (HQ) und Niedrigwasser (NQ) der Pegel Ammeldorf, Hainsberg 3 (Wilde Weißeritz) sowie Dippoldiswalde, Hainsberg 1 (Rote Weißeritz) in der Klimanormalperiode 1961-1990	28
2.3	Die mittleren Abflüsse (arithm. Mittel und Median) der Pegel Ammeldorf (Wilde Weißeritz) und Dippoldiswalde (Rote Weißeritz) in der Klimanormalperiode 1961-1990.	29
2.4	Vergleich der kumulierten Niederschläge täglicher und stündlicher Messwerte für das Gebietsmittel des Einzugsgebiets des Pegels Ammeldorf	38
2.5	Ganglinienvergleich der Pegel Schmiedeberg und Dippoldiswalde 1997	41
2.6	Vergleich der Modellierungsergebnisse mit <i>wasim 1</i> und <i>wasim 2</i> , Pegel Ammeldorf 1995	43
2.7	Vergleich der Modellierungsergebnisse mit <i>wasim 1</i> und <i>wasim 2</i> , Pegel Wiesa 1995	43
2.8	Kalibrierung des Pegels Dippoldiswalde für das Jahr 1994	48
2.9	Validierung des Pegels Dippoldiswalde	48
2.10	Kalibrierung des Pegels Hainsberg 1 für das Jahr 1994	49
2.11	Validierung des Pegels Hainsberg 1	49
2.12	Modellierung in Stundenschritten am Pegel Dippoldiswalde	50
2.13	Kalibrierung des Pegels Ammeldorf für das Jahr 1994	53
2.14	Validierung des Pegels Ammeldorf 1991-2000	53
2.15	Kalibrierung des Pegels Hainsberg 3 für das Jahr 1994	54
2.16	Validierung des Pegels Hainsberg 3	54
2.17	Modellierung des Pegels Ammeldorf in Stundenschritten	55
2.18	Das Einzugsgebiet im 20 m-Raster und im 1000 m-Raster	59
2.19	Veränderung des Anteils der Gesamtfläche und der Jahresabflusssumme in verschiedenen Rasterweiten in den Einzugsgebieten der Pegel Schmiedeberg, Dippoldiswalde, Rehefeld und Ammeldorf.	60
2.20	Veränderung des Anteils von Direktabfluss am Gesamtabfluss in verschiedenen Rasterweiten in den Einzugsgebieten der Pegel Schmiedeberg, Dippoldiswalde, Rehefeld und Ammeldorf.	61
2.21	Modellierungsgüten in den Einzugsgebieten der Pegel Rehefeld, Ammeldorf, Schmiedeberg und Dippoldiswalde in den Rasterweiten 20 m (r20), 50 m (r50), 100 m (r100), 300 m (r300), 500 m (r500) und 1000 m (r1000).	62

3.1	modellierter Tagesgang von Direktabfluss und Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Schwarzbaches bei konservierender und konventioneller Landnutzung . . .	74
3.2	modellierter stündlicher Abflussganglinie von Direktabfluss und Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Weißbaches bei konservierender und konventioneller Landnutzung	76
3.3	Waldmehrungsflächen im Untersuchungsgebiet	79
3.4	modellierter Abflussganglinie (Gesamtabfluss) der Einzugsgebiete des Schwarzbaches und des Weißbaches mit und ohne Waldmehrung	80
3.5	modellierter Abflussganglinie (Gesamtabfluss) der Einzugsgebiete des Schwarzbach und Weißbach und an den Pegeln Dippoldiswalde und Ammeldorf mit potentiell natürlicher Vegetation (pnv) und beim Ist-Stand	82
3.6	Vergleich der berechneten jährlichen Abflusssummen des Weißbachs bei Anwendung der Szenarien	85
3.7	Temperaturklassen für das Weißeritz Einzugsgebiet.	94
3.8	Niederschlagsklassen für das Weißeritz Einzugsgebiet.	97
3.9	Modellierte Jahresabflusssummen 1991-2000 mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten am Beispiel des Pegels Ammeldorf	99
3.10	Modellierte Abflusssummen 1991-2000 in den einzelnen Jahreszeiten mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten am Beispiel des Pegels Ammeldorf .	100
3.11	Modellierte Abflusssummen 1991-2000 und 2021-2050 für das Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz	101
3.12	Modellierte Abflusssummen 1991-2000 und 2021-2050 im Frühling mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten an der Elbemündung	102
3.13	Modellierte Abflusssummen 1991-2000 und 2021-2050 im Frühling mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten am Pegel Ammeldorf	102
3.14	Abflusstrends am Pegel Ammeldorf zwischen 1931 und 2000 im Vergleich mit prognostizierten künftigen Trends	104
A.1	Landnutzung und Bodenarten im Untersuchungsgebiet	125
A.2	Abflusstrends am Pegel Ammeldorf zwischen 1931 und 2000	133
A.3	Abflusstrends am Pegel Dippoldiswalde zwischen 1965 und 2000	133

Tabellenverzeichnis

1.1	Niveaustufen der Prozessbeschreibung bei der Wasserhaushaltsmodellierung	5
1.2	Eingangsdaten in WaSiM-ETH	8
2.1	Die Klimaverhältnisse im Osterzgebirge	26
2.2	Charakteristiken der Talsperreneinzugsgebiete	30
2.3	Landnutzungsparameter in WaSiM-ETH, deren zeitliche Auflösung und genutzte Quellen	33
2.4	Bodenparameter in WaSiM-ETH (<i>wasim 1</i>), deren zeitliche Auflösung und genutzte Quellen	34
2.5	Bodenparameter in WaSiM-ETH (<i>wasim 2</i>), deren zeitliche Auflösung und genutzte Quellen	35
2.6	Für die Modellierung genutzte Pegelstationen im Einzugsgebiet	40
2.7	ermittelte Bodenparameter für <i>wasim 1</i>	44
2.8	ermittelte Bodenparameter für <i>wasim 2</i>	45
2.9	Validierung des Modells <i>wasim 2</i> an den Pegeln Dippoldiswalde und Hainsberg 1 an der Roten Weißeritz	47
2.10	Validierung des Modells an den Pegeln Ammeldorf und Hainsberg 3 an der Wilden Weißeritz	52
3.1	Durch ENKE (2001, 2003a) für die Klassifizierung vorgegebene Temperaturintervalle	93
3.2	Temperaturintervalle für die unteren Lagen (Messstation Tharandter Wald) im Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz	95
3.3	Durch ENKE (2001, 2003a) für die Klassifizierung vorgegebene Niederschlagsintervalle	96
3.4	Niederschlagsintervalle für die unteren Lagen (Messstation Tharandter Wald) im Einzugsgebiet der Weißeritzen	97
A.1	ATKIS-Landnutzungskategorien	126
A.2	Leitbodenarten für die Parametrisierung in WaSiM-ETH	127
A.3	Genutzte meteorologische Stationen für die Modellierung im Untersuchungsgebiet	128
A.4	Standardfruchtfolgen für verschiedene Höhenlagen im Untersuchungsgebiet	130
A.5	Die potentiell natürliche Vegetation (pnv) im Untersuchungsgebiet	131

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

α	van Genuchten-Parameter [1/m]
α_t	spezifische Einzugsgebietsgröße pro Längeneinheit einer Gitterzelle (Flächen- größe, die pro Meter quer zur Fließrichtung in ein Gitterelement entwässert) [m ² /m]
β_t	Geländegefälle [m/m]
γ	mittlerer topographischer Index des (Teil-)Gebiets [-]
μ	Mittelwert
μ_i	mittlere Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten
$\psi(\Theta)$	Saugspannung in Abhängigkeit vom Wassergehalt [m]
σ	Varianz
Θ	aktueller Wassergehalt [m ³ /m ³]
Θ_{res}	Restwassergehalt bei $k(\Theta) = 0$ [m ³ /m ³]
Θ_{sat}	Wassergehalt bei Sättigung [m ³ /m ³]
ε_i	Abweichung gemessen - modelliert ($y_i - x_i$) zum Zeitpunkt i
c_K	maximales Verhältnis der relativen hydraulischen Leitfähigkeiten benach- barter Bodenschichten [-]
c_s	topographischer Index [-]
d	Dicken der jeweiligen Schichten, zwischen denen der Fluss berechnet wird [m]
d_r	Drainage- oder Entwässerungsdichte, Maß für die Dichte von Makroporen pro Flächeneinheit [-]
E	Effizienz (efficiency)
EV	Erklärte Varianz
F	Infiltrationsmenge [mm]
FC	Feldkapazität [%]
h_{geo}	geodätische Höhe [m]
h_h	hydraulische Höhe in Abhängigkeit vom Wassergehalt als Summe aus $\psi(\Theta)$ und h_{geo} [m]
I	Gefälle der Flussstrecke [m/m]
k_d	Speicherrückgangskonstante für den Direktabfluss [d]
k_H	Speicherrückgangskonstante für den Zwischenabfluss [d]
k_h	Auslaufkonstante für Basisabfluss [-]
k_s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
k_{eff}	effektive hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
K_{korr}	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung ungesättigter Zustände und bevor- zugter Fließwege [-]
$k_{o(rel)}$	Leitfähigkeit der oberen Bodenschicht [m/s]
k_{rec}	Abnahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe [-]
$k_{u(rel)}$	Leitfähigkeit der unteren Bodenschicht [m/s]

<i>M</i>	Manningbeiwert [$m^{1/3}/s$]
<i>mSB</i>	maximale Kapazität des pflanzenverfügbaren Bodenspeichers [%]
<i>MSE</i>	mittlerer quadrierter Fehler (mean square error)
<i>n</i>	van Genuchten-Parameter [-]
<i>P_{grenz}</i>	Grenzniederschlagsintensität für Abfluss über Makroporen [mm]
<i>q</i>	Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]
<i>Q₀, Q_b</i>	Skalierungsparameter für den Basisabfluss [-]
<i>q_{in}</i>	Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]
<i>q_{out}</i>	Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]
<i>QD_{Schnee}</i>	Anteil der Schneeschmelze am Direktabfluss [-]
<i>r</i>	Reduktionswert des Rückflusses aus Interflow- zu Bodenspeicher [-]
<i>R</i>	Bestimmtheitsmaß
<i>R_h</i>	hydraulischer Radius [m]
<i>RSME</i>	Wurzel aus dem mittleren quadrierten Fehler (root mean square error)
<i>S_i</i>	spezifischer Sättigungsindex
<i>S_m</i>	Anfangsfüllung des Zwischenspeichers [mm]
<i>S_m</i>	mittleres Sättigungsdefizit des Gebietes (arithmetisches Mittel aller <i>S_i</i> [mm])
<i>SH_{max}</i>	Maximaler Zwischenspeicherinhalt [mm]
<i>T₀</i>	gesättigte hydraulische Transmissivität am Standort [m^2/s]
<i>T_{korrr}</i>	Korrekturfaktor der Bodentransmissivität und Erfassung skalenabhängiger Einflüsse des topographischen Index [-]
<i>T_{korrr}</i>	Korrekturparameter für die Transmissivität, Skalierung von γ
<i>unsat</i>	Anfangsfüllung der ungesättigten Zone [mm]
<i>v</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]
<i>VE</i>	Volumenfehler (volume error)
<i>x_i</i>	modellierter Wert
<i>y_i</i>	gemessener Wert, Referenz
<i>m</i>	Rezessionsparameter des Basisabflusses, gebietspezifischer Modellparameter [mm]
<i>Z₀</i>	effektive Vegetationshöhe
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BKKonz	Bodenkonzeptkarte
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CIR	Color-Infrared
Corine	Coordinated Information on the Environment
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DLM	digitales Landnutzungsmodell
EEA	European Environmental Agency
EMTAL	Einzugsgebietsmanagement von Talsperren in Mittelgebirgslandschaften
EU	Europäische Union
GIS	Geographisches Informationssystem
IDW	inverse distance weighting
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
LAI	Leaf Area Index - Blattflächenindex [m^2/m^2]
LfUG	Landesamt für Umwelt und Geologie
LPG	landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaft
rsc	Oberflächenwiderstand

SMUL	Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Sachsen
SMWA	Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit, Sachsen
VA	Volksausgabe
VEB	Volkseigener Betrieb
wasim 1	WaSiM-ETH unter Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmoduls auf Basis des TOPMODEL
wasim 2	WaSiM-ETH unter Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmoduls auf Basis der Richards-Gleichung
WaSiM-ETH ...	Wasserhaushalts-Simulations-Modell, entwickelt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

Die Siedlungsgeschichte des Menschen ist bestimmt von der Zugangsmöglichkeit zu trinkbarem Wasser. Die meisten Kulturen der Menschheitsgeschichte, darunter die Reiche der Ägypter, der Babylonier oder China, entstanden an großen Flüssen und Seen. Die Gewässer wurden als Verkehrswege genutzt, sie lieferten Nahrung, Trink- und Brauchwasser. Gleichzeitig aber mussten sich die Menschen mit katastrophalen Hochwassern und Überschwemmungen, lang anhaltenden Niedrigwasserperioden und Dürren auseinandersetzen. Immer versuchten sie deshalb, die Vorgänge in den Gewässern zu verstehen, vorherzusehen und zu ihren Gunsten zu manipulieren (u. a. DEUTSCH 2004; LIEBSCHER 2004; WEICHSELGARTNER 2000). Aus mangelndem Systemverständnis wurden und werden dabei Fehler gemacht. In neuer Zeit versucht man Kompromisse zu finden zwischen den natürlichen Gegebenheiten, dem Schutz der Gewässerökosysteme und den Anforderungen, die der Mensch an diese stellt. So kam es zu einem völlig neuen interdisziplinären Forschungsfeld: dem Flussgebietsmanagement (WEICHSELGARTNER 2000). Die hydrologische Modellierung bietet dabei eine Hilfe zum Erwerb und zur Nutzung des Verständnisses von Gewässern und ihrer Reaktionen auf verschiedenste Einflüsse.

Das BMBF-Verbundprojekt EMTAL (Einzugsgebietsmanagement von Talsperren in Mittelgebirgslandschaften), im Rahmen dessen die vorliegende Arbeit entstand, kann vor diesem Hintergrund gesehen werden. In ihm stehen mehrere hydrologische Fragestellungen im Vordergrund: Wie wirken sich Landnutzungsänderungen auf die Gewässer aus? Wie wirken sich Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt eines Gebietes aus? Welchen Einfluss haben die genannten Änderungen auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwassern und Trockenperioden? Wie wirken sich veränderte Niederschlagsregime auf Hochwasserspitzen aus? Dabei werden in einem interdisziplinären Ansatz von anderen Arbeitsgruppen (Geoökologie, Biologie/Ökologie, Boden- und Erosionsschutz, Meteorologie, Flood Hydrology, Umweltmanagement) erarbeitete Fragestellungen und Lösungsansätze mit in die Berechnungen einbezogen.

Die Wasserrahmenrichtlinie der EU (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2000) sieht vor, flächendetaillierte Bewirtschaftungspläne für Flussgebiete aufzustellen, die Angaben über mögliche Belastungen von Gewässern enthalten sollen. „Die Mitgliedstaaten können Modellierungstechniken anwenden, um diese Beurteilung zu unterstützen.“ (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2000:29). In Deutschland arbeitet beinahe jedes Bundesland und jede Wasserbehörde mit einem eigenen Modellierungsprogramm, das in der Regel speziell an die Bedingungen vor Ort angepasst ist. Im Gegensatz dazu wurde zu Projektbeginn festgelegt, kein neues Modell zu schreiben, sondern ein bereits bestehendes und bewährtes Niederschlag-Abfluss-Modell zu nutzen. In dieser Arbeit wird ein geeignetes Modell ausgewählt und an die hydrologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet angepasst.

Um die Nutzbarkeit der Ergebnisse der hydrologischen Modellierung innerhalb des EMTAL-Projekts auch in anderen, ähnlichen Einzugsgebieten zu gewährleisten, muss das Modell über-

tragbar sein. Dabei soll das Modell vor allem vor dem Hintergrund der je nach Einzugsgebiet sehr unterschiedlichen Datensituation auf Flexibilität gegenüber verschiedenen aufgelösten Eingangsdaten und der Vielzahl möglicher Szenarien überprüft werden. Zudem wird festgestellt, inwieweit das in dieser Arbeit genutzte und für das Untersuchungsgebiet parametrisierte Modell auf ähnliche Einzugsgebiete übertragbar ist.

In der Zusammenarbeit mit den anderen Arbeitsgruppen sollen mit dem ausgewählten hydrologischen Modell Szenarien berechnet werden können. Von Interesse sind insbesondere Landnutzungsszenarien in Hinblick auf den Hochwasserschutz bzw. das Wasserdargebot der Talsperren sowie Klimaszenarien. Nach Erarbeitung und Berechnung der Szenarien wird daher eine Bewertung des Modells hinsichtlich der Eignung für Szenarienrechnung erfolgen.

1.2 Hydrologische Modellierung

1.2.1 Einführung

In der Regel werden für Modellierungen Einzugsgebiete ausgewählt, die eine gute Datenlage vorweisen - so auch das in dieser Arbeit betrachtete Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz. Doch auch in diesen gut beobachteten Regionen treten in der Regel noch erhebliche Messlücken auf und die erforderliche Güte der Daten ist nicht immer gewährleistet. Dazu kommen Untersuchungslücken. So wurde zwar beispielsweise die Landwirtschaft im Einzugsgebiet der benachbarten Talsperre Saidenbach in den vergangenen 15 Jahren zu nahezu 100 % in konservierende umgewandelt (siehe Abschnitt 3.2), es ist aber nach NITZSCHE (mündl. Mittl., Landesanstalt für Landwirtschaft, 06.10.2005) wegen vielfältig veränderter Randbedingungen nicht möglich, Abflussdaten vorher und nachher zu vergleichen. Um bei dem Beispiel zu bleiben, wurden zum Vergleich der Anbautechniken zwar einige Beregnungsversuche durchgeführt, um Erosionsraten, Oberflächenabflüsse und das Infiltrationsverhalten vergleichen zu können, doch abgesehen von Beobachtungen der Landwirte ist es nicht möglich, harte Daten und Fakten über das sich möglicherweise geänderte (Gesamt-)Abflussverhalten in längeren Zeiträumen von diesen Flächen zu bekommen. Man ist auf Mutmaßungen und Annahmen angewiesen. In Bezug auf die Klimaszenarien ist die Lage noch schwieriger, da niemand die Zukunft vorhersagen kann; wir können nur Schätzungen anstellen, mit Hilfe vergangener Trends, der Klimamodellierung und Erfahrungen (ZWIERS U. VON STORCH 2004). Eine Verifizierung der erhaltenen Ergebnisse ist in diesem Fall eine Frage der Zeit, nicht statistischer oder messtechnischer Methoden.

Da es in solchen Fällen aus vielfältigen Gründen meist (noch) keine geeigneten Messmethoden gibt, wird in der Regel auf ein möglichst gut geeignetes Modell zurückgegriffen.

1.2.2 Stand der Wissenschaft

Die natürlichen Prozesse des Wasserkreislaufs können bisher in ihrer gesamten Komplexität nicht exakt erfasst werden. Daher wird versucht, die Realität durch systemtheoretische, mathematische Modelle in idealisierendem Maßstab zu abstrahieren. Das System ist nach DVWK (1999) eine abgegrenzte Gesamtheit von physikalischen Elementen, die im betrachteten Fall vereinfacht ausgedrückt eine Eingabe von Wasser und eine Ausgabe von Wasser in einen Zeitbezug bringt. Das Einzugsgebiet ist in diesem theoretischen Verständnis ein offenes dynamisches System, welches mit seiner Umgebung durch die Zufuhr (Niederschlag, Zustrom) und die Abfuhr von Wasser (Verdunstung, Abfluss) über die Gebietsgrenzen hinaus in Bezie-

hung steht. Die Ein- und Ausgabe aus einem solchen System sind über eine Systemoperation, also eine Übertragungsfunktion, kausal verknüpft. Diese Systemoperation kann durch ein Modell beschrieben werden, dessen Komplexität in der Regel vom Zweck der Modellanwendung abhängig ist (BRONSTERT 2003).

In der Modellierung wird zwischen zwei Haupt-Vorgehensweisen unterschieden. In der *Vorwärts-Modellierung* sind Systemgleichungen, Randbedingungen und Parameter bekannt. Gesucht ist der Output aus dem System, beispielsweise der Abfluss an einem Pegel. Hierzu sind alle Prognoseszenarien zu zählen. In der *Inversen Modellierung* dagegen sind Systemgleichung, Randbedingungen und Output des Systems bekannt. Gesucht werden die Parameterwerte, die die Transformation von Input zu Output erzeugen. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise sind Säulenexperimente zur Ermittlung der Van-Genuchten-Parameter für die Beschreibung der Wasserflüsse im Boden.

Es wird zudem zwischen verschiedenen Modelltypen unterschieden (Definitionen nach BRONSTERT 2004; DVWK 1999; DYCK U. PESCHKE 1995; ROHDENBURG 1989):

1. Stochastische Modelle

Unterschieden werden kann hier zwischen Zeitreihenmodellen und probabilistischen Modellen. Sie werden bei stochastisch verteilten Prozessen angewandt (z.B. Wetter- und Katastrophenanalyse, Risikoanalyse). Die in ihnen enthaltene stochastische Komponente dient nicht der Prozessbeschreibung selbst, sondern zur Beschreibung der räumlichen Varianz. Stochastische Modelle können mit deterministischen verknüpft werden (z.B. NIELSEN et al. 1986).

2. Deterministische Modelle

Die in diesen Modellen verwendeten Grundgleichungen setzen die Gültigkeit des Kausalprinzips voraus, d.h. ein späterer Zustand kann aus einem vorhergehenden berechnet werden. Sie können in drei Kategorien eingeteilt werden. Tabelle 1.1 fasst die Eigenschaften von Black-Box-, Grey-Box- und White-Box-Modellen in Hinblick auf ihre Anwendung im Einzugsgebietsmanagement zusammen.

a) Black-Box-Modelle

Dieser Modelltyp fasst das Einzugsgebiet als ein System auf. Dabei wird nicht das reale System abgebildet, sondern es werden lediglich seine Wirkungen durch mathematische Systemfunktionen nachgebildet. Die Systemoperationen werden dabei nicht im Detail untersucht, sondern durch empirische Erfahrungswerte ersetzt. Diese empirischen Modelle stellen einen Formalismus dar, von dem lediglich gefordert wird, dass für bestimmte, in der Natur gemessene Eingangsgrößen errechnete Ausgangsgrößen erzeugt werden, die hinreichend genau mit gemessenen übereinstimmen. Dadurch bleibt der Transfervorgang des Systeminputs in die Systemantwort „unsichtbar“. Im System werden keine räumlichen Differenzierungen unterschieden und die inneren Systemeigenschaften werden als zeitlich konstant angesehen. Anwendung findet dieses Verfahren z.B. in der klassischen Niederschlags-Abfluss-Modellierung (Zweiflächendiagramme oder Einheitsganglinienverfahren, DYCK U. PESCHKE 1995).

b) Grey-Box-Modelle

Dies sind hydrologische Modelle mittlerer Komplexität. Diese Modelle versuchen Vorteile der einfachen Ansätze der konzeptionellen Modelle mit denen physikalisch

begründeter Modelle, insbesondere hinsichtlich der Prozess- und Raumdetailliertheit, zu verbinden. Sie beschreiben die physikalischen Gesetzmäßigkeiten durch vereinfachende Näherungen und bedienen sich dabei teilweise der Empirie. Auch physikalisch begründete Prozessbetrachtungen finden Eingang in diese Modelle, jedoch überwiegen konzeptionelle Vereinfachungen. Häufig werden die einzelnen Prozesse des Wasserkreislaufs separat berechnet, so dass sie einfach identifiziert werden können. In diese Kategorie gehören die meisten Modelle, die in Forschung, aber auch im gewerblichen Bereich und bei Behörden verwendet werden, darunter beispielsweise die Einzugsgebietsmodelle HBV (BERGSTRÖM U. FORSMAN 1973), ArcEgmo (BECKER et al. 2002), TOPMODEL (BEVEN 2001) und WaSiM-ETH (SCHULLA 1997).

c) White-Box-Modelle

Diese Modelle haben den Anspruch, die verschiedenen hydrologischen Prozesse einzeln durch mathematische Systemfunktionen physikalisch begründet darzustellen und die Einzugsgebietsbedingungen bezüglich Boden, Vegetation und Geländeoberfläche direkt aus Messungen und räumlich differenziert zu parametrisieren. Die Realisierung des Anspruchs erfordert eine große Anzahl von Eingangsinformationen und Modellparametern, was einen operationellen Einsatz dieser Modelle nur eingeschränkt möglich macht. Daneben ist der Idealfall, die genaue Kenntnis aller Systemeigenschaften, (noch) nicht gegeben, so dass viele Prozessansätze weiterhin empirische Komponenten enthalten. Zudem können meist die Effekte räumlicher Variabilitäten, die das Prozessverhalten stark prägen, nicht mit den betreffenden Gesetzen erfasst werden. Deshalb wird in der Literatur der Begriff „physikalisch begründet“ meist in weniger engem Sinne verstanden. White-Box-Modelle finden vor allem im Bereich der Forschung Verbreitung. Beispiele sind das SHE-Modell (Système Hydrologique Européen, ABBOT et al. 1986) und CATFLOW (MAURER 1997).

Alle vorgestellten Modelltypen weisen spezifische Vor- und Nachteile auf (Tabelle 1.1). Besonders die Anforderungen an die Parametrisierung und die Verfügbarkeit von zeitlich und räumlich fein aufgelösten Messdaten zur Überprüfung, Kalibrierung und Weiterentwicklung von Modellen können ein ernst zu nehmendes Hindernis darstellen. Bei konzeptionellen Modellen können die Modellparameter in der Regel nicht aus Gebietseigenschaften abgeleitet werden. Sie müssen entweder durch empirische Funktionen abgeschätzt werden oder mit Hilfe einer Optimierungsstrategie so angepasst werden, dass die Abweichung zwischen Simulationsergebnissen und Beobachtungen minimiert wird (BRONSTERT 2003). Auch bei physikalisch begründeten Modellen müssen insbesondere im größerskaligen Bereich Parameteranpassungen vorgenommen werden, wobei eine schrittweise Verfeinerung möglich ist, so dass die Prozessparameter bei adaptiver Kalibrierung schrittweise an physikalischer Bedeutung und damit auch an Übertragbarkeit gewinnen. Dadurch ist hier wie auch bei den Grey-Box-Modellen durch die große Anzahl von Einzelprozessen und die damit verbundene hohe Parameterzahl häufig keine eindeutige Parameterkombination möglich (ROHDENBURG 1989; BRONSTERT 2003). Allerdings ist dies auch nicht Aufgabe der physikalisch begründeten Modelle, da der Schwerpunkt mehr auf Identifikation und Quantifizierung der Einzelprozesse der Wasserkreislaufs liegt. In neuer Zeit wird versucht, die Notwendigkeit der Eichung bei physikalisch begründeten Modellen einzuschränken oder hinfällig zu machen (SIVAPALAN 2003). Aufgrund von Datenmangel, unvollständigem Prozessverständnis, kleinräumigen Variabilitäten und ähnlichem wird dies

Tabelle 1.1: Niveaustufen der Prozessbeschreibung bei der Wasserhaushaltsmodellierung (verändert nach ROHDENBURG 1989)

	Black-Box-Modelle	Grey-Box-Modelle	White-Box-Modelle
alternative Bezeichnung	mathematische Modelle, empirische Modelle, teilweise „lumped models“	deterministisch-analytische Modelle	deterministisch-numerische Modelle
Funktionsweise	vereinfachte Beschreibung von Prozessen durch empirisch ausgewählte (mathematische) Funktionen	vereinfachte Beschreibung von Prozessen durch physikalisch begründete Modellfunktionen	exakte physikalische Beschreibung von Prozessen
mathematische Lösung	analytische Lösung möglich, Rechenaufwand gering	in der Regel analytische Lösung möglich, Rechenaufwand gering	in der Regel numerische Lösung erforderlich, Rechenaufwand groß
Anwendbarkeit	Einschränkungen hinsichtlich der Randbedingungen (Typ, Geltungsbereich)	Einschränkungen hinsichtlich der Randbedingungen (Typ, Geltungsbereich)	in der Regel keine Einschränkungen hinsichtlich der Randbedingungen
Funktionsparameter	ohne physikalische Bedeutung	mit scheinbarer bzw. sehr stark eingeschränkter physikalischer Bedeutung	besitzen eine physikalische Bedeutung
Übertragbarkeit der Funktionsparameter	fehlt	fehlt, allerdings oft Abschätzung des Geltungsbereichs möglich	voll gegeben
experimenteller Aufwand	gering	mäßig groß	groß, jedoch im Prinzip nur einmal für jede gesuchte Größe
Bewertung	keine generelle Aussage möglich	entweder Fehler hinsichtlich der Bilanz oder/und Zustandsvariablen oder/und der Dynamik. Optimierung auf bestimmtes Kriterium möglich	bis auf numerische Fehler exakte Lösung
Eignung für Prognosen	keine Aussage	zum Teil gegeben	gegeben

jedoch in naher Zukunft nicht möglich sein. Deswegen sind neue Verfahren zur Übertragung von leicht verfügbaren Informationen in Modellparameter zu entwickeln. Daneben werden Methoden zur Überprüfung eines Modells auf seine Prognosefähigkeit vor allem im Hinblick auf die Verwendung hydrologischer Modelle im Rahmen langfristiger Klimaszenarienrechnungen benötigt.

Für das EMTAL-Projekt sollte kein neues Modell entwickelt werden, sondern bewährte Techniken dem verfügbaren Datenbestand angepasst werden. Die Ziele des Projektes vor Augen wurde durch Vorrecherchen und verschiedene Arbeiten (z.B. SEQUEIRA 2003; HAGEDORN 2003; SCHRAMM 2004) im Vorfeld dieser Dissertation das Wasserhaushalts-Simulations-Modell WaSiM-ETH ausgewählt. Das Modell beruht auf allgemein anerkannten deterministisch-analytischen und numerischen Konzepten, ist dadurch vielseitig und flexibel anwendbar und steht jedem Nutzer kostenlos zur Verfügung.

1.2.3 Theoretische Grundlagen des Modells WaSiM-ETH

Übersicht

Das **W**asserhaushalts-**S**imulations-**M**odell WaSiM-ETH wurde an der ETH Zürich (SCHULLA 1997) entwickelt. Es ist ein deterministisches, flächendifferenziert arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell zur Simulation des Wasserkreislaufs auf und unter der Landoberfläche. Sein Prinzip ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Das Modell ist eine Kombination aus physikalisch basierten und konzeptionellen Prozessbeschreibungen. Das zu modellierende reale System wird durch geometrische und stoffliche Systemparameter beschrieben und steht mit der Umgebung über die Systemgrenzen wirkenden Ein- und Ausgangsgrößen, die Randbedingungen, in Wechselwirkung. Es ist also offen. Das Modellgebiet in WaSiM-ETH schließt vertikal die Vegetationsdecke, den verdunstungsrelevanten Boden sowie eine nicht eindeutig abgrenzbare Schicht des tieferen Bodens bzw. des geologischen Unterbaus ein. Die Obergrenze des Systems bilden in der schneefreien Zeit die Vegetationsschicht bzw. bei fehlender Vegetation der Boden, die Bebauung oder das anstehende Gestein. Ist eine Schneedecke vorhanden, bildet diese die Obergrenze des Systems. In horizontaler Richtung wird das System durch die Einzugsgebietsgrenzen begrenzt. In natürlichen Systemen sind diese Grenzen nicht absolut, sie sind weder für Stoff- noch für Energieflüsse undurchlässig. Diese Flüsse werden innerhalb WaSiM-ETH ausgeglichen oder wegen ihrer sehr geringen Größenordnung vernachlässigt. Eine weitere vernachlässigte Größe ist die Speicherung von Wasser in Flora und Fauna (SCHULLA 1997). Die räumliche Verteilung der physiographischen Gebietseigenschaften wird in WaSiM-ETH durch die Einteilung des Einzugsgebiets in ein regelmäßiges Gitter berücksichtigt. Das Modell ist in der Lage, die Abflüsse von Einzugsgebieten mit Größen von $< 1 \text{ km}^2$ bis zu mehreren $10\,000 \text{ km}^2$ zu berechnen. Zusätzlich kann das Einzugsgebiet in beliebig viele verschiedene Teileinzugsgebiete gegliedert werden. Deren Grenzen orientieren sich ebenfalls an dem Gitter. Einschränkungen ergeben sich aus den Gültigkeitsbereichen der verwendeten Teilmodelle. Das Gitterformat birgt den Vorteil, dass die Daten leicht mit vielen verschiedenen anderen Modellen und Softwarepaketen ausgetauscht werden können. Die Eingangsdaten können meist schnell und ohne Genauigkeitsverlust an die gewünschte Modellauflösung angepasst werden. Die meteorologischen Daten werden während des Modelllaufs für jede einzelne Zelle des Gitters interpoliert. Für jede Gitterzelle werden daraufhin die in Abbildung 1.1 dargestellten Prozesse simuliert.

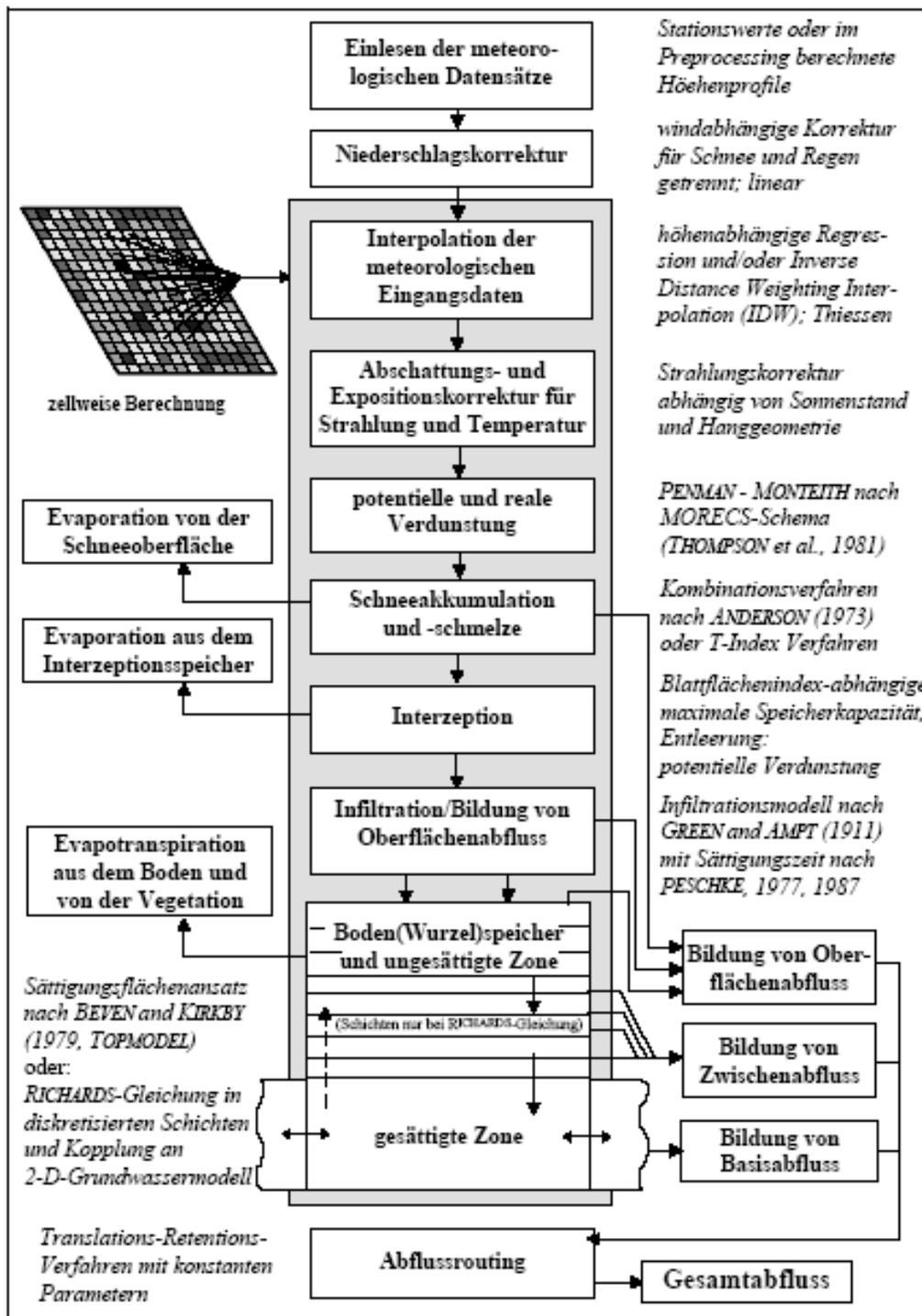


Abbildung 1.1: Der Aufbau des Modells WaSiM-ETH (SCHULLA U. JASPER 1998)

Der auf den einzelnen Gitterzellen gebildete Oberflächenabfluss wird anhand eines Fließzeit-schemas dem Gerinne zugeführt. Die Abflusskonzentration bis zum Teilgebietsauslass erfolgt anhand von Einzellinearspeichern getrennt für die Abflusskomponenten Direktabfluss, Interflow und Basisabfluss. Der weitere Weg des Abflusses im Gewässernetz vom Pegel des Gesamteinzugsgebietes wird durch ein Abflussrouting beschrieben.

In den folgenden Abschnitten wird eine Auswahl der Teilmodule besprochen, die für die Bearbeitung der Eingangsdaten und die Berechnung der Szenarien und für Überlegungen zur Übertragbarkeit nötig sind. Ausführliche Informationen finden sich in SCHULLA (1997) und SCHULLA U. JASPER (1998, 2001).

Tabelle 1.2: Eingangsdaten in WaSiM-ETH (nach SCHULLA (1997); SCHULLA U. JASPER (1998, 2001))

Datenart	Abgeleitete Eingaben in das Modell
Digitales Geländemodell	Raster, Topographischer Index, Gefälle, Exposition, Fließzeiten und Fließzeitsummen, Flusstiefen und -breiten, Geländezonierung (z.B. in Teileinzugsgebiete oder Höhenstufen)
Landnutzung	Raster, Parametertabelle
Bodenarten	Raster, Parametertabelle, Transmissivität
Meteorologische Daten (zwingend Niederschlag und Temperatur, zusätzlich Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Luftfeuchte und Dampfdruck)	Berechnung der Höhengradienten Interpolation über das Gebiet
Hydrologische Daten (Pegeldaten, Wildwasserabgaben der Talsperren)	Umrechnung in Spenden

Geographische Daten

Geographische Daten werden in WaSiM-ETH benötigt, um die räumliche Struktur sowie die räumlich verteilten, zeitlich konstanten Eigenschaften des zu modellierenden Einzugsgebietes darzustellen. Dazu gehören verschiedene Bodendaten, Landnutzungsdaten sowie als eine der wichtigsten Datengrundlagen ein digitales Höhenmodell. Da diese Daten in der Regel aus verschiedenen Quellen stammen und meist in unterschiedlichen Datenformaten und räumlichen Auflösungen vorliegen, müssen sie an die vom Modell geforderte Schnittstelle angepasst werden. Alle graphischen Eingangsdatensätze müssen bezüglich ihrer Dimensionen und Koordinaten deckungsgleich sein. Zusätzlich können aus dem digitalen Geländemodell mit Hilfe im Modellpaket zur Verfügung gestellter Programme, insbesondere *Tanalys*, weitere Eingangsdaten berechnet und Modellparameter abgeschätzt werden. Tabelle 1.2 gibt eine Übersicht über die benötigten und berechenbaren geographischen Daten.

Möchte man eigene Datensätze, z.B. gemessene Flussbreiten, nutzen, können diese alternativ

in das Modell integriert werden. Die Programme sowie weitere Werkzeuge zur Datenbereitung und Datenauswertung werden in SCHULLA (1997) und SCHULLA U. JASPER (1998, 2001) beschrieben.

Meteorologische Daten

Neben den geographischen Eingangsdaten benötigt das Modell einige meteorologische Informationen. Sie sind in Tabelle 1.2 aufgelistet. Die Zeitschrittweite sollte dabei an die Aufgabenstellung angepasst sein. So empfehlen sich für Hochwassermodellierung mindestens stündlich aufgelöste Daten, für Wasserhaushaltsberechnungen genügen nach SCHULLA 1997 im Allgemeinen Tageswerte. Die Zeitreihen sollten möglichst lang sein. Besonders bei Abschätzungen der Größe und Häufigkeit von seltenen Ereignissen, aber auch bei der Bewertung von klimatischen Trends, wird eine Beobachtungsperiode von wenigstens 30 Jahren für notwendig erachtet.

In WaSiM-ETH ist ein Modul implementiert, mit Hilfe dessen Niederschlagswerte korrigiert werden können. Stehen Korrekturalgorithmen zur Verfügung, empfiehlt es sich, dieses Modul auszuschalten und bereits korrigierte Daten einzulesen. Im Untersuchungsgebiet liegt beispielsweise ein Korrekturalgorithmus nach RICHTER (1995a) vor, der an die einzelnen Stationen angepasst worden ist.

Die Stationswerte werden durch das Modell auf die einzelnen Zellen des Modellgitters interpoliert. Dies kann durch eine höhenabhängige Regression, inverse Distanzgewichtung oder eine Kombination beider Methoden geschehen. Erstere Methode bietet sich für Größen an, die eine ausgeprägte Höhenabhängigkeit aufweisen. Dazu zählen Lufttemperatur, der Dampfdruck und die Globalstrahlung. Voraussetzung für die Interpolation der Eingangsdaten durch höhenabhängige Regression ist das Vorhandensein von mindestens drei Stationen zur Bestimmung des Höhengradienten. Das Gelände wird dabei durch das Programm in zwei oder drei Höhenabschnitte unterteilt, getrennt durch Inversionen, deren Höhe vorgegeben werden kann. Diesen Höhenabschnitten wird für jede Zeiteinheit jeweils eine Regressionsgerade für die zu interpolierenden Werte zugewiesen. Die abstandsgewichtete Interpolation geht davon aus, dass der Wert einer Messgröße an einer Interpolationsstelle durch die Entfernungen der Interpolationsstelle zu den verschiedenen Stützstellen, also den Stationsstandorten, und deren Messwerte beschrieben werden kann. Diese Annahme trifft bei genügender Messwertdichte vor allem auf die Windgeschwindigkeit zu, die in Mittelgebirgen stark von der Geländemorphologie geprägt wird. Bei der abstandsgewichteten Interpolation können entweder die Inverse Distance Weighting Interpolation (IDW) zur Anwendung kommen oder es werden Thiessen-Polygone als Spezialfall der IDW genutzt. Der Interpolationswert bei der IDW ergibt sich aus der Summe aller beitragenden gewichteten Stützstellenwerte. Dabei können in WaSiM-ETH die Gewichtung der Stützstellen sowie zwei Parameter zur Festlegung einer Anisotropie in der räumlichen Gewichtung vom Modellierer bestimmt werden. Schließlich können die abstandsgewichtete und die höhenabhängige Interpolation mit unterschiedlicher Gewichtung kombiniert werden. Dies hat sich vor allem bei der Interpolation des Niederschlags als sinnvoll erwiesen.

Potentielle und aktuelle Evapotranspiration

Zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration können im Modell mehrere Ansätze genutzt werden, die sich in der Zahl ihrer Eingangsparameter und in ihrer physikalischen Nachvollziehbarkeit unterscheiden. Neben dem Verfahren nach Penman-Monteith, das als Eingangsdaten Temperatur, Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchte und

die Windgeschwindigkeit benötigt, stehen verschiedene vereinfachte Verfahren zur Verdunstungsberechnung zur Verfügung. Letztere benötigen weniger Eingangsparameter (in der Regel Lufttemperatur und in einem Fall zusätzlich die Globalstrahlung), können aber aufgrund ihres verschieden stark empirischen Vorgehens die Schwankungen der Evapotranspiration über den Tag und das Jahr teilweise nur angenähert (wenn auch in der Summe meist gut) wiedergeben. Die Verfahren sind in SCHULLA (1997) beschrieben. Zusätzlich werden in der Berechnung das spezifische Verdunstungspotential der Vegetation und der tatsächliche Feuchtezustand des Bodens (beides bei unbeschränkter Wasserversorgung) berücksichtigt. Sie werden über Parameter Rauigkeitsbeiwert, Blattflächenindex, Wurzeltiefen und Wurzeldichtevertelung und verschiedene Bodenparameter modelliert.

Die Berechnung der aktuellen Verdunstung ist vom gewählten Bodenmodul abhängig. Wird der TOPMODEL-Ansatz (*wasim 1*) genutzt, wird die reale gegenüber der potentiellen Evapotranspiration dann reduziert, wenn der Füllungsstand des Bodenspeichers unter einen Grenzwert für die Bodenfeuchte fällt. In der WaSiM-Version mit Richards-Gleichung (*wasim 2*) dagegen wird die reale Verdunstung anhand der Saugspannung des Bodens gegenüber der potentiellen reduziert. Neben einer Reduktion aufgrund zu geringer Bodenfeuchte wird zusätzlich der reduzierende Einfluss von zu hoher Bodenfeuchte durch anaerobe Verhältnisse berücksichtigt.

Schneeakkumulation und -schmelze, Schneedeckenausfluss

Im Schneemodell werden die quantitative Akkumulation des Schnees sowie dessen Schmelze modelliert. Der Anteil der Schnees am Niederschlag wird im Modell anhand der Lufttemperatur, einer Grenztemperatur, bei der 50 % des Niederschlags als Schnee fallen, und der Weite dieses Übergangsbereichs zwischen Schnee und Regen berechnet. Der ermittelte feste Niederschlag wird als Schneedecke akkumuliert. In WaSiM-ETH können verschiedene Algorithmen zur Berechnung der Schneeschmelze benutzt werden: Das Temperatur-Index-Verfahren, das Temperatur-Wind-Index-Verfahren nach BRAUN (1985) und ein kombiniertes Verfahren nach ANDERSON (1973). Letzteres stellt die Verhältnisse am genauesten dar, ist allerdings für Tageswerte entwickelt worden, so dass dieses Verfahren nur unter Vorbehalten für Stundenwerte angewendet werden sollte. Nach SCHULLA (1997) kann für Stundenwerte ohne weiteres eines der ersten beiden Verfahren verwendet werden. Da meist nicht ausreichend Werte für die Windgeschwindigkeit vorliegen, ist tatsächlich die Nutzung des Temperatur-Index Verfahrens zu empfehlen. In den vorliegenden Untersuchungen lieferte es ausnahmslos die besseren Ergebnisse.

Interzeption

Interzeption ist die Speicherung von Niederschlags- und Schmelzwasser auf der Vegetation, der Streuschicht und der Geländeoberfläche. In WaSiM-ETH wird nur ein einfacher Überlaufspeicher eingesetzt, der alle Interzeptionseffekte gemeinsam berücksichtigt. Der Interzeptionsspeicher ist im Modell dem Schneespeicher nachgeordnet, so dass die Schneeschmelze über den Interzeptionsspeicher geleitet wird. So kann eine Speicherung von Schmelzwasser in Bodenmulden und in der Muldschicht berücksichtigt werden (SCHULLA U. JASPER 1998). Die Kapazität dieses Speichers hängt von der Pflanzenart, deren jeweiligem Blattflächenindex und vom Vegetationsbedeckungsgrad ab. Auch Felsen, unbewachsener Boden und Siedlungsfläche werden zur Berücksichtigung von Benetzungsverlusten mit Parametern belegt. Bei der Model-

lierung wird von der Annahme ausgegangen, dass sich auf allen Oberflächen eine gleich dicke Schicht Wasser aus allen Niederschlagsformen halten kann. Die Füllung des Interzeptionsspeichers erfolgt durch Niederschlag und Schneeschmelze, seine Ausschöpfung durch Verdunstung (potentielle Evapotranspiration). Ist der Interzeptionsspeicher gefüllt, tropft weiteres Niederschlags- oder Schmelzwasser auf die Bodenoberfläche durch. Dieser Bestandesniederschlag bildet den Zufluss zum Infiltrationsmodell.

Infiltration

Das Infiltrationsmodell ist in das Bodenmodell integriert und nutzt eine Reihe an Daten, die auch dort benötigt werden (u.a. Bodenfeuchte, Leitfähigkeit, Wassergehalte). Das Infiltrationsmodell in WaSiM-ETH ist das auf dem Infiltrationsmodell von GREEN U. AMPT (1911) aufbauende „Zweistufenmodell für homogene Böden“ von Peschke (DYCK U. PESCHKE 1995). Mit diesem Ansatz ist es möglich, diskontinuierliche Niederschläge zu verarbeiten. Das Modell setzt einen homogenen, ungeschichteten Boden voraus, bei dem der Matrixfluss gegenüber dem Makroporenfluss dominiert. Die Niederschlagsintensität wird als über den Zeitintervall konstant angenommen. Der Infiltrationsvorgang wird in zwei Phasen unterteilt: Die Sättigungsphase bei ungesättigten Verhältnissen und eine Rückgangsphase bei gesättigten Verhältnissen. Das eindringende Niederschlagswasser wird im Modell als sprunghaft vorrückende Feuchtefront idealisiert. Deren Vorrücken wird vom Sättigungsdefizit und den bodenphysikalischen Kenngrößen hydraulische Leitfähigkeit des Bodens und Saugspannung an der Feuchtefront bestimmt. Diese Kenngrößen sind in der Bodentabelle des Modells aufgelistet. Das Ergebnis der Berechnungen des Infiltrationsmodells ist eine Aufteilung des Niederschlags in Infiltrationsüberschuss, der in Direktabfluss umgewandelt wird und infiltrierendes Wasser, das an das Bodenmodell übergeben wird.

Bodenmodell

In WaSiM-ETH kann zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Modulen zur Berechnung der (vertikalen) Abflussbildung auf und unter der Landoberfläche gewählt werden: Dem konzeptionellen TOPMODEL-Ansatz (*wasim 1*) und dem physikalischen Ansatz mit Richards-Gleichung (*wasim 2*).

In *wasim 1* wird der Bodenwasserhaushalt durch einen erweiterten Speicheransatz von BEVEN U. KIRKBY (1979) modelliert. Unter Berücksichtigung des topographischen Index c_s wird für potentielle Sättigungsflächen jeweils das spezifische Sättigungsdefizit S_i berechnet.

$$c_s = \ln \frac{\alpha_t}{T_0 \cdot \tan \beta_t} \quad (1.1)$$

c_s	topographischer Index [-]
α_t	spezifische Einzugsgebietsgröße pro Längeneinheit einer Gitterzelle (Flächengröße, die pro Meter quer zur Fließrichtung in ein Gitterelement entwässert) [m^2/m]
T_0	gesättigte hydraulische Transmissivität am Standort [m^2/s]
β_t	Geländegefälle [m/m]

$$S_i = S_m - m \left(\ln \frac{\alpha_t}{T_0 \cdot T_{korr} \cdot \tan \beta_t} - \gamma \right) \quad (1.2)$$

S_m	mittleres Sättigungsdefizit des Gebietes (arithmetisches Mittel aller S_i) [mm]
m	gebietsspezifischer Modellparameter [mm]
γ	mittlerer topographischer Index des (Teil-)Gebiets [-]
T_{korr}	Korrekturparameter für die Transmissivität des Bodens und zur Skalierung von γ

Negatives oder neutrales S_i führt bei Auftreten von flüssigem Niederschlag zu Oberflächenabfluss. Sollte auf dem Boden eine Schneedecke liegen, wird ein vom Nutzer festgelegter Anteil der Schneeschmelze noch vor Erreichen der Bodenoberfläche als Oberflächenabfluss abgeführt. Anhand einer Grenzintensität P_{grenz} wird der infiltrierende Niederschlag auf den durch Verdunstung ausschöpfbaren Bodenspeicher und die durch bevorzugte Fließwege und Makroporen erfolgende Tiefenversickerung aufgeteilt. Ist der Zwischenabflussspeicher gefüllt, wird das überschüssige Niederschlagswasser als Oberflächenabfluss abgeführt. Dabei werden Evapotranspirationsverluste durch Zuflüsse aus dem Zwischen- und Grundwasserspeicher, wenn möglich, ausgeglichen.

In *wasim 2* wird für die Berechnung des Bodenwasserhaushalts die Richards-Gleichung genutzt. Die diskretisierte Richards-Gleichung hat für die Beschreibung der eindimensional vertikalen Wasserbewegung in der ungesättigten Zone folgende Form:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta z} = q_{in} - q_{out} \quad (1.3)$$

Θ	Wassergehalt des Bodens [m^3/m^3]
t	Zeit [s]
q	Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]
z	Tiefe [m]
q_{in}	Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m^3/s]
q_{out}	Abflüsse aus der Bodenschicht (einschließlich Interflow, Drainage) [m^3/s]

Für die Flüsse q_{in} und q_{out} werden die Abhängigkeiten der hydraulischen Bodenparameter vom Wassergehalt des Bodens in diskreter Form berücksichtigt.

Der Fluss zwischen zwei Schichten kann wie folgt dargestellt werden:

$$q = k_{eff} \cdot \frac{h_h(\Theta_u) - h_h(\Theta_l)}{0.5 \cdot (d_u + d_l)} \quad (1.4)$$

mit

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{d_u}{d_l + d_u} \cdot \frac{1}{k(\Theta_u)} + \frac{d_l}{d_l + d_u} \cdot \frac{1}{k(\Theta_l)} \quad (1.5)$$

q	Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]
l, u	unten (lower), oben (upper)
k_{eff}	effektive hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
h_h	hydraulische Höhe in Abhängigkeit vom Wassergehalt als Summe aus Saugspannung $\psi(\Theta)$ und geodätischer Höhe h_{geo} [m]
d	Dicken der jeweiligen Schichten, zwischen denen der Fluss berechnet wird [m]

Zur Bestimmung der Funktionen von Matrixpotential und Wassergehalt sowie Leitfähigkeit und Wassergehalt können in WaSiM-ETH entweder tabellierte Messwerte eingelesen oder der Ansatz von VAN GENUCHTEN (1976) genutzt werden, indem die Parameter der Gleichung über Pedotransferfunktionen abgeschätzt werden. In vorliegender Arbeit wurde letztere Methode verwendet.

Dabei gilt:

$$\psi(\theta) = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\Theta - \Theta_{res}}{\Theta_{sat} - \Theta_{res}} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1.6)$$

und

$$\frac{k(\Theta)}{k_s} = \left[\frac{\Theta - \Theta_{res}}{\Theta_{sat} - \Theta_{res}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\Theta - \Theta_{res}}{\Theta_{sat} - \Theta_{res}} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (1.7)$$

ψ	Saugspannung [m]
α	empirischer Parameter [m^{-1}]
m	empirischer Parameter [-]
n	empirischer Parameter [-]
Θ	aktueller Wassergehalt [m^3/m^3]
Θ_{res}	residualer Wassergehalt bei $k(\Theta) = 0$ [m^3/m^3]
Θ_{sat}	Sättigungswassergehalt [m^3/m^3]
k_s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

Die Parametrisierung der Richardsgleichung und der Pedotransferfunktionen erfolgt in der Regel anhand von Messungen oder Literaturwerten.

Zur Beschreibung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone wird der Boden aus numerischen Gründen für jede Gridzelle in eine vom Nutzer festzulegende Anzahl von Schichten unterteilt, die mit den gleichen Bodeneigenschaften und der gleichen Mächtigkeit ausgestattet sind. Lediglich die Leitfähigkeit kann über einen Parameter k_{rec} über die Tiefe variieren. Zur Lösung der Bewegungsgleichung wird ein vertikal eindimensionales Finite-Differenzen-Verfahren angewandt. Obere Randbedingung ist die berechnete Infiltrationsmenge F . Zunächst wird die Infiltrationsmenge bis zur Schicht m berechnet. Dies geschieht, bis bei der Schicht $m+n$ die Iteration abbricht. In jeder Schicht kann Interflow abgezweigt werden. Dabei wird jeweils über die Feldkapazität und die Schichtdicke der maximal mögliche Zwischenabfluss bestimmt und der aktuelle Zwischenabfluss dann in einem zweiten Schritt aus Leitfähigkeit, Flussdichte und Hangneigung berechnet.

Weiter werden Infiltration aus dem Vorfluter bzw. die Exfiltration aus dem Grundwasser in den Vorfluter sowie Verluste durch Transpirationseutnahmen, Grundwasserneubildung und Exfiltration von Grundwasser in Oberflächengewässer kalkuliert. In dem Modell können zudem Bewässerung, Drainagen, Stauhorizonte, Überstau und der Grundwasserstand berücksichtigt werden.

In WaSiM-ETH sind das Modell für die ungesättigte Zone und das Grundwassermodell periodisch gekoppelt. Dadurch kann die Zeitschrittdauer im Grundwassermodell größer als im Modell der ungesättigten Zone sein. Die Kopplung erfolgt in beide Richtungen. Daneben ist in *wasim 2* die Möglichkeit gegeben, den Transport und die Mischung idealer Tracer zu modellieren. Es können radioaktive Zerfallsprozesse (z.B. für Tritium), Vermischungsprozesse sowie Konzentrationserhöhungen (Anreicherung) bei Verdunstung für Salze modelliert werden. Dabei wird nur advektiver Transport berechnet, Diffusion und Dispersion werden gegenüber den advektiven Komponenten als vernachlässigbar angesehen. Eine ausführliche Beschreibung der Bodenmodule ist SCHULLA (1997) und SCHULLA U. JASPER (1998, 2001) zu entnehmen.

Abflusskonzentration und Abflussrouting

Basisabfluss wird für ein Teilgebiet als Mittelwert gebildet. Interflow und Oberflächenabfluss werden zunächst als Summe aus schneeeinternem Abfluss, Infiltrationsüberschuss und Sättigungsflächenabfluss potentiell für jede Rasterzelle gebildet. Dort wird der Interflow bereits einer Speicherwirkung unterzogen. Der Mittelwert aller Interflow-Komponenten der einzelnen Gridzellen eines Teilgebiets ist der mittlere Gebietsinterflow. Der Direktabfluss wird dagegen intervallweise zum Gebietsausfluss verschoben. Er fließt nach seinem Entstehen in den einzelnen Gitterzellen dem topographischen Gefälle folgend zum nächsten Gewässerlauf und weiter bis zum Gebietsauslass. Die Dauer und der zeitliche Verlauf dieses Konzentrationsprozesses werden von Oberflächengefälle und Oberflächenrauigkeit, von der Gewässerdichte und der Größe des Gebiets beeinflusst. Die Zeitverschiebungen zwischen Entstehung des Oberflächenabflusses und seinem Durchfluss am Gebietsauslass (Translationszeit) sowie die Abflachung der Ganglinie durch Retentionseffekte auf der Landoberfläche und im Gewässernetz werden dabei berücksichtigt.

Mit Hilfe des Programmes *tanalys* (SCHULLA 1997) werden im *preprocessing* Fließzeiten von jeder Rasterzelle zum Gebiets- bzw. Teilgebietsauslass berechnet. Diese Fließzeiten pro Rasterzelle werden zu Fließzeitonen mit jeweils gleichen Fließzeiten zusammengefasst. Zu Beginn jedes Zeitschritts wird der in der jeweiligen Fließzeitzone gebildete Oberflächenabfluss in die jeweils unterhalb gelegene Zone geleitet. Nur der in der untersten Fließzeitzone befindliche Abfluss wird vom Modell nach Berechnung der Retention als Direktabfluss zu Interflow und Basisabfluss addiert, um so den Gesamtabfluss des Teilgebietes für einen Zeitschritt zu erhalten. Für die Retentionsberechnung wird der Oberflächenabfluss aus der untersten Fließzeitzone über einen Einzellinearspeicher geleitet. Am Beginn des folgenden Zeitschrittes ist die oberste Fließzeitzone leer gelaufen, während in den folgenden Zonen bereits Oberflächenabfluss auf dem Weg zum Gebietsauslass sein kann. Zum Abfluss kommt nun der im aktuellen Intervall neu gebildete Abfluss hinzu.

Das Abflussrouting selbst beschreibt den weiteren Weg des Abflusses eines Teileinzugsgebiets im Gewässernetz. Es bildet die Translations- und Retentionsvorgänge im Hauptbett sowie bei Überschreiten von dessen Kapazität im Vorland nach. Dies kann besonders für die Hochwassermodellierung entscheidend sein, da der Hochwasserscheitel je nach Beschaffenheit und geographische Lage der Teileinzugsgebiet in Höhe und Breite variieren kann. Die Gerinnere-tention wird getrennt für Hauptbett und Vorland mit Hilfe von zwei Einzellinearspeichern simuliert. Dabei wird zuerst die Translation berechnet, daraufhin die Wellenabflachung - die Retention bzw. Diffusion - und schließlich werden die gerouteten Abflüsse aus unterschiedlichen Quellgebieten mit dem im Zwischengebiet selbst gebildeten Abfluss zum Gesamtabfluss des Gebiets überlagert.

1.2.4 Bewertung des Modells und der Modellierung

Modellgüte

Die Beurteilung der Eignung eines Modells geschieht in der Regel nach den Kriterien Genauigkeit der Ergebnisse, Arbeitsaufwand (Vorbereitung, Auswertung), Fehleranfälligkeit bei der Bearbeitung, die einzusetzenden Computerressourcen und die Validierung, d.h. Nachweis der Prognosefähigkeit des Modells (DVWK 1999).

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt bei jedem Modell von der Genauigkeit und Güte der Eingangsdaten ab. Der Arbeitsaufwand des sog. *Preprocessing*, nämlich die Erstellung der

Eingangsdatensätze und die Parametrisierung für WaSiM-ETH, wird in Abschnitt 2.2 beschrieben. Im gleichen Abschnitt wird auch die Validierung des Modells vorgenommen.

Die Fehleranfälligkeit bei der Bearbeitung muss in zwei Abstufungen gesehen werden. Fehler und Ungenauigkeiten bei der Parametrisierung des Modells sind nicht nur möglich, sondern durch die hohe Anzahl an einzugebenden Parametern auch bei hohem Zeitaufwand kaum auszuschließen. Solche Fehler können sich teilweise gegenseitig ausgleichen, insbesondere indem in der Kalibrierung (unbeabsichtigt) gegengesteuert wird. Kalibrierungsfehler, die dadurch entstehen können, werden in der Regel durch die Validierung identifiziert.

Daneben ist die Fehleranfälligkeit des Modells selbst, d.h. bei Kompilierung und Durchlauf, zu bewerten. Sie hat sich bei WaSiM-ETH als gering erwiesen. Bei auftretenden Ungereimtheiten sind die Entwickler bereit, Hilfestellung zu leisten oder erwiesene Fehler aus dem Programm zu entfernen. Fehler bei der Modellanwendung liegen meist in nicht korrekt formatierten Eingangsdaten oder fehlerhaften Angaben in der Steuerungsdatei begründet. Sie werden in der Regel eindeutig durch das Programm selbst identifiziert und können durch den Anwender beseitigt werden.

Das Modell wird in der DOS-Ebene gestartet; es ist portabel und nicht direkt vom Betriebssystem abhängig. Die Rechenzeiten bzw. benötigten Rechenkapazitäten hängen von der gewählten räumlichen und zeitlichen Auflösung ab. Die Zunahme der Rechenzeiten kann bei höherer Diskretisierung sehr hoch sein. Deshalb ist es wichtig, sich vor der Modellierung entsprechend Gedanken über gewünschte und sinnvolle Auflösungen zu machen (Abschnitt 2.3.2).

Modellierungsgüte

Modelle werden in der Regel danach beurteilt, inwieweit gemessene und modellierte Werte übereinstimmen. Dies kann anhand aller Daten, die das zu beurteilende Modell berechnet, geschehen. Im Fall von WaSiM-ETH beginnt das theoretisch mit Geländeparametern wie Flusstiefen und -breiten oder dem berechneten Flussnetz. Es setzt sich fort mit berechneten meteorologischen Informationen wie die räumliche Verteilung von Niederschlägen oder Temperaturen über das Einzugsgebiet oder die Strahlungskorrektur und daraus berechneten Wasserhaushaltsgrößen wie potentielle und reale Evapotranspiration, Interzeption und Bodenwassergehalt. Schließlich berechnet das Modell auch hydrologische Ausgabegrößen wie Basis-, Zwischen- und Gesamtabfluss sowie den gerouteten Abfluss am Gebietsauslass. Um den Aufwand gerade bei so komplexen Modellen zu begrenzen, ist es in der Regel sinnvoll, die Prüfwerte anhand der Zielstellung zu wählen. Da im vorliegenden Fall der Abfluss am Pegel interessiert und dies zudem einen integralen Wert über das Modellgebiet darstellt, von dem nicht zuletzt auch genug gemessene Werte vorliegen, wurde er für die Kalibrierung und zur Bewertung der Modellgüte herangezogen, während die anderen Ausgabeparameter vor allem auf Plausibilität überprüft wurden.

Vor und während der Bewertung der Modellergebnisse muss, wie bereits oben erwähnt, die Güte der Eingangsdaten bewertet werden. Dabei ist nach AITKEN (1973) von zwei Fehlerarten auszugehen:

- Zufällige Fehler: Sie werden meist schnell in den Ergebnissen erkannt.
- Systematische Fehler: Sie führen meist zu schwer erkennbaren Fehlern in der Parametrisierung, wobei die Ergebnisse aber richtig zu sein scheinen. Dies führt in Szenarien- oder Prognoserechnungen zu Fehlinterpretationen.

Methoden zur Überprüfung von Eingangsdaten sind so vielfältig wie die Eingangsdaten selbst. Meist werden zur Prüfung Doppelsummenanalysen herangezogen und verschiedene Plausibilitäts- und Homogenitätstest durchgeführt.

Für den Vergleich gemessener und modellierter Größen können zwei sich im besten Fall ergänzende Ansätze gewählt werden.

1. Subjektive Bewertung

- a) Optischer Vergleich der Ganglinien und eventuell Feststellung von Mustern bei abweichendem Verhalten, die von statistischen Methoden nicht erfasst werden. Beispiel: Die Schneeschmelze setzt regelmäßig wenige Tage zu früh ein, während der Anstieg aller anderen Hochwasser korrekt modelliert wird.
- b) Prüfung der Ergebnisse auf Plausibilität über das sogenannte *Expertenwissen* (Erfahrungswissen). Diese Prüfung erfolgt häufig über den Vergleich mit anderen Modellen oder statistischen Verfahren (z.B. Doppelsummenanalysen), ist aber im Endeffekt von der Aufgabenstellung und vom Standpunkt des Modellierers abhängig. So können bei Wasserhaushaltsberechnungen in großen Skalen kleinere zeitliche oder geographische Abweichungen der interpolierten Niederschläge leichter toleriert werden als bei Berechnungen von Einzelereignissen wie Hochwässern in kleinen Raum- und Zeitskalen.

2. objektive Bewertung

- a) Nutzung verschiedener statistischer Werkzeuge für die Kalibrierung
- b) Überprüfung der Kalibrierung durch den *split-sample-test* nach KLEMEŠ (1986). Nur ein Teil der verfügbaren Daten wird zur Kalibrierung des Modells genutzt. Stehen die Funktionsparameter fest, werden sie mit den restlichen Daten überprüft (Validierung).

Für die statistische Bewertung der Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Größen stehen dem Modellierer vielfältige statistische Werkzeuge zur Verfügung. So können in einem ersten Schritt Mittelwerte (μ), Varianzen (σ) und der mittlere absolute Fehler (MAE) berechnet werden. Dabei ist x_i der modellierte und y_i der Referenz-Wert.

$$\bar{\mu}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1.8)$$

$$\hat{\sigma}_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{\mu}_y)^2 \quad (1.9)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (1.10)$$

Allerdings sagen diese Maße nichts über individuelle Ereignisse aus und sie unterscheiden nicht zwischen zufälligen und systematischen Fehlern (AITKEN 1973; LEGATES 1999).

Weitere häufig angewendete Testgrößen sind der mean square error (MSE) oder der root mean square error (RSME) bzw. Volumenfehler VE (AHRENS 2003; LEGATES 1999; MADSEN et al. 2002). Der MSE ist eine quadratische Funktion der Abweichung der modellierten von den gemessenen Werten, graphisch ist er über eine nach oben geöffnete Parabel darstellbar. Das Minimum des MSE ist die Varianz der gemessenen Werte. Dieser Zusammenhang ist über die Effizienz (efficiency E) (BATTAGLIA 1996) darstellbar. Ist die Effizienz Null, entspricht die Abweichung gemessener und modellierter Werte der Varianz der gemessenen Werte um den Mittelwert.

$$E = 1 - \frac{MSE(x, y)}{\hat{\sigma}_y^2} \quad (1.11)$$

Auch dieser Wert ist durch die Quadrierung der Abweichungen stark sensitiv gegenüber Ausreißern und erkennt keine systematischen Verschiebungen der modellierten Ganglinien. Zudem ist er nur sehr bedingt für Datenreihen geeignet, die keine Normalverteilung um einen Mittelwert aufweisen.

In verschiedenen Anwendungen hat sich gezeigt, dass die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R und der erklärten Varianz EV nach NASH U. SUTCLIFFE (1970) das robusteste Gütemaß darstellt (AHRENS 2003; AITKEN 1973; ECKHARDT 2001; MADSEN et al. 2002; PERRIN et al. 2001).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i \varepsilon_i^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{\sum_i x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_i x_i)^2} \quad (1.12)$$

$$EV = 1 - \frac{\sum_i (\varepsilon_i - \mu_i)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} = 1 - \frac{\sum_i \varepsilon_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_i \varepsilon_i)^2}{\sum_i x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_i x_i)^2} \quad (1.13)$$

ε_i	Abweichung gemessen - modelliert ($y_i - x_i$) zum Zeitpunkt i
μ_i	mittlere Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten
x_i, \bar{x}	gemessener Wert (z.B. Abfluss [mm]), mittlerer gemessener Wert
n	Anzahl der Intervalle, für die R^2 oder EV berechnet wird

Auch das Bestimmtheitsmaß und die erklärte Varianz setzen streng genommen normalverteilte Stichproben voraus. Abflussdaten erfüllen diese Voraussetzung meist nicht. SCHULLA (1997) schlägt vor, die Gütemaße in linearer Form bei der Modellierung von Hochwasser einzusetzen, da hier die Überbewertung der Abflussspitzen gegenüber Normalabfluss sinnvoll ist. Liegt der Schwerpunkt der Modellierung bei der Simulation von Niedrigwasser oder des Abflusskontinuums, muss das Gütemaß in eine Normalverteilung transformiert werden. Als einfachste Transformation schlägt SCHULLA (1997) die Logarithmierung vor. Diese Methodik

wurde in dieser Arbeit übernommen.

Während das Bestimmtheitsmaß die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Werten vergleicht, erkennt die Erklärte Varianz systematische Ordinatenverschiebungen der modellierten gegenüber den gemessenen Daten und eliminiert diesen Einfluss. Der Vergleich der beiden Gütemaße liefert Hinweise auf systematische Fehler.

Bewertung der Szenarien

Wie bereits beschrieben, ist eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Abflüssen am Gebietsauslass kein hinreichendes Kriterium für die Güte der Modellierung und insbesondere kein Beweis für die Übertragbarkeit des Modells. Besonders bei hohen errechneten Gütemaßen ist die Versuchung groß, das Modell nun als geeignet für jedweden Gebrauch zu bezeichnen. Es ist jedoch zusätzliches Wissen über die internen Variablen nötig, um deren Unsicherheit abschätzen bzw. eine physikalisch sinnvolle Parametrisierung vornehmen zu können (BEVEN 1989; ECKHARDT et al. 2003). Bei jeder Bewertung von Szenarien müssen die Möglichkeiten und Grenzen des Modells Berücksichtigung finden. Insbesondere für die Modellierung von Landnutzungsänderungen sind Studien verschiedener Einzugsgebiete, die Recherche historischer Vorbedingungen und aktueller, z.B. politischer, wirtschaftlicher und klimatischer Randbedingungen unbedingt notwendig. Erst diese Aussagen kombiniert mit langjährigen Abflussmessungen lassen den Anwender das Modell effizient nutzen und führen zu belastbaren Aussagen.

Die Bewertung der Szenarien in dieser Arbeit erfolgt auf drei Ebenen. Vor der eigentlichen Szenarienrechnung wird über Sensitivitätstest ermittelt, wo die Möglichkeiten und Grenzen des Modells für die gewünschten Anwendungen liegen. Dann erfolgt ein statistischer Test auf Signifikanz der Unterschiede (in der Regel ein zweiseitiger T-Test). Zudem wird ein subjektiver Vorher-Nachher-Vergleich durchgeführt, in den das verfügbare Erfahrungs- und Literaturwissen miteinbezogen wird.

Die Klimaszenarien werden schließlich einem Trendtest unterzogen. Da die Testgrößen weder unabhängig noch normalverteilt sind, reduziert sich die Anzahl der verfügbaren Tests deutlich. In dieser Arbeit werden die parameterfreien Trendtests nach Mann-Kendall und Sen genutzt, die beide sehr robust sind und Fehlwerte tolerieren (HISDAL et al. 2001; LIBISELLER U. GRIMVALL 2002; SALMI et al. 2002). In einer Zeitreihenanalyse an gemessenen Werten sind zwingend zusätzlich zugrundeliegende Schwankungen, wie sie beispielsweise durch Sonnenfleckenzyklen entstehen, zu berücksichtigen. Die der Erzeugung von Abflussszenarien zugrundegelegte Methodik (siehe Abschnitt 3.3) erlaubt jedoch, die im folgenden beschriebenen Tests zu verwenden.

Der in der Umweltanalytik und Trendforschung relativ weit verbreitete Mann-Kendall-Test oder auch S-Test kann dann angewendet werden, wenn die Werte x_i einer Zeitreihe an eine monoton steigende oder fallende Funktion angepasst werden können.

$$x_i = f(t_i) + \varepsilon_i \quad (1.14)$$

Die Summe der Residuen ε_i sollte eine gleiche Verteilung mit einem Mittelwert 0 aufweisen. Es wird demnach angenommen, dass die Varianz der Verteilung mit der Zeit konstant ist.

Getestet wird die Nullhypothese, dass kein Trend vorliegt, d.h. die Werte zufällig um einen mittleren Wert schwanken. Für den Test wird zuerst die Varianz S berechnet und daraufhin die Test-Statistik Z festgelegt.

$$VAR(S) = \frac{1}{18}(n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)) \quad (1.15)$$

q Gesamtzahl der Gruppen
 t_p Anzahl der Werte in der p -ten Gruppe

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & : S > 0 \\ 0 & : S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & : S < 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

Die Testgröße Z ist normalverteilt. Ein positives Z weist auf einen positiven, ein negatives Z auf einen negativen Trend hin. Zur Bestimmung der Signifikanz wird ein doppelseitiger T-Test verwendet, bei dem die Nullhypothese dann zurückgewiesen wird, wenn Z größer ist als $Z_{1-\alpha/2}$.

Beim Sen-Test wird eine Median-Steigung ermittelt. Vorausgesetzt wird die Annahme, dass der Trend linear ist, d.h. er kann an eine Gleichung

$$f(t) = Qt + B \quad (1.17)$$

angenähert werden. Q ist dabei die Steigung und B der y -Achsenabschnitt. Die Schätzung der Steigung erfolgt dadurch, dass alle Steigungen aller möglichen Datenpaare

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (1.18)$$

ermittelt werden, wobei $j > k$ ist. Die angenäherte wahre Steigung ist der Median dieser ermittelten Steigungen Q_i . Zusätzlich kann ein $100 \cdot (1 - \alpha) \%$ Konfidenzintervall berechnet werden mit den Konfidenzniveaus $\alpha = 0.05$ und $\alpha = 0.01$. Für die Bestimmung von B werden die n Werte der Differenzen $x_i - Q_i$ berechnet. Der Median ergibt den Schnittpunkt mit der y -Achse.

Genauere Informationen zu den Test-Methoden sind in KENDALL (1975), LIBISELLER U. GRIMVALL (2002), MANN (1945), SACHS (2002) und SALMI et al. (2002) enthalten.

2 Ist-Standsanalyse

2.1 Gebietsbeschreibung

2.1.1 Das Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz

Geographie

Das Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz befindet sich im Ostteil des Erzgebirges und seines Vorlandes im Freistaat Sachsen. Es reicht von den Quellen der Roten und Wilden Weißeritz in den Erzgebirgs-Kammlagen, die sich teilweise in der tschechischen Republik befinden, bis zur Mündung der Vereinigten Weißeritz in die Elbe in Dresden. Das gesamte Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz umfasst nach FRIESE (2002) eine Fläche von 384 km^2 mit Teileinzugsgebieten von 156 km^2 (Rote Weißeritz) und $162,5 \text{ km}^2$ (Wilde Weißeritz). Größere Ortschaften im Einzugsgebiet sind neben der Landeshauptstadt Dresden die Kreisstadt Dippoldiswalde sowie die Städte und größeren Gemeinden Freital und Tharandt im Norden, Schmiedeberg am Mittellauf der Roten Weißeritz sowie Altenberg an der Grenze zur Tschechischen Republik. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick das Untersuchungsgebiet.

Geomorphologie und Geologie

Das Erzgebirge kann in die unteren Lagen (bis 450 m ü. NN), die mittleren Lagen (zwischen 450 m und 650 m ü. NN) und die oberen Lagen und Kammlagen (über 650 m ü. NN) unterteilt werden (GOLDBERG et al. 1998). Sein Formenbild ist im Wesentlichen von Hochflächen bestimmt, die durch periglaziale Vorgänge wie Solifluktion und Kryoturbation geprägt sind (KAULFUSS U. KRAMER 2000). Diese werden von Flüssen meist in nördlicher (Rote und Wilde Weißeritz, Pöbelbach) und nordöstlicher Richtung (Reichstädter Bach, Weißbach) durchschnitten. In den oberen Lagen bilden sich dabei vor allem Sohlen- und Sohlenkerbtäler aus, in den unteren Lagen herrschen Kerbtäler vor. Dabei sind nach NEBE et al. (1998) vor allem Gesteinsunterschiede für Besonderheiten im Landschaftsbild verantwortlich.

Die im Gebiet des heutigen Erzgebirges ursprünglich vorherrschenden proterozoischen Gesteinsbildungen wurden im Rahmen der variskischen Gebirgsbildung im Karbon intensiv gefaltet und zu Metamorphiten (hauptsächlich Gneise) umgeprägt. In der Spätphase der variskischen Gebirgsbildung (Oberkarbon) drang stellenweise granitisches Magma in die Metamorphite ein und führte zur Bildung von Erzgängen, die ab dem 10. Jahrhundert bergbaulich genutzt wurden (WAGENBRETH 1982). Besonders ausgeprägt sind sie in den mittleren Lagen des Erzgebirges in SW-NO-Richtung als Quarz- und Granitporphyrgänge (Rhyolith), in der Region des Tharandter Waldes und im südöstlichen Bereich des Erzgebirges als flächige Quarzporphyre. Während der Kreidezeit erfolgte eine Einebnung des Gebietes. Flüsse mit breiten Überschwemmungsflächen prägten die Landschaft. Im nordöstlichen Randgebiet markieren geringmächtige Sandsteine auf dem Erzgebirgsgneis die Strandlinie des Kreidemeeres und somit die Grenze zur Elbtalzone. Im Tertiär hob sich die Erzgebirgsscholle und es erfolgte

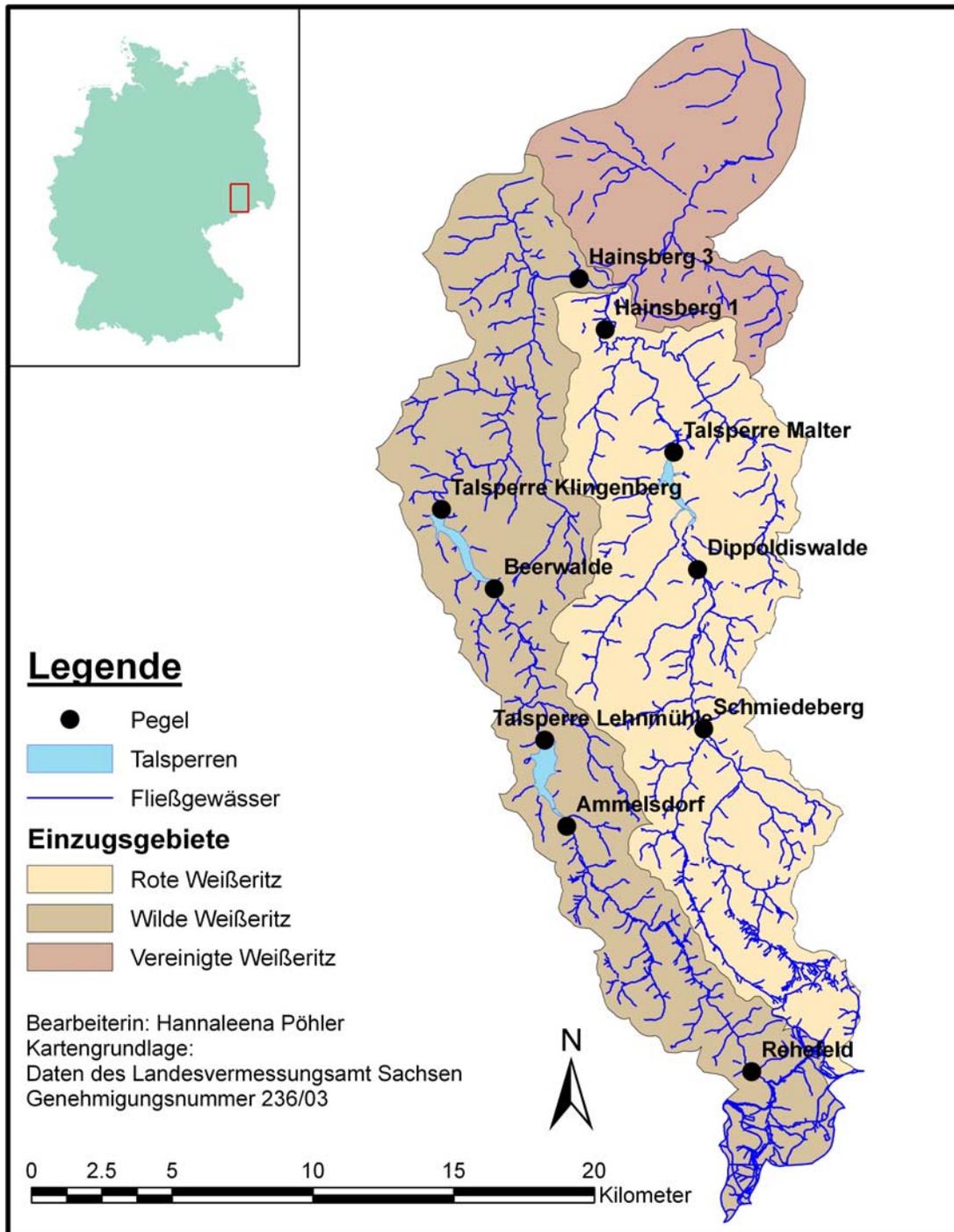


Abbildung 2.1: Das Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz im Osterzgebirge

die Bildung des Egergrabens. Begleitet wurde dieser Prozess von Basaltvulkanismus entlang der Störungszone. Die seit diesen Zeiten erfolgte Tiefenerosion durch Flüsse bewirkte die Entstehung der heute bestehenden tiefzertalten Hochfläche. Im Quartär schließlich bildeten sich im nordöstlichen Bereich des Erzgebirges Lössauflagen, die sich teilweise inselhaft im Süden fortsetzen (WAGENBRETH 1982).

Hydrogeologie

Bedingt durch den Kristallinkomplex ist das Erzgebirge als hydrogeologische Einheit zu sehen (JORDAN U. WEDER 1995). Es ist wenig durchlässig und besitzt lediglich entlang der Klüfte, Störungszonen und Verwitterungszonen sowie in den fleckenhaft vorkommenden Kreidesandsteinen gute Grundwasserleitfähigkeit. Der hypodermische Abfluss ist hier dominant. Für das gesamte Untersuchungsgebiet wird eine sehr geringe Brunnenergiebigkeit von $< 0,5 l/s$ angegeben. Bei den Quellen handelt es sich meistens um Hangschuttquellen mit $< 1 l/s$, die einen starken Zusammenhang zu Niederschlägen aufweisen (LAUTERBACH 2000). Im Untersuchungsgebiet sind nach JORDAN U. WEDER (1995) das ober- und das unterirdische Einzugsgebiet weitgehend identisch. Die lokalen Fließbedingungen können jedoch stark durch den Bergbau beeinflusst sein.

Pedologie

Die Böden des Osterzgebirges haben sich überwiegend auf Gesteinsverwitterungsdecken gebildet, die im Wesentlichen in der Weichselkaltzeit entstanden. Ihr Habitus wandelt sich in Abhängigkeit von Höhenlage und Geländeformung sowie dem Ausgangsgestein. Die Bodenbildung im Erzgebirge wird dabei vor allem durch das Nebeneinander von Decklössen und Frostschuttdecken bestimmt, die sich durch den Einfluss periglazialer Bedingungen in den Kaltzeiten des Pleistozäns entwickelten. In den Schuttdecken sind insbesondere im Ostteil des Erzgebirges bis in Höhenlagen von 500 m ü. NN Löß und Lößderivate im Oberboden enthalten, während die Unterböden durch zunehmende Anteile an dicht gelagertem Festgesteinsmaterial gekennzeichnet sind. Vereinzelt sind auch in den Hochlagen inselartig aufgewehte, meist stauvergleyte Lößvorkommen der jüngeren Eiszeit anzutreffen (KAULFUSS 1999; KAULFUSS U. KRAMER 2000). Bei eigenen Bodenkartierungen im Untersuchungsgebiet konnte das Vorhandensein von Löß für einen Standort in Kammlage nachgewiesen werden. In den Kammlagen gibt es darüber hinaus mehrere Hochmoore, die heute allerdings größtenteils durch Torfabbau und Drainagen gestört sind.

Aus den Gneisen bildeten sich in der Regel sandig-lehmige Braunerden mit einem meist mäßigen Skelettgehalt und mittlerer Bodengüte. Sie stellen die wesentliche Basis des Feldbaues im Osterzgebirge dar. Aus den Porphyren entwickelten sich überwiegend nährstoffarme Böden. Sie sind block- und steinreich und grobkörnig und entwickeln sich selten zu Braunerden, häufiger zu Podsolen (BERNHARDT 1995). In den unteren und mittleren Lagen des Erzgebirges treten Braunerden und Podsol-Braunerden aus Löss oder Lehm sowie aus harten Ton- und Schluffschiefen mit Anteilen von Grauwacke, Sandstein, Quarzit und Phyllit auf. In den Kammlagen überwiegen Braunerden und Podsol-Braunerden aus Grussand oder -lehm aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen (Angaben nach der Bodenkonzeptkarte 1:50 000, BKKonz, Stand 2002). Diese sind durch lehmige Bodenarten sowie hohen Grus- und

Steinanteil und mäßigen Ertrag charakterisiert, die aus teilweise lössbeeinflussten Fließerden über Hangschutt auf Festgestein entstanden sind. Daneben treten in den Kammlagen Moore und anthropogene Böden des Bergbaus und der Siedlungen auf. Insgesamt weisen anthropogen beeinflusste Böden im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz einen Anteil von 13 % auf. Bei den natürlichen Böden dominiert im Untersuchungsgebiet Ls3 mit einem Anteil von 41 %. Weitere wichtige Bodenarten sind daneben Sl3 (9 %), Sl4 und Ut2 (jeweils 8 %; vgl. Abbildung A.1 und Tabelle A.2).

Die Entwicklungstiefe der Böden variiert im Untersuchungsgebiet zwischen wenigen Zentimetern bis einigen Metern. Dies ist vor allem abhängig von der Mächtigkeit der Fließerden an Hängen und in Geländesenken und Tälern (MANNSFELD U. RICHTER 1995).

Vegetation und Landnutzung

Das Untersuchungsgebiet war ursprünglich von sommergrünen Laubwäldern dominiert, die durch Moore und Felsen unterbrochen wurden. Zwischen 500 und 1000 n. Chr. wurde das Erzgebirge kolonisiert (KOWALKE 2000a). Besonders stark veränderte sich das Landschaftsbild im Zeitraum Mitte 12. bis Ende des 13. Jahrhundert durch den Bergbau und dadurch initiierte Siedlungsneugründungen, Waldrodungen, Sumpftwässerungen sowie die Anlage und Erweiterung landwirtschaftlicher Nutzflächen durch slawische, fränkische und thüringische Bauern. Nach BLASCHKE 1967 zeigte die bis Ende des 13. Jahrhunderts entstandene Kulturlandschaft im Wesentlichen die heute noch bestehende Verteilung von Wald und Ackerland. Zwischen 1880 und 1890 wurden erste Relief-, Hydro- und Flurholzmeliorationen auf Äckern der Rittergüter und Besitztümern der reicheren Bauern durchgeführt (BERNHARDT 1995). Es ist anzunehmen, dass sich die Veränderungen stark auf die Gebietshydrologie auswirkten, auch wenn dies durch fehlende Messdaten sowohl hinsichtlich des Niederschlags als auch des Gebietsabflusses nicht mit Zahlen belegbar ist.

Nach Kriegsende erfuhr die Struktur der landwirtschaftlichen Flächennutzung im Osterzgebirge radikale Veränderungen durch die Einführung der Planwirtschaft und die Kollektivierung der Produktion. Die landwirtschaftliche Nutzfläche wurden von LPGen und VEBen bewirtschaftet, die Produktionsmittel waren überwiegend vergesellschaftet. In den 70er Jahren wurden „industriemäßige Produktionsmethoden“ (LUFT 1998:38) durchgesetzt. Große einheitliche Partien wurden in konsequenter Arbeitsteilung bewirtschaftet und dafür verstärkt Großmaschinen und Chemie eingesetzt. Die LPGen spezialisierten sich nun entweder auf Pflanzen- oder Tierproduktion. Andere Produktionsprozesse wurden ausgegliedert (JÄHNICHEN 1998; LUFT 1998; WIEGAND 1994).

Die Eingriffe der sozialistischen Landwirtschaft, deren wesentliche Ziele auch die Umwandlung von Grasland in Ackerland sowie die Intensivierung der Nutzung des bestehenden Graslandes waren, zeigten eine starke Einflussnahme auf die Natur. Die Großflächenlandwirtschaft mit der Ausräumung der Landschaft und der Einsatz schwerer Maschinen führten zu einer homogenen Bewirtschaftung heterogener Standorte und damit zu einem Anstieg der Heterogenität der Bodenverhältnisse innerhalb der Geländeschläge. Während Kuppen oft trocken waren, stand in den Senken häufig Wasser. Letztere blieben dadurch vielfach unbestellt. Optimale Düngergaben waren nicht für den gesamten Schlag möglich. Durch die eingeschränkte Verfügbarkeit vieler chemischer Mittel wie Stickstoff- und Phosphordüngern sowie von Fungiziden konnten diese anders als in den flurbereinigten westdeutschen Bundesländern häufig nicht in ausreichendem Maß eingesetzt werden (VOIGTLÄNDER et al. 2001). Wind- und Wassererosion

wurden durch die Anbaumethoden der LPGen verstärkt, die Böden erheblich durch die Zunahme des Maschinenbestandes belastet. Das zunehmende Gewicht der Traktoren und die Arbeitsbreiten der Anhängengeräte führten besonders in den 60er und 70er Jahren zu großen Schäden in der Bodenstruktur. Erst im Zuge zunehmender Gerätekombinationen in den 80er Jahren reduzierte sich die Zahl der Flächenüberfahrungen und infolgedessen die Bodenverdichtung. Trotzdem blieb in großen Teilen Ostdeutschlands im Gegensatz zu den westlichen Bundesländern eine vergleichsweise hohe Biotop- und Artenvielfalt erhalten (VOIGTLÄNDER et al. 2001).

Nach der Wiedervereinigung beider deutscher Staaten am 03.10.1990 wurden die sozialistischen Großbetriebe einem starken Veränderungsprozess unterworfen. Die Agrarwirtschaft der DDR musste aus einer planwirtschaftlichen Ordnung mit sozialistischem Eigentum an Produktionsfaktoren in eine soziale Marktwirtschaft mit grundlegend anderen Ordnungsprinzipien überführt werden. Es kam dadurch zu tief greifenden Umstrukturierungen in der Rechtsform, der Anbaustruktur und Tierhaltung sowie der Bewirtschaftungsintensität und der Flächennutzung der landwirtschaftlichen Betriebe. Allgemein überlebte die LPG die DDR. Ursache dafür waren nach LUFT (1998) nicht nur die Scheu vor den Risiken eines Umbruchs, sondern auch positive Erlebnisse der Bauern in der LPG, die negative Erfahrungen überwogen. Dadurch wurde auch nach der Umstrukturierung noch ein sehr großer Flächenanteil im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz, nämlich 89,4 % in den unteren Lagen und 80 % in den mittleren Lagen, von LPG-Nachfolgebetrieben, das heißt vor allem von verschiedenen Agrargenossenschaften, betrieben. In den oberen Berglagen zeigt sich eine etwas andere Situation. Dort existierten schon zu DDR-Zeiten deutlich mehr private Betriebe (21,7 % der damaligen bewirtschafteten Fläche). Aktuell werden in diesen Lagen 62 % der Flächen von LPG-Nachfolgebetrieben bewirtschaftet. Der Großteil der Felder hat weder Form noch Fläche seit 1989 geändert. Allgemein ist festzustellen, dass heute die Schläge je größer werden, desto besser die naturräumlichen Bedingungen sind, da so Maschinen effektiver genutzt werden können (alle Angaben beziehen sich auf das Jahr 2002, aus BIANCHIN 2003).

Aktuell besteht die Landnutzung im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz aus 34 % Forst (hauptsächlich Fichte), 45 % Acker- und Grünland, 15 % Siedlungsfläche und 6 % sonstige Nutzung wie Infrastruktur, Moore, Wasserflächen (Angaben aus dem ATKIS-DLM 1:25 000, Stand 1998, vgl. Abbildung A.1). In den unteren Lagen überwiegen deutlich die Siedlungsflächen. Dies ist vor allem den Städten Dresden und Freital geschuldet. In den mittleren Lagen überwiegen Ackerbau und Grünland. Siedlungen sind vorhanden, bestimmen aber nicht mehr die Landnutzung. In den oberen Lagen herrschen Nadelforste vor, unterbrochen von Grünland. In den Kammlagen lichtet sich das Gebiet wieder durch Moore und teilweise noch kahle Bergkuppen. Strukturell unterscheiden sich die Einzugsgebiete der Wilden und der Roten Weißeritz dabei dadurch, dass bei letzterem Siedlungen im Hauptflusstal anzutreffen sind, während bei der Wilden Weißeritz die Siedlungen eher an den Nebenflüssen zu finden sind und das Haupttal des Flusses großteils bewaldet ist.

Klima

Sachsen befindet sich nach FREY U. LÖSCH (1998) in der gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich zwischen ozeanisch und kontinental beeinflusstem Klima mit kurzer Winterkälte- bzw. Frostperiode. Die ganzjährig fallenden Niederschläge mit einem Niederschlagsmaximum im Sommer sind hauptsächlich an Zyklonendurchgänge gebunden (DWD 1997; MANNSFELD

U. RICHTER 1995). Temperatur- und Niederschlagsverteilung sind durch den Höhengradienten sowie ausgeprägte Luv- und Leewirkungen geprägt. Dabei fallen die Niederschläge wegen der Abschirmungseffekte durch Westerzgebirge, Fichtelgebirge und Böhmerwald großräumig niedriger aus als in vergleichbaren Gebirgen (GOLDBERG et al. 1998). Die allgemeinen Kenndaten für das Gebiet sind in Tabelle 2.1 zusammenfasst.

Tabelle 2.1: Die Klimaverhältnisse im Osterzgebirge (GOLDBERG et al. 1998, HAD 2000)

Höhenlage	Höhe [m ü. NN]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Wind [m/s]	ETP [mm]
Untere Lagen	200-450	7,0-8,5	700-800	2-4	550-575
Mittlere Lagen	450-650	5,5-7,5	800-950	2-5	450-550
Obere Lagen	650-800	5,0-6,0	900-1000	3-6	400-450
Kammlagen	über 800	4,0-5,0	um 1000	4-7	400-450

Auf Grundlage der langjährigen Klimawerte von mehreren Stationen des Deutschen Wetterdienstes im Osterzgebirge können nach GOLDBERG et al (1998) mittlere Höhengradienten der meteorologischen Standardgrößen Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit angegeben werden.

$$t = 9,1^{\circ}\text{C} - \frac{0,5^{\circ}\text{C}}{100\text{ m}} * H \quad (2.1)$$

$$P = 596\text{ mm} + \frac{49,2\text{ mm}}{100\text{ m}} * H \quad (2.2)$$

$$v_h = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \frac{0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 1}{100\text{ m}} * H \quad (2.3)$$

H	Höhe ü. NN [m]
t	Temperatur [°C]
P	Niederschlag [mm]
v_h	Windgeschwindigkeit [m/s]

Der Unterschied der Globalstrahlung in Tal- und Kammlagen des Osterzgebirges ist im Allgemeinen unter 5%. Allgemein wird von einem Gradienten von -1% pro 100 Höhenmetern ausgegangen. Die mit der Höhe zunehmende Strahlung wird nach FLEMMING (1993) und GOLDBERG et al. (1998) in den Hochlagen durch das Anwachsen der Nebelhäufigkeit und der Bewölkung überkompensiert. Der Gradient kann sich an wolkenlosen Tagen im Winter umdrehen, so dass die Globalstrahlung mit der Höhe leicht zunimmt.

Im Kammgebiet herrschen zu anderen Mittelgebirgsregionen abweichende Windverteilungen vor, die durch häufig auftretende Südströmungen aus dem Böhmischem Becken verursacht werden (FRANKE U. BERNHOFER 2005). Auf der Nordabdachung treten zudem bei West- und Nord-West-Wetterlagen Staueffekte mit einer ausgeprägten Wolkenbildung sowie einer hohen Niederschlagsneigung ein. Auffällig sind im Osterzgebirge die relativ niedrigen Inversionen (im Allgemeinen zwischen 650 und 700 m ü. NN, Angaben nach FLEMMING 1993; MIEGEL U. PESCHKE 1998). Besonders in den Wintermonaten Dezember bis Februar bildet sich hier häufig eine scharfe Temperaturgrenze aus. Der so entstehende Nebel kann zum Niederschlag noch zwischen 40 und 200 mm Bestandesniederschlag in Fichtenforsten hinzufügen (FLEMMING 1993; LANGE et al. 2003; ZIMMERMANN U. ZIMMERMANN 2002).

Bei Strahlung, Temperatur und Niederschlag führt das Relief des Osterzgebirges zu starken kleinräumigen Änderungen. Es ergeben sich deutliche Unterschiede in der Strahlung zwischen verschiedenen Hanglagen und nach Bewölkungsgrad (FRANKE U. BERNHOFER 2005; GOLDBERG et al. 1998). Der Lokalgradient der Temperatur schwankt nach GOLDBERG et al. (1998) um $-0,65\text{ °C}$ pro 100 Höhenmeter. Besonders in der Übergangszone von den mittleren zu den höheren Lagen bildet sich ein größerer Lokalgradient aus, da durch die häufige Ausbildung stabiler Inversionen die Nebelhäufigkeit sprunghaft ansteigt. Das führt zu einer Verschiebung der Vegetationsperioden. So können sich nach BIANCHIN (2003) beispielsweise Roggenblüte, Roggenernte und der mittlere Beginn der Feldarbeiten verschiedener Teiluntersuchungsgebiete mit Zeitverzögerungen von bis zu einem Monat ereignen. Beim Niederschlag kann nach GOLDBERG et al. (1998) das Verhältnis von Hangniederschlag zu Niederschlag auf die Horizontale insbesondere in den engen Nord-Süd-orientierten Flusstälern der Wilden und Roten Weißeritz zwischen Luv- und Leelagen Differenzen bis 14 % aufweisen, nach neueren Berechnungen von FRANKE U. BERNHOFER (2005) beträgt er teilweise sogar über 20 %.

Hydrologie

Die Rote Weißeritz beginnt ihren Lauf am Abfluss des Trinkwasserspeichers Altenberg, der aus den Galgenteichen bei Altenberg gespeist wird. Die Zuflüsse der Teiche entstammen den oberen Kammlagen des Erzgebirges bei Zinnwald-Georgenfeld und entspringen zahlreichen Quellen im Seifenbusch und am Hang des Kahlebergs (905 m ü. NN). Diese Zuflüsse sind gekennzeichnet durch miteinander vernetzte Grabensysteme, die wegen der zahlreichen Querverbindungen in das Einzugsgebiet der Müglitz nicht immer eindeutig einem der beiden Einzugsgebiete zuordenbar sind. Die Rote Weißeritz weist im Oberlauf einen steilen Gradienten um 3,0 % auf, der bei Kipsdorf etwas flacher (um 1,2 %) wird. Auch nach der Talsperre Malter bleibt das Gefälle mit 1,1 % bis zum Zusammenfluss mit der Wilden Weißeritz relativ steil. Wichtige Nebenflüsse der Roten Weißeritz sind der Langer Grund Bach, der Fallbach, der Pöbelbach, der Schwarzbach, der Reichstädter Bach, der Borlasbach sowie der Oelsabach. Die Rote Weißeritz entspricht bis zur Talsperre Malter nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie grobmaterialreichen, silikatischen Mittelgebirgsbach (Typ 5), unterhalb der Talsperre bis zur Vereinigung mit der Wilden Weißeritz dem Typ der silikatischen, fein- bis grobmaterialreichen Mittelgebirgsflüsse (Typ 9).

Die Wilde Weißeritz entspringt unter dem Namen Divoká Bystrice nahe dem Ort Nové Mešto in der tschechischen Republik am Hang des Pramenáč (910 m ü. NN). Im Quellgebiet in Kammlage des Erzgebirges durchläuft sie genauso wie ihre Nebenflüsse ein durch Hoch- und Hangmoore beeinflusstes Gebiet. Die Hochmoore sind heute in großen Teilen trockengelegt und mit lichtem Kiefernwald bewachsen. Bedeutende Zuflüsse sind der Hennersdorfer

Bach, der Seerenbach sowie der Schlortzbach. Das mittlere Gefälle der Wilden Weißeritz auf tschechischer Seite beträgt im Mittel 3,1 %. Auf deutscher Seite verflacht sich das Gefälle auf 1,3 % bis zur Talsperre Lehmühle. Zwischen den beiden Talsperren beträgt das Gefälle um 1,1 %, im weiteren Verlauf bis zum Zusammenfluss mit der Roten Weißeritz 1,0 %.

Die Wilde Weißeritz entspricht bis zur Talsperre Klingenberg nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie dem grobmaterialreichen, silikatischen Mittelgebirgsbach (Typ 5), unterhalb der Talsperre bis zur Vereinigung mit der Roten Weißeritz dem Typ der silikatischen, fein- bis grobmaterialreichen Mittelgebirgsflüsse (Typ 9). Die Gewässerkennzahlen der Pegel Dippoldiswalde und Hainsberg 1 sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

In Abbildung 2.3 sind für die Klimanormalperiode 1961-1990 die arithmetischen Mittel und Mediane der Abflüsse des noch von Talsperren unbeeinflussten Pegels Dippoldiswalde abgebildet. Es ist gut erkennbar, dass der Hauptanteil des Abflusses im Winter bzw. während der Schneeschmelze erfolgt, dass aber offensichtlich im Sommer immer wieder Ausreißer den Mittelwert des Abflusses ansteigen lassen, während der Median als robusteres Mittelmaß davon unberührt bleibt. Die Rote Weißeritz weist eine stärkere Anfälligkeit für Ausreißer auf als die Wilde Weißeritz, deren Median und arithmetisches Mittel am Pegel Ammeldorf deutlich ähnlicher sind. Es ist offensichtlich, dass die beiden Einzugsgebiete, obwohl in Nachbartälern gelegen, im kurzfristigen Verhalten verschiedene Charakteristika aufweisen (siehe auch PÖHLER 2005b; WEIGERT U. SEIDEL 2005).

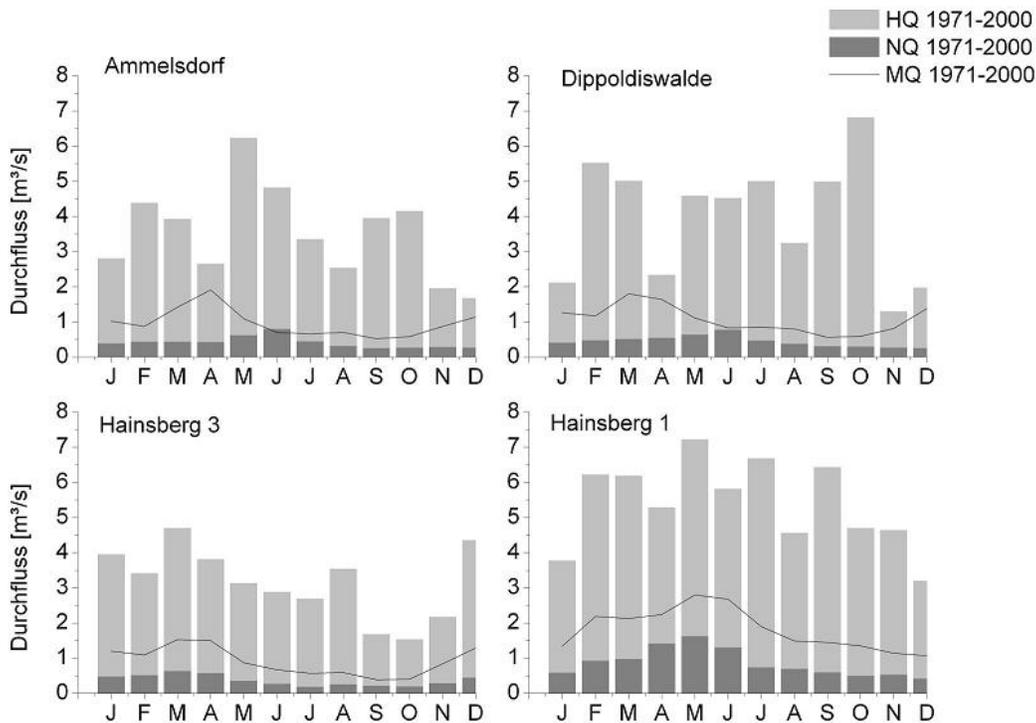


Abbildung 2.2: Die mittleren Hochwasser (HQ) und Niedrigwasser (NQ) der Pegel Ammeldorf, Hainsberg 3 (Wilde Weißeritz) sowie Dippoldiswalde, Hainsberg 1 (Rote Weißeritz) in der Klimanormalperiode 1971-2000 (LFUG 2002a).

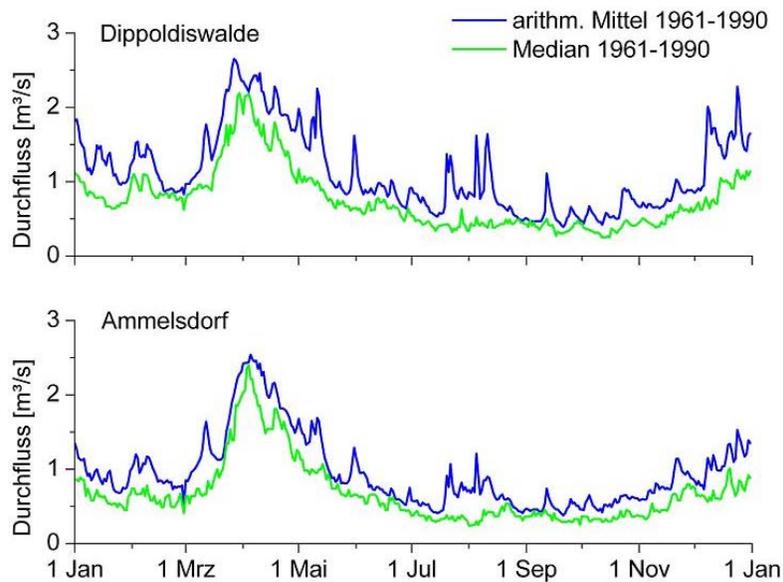


Abbildung 2.3: Die mittleren Abflüsse (arithm. Mittel und Median) der Pegel Ammeldorf (Wilde Weißeritz) und Dippoldiswalde (Rote Weißeritz) in der Klimanormalperiode 1961-1990 (LFUG 2002a.)

Die Vereinigte Weißeritz schließlich fließt in ihrem gesamten Verlauf durch stark besiedeltes Gebiet in Freital und Dresden. Sie ist größtenteils offen kanalisiert. In den Jahren 1891 bis 1893 wurde die Weißeritz am sogenannten Weißeritzknick aus ihrem alten Bachbett in einen neuen Gewässerlauf umgeleitet und mündet heute im Dresdner Stadtteil Cotta in die Elbe. Der Weißeritzknick stellt bei Hochwasser eine äußerst kritische Stelle im Verlauf der Vereinigten Weißeritz dar. Als geschiebegeprägter Mittelgebirgsfluss neigt der Fluss dort bei einem Hochwasser HQ20 dazu, geradeaus dem alten Flussverlauf entlang zur Elbe zu folgen. In der derzeitigen städtebaulichen Situation bedeutet dies stets eine massive Hochwassergefahr für die Stadtteile Friedrichstadt und Wilsdruffer Vorstadt sowie das historische Stadtzentrum von Dresden (HEY 2004).

Tatsächlich treten im Erzgebirge in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen Hochwässer von großem Ausmaß auf (GRÜNEWALD 2005; PITZSCH 1963). Dies beruht auf der oben beschriebenen hochwasserbegünstigenden Morphologie ausgedehnter Hochflächen in den Hochlagen mit oft sprunghaftem Übergang in enge Kerbtäler sowie der für ländliche Gebiete hohen Besiedlungsdichte, einhergehend mit intensiver Abholzung seit Beginn der Besiedlung und des Erzabbaus im Erzgebirge (BEYER 1973). Durch das starke Sohlgefälle der Roten und der Wilden Weißeritz, das auch in der Vereinigten Weißeritz noch im Mittel 0,5 % beträgt, entwickelt die Weißeritz nach HEY (2004) hohe Schleppkräfte, die umfangreiche Sohl- und Ufererosionen und eine erhebliche Geschiebeführung und hohe Schäden bei Gewässeranreinern verursachen können. Auch an den Ganglinien ist erkennbar, dass beide Flüsse durch steile Wellenanstiege und Wellenabflachungen gekennzeichnet sind, die zudem beinahe zeitgleich auftreten (Abbildung 2.3). Alle betrachteten Pegel zeigen dabei ähnliches Verhalten. Insbesondere für den

Hochwasserschutz, aber auch wegen des hohen Trink- und Brauchwasserbedarfs entstanden im Einzugsgebiet der Vereingten Weißeritz deshalb die drei Talsperren Lehmühle, Klingenberg und Malter (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Charakteristiken der drei Talsperreneinzugsgebiete im Untersuchungsgebiet (SIEBER 1992; WEIGERT U. SEIDEL 2005)

Talsperre	Lehmühle	Klingenberg	Malter
gestautes Gewässer	Wilde Weißeritz	Wilde Weißeritz	Rote Weißeritz
Einzugsgebiet [km^2]	60,4	89,4	104,6
Stauraum [$Mio m^3$]	21,86	16,38	8,78
Bevölkerungsdichte [EW/km^2]	35	32	165
Inbetriebnahme	1931	1914	1913
Funktion	Trinkwasserspeicher, Hochwasserschutz	Trinkwasserspeicher, Hochwasserschutz	Brauchwasser, Tourismus/Erholung, Energieerzeugung, Hochwasserschutz

2.1.2 Das Einzugsgebiet der Zschopau

Im Einzugsgebiet der Zschopau dient als Vergleichsgebiet zur Überprüfung der Übertragbarkeit des Modellsystems. Es wird deshalb im Folgenden lediglich in seinen Hauptmerkmalen und Unterschieden zum Hauptuntersuchungsgebiet umrissen. Die genaue Beschreibung der Gebietseigenschaften und der genutzten Eingangsdaten im Einzugsgebiet der Zschopau sind BERGER (2005) und PÖHLER (2006) zu entnehmen.

Das Einzugsgebiet der Zschopau bis zum Pegel Hopfgarten ist innerhalb der naturräumlichen Gliederung Sachsens dem mittleren Erzgebirge zuzuordnen (KAULFUSS U. KRAMER 2000). Das Einzugsgebiet umfasst insgesamt $529 km^2$, davon liegen rund 20 % in der Tschechischen Republik. Wie das Einzugsgebiet der Vereingten Weißeritz ist das betrachtete Teileinzugsgebiet der Zschopau durch einen allmählichen Geländeabfall nach Norden und tief eingeschnittene Flusstäler gekennzeichnet.

Das Einzugsgebiet wird von der Zschopau und ihre Zuflüssen nach Norden entwässert. Bedeutende Zuflüsse sind die Sehma, der Pöhlbach und die Preßnitz. Zudem befinden sich in diesem Einzugsgebiet der Greifenbachstauweyer Geyer und die Talsperre Cranzahl auf deutscher Seite sowie die Talsperre Preßnitz (vodni nádrž Přisečnice) in der Tschechischen Republik.

Fast das gesamte Gebiet erstreckt sich über die mittleren und oberen Lagen und den Kamm, eine Ausnahme bildet lediglich das Zschopautal vom Zufluss der Preßnitz bis zum Gebietsauslass am Pegel Hopfgarten, das mit 360 bis 400 m ü. NN die geringste Erhebung darstellt (nach KAULFUSS U. KRAMER 2000). Die höchsten Erhebungen sind der Fichtelberg (1214 m ü. NN) und der Klinovec (Keilberg, 1243 m ü. NN).

Das Einzugsgebiet der Zschopau und ihrer Nebenflüsse bis zum Pegel Hopfgarten ist von Gneisen dominiert, in denen sich Einschaltungen sedimentärer Herkunft (Grauwacken, Hornfelsen,

Glimmerfelsen, Kalksteine bzw. Marmor und Dolomite) befinden. Zudem treten vor allem im den südwestlichen und südlichen Regionen des Einzugsgebiets muskovit- und biotitreiche Glimmerschiefer auf (PIETZSCH 1956). Wie das Osterzgebirge wird das mittlere Erzgebirge hydrogeologisch als Kluftgrundwasserleiter-System angesehen. Dabei sind die Grundwasserneubildungsraten im Einzugsgebiet der Zschopau mit beispielsweise $3,7 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ für den Raum Annaberg-Buchholz etwas höher als im Osterzgebirge (JORDAN U. WEDER 1995).

Die klimatischen Bedingungen sind im Mittel vergleichbar mit denen im Einzugsgebiet der Weißeritz. Lediglich die mittleren Temperaturen in den oberen Lagen und Kammlagen mit $4,3\text{-}5,5^\circ\text{C}$ bzw. $2,8\text{-}4,3^\circ\text{C}$ und demzufolge auch die mittleren Verdunstungsraten sind deutlich niedriger als im Osterzgebirge (KAULFUSS U. KRAMER 2000). Auch die Böden beider Einzugsgebiete sind ähnlich. In den betrachteten Teileinzugsgebieten der Zschopau dominieren Braunerden und Pseudogley-Braunerden sowie vor allem in den oberen Lagen und Kammlagen Podsol-Braunerden (BKKonz 1:50 000). Wie im Osterzgebirge werden die oberen Lagen und Kammlagen größtenteils forstwirtschaftlich genutzt, dabei dominieren teilweise noch stark geschädigte Nadelwälder (ATKIS-DLM 1:25 000). Die nicht von Wald bedeckten Flächen im südlichen Teil des Einzugsgebiets sind vorrangig Grünland und erstrecken sich um die Siedlungsbereiche und im Einzugsgebiet der Talsperre Preßnitz. In den mittleren und unteren Lagen nimmt der Anteil von Ackerland mit sinkender Höhe deutlich zu. Die Ortschaften befinden sich größtenteils direkt an den Fließgewässern. Im Gebiet befinden sich mehrere, teilweise noch intakte Moore. Dabei ist das gesamte Einzugsgebiet der oberen Zschopau stark durch den Bergbau geprägt.

2.2 Anpassung des Modells

Da im Rahmen des EMTAL-Projekts gewährleistet werden soll, dass Modellierungen mit öffentlich erhältlichen Daten möglich ist, wurde für die Parametrisierung auf möglichst breit verfügbare, dabei aber exakte und korrekte Informationen zurückgegriffen.

2.2.1 Geographische Daten

Durch die geographischen Daten werden die räumliche Struktur sowie die räumlich verteilten, zeitlich konstanten Eigenschaften des zu modellierenden Einzugsgebietes dargestellt. Dazu gehören eine Bodenkarte (Bodenarten), eine Landnutzungskarte und ein digitales Höhenmodell. Zur Gewährleistung der Übertragbarkeit wurden soweit wie möglich allgemein erhältliche Daten genutzt, in diesem Fall das digitale Geländemodell im Maßstab 1:25 000 bzw. im 20 m-Raster (ATKIS-DGM 25) und das digitale Landnutzungsmodell im selben Maßstab (ATKIS-DLM 25) vom Landesvermessungsamt Sachsen (Stand 1998) sowie die Bodenkonzeptkarte (BKKonz 50) vom Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) Sachsen (Stand 2002). Im Teileinzugsgebiet, das sich in der tschechischen Republik befindet, mussten eigene Kartierungen vorgenommen werden (z.B. WALTHER 2004).

Das *preprocessing*, d.h. die Beschaffung der Daten und deren Umarbeitung in das von WaSiM-ETH benötigte Format nehmen einen großen Zeitraum ein. Besonders sorgfältig und kritisch müssen vor allem in Hinblick auf Übertragbarkeit folgende Punkte beachtet werden:

- Zugang zu Daten (Deutschland und Nachbarländer, in diesem Fall Tschechien)
- Preis der Daten

- Lieferzeit für die Daten
- Qualität der Daten in Abhängigkeit von der gewählten bzw. lieferbaren Auflösung.

Zudem ist die Beschaffung mancher Eingangsparameter wie Leitfähigkeiten, Kolmationswiderstand, Bodenmächtigkeiten, van-Genuchten-Parameter nur in ungenügender Genauigkeit oder garrnicht möglich. Essentiell sind deshalb gute Literaturwerte bzw. geeignete Schätzmethoden.

Landnutzung

Die Landnutzung kann in WaSiM-ETH theoretisch beliebig genau codiert werden. Praktische Einschränkungen ergeben sich durch die Rasterweiten und durch die Verfügbarkeit der zugehörigen Parameter. Die Ist-Stands-Modellierung wurde im vorliegenden Fall mit ATKIS-Daten vom Landesvermessungsamt Sachsen durchgeführt. Sie sind neben Corine-Daten und CIR-Daten allgemein erhältlich, werden regelmäßig aktualisiert und weisen eine ausreichende Genauigkeit auf. Bei größeren Anteilen der modellierten Einzugsgebiete in Nachbarländern sollte auf die europaweit erhobenen Corine-Daten zurückgegriffen werden, die für Wasserhaushaltsmodellierungen in größeren Rasterweiten in der Regel eine ausreichende Genauigkeit bieten.

In Übereinstimmung mit den anderen Arbeitsgruppen im EMTAL-Projekt wurden Landnutzungskategorien für die Modellierung festgelegt. Sie sind in Tabelle A.1 aufgelistet. Für die Modellierung der Jahre 1980-1990 wurden die Abweichungen der Landnutzung von 1980-1990 gegenüber dem in den ATKIS-Daten repräsentierten Stand 1991-2000 über den Abgleich mit den topographischen Karten VA 1:10 000, Jahre 1980 bis 1989 ermittelt und daraus Landnutzungskarten auf Basis der Codierung in Tabelle A.1 erstellt (siehe auch KOMISCHKE 2005). Genauere Codierungen v.a. in Bezug auf die Äcker und Wälder werden in Zusammenhang mit den Landnutzungsszenarien beschrieben.

In der Literatur herrscht trotz einiger Erfahrung in hydrologischer Modellierung eine hohe Unsicherheit in Bezug auf Parametrisierung der Landnutzung in Hinblick auf die Wirkung auf Evapotranspiration, Interzeption und andere wasserhaushaltlich wirksame Prozesse vor. Eine Minimierung von Messunsicherheiten beispielsweise beim Blattflächenindex LAI verursacht in der Regel Probleme bei der Übertragung der einzelnen Messergebnisse auf Einzugsgebietsebene (Regionalisierung). Dies wird dadurch verschärft, dass in einem Modell zwangsläufig eine Aggregation von Parametern und damit meist eine Vereinfachung erfolgen muss, die einen Informationsverlust mit sich bringt (ECKHARDT et al. 2003). Die Parametrisierung der Landnutzung für WaSiM-ETH erfolgte mit Hilfe verschiedener Quellen. In Tabelle 2.3 ist skizziert, welche Parameter in welcher zeitlichen Auflösung zur Anwendung kommen und welche Quellen für die vorliegende Arbeit genutzt wurden. Die phänologischen Eckdaten werden für jede Landnutzungsart durch den Zeitpunkt von Blattaustrieb, Blüte, Frucht und Blattverlust bzw. Ernte definiert.

Boden

Die Bodenkonzeptkarten sind die genauesten Bodenaufnahmen, die in Sachsen aktuell zu beziehen sind, stellen jedoch genauso wie die Bodenübersichtskarten eine Verallgemeinerung dar. Für Modellierungen in kleinen Einzugsgebieten in sehr kleinen Rasterweiten sind deshalb

Tabelle 2.3: Landnutzungsparameter in WaSiM-ETH, deren zeitliche Auflösung und genutzte Quellen

Parameter	zeitliche Auflösung	Quelle
Albedo	konstant	DVWK 1996
Oberflächenwiderstand (rsc)	monatlich	MONTEITH 1965; SCHULLA 1997 (angepasst)
Blattflächenindex (LAI)	phänologische Eckdaten	MÜNCH 1994
Wurzeltiefe	phänologische Eckdaten	MÜNCH 1994
Wurzelverteilung	konstant	SCHULLA 1997
effektive Vegetationshöhe (Z_0)	phänologische Eckdaten	SCHULLA 1997; MÜNCH 1994; eigene Messungen
Vegetationsbedeckungsgrad	phänologische Eckdaten	MÜNCH 1994

Bodenkartierungen und eine Ermittlung der Bodenkenngößen im Labor unverzichtbar. Für die vorliegenden Zielstellungen jedoch kann mit den Bodenkonzeptkarten gearbeitet werden, auch wenn genauere Karten wünschenswert wären.

Da WaSiM-ETH nicht mit Bodentypen, sondern mit Bodenarten arbeitet, wurden den verschiedenen Leitbodenprofilen dominante Bodenarten zugeordnet (vgl. Tabelle A.2). Dabei wurde der jeweiligen Bodensäule die Bodenart, die die obersten 30 cm dominiert, als Hauptbodenart zugewiesen, da diese in der Regel auch den Infiltrationsprozess dominiert. Ausnahmen sind Bodenprofile, deren oberste Zentimeter tonreich sind. Für sie wird diese Bodenart als Hauptbodenart angenommen, da sie die Infiltrationseigenschaften des Bodens dominiert. In den Tabellen 2.4 und 2.5 ist skizziert, welche Parameter in welchem Bodenmodell zur Anwendung kommen und welche Quellen für die vorliegende Arbeit genutzt wurden. Die Zuweisung der van Genuchten-Parameter für *wasim 2* erfolgte dabei unter Zuhilfenahme des Programms RETC (RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. M. Th. van Genuchten, F. J. Leij und S. R. Yates. U.S. Salinity Laboratory. Juni 1991).

Tabelle 2.4: Bodenparameter in WaSiM-ETH (*wasim 1*), deren zeitliche Auflösung und genutzte Quellen. KA4: Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN 1996)

Parameter	Bezeichnung/Bedeutung	Einheit	Bestimmung/Quelle
m	Rezessionsparameter des Basisabflusses, gebietsspezifischer Modellparameter	mm	Ganglinienanalyse, Kalibrierung
k_d	Speicherrückgangskonstante für den Direktabfluss	d	Ganglinienanalyse, Kalibrierung
k_H	Speicherrückgangskonstante für den Zwischenabfluss	d	Ganglinienanalyse, Kalibrierung
T_{korr}	Korrekturfaktor der Bodentransmissivität und Erfassung skalenabhängiger Einflüsse des topographischen Index	-	Kalibrierung
K_{korr}	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung ungesättigter Zustände und bevorzugter Fließwege	-	Kalibrierung
SH_{max}	Maximaler Zwischenspeicherinhalt	mm	Kalibrierung
$unsat$	Anfangsfüllung der ungesättigten Zone	mm	Kalibrierung
S_m	Anfangsfüllung des Zwischenspeichers	mm	Kalibrierung
P_{grenz}	Grenzniederschlagsintensität für Abfluss über Makroporen	mm	Kalibrierung
r	Reduktionswert des Rückflusses aus Interflow- zu Bodenspeicher	-	Kalibrierung
QD_{Schnee}	Anteil der Schneeschmelze am Direktabfluss	-	Ganglinienanalyse, Kalibrierung
k_{sat}	gesättigte Leitfähigkeit		KA4
mSB	maximale Kapazität des pflanzenverfügbaren Bodenspeichers	%	KA4
FC	Feldkapazität	%	KA4

Tabelle 2.5: Bodenparameter in WaSiM-ETH (*wasim 2*), deren zeitliche Auflösung und genutzte Quellen. KA4: Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN 1996)

Parameter	Bezeichnung/Bedeutung	Einheit	Bestimmung/Quelle
d_r	Drainage- oder Entwässerungsdichte, Maß für die Dichte von Makroporen pro Flächeneinheit	-	Kalibrierung
Q_0 oder Q_b	Skalierungsparameter für den Basisabfluss (falls ohne das Grundwassermodul gerechnet wird)	-	Kalibrierung
k_h	Auslaufkonstante für Basisabfluss, wie Q_0	-	Kalibrierung
k_{sat}	gesättigte Leitfähigkeit	m/s	KA4; RETC
c_K	maximales Verhältnis der relativen hydraulischen Leitfähigkeiten benachbarter Schichten	-	SCHULLA 1997
n	van Genuchten-Parameter	-	RETC
α	van Genuchten-Parameter	1/m	RETC
layer	Anzahl der Schichten für die numerische Berechnung der Infiltration	-	frei
layer thick	Dicke der Schichten für die numerische Berechnung der Infiltration	m	frei
Θ_{res}	Restwassergehalt bei $k(\Theta) = 0$	m^3/m^3	RETC
Θ_{sat}	Wassergehalt bei Sättigung	m^3/m^3	RETC
max-ratio	$k_{o(rel)}/k_{u(rel)}$	-	SCHULLA 1997
k_{rec}	Abnahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe	-	SCHULLA 1997

Topographische Analyse

Mit dem Programm *Tanalis* kann eine umfangreiche topographische Analyse des digitalen Höhenmodells durchgeführt werden. Erzeugt werden unter anderem Datensätze für Gefälle, Exposition, Fliesszeiten und Fliesszeitsummen, Flusstiefen, Flussbreiten, Routingstrecken, die Einzugsgebiete und schließlich die Entwässerungsstruktur mit Gerinneparametern. Ein Teil der Berechnungen erfolgt auf physikalischem Weg über den Höhenvergleich benachbarter Rasterzellen und der daraus erfolgenden Berechnung von Gefälle, Exposition und anderen geographischen Kennzahlen (SCHULLA 1997). Durch Vergleiche mit GIS-Analysen und mit manuell erstellten Analysen zeigte sich, dass *Tanalis* für die Generierung der (natürlichen) Abflusswege, der Berechnung von Einzugsgebieten, Exposition und Gefälle sehr gut geeignet ist. Die Berechnung von Fliesszeiten, Flusstiefen und Flussbreiten erfolgt auf Basis der Formel von Manning und Strickler unter Vorgabe des Manning-Beiwertes und einer maximalen Abflussspende (SCHULLA 1997).

$$v = M * R_h^{2/3} * I^{1/2} \quad (2.4)$$

v	Fließgeschwindigkeit [m/s]
M	Manningbeiwert [$m^{1/3}/s$]
R_h	hydraulischer Radius [m]
I	Gefälle der Flusstrecke [m/m]

Die Fließformel nach Manning und Strickler wird häufig in der wasserbaulichen Praxis verwendet (DYCK U. PESCHKE 1995). Sie ist zwar stark empirisch, besitzt jedoch eine solide Datengrundlage für rauhe Gerinne. Mit Reynoldszahlen Re in der Regel über 50 000 liegen die untersuchten Fließgewässer nach den Untersuchungen von SCHWENDEL (2006) weit über dem kritischen Wert von $Re = 500$, der den Übergang vom laminaren zum turbulenten Fließen darstellt. Auch der zur Anwendung der Manning-Strickler-Formel zulässige Mindestwert von $Re = 4 \cdot 10^4$ (AHNERT 1996) wird überschritten. So sind die Voraussetzungen zur Anwendung von Gleichung 2.4 gegeben.

Da in *Tanalis* für das gesamte berechnete Einzugsgebiet nur ein Manningwert vorgegeben werden kann, sind Ungenauigkeiten unvermeidbar. Es hat sich als günstig erwiesen, im Gesamteinzugsgebiet den in der Literatur für Gebirgsbäche mit Schottern und Blöcken empfohlenen Wert von $M = 25 \text{ m}^{1/3}/s$ zu benutzen (z.B. DYCK U. PESCHKE 1995). Bei Messungen der Systemrauhigkeit in 34 gering bis mäßig veränderten 100 m langen Fließabschnitten im Mittel- und Oberlauf der Wilden Weißeritz und im Oberlauf der Roten Weißeritz ergaben sich Manningbeiwerte von im Mittel $18 \text{ m}^{1/3}/s$ mit einer sehr hohen Schwankungsbreite zwischen 3 und $63 \text{ m}^{1/3}/s$ (SCHWENDEL 2006). Gemittelt über das Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz - vor allem letztere weist auf weiten Strecken einen starken Verbau auch der Sohle auf (WEISS 2006) - zeigt sich, dass ein mittlerer Wert von $25 \text{ m}^{1/3}/s$ angemessen ist. So konnte beim Routing der einzelnen Teileinzugsgebiete festgestellt werden, dass die Fließzeiten zwischen den einzelnen Pegeln korrekt modelliert werden. Die Messungen weisen

allerdings auch darauf hin, dass vor allem im Oberlauf der Roten und Wilden Weißeritz und bei der Modellierung kleinerer Einzugsgebiete (bis etwa 15 km^2) bei dem Manningwert von $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ zu kurze Fließzeiten und dementsprechend zu breite Gerinne berechnet werden. Fließgeschwindigkeitsmessungen im Weißbach, einem Teileinzugsgebiet der Wilden Weißeritz, zeigten, dass *Tanalis* tatsächlich zu lange Fließzeiten berechnet. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die physikalische Berechnung der Fließgerinne natürliche Fließstrukturen wie Windungen, Aufspaltungen, Verklausungen, Makrophyten oder ähnliches kaum berücksichtigt werden. Diese Faktoren wiegen in kleineren Fließgewässern bzw. kleinen Einzugsgebieten schwerer als in großen. Nach mehreren Tests kann empfohlen werden, bei Einzelanalysen für solche Einzugsgebiete einen deutlich niedrigeren Manningwert, im Fall des Weißbaches beispielsweise $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ zu benutzen. Dadurch werden die natürlichen Fließstrukturen, die die Geschwindigkeit des Wassers vermindern, quasi mitberücksichtigt.

In Bezug auf die Spende sollte der Wert angegeben werden, der am Gebietsausgang Gültigkeit hat. Die dadurch entstehenden Ungenauigkeiten in Flussbreite und -tiefe durch zu hohen Werte für den Oberlauf des Gewässers müssen in Kauf genommen werden.

Ergeben sich wider Erwarten keine befriedigenden Ergebnisse, besteht die Möglichkeit, auf die in *Tanalis* berechneten Werte zu verzichten und WaSiM-ETH auf anderem Wege erstellte Grids zur Verfügung zu stellen.

2.2.2 Klimatologische und meteorologische Daten

Meteorologische Daten in Form von Stationswerten werden für den Modellantrieb benötigt. Das beinhaltet die Stations-Zeitreihen von Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck, relativer Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer möglichst vieler meteorologischer Stationen in einer der hydrologischen Problemstellung angepassten zeitlichen Auflösung. Die verwendeten Stationen sind in Tabelle A.3 dargestellt. Die Stationsdaten entstammen der sächsischen Klimadatenbank und wurden vom LfUG zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Datensätze wurden nach dem Kriterium Nähe zum Einzugsgebiet sowie Vollständigkeit und Qualität der Daten ausgewählt.

Für die Interpolation der Temperatur, der Luftfeuchte und des Dampfdrucks wurde die Höhenregression gewählt, da diese Daten eine starke Höhenabhängigkeit aufweisen. Die Interpolation der Globalstrahlung erfolgte durch eine Kombination von Höhenregression und IDW (inverse distance weighting) zu gleichen Teilen. Die Windgeschwindigkeiten wurden mit IDW interpoliert, da sie stärker vom Relief als von der Höhenlage abhängig sind. Da zu letzterer nur wenige Messwerte vorlagen und eine Interpolation aufgrund der kleinräumigen Differenziertheit im eigentlichen Sinne nicht möglich ist, muss hier von einem großen Fehler ausgegangen werden. Da die täglichen Sonnenscheindauern und die Globalstrahlung gegenseitig aus den jeweils anderen Daten berechnet werden können und von letzterer deutlich bessere Datensätze vorlagen, wurde nur die Globalstrahlung als externer Input in das Programm gegeben.

Die Niederschläge stellen einen der wichtigsten Eingangsparameter dar. Deshalb wird auf die Interpolation dieser im Folgenden genauer eingegangen. In dieser Arbeit wurden die Niederschlagswerte nach RICHTER (1995a) korrigiert und so in das Modell eingelesen. Das Modul [Niederschlagskorrektur] wurde ausgeschaltet. Auf die Güte der eingelesenen meteorologischen Werte reagiert das Modell sehr sensitiv. Deshalb wurde viel Wert darauf gelegt, die Verteilung der Daten über das Gebiet möglichst wirklichkeitsgetreu wiederzugeben. Dafür wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Interpolation von einer reinen Höhenregression bis zu IDW (inverse distance weighting) oder Thiessenpolygonen getestet. Die geeigneteste Interpolations-

methode für das Untersuchungsgebiet wurde durch Vergleich der modellierten Niederschlagsverteilung mit der durch GOLDBERG et al. (1998) berechneten mittleren Höhenregression der Niederschläge für das Osterzgebirge sowie den Messwerten ermittelt. Die Zunahme des Niederschlags mit der Höhe wird danach durch eine Gewichtung von der IDW gegenüber der alleinigen Höhenregression mit einem Anteil von 30 % gut erreicht. Allerdings kommt es in höheren Lagen tendenziell zu einer Überschätzung der Niederschläge. Zwar kann das Regressionsmodul Inversionen berücksichtigen, doch die veränderten Bedingungen in Kammlage können nicht vollständig befriedigend wiedergegeben werden. Die Überschätzung der Niederschläge ist weniger auf die Niederschlagskorrektur zurückzuführen, sondern mehr auf die wenigen verfügbaren Stationen in Kammlage. Da jedoch der Nebelniederschlag auf die gemessenen Niederschläge addiert werden muss (vgl. Abschnitt 2.1.1), ist anzunehmen, dass der Gesamtfehler im Tagesmittel relativ gering ist.

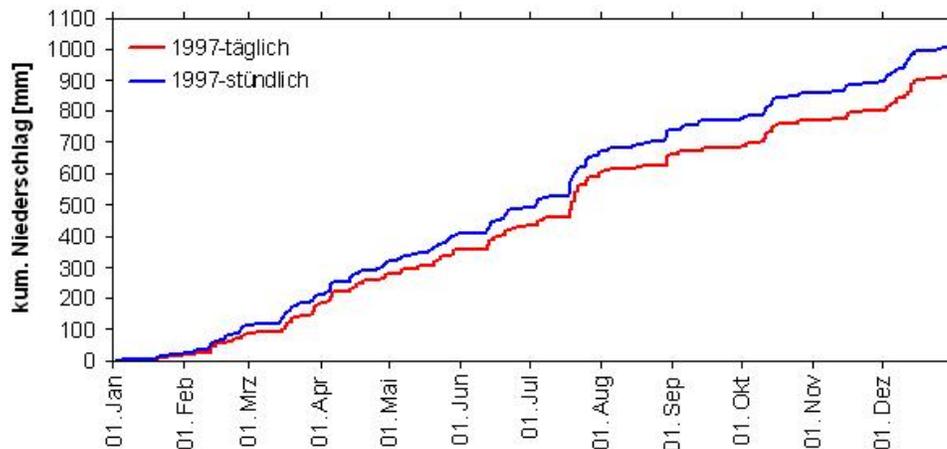


Abbildung 2.4: Vergleich der kumulierten Niederschläge täglicher und stündlicher Messwerte für das Gebietsmittel des Einzugsgebiets des Pegels Ammeldorf

Für die Modellierung des Ist-Zustandes wurden zwei zeitliche Auflösungen genutzt. Der Wasserhaushalt und Mittel- und Niedrigwässer wurden in einer Zeitschrittweite von einem Tag, Hochwasserereignisse in einer Zeitschrittweite von einer Stunde modelliert. Letzteres stellt einen Kompromiss zwischen wünschenswerten Zeitschrittweiten bei Hochwässern im Gebirge, den verfügbaren Daten und einer angemessenen Rechenzeit dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Niederschlagsdaten in täglicher Auflösung eine gute Qualität aufweisen. Die modellierten Gebietsmittel stimmen mit langjährigen Mitteln sowie ermittelten Höhengradienten gut überein. In Abbildung 2.4 ist am Beispiel des mittleren Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet des Pegels Ammeldorf zu sehen, dass die gemessenen Niederschläge in stündlicher und täglicher Auflösung deutliche Abweichungen zeigen. Dies ist auf die geringe Zahl und ungünstige Verteilung der höherauflösenden Niederschlagssammler im Gebiet zurückzuführen. Die stündlichen Werte stützen sich mit den sehr nahe beieinander gelegenen Stationen Tharandt (1997-2000), Wernersbach (1997-2000), Wildacker (1997-1999) und Grillenburg (1997, 2000) sowie Lugstein (2000) und Oberbärenburg/Rotherdbach (1997) in den Kammlagen strenggenommen nur auf zwei Ankerpunkte im Gebiet. So sind die Verteilungen der Nieder-

schläge lediglich entlang dieser Gerade erfasst und der Ausfall einer Station in Kammlage bringt größere Fehler mit sich. Das ermittelte Gebietsmittel für tägliche Daten weist eine deutlich höhere Robustheit auch gegenüber einzelnen Fehlwerten bei den Stationsdaten auf.

2.2.3 Hydrologische Daten

Pegel

Hydrologische Daten sind in erster Linie die Abflusszeitreihen als integrale Informationen für ganze Teileinzugsgebiete. Sie dienen der Kalibrierung und Validierung des Modells. Die Abflussspenden von den verschiedenen Messpegeln im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz wurden durch das LfUG zur Verfügung gestellt. An der Vereinigten Weißeritz ist der Pegel Cotta, an der Wilden Weißeritz sind die Pegelstationen Rehefeld 1, Ammeldorf, Lehmühle, Beerwalde und Hainsberg 3 und an der Roten Weißeritz die Pegel Schmiedeberg 1, Dippoldiswalde 1 (Hauptgerinne) und Dippoldiswalde 3 (Werkgraben) sowie Hainsberg 1 (Tabelle 2.6). Die Talsperrenpegel Lehmühle, Klingenberg und Malter sind nicht relevant, da für die Modellierung allein die Wildbettabgabe von Bedeutung ist. Sie wurde den handschriftlichen Pegelbögen und digitalen Aufzeichnungen der Talsperrenmeister entnommen. Zusätzlich zu den Daten in täglicher Auflösung liegen Pegeldaten von Rehefeld, Ammeldorf, Schmiedeberg und Dippoldiswalde in stündlicher Auflösung vor. Der Pegel Cotta ist sehr stark durch ein Wasserwerk beeinflusst, so dass er nicht zum Vergleich mit modellierten Werten herangezogen werden kann. Dies führte gemeinsam mit der Tatsache, dass der Flusslauf der Vereinigten Weißeritz in Dresden stark verändert wurde, dazu, dass lediglich die Einzugsgebiete von Roter und Wilder Weißeritz bis zu den Pegeln Hainsberg 1 und Hainsberg 3 modelliert wurden.

An der Roten Weißeritz sind die Pegel Schmiedeberg und Dippoldiswalde nicht vom Talsperrenbetrieb beeinflusst. Dem Trinkwasserspeicher Altenberg als „Quelle“ der Roten Weißeritz kann ein steuernder Einfluss zugeschrieben werden, doch ist dieser bereits beim Pegel Schmiedeberg kaum identifizierbar. Die Wildwasserabgabe des Trinkwasserspeichers entspricht etwa dem Zufluss zu den Teichen bzw. aus dem Einzugsgebiet der Galgenteiche. Der Pegel Hainsberg 1 liegt am Zusammenfluss der Roten und Wilden Weißeritz und gibt somit eine Information über den Gesamtabfluss der Roten Weißeritz. Die Ganglinie dieses Pegels ist stark von der Wildwasserabgabe der Talsperre Malter beeinflusst.

Der Pegel Rehefeld befindet sich hinter dem Zusammenfluss von Großem Warmbach und der Wilden Weißeritz aus der Tschechischen Republik. Beide Bäche führen an ihrem Zusammenfluss etwa gleich viel Wasser und haben ihre Einzugsgebiete in weiten Teilen in vermoorten Gebieten. In seinem Unterlauf befindet sich der Pegel Ammeldorf. Er liegt kurz oberhalb der Talsperre Lehmühle. Da die Pegelstation Beerwalde zwischen den beiden Talsperren liegt und nur ein sehr kleines natürliches Einzugsgebiet aufweist, ist er sehr stark von der Wildwasserabgabe der Talsperre Lehmühle beeinflusst. Eine Analyse der Ganglinie bzw. eine Kalibrierung an diesem Pegel ist deshalb nicht sinnvoll. Pegel Hainsberg 3 befindet sich am Zusammenfluss der beiden Weißeritzen und gibt so Information über den gesamten Abfluss aus dem Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz. Dieser Pegel weist durch sein deutlich größeres Einzugsgebiet unterhalb der Talsperre Klingenberg einen weniger von der Wildwasserabgabe beeinflussten Ganglinienverlauf als Hainsberg 1 auf.

Die Pegel am Pöbelbach, Reichstädter Bach und den Talsperren werden von der Landes-talsperrenverwaltung Sachsen (LTV) verwaltet und sind nicht immer von gleichbleibender

Qualität. So hat sich gezeigt, dass vor allem der Pegel am Reichstädter Bach schnell verschlammte und die Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen dann keine Gültigkeit mehr haben. Da genügend andere Pegel guter Qualität vorlagen, wurden diese nach gründlicher Prüfung mit Hilfe der Arbeit von HAGEDORN (2003) nicht mehr für die Kalibrierung verwendet.

Tabelle 2.6: Für die Modellierung genutzte Pegelstationen im Einzugsgebiet, WW: Wilde Weißeritz, RW: Rote Weißeritz (nach LfUG 2002a)

Name (Fluss)	Hochwert Rechtswert	Höhe [m ü. NN]	Einzugsgebiet [km ²]	Beobachtungsbeginn (Fehljahre)
Rehefeld 1 (WW)	5622180 5408430	684,9	15,3	1961
Ammelsdorf (WW)	5630650 5402070	527,3	49,3	1931 (1944-45, 1963)
Beerwalde (WW)	5639380 5399110	396,4	80,9	1915 (1944-45, 1955, 1958-59, 1963-65)
Hainsberg 3 (WW)	5650280 5402920	190,5	162	1928 (1944-45, 1963)
Schmiedeberg 1 (RW)	5634380 5406830	429,6	47,8	1983
Dippoldiswalde 1+3 (RW)	5640750 5406140	340,3	72,9	1915 (1944-45, 1954-64)
Hainsberg 1 (RW)	5649360 5403150	197,1	153	1928 (1944-45)
Reichstädt (Reichstädter Bach, RW)	5639975 5404825	360,8	13,2	1982

Die Qualität der Daten, die vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) bzw. von der Umweltbetriebsgesellschaft (UBG) verwaltet werden, ist in der Regel gut. Die Ganglinien wurden einer Plausibilitätsanalyse unterzogen und der Verlauf ist in der Regel homogen. Trotzdem finden sich immer wieder Inkonsistenzen, die in Abbildung 2.5 beispielhaft dargestellt sind. GRÜNEWALD (2005) weist zudem teilweise sehr hohe Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Abflussmessungen beim Hochwasser im August 2002 nach. Inkonsistenzen dieser Art können im vorliegenden Fall nicht auf eine Hysterese in Folge der ablaufenden Hochwasserwelle zurückgeführt werden, da die Translationszeiten deutlich unter einem Tag liegen. Eher ist die Ursache in der räumlichen Verteilung der (Stark-)Niederschläge zu suchen, allerdings ist das im Untersuchungsgebiet aufgrund der räumlichen Muster der Niederschläge (EISOLD 2002; GOLDBERG et al. 1998) eher unwahrscheinlich. Zudem treten die meisten Inkonsistenzen im Mittel- und Niedrigwasserbereich von September bis Dezember auf. Weitere Ursachen könnten in Bodenwasserspeichern oder Grundwasserzufuhr zu suchen sein, sind aber vermutlich aufgrund der Gebietsstruktur - geringe Bodenmächtigkeiten und geringe Brunnenergiebigkeit - nur Nebeneffekte. Die Hauptursache für die Inkonsistenzen ist also wahrscheinlich im Pegelbetrieb zu suchen: Hier wurden offensichtlich die Abflussspitzen entweder nicht korrekt erfasst oder nicht korrekt aus der Wasserstands-Durchflussbeziehung hergeleitet. Die Pegelwerte, besonders Hochwasserdurchflüsse mit hohen Wiederkehrzeiten,

müssen deshalb überprüft werden.

Während die Pegelstände bzw. Durchflüsse vor 1990 teilweise nur auf 100 Liter (Pegel Schmiedeberg) genau aufgezeichnet wurden, liegen sie ab Beginn automatischer Aufzeichnungen, die im Einzugsgebiet kurz nach der politischen Wende eingeführt wurden, mit einer Genauigkeit von einem Liter vor. So ergeben sich besonders im Niedrigwasserbereich in den Jahrzehnten vor 1990 Plateaus, die nicht dem natürlichen Abflussverlauf entsprechen. Zudem wurde vor allem in den Sommermonaten in den vergangenen Jahrzehnten häufig Flusswasser zur Bewässerung genutzt, so dass der Wasserspiegel teilweise sehr plötzlich absacken kann. Diese Phänomene sind heute teilweise nicht mehr nachvollziehbar bzw. korrigierbar und müssen bei der Analyse der Ganglinien und beim Vergleich gemessener und modellierter Abflüsse Berücksichtigung finden.

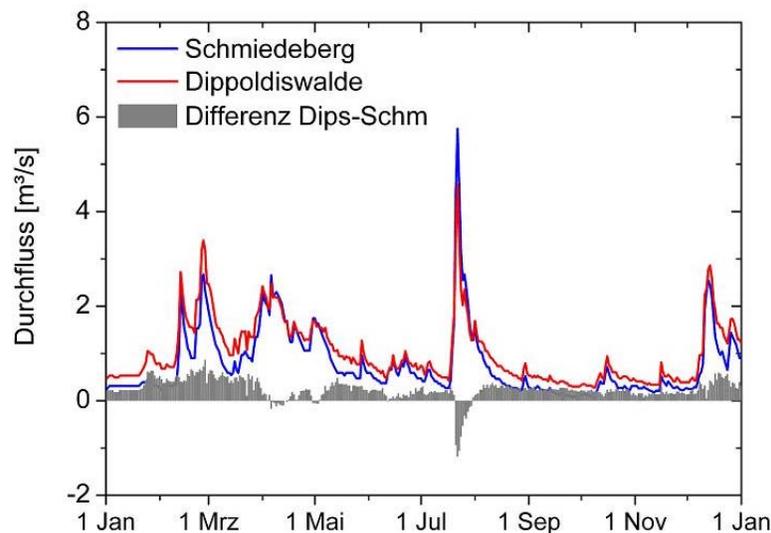


Abbildung 2.5: Ganglinienvergleich der Pegel Schmiedeberg (Schm) und Dippoldiswalde (Dips) 1997 (Daten: LfUG Sachsen)

Talsperren

Eine Besonderheit für die Modellierung ist die Integration der im Gebiet vorhandenen Talsperren Lehmühle, Klingenberg und Malter. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Tatsache von Bedeutung, dass es im Raum Erzgebirge, aber auch in vielen anderen mitteleuropäischen Gebirgen, kaum vom Menschen nicht beeinflusste Einzugsgebiete gibt. Für die Analyse des Ist-Zustands wurde aufgrund der Tatsache, dass keine lineare Regel für Speicherabgaben existiert, das Verfahren gewählt, die Wildwasserabgaben als externen Zufluss in das Flusssystem zu modellieren. Das Einzugsgebiet der Talsperren wird dabei „abgeschnitten“ so dass lediglich im restlichen Teil des Einzugsgebiets Abfluss generiert wird.

Daneben gibt es die Möglichkeit, Speicherabgaberegeln vorzugeben, auf die aber im vorliegenden Fall nicht zurückgegriffen wird, da die Speicherabgaberegeln im Einzugsgebiet teilweise

auf persönlicher Einschätzung der Talsperrenmeister beruhen und deshalb nur ungenügend über starre Regeln erfasst werden können.

2.3 Ergebnisse und Diskussion

2.3.1 Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung erfolgte für die Jahre 1984 und 1994, die Validierung mit den Jahren 1980-2000 für die Rote Weißeritz und 1971-2000 für die Wilde Weißeritz. Im Vergleich der Ergebnisse in den verschiedenen betrachteten Einzugsgebiete lässt sich die Übertragbarkeit des kalibrierten Modells zwischen Regionen, die dieselben meteorologischen Daten als Grundlage nutzen, testen. Dadurch wird ausgeschlossen, dass die Übertragbarkeit allein von der Güte dieser sehr sensitiven Daten abhängt. Auch die Qualität der anderen Eingangsdaten weist dadurch, dass sie ausnahmslos denselben Quellen entstammen, keine signifikanten Unterschiede auf. Dadurch sollten theoretisch in der Kalibrierung nur tatsächliche Unterschiede im Gelände eine Rolle spielen. Daneben wurde eine Simulation der Abflüsse im Einzugsgebiet der Zschopau im Mittleren Erzgebirge durchgeführt, um die Übertragbarkeit auf ein geologisch, morphologisch und klimatisch ähnliches Gebiet zu testen.

Vergleich von *wasim 1* und *wasim 2*

Die Modellierungen mit dem konzeptionellen Ansatz (*wasim 1*) zeigen gute bis sehr gute Ergebnisse in den Einzugsgebieten der Roten und Wilden Weißeritz und den Einzugsgebieten der Zschopau (Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7). Die errechneten Gütwerte liegen im Mittel bei 0,85 für alle Nash-Sutcliffe Gütemaße, dabei sind die Gütemaße beim Reichstädter Bach im unteren Bereich, die im Einzugsgebiet der Zschopau im oberen Bereich (bis 0,97) zu finden (siehe auch PÖHLER 2006).

Bereits der große Unterschied der Parametersätze zwischen hintereinanderliegenden Pegeln wie beispielsweise Rehefeld und Ammeldorf oder Schmiedeberg und Dippoldiswalde, dargestellt in Tabelle 2.7, zeigt, dass die ermittelten Parametersätze nicht innerhalb eines Einzugsgebiets übertragbar sind. Auch benachbarte Einzugsgebieten der Roten und Wilden Weißeritz weisen keine wechselseitige Übertragbarkeit der Parameter auf und dementsprechend auch nicht die Einzugsgebiete der Weißeritz und der Zschopau. Zudem kann mit deutlich verschiedenen Parametersätzen für einen gewählten Zeitraum das gleiche Ergebnis erreicht werden und ein für 1991 bis 2000 kalibrierter und validierter Parametersatz ist im gleichen Einzugsgebiet nicht auf 1980 bis 1990 übertragbar. Neben diesen Phänomenen bei der Parametrisierung zeigt sich, dass zwar der Gesamtabfluss, nicht aber die Abflusskomponenten im Modell korrekt dargestellt werden. Sie können also nicht in die Auswertung miteinbezogen werden. So ist bei diesem Modellansatz keine Übertragbarkeit oder Prognosefähigkeit in Bezug auf künftige Klimate oder Landnutzungsarten und in Bezug auf die einzelnen Abflusskomponenten gegeben, was ihn für den Zweck dieser Arbeit disqualifiziert. Soll aber je nach Zielstellung lediglich der Gesamtabfluss gut wiedergegeben werden, ist dem künftigen Nutzer mit *wasim 1* ein Werkzeug an die Hand gegeben, mit dem - bei hohem Kalibrierungsaufwand und nur in wenigen Fällen physikalisch nachvollziehbaren freien Parametern - sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

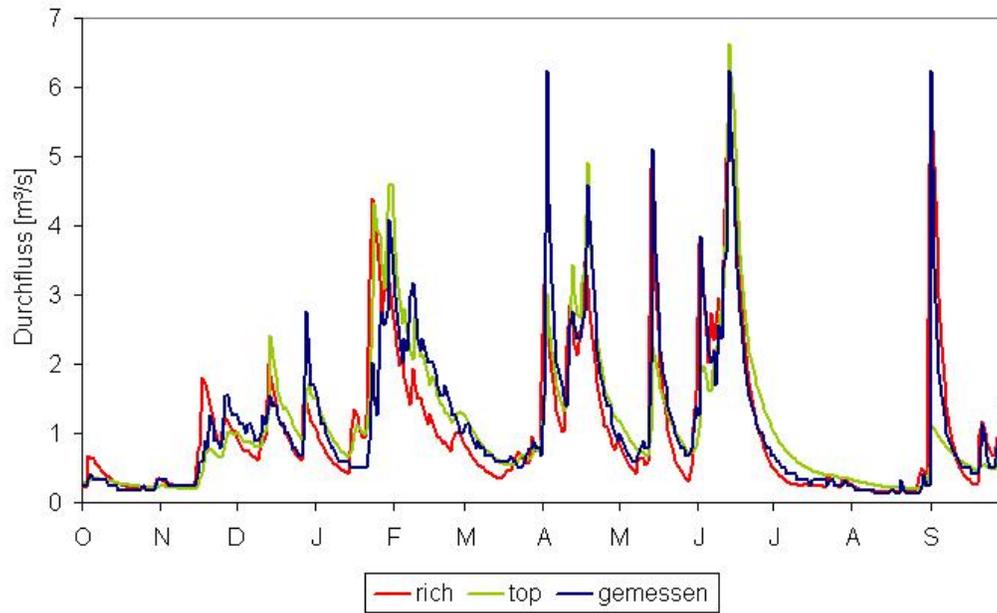


Abbildung 2.6: Vergleich der Modellierungsergebnisse mit *wasim 1* und *wasim 2*, Pegel Ammeldorf 1995. top = Anwendung von *wasim 1*, rich = *wasim 2*.

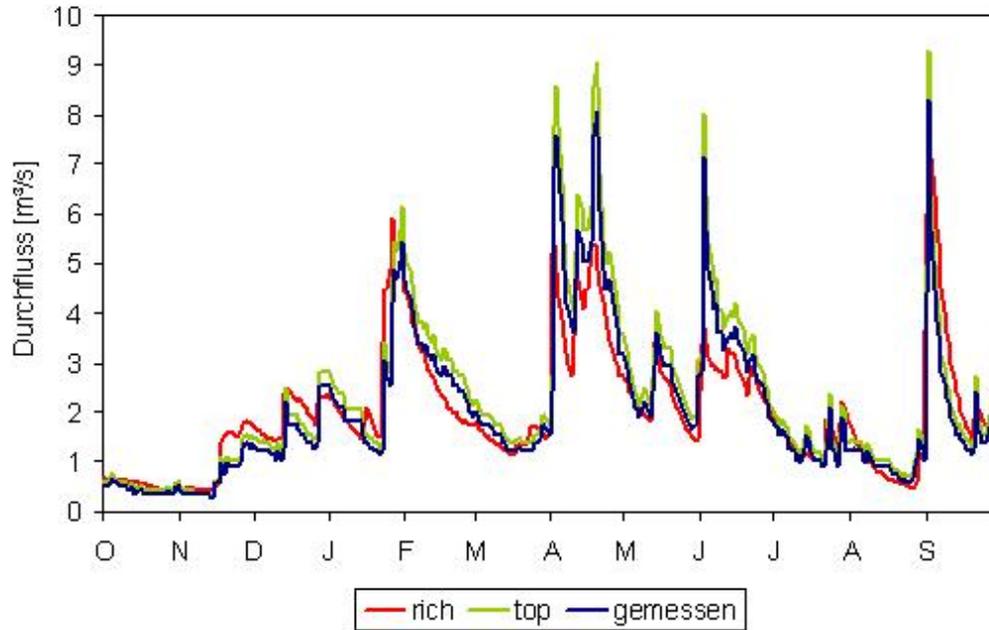


Abbildung 2.7: Vergleich der Modellierungsergebnisse mit *wasim 1* und *wasim 2*, Pegel Wiesa 1995. top = Anwendung von *wasim 1*, rich = *wasim 2*.

Tabelle 2.7: ermittelte Bodenparameter für *wasim 1*. RW: Rote Weißeritz, WW: Wilde Weißeritz, Z: Zschopau, P: Pöhlbach, Pr: Preßnitz, S: Sehma. Der Pegel Reichstädt bemisst einen Zufluss (Reichstädter Bach) in die Talsperre Malter / Rote Weißeritz

Pegel	m	T_{korr}	K_{korr}	k_d	SH_{max}	k_h	P_{Grenz}	r	QD_{Schnee}
KOMISCHKE 2005									
Rehefeld (WW)	0,0045	1,7	1000	100	75	390	6	0,1	0,1
Ammelsdorf (WW)	0,034	1,4	1000	130	75	550	2	0,05	0,38
Hainsberg 3 (WW)	0,0055	2,0	1000	190	45	1615	3	0,6	0,2
Schmiedeberg (RW)	0,0075	1,8	1000	190	50	875	1	0,07	0,1
Dippoldiswalde (RW)	0,0142	1,4	1000	320	40	1220	5	0,56	0,1
Hainsberg 1 (RW)	0,007	2,0	1000	425	10	720	1	0,16	0,2
kalibrierte Parameter									
Rehefeld (WW)	0,022	1,9	1000	250	35	340	5	0,25	0,5
Ammelsdorf (WW)	0,02	2,0	1000	300	20	720	5	0,9	0,1
Hainsberg 3 (WW)	0,015	2,0	1000	400	50	720	7	0,25	0,5
Schmiedeberg (RW)	0,015	1,8	1000	250	25	240	3	0,5	0,1
Dippoldiswalde (RW)	0,01	1,8	1000	250	10	340	5	0,25	0,3
Hainsberg 1 (RW)	0,015	1,8	1000	100	50	340	5	0,25	0,5
SCHRAMM 2003									
Rehefeld (WW)	0,021	2	40	24	30	96	1	0	0,3
Ammelsdorf (WW)	0,027	0,2	100	24	40	96	0,9	0	0,3
Hainsberg 3 (WW)	0,038	0,02	50	70	35	350	5	0	0,15
HAGEDORN 2003									
Reichstädt	0,022	1,8	1000	13	35	340	5	0,25	0,5
BERGER 2005									
Annaberg (S)	0,035	1,0	1000	20	60	200	5	0,5	0,1
Tannenberg (Z)	0,035	0,9	1000	30	60	250	5	0,5	0,1
Wiesa (P)	0,037	1,0	1000	35	80	250	5	0,5	0,1
Streckewalde (Pr)	0,035	1,0	1000	30	80	200	5	0,5	0,2
Hopfgarten (Z)	0,03	1,5	1000	30	80	250	5	0,5	0,2

Die ermittelten Parametersätze für *wasim 2* sind in Tabelle 2.7 dargelegt. Sie zeigen deutlich größere Ähnlichkeiten, wie es bei einem Ansatz, der auf physikalischen Gleichungen beruht, auch zu erwarten ist. Trotzdem treten Unterschiede in den kalibrierten Parametern auf, die jedoch in diesem Fall aus dem Gebiet heraus erklärbar sind. So sind die Abweichungen beim Pegel Rehefeld dahingehend zu interpretieren, das sich sein Einzugsgebiet durch den hohen Anteil an Mooren und vernässten Flächen strukturell im Sinne von Hydrotopen deutlich von den anderen unterscheidet. Durch das höhere Q_0 wird vor allem der Speicherwirkung letzterer Rechnung getragen. Der kleinere k_d bei Schmiedeberg ist darin begründet, dass die Quelle der Roten Weißeritz in die Galgenteiche gelegt wurde. Auch bei der Parametrisierung der im Mittleren Erzgebirge gelegenen Pegel zeigt sich große Ähnlichkeit, aber nicht vollständige Übertragbarkeit zu den Einzugsgebieten im Osterzgebirge. Die Modellierungsgüten der Roten und Wilden Weißeritz sind auf den folgenden Seiten dargelegt, die Güte der Modellierung der Einzugsgebiete Zschopau, Pöhlbach, Preßnitz und Sehma beträgt im langjährigen Mittel (1991-2000) 0,73 für $\ln R^2$, 0,69 für $\log R^2$, 0,74 für $\ln EV$ und für $\log EV$ 0,71.

Tabelle 2.8: ermittelte Bodenparameter für *wasim 2*. RW: Rote Weißeritz, WW: Wilde Weißeritz, Z: Zschopau, P: Pöhlbach, Pr: Preßnitz, S: Sehma

Pegel	k_d	k_i	d_r	k	Q_0
	kalibrierte Parameter				
Rehefeld (WW)	100	100	3	3	15
Ammelsdorf (WW)	120	120	5	3	5
Hainsberg 3 (WW)	120	120	5	3	5
Schmiedeberg (RW)	96	120	5	3	10
Dippoldiswalde (RW)	120	120	5	3	10
Hainsberg 1 (RW)	120	120	5	3	5
Annaberg (S)	120	240	5	3	5
Tannenberg (Z)	120	240	10	1	3
Wiesa (P)	120	240	5	1	1
Streckewalde (Pr)	120	120	3	1	1
Hopfgarten (Z)	120	120	5	1	1

Obwohl der Ansatz auf der physikalisch begründeten Richards-Gleichung beruht, muss man durch die Struktur von WaSiM-ETH von einer gewissen „Konzeptionalisierung“ dieses Ansatzes sprechen. Einerseits über die Van-Genuchten-Parameter, auf der anderen Seite aber über die Aggregation der Böden in horizontaler Hinsicht zu Rasterzellen und in vertikaler Hinsicht zu einer homogenen Bodensäule finden Vereinfachungen statt, die sich teilweise in Parametern wiederfinden, die nicht mehr ausschließlich aufgrund physikalischer Logik angepasst werden können. Trotzdem zeigen die hohen Ähnlichkeiten und die schlüssigen Begründungen für abweichende Parametrisierung, dass der konzeptionelle Charakter dieses Bodenwasserhaushaltsmoduls weit weniger ausgeprägt ist als bei *wasim 1*.

Aufgrund der besseren physikalischen Nachvollziehbarkeit und Übertragbarkeit wird für die Bildung von Szenarien und Übertragbarkeitsanalysen *wasim 2* genutzt.

Rote Weißeritz

An der Roten Weißeritz befinden sich die Pegel Schmiedeberg, Dippoldiswalde und Hainsberg 1 (Tabelle 2.6). In den Abbildungen 2.8 und 2.10 sind jeweils die Ergebnisse der Kalibrierung in Tagesschritten für die Pegel Dippoldiswalde und Hainsberg 1 dargestellt. Da die Abflussganglinien an den Pegeln Dippoldiswalde und Schmiedeberg sowie die Ergebnisse der Modellierung sehr ähnlich sind, repräsentiert hier der Pegel Dippoldiswalde die Modellierung an beiden Standorten. Die Abbildungen 2.9 und 2.11 sowie Tabelle 2.9 zeigen wegen der Übersichtlichkeit nur die Ergebnisse der Validierung von 1991 bis 2000. Die Ergebnisse von 1980-1990 bewegen sich im selben Rahmen. Die als Beispiele in der Validierung gewählten Jahre 1995 und 1998 weisen deutlich verschiedener Jahresverläufe auf, so dass hier das Verhalten des Modells in Nassjahren sowie in einem relativ trockenem Sommer zu beobachten ist.

Die in Tabelle 2.9 gelisteten Gütemaße gelten für die Wasserhaushalts- bzw. Niederschlags-Abfluss-Modellierung in Tagesschrittweite. Während die mittleren absoluten Abweichungen (MAE) bedingt durch die ihnen innewohnende Überbewertung von Ausreißern (Abschnitt 1.2.4) relativ schlechte Werte zeigen, weisen die Gütemaße nach NASH U. SUTCLIFFE (1970) im Mittel gute Werte auf. Im Vergleich der linearen mit den logarithmierten Gütemaßen ist nicht zu erkennen, dass systematisch die Modellierung von Hochwässern (lineares R^2) oder von Mittel- und Niedrigwasser (logarithmiertes R^2) besser gelingt, obwohl bei der Kalibrierung der Schwerpunkt auf eine korrekte Modellierung des Wasserhaushalts und nicht einzelner Hochwasserereignisse gelegt wurde. Variationen zwischen linearen und logarithmierten Maßen scheinen mehr in der Verteilung des Abflusses begründet zu sein, d.h. ob im betreffenden Jahren Schneeschmelzhochwasser oder sommerliche Hochwässer dominieren. Letztere wurden durch das Modell in der Regel weit besser abgebildet.

Tabelle 2.9: Validierung des Modells *wasim 2* an den Pegeln Dippoldiswalde und Hainsberg 1 an der Roten Weißeritz. MAE: Mittlerer absoluter Fehler, R^2 und EV: Bestimmtheitsmaß und erklärte Varianz nach NASH, SUTCLIFFE (1970)

Pegel	Jahr	MAE	R^2	$\log R^2$	EV	$\log EV$
Schmiedeberg	1991	0,22	0,65	0,40	0,67	0,66
	1992	0,30	0,53	0,73	0,55	0,73
	1993	0,29	0,50	0,53	0,50	0,56
	1994	0,23	0,67	0,79	0,72	0,81
	1995	0,39	0,71	0,77	0,74	0,79
	1996	0,30	0,45	0,36	0,48	0,36
	1997	0,37	0,30	0,50	0,51	0,75
	1998	0,44	0,52	0,46	0,61	0,71
	1999	0,23	0,76	0,76	0,76	0,77
	2000	0,26	0,76	0,78	0,76	0,85
Dippoldiswalde	1991	0,42	0,32	0,39	0,53	0,76
	1992	0,33	0,72	0,86	0,74	0,88
	1993	0,44	0,58	0,52	0,61	0,63
	1994	0,34	0,32	0,39	0,53	0,76
	1995	0,46	0,73	0,78	0,73	0,80
	1996	0,48	0,49	0,31	0,60	0,41
	1997	0,33	0,48	0,13	0,69	0,68
	1998	0,38	0,73	0,53	0,74	0,64
	1999	0,37	0,74	0,73	0,74	0,73
	2000	0,42	0,83	0,76	0,84	0,86
Hainsberg 1	1991	0,36	0,47	0,67	0,50	0,70
	1992	0,37	0,91	0,77	0,91	0,80
	1993	0,40	0,79	0,75	0,79	0,75
	1994	0,41	0,83	0,80	0,84	0,81
	1995	0,98	0,63	0,47	0,63	0,53
	1996	0,54	0,70	0,18	0,84	0,62
	1997	0,47	0,63	0,67	0,65	0,68
	1998	0,68	0,80	0,73	0,87	0,68
	1999	0,54	0,84	0,80	0,89	0,89
	2000	0,43	0,96	0,90	0,97	0,90

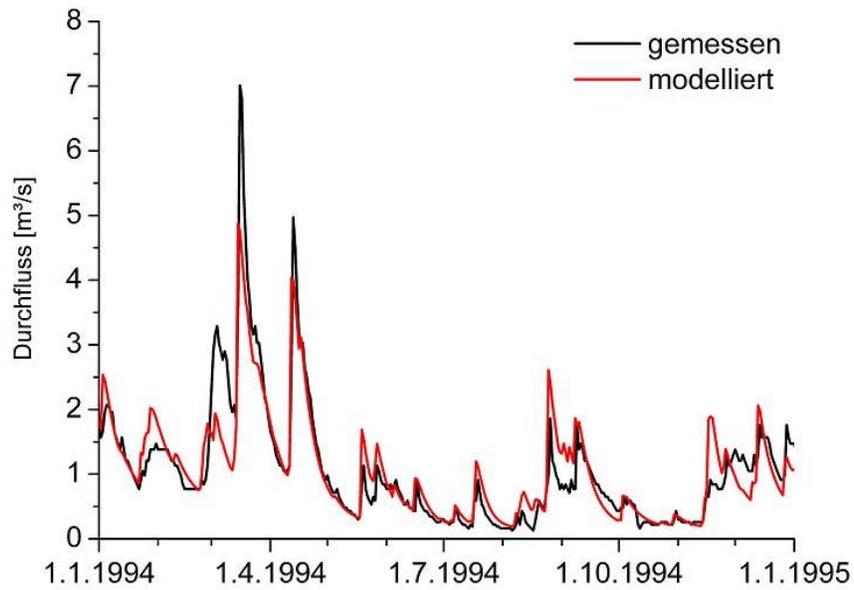


Abbildung 2.8: Kalibrierung des Pegels Dippoldiswalde für das Jahr 1994

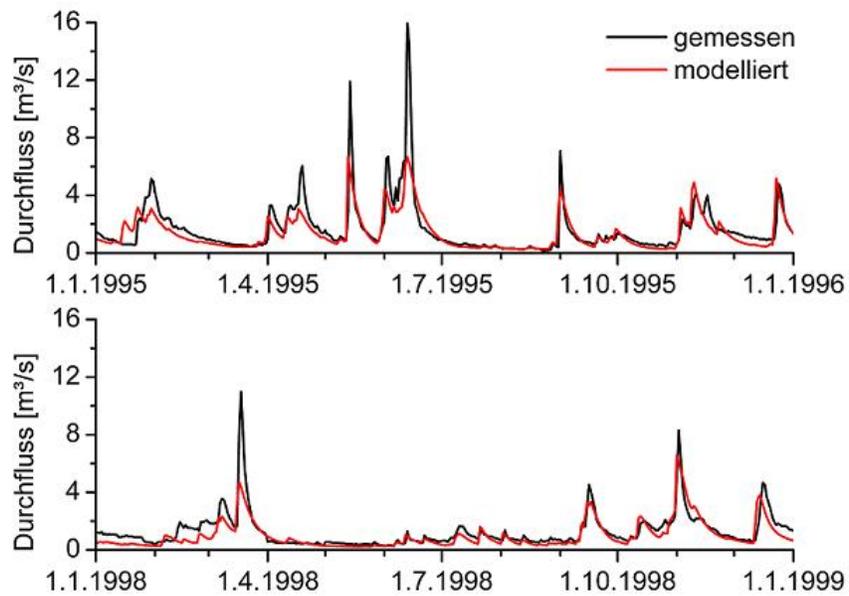


Abbildung 2.9: Validierung des Pegels Dippoldiswalde, hier die Ergebnisse in den Jahren 1995 und 1998

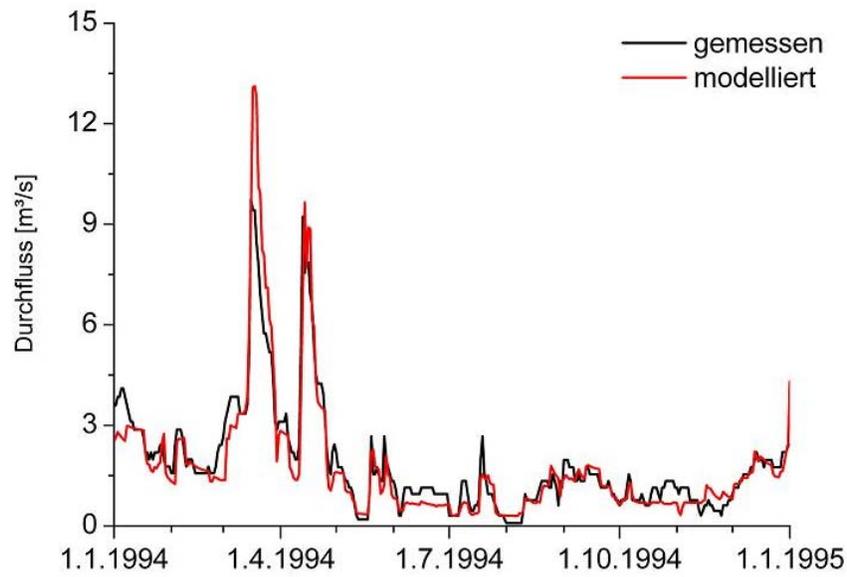


Abbildung 2.10: Kalibrierung des Pegels Hainsberg 1 für das Jahr 1994

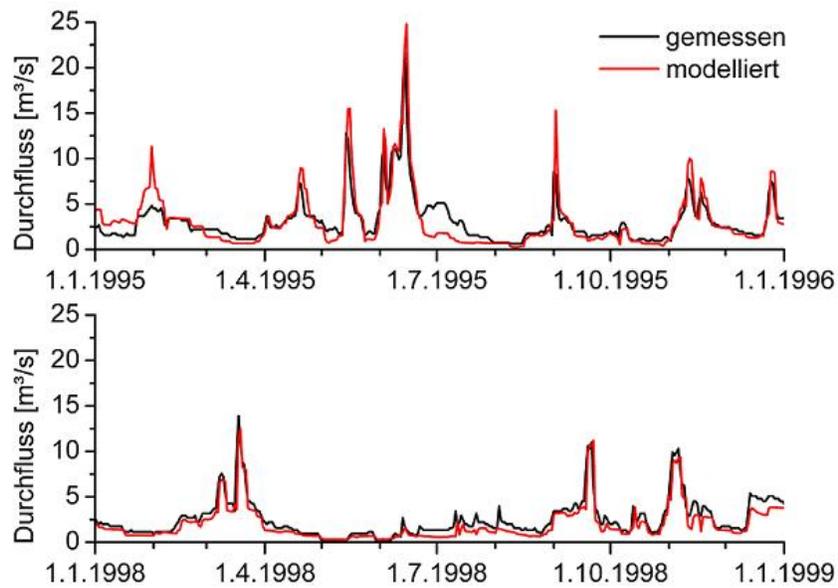


Abbildung 2.11: Validierung des Pegels Hainsberg 1, hier die Ergebnisse in den Jahren 1995 und 1998

Hochwassermodellierungen sind in einem gewählten Zeitschritt von einem Tag nicht sinnvoll. Ein Beispiel für Modellierungen von Hochwässern im Stundenintervall ist in Abbildung 2.12 abgebildet. Die Modellierung konnte nur für die Jahre 1998, 1999 und 2000 durchgeführt werden, da lediglich für diese Zeiträume genügend Eingangsdaten vorliegen. Obwohl die Niederschlagsreihen 1997 die beste Güte vorweisen, musste auf die Modellierung dieses Jahres verzichtet werden, da die gemessenen Pegelstände große Lücken aufweisen. Zudem wurde die Modellierung auf das Sommerhalbjahr beschränkt, da die stündlichen Klimadaten, insbesondere der Niederschlag, im Winter mit zu großen Fehlern behaftet sind (siehe Abschnitt 2.2.2). Trotzdem zeigt sich an dem gewählten Beispiel, dass die Übereinstimmung von gemessener und modellierter Ganglinie nicht befriedigend ist. Der Fehler ist in diesem Fall bei den verfügbaren Niederschlagsdaten zu suchen. Da 1998 wie auch 1999 nur stündliche Messungen der Stationen Tharandt, Wildacker und Wernersbach vorhanden sind, können lokale Niederschläge in den oberen Lagen nur unzureichend erfasst werden. Trotzdem liegen die Nash-Sutcliffe-Gütemaße mit 0,78 für $\ln R^2$ und $\ln EV$ und 0,59 bzw. 0,60 für $\log R^2$ und $\log EV$ für das Jahr 1998 relativ hoch. Die Modellierung von diesem Jahr, beschränkt vor allem auf den Zeitraum August und September, kann für Prognoserechnungen genutzt werden. Im Jahr 2000, das bis auf das Frühjahrshochwasser durch eine ganzjährig sehr gleichmäßige Abflussganglinie im Niedrigwasser ausgezeichnet ist, entspricht die modellierte Abflussganglinie sehr gut der gemessenen täglichen Ganglinie, während die gemessene stündliche Ganglinie deutlich geringere Abflüsse aufweist. Da Abflussmessungen in verschiedenen Zeitintervallen bei Hochwasser sehr unterschiedliche Verläufe zeigen können, dies im Niedrigwasserbereich aber in der Regel nicht der Fall sein sollte, ist der Fehler wahrscheinlich in der Messung bzw. der Aufzeichnung der Pegelganglinie zu suchen, so dass auch dieses Jahr, insbesondere aufgrund der im Vergleich geringen Fehler in der Niederschlagsmessung (Abschnitt 2.2.2), zusätzlich für weitere Modellierungen genutzt werden kann.

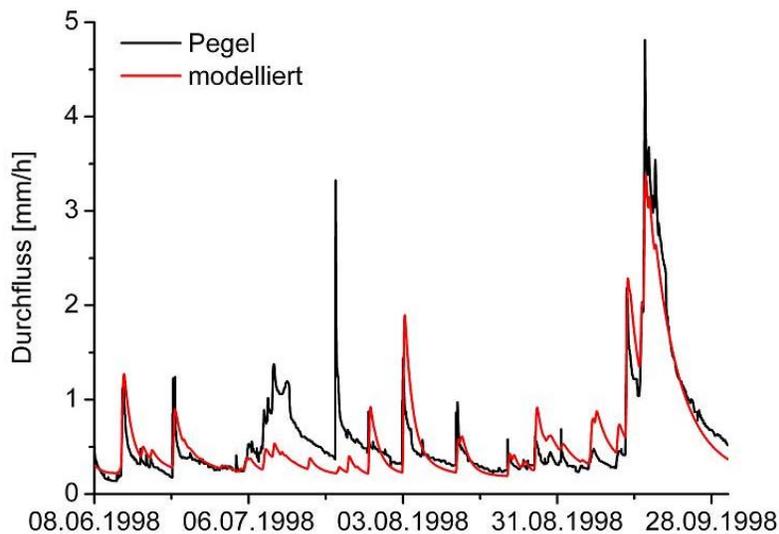


Abbildung 2.12: Modellierung in Stundenschritten am Pegel Dippoldiswalde

Wilde Weißeritz

An der Wilden Weißeritz befinden sich die Pegel Rehefeld, Ammeldorf, Beerwalde und Hainsberg 3 (Tabelle 2.6). Der Pegel Beerwalde wird im Folgenden nicht berücksichtigt, da der Einfluss der Talsperre Lehmühle so groß ist, dass Einflüsse durch das restliche Einzugsgebiet bzw. die Modellierung im Ganglinienverlauf nicht klar unterscheidbar sind.

Die Abbildungen 2.13 und 2.15 zeigen die Kalibrierung, die Abbildungen 2.14 und 2.16 sowie Tabelle 2.10 die Validierung der beiden Pegel. Beispieljahre sind wie bei den Pegeln an der Roten Weißeritz 1995 und 1998. Die Güterwerte nach Nash-Sutcliffe betragen im Mittel für den gesamten Zeitraum von 1971-2000 $\text{lin } R^2 = 0,57$, $\text{log } R^2 = 0,58$, $\text{lin EV} = 0,59$ und $\text{log EV} = 0,63$.

Am Beispiel Ammeldorf zeigt sich, dass die Kalibrierung, obwohl sie in Abbildung 2.13 nicht sehr gut gelungen scheint, doch zu guten Ergebnissen in der Validierung führt. Die deutlichen Schwächen der Abflussmodellierung bei Schneeschmelze sind, wie bereits bei der Kalibrierung des Abflusses der Roten Weißeritz erwähnt, auf das konzeptionelle Schneemodul (Temperatur-Index-Verfahren) zurückzuführen. Hinzu kommt in diesem Fall, dass im oberen Einzugsgebiet die vorkommenden Hoch- und Nieder- sowie Hangmoore und die weitläufig vernässten Stellen nicht einfach zu parametrisieren sind. So kommen zu gelegentlichen Wasserentnahmen durch die landwirtschaftlichen Betriebe Zehrungen in den Mooren und vernässten Flächen, die durch das Modell nicht korrekt wiedergegeben werden können. Der Hauptteil der Abflüsse dieser Gebiete wird am Pegel Rehefeld zusammengefasst. Der Pegel Rehefeld weist dadurch durchweg schlechtere Güten in der Modellierung auf als alle anderen untersuchten Pegel im Einzugsgebiet. Die Abweichungen, die die Modellierung am Pegel Rehefeld zeigt, werden jedoch zu einem großen Teil durch den hinzukommenden Abfluss im gesamten Einzugsgebiet Ammeldorf relativiert, so dass ungenügende Wiedergaben von Abflüssen beispielsweise im September 1994 nicht mehr eindeutig diesen Schwächen zugeordnet werden können. Die parallele Überschätzung des Abflusses im gleichen Zeitraum am Pegel Dippoldiswalde lässt eher vermuten, dass ein modellinternes Problem auftritt, das offensichtlich in anderen Jahren im Validierungszeitraum keinen Einfluss auf die Modellierung von Abflussspitzen im Sommerhalbjahr hat. Es lässt sich aber keiner Einzelursache zuordnen. Anzunehmen ist eine Kombination aus kleinen Fehlern in der Berechnung von Verdunstung und Füllung der Bodenspeicher bzw. Infiltration, die sich zu der Abweichung in Abbildung 2.8 und 2.13 summieren.

Pegel Hainsberg 3 zeigt in der Modellierungsgüte eine sehr hohe Variabilität. Besonders 1993, 1996 und 1997 sind durch schlechte Gütemaße gekennzeichnet. In diesen drei Jahren ist im Gegensatz zu allen anderen die Schneeschmelze sehr schlecht wiedergegeben, während die Ganglinie zu schneefreien Zeiten gut nachgebildet ist. Wenn die Wildwasserabgaben korrekt aufgezeichnet wurden, ist zu vermuten, dass der Fehler wie bei den Pegeln im Oberlauf im Schneemodell zu suchen ist. Wie an der Roten Weißeritz zeigt sich also auch hier, dass das Modell in Bezug auf die Abbildung der Schneeschmelze Verbesserungsbedarf hat.

Tabelle 2.10: Validierung des Modells an den Pegeln Ammeldorf und Hainsberg 3 an der Wilden Weißeritz

Pegel	Jahr	MAE	R^2	$\log R^2$	EV	$\log EV$
Rehefeld	1991	0,16	0,46	0,48	0,50	0,52
	1992	0,35	0,01	0,35	0,30	0,56
	1993	0,20	0,28	0,32	0,29	0,33
	1994	0,20	0,29	0,44	0,35	0,45
	1995	0,21	0,54	0,61	0,57	0,61
	1996	0,20	0,30	0,34	0,32	0,38
	1997	0,17	0,28	0,56	0,37	0,57
	1998	0,17	0,62	0,60	0,70	0,67
	1999	0,15	0,58	0,43	0,59	0,46
	2000	0,15	0,70	0,52	0,70	0,64
Ammeldorf	1991	0,27	0,67	0,65	0,67	0,66
	1992	0,30	0,69	0,84	0,69	0,85
	1993	0,45	0,44	0,33	0,54	0,57
	1994	0,29	0,71	0,79	0,71	0,80
	1995	0,37	0,69	0,81	0,69	0,81
	1996	0,36	0,66	0,57	0,67	0,58
	1997	0,32	0,51	0,72	0,57	0,77
	1998	0,31	0,78	0,77	0,78	0,79
	1999	0,40	0,54	0,62	0,58	0,69
	2000	0,45	0,76	0,54	0,79	0,83
Hainsberg 3	1991	0,20	0,33	0,01	0,51	0,46
	1992	0,26	0,81	0,71	0,82	0,73
	1993	0,32	0,39	0,37	0,42	0,39
	1994	0,35	0,85	0,75	0,85	0,77
	1995	0,49	0,78	0,79	0,78	0,82
	1996	0,40	0,38	-0,15	0,64	0,40
	1997	0,35	0,15	0,26	0,19	0,38
	1998	0,31	0,88	0,78	0,90	0,83
	1999	0,27	0,90	0,87	0,91	0,88
	2000	0,35	0,89	0,79	0,89	0,84

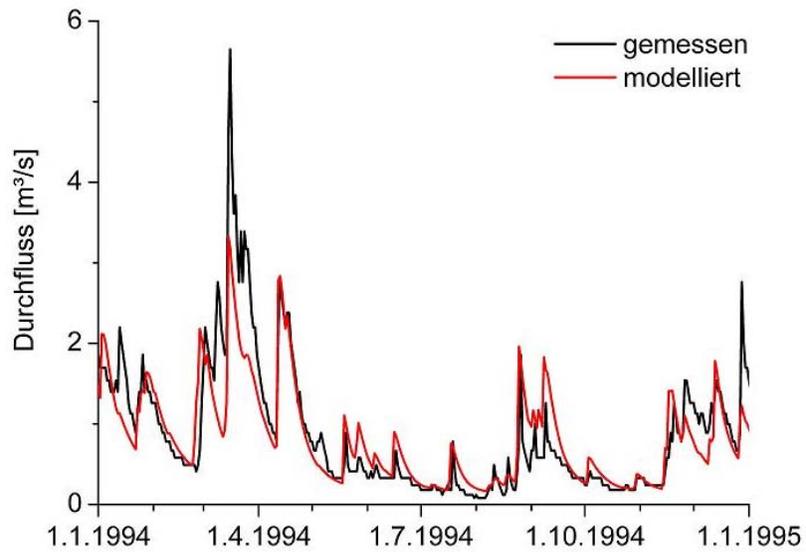


Abbildung 2.13: Kalibrierung des Pegels Ammeldorf für das Jahr 1994

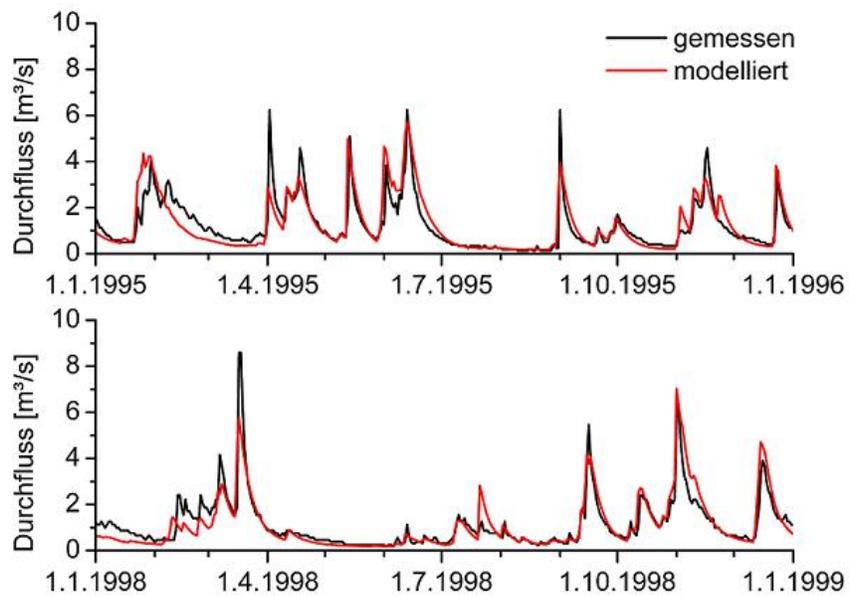


Abbildung 2.14: Validierung des Pegels Ammeldorf, hier die Ergebnisse in den Jahren 1995 und 1998

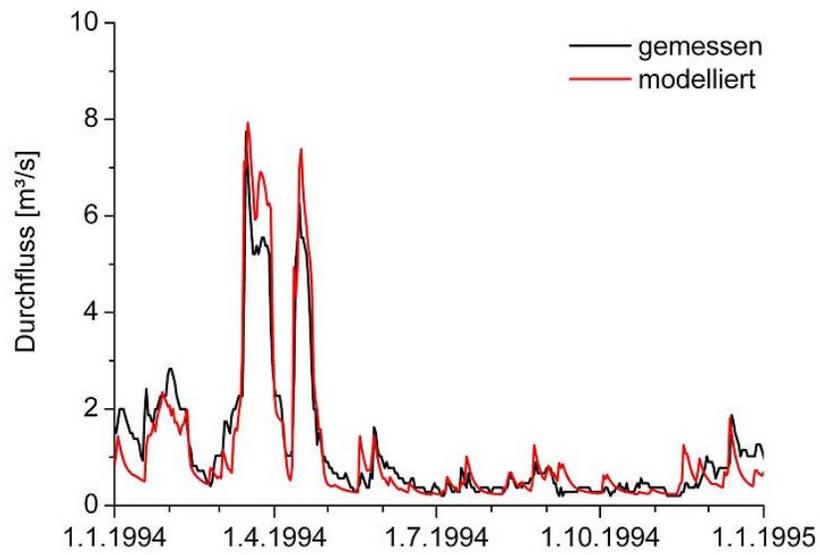


Abbildung 2.15: Kalibrierung des Pegels Hainsberg 3 für das Jahr 1994

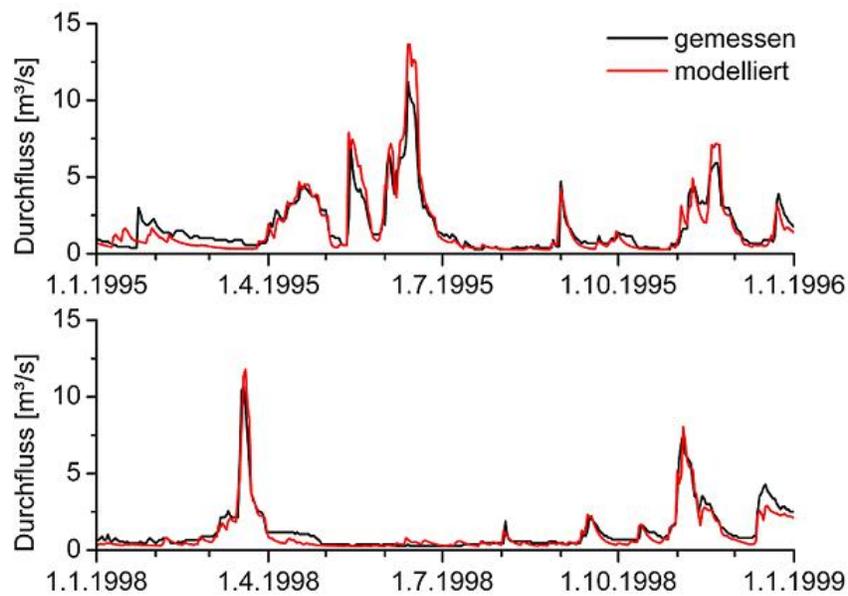


Abbildung 2.16: Validierung des Pegels Hainsberg 3, hier die Ergebnisse in den Jahren 1995 und 1998

In Abbildung 2.17 ist die Modellierung in Stundenschritten dargestellt. Sie wurde für die Jahre 1997 bis 2000 durchgeführt und ist aus den in Abschnitt 2.2.2 sowie bei der Erläuterung der Ergebnisse der stündlichen Modellierung am Pegel Dippoldiswalde genannten Gründen in den Jahren 1997 und 2000 gut gelungen, auch wenn die Hochwasserspitze bei der Modellierung tendenziell überschätzt werden. Diese beiden Jahre können für Szenarienrechnungen genutzt werden. Zudem ist in Abbildung 2.17 zu erkennen, dass die Modellierungen sowie Messungen in stündlichen und täglichen Zeitschritten gut übereinstimmen.

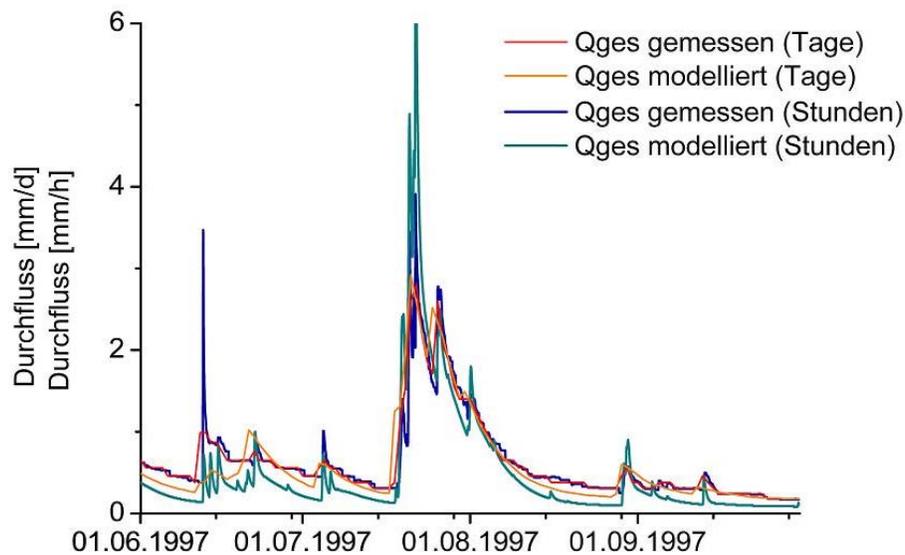


Abbildung 2.17: Modellierung des Pegels Ammeldorf von Juni bis September 1997 in Stunden- und Tagesschritten

2.3.2 Skalen

Besonders in komplexen Modellierungen sind die räumliche und zeitliche Auflösung bzw. die Skala, in der gerechnet wird, von größter Bedeutung. Die Skalenproblematik ergibt sich auf drei Ebenen (BLÖSCHL 1996; BRONSTERT et al. 2005). Auf Prozessebene stellt sich die Frage, bis in welche zeitliche und räumliche Aggregierungsstufe natürliche Prozesse dargestellt werden können. Im konkreten Fall bedeutet dies, dass die Wasserflüsse im Boden abhängig von Leitfähigkeit, Skelettgehalt, der Menge vorhandener Makroporen usw. in einem deutlich kleineren Zeitmaßstab dargestellt werden müssen als beispielsweise die Umwälzung des Wassers in einem See. Überschreitet man die vom natürlichen System vorgegebene Auflösung, ist eine korrekte physikalische Darstellung nicht mehr möglich, sondern das Modell muss zumindest in Teilen auf konzeptionelle Ansätze zurückgreifen. Zudem kommt es in vielen Fällen zu einer Verschiebung der dominanten Prozesse, wenn sie in verschiedenen Skalen betrachtet werden. So sind für ein korrektes Verständnis des Wasserhaushalts in kleinen räumlichen Auflösungen die durch Bodeneigenschaften gesteuerte Infiltration sowie die Wasserentnahme durch Evaporation und Transpiration der jeweils vorhandenen Vegetation von großer Bedeutung,

während in großen Raumskalen die Speichereigenschaften des jeweiligen Bodens neben der Evapotranspiration stärker in den Vordergrund treten.

Bedeutende Skalenprobleme ergeben sich in der Regel auf Ebene der Messungen. Die Qualität bzw. Güte einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung wird nicht zuletzt durch die räumliche und zeitliche Auflösung der Eingangsdaten bestimmt. Hochaufgelöste Daten sind jedoch häufig entweder schwer zu beschaffen und/oder mit erheblichen Kosten verbunden. Während bei einer Standortmodellierung oder bei sehr kleinen Einzugsgebieten hochaufgelöste Messungen möglich sind, die eine nahezu wirklichkeitsgetreue Wiedergabe beispielsweise der Bodeneigenschaften oder einzelner Niederschlagsereignisse erlauben, ist dies bei Einzugsgebieten im mesoskaligen Bereich in aller Regel nicht der Fall. Es übersteigt nicht allein durch den Arbeitsaufwand die Möglichkeiten des Modellierers, sondern in der Regel auch die Rechenkapazitäten der zur Verfügung stehenden Computer.

Schließlich setzt auch das verwendete Modell Grenzen für die Auflösung. In der Regel können Variabilitäten, die sich auf kleinerer Ebene abspielen als die intern gesetzte untere Grenze im Modell nicht behandelt werden bzw. werden ignoriert. WaSiM-ETH ist in dieser Hinsicht sehr flexibel. Zeitlich sind Auflösungen bis zu einer Minute möglich, räumlich können die Raster beliebig verkleinert werden. Grenzen werden in diesen Fällen von den zur Verfügung stehenden Computern gesetzt, deren Rechenzeiten mit der Zahl der Zeitschritte und der Raster linear ansteigt. Beachtet werden muss aber auch, dass das Modell bislang nur in einer gemeinsamen zeitlichen Auflösung für alle Module rechnen kann. So ist es nicht möglich, die Prozesse im Boden zeitlich von den Prozessen in der Atmosphäre oder in der Vegetationsschicht zu entkoppeln.

Diese drei Ebenen der Skalenbetrachtung sind in den wenigsten Fällen identisch, teilweise unterscheiden sie sich sogar um mehrere Größenordnungen (vgl. BRONSTERT et al. 2005). Es hat sich zudem gezeigt, dass es auf Basis heutigen Wissens nicht möglich ist, eine Auflösung festzulegen, in der die Berechnungen und Experimente wie Messungen erfolgen müssen, sondern dass dies je nach Aufgabenstellung stark variieren kann. Wichtiger noch ist dies bei komplexer Modellierung, in der mehrere Prozesse miteinander verbunden werden, wie im vorliegenden Fall beispielsweise Wasserhaushalt der Böden, Wassertransport im Gerinne, Evapotranspiration und die Modellierung von Klimaszenarien. Es ist dem Modellierer aufgetragen, durch ein möglichst gutes Verständnis der Prozesse, der Messmethoden und des verwendeten Modells, die im individuellen Fall ideale zeitliche und räumliche Auflösung zu wählen.

Bei der Bestimmung der geeigneten raum-zeitlichen Auflösung für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung im Osterzgebirge hat sich gezeigt, dass die Messfrequenz der einzelnen Eingabeparameter den dominanten Faktor darstellt. Zur adäquaten Darstellung der Prozesse, beispielsweise von Hochwässern bei kurzen Starkregenereignissen, wäre eine zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten im Minutenbereich wünschenswert sowie eine räumliche Auflösung von wenigen Metern. Dies trüge den schnellen Systemantworten Rechnung, die im Gebiet beobachtet werden. Zudem könnte dann der starke Einfluss des Reliefs auf die Niederschläge und die daraus resultierenden Abflussprozesse wiedergegeben werden. In Mitteleuropa sind eine große Anzahl von Messreihen täglicher Niederschläge vorhanden. Es gibt wenige Stationen mit stündlich aufgelösten Daten und nur sehr wenige Stationen mit höher als stündlich aufgelösten Daten. Klimastationen, die neben Niederschlag auch Temperatur, Strahlung, Bedeckungsgrad und weitere meteorologische Daten aufnehmen, sind nicht in jedem Einzugsgebiet vorhanden. Im Tiefland muss dies kein Hindernis für Modellierungen sein, in den komplexen Landschaften der Mittelgebirge entscheiden die Anzahl und raum-zeitliche Verteilung der Messungen im

Gebiet jedoch häufig darüber, ob hydroklimatische Verhältnisse sinnvoll nachgebildet werden können (z.B. BEVEN U. HORNBERGER 1982; BRONSTERT U. BÁRDOSSY 2003; DAWDY U. BERGMANN 1969; OBLED et al. 1994).

Zur „Lückenfüllung“ werden in der Regel, so auch in dieser Arbeit, die klimatischer Daten anhand vorhandener Punktinformationen über das Gebiet interpoliert. Je nach Datendichte muss der zeitliche Interpolationsschritt passend gewählt werden, um entstehende Fehler in der räumlichen und zeitlichen Verteilung möglichst klein zu halten bzw. sich gegenseitig oder über Aggregation ausgleichen zu lassen. Verbesserte Interpolationsverfahren, wie sie z.B. in FRANKKE U. BERNHOFER (2005) für Einzelereignisse vorgeschlagen werden, weisen einen Schritt auf den künftigen Weg, aus wenig Daten besser aufgelöste kontinuierliche Eingangsdatensätze für Wasserhaushaltsrechnungen und Niederschlag-Abfluss-Modellierungen zu erhalten.

WaSiM-ETH ist, wie bereits erwähnt, in der Lage, mit verschiedenen zeitlichen Auflösungen zu rechnen. Allerdings hat sich in mehreren Untersuchungen gezeigt, dass die Zeitreihe eine Mindestlänge aufweisen muss, damit das Modell korrekte Abflüsse berechnen kann. Die Länge der Zeitreihe ist davon abhängig, wie lange das Modell benötigt, um zu korrekten Bodenfeuchten und/oder verschiedenen Speicherfüllungen zu gelangen (z.B. HAGEDORN 2003). Dies birgt den Vorteil, dass die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von der gewählten Vorfeuchte im Boden, wie sie in anderen Modellen häufig der Fall ist (z.B. DAVID et al. 2005) hier nicht auftritt. Aus diesem Grund ist eine Eventmodellierung nur möglich, wenn z.B. das Hochwasserereignis bzw. der Bemessungsniederschlag in eine vorangehende Zeitreihe integriert wird oder sehr aufwändig die korrekten Vorfeuchten ermittelt und in das Modell eingegeben werden. Eine Kalibrierung eines einzelnen Ereignisses ist zwar möglich, aber aufgrund der Modellstruktur nicht übertragbar. So zeigt sich das grundsätzliche Problem einer Modellierung in Stundenschritten in den oben genannten Punkten. Es sind zuwenige und zudem ungünstig über das Gebiet verteilte Messreihen vorhanden. Eine Kalibrierung oder gar Validierung einer Modellierung in Stundenschritten für die nutzbaren Sommerhalbjahre 1997 und 2000 ist eigentlich nicht möglich. Hier muss von der Annahme ausgegangen werden, dass grundsätzlich eine Übertragbarkeit von großen zu kleineren Zeitschritten vorhanden ist. Die Parametrisierung der Tageswerte konnte tatsächlich bis auf wenige Veränderungen für Stundenwerte übernommen werden.

Auch die Wahl der räumlichen Auflösung der geographischen Eingangsdaten ist vor allem von den zur Verfügung stehenden Messdaten und Karten abhängig. Sollen keine eigenen Kartierarbeiten erfolgen, hat bereits die Entscheidung, ob beispielsweise für die Landnutzung Corine-Daten, ATKIS-Daten oder Informationen aus topographischen Karten oder anderen Quellen genutzt werden, weitreichende Folgen für den Anwender. Nicht nur sind sie verschieden leicht verfügbar und unterscheiden sich sehr deutlich im Preis, sondern sie wurden in der Regel auch zu verschiedenen Zeitpunkten in unterschiedlich genauen Auflösungen aufgenommen, verschieden klassifiziert und unterschiedlich umgesetzt. So mussten im Untersuchungsgebiet gemeinsame Grundlagen für die tschechische und die deutsche Seite des Einzugsgebiets geschaffen werden. Im Teileinzugsgebiet in der Tschechische Republik sind zwar flächendeckend Corine-Daten und fast flächendeckend Bodendaten vorhanden, es war jedoch im konkreten Fall einfacher, beide Aspekte in dem betreffenden Teileinzugsgebiet unter Zugrundelegung des deutschen Systems (ATKIS-DLM, Bodenkonzeptkarte) selbst zu kartieren, um Randeffekte zu vermeiden. Aus demselben Grund wurde auch das digitale Geländemodell für die tschechische Seite manuell erweitert.

Im Fall der geographischen Eingangsdaten sind zudem modellbedingte Beschränkungen von

großer Relevanz. Eine Darstellung jedes einzelnen Waldtyps in seinem horizontalen und vertikalen Aufbau, wie es im Einzugsgebiet der Weißeritzen möglich wäre, ist beispielsweise nur dann sinnvoll, wenn dieser Aufbau durch das Modell dargestellt werden kann und die notwendigen Parameter vorhanden sind. Bei der genutzten WaSiM-Version ist das nicht der Fall, allerdings wird das Modell aktuell weiterentwickelt und in der nächsten Version werden solche Differenzierungen möglich sein (SCHULLA U. JASPER 2005).

Jedes Modell wird für einen bestimmten Zweck und unter bestimmten Intentionen geschrieben und genutzt. In vielen Fällen benötigen sie in Teilbereichen differenzierte Informationen, während andere Teilmodule „mitlaufen“. So sind im Modell SWAT (NEITSCH et al. 2002) Stickstoffumsätze detailliert beschrieben und zu parametrisieren, während der Wasserhaushalt durch einen sehr einfachen Ansatz nachgebildet wird und dementsprechend viele Eingangsdaten nicht benötigt, die in Modellen wie WaSiM-ETH essentiell sind.

Modelle sind in der Regel für bestimmte Skalenbereiche geschrieben worden und es ist meist nicht möglich, sie ohne aufwändige Anpassung auf engere oder weitere Skalenebenen auszuweiten (LAMMERS et al. 1997), da bestimmte Annahmen und Vereinfachungen, sollte es sich nicht um ein White-Box-Modell handeln, ihre Gültigkeit verlieren können.

WaSiM-ETH liest die geographischen Daten als gleichmäßiges Raster ein. Das Minimum für Rasterweiten wird nicht durch das Modell, sondern durch externe Bedingungen, nämlich durch die geographischen Eingangsdaten vorgegeben. Im Untersuchungsgebiet ist die Basis das digitale Geländemodell. Es liegt für Teile Deutschlands in einem 5 m-Raster vor, aber im Allgemeinen muss davon ausgegangen werden, dass wie auch in dieser Untersuchung mit dem dgm25, das heißt einem 20 m-Raster, gearbeitet wird. Um zu untersuchen, wie sich im Fall des Modells WaSiM-ETH die Rasterung auf die Modellierung auswirkt, wurden zudem die Rasterweiten 50 m, 100 m, 300 m, 500 m und 1000 m auf den entsprechenden Kartengrundlagen erstellt. Das im Internet erhältliche 1 km-Raster stellt die Obergrenze für Modellierungen mesoskaliger Einzugsgebiete in Mittelgebirgen dar (Abbildung 2.18). Mit den genannten Rasterweiten wurden Modellierungen in Tagesschritten in den Einzugsgebieten Rehefeld, Ammeldorf, Hainsberg 3, Schmiedeberg, Dippoldiswalde und Hainsberg 1 durchgeführt. Die Auswahl stellt sicher, dass verschieden strukturierte und verschieden große Einzugsgebiete miteinander verglichen werden können, bei denen die anderen Randbedingungen, insbesondere betreffend die Menge und Güte der meteorologischen Eingangsdaten, gleich bleiben. So bleibt bei größtmöglicher Varianz die direkte Vergleichbarkeit gewährleistet.

Da für die Erstellung der Raster ein einschließendes Verfahren gewählt wurde, nimmt in der Regel die Einzugsgebietsfläche mit steigender Rasterweite zu. Dabei sind die relativen Veränderungen im kleinsten Einzugsgebiet am höchsten. Im Einzugsgebiet der Roten Weißeritz entwässert ab einer Rasterweite 300 m aufgrund von rasterungsbedingten Veränderungen in errechneten Hangneigungen und Expositionen der westliche Teil des Einzugsgebiets in die Wilde Weißeritz. Im Einzugsgebiet Ammeldorf nimmt die Einzugsgebietsfläche von 500 m zu 1000 m stark ab. Etwa bis zum Pegel Rehefeld kann zwar auch im größten Raster das Einzugsgebiet berechnet werden, aber zwischen den beiden Pegeln entwässert die Wilde Weißeritz im 1 km-Raster nach Westen in das Einzugsgebiet der Freiburger Mulde, so dass der Pegel Ammeldorf quasi trocken fällt. Die Veränderungen im Abflussverhalten der jeweiligen Pegel zeigen keinen signifikanten Zusammenhang mit den Veränderungen der Einzugsgebietsgrößen (Abbildung 2.19). In Bezug auf die relativen Flächenanteile einzelner Bodenarten bzw. Landnutzungskategorien zeigen sich in allen Einzugsgebieten erst bei einer Rastergröße von 300 m deutliche Unterschiede. Im Ergebnis zeigt sich, dass sich lediglich die anteilige Landnutzung

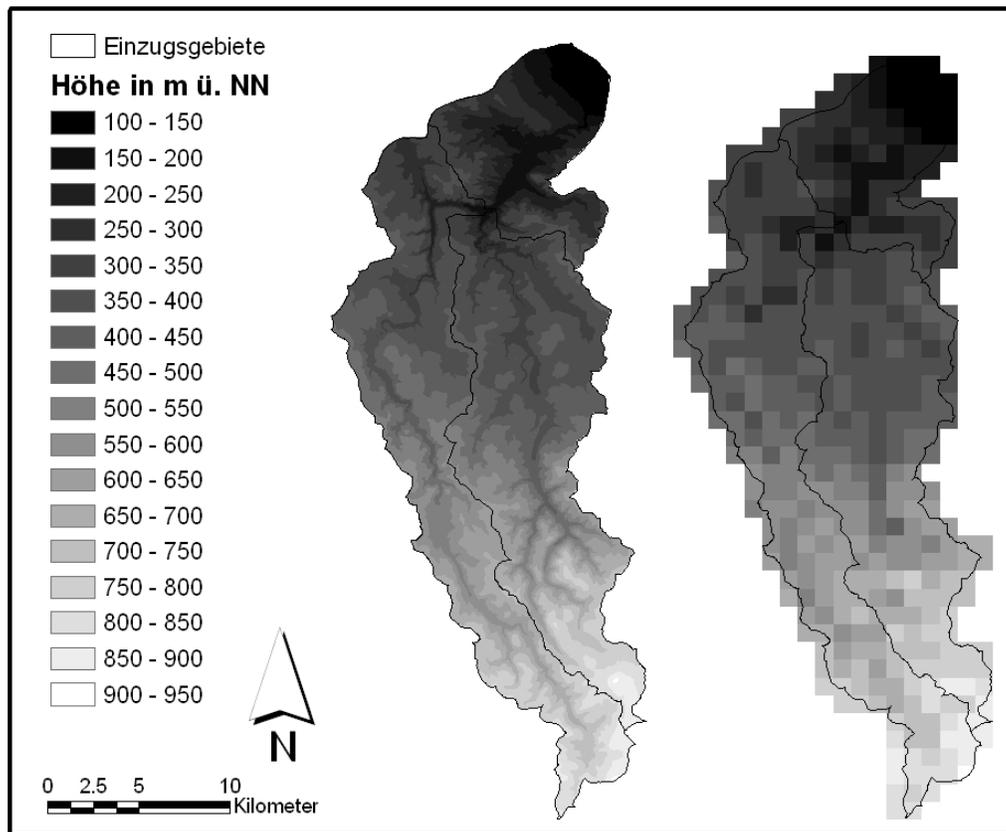


Abbildung 2.18: Das Einzugsgebiet im 20 m-Raster (links) und im 1000 m-Raster (rechts)

im 1000 m-Raster von Schmiedeberg und Dippoldiswalde signifikant von der im 20 m-Raster unterscheidet.

Obwohl bei der Landnutzung für Rehefeld im 1000 m-Raster keine signifikanten Unterschiede zum 20 m-Raster gefunden wurden, sind die Veränderungen durch die auf große Flächeneinheiten aggregierte Landnutzung und Bodenstruktur von großer Relevanz für die Gebietshydrologie. Besonders das gänzliche Fehlen der Moorflächen im 1000 m-Raster hat hydrologische Auswirkungen, die eine Modellierung in dieser Rasterweite nicht als angebracht erscheinen lassen. Der Vergleich der Direktabflussanteile am Gesamtabfluss (Abbildung 2.20) zeigt dementsprechend einen Zusammenhang mit der Rasterweite. Der Direktabfluss steigt offensichtlich mit größerer Auflösung an. Dies ist auf deutliche Abnahmen gut durchlässiger und der Zunahme schlecht durchlässiger Böden besonders im 300 m- und im 500 m-Raster zurückzuführen. Beispielsweise im Einzugsgebiet Schmiedeberg nehmen die Anteile des relativ gut durchlässigen Ls3 und versiegelte Flächen mit dem Aggregierungsgrad zu, was sich in einer leichten Steigerung des Direktabflusses bis 500 m und einer extremen Steigerung im 1000 m-Raster im Modell wieder findet. In Dippoldiswalde sind die Veränderungen der Bodenanteile zusammengekommen relativ klein, so dass auch die Veränderungen im Abfluss weniger deutlich sind. Durch Vergleiche mit verschiedenen Ganglinienanalysen konnte gezeigt werden (EISOLD 2002; LANGE 2001), dass der modellierte Direktabfluss an den Pegeln Ammeldorf, Schmiedeberg und Dippoldiswalde mit dem realen gut übereinstimmt. Da aber bis auf das 1000 m-Raster bei

Schmiedeberg alle Direktabfluss-Anteile im durch die Ganglinienanalysen gesteckten Rahmen von ca. 10 % bis 25 % im Jahresverlauf liegen, ist es nicht möglich, eine Aussage darüber zu treffen, welche Rasterweite den Anteil des Direktabflusses am besten wieder gibt. Es ist anzunehmen, dass er in den kleineren Rasterweiten besser modelliert wird, da dort in Größe und Verteilung der Anteile versiegelter und schlecht durchlässiger Böden die kleinsten Veränderungen verglichen zu realen Verhältnissen vorhanden sind. Am Pegel Rehefeld kann wegen der Zehrungsflächen, die durch die Moore und vernässten Stellen im Jahresverlauf entstehen und mehr noch durch die in Bezug auf die Einzugsgebietsgröße starken anthropogene Veränderungen der Fließwege keine Ganglinien-Analyse vorgenommen werden (SCHWARZE, mündl. Mittl., Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden, 2005). Deshalb ist der niedrige Anteil von Direktabfluss nicht direkt überprüfbar. Doch er ist plausibel, da aufgrund der Gebietsmorphologie und der Moore und Feuchtflächen der Anteil des Direktabflusses am Gesamtabfluss wahrscheinlich tatsächlich niedriger als bei den anderen Pegeln ist.

In allen Einzugsgebieten verändern sich offensichtlich bis 500 m die Modellierungsgüten kaum (Abbildung 2.21). Der starke Abfall in Rehefeld zum 1000 m-Raster bestätigt, dass hier keine Modellierung mehr erfolgen sollte. In Schmiedeberg weisen das 300 m-Raster und das 1000 m-Raster einen deutlichen systematischen Fehler auf, der auf die Aggregation der Bodenarten zurückzuführen ist, die im 300 m-Raster eine Verteilung ergibt, die sich von allen anderen Rasterungen deutlich unterscheidet. Dies ist als Besonderheit dieses einzelnen Einzugsgebiets zu werten und tritt in den anderen Einzugsgebieten nicht auf. Die Ergebnisse lassen den nahe liegenden Schluss zu, dass sich bei größeren Einzugsgebieten die Größe der Rasterweite weniger als bei kleineren auswirkt. Ungenauigkeiten werden über das Gesamtgebiet ausgeglichen.

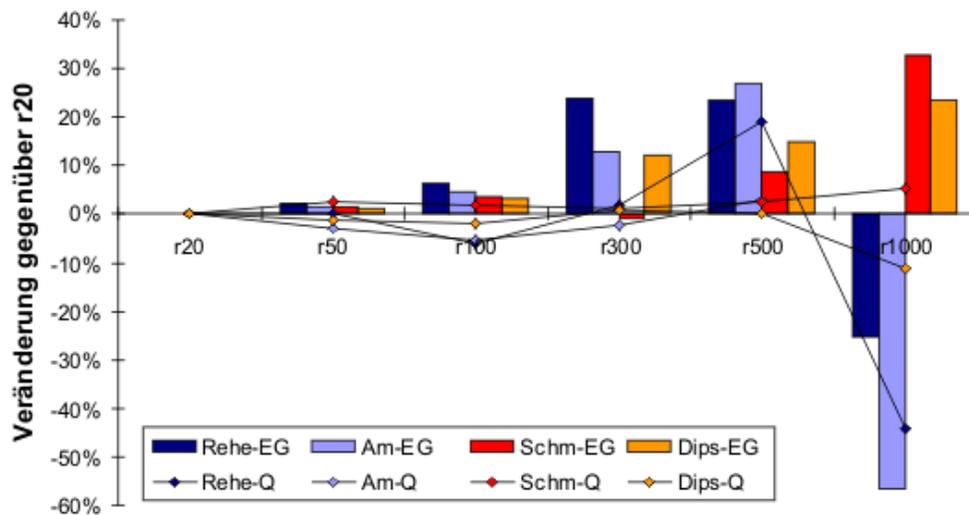


Abbildung 2.19: Veränderung des Anteils der Gesamtfläche und der Jahresabflusssumme in verschiedenen Rasterweiten in den Einzugsgebieten der Pegel Rehefeld (Rehe), Ammelsdorf (Am), Schmiedeberg (Schm) und Dippoldiswalde (Dips). r20 = 20 m-Raster, r50 = 50 m-Raster, r100 = 100 m-Raster, r300 = 300 m-Raster, r500 = 500 m-Raster, r1000 = 1000 m-Raster, Q = Jahresabflusssumme, EG = Einzugsgebietsfläche

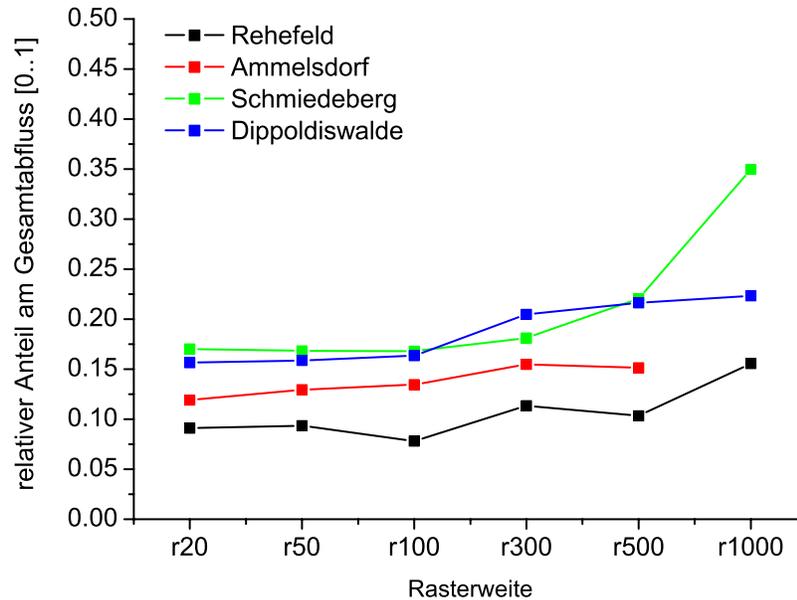


Abbildung 2.20: Veränderung des Anteils von Direktabfluss am Gesamtabfluss in verschiedenen Rasterweiten in den Einzugsgebieten der Pegel Rehefeld, Ammelsdorf, Schmiedeberg und Dippoldiswalde. r20 = 20 m-Raster, r50 = 50 m-Raster, r100 = 100 m-Raster, r300 = 300 m-Raster, r500 = 500 m-Raster, r1000 = 1000 m-Raster.

Die modellierten Abflussganglinien selbst zeigen in den verschiedenen Rasterweiten keine signifikanten Unterschiede. Die Abflusskurven der verschiedenen Rasterweiten verlaufen an allen modellierten Pegeln vom 20- bis zum 500 m-Raster parallel. Die relativen Abstände der Parallelen sinken dabei mit der Größe des Einzugsgebiets. Die modellierten Ganglinien unterscheiden sich dabei mehr in den Abflussspitzen als in den Niedrigwasserbereichen, was sich in den bereits erwähnten veränderten Anteilen von Direkt-, Zwischen- und Basisabfluss widerspiegelt.

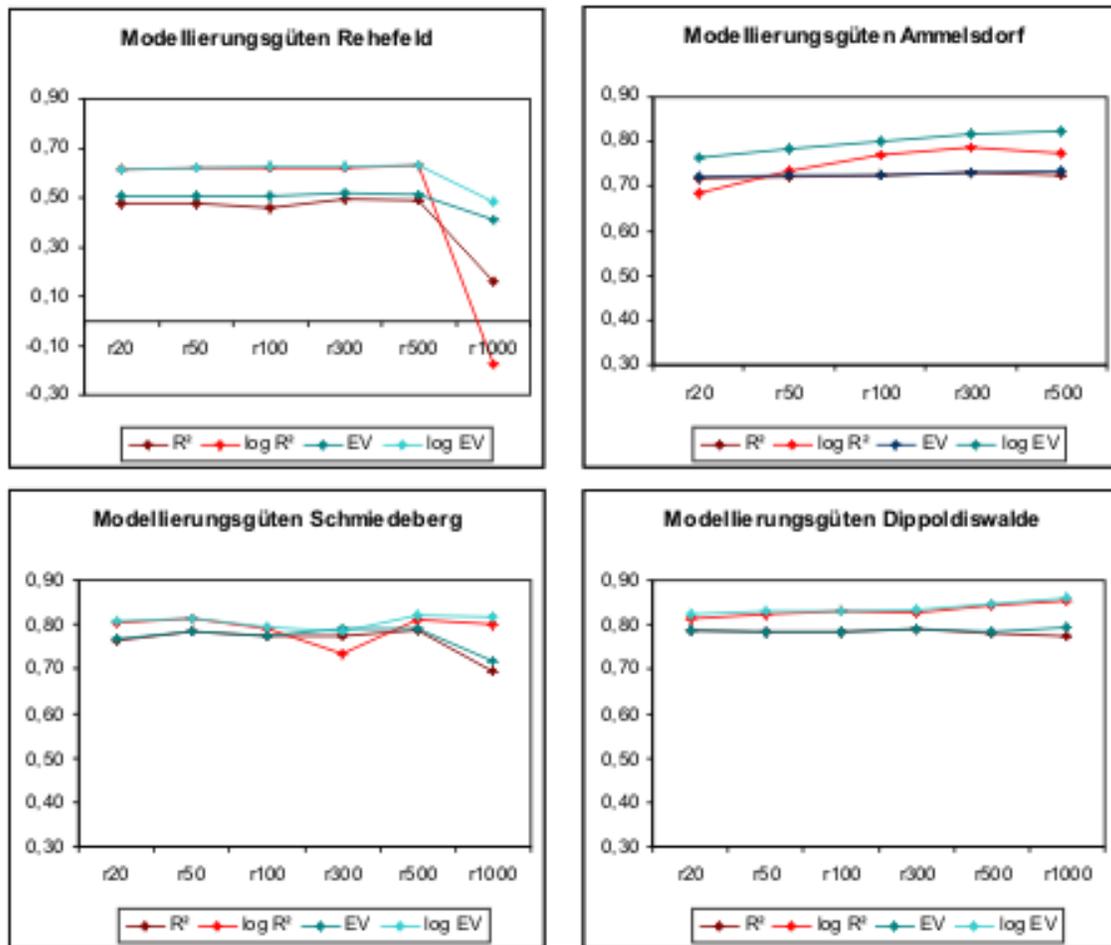


Abbildung 2.21: Modellierungsgüten in den Einzugsgebieten der Pegel Rehefeld, Ammeldorf, Schmiedeberg und Dippoldiswalde in den Rasterweiten 20 m (r20), 50 m (r50), 100 m (r100), 300 m (r300), 500 m (r500) und 1000 m (r1000). Güteberechnung nach NASH U. SUTCLIFFE (1970). Aus PÖHLER et al. 2005.

Bei der Kalibrierung der verschiedenen Rasterweiten hat sich also gezeigt, dass die für das 500 m-Raster kalibrierten Werte für kleinere Rasterweiten übernommen werden können. Bei verschiedenen Sensitivitätsanalysen erwies sich zudem, dass dies auch für die Geltungsbereiche der verschiedenen Parameter gilt, soweit sie in den jeweils korrekten raum-zeitlichen Zusammenhang gesetzt werden.

2.4 Zusammenfassung

Bei der Zusammenstellung der Eingangsdaten, der Kalibrierung und Validierung zeigt sich, dass das Wasserhaushalts-Simulations-Modell WaSiM-ETH die Abflussprozesse im Untersuchungsgebiet gut nachbilden kann.

Das genutzte Modell zeigt eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Eingangsdaten. Abhängig vom Vorhandensein und der Qualität bestimmter Eingangsdaten, die für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung potentiell benötigt werden - ausgenommen sind für WaSiM-ETH die Mindestvoraussetzungen Landnutzung, Bodenarten, digitales Geländemodell, Niederschlag und Temperatur - kann in den einzelnen Modulen zwischen verschiedenen mehr oder weniger konzeptionellen Ansätzen gewählt werden. Beispielsweise war es im vorliegenden Fall trotz potentiell vorhandener Eingangsdaten für komplexere Ansätze beim Schneemodell sinnvoll, das einfachste, nämlich das Temperatur-Index-Verfahren, anzuwenden. Denn so sind aufgrund ungenauer Wind-Daten die Abweichungen in den aus Schneeschmelzen resultierenden modellierten Abflüssen zu den gemessenen Abflüssen am geringsten. Allgemein aber zeigt sich, dass man sich bei der Modellierung nach Möglichkeit auf Modellkomponenten stützen sollte, die physikalisch begründbar sind, da deren Ergebnisse vor allem in Hinblick auf Abweichungen zu Messwerten besser nachvollziehbar sind. Zudem ist das kalibrierte Modell dann aufgrund einer kleineren Anzahl messbarer Parameter in der Regel gut auf andere Einzugsgebiete übertragbar. Dies konnte durch den direkten Vergleich der beiden in WaSiM-ETH anwendbaren Modelle zur Abbildung des Bodenwasserhaushalts gezeigt werden. Während WaSiM-ETH bei Anwendung des konzeptionellen Ansatzes in jedem Einzugsgebiet individuell kalibriert werden muss, kann es bei Anwendung des Richards-Ansatzes im Bodenmodul mit nur wenigen Veränderungen in den Parametern in ähnlichen Einzugsgebieten eingesetzt werden.

Es ist möglich, mit einer großen Spannweite an räumlicher Diskretisierung (Rasterweiten) zu korrekten Ergebnissen zu kommen. Zudem kann WaSiM-ETH mit nur geringen Anpassungen der Parametersätze, die zudem im vorliegenden Fall vor allem auf die schlechtere Qualität der Eingangsdaten in kleinerer zeitlicher Auflösung zurückzuführen sind, in verschiedenen Zeitskalen rechnen.

Abhängig vom Ziel der Untersuchungen und der Verfügbarkeit von Eingangsdaten können also verschiedene Teilmodule in WaSiM-ETH eingesetzt werden. Dabei können konzeptionelle und physikalische Ansätze nahezu beliebig kombiniert werden. Die große mögliche Spannweite in Bezug auf verwendete Raum- und Zeitskalen macht das Modell flexibel und breit anwendbar. Dadurch ist es für die übergeordnete Aufgabenstellung, die das EMTAL-Projekt vorgibt, geeignet.

3 Szenarien

3.1 Vorbemerkung

Es ist wünschenswert, Szenarien zu entwickeln, die alle sich in der nahen oder fernerer Zukunft verändernden Aspekte in einem Untersuchungsgebiet beinhalten. Das betrifft wirtschaftliche, soziale, politische, klimatische, (geo)ökologische und sonstige denkbare Bedingungen, die sich in Zukunft in verschiedenem Ausmaß verändern oder gerade nicht verändern werden. Dass dies bis heute nicht möglich ist, hat zwei Hauptursachen. Zum einen ist die Prognose jedes einzelnen Aspektes mit verschieden großen, aber immer vorhandenen Unsicherheiten behaftet. Werden Zielwahrscheinlichkeiten oder Eintreffgenauigkeiten definiert, ist dieses Problem für jeden einzelnen Faktor zumindest einzugrenzen. Zum anderen ergibt sich beim Zusammenwirken der verschiedenen Gruppen ein Problem in der Skala der Veränderungen. Es sind beispielsweise Veränderungen im agrartechnischen Bereich denkbar, sowie planerische Veränderungen im Gewässerlauf (z.B. Verbau des Flusses oder seine Renaturierung), Aufforstung, Siedlungsausbau, Veränderungen in den Agrarsubventionen, der Weltmarktpreise oder z.B. ein steigendes Umweltbewusstsein der Bevölkerung. Hinzu kommt der prognostizierte Klimawandel. Diese Veränderungen wirken auf völlig verschiedenen räumlichen Skalenebenen und müssen dementsprechend auch auf verschiedenen Ebenen und mit verschieden starkem Raumbezug parametrisiert werden. Zudem sind in verschiedenen Skalenbezügen unterschiedliche Prozesse dominant. So mögen auf Einzelbetriebsebene Entscheidungen über Feldfrüchte und Anbautechnik sowie Düngereinsatz des individuellen Landwirtes aufgrund ökologischer Überlegungen zumindest teilweise im Vordergrund stehen, diese treten in ihrer Bedeutung aber schon auf regionaler Ebene weit hinter den Lenkungswirkungen von Subventionen und den Weltmarktpreisen zurück. Auch kann die Umstellung der Agrartechnik der ansässigen Landwirte bedeutende Auswirkung auf die Gewässergüte der angrenzenden Bäche und Flüsse oder einer Talsperre haben, diese Wirkungen treten aber in der Regel auf höherer Ebene stark zurück hinter gesetzlichen Regelungen zum Kläranlagenbetrieb oder der Einleitung von Abwässern in größeren Einzugsgebieten. Alle diese Einflüsse sind darüber hinaus in einem völlig anderen zeitlichen Kontext zu sehen als die zu erwartenden Klimaänderungen.

In dem hier vorliegenden konkreten Beispiel werden die Klimaveränderungen bis 2050 modelliert. Wie in Abschnitt 3.3 ausgeführt werden wird, können keine konkreteren Aussagen als für Jahreszeiten getroffen werden. Dies ist aber für den Großteil der Landnutzungsszenarien in Bezug auf ihre Wirkung auf den Wasserhaushalt ein viel zu großer Zeitschritt, um Veränderungen realistisch abbilden zu können. Erschwerend ist die Tatsache, dass für den Zeitraum bis 2050 keine belastbaren Aussagen in Bezug auf sich verändernde Landnutzung gemacht werden können. Zum Beispiel umfassen die RAUMIS-Szenarien (GÖMANN et al. 2003) aus diesem Grund nur einen Zeitraum von zehn bis maximal dreißig Jahre in die Zukunft. Es ist davon ausgehen, dass die künftigen ökonomischen Rahmenbedingungen für die künftige Landnutzung mindestens ebenso wichtig, wenn nicht sogar wichtiger als die klimatischen Randbedingungen sind. Nicht zu vernachlässigen sind technischer Fortschritt, Züchtung und Gentechnik. Da die Prognose dieser Randbedingungen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich

war und um außerdem der Skalenproblematik gerecht zu werden, wurden Landnutzungs- und Klimaszenarien vollständig getrennt betrachtet. Dabei stellen die Klimaszenarien in Abschnitt 3.3 tatsächlich Zukunftsszenarien dar, während die ausgewählten Landnutzungsszenarien in Abschnitt 3.2 veränderte Landnutzungsbedingungen unter heutigen klimatischen Randbedingungen thematisieren.

3.2 Landnutzungsszenarien

3.2.1 Stand der Forschung

Prognosen und Szenarien

Eine Prognose dient dazu, Informationen über voraussichtliche Entwicklungen in der Zukunft bereitzustellen. Sowohl in der Wirtschaft als auch in der Politik sind Prognosen wichtige Grundlagen für zukunftsrelevante Entscheidungen. Entgegen der weit verbreiteten Meinung ist es jedoch nicht Ziel der Prognose, ausschließlich die Zukunft eindeutig und genau abzubilden. Wesentlich wichtiger ist die sich aus der Prognose ergebende Möglichkeit, vertieft Einblicke in die Wirkungszusammenhänge vorgegebener Problemstellungen zu gewinnen. So ist nicht in jedem Fall die genaueste Prognose auch die beste. Den größten Nutzen zieht der Anwender häufiger aus solchen Prognosen, die die weitestgehenden Einsichten für Planungs- und Entscheidungsakte oder für weitergehende Forschung ermöglichen (WIEGAND 1994). Es gibt eine große Anzahl Möglichkeiten, verschiedenste Prognosen nach den unterschiedlichsten Kriterien zu erstellen. Zunächst wird zwischen kurzfristigen (bis zu zwei Jahre), mittelfristigen (bis 10 Jahren) und langfristigen (über 10 Jahren) Prognosen unterschieden (FRERICHS U. KÜBLER 1980). Kurzfristige Prognosen können im landwirtschaftlichen Bereich erstellt werden, sind jedoch für die Wasserhaushaltsmodellierung in der Regel wenig zielführend. Prognosen, die der Realität möglichst nahe kommen sollen, bewegen sich am besten im mittelfristigen Bereich. Veränderungen in der Landnutzung sind über einen solchen Zeitraum überschaubar und bis zu gewissen Grenzen vorhersagbar. Langfristige Prognosen sind im Fall von Landnutzungsänderungen wenig realistisch. „Sozioökonomische Überraschungen“ (WIEGAND 1994) stellen durchaus keine Seltenheit dar, dazu gehören Großereignisse wie die politischen Wenden in Deutschland, Umstellungen in der Agrarsubventionierung, Veränderungen auf dem Weltmarkt oder ähnliches. Doch können langfristige Prognosen bei geeigneten Problemstellungen und geeigneter Parametrisierung Handlungsrahmen für Entscheidungsträger bereitstellen. Daneben wird zwischen quantitativen und qualitativen bzw. heuristischen Prognoseverfahren differenziert. Quantitative Prognoseverfahren sind vor allem verschiedene Zeitreihenmodelle. Daneben existieren kausale Modelle, die vor allem regressionsanalytische Ansätze verwenden sowie eine Vielzahl von Kombinationen aus diesen beiden Methoden. Qualitative Prognoseverfahren sind vor allem Befragungen verschiedener Ziel- und Expertengruppen und andere Verfahren wie der Analogieschluss, die sogenannte Indikatorenmethode oder die Erstellung von Szenarien (WIEGAND 1994). Klimaszenarien stützen sich auf quantitative Prognosen. Wie bereits oben ausgeführt, unterliegen jedoch Landnutzungsszenarien im Gegensatz zu Klimaänderungen weniger einem quantifizierbaren Trend als kurzfristigen Entscheidungen von Politikern verschiedenster Ressorts, Veränderungen auf dem Weltmarkt und kurzfristigen ökonomischen Kalkulationen sowie subjektiven Entscheidungen der Landwirte selbst. Selbst wenn die Landnutzung der letzten Jahre mathematisch durch eine Zeitreihe ausgedrückt werden könnte, ist die Zeitspanne seit dem letzten großen Umbruch - die Wiedervereinigung 1990

und die damit einhergehenden Veränderungen auf dem Agrarsektor - zu kurz, um Schlüsse aus den Daten herleiten zu können. Vor 1990 war die Landwirtschaft in den Bundesländern Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern eindeutig anderen Steuerungsmechanismen unterworfen als heute, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Hinzu kommen Veränderungen auf dem technischen und dem chemischen Sektor sowie Änderungen im Bewusstsein der Menschen (z.B. die Umweltbewegung in den 1980er Jahren). Landnutzungsveränderungen stellen also keine linearen Prozesse dar, die durch mathematische Formeln ausgedrückt werden könnten. Kausale Verfahren wie beispielsweise regressionsanalytische Modelle sind demnach für die vorliegende Aufgabenstellung nicht geeignet. So bleiben die qualitativen Prognoseverfahren, die durch subjektive (intuitive), d.h. nicht unmittelbar nachprüfbar und für Außenstehende oft nicht klar erkennbare Elemente sowie durch eine schwach ausgebildete theoretische Komponente gekennzeichnet sind (WIEGAND 1994). Vergangenheitsdaten und mathematisch-statistische Instrumente treten bei der Erstellung der Prognose in den Hintergrund, sollten aber nicht vollständig vernachlässigt werden. Weiteres Kennzeichen qualitativer Prognosen ist die Hinzuziehung von Experten, die auf den für die Prognose relevanten Spezialgebieten über Erfahrungen verfügen. Daneben spielt nach FRERICHS u. KÜBLER (1980) und WIEGAND (1994) häufig das Instrument der Befragung eine große Rolle. Vorteil dieser Prognosemethode ist, dass auch subjektive, d.h. mehr oder weniger zufällige Elemente, die die Entscheidungsfindung beeinflussen, mit Hilfe von Erfahrungswerten berücksichtigt werden können. Allerdings wird gerade dieser Vorteil schnell zum Nachteil, wenn auch persönliche Interessen eine Rolle spielen und so die Prognoseergebnisse im Sinne der Anwenders oder der Auftraggebers verfälschen. Wichtig ist deshalb die Hinzuziehung möglichst vieler verschiedener Quellen, um ein höchstmögliches Maß an Objektivität zu erreichen.

Eine Unterart der qualitativen Prognoseerstellung ist die so genannte Szenariotechnik, die auch in dieser Arbeit Anwendung finden soll. Im Gegensatz zu Prognosen treffen Szenarien keine Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit (JENKINS 1997). Die Szenariotechnik hat ihre Ursprünge in der militärstrategischen Planung. In den Umweltwissenschaften wird sie heute vor allem für die Beschreibung der zukünftigen Entwicklung des Prognosegegenstands anhand alternativer Rahmenbedingungen angewendet (ALCAMO 2001). In Szenarien werden nach PONCE-HERNANDEZ et al. (2004) ausgehend von der aktuellen Situation oder einem definierten Grundzustand schrittweise logische Folgen alternativer Einwicklungsmöglichkeiten für den Prognosezeitraum aufgezeigt. Das schrittweise Vorgehen basiert häufig auf der Veränderung jeweils einer Variable, die in den folgenden Schritten mit anderen sich verändernden Variablen verglichen oder kombiniert wird. Dadurch können gewünschte oder erwartete Zielzustände erreicht oder durch geeignete Kombinationen von Variablen angenähert werden.

Nutzung von Landnutzungsszenarien in der hydrologischen Modellierung

Die große Anzahl von Untersuchungen der Auswirkung von Landnutzung und Landnutzungsveränderungen auf den Wasserhaushalt und das Abflussgeschehen spiegelt das Interesse der Menschen an diesem Thema wieder. Trotzdem liegen in diesem Bereich aus vielfältigen Gründen nur sehr wenige geeignete Messreihen vor (vgl. BROWN et al. 2005). Weder sind die meisten Flüsse mit einem Pegel versehen noch gibt es in der Mehrzahl der Fälle genügend hoch aufgelöste und lange Zeiträume umfassende Daten über die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten. Aus diesem Grund wurden Landnutzungsänderungen schon sehr früh nicht nur zur Verbesserung des Prozessverständnisses, sondern auch zur Generierung von Daten durch

Modelle nachgebildet und im Idealfall anhand Messungen verifiziert. Die ergebnisorientierten Arbeiten verlegen im Gegensatz zu modelltheoretisch motivierten Arbeiten (z.B. BEVEN U. HORNBERGER 1982; NIEHOFF 2001; SEIDLER et al. 2005) den Schwerpunkt von der Modifikation und Verbesserung des Modells auf die Ergebnisse. Es wird in vielfältiger Weise überprüft, dass das Modell den Anforderungen der jeweiligen Fragestellung genügt. Danach wird es als gegeben vorausgesetzt, dass die Modellierung interpretierbar ist. In diese Kategorie fällt die große Mehrzahl der Veröffentlichungen, darunter Arbeiten aus vielfältigen Bereichen, beispielsweise Waldumbau, Aufforstung oder Abholzung (z.B. KLÖCKING U. HABERLANDT 2002; IRRGANG 2003; KLEINHANS 2003) oder Ver- und Entsiegelung (beispielsweise TANG et al. 2005).

Wie bereits in Abschnitt 3.1 angemerkt wurde, ist die Erstellung von Landnutzungsszenarien nicht trivial. Die Veränderung von Landnutzung hängt in starkem Maße von den politischen und ökonomischen Randbedingungen ab, die aber in der Regel mittel- und langfristig nur sehr schwer einzuschätzen sind, ja sogar häufig von sehr kurzfristigen Entscheidungen und den erwähnten „sozioökonomischen Überraschungen“ geprägt sind. Die Landnutzungsveränderungen folgen nur zu einem kleinen Teil klar erkennbaren Regeln. In den vergangenen Jahren sind mehrere Hilfswerkzeuge zur Erstellung von Landnutzungsszenarien entwickelt worden (z.B. FRITSCH 2002; GÖMANN et al. 2003; PONCE-HERNANDEZ et al. 2004). In der Regel sind diese Werkzeuge aber an bestimmte Randbedingungen und vor allem an bestimmte Skalen angepasst. Zudem sind die modellierten Szenarien in vielen Fällen abstrakt und großräumig gemittelt. Die modellierten Einzugsgebiete sind in der Regel deutlich über 1000 km^2 groß oder beziehen sich auf sehr kleine räumliche Einheiten wie einzelne Ackerschläge. Dasselbe gilt für die Auflösung der Modelle und verwendete Rasterweiten. Talsperren spielen selten eine Rolle. Das durch FRITSCH (2002) entwickelte Tool LUCK kann Szenarien für mesoskalige Einzugsgebiete entwerfen, doch auch diese sind im Untersuchungsgebiet als wenig realistisch anzusehen. Es ist also aus vielerlei Gründen nicht möglich, automatisiert Landnutzungsszenarien für die vorliegenden Bedingungen zu erstellen. Deshalb wurden im vorliegenden Fall einzelne realistische Szenarien für das Untersuchungsgebiet entwickelt, die mit WaSiM-ETH berechnet wurden. Anhand dieser Szenarien kann die Eignung des Modells für die jeweiligen Szenariotypen analysiert werden und bei Eignung können die Folgen bestimmter Landnutzungsveränderungen für das Untersuchungsgebiet abgeschätzt werden.

3.2.2 Methodik und Ergebnisse

Agrarsektor, Teil 1: Trends bei Ackerfrüchten

Die ersten Veränderungen in der Landnutzung, die betrachtet werden sollen, betreffen den Ackerbau bzw. die Feldfrüchte. Da es wegen des großen Erfassungsaufwandes und Datenschutzbestimmungen der Kommunen nicht möglich ist, die Einzelbelegungen der Felder im gesamten Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigte Weißeritz in der Vergangenheit nachzuvollziehen und zusätzlich die Vorhersage von Ackerfrüchten für einzelne Jahre mit sehr großen Unsicherheiten behaftet ist, wurde in Einvernehmen mit den Arbeitsgruppen Bodenschutz und Umweltmanagement der Weg gewählt, die Standardfruchtfolgen des Gebietes herauszuarbeiten und für die Modellierungen zu verwenden. Die tatsächlich vorherrschenden Fruchtfolgen richten sich nach einer Vielzahl von Einflussfaktoren (Marktpreise, Quoten, Lieferverträge, Futterbedarf, Arbeitskapazität...), die mit Standardfruchtfolgen aufgrund ihres mittelnden Charakters nicht alle zu fassen sind. Daneben können Fruchtarten, die nur ge-

ringe Anbaubedeutung im Gebiet haben, nur mangelhaft abgebildet werden. Auch lokalen und betriebsspezifischen Besonderheiten kann nicht Rechnung getragen werden. Das betrifft besonders Betriebe, die einen hohen Anteil einzelner Kulturen anbauen (z.B. Kartoffeln oder Zuckerrüben). Auf der anderen Seite trägt diese Verallgemeinerung der Auflösung der Modellierung mit WaSiM-ETH Rechnung. Es ist nicht sinnvoll, genaueren input in das Modell einzugeben, als von ihm verarbeitet werden kann. Zudem sind die erarbeiteten Standardfruchtfolgen gerade wegen der ihnen innewohnenden Verallgemeinerung robuster gegenüber kurzfristigen Veränderungen, dabei aber noch sehr realistisch und nachvollziehbar. Sie können im Idealfall auf ähnliche Gebiete übertragen werden.

Von der Landesanstalt für Landwirtschaft in Leipzig (schriftl. Mitt., NITZSCHE, 11.06.2004) erhielten wir die in Tabelle A.4 in Spalte A aufgelisteten Angaben. Bei Aufstellung der Fruchtfolgen wurden die nach Anbauumfang wichtigsten Kulturen berücksichtigt und auf acker- und pflanzenbaulich mögliche Kombinationen geachtet. Zum Vergleich wurden Informationen von NEUMANN (schriftl. Mitt., Staatliches Amt für Landwirtschaft Pirna, 01.07.2004) und aus BIANCHIN (2003) herangezogen, aus denen hervorgeht, wie die Ackerflächen in bestimmten beispielhaften Orten bebaut wurden. In den unteren Lagen sind dies die Orte Hänichen, Rabenau und Seifersdorf, in den mittleren Lagen Reinholdshain, Schmiedeberg und Sadiesdorf und in den oberen Lagen Liebenau, Altenberg und Zinnwald. In Spalte B sind jeweils die Ackerfrüchte aufgelistet, die in den genannten Orten über mehrere Jahre bis heute regelmäßig angebaut wurden und anteilig die größten Flächen einnehmen. Stilllegungsflächen und Dauergrünland wurden außer Acht gelassen, da sie durch das ATKIS-DLM ohnehin getrennt erfasst sind. Schließlich wurden unter Berücksichtigung der Angaben der Landwirte in verschiedenen Befragungen, eigenen Erfahrungen in dem Gebiet und den Anbauzeiten der verschiedenen Früchte in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Boden- und Gewässerschutz innerhalb des EMTAL-Projekts die in Tabelle A.4 in Spalte C aufgelisteten Standardfruchtfolgen für die drei verschiedenen Höhenstufen erstellt.

Im Allgemeinen äußern sich die Veränderungen in der Anbaustruktur der Jahre nach der politischen Wende vor allem im Verlust des Anteils der Anbaufläche für Futterpflanzen, Kartoffeln und Zuckerrüben und des Zuwachses des Anbaus von Raps, Triticale, Körnermais und Weizen (MITTELBACH 1992; VOIGTLÄNDER et al 2001). Dieser für Sachsen festgestellte Trend setzt sich im Weißeritzkreis fort. Dort kann ein deutlicher Rückgang des Anteils des Dauergrünlands von 1989 bis 1993 festgestellt werden, der auf eine steigende Ausweisung von Grünland als Siedlungs- und Verkehrsfläche sowie Aufforstungsfläche zurückgeführt werden kann. Nach 1993 stabilisiert sich der Anteil an Dauergrünland auf annähernd gleich bleibendem Niveau (BIANCHIN 2003). In der Vergangenheit wurden und noch heute werden unrentable Standorte aufgegeben. Zusätzlicher Anreiz für (konjunkturelle) Flächenstilllegungen schaffen die an diese als Bedingung gekoppelten Flächenprämien. Dazu gibt es von der EU Stilllegungsprämien für permanent umgewidmete Flächen, wobei es in beiden Fällen erlaubt ist bzw. sogar noch zusätzlich gefördert wird, Energiepflanzen anzubauen (BICKER 1998). Heute allerdings werden nur noch sehr selten Ackerstandorte aufgegeben, da aufgrund rückgängiger Viehzahlen Grünlandbewirtschaftung nicht mehr rentabel ist (BIANCHIN 2003). Es kann davon ausgegangen werden, dass alle noch verbliebenen Ackerstandorte erhalten bleiben.

Folgende Muster sind im Untersuchungsgebiet zu erkennen:

1. Roggen-, Hafer-, Kartoffel-, Futterpflanzen- und Zuckerrübenanbaus gehen zurück zugunsten des Getreide-, Mais und Rapsanbaus (LANDWIRTSCHAFTSAMT PIRNA 2003; STAATLICHE ZENTRALVERWALTUNG FÜR STATISTIK 1990). Die Veränderungen im Anbau dieser Feldfrüchte sind Ausdruck veränderter Förderbedingungen und Agrarmarktstrukturen.
2. Winterweizen ist die dominierende Kultur in den tieferen Lagen, fehlt aber vollständig oberhalb 600 m und wird schon in den mittleren Lagen in deutlich reduziertem Umfang angebaut. Durch neue Züchtungen und die Verwertung als Energiepflanze wird der Weizen seit Mitte der 90er Jahre für Landwirte in mittleren Höhenlagen interessanter. Aufgrund der heutigen Förderpraxis und den momentan zu erzielenden Gewinnen ist zu erwarten, dass der Anbau von Weizen vor allem in den unteren Lagen weiter zunimmt (mündl. Mittl. SCHMIDT, Landesanstalt für Landwirtschaft Leipzig, 11.06.2004).
3. Der Maisanbau verdreifachte sich von 1989 bis 1993, um dann wieder leicht zurückzugehen (LANDWIRTSCHAFTSAMT PIRNA 2003; STAATLICHE ZENTRALVERWALTUNG FÜR STATISTIK 1990). Tendenziell geht der Silomaisanteil in den tieferen Lagen zurück, wenn er nicht von einzelnen Betrieben, die in größerem Umfang Vieh halten, als Futterbasis benötigt wird. Nach NITZSCHE (schriftl. Mittl. 01.07.2004, Landesanstalt für Landwirtschaft Leipzig) hat der Körnermaisbau erst deutlich unter 400 m größere Anbaubedeutung. Allerdings versuchen die Landwirte verstärkt, neue Maissorten auch in höheren Lagen anzubauen, so dass in Zukunft wahrscheinlich mit einem höheren Maisanteil auch in den mittleren und oberen Lagen gerechnet werden muss.
4. Winterraps wird in allen Höhenlagen angebaut. Zusätzlich gewinnt die Produktion von Winterraps auf Stilllegungsflächen zur Erzeugung nachwachsender Rohstoffe an Bedeutung. Dazu kommen seine positiven Wirkungen auf den Boden, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die angebaute Menge an Raps mindestens gleich bleiben wird (BIANCHIN 2003).
5. Der Anbau von Hackfrüchten nahm deutlich und kontinuierlich von 1989 bis 2002 ab. Der Anbau von Kartoffeln und Zuckerrüben hat im Untersuchungsgebiet aufgrund der Böden, der abnehmenden Viehbestände und dem Wegfall von Subventionen nur sehr geringe Bedeutung (BIANCHIN 2003), die wahrscheinlich noch weiter sinken wird.
6. Der Anbau von Futterpflanzen, darunter vor allem Feldgras und Klee gras, nahm im Untersuchungsgebiet ab und hat nur geringe Bedeutung. Nach NITZSCHE (schriftl. Mittl. 01.07.2004, Landesanstalt für Landwirtschaft Leipzig) gewinnen aber die Futterpflanzen genauso wie Eiweißpflanzen, insbesondere Erbsen zur Körnernutzung, in mittleren und höheren Lagen an Bedeutung. Ein steigender Anbau ist aufgrund der rückgängigen Viehzahlen trotzdem nicht zu erwarten.
7. Der Rinderbestand in Sachsen verringerte sich von 1989 bis 2001 um 58 % und der Milchkuhbestand um 55 % (BIANCHIN 2003). Auch die Schweinezucht ging stark zurück. Da aufgrund der Förderbedingungen und des anhaltend geringen Milchpreises weitere Rückgänge des Milchviehs zu erwarten sind, wird dies Auswirkungen auf die Grünland- und Weidewirtschaftung haben, die sich besonders darin äußern werden, dass diese Flächen stagnieren, wenn nicht sogar in Zukunft weiter abnehmen werden.

Es ist damit zu rechnen, dass sich diese Trends zumindest in den nächsten Jahren fortsetzen werden, auch wenn aufgrund des starken Einflusses der sich verändernden Förderpolitiken auf Länder-, Bundes- und EU-Ebene nur relativ kurzfristige Prognosen abgegeben werden können.

Bei der Modellierung dieses Szenarios hat sich allerdings gezeigt, dass die aufgezeigten real sehr geringen Veränderungen in den gewählten Skalen und mit dem gewählten Modell keine Unterschiede zum aktuellen Stand ergeben. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass im Hinblick auf die aufgezeigten Trends im Anbau von verschiedenen Ackerfrüchten keine signifikanten Veränderungen im Wasserhaushalt des Untersuchungsgebiets zu erwarten sind bzw. dass diese von Veränderungen anderer Art, sei es im Forst, in der Siedlungsstruktur oder durch Fördermaßnahmen, die beispielsweise die Anbautechniken betreffen, überlagert werden.

Agrarsektor, Teil 2: Agrarförderung: Konservierende und konventionelle Bodenbearbeitung

Nach BIANCHIN (2003) ist eine durchgehend hohe Bereitschaft zur Veränderung der Anbaustrukturen oder der Methodik in der Tierzucht aufgrund von Förderprogrammen vorhanden. Bei der Befragung der Landwirte im Untersuchungsgebiet durch BIANCHIN (2003) und durch eigene Beobachtungen und Erfragungen kann der Schluss gezogen werden, dass die zukünftige Entwicklung der Flächennutzung stark von der Förderpolitik der Europäischen Union, der Bundesrepublik Deutschland und des Freistaates Sachsen abhängt.

Im Untersuchungsgebiet sind neben staatlichen Förderprogrammen wie dem Programm zum Naturschutz und Erhalt der Kulturlandschaft (NAK) und dem Kulturlandschaftsprogramm (KULAP), die vor allem von privaten Betrieben, im Haupt- genauso wie im Nebenerwerb, in Anspruch genommen werden, vor allem in den unteren und mittleren Lagen EU-Förderprogramme von Bedeutung. Dazu gehören im Untersuchungsgebiet insbesondere Flächenzahlungen für Eiweißpflanzen und Getreide sowie für Ölsaaten und Stilllegungsprämien für nachwachsende Rohstoffe, Raps und Miscanthus (Schilfgras). Dazu kommen Tierprämien für Mutterkühe, Schlachtpremien für Großrinder und Kälber und Sonderprämien für männliche Rinder (BIANCHIN 2003). Welches Förderprogramm gewählt wird, hängt meist mit finanziellen Erwägungen zusammen. Da die meisten und lukrativsten Fördermittel flächen- bzw. mengengebunden und nicht betriebsgebunden vergeben werden, sind insbesondere die Betriebe juristischer Personen durch große Flächen und Stallanlagen in der Lage, die Fördermittel effektiv auszunutzen.

Durch die neuen Förderstrategien im Rahmen der Luxemburger Beschlüsse des EU-Agrarrates vom Juni 2003, die am 01.01.2005 in Deutschland in Kraft traten, wurde eine Wende in der Agrarpolitik der Europäischen Union eingeleitet. Ein Kernelement der Beschlüsse ist die Entkopplung der Direktzahlungen von der Produktion. Dadurch soll unter anderem die bisher durch Subventionen geförderte Überschussproduktion verhindert werden (BMVEL 2004). Die Wahl des erzeugten Produkts hängt nun stärker von den Marktbedingungen ab. Daneben erhalten Landwirte in Deutschland zusätzlich Zahlungen für Leistungen, die der Allgemeinheit zugute kommen. Dazu zählen der Erhalt der Landschaften, mehr Natur- und Umweltschutz sowie artgerechte Tierhaltung (BMVEL 2004). Auf der anderen Seite werden Zahlungen an Landwirte, die bestimmte von Bund und Ländern festgelegte Mindeststandards nicht einhalten, eingeschränkt bzw. eingestellt. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Landwirtschaft im Erzgebirge sind aktuell noch schwer absehbar und sollen deshalb in der Szenarienbildung nicht berücksichtigt werden.

Im Freistaat Sachsen nimmt das Förderprogramm „Umweltgerechte Landwirtschaft“ eine wichtige Stellung ein. Ziel ist die Erhöhung des Anteiles konservierend bearbeiteten Ackerlandes. In den Jahren 2002 und 2003 wurden 26,8 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen in Sachsen durch das Programm gefördert. Nach SCHMIDT (mündl. Mittl., Landesanstalt für Landwirtschaft Leipzig, 11.06.2004) betrieben im Jahr 2004 insgesamt bis zu 40 % der Landwirte konservierende Landnutzung. Die Differenz von 13,2 % erklärt sich dadurch, dass viele Landwirte aus verschiedenen Gründen die Förderung nicht in Anspruch nehmen können, aber dennoch die bodenschonende Bewirtschaftungsweise eingeführt haben. Es ist damit zu rechnen, dass der Anteil der konservierend bearbeiteten Fläche in Zukunft weiter ansteigt.

Die konservierenden Landbautechniken sind durch eine reduzierte Bearbeitungsintensität gekennzeichnet. Dazu gehört vor allem die nichtwendende, d.h. pfluglose Bodenbearbeitung. Im Gegensatz zur Direktsaat wird der Boden bei konservierenden Anbaumethoden mit Grubbern, Scheibeneggen oder Fräswellen gemischt. Dadurch bildet sich ein stabiles Bodengefüge mit guter Tragfähigkeit aus (ESTLER U. KNITTEL 1996; GRUBE 2003), zudem kann der Boden durch die ganzjährige Bodenbedeckung mehr Wasser aufnehmen, Verschlammung und Verkrustung werden deutlich vermindert. Der Oberflächenabfluss wird reduziert und dadurch Erosion weiträumig vermieden (LÜTKE-ENTRUP U. SCHNEIDER 2003; NITZSCHE et al. 2000). Nach Gesprächen mit den Landwirten vor Ort und Vertretern des Landesamts für Landwirtschaft kann festgestellt werden, dass die Änderungen in Ertrag, Wurzeltiefen und -dichten sowie Wuchshöhen weniger stark davon abhängen, ob der Landwirt in konventioneller oder konservierender Weise arbeitet, sondern vielmehr davon, wie er mit den verschiedenen Bedingungen unterschiedlicher Standorte und Ackerpflanzen umgeht. Dies entspricht der großen Variabilität gemessener und modellierter Veränderungen, die bei Sichtung der Literatur zu konservierender Bodenbearbeitung zu Tage treten. So werden je nach Intention des Autors teilweise extreme Veränderungen angegeben (vgl. HERTWIG et al. 2004), die meisten Abweichungen hängen jedoch weniger mit den Intentionen als mit den sehr unterschiedlichen Boden- und Feuchteverhältnissen im jeweiligen Versuchszeitraum zusammen. Im Folgenden wird versucht, eine Parametrisierung für das Untersuchungsgebiet zusammenzustellen, die sich auf vorhandene Literatur stützt, da bisher keine Messungen im Einzugsgebiet der Weißeritzen durchgeführt wurden.

Laut GKB (2005) ist die konservierende Bearbeitung von Ackerböden für alle Bodentypen geeignet, so dass keine Vorauswahl der Böden getroffen werden muss, und sie kann in allen Fruchtfolgen angewandt werden. Veränderungen ergeben sich in Details, die zwar den Anbau, nicht aber die Modellierung betreffen, wie die Veränderung der Reihenfolge von Raps nach Getreide in der Fruchtfolge und umgekehrt. Deshalb kann für dieses Szenario angenommen werden, dass die gesamte landwirtschaftliche Fläche konservierend bearbeitet wird.

Durch die schonendere Bearbeitung bei konservierenden Techniken, d.h. breitere Reifen, schonenderer Maschineneinsatz usw. wird der Aufbau eines quasi natürlichen Gefüges begünstigt (GRUBER 1993). Kennzeichen dafür sind eine vergleichsweise höhere Lagerungsdichte, die zu einer besseren Befahrbarkeit bzw. höheren Belastbarkeit führt. GROSS (1996) führt aus, dass die Bodenbearbeitungsintensität erheblichen Einfluss auf die Aggregatstabilität hat, insbesondere mit sinkendem Tongehalt der Böden. Je niedriger die Bearbeitungsintensität und der Tongehalt des Bodens, desto höher war in der Arbeit die festgestellte Aggregatstabilität und dementsprechend niedriger die Verschlammungsneigung der entsprechenden Standorte. Durch Versuche von BUCHNER (2003), GRUBE (2003) und RICHTER U. TERBRÜGGE (1996) auf verschiedenen Böden wird ergänzt, dass unterhalb von etwa 20 bis 40 cm, abhängig von

der (vorangegangenen) Bearbeitungstiefe am jeweiligen Standort, die Verteilungen von Bodenwiderstandswerten aller Anbauformen etwa gleich ist. Darüber können sie aber erheblich abweichen. Durch wendende Techniken entsteht eine sehr gleichmäßige Dichteverteilung des Bodens bis etwa 15 cm und dann ein rasches Ansteigen der Bodenwiderstandswerte. Mischende und Direktsaattechniken zeichnen sich dagegen durch ein gleichmäßiges Ansteigen der Bodendichten aus. Bei letzterem zeigten sich allerdings erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Ackerstandorten. Es ist offensichtlich nicht der Fall, dass dadurch bei wendenden Techniken die Infiltrationskapazität in jedem Fall höher ist. GRUBE (2003) und TERBRÜGGE U. ABELSOVA (1999) konnten nachweisen, dass zwar bei anfänglichen Infiltrationsvorgängen bei konventioneller Bodenbearbeitung die Leitfähigkeit etwa der konservierender Verfahren entspricht bzw. etwas höher ist, aber dann durch Verschlämmung sehr stark abnimmt, so dass trotz dichter Böden bei konservierender Bodenbearbeitung im Mittel eine deutlich höhere Leitfähigkeit vorliegt. Nach TERBRÜGGE U. ABELSOVA (1999) ist die Leitfähigkeit pfluglos bearbeiteter Böden bei Niederschlägen über 19 mm um das doppelte bis dreifache höher als bei wendenden Verfahren. Deshalb wird für die Modellierung der k_f -Wert auf das doppelte angehoben, bei der Auswertung aber nur Niederschlagsereignisse einer Mindestintensität von 10 mm berücksichtigt. Dies wird als gutes Mittel zwischen der Reaktion auf verschiedenen intensive Niederschläge in Kombination mit den vorliegenden geringmächtigen Böden angesehen. Da durch konservierende Landwirtschaft die Dichtezunahme mit der Tiefe in kleineren Tiefen im Gegensatz zu konventioneller Bewirtschaftung statt findet und darunter gleichmäßiger erfolgt, wurde der Parameter k_{rec} (Abnahme der gesättigten Leitfähigkeit mit der Tiefe) um 10 % vergrößert.

In Bezug auf die Bodenbiologie zeigt sich in allen diesbezüglichen Arbeiten ein deutlicher Anstieg der Anzahl von verschiedenen Regenwürmern und damit von Regenwurmängen. Die Makroporen solcher Standorte sind durch höhere Kontinuität gekennzeichnet (GRUBE 2003; JOSCHKO et al. 1996; NITZSCHE et al. 2000; RICHTER U. TERBRÜGGE. 1996). Diese wird durch die sogenannte drainage density d_r beschrieben. Der Parameter stellt die Menge von Makroporen pro Rasterzelle dar. Sie wird für die Modellierung deshalb leicht erhöht. Die Steigerung der Bodenfruchtbarkeit führt zu einem dichteren Pflanzenbewuchs mit dichtem und tiefer reichendem Wurzelsystem (RICHTER 1995b). Eine erhöhte Durchwurzelung ergibt sich zudem durch den erhöhten Anteil organischer Substanz, der erhöhten mikrobiellen Aktivität und der größeren Lockerung des Oberbodens durch Regenwürmer. Durch eine Änderung des Wurzeldichteparameters von 1 auf 0 wird die größere Wurzeldichte und die gleichmäßigere Verteilung der Wurzeln betont. Aus der Aussaat von Zwischensaat und der Mulchsaat bzw. der Stoppelrotte und der Spreuverteiler ergibt sich eine Erhöhung des Vegetationsbedeckungsgrades. Zur Entwicklung der Bodenfeuchten gibt es keine Arbeiten, die statistisch genügend abgesicherte Daten bereitstellen. In der Tendenz führt konservierende Bodenbearbeitung zu im Mittel etwas höheren Bodenfeuchten (GRUBE 2003). Dieser Wert wurde nicht parametrisiert. Es ergeben sich also folgende Veränderungen in den Parametern:

- Erhöhung des k_f -Wertes auf das Zweifache
- Vergrößerung von d_r um 2
- Erhöhung von k_{rec} um 10 %
- Erhöhung des Vegetationsbedeckungsgrades an d1 und d4 um 10 %
- Veränderung des Wurzeldichteparameters von 1 auf 0

Es ist festzustellen, dass die beiden benachbarten Einzugsgebiete verschieden auf die Änderung in der Bodenbearbeitung reagieren. Während in Ammeldorf der Gesamtabfluss bei konservierendem Anbau im Mittel um 1,4% signifikant gegenüber konventionellem Anbau erhöht ist, stagniert er im Einzugsgebiet Dippoldiswalde allgemein. Die zu beobachtenden leichten Abnahmen im Gesamtabfluss sind hier nicht signifikant. Auch die Reaktion der Abflusskomponenten ist unterschiedlich. Während im Einzugsgebiet des Pegels Ammeldorf der Basisabfluss bei pflugloser gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung signifikant abnimmt und sich der Zwischenabfluss signifikant erhöht, ist beim Einzugsgebiet des Pegels Dippoldiswalde nur die Verringerung des Direktabflusses signifikant. Im Gegensatz zu Ammeldorf zeigt sich im Mittel eine (nicht signifikante) Steigerung des Basisabflusses. Die reale Evapotranspiration nimmt im Einzugsgebiet des Pegels Ammeldorf signifikant ab, während die Unterschiede im Einzugsgebiet des Pegels Dippoldiswalde nicht signifikant sind.

Verwertbare Aussagen von einer veränderten Landnutzung auf den Wasserhaushalt und einzelne Abflusskomponente im Sinne eines Hochwasser- oder Erosionsschutzes bekommt man erst in kleineren Zeitskalen. Die Unterschiede in den täglichen Abflussreihen sind bei allen drei Abflusskomponenten beim Pegel Ammeldorf signifikant, bei Pegel Dippoldiswalde nicht signifikant. Die Aussagekraft ist durch die große Stichprobenmenge im Gegensatz zu den Jahressummen hoch und bezieht sich vor allem auf Hochwasserspitzen.

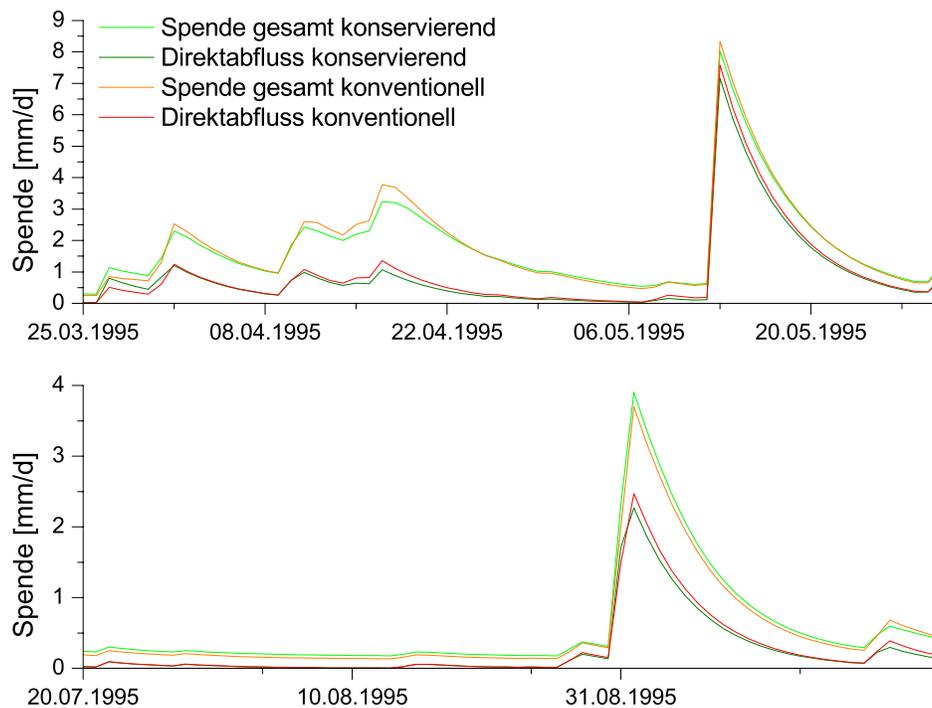


Abbildung 3.1: modellierter Tagesgang von Direktabfluss und Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Schwarzbaches bei konservierender und konventioneller Landnutzung

Zwei repräsentative Ereignisse in zwei Teileinzugsgebieten der Roten und der Wilden Weißeritz sollen im Folgenden die Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsarten verdeutlichen. Dabei können aus oben genannte Gründen lediglich die Ergebnisse im Hochwasserbereich ausgewertet werden. Im Einzugsgebiet des Schwarzbachs, der nördlich der Stadt Dippoldiswalde in die Rote Weißeritz mündet, dominiert landwirtschaftliche Fläche, so dass auch im täglichen Zeitschritt Unterschiede in den Ganglinien, die sich in den großen Einzugsgebieten stark relativieren, herausgearbeitet werden können. Für die Darstellung eines Ereignisses in Stundenschritten wurde der Weißbach gewählt, dessen Einzugsgebiet durch gemischte Nutzung charakterisiert ist. Er mündet bei der Ortschaft Seyde in die Wilde Weißeritz (vgl. Abbildung 3.3).

In den beiden in Abbildung 3.1 dargestellten Zeiträumen ist der Durchfluss in Tagesschritten als Abflussspende dargestellt. Zudem wurde der modellierte Direktabfluss abgebildet. Als Beispiele wurden zwei Ereignisse gewählt, bei denen sich konservierende Bearbeitung verschieden auswirkt. Bei der Abflussspitze Mitte Mai 1995 zeigt sich, dass sich der Direktabfluss und der Gesamtabfluss verringern. Die durch die vorhergehende Schneeschmelze verursachte hohe Vorsättigung des Bodens verändert die Füllung des Bodenwasserspeichers und den Interflow bei konservierender gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung kaum; die höhere Infiltrationskapazität lässt jedoch zu, dass der Boden etwas mehr Wasser als bei der konventionellen Bearbeitung aufnehmen kann, so dass der Direktabfluss leicht sinkt. Bei dem Ereignis Anfang September 1995 steigt der Gesamtabfluss, was aber in diesem Fall offensichtlich nicht auf gestiegenen Direktabfluss zurückzuführen ist. Hier zeigt sich die Auswirkung des durch bessere Porengängigkeit hervorgerufenen höheren Zwischenabflusses.

Im Mittel steigt der Gesamtabfluss bei konservierender gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung an. Dieser Anstieg ist je nach relativer Zusammensetzung des Einzugsgebiets verschieden ausgeprägt, so ist er am Schwarzbach deutlich, in Ammelsdorf etwas abgeschwächt und am Pegel Dippoldiswalde kaum zu erkennen. Hochwässer werden allgemein etwas höher, im Mittel um 5 % in allen Einzugsgebieten. Das Verhalten in Einzelfällen kann allerdings deutlich abweichen (vgl. Abbildung 3.1), so sind häufig Schneeschmelzhochwässer im Frühjahr bei konservierender Bearbeitung niedriger als bei konventionellem Landbau. Da der Direktabfluss in der Regel bei konservierender Bodenbearbeitung niedriger ist als bei der Bodenbearbeitung mit Pflug und sich der Basisabfluss nicht signifikant verändert, sind diese gestiegenen Abflüsse auf die Erhöhung des Zwischenabflusses zurückzuführen. Die wenigen Ausnahmen gesteigener Direktabflüsse sind Zeiträume mit starker Vorsättigung des Bodens und darauf erfolgenden starken Niederschlägen. Der bei konservierender Bodenbearbeitung in allen betrachteten Einzugsgebieten fast durchgehend höhere Zwischenabfluss ist teilweise zurückzuführen auf die höhere Makroporendichte, vor allem aber auf die geringmächtigen Böden und steilen Hangneigungen, die ein schnelles Abfließen der Niederschläge begünstigen und die vermehrte Tiefensickerung, die in anderen Gebieten bei konservierender Bodenbearbeitung auftritt, verhindern.

Die reale Evapotranspiration ist bei konservierender Bodenbearbeitung bis auf wenige Tage im August/September 1999 geringer als bei konventioneller Bodenbearbeitung. Der Wassergehalt des Bodens ist über alle Einzugsgebiete gemittelt leicht erhöht. Im Einzugsgebiet Schwarzbach sind die Veränderungen der Bodenfeuchte mit -0,65 % im durchwurzelten Raum und -1,65 % in der gesamten ungesättigten Zone im jährlichen Mittel sehr gering und nicht signifikant. Bei Betrachtung der saisonalen Veränderungen zeigt sich eine deutliche, aber nicht signifikante, Zunahme der Bodenfeuchte in Frühjahr und Frühsommer, die durch eine Abnahme der Bodenfeuchte in Herbst und Winter ausgeglichen wird.

Durch Modellierung in Stundenschritten kann deutlich differenzierter dargestellt werden, welche Veränderungen im Abflussgeschehen, vor allem bei einzelnen Abflussspitzen, bei konservierender Bodenbearbeitung erfolgen können. Genauso wie beim Schwarzbach verändert sich bei dem gewählten Ereignis am Weißbach die Tagessumme der Abflüsse kaum, dabei nimmt die Abflusskomponente Zwischenabfluss etwas zu, während der Direktabfluss etwas abnimmt. In Abbildung 3.2 ist jedoch zu erkennen, dass ein signifikanter Einfluss auf die Hochwasserspitze vorhanden ist, der fast ausschließlich auf eine starke Vergleichmäßigung des Direktabflusses zurückzuführen ist. Dies ist neben stärkerer Infiltration, die sich auf die Menge des Direktabflusses auswirkt, vor allem auf die gesteigerte Vegetationsbedeckung zurückzuführen, die die Fließgeschwindigkeit des Wassers abbremst sowie auf eine Erhöhung der Anteile von Sättigungsflächenabfluss gegenüber Infiltrationsüberschuss.

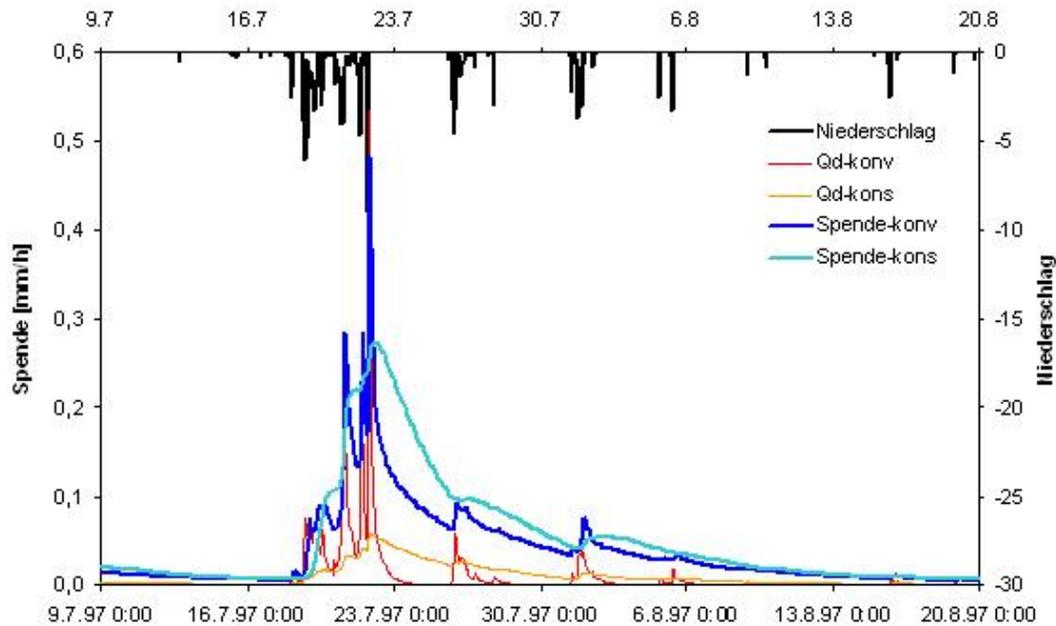


Abbildung 3.2: modellierte stündliche Abflussganglinie von Direktabfluss und Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Weißbaches bei konservierender (kons) und konventioneller (konv) Landnutzung. Spende = (Gesamt-)Abflussspende, Q_D = Direktabflussspende

Die Ergebnisse der Modellierungen müssen in Beziehung gesetzt werden mit den Veränderungen der Parameter, auch wenn Beobachtungen bei Freilandversuchen in der oben zitierten Literatur die Befunde sowohl in der tageweisen wie stündlichen Modellierung, soweit sie vergleichbar sind, bestätigen. So wird durch den höheren Vegetationsbedeckungsgrad zunächst die Interzeption erhöht. Dadurch wird das Auftreffen des Niederschlags auf den Boden verzögert, aber insgesamt nicht bedeutend niedriger. Zusätzlich wird über die veränderte Wurzelverteilung die Transpiration der Pflanzen erhöht. Was über die Blattflächen mehr verdunstet und transpiriert, wird im Modell offensichtlich durch den beschattenden und speichernden Effekt der Pflanzen auf den Boden überkompensiert. Die für Evaporation verfügba-

re Wassermenge sinkt dadurch. So ist im Endeffekt die reale Verdunstung niedriger als bei kleineren Bedeckungsgraden. Der Direktabfluss sinkt mit steigendem k_f -Wert, da die Infiltrationsrate erhöht wird. Für den Bodenspeicher und damit die Infiltration steht also mehr Wasser zur Verfügung, das durch die vermehrten Grobporen und den insgesamt erhöhten k_f -Wert besser vertikal, aber auch horizontal abgeleitet wird. In den geringmächtigen Böden des Osterzgebirge mit starken Hangneigungen überwiegt teilweise die horizontale Komponente, so dass es zu vermehrtem Interflow kommt. Den Praxisversuchen in der Literatur nach zu urteilen, wird zudem mehr Wasser im Boden selbst zurückgehalten. Dies ist bei der Modellierung im Untersuchungsgebiet mit WaSiM-ETH nicht immer der Fall. Das ist nicht unplausibel, da die Berechnungsversuche in der Regel bei deutlich geringeren Hangneigungen durchgeführt wurden und so das Wasser weniger schnell horizontal bzw. hangabwärts abgeführt wird. Es wäre von großem Nutzen, im Untersuchungsgebiet oder ähnlichen Regionen Berechnungsversuche durchzuführen, um die Modellierungsergebnisse zu überprüfen.

Forstwirtschaft

Insbesondere die Altersstruktur des Waldes bzw. Forstes sowie sein Arteninventar haben großen Einfluss auf die verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten. Dabei differieren die meisten Einflussgrößen wie Durchwurzelungstiefe, Wuchsdichte und -höhe, Blattflächenindices und Oberflächenrauigkeiten sowie die durch die Bäume entstehenden Veränderungen in der physikalischen Bodenstruktur sehr stark innerhalb geringer räumlicher Entfernungen. In der Wasserhaushaltsmodellierung sind der Genauigkeit der Nachbildung dieser Prozesse Grenzen gesetzt. Bereits die vorgegebenen Rastergrößen im vorliegenden Fall von mindestens 20 m, in den meisten Anwendungsfällen aber zwischen 100 m und 1000 m, lassen es in mesoskaligen Einzugsgebieten in Mittelgebirgen, die in der Regel von kleinräumigen Strukturen geprägt sind, nicht zu, subskalige vertikale und horizontale Strukturen genau abzubilden. Zudem können vertikale Effekte in verschiedenen Waldtypen in der genutzten Modellversion selbst bei kleineren Rasterweiten nicht berücksichtigt werden. Erst in der aktuell neuesten Version von WaSiM-ETH, die zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit allerdings noch nicht allgemein verfügbar war, können Krautschicht, Strauchschicht und Kronen eigenständig parametrisiert werden (SCHULLA U. JASPER 2005).

Die Modellergebnisse bei der Kalibrierung zeigen, dass diese zwangsläufigen Verallgemeinerungen für die Wiedergabe der Niederschlag-Abfluss-Beziehungen in den gewählten räumlichen und zeitlichen Auflösungen kein größeres Problem darstellt. Verschiedene Sensitivitätsanalysen zeigen zudem, dass die Waldverteilung entscheidend für die Modellergebnisse ist (z.B. KOMISCHKE 2005). Für den Einbezug künftiger Entwicklungen muss also berücksichtigt werden, dass weniger die Veränderungen in der Zusammensetzung einzelner Wälder oder in der inneren Struktur modelliert werden können, als vielmehr der Schwerpunkt der Szenarien auf Veränderungen im Waldanteil des Einzugsgebietes, seiner geographischen Verteilung sowie großräumiger und damit in der aktuellen Modellversion parametrisierbarer struktureller Veränderungen liegen muss.

Prognosen in Bezug auf Waldwachstum in den nächsten hundert Jahren werden vor allem durch die Tatsache bestimmt, dass in Wald und Forst Veränderungen im Regelfall nicht innerhalb weniger Monate oder Jahre auftreten, sondern innerhalb von Jahrzehnten. Wichtige Ausnahmen sind Erstaufforstungen und Rodungen. Im Untersuchungsgebiet gibt es aktuell mehrere Waldmehrungsprogramme, die in die Szenarienbildungen eingeschlossen wurden. Ob-

wohl die Bemühungen, den sächsischen Waldanteil von 27 % auf 30 % anzuheben, vor allem auf die stark devastierten Mitteldeutschen und Lausitzer Tagebaufolgelandschaften und die ehemaligen militärischen Liegenschaften konzentriert sind, wurden doch auch in den Bereichen der Forstämter Tharandt, Altenberg und Bärenfels einige Waldmehrungsflächen ausgewiesen (FORSTAMT THARANDT 2001). Nach Informationen aus dem Landesforstpräsidium Sachsen (mündl. Mittl. WERNER 2004 und STETTINIUS 2005) ist es allerdings sehr unwahrscheinlich, dass es in nächster Zeit vermehrt zu Aufforstungen und zu Waldumbau von staatlicher Seite kommen wird, da die neuen Agrarförderrichtlinien die Aufforstung nicht unterstützen und die Waldumbauprojekte momentan zu teuer für die Durchführung sind. Da aber in diesem Bereich reichlich Fördermittel anderer Träger vorhanden sind und auf den ausgewiesenen Aufforstungsflächen das Verfahren der Antragstellung stark vereinfacht worden ist (MUSCHKOWSKI 2006; NABU 2002), konnte tatsächlich beobachtet werden, dass mehrere Landwirte im Untersuchungsgebiet Ackerflächen bzw. stillgelegte Flächen aufforsten. Zudem wurden die Mehrungsflächen, wie im Bericht des FORSTAMT THARANDT (2001) betont wird, bereits unter diesem Gesichtspunkt festgelegt. Mögliche Konfliktpunkte mit Landwirtschaft und Naturschutz wurden herausgearbeitet und die Planungen an bestehende Pläne (u.a. Landesentwicklungsplan Sachsen, Regionalplan Oberes Elbetal/Osterzgebirge, Agrarstrukturelle Vor- bzw. Entwicklungsplanung, Landschaftsplan) angepasst. Aus diesem Grund ist es als realistisch anzusehen, dass die Pläne in näherer Zukunft, wenn auch nicht unbedingt von staatlicher Seite, umgesetzt werden.

Als Extremszenario wurde zudem die potentiell natürliche Vegetation ergänzt. Diese Ausnahme von der sonst strikten Einhaltung der Vorgabe realistischer Szenarien wurde gemacht, da diese Option häufig als bester Fall herangezogen wird. Die Berechnung des Extremszenarios bzw. seine Ergebnisse dienen deshalb der argumentativen Unterstützung in Beratungen über Aufforstung in verschiedenen Gebieten.

Als Grundlage für das berechnete Szenario *Waldmehrung* werden die vorliegenden Pläne des Landespräsidiums für Forstwirtschaft Sachsen (LFP, seit 01.01.2006 Umbenennung in Staatsbetrieb Sachsenforst SBS) verwendet. Die aktuellen Landnutzungskarten wurden mit den angegebenen Flächen des SBS verschnitten, die uns von letzterem freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden (Abbildung 3.3). Im Folgenden werden die modellierten Ganglinien der aktuellen Landnutzung mit den Ergebnissen, die mit veränderten ATKIS-Landnutzungsdaten errechnet wurden, verglichen. Die Zusammensetzung des Waldes ist dabei stark vom jeweilig zuständigen Forstamt und den Besitzern der Flächen abhängig. Da hierzu in den Karten selbst keine konkreten Auskünfte erteilt werden, wird für die Modellierung angenommen, dass der angepflanzte Mischwald von Fichten dominiert wird und zusätzlich Ahorn, Ebereschen, Erlen und Buchen enthält. Diese Waldzusammensetzung stützt sich auf Beobachtungen im Untersuchungsgebiet und Auskünfte des SBS (FORSTAMT THARANDT 2001).

Im Ergebnis zeigte sich, dass durch die Waldmehrung sowohl im Einzugsgebiet Ammeldorf wie im Einzugsgebiet Dippoldiswalde eine signifikante Abnahme des Abflusses zu verzeichnen ist, die allerdings sehr gering (um 1 %) ausfällt. Diese Abnahme ist vor allem auf gesunkenen Zwischenabfluss zurückzuführen, während der Direktabfluss abhängig von der Intensität des Niederschlagsereignisses und der Vorfeuchte des Bodens im Bereich von 1 bis 2 % um 0 schwankt. Die Evapotranspiration ist leicht, aber nicht signifikant erhöht.

Da die Veränderungen in den Waldanteilen der Einzugsgebiete an den Pegeln Dippoldiswalde und Ammeldorf relativ gering sind, werden die meisten Effekte durch die großen Ein-

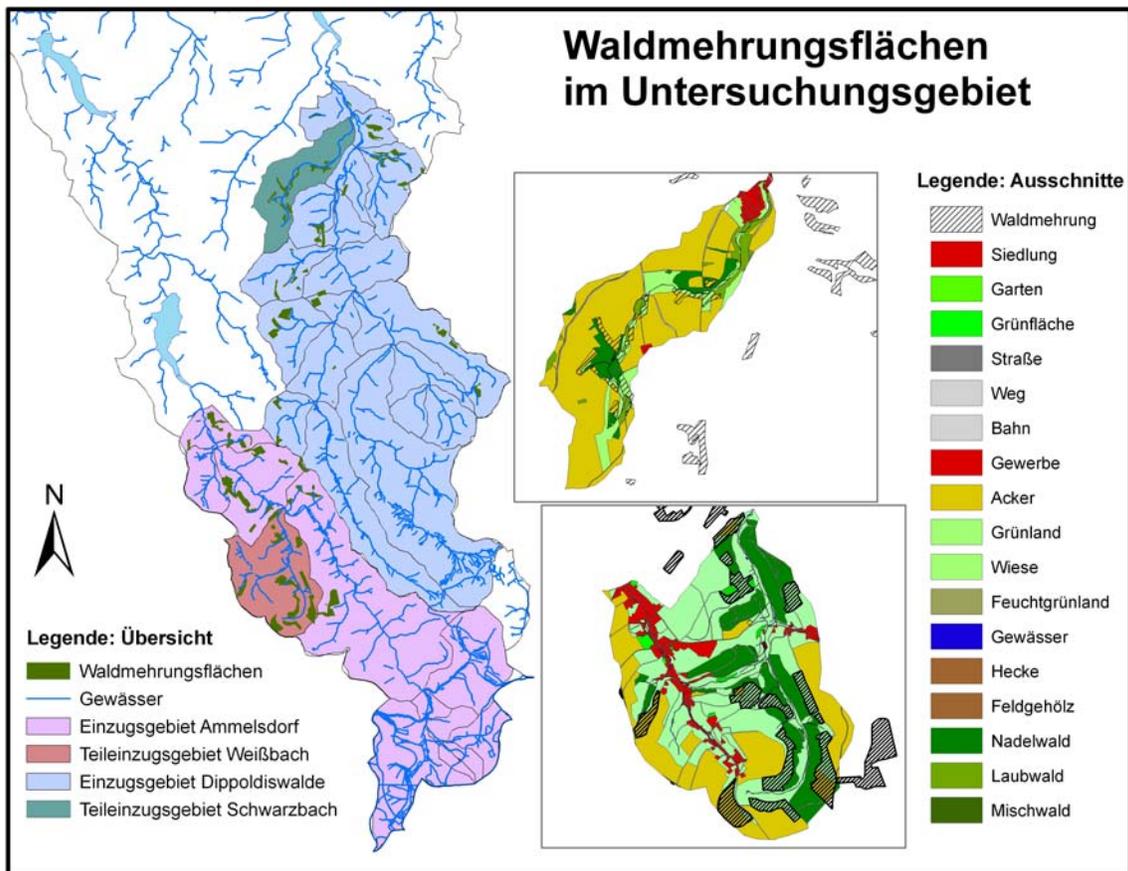


Abbildung 3.3: Waldmehrungsflächen im Untersuchungsgebiet. Datengrundlage: ATKIS-DLM 25, Landesvermessungsamt Sachsen, Genehmigungsnr. 236/03

zugsgebiete stark relativiert. Es ist anzunehmen, dass Veränderungen im Abflussverhalten in kleineren Einzugsgebieten mit größeren Anteilen aufgeforsteter Flächen besser sichtbar sind. Deshalb wurden wie in Abschnitt 3.2.2 die Teileinzugsgebiet des Weißbach und des Schwarzbach für eine nähere Betrachtung ausgewählt. Beim Weißbach zeigt sich (Abbildung 3.4) eine signifikante, aber sehr geringe Abnahme beim Gesamtabfluss, nämlich unter 1%. Ein Anteil des Niederschlagswassers wird dem System durch erhöhte Evapotranspiration entzogen, zudem wird im Boden mehr Wasser gespeichert. Der Zwischenabfluss nimmt ab, die Unterschiede im Direktabfluss schwanken um Null. Auch beim Schwarzbach, einem Einzugsgebiet, das aktuell sehr stark von Landwirtschaft dominiert wird, verändern sich die modellierten Gesamtabflüsse kaum. Die Unterschiede im Direktabfluss in der Jahressumme sind nicht signifikant.

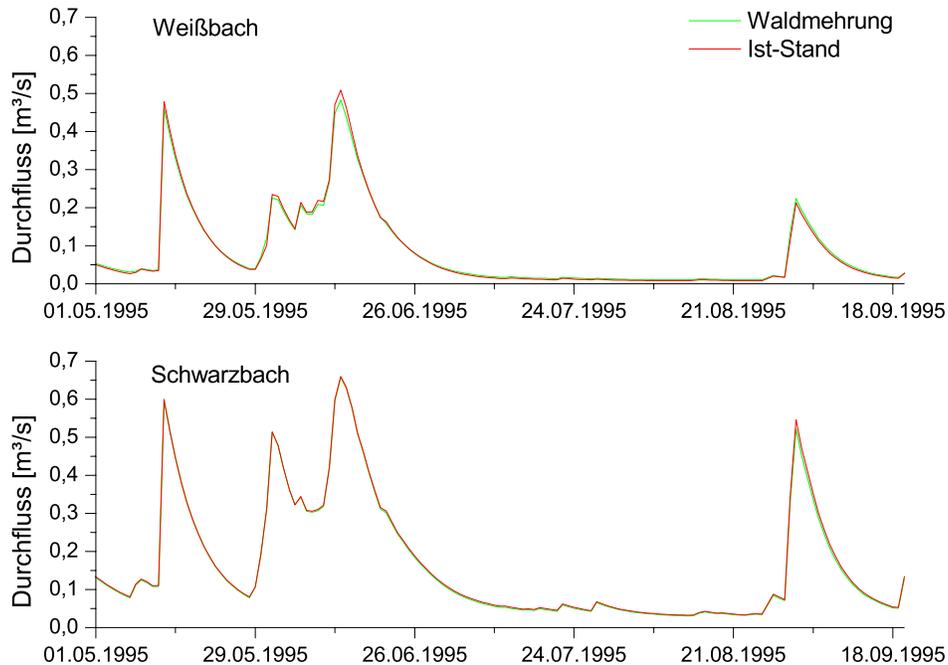


Abbildung 3.4: modellierte Abflussganglinie (Gesamtabfluss) der Einzugsgebiete des Schwarzbaches und des Weißbaches mit und ohne Waldmehring

Das heißt, dass es in der Modellierung in Tagesschritten im betrachteten Einzugsgebiet keine signifikanten Unterschiede zwischen Direktabflussbildung auf Acker bzw. Grünland und unter Wald zu geben scheint. Drei Begründungen dafür sind denkbar. Erstens ist es möglich, dass die Parametrisierung nicht korrekt ist bzw. die Modellstruktur dem Problem nicht angemessen ist. In der aktuellen Modellversion werden die Bodeneigenschaften und die Parametrisierung der Infiltrations- und Bodenwasserhaushaltsgleichungen vor allem an der Bodenart ausgerichtet. Spezielle walddtypische Strukturen wie z.B. Humusaufgaben können in der verwendeten Modellversion nicht berücksichtigt werden. Das kann zu Fehlern in den Ergebnissen führen. In Abschnitt 2.3.2 wurde darauf hingewiesen, dass der berechnete Anteil an Direktabfluss mit dem durch Ganglinienseparationen vorgegebenen Rahmen übereinstimmt. Trotz vorhandener Modellschwächen wird also die Direktabflussbildung auch in bewaldeten Einzugsgebieten anteilig korrekt wiedergegeben. Daraus ergibt sich die zweite mögliche Fehlerquelle. Auch wenn die modellierte Direktabflussmenge im Gebietsmittel korrekt ist, kann dies auf Mittelung und nicht korrekter Abbildung einzelner Landnutzungsstrukturen zurückzuführen sein. Da jedoch bei vergleichenden Modellierungen von Teilgebieten, die ausnahmslos mit Wald bestanden waren, kein nennenswerter Direktabfluss modelliert wurde, wohl aber in rein ackerbaulich genutzten Teileinzugsgebieten, wird diese Möglichkeit für den aktuell betrachteten Fall ausgeschlossen. Schließlich ist drittens möglich, dass tatsächlich kaum Veränderungen im Direktabfluss entstehen. Zu erklären ist dies vor allem unter Betrachtung der Struktur von

WaSiM-ETH. Das Modell berücksichtigt, wie bereits erwähnt, nicht die Humusaufgabe im Wald, sondern modelliert erst ab Beginn des eigentlichen Bodens. Aller Abfluss, der nicht auf der Humusaufgabe, sondern zwischen ihr und der Bodenschicht gebildet wird, ist also für das Modell Direktabfluss. Da dieser Abfluss zwischen Humusschicht und Boden vor allem bei den vorliegenden steilen Hangneigungen und zusätzlich durch die im Feld beobachteten hydrophoben und drainierenden Eigenschaften insbesondere der Fichtennadeln nur eine leichte Verzögerung erfährt, wird er auch in der Ganglinienseparation als schneller Direktabfluss erfasst. Freilandversuche mit Ringinfiltrometern im Einzugsgebiet des Weißbachs in Mai und Juni 2005 zeigten tatsächlich im Wald eine sehr schnelle Abführung des aufgegebenen Wassers zwischen Humusschicht und Boden und eine sehr geringe Infiltration des Wassers. Zudem erbringt auch die Modellierung in Stundenschritten keine sichtbaren Veränderungen im Verlauf der Ganglinie. Eine Schwäche des Modells führt hier also trotzdem zu einer korrekten Abbildung der Verhältnisse im Einzugsgebiet. Dadurch ergibt sich aber auch die Notwendigkeit, jedes Waldeinzugsgebiet, das gesondert modelliert wird, genau nach dominierenden Abflüssen zu analysieren und bei Bedarf in WaSiM-ETH für die Waldflächen über gesonderte Bodenparametrisierung oder das „pond-grid“ (SCHULLA 1997) eine Speicherschicht zu simulieren.

In der Öffentlichkeit wird vor allem von Umweltverbänden und Naturschutzvereinigungen die hochwassermindernde Wirkung der „natürlichen“ Vegetation hervorgehoben (vielfach im Internet, z.B. <http://www.anw-sachsen.de/aktuell.html>, Stand Mai 2006). Da darauf sehr häufig in Diskussionen Bezug genommen wird, soll das Abflussverhalten bei PNV exemplarisch für dieselben Einzugsgebiete wie in Szenario *Waldmehrung* modelliert werden.

TÜXEN (1956) definiert die potentielle natürliche Vegetation (PNV) als das hypothetische, ohne Fortdauer der menschlichen Einwirkung entstehende Mosaik aus Pflanzengesellschaften. Das sächsische Landesamt für Geologie und Umwelt hat die PNV für Sachsen kartieren lassen und in Form analoger und digitaler Karten herausgegeben (LFUG 2002b). Im Untersuchungsgebiet sind die in Tabelle A.5 im Anhang aufgelisteten Pflanzengesellschaften in der PNV vorhanden. Für den Vergleich bleiben alle anderen Bedingungen wie Geländemorphologie, Witterung für die einzelnen Jahre und die Bodenarten erhalten. Prinzipiell verändert sich die Bodenstruktur unter Wald im Laufe der Jahre. Da hier aber Aufforstung simuliert wird, kann davon ausgegangen werden, dass kurzfristig noch keine tiefgreifenden Strukturveränderungen auftreten. Das wird in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt. Die aktuelle Landnutzung wird durch das ATKIS-DLM repräsentiert.

Im Vergleich täglicher Werte unterscheiden sich alle drei Abflusskomponenten in den Einzugsgebieten der beiden Pegel Ammeldorf und Dippoldiswalde signifikant. Dabei zeigen die Unterschiede im Jahresverlauf ein uneinheitliches Bild. Die modellierten Hochwasserpeaks sind im Winter bzw. bei Schneeschmelze im Frühjahr meist höher und der Abfall der Ganglinie steiler. Dieses den bisherigen Erfahrungen (z.B. WEINMEISTER 2003) widersprechende Verhalten ist auf die bereits erwähnte Schwäche der genutzten Modellversion bei der Darstellung der vertikalen Prozesse innerhalb des Waldes zurückzuführen. Das für die Berechnung der Schneeschmelze genutzte Temperatur-Index-Verfahren (Abschnitt 1.2.3) bildet die beschattende, d.h. schmelzverzögernde Wirkung des Waldes, nicht ab. Aufgrunddessen können diese Ergebnisse nicht interpretiert werden.

Im Sommerhalbjahr ist der Gesamtabfluss mit potentiell natürlicher Vegetation in der Regel in allen Einzugsgebieten niedriger als bei aktueller Landnutzung. In den Einzugsgebieten Schwarzbach und Weißbach ist dies durch die relativ am stärksten veränderte Landnutzung besonders deutlich zu erkennen (Abbildung 3.5).

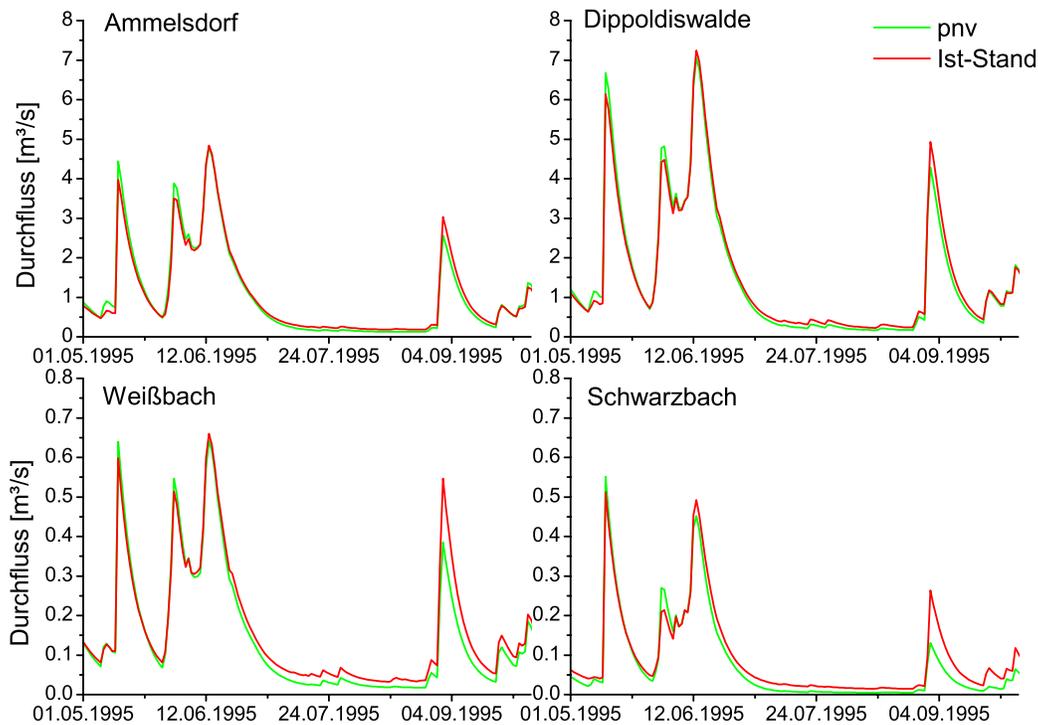


Abbildung 3.5: modellierte Abflussganglinie (Gesamtabfluss) der Einzugsgebiete des Schwarzbach und Weißbach und an den Pegeln Dippoldiswalde und Ammelsdorf mit potentiell natürlicher Vegetation (pnv) im Vergleich zum Ist-Stand

Das ist auf eine signifikant erhöhte Evapotranspiration zurückzuführen, die sowohl weniger Niederschlagswasser abflusswirksam werden lässt und zudem eine erhöhte Aufnahmekapazität des Bodens für sommerliche Niederschläge bewirkt. Beim Direktabfluss zeigt sich in den Einzugsgebieten verschiedenes Verhalten im Winter- und Sommerhalbjahr. Bei Schneeschmelze steigt der Direktabfluss an, ein weiterer Hinweis auf die nicht korrekte Erfassung der verzögernden Wirkung von Wald auf die Schneeschmelze durch das genutzte Modell. Im Sommerhalbjahr ist allgemein ein niedrigerer Direktabfluss bei der pnv zu beobachten. Allerdings ist bei Starkregenereignissen das Verhalten von Ereignis zu Ereignis und in den einzelnen Einzugsgebieten unterschiedlich. Der Direktabfluss sinkt häufig, manchmal aber ist keine signifikante Veränderung zu erkennen und in wenigen Fällen steigt er sogar leicht an. Das ist sowohl bei Modellierung in Tages- als auch in Stundenschritten der Fall. Dies widerspricht den Hauptargumentationslinien, die in der Regel in Bezug auf Aufforstung und Hochwasserschutz gefahren werden. Bei genauem Studium der Literatur zeigt sich jedoch, dass die vielzitierte hochwassermindernde Wirkung von Wald differenziert betrachtet werden muss. WEINMEISTER (2003) stellt mehrere Fallstudien aus Frankreich, der Schweiz, den USA, der Tschechischen Republik, Deutschland und Österreich vor, die zwar teilweise, aber nicht

immer zur Senkung von Abflussspitzen bei bewaldeten oder aufgeforsteten gegenüber nichtbewaldeten Flächen führten. LÜSCHER U. ZÜRCHER (2003) unterstützt die Argumentation durch eine Analyse von Hochwässern in den Schweizer Alpen. Das Vorhandensein einer hochwassermindernden Wirkung des Waldes hängt danach wesentlich von den Bodeneigenschaften ab und kann nicht selbstverständlich vorausgesetzt werden.

Im Untersuchungsgebiet ist also nach den Ergebnissen der Modellierung durch Aufforstung kein Schutz vor Hochwasser zu erwarten. Zwar sinken vor allem bei der unrealistischen vollständigen Aufforstung die Gesamtabflüsse und auch die meisten Hochwasserspitzen ab, doch sind die Unterschiede bedingt durch die geringen Bodenmächtigkeiten und die steilen Hangneigungen gering. Besonders das realistische Waldmehrungszenario kann offenbar nicht als hochwasserschützende Maßnahme angesehen werden. Einschränkend ist jedoch zu bemerken, dass WaSiM-ETH, wie bereits oben ausgeführt wurde, lediglich horizontale und „ganzheitliche“ Waldstrukturen abbilden kann, nicht die internen Veränderungen durch Wald. Während durch ausgleichende Wirkungen in Tagesschritten anzunehmen ist, dass die Wiedergabe der Ergebnisse korrekt ist, können Prozesse in Stundenschritten womöglich nicht mehr erfasst werden. Deshalb sollten solche flächenhaften Veränderungen aufgrund der Modellstruktur weder in zu kleinen räumlichen noch zu geringen zeitlichen Skalen berechnet werden, um auswertbare Ergebnisse zu bekommen.

Siedlungen, Industrie und Tourismus

Regionen bieten den Menschen verschiedene Nutzungsfunktionen, darunter Wohnen, Arbeiten und Erholen. Aus wasserhaushaltlicher Sicht ist insbesondere die teilweise oder völlige Versiegelung von Böden bedeutsam. Bodenversiegelung verursacht einen erhöhten Oberflächenabfluss, verbunden mit erhöhter Evaporation. Abhängig von dem Oberflächenausbau verändert die Versiegelung von Böden das Infiltrationsverhalten, von einer Minimierung auf nahezu Null bei Asphaltierungen (ohne Risse) bis zu einer teilweise sogar gesteigerten Infiltration z. B. durch Überstau auf Rasensteinen. Auch der Verlust von Vegetationsflächen äußert sich durch erhöhten Oberflächenabfluss, der direkt in den Vorfluter gelangt. Die erhöhte Evaporation kann manchmal durch die deutlich verringerte Evapotranspiration kompensiert werden, doch in der Regel muss man auch hier mit Flüssigkeitsverlusten rechnen. Bodenveränderungen durch Trittschäden oder ähnlichem sind sicher vorhanden, werden hier jedoch aufgrund der für kleinräumige Veränderungen zu groben Auflösung des Modells WaSiM-ETH nicht berücksichtigt. Straßen schließlich haben neben der Bodenversiegelung den weiteren entscheidenden Einfluss, dass sie häufig Abflussschneisen bilden, und so ganze Teile eines Einzugsgebietes von diesem „abschneiden“ können (so beispielsweise durch die B170 im Teileinzugsgebiet Reichstädter Bach, vgl. HAGEDORN 2003).

Aktuell sind die Bevölkerungszahlen in der betrachteten Region rückläufig (SEITZ 2005) und werden es sehr wahrscheinlich in den nächsten Jahren bleiben. Hypothetisch soll jedoch für das Szenario davon ausgegangen werden, dass einige Dresdner - dort ist ein Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum zu verzeichnen - aus der Innenstadt auf das Land ziehen, insbesondere in die gut angebundenen und infrastrukturell attraktiven Orte Freital, Dippoldiswalde und Schmiedeberg.

Tourismus stellt in der Untersuchungsregion eine Chance dar. Arbeitsplätze werden geschaffen, die Einkommenssituation der Händler verbessert. Störungen von Fauna und Flora, Bodenverdichtung und eine Verarmung der Vegetation sind in den Zentren des Erholungswesens zu erwarten. Andererseits führt ein sanfter Tourismus oder sogar ein Ökotourismus zu einem

systematischen Erhalt wertvoller Biotope und eine meist verantwortungsvolle Nutzung dieser durch Touristen. So kann der Tourismus nicht nur negativ gesehen werden. Es ist anzunehmen, dass der Tourismus in der Region weiter zunehmen wird (SMWA 2004). Das wird sich insbesondere in einem Ausbau bestehender Einrichtungen niederschlagen. Zudem ist anzunehmen, dass neue Gebäude gebaut werden, verbunden mit Zufahrtsstraßen, Parkplätzen, Wanderwegen usw. Zu rechnen ist mit erhöhtem Skitourismus insbesondere im Bereich Langlauf. Die Klimaänderungen werden sich in den betroffenen Höhenlagen wahrscheinlich erst mittelfristig auswirken. Zudem ist mit weiterer Erhöhung von Wander- und Radtourismus sowie Zuwächsen im Wellness-Bereich zu rechnen.

Als Zielgröße wurde angenommen, dass die versiegelte Fläche der Einzugsgebiete Ammeldorf und Dippoldiswalde jeweils insgesamt um etwa 10 % steigt. Dies stellt eine Vergleichbarkeit der Einzugsgebiete sicher. Zudem ist dadurch, dass diese 10 % nicht einfach jeder Stadt zugeschlagen werden, sondern individuell über das Einzugsgebiet bis zur Erreichung des Zielwerts verteilt werden, eine möglichst realitätsnahe Verteilung dieser Flächen auf das Gesamteinzugsgebiet gewährleistet.

Das Szenario geht von der Annahme aus, dass sich das Einzugsgebiet der Städte Dresden und Freital auf Dippoldiswalde und Schmiedeberg erstreckt, da die anderen Orte im Untersuchungsgebiet heute weder über eine genügend gute Anbindung, noch eine attraktive Infrastruktur verfügen. In den genannten Städten wurden also für das Szenario entlang vorhandener Entwicklungslinien Siedlungen erweitert und neugebaut. Neben dem leichten Bevölkerungszuwachs durch Pendler kann mit einem weiteren Ausbau touristischer Infrastruktur gerechnet werden. (Rad-)Wanderwege und Skihänge sind vorhanden und wurden für das Szenario nicht erweitert. An dafür geeigneten Orten werden neue Langlaufloipen entstehen. Es wird angenommen, dass für das Einzugsgebiet des Pegels Ammeldorf in den Ortschaften Ammeldorf, Seyde und Schönfeld neue Pensionen und Anlagen im Wellnessbereich gebaut werden. Sie würden entlang vorhandener Entwicklungslinien und unter dem Aspekt der Erreichbarkeit von Naherholungsgebieten sowie unter landschaftlichen Aspekten plaziert. Für das Einzugsgebiet Dippoldiswalde, in dem bereits ein ausgewiesener Kurort (Kurort Kipsdorf) besteht, wurde ein Neubau weiterer Wellness-Anlagen, von Pensionen, Gasthäusern und ähnlicher Infrastruktur angenommen. Alle diese Anlagen wurden mit den Parametern für versiegelte Böden versehen.

Im Ergebnis zeigte sich, dass in beiden Einzugsgebieten durch Vergrößerung der versiegelten Flächen kaum Unterschiede im Abfluss auftraten. Dies liegt vor allem daran, dass an den im Szenario zusätzlich versiegelten Orten geringmächtige, relativ schlecht durchlässige Böden bei gleichzeitig starken Hangneigungen vorherrschen. Diese für Infiltration und Wasserspeicherung ungünstigen Voraussetzungen bedingen die relativ geringen Veränderungen im Abflussverhalten bei Versiegelung.

In Abbildung 3.6 wurden exemplarisch für das Weißbachgebiet die Veränderungen durch die Landnutzungsszenarien als Jahressummen gegenübergestellt. Deutlich ist zu erkennen, wie wenig Wirkung die modellierte erhöhte Versiegelung in diesem Fall hat.

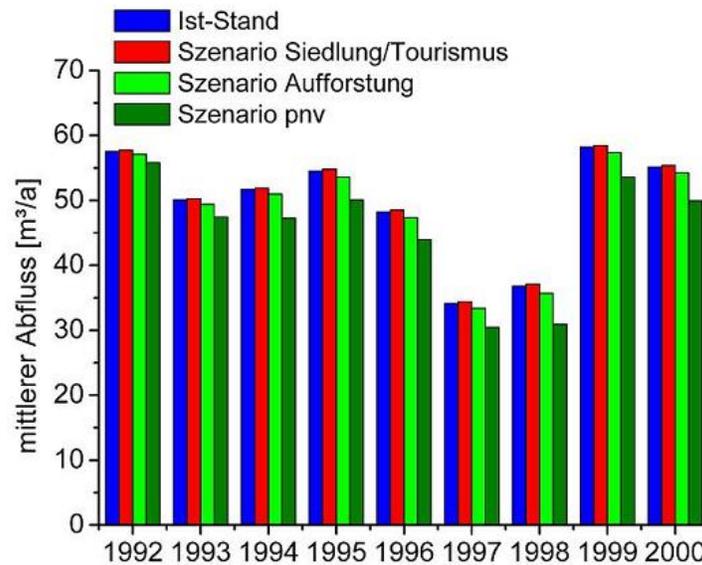


Abbildung 3.6: Vergleich der berechneten realen jährlichen Abflusssummen des Weißbachs mit den Szenarien *potentiell natürliche Vegetation (pnv)*, *Aufforstung*, d.h. Waldmehrung, und *Siedlungsmehrung und Tourismus*.

3.2.3 Zusammenfassung und Diskussion

Anhand vorhandener Daten, Befragungen, Expertenwissen aus Behörden und von Landwirten sowie Gesetzesvorlagen wurden Vorhersagen für das Untersuchungsgebiet getroffen und anhand derer vier Szenarien erstellt. Die Szenarien beinhalten jedes für sich getrennt Veränderungen im Agrarsektor, im Forst und bei Siedlung und Tourismus. Durch die Einzelbetrachtung der verschiedenen Veränderungen unter Beibehaltung der übrigen Randbedingungen ist es möglich, die Auswirkungen einzelner Maßnahmen zu erkennen und miteinander zu vergleichen. Anhand dieser Anfangsszenarien kann der Anwender schrittweise weitere Szenarien, die seiner Interessenlage entsprechen, entwickeln und berechnen, ohne das Modell neu einstellen zu müssen - ausgenommen ist natürlich die Parametrisierung des jeweiligen Szenariums.

Für die Modellierung wurden die beiden mesoskaligen Einzugsgebiete der Pegel Dippoldiswalde und Ammeldorf ausgewählt, da sie selbst keiner Beeinflussung durch die Talsperren unterliegen. Aufgrund ihrer Lage kann dargestellt werden, wie der quantitative Zulauf durch die Rote und Wilde Weißeritz zu den Talsperren durch die vorgestellten Maßnahmen verändert werden kann. Die ausgewählten Teileinzugsgebiete des Schwarzbachs und des Weißbachs repräsentieren typische Verteilungsmuster von Landnutzung und Böden in den oberen und mittleren Lagen des Osterzgebirges. In diesen Einzugsgebieten kann die Wirkung der einzelnen Maßnahmen auf zwei deutlich verschieden strukturierte Gebiete getestet und verglichen werden. Die Modellierungen wurden in Tagesschritten sowie in Stundenschritten bei einer

durch die Daten vorgegebenen minimalen Auflösung von 20 m durchgeführt. Zwei der berechneten Szenarien basieren auf dem Waldmehrungsprogramm (RL-Nr. 52/2004) sowie auf dem Förderprogramm „Umweltgerechte Landwirtschaft (UL)“ des Freistaates Sachsen (konservierende Bodenbearbeitung). Zudem wurde durch die direkte Nachbarschaft zur prosperierenden Stadt Dresden ein leicht steigender Pendelverkehr sowie stärkere Nutzung von Erholungsangeboten der Untersuchungsregion angenommen, ausgedrückt durch eine regional spezifizierte 10 %ige Steigerung versiegelter Flächen entlang vorhandener Entwicklungslinien. Als Hintergrund für Diskussionen mit Forstwirtschaft und Naturschutz dient das Szenario einer vollständigen Aufforstung des Gebiets mit der potentiell natürlichen Vegetation. Die Parametrisierung erfolgte mit Hilfe der zuständigen Behörden, mit Literaturwerten und verschiedenen Untersuchungsdaten.

Vollständige Aufforstung bewirkt erwartungsgemäß eine deutliche Abflussreduktion durch erhöhte Evapotranspiration. In kleineren Nebenbächen ist dies, bedingt durch die Morphologie und geringe Grundwasserbürtigkeit des Untersuchungsgebiets, besonders im Sommer von hoher Bedeutung für die angrenzende Aue. Die um 10 % erhöhte Versiegelung führt im Untersuchungsgebiet nicht zu einem signifikanten Einfluss auf die Abflüsse am Gebietsauslass. Auf Tagesbasis haben weder die Umstellung von konventionellem zu konservierenden Landbau noch die Aufforstung der durch die Waldmehrungskarten festgelegten Flächen bedeutende Wirkung auf die Abflusshöhe der Vorfluter, während sich in Stundenschritten vor allem bei Umstellung der Bodenbearbeitungstechniken eine Vergleichmäßigung der Abflüsse zeigt. Sowohl die Umstellung von konventionellem auf konservierenden Landbau wie die Aufforstung der durch die Waldmehrungskarten festgelegten Flächen zeigen signifikante Wirkung auf die Abflusshöhe der Vorfluter. Bei Waldmehrung wird der Gesamtabfluss durch gesteigerte Evapotranspiration verringert, er steigt aber bei konservierender Bodenbearbeitung unter den vorliegenden Bedingungen durch den erhöhten Zwischenabfluss leicht an. Der Direktabfluss nimmt ab. Durch die Vergleichmäßigung der Ganglinie bei Umstellung von konventioneller zu konservierender Bodenbearbeitung verringert sich zwar durch die Abnahme des Direktabflusses der Eintrag von erodiertem Material in die Flüsse und in die Talsperren (vgl. WEIGERT U. SEIDEL 2005), doch sind die Veränderungen in Summe als sehr gering anzusehen.

Sowohl die Umstellung von konventionellem auf konservierenden Landbau wie die Aufforstung der durch die Waldmehrungskarten festgelegten Flächen zeigen also im Jahresmittel signifikante Wirkung auf die Abflusshöhe der Vorfluter. Während in Bezug auf das gesamte Einzugsgebiet und die Bewirtschaftung der Talsperren bei Waldmehrung tatsächlich davon gesprochen werden kann, dass Abflussspitzen verringert werden können - allerdings in einem sehr kleinen, für größere Hochwasser unerheblichen Rahmen - kann diese Aussage für den konservierenden Landbau nur eingeschränkt getroffen werden. Zwar zeigt sich im kleineren Zeitschritt eine Vergleichmäßigung der Abflüsse, doch führen die erhöhten Zwischenabflüsse im Tagesmittel teilweise sogar zu erhöhten Abflüssen. Aufgrund der Ergebnisse kann dennoch zu einer Umstellung des Landbaus geraten werden. Zwar ist der Hochwasserschutz von der Wasserseite durch diese Anbautechnik nicht gewährleistet, durch den abnehmende Direktabfluss nehmen die Erosion und damit auch der Eintrag von erodiertem Material in die Flüsse und in die Talsperren ab. Durch das nicht eingetragene Material wird der Hochwasserrückhalteraum weniger beeinträchtigt als bei konventioneller Landwirtschaft.

3.3 Klimaszenarien

3.3.1 Stand der Forschung

Klimatrends

Als *Klima* ist die mittlere Witterung, ausgedrückt in Mittelwerten meteorologischer Größen über Zeiträume von mindestens 30 Jahren, zu verstehen. In den vergangenen Jahrzehnten haben sich deutliche Veränderungen im globalen Klima ergeben, die sich vor allem in einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur zeigen. Diese Veränderungen sind nach dem Erkenntnisstand der Klimaforscher im Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, WATSON et al. 2001) zu einem großen Teil auf Einwirkungen des Menschen auf die Biosphäre, die Hydrosphäre, Lithosphäre und die verschiedenen Ökosysteme sowie auf die Atmosphäre zurückzuführen. Übereinstimmend sprechen EEA (2004), SCHÖNWIESE (2004) und WATSON et al. (2001) von einer Erhöhung der Lufttemperatur um $0,7\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ in Bodennähe im Zeitraum 1901 bis 2000. Trotz vielfältiger Schwierigkeiten wie zeitlich und räumlich ungenügend aufgelöster Messnetze oder die hochkomplexe Herausrechnung externer Einflüsse wie z.B. urbaner Wärmeinseln, sind diese Klimaveränderungen auch regional nachzuweisen. Die Veränderungen weisen eine hohe räumliche Variabilität auf. So ist der Anstieg der mittleren bodennahen Lufttemperatur zwischen 1901 und 2000 in Europa nach EEA (2004) mit $0,95\text{ °C}$ überdurchschnittlich hoch. Deutschland liegt nach SCHÖNWIESE et al. (2001) und ZEBISCH et al. (2005) mit einer mittleren Erwärmung von $0,8\text{--}1\text{ °C}$ im europäischen Trend. Im gleichen Zeitraum beträgt nach SCHÖNWIESE et al. (2001) in Österreich die mittlere Erwärmung im Jahresdurchschnitt $1,0\text{--}1,2\text{ °C}$; der alpine Raum der Schweiz erwärmt sich nach OCCO (2002) im Jahresmittel um 1 °C , die Nordschweiz um $1,2\text{--}1,5\text{ °C}$ und die Westschweiz um $1,5\text{--}1,7\text{ °C}$. Auch die zeitliche Variabilität der erkannten Trends ist hoch, zudem sind Klimatrends in der Regel nicht linear. Veränderungen waren weder gleichmäßig über die vergangenen Jahrzehnte verteilt noch innerhalb der Jahreszeiten. So sind nach SCHÖNWIESE et al. (2001), WATSON et al. (2001) und ZEBISCH et al. (2005) in den letzten 30 Jahren in Mitteleuropa vor allem die Winter wärmer geworden, im Mittel um mehr als $1,5\text{ °C}$; dabei traten immer wieder auch Perioden mit kälteren Wintern auf. Im Frühling und Sommer ist im Schnitt eine weniger deutliche Erwärmung von rund einem halben Grad zu verzeichnen.

Die Klimamodellierung hat innerhalb der vergangenen Jahre deutliche Fortschritte gemacht. Diese zeigen sich beispielsweise darin, dass inzwischen trotz noch vorhandener Ungenauigkeiten vergangene Klimate auf überregionaler Ebene, die über verschiedene Methoden wie Pollen- und Warvenanalysen oder Eisbohrkerne ermittelt und wechselseitig verifiziert sind, mit den vorhandenen Modellen gut abgebildet werden können und dass insbesondere in Bezug auf die prognostizierte Temperatur die Abweichungen zwischen den Klimasimulationen einzelner Modelle relativ gering sind (BALZER et al. 1998; NEU 2003; SCHÄR et al. 2003). Ausgehend von diesen Erfahrungen werden mögliche künftige Veränderungen im globalen Klima modelliert. Mit Berücksichtigung der bisherigen globalen Trends und den Ergebnissen verschiedener Klimamodellierungen geht man im IPCC-Bericht (Intergovernmental Panel of Climate Change, WATSON et al. 2001) im globalen Mittel von einer weiteren Erwärmung zwischen $1,4$ und $5,8\text{ °C}$ bis 2100 aus. Dabei ist zu erwarten, dass diese Werte im 2007 erscheinenden neuen IPCC-Bericht eher nach oben korrigiert werden. Diese mittleren Werte variieren wiederum stark im regionalen Maßstab. Im mitteleuropäischen Raum ist nach aktuellem Forschungsstand vor allem durch eine Zunahme der Häufigkeit warmer Wetterlagen eine Erwärmung zwischen $1,6\text{ °C}$

und $6,3^{\circ}\text{C}$ zu erwarten (EEA 2004, ENKE 2001, SMUL 2005, ZEBISCH et al. 2005). Der große Schwankungsbereich ist vor allem auf verschiedene Regionalisierungsverfahren (hier ENKE 2003 und MITCHELL et al. 2004) zurückzuführen. Im sächsischen Bereich werden die Mitteltemperaturen nach ENKE (2003) zwischen $+0,3^{\circ}\text{C}$ und $+0,4^{\circ}\text{C}$ in Frühling und Winter bis $+1,0^{\circ}\text{C}$ und $+1,1^{\circ}\text{C}$ in Sommer und Herbst zunehmen. Dabei werden die Erhöhungen wahrscheinlich insbesondere im Winter nicht gleichförmig über die Dekaden erfolgen. Parallel wird wahrscheinlich auch die Sonnenscheindauer in Frühjahr und Sommer deutlich ansteigen. Innerhalb des Landes Sachsen existieren nach den Untersuchungen von ENKE (2001, 2003) in Bezug auf den Anstieg von Temperatur und Sonnenscheindauern keine signifikanten räumlichen Unterschiede. Nach FREI (2003) ist eine Trendanalyse bei Extremereignissen nicht möglich. Da aber Temperaturprognosen inzwischen eine hohe Eintreffwahrscheinlichkeit aufweisen, nehmen SMUL (2005) und ZEBISCH et al. (2005) mit relativ hoher Sicherheit an, dass sich die Anzahl von Frost- und Eistagen deutlich verringern wird, während die Anzahl der Sommertage und heißen Tage wahrscheinlich deutlich zunehmen wird.

Die Zunahme von Energie in der Atmosphäre führt nach SCHÄR et al. (2000) zu einer Veränderung des Niederschlagsregimes. Trends sind bisher allerdings aufgrund starker kleinräumiger Abhängigkeit und sich daraus ergebender Repräsentanzprobleme nur selten eindeutig feststellbar. Zudem stellt SCHÖNWIESE (1995) fest, dass beim Niederschlag das 100- bzw. 200jährige fluktuative und Anomalieverhalten zu überwiegen scheint. Trotzdem konnte bereits NICHOLSON (1989) zeigen, dass es deutliche Hinweise auf eine Abnahme von Niederschlägen in der Sahelzone innerhalb der letzten Jahrzehnte gibt, die nicht allein durch die dort typischen langjährigen Schwankungen zu erklären sind. Auch in Europa sind trotz häufig nicht oder nur gering signifikanter Trends großräumige Muster im Niederschlagsverhalten der letzten Jahrzehnte zu erkennen. So überwiegt im großräumigen Trend innerhalb der nördlichen Breiten in den Subtropen eine Abnahme, zu den Polen hin (nördlich 45°) eine Zunahme der Niederschläge (SCHÖNWIESE 1995; WATSON et al. 2001). Innerhalb Europas zeigt sich nach EEA (2004) eine signifikante Niederschlagszunahme in Skandinavien (10-40 % feuchter) und eine Abnahme bis zu 20 % im Mittelmeergebiet. In Deutschland sind nach ZEBISCH et al. (2005) über die vergangenen Jahrzehnte keine signifikanten Trends im Niederschlagsverhalten feststellbar. Allgemein steht einem Anstieg der Winterniederschläge um etwa ein Viertel eine leichte Abnahme der Sommerniederschläge gegenüber. Die winterliche Niederschlagszunahme ist vor allem im Westen und Süden Deutschlands ausgeprägt; dagegen kommt es im Nordosten Deutschlands tendenziell zu einer Abnahme der Niederschläge. Dies gilt insbesondere für das Einzugsgebiet der Elbe. Dieser Trend ist wahrscheinlich auf das veränderte Verhalten großräumiger Zirkulationsmuster zurückzuführen (SMUL 2005; WECHSUNG 2005; ZEBISCH et al. 2005). Die Mehrzahl der im sächsischen Raum untersuchten Messreihen zeigt in den Sommermonaten eine deutliche Abnahme der Niederschlagsmengen, die bis zu 30 % betragen kann, während im Winter überwiegend zunehmende Niederschlagsmengen zu verzeichnen sind. Diese Trends sind nach den Untersuchungen von WOLF (2001) und HÄNSEL (mündl. Mittl., TU Bergakademie Freiberg 2006) in der Regel weniger auf signifikant verändertes Verhalten einzelner Stationen zurückzuführen, sondern auf erkennbare Veränderungen im regionalen Verteilungsmuster der Niederschläge. In der Regel nehmen diese Tendenzen im Erzgebirge an Deutlichkeit ab und sind besonders an den Stationen im oberen Erzgebirge kaum noch vorhanden.

Die Vorhersage von Niederschlagstrends ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Streuung der globalen Modelle in Bezug auf Niederschlagsprognosen ist nach SCHÄR et al. (2003) noch sehr groß. Dies muss bei der Auswertung der Modellergebnisse berücksichtigt werden. Die nach EEA (2004) aktuell robustesten Klimaprojektionen zeigen einen Anstieg des Jahresniederschlags in Nordeuropa um 1-2 % pro Jahrzehnt und eine Abnahme des Jahresniederschlags in Südeuropa um 1 % pro Jahrzehnt. Dabei können im Sommer Abnahmen von bis zu 5 % pro Jahrzehnt auftreten. Wahrscheinlich werden bis 2080 sowohl Dürren als auch Starkniederschlagsereignisse in Europa häufiger vorkommen. Die Veränderungen sind geographisch und zeitlich hochvariabel (EEA 2004; SCHÄR et al. 2003). Der globale Mittelwert ist deshalb nicht geeignet, Abschätzungen für Regionen vorzunehmen. Die höchste numerische Auflösung für gekoppelte ozeanisch/atmosphärische Modelle, die mehrere Jahrzehnte in die Zukunft rechnen, liegt aktuell vor allem aufgrund der enormen Rechenzeit bei etwa 200 km am Äquator (MPI-M 2006). Die angewandten Techniken für die Darstellung der Klimaänderungen in enger begrenzten Regionen werden auf der nächsten Seite beschrieben.

Für Deutschland wurden mit verschiedenen Methoden, beispielsweise in ZEBISCH et al. (2005), von 2005 bis 2080 kaum Veränderungen (im Mittel unter 10 %) im Niederschlag modelliert. Diese im Jahresmittel geringe Veränderung resultiert aus einer modellierten deutlichen Niederschlagszunahme im Winter insbesondere im süddeutschen Raum, die meist abnehmenden Sommerniederschlägen vor allem im ostdeutschen Raum gegenüber steht. Im Elbe-Einzugsgebiet sind nach WECHSUNG (2005) deutliche Niederschlagsabnahmen zu erwarten. In Sachsen wird es wahrscheinlich im Winter über die Dekaden hinweg zu ungleichmäßig verteilten Niederschlagszunahmen kommen, während es im Sommer vor allem im Norden Sachsens trockener werden wird (ENKE 2003; ZEBISCH et al. 2005). Allerdings wird es analog zum Niederschlagsverhalten in der Vergangenheit zu signifikanten regionalen Unterschieden kommen, die z.B. durch Lee-Lagen an Gebirgen hervorgerufen werden. In der Prognose von Extremereignissen bei Niederschlag sind die Unsicherheiten noch größer als bei Temperaturextremen, nicht nur in Bezug auf Extremniederschläge, sondern auch in Bezug auf Trockenperioden (FREI 2003; SCHÖNWIESE 1995), so dass Prognosen in diesem Bereich mit großer Vorsicht zu betrachten sind. Trotzdem lässt sich aus den Untersuchungen von ENKE (2003) schließen, dass im sächsischen Raum Tage mit extremen Niederschlägen wahrscheinlich besonders im Sommer zunehmen werden, während in Herbst und Winter keine signifikanten Veränderungen extremer Niederschläge zu erwarten sind.

Klimamodellierung

Der Erfolg von Langfristprognosen hängt vor allem von zwei Schlüsselfaktoren ab. Der erste ist die Vorhersage der großflächigen Meerestemperatur und ihrer Anomalien in den tropischen Gewässern sowie der daraus resultierenden großräumigen Luftdruckverteilungen. Der zweite Schlüsselfaktor ist die Regionalisierung der Vorhersagen über die Verwendung statistischer, dynamischer oder hybrider Modelle. Obwohl Langzeitsimulationen mit globalen Klimamodellen in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte zeigen, ist die Genauigkeit der Klimavorhersagen mit Unsicherheiten behaftet. Ein wichtiger Unsicherheitsfaktor liegt in der heute noch groben Rasterung der globalen Modelle, der durch den extrem hohen Rechenaufwand bedingt ist. Dazu kommen Art und Umfang der verwendeten Basisdaten und die Parametrisierung klimarelevanter, teilweise subskaliger Prozesse, z.B. die ozeanischen Zyklen des Kohlenstoff- und des Wasserkreislaufes oder das Verständnis der Konvektion und Wolkenbildung. Zudem unterscheiden sich die Modelle durch die verwendeten Szenarien für

künftige Prozesse. Obwohl inzwischen einige systematische Fehler in verschiedenen Modellen erkannt wurden, ist der Ersatz der verwendeten Prozessbeschreibungen nicht trivial. Zusätzlich können die meisten Modelle aufgrund der hohen Komplexität des Klimasystems und Unklarheiten in der Prozessbeschreibung nur einen Teil der Einflussfaktoren berücksichtigen, so dass häufig (noch) wichtige Prozesse, wie der Einfluss von Schwefelaerosolen auf das Klima oder Rückkopplungseffekte des Wasserdampfs in der Atmosphäre, vernachlässigt werden müssen (BALZER et al. 1998; ENKE 2003; GODDARD ET AL. 2001; MCGUFFIE U. HENDERSON-SELLERS 2001; SCHUMANN et al. 2001).

Allgemein simulieren die Modelle einen möglichen künftigen Wetterablauf, der über die betrachtete Zeitspanne statistisch ausgewertet wird. Ergebnis sind voraussichtliche Veränderungen im durchschnittlichen Verhalten des Wetters, also des Klimas. Für regionale Prognosen und Zeiträume bis zu acht Monaten wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Ansätzen getestet. Dabei zeigte sich bei Untersuchungen in BALZER et al. (1998), dass auf der einen Seite die Unterschiede zwischen den Modellen nicht signifikant sind, auf der anderen Seite aber die Prognoseleistung aller Modelle im Vergleich zu gemessenen Werten im Bereich des Zufälligen lag. SCHUMANN et al. (2001) ermittelten ähnliche Unsicherheiten beim Test von vierzehn Simulationsläufen von sieben verschiedenen Modellen. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die aktuell besten großen Klimamodelle in den allgemeinen Aussagen gut übereinstimmen, im Detail jedoch fall- und gebietsweise größere Unterschiede insbesondere beim Niederschlag aufweisen (ENKE 2003; SCHÄR et al. 2003; WECHSUNG 2005). So kommt der Forschung im Bereich der Regionalisierung von ermittelten Klimatrends größte Bedeutung zu. Regionale Klimamodelle stellen für das Untersuchungsgebiet atmosphärische Prozesse in höherer Auflösung (10-50 km) dar. Sie übernehmen nur die Bedingungen an den Rändern des Untersuchungsfensters von den Globalen Modellen. Die verschiedenen statistischen Verfahren, die für das „downscaling“ genutzt werden, verfeinern dagegen die groben Informationen der globalen Modelle aufgrund von hochauflösenden Informationen über Klima, Witterung und Wetter in der Vergangenheit. Beide Methoden können heute noch nicht als ausgereift bezeichnet werden und haben zahlreiche Vor- und Nachteile (vgl. BALZER et al. 1998; YARNAL et al. 2001; ZEBISCH et al. 2005). So können regionale Klimamodelle auch komplexe Wetterphänomene (Extreme, Wind) darstellen, sind allerdings schwer zu kalibrieren, produzieren aufgrund ihrer Komplexität und Sensitivität teilweise nur wenig realistische Ergebnisse und sind sehr rechenaufwändig. Statistische Verfahren dagegen sind im Vergleich relativ robust und wenig rechenaufwändig, übernehmen allerdings häufig Fehler und Unsicherheiten aus den globalen Modellen. Sie beinhalten meist nur Mittelwerte von Klimaparametern, Extremereignisse können mit den meisten statistischen Methoden nicht abgebildet werden.

Für Deutschland und verschiedene Teilregionen liegen verschiedene Modellrechnungen und Regionalisierungen über zukünftige Klimaveränderungen vor. Dazu zählen unter anderem Ergebnisse des regionalen Klimamodells REMO (JACOB U. PODZUN 1997; KOTLARSKI et al. 2005), und die statistischen Verfahren nach Werner und Gerstengarbe („PIK-Modell“ von WERNER U. GERSTENGARBE 1997), Enke (ENKE 2003; ENKE et al. 2005) und Mitchell (MITCHELL et al. 2004).

Von den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg wurden Untersuchungen (z.B. BARTELS 2005; GERLINGER 2004; IHRINGER 2004) in Auftrag gegeben, in denen die Klimaszenarien von JACOB U. PODZUN (1997); WERNER U. GERSTENGARBE (1997) und ENKE (2003) unter gleichen Randbedingungen (gleiches zugrundeliegendes globales Modell, gleiche Region, gleicher Zeitschritt, gleicher Zeitraum) getestet wurden. Das PIK-Modell zeigte im Test deutliche systematische Schwächen, vor allem mangelnde Persistenz. Die hydrologische Mo-

dellierung mit Daten aus dem PIK-Modell ergaben durchweg unrealistische Tendenzen. Der REMO-Validierungslauf zeigte im allgemeinen gute Übereinstimmung mit Messwerten, erforderte aber immer den relativen Vergleich zwischen Kontrolllauf und Zukunftsszenarien, da sich Unstimmigkeiten des globalen Modells teilweise in REMO verstärken. Es weist teilweise kleinere Inkonsistenzen in der räumlichen Auflösung auf, die aber aktuell beseitigt werden. Die Simulation mit dem Modell von ENKE (2003) zeigte im Validierungslauf eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten. Im Gegensatz zu REMO ist die Rechenzeit deutlich kürzer. Allerdings fließen in das Modell Annahmen und Größen mit ein, die nicht nachvollziehbar und somit subjektiv sind. Am Ende zeigte sich, dass zur Zeit das Enke-Modell am besten geeignet ist. Deshalb und da es in Sachsen bereits breite Anwendung findet, wird es in dieser Arbeit als Grundlage für die Offline-Kopplung mit dem hydrologischen Modell genutzt.

Anwendung von Klimaprognosen in der hydrologische Modellierung

Die sich verändernden klimatischen Randbedingungen erfordern, dass sich die Menschen in vielerlei Hinsicht mit den daraus resultierenden hydrologischen Veränderungen befassen. So ergeben sich offensichtlich Veränderungen in den Niederschlagsregimes der verschiedenen Regionen. Auch ist es nach SCHÄR et al. (2000) und ENKE (2003) trotz der bereits ausgeführten Unsicherheiten in der Extremwetterstatistik wahrscheinlich, dass die Klimaänderungen die Häufigkeit extremer Witterungsereignisse erhöhen, da die erhöhten Globaltemperaturen einen intensiveren Umsatz im globalen Wasser- und Energiehaushalt bedingen. Allerdings zeigt sich, dass die Vorhersagemöglichkeiten hydrologischer Veränderungen aufgrund erwarteter Klimaänderungen allgemein unsicher sind. Die hohen Unsicherheiten addieren sich aus den durch die Klimamodellierungen und hydrologischen Modellierungen innewohnenden Unsicherheiten, gesetzt den Fall, sie sind jeweils für den Zweck der Modellierung geeignet, und vervielfachen sich durch die Kombination zweier Modellsysteme, die in der Regel auf sehr unterschiedlichen Randbedingungen wie Skaligkeiten basieren. So besteht zu hohem Maße die Gefahr der Fehlinterpretation regionaler Aussagen der Klimamodelle im Sinne einer zukünftigen Entwicklung. Die Raumskala der Klimamodelle ist für hydrologische Aussagen im Sinne von einzugsgebietsbezogenen Untersuchungen nicht geeignet, sondern erfordert zwingend eine Skalenübertragung. Bedacht werden muss zudem, dass die hydrologische Modellierung innerhalb der Zeitskalen einer Klimamodellierung statt findet. Es können keine einzelnen Ereignisse bewertet werden, sondern immer nur ein mittlerer Trend (nach BARDOSSY 1997; CAMERON et al. 2000; SCHUMANN et al. 2001 und WILBY et al. 1999).

Offensichtlich sind also die Ergebnisse der Modellierung stark abhängig vom genutzten Modell, wie durch SCHUMANN et al. (2001) für das Einzugsgebiet der oberen Donau sehr eindrucksvoll nachgewiesen werden konnte. Dies alles führt zu dem Schluss, dass eine hydrologische Modellierung künftiger Verhältnisse nur sehr begrenzt möglich ist. Eine sorgfältige Beachtung aller Einschränkungen lässt aber durchaus zu, dass die Modellierung künftiger hydrologischer Trends als Hinweis darauf gewertet wird, was möglicherweise geschehen wird und welche künftigen Trends sehr unwahrscheinlich sind. In diesem Sinne müssen auch die folgenden Ergebnisse der hydrologischen Modellierung vorhandener Klimaszenarien im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz mit dem Modell WaSiM-ETH gedeutet werden.

3.3.2 Methoden

Dr. Wolfgang Enke (z.B. ENKE 2001, 2003a; ENKE et al. 2005) entwickelte innerhalb der vergangenen Jahre eine Methode der Projektion von Zeitreihen verschiedener Klimaelemente in die Zukunft basierend auf der Verteilung von Wetterlagen. Grundlage sind die Szenarien der globalen Simulationsmodellen ECHAM4-OPYC3-T42 des Deutschen Klimarechenzentrums DKRZ Hamburg unter Verwendung verschiedener durch den IPCC-Bericht vorgeschlagenen Szenarien und die NCEP/NCAR-Reanalysen des National Center for Environmental Prediction, Washington D.C., und des National Center for Atmospheric Research in Boulder, CO. Anhand dieser Daten wurden über ein Wetterlagenklassifizierungsmodell saisonale Wetterlagen zunächst für Sachsen und später für das engere Mitteleuropa entwickelt. Die genaue Beschreibung der Vorgehensweise ist ENKE et al. (2005) zu entnehmen.

Die auf das engere Mitteleuropa zugeschnittenen Wetterlagen sind nach ENKE (2003a) gut auf Sachsen anwendbar. Dies birgt den Vorteil, dass innerhalb dieses Raumes Randeffekte minimiert werden können. Für das EMTAL-Projekt wiederum beinhaltet diese Tatsache die Möglichkeit, mit einer einfachen Anpassung dieses vorhandenen Sets von prognostizierten Wetterlagen allgemeine Aussagen für das künftige Klima und das mittlere Abflussverhalten zu erhalten. Im folgenden werden sowohl die Daten für Mitteleuropa als auch die über das Programm WEREX (ENKE 2003a) jeweils für einzelne Klimastationen berechneten Daten für die Abflusssimulation genutzt.

Anpassung der Klimadaten an die Erfordernisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Es liegen Daten bis 2100 für den mitteleuropäischen Raum vor, in denen sowohl Reanalysen der Wetterlagen der vergangenen Jahre sowie prognostizierte Wetterlagen für das engere Mitteleuropa bis 2100 enthalten sind. Zunächst werden die Temperaturklassifikationen an die Verhältnisse im Weißeritzgebiet angepasst. ENKE (2003a) teilt den verschiedenen Wetterlagen durch ein halbempirisches Verfahren Temperaturklassen zu. Dabei wird das räumliche Temperaturmittel zugehörig zu den einzelnen Wetterlagen aus über 50 Klimastationen im Elbeinzugsgebiet sowie angrenzenden Regionen gebildet und schließlich zu zehn Temperaturklassen zusammengefasst. Die Verteilung der Klimastationen ist ENKE (2003a) zu entnehmen. Jede dieser Temperaturklassen definiert eine Anzahl von Wetterlagen, die typischerweise in den einzelnen Jahreszeiten zu den in Tabelle 3.1 festgelegten Temperaturen führen.

Die Klassengrenzen der zehn Temperaturklassen wurden von ENKE (2003a) im Abstand von 3 K in Frühling, Herbst und Winter und 2 K im Sommer subjektiv festgelegt. Die Klassengrenzen sind scharf. Die Klassenzuteilung der einzelnen Tage dagegen ist unscharf, d.h. jede Klasse hat einen prozentualen Anteil am Wetter dieses einen Tages. Um dem einzelnen Tag eine Temperatur zuteilen zu können, wird auf die Wetterlage zurückgegriffen, die den höchsten prozentualen Anteil am Tag besitzt.

Um diese Temperaturklassen mit der realen Situation im Osterzgebirge vergleichen zu können, wurden Analysen der Stationen Dresden-Klotzsche, Dresden-Hosterwitz, Oberbärenburg, Zinnwald, Dippoldiswalde, Tharandter Wald, Tharandt, Grillenburg und Wildacker vorgenommen. Die Auswahl der Stationen erfolgte nach geografischen Gesichtspunkten und unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit. Als Zeitabschnitt wurde die Dekade 1991-2000 ausgewählt. Für diesen Zeitraum liegen reale Daten, ReAnalysen und Prognosen in einer genügend großen Stichprobe für vergleichende Analysen vor. Zudem sollen Veränderungen künftiger Dekaden im Vergleich zu der Dekade 1991-2000 untersucht werden.

Tabelle 3.1: Durch ENKE (2001, 2003a) für die Klassifizierung vorgegebene Temperaturintervalle

Klasse	Bezeichnung	Temperaturintervall [°C]			
		Frühling	Sommer	Herbst	Winter
1	sehr extrem kalt	≤ -2	≤ 14	≤ -2	≤ -12
2	extrem kalt	-2 - 1	14 - 16	-2 - 1	-12 - -8
3	sehr kalt	1 - 4	16 - 18	1 - 4	-12 - -8
4	kalt	4 - 7	18 - 20	4 - 7	-8 - -5
5	leicht unternormal	7 - 10	20 - 22	7 - 10	-5 - -2
6	unternormal	10 - 13	22 - 24	10 - 13	-2 - 1
7	leicht übertormal	13 - 16	24 - 26	13 - 16	1 - 4
8	warm	16 - 19	26 - 28	16 - 19	4 - 7
9	sehr warm	21 - 24	28 - 30	21 - 24	7 - 10
10	extrem warm	> 24	> 30	> 24	> 10

Aus den realen Daten aller verwendeten Stationen in der betrachteten Region wurden jeweils die täglichen Minima und Maxima gebildet. Daraufhin wurden den Stationsdaten getrennt nach Jahreszeiten die prognostizierten und die in der ReAnalyse ermittelten Klassen zugeteilt. In jeder Klasse wurden aus den täglichen Minima und Maxima das absolute Klassenminimum und -maximum gebildet, um einen Wertebereich realer Temperaturen in den jeweiligen Klassen zu erhalten. Daneben wurden zur Überprüfung der Normalverteilung innerhalb der Klassen Intervalle aus dem arithmetischen Mittel mit Standardabweichung und dem Median der Tagesminima und -maxima sowie die Schiefen berechnet. Bei diesen Vergleichen weisen sowohl die nahe beieinander liegenden arithmetischen Mittel und Mediane als auch die sehr geringe Schiefe auf eine symmetrische Verteilung innerhalb der einzelnen Klassen hin. Die Intervallgrenzen sind also erwartungsgemäß nicht scharf. Jedoch können aufgrund der Verteilung approximativ scharfe Klassengrenzen angenommen werden. Die Standardabweichungen des Mittelwerts der gebildeten Klassen betragen im Frühling und im Sommer überwiegend zwischen 1,5 °C und 2 °C, im Herbst um 2 °C und im Winter meist zwischen 2,5 °C und 3 °C. Im Allgemeinen entsprechen den Klassen von Enke reale Temperaturklassen im Untersuchungsgebiet, die jedoch meist einige Grad unter den vorgegebenen Temperaturen liegen. Im Herbst sind im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz die Klassen 1 und 2 im unteren und die Klassen 9 und 10 im oberen Temperaturspektrum sehr ähnlich. Dasselbe gilt für die Klassen 9 und 10 im Winter. Um die Klasseneinteilung von Enke zu bewahren, wurde trotzdem die Einteilung in 10 Klassen beibehalten, da sich in der Modellierung keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen mit 8 oder 10 Temperaturklassen zeigten.

Zur Überprüfung wurden die realen Temperaturen der Stationen in Temperaturklassen nach den in Tabelle 3.1 vorgegebenen Intervallen eingeteilt. Dabei zeigte sich, dass die Summenkurven der Häufigkeit der einzelnen Temperaturklassen in Frühling und Herbst ähnlich sind, sich aber in Sommer und Winter unterscheiden (Abbildung 3.7). Dies widerspricht Untersuchungen in ENKE (2001), nach denen die erklärte Varianz bei Abbildung des Temperaturregime durch die Wetterklassifikation mit im Mittel zwischen 80 und 90 % hoch ist, wobei sich bei den zitierten Untersuchungen die größten Variabilitäten in Frühling und Herbst zeigten. Auffällig ist die Verschiebung der aus realen Daten mit in Tabelle 3.1 vorgegebenen Klassengrenzen in

niedrigere Temperaturbereiche. Passt man die Temperaturen wie in Tabelle 3.2 an, sind die Summenkurven der Häufigkeiten der einzelnen Temperaturklassen von realen Daten und Re-Analysen ausreichend ähnlich, um diese Klassifizierung rechtfertigen zu können, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Unterschiede zwischen ReAnalyse und Kontrolllauf teilweise deutlich größer sind. Offensichtlich ist es also möglich, im Untersuchungsgebiet ähnliche Temperaturklassen zu bilden, wie von Enke vorgegeben, jedoch bei allgemein niedrigeren Temperaturintervallen.

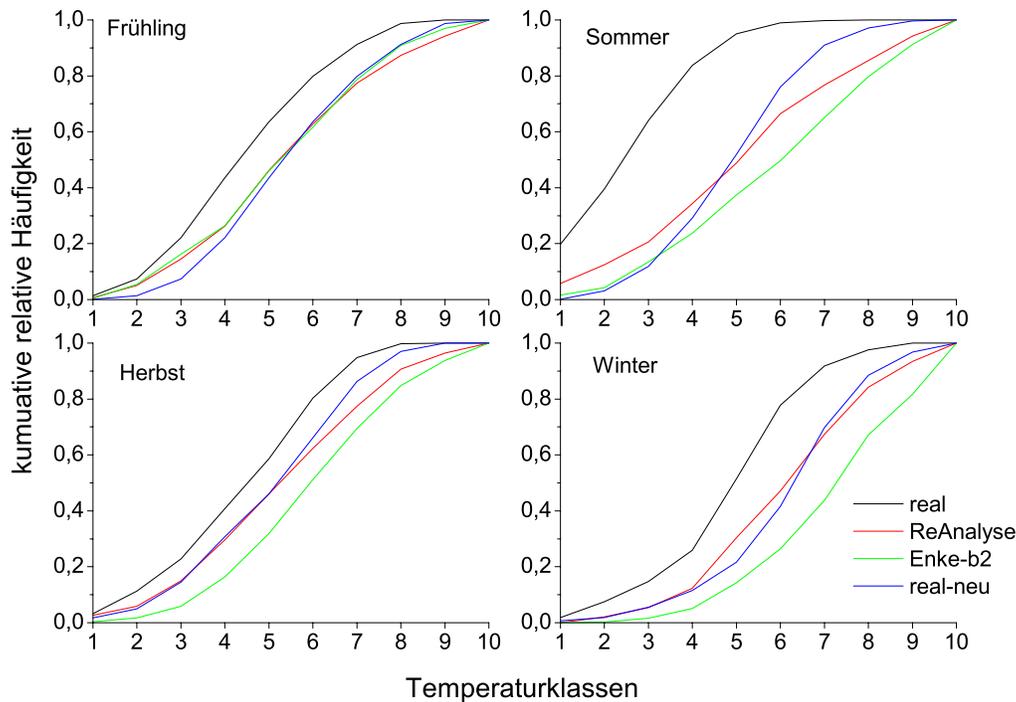


Abbildung 3.7: Temperaturklassen für das Weißeritzzugsgebiet. Real: Anzahl der Temperaturklassen bei Einteilung realer Temperaturen nach ENKE (2003a); Enke-b2: von ENKE (2003a) ermittelte Klassenhäufigkeiten; ReAnalysen: Klassenhäufigkeiten nach Einteilung von ENKE (2003a) in den ReAnalysen; real-neu: Klassenhäufigkeiten der realen Daten in angepasster Klassifikation

Bei den verwendeten Projektionen werden keine Wetterveränderungen abgebildet, sondern Veränderungen im Klima. Dadurch bedingt ist ein Skalensprung in höhere räumliche und zeitliche Skalen. Deshalb wurden die Klimaprojektionen nicht an einzelne Stationen sondern an die Region, d.h. hier das Einzugsgebiet der Weißeritzen angepasst. Tatsächlich gibt es innerhalb der Region einen systematischen Wechsel in den Anströmrichtungen mit der Höhe (FRANKE U. BERNHOFER 2005) der auch Auswirkungen auf die Ausprägungen der Wetterlagen haben müsste. Der Test, ob die Temperatur- und Niederschlagsklassifikationen bezogen auf Tharandt bzw. gemittelt auf das Gebiet auch mit den in Zinnwald beobachteten übereinstimmen, war positiv, so dass im weiteren davon ausgegangen wird, dass ein Gebietsmittel

erstellt werden kann. Es wurde also von den neu ermittelten Klassen die entsprechenden Temperaturen fiktiv der Station Tharandt zugewiesen und dann mit Hilfe von Gleichung 2.3 auf fiktive Stationen in verschiedenen Höhenlagen übertragen. Mit einer konstanten Temperatur über das Gebiet zu rechnen, wäre äußerst unrealistisch, da bei der Temperatur die Stationshöhe über dem Meeresspiegel ein entscheidender Faktor ist. Da nach ENKE 2001 in den Untersuchungen vor allem Wert auf Temperaturänderungen, nicht auf absolute Temperaturen gelegt wurde, kann dieses Verfahren hier angewendet werden.

Tabelle 3.2: Für die Modellierung genutzte Temperaturintervalle für die unteren Lagen (Messstation Tharandter Wald) im Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz

Klasse	Bezeichnung	Temperaturintervall [°C]			
		Frühling	Sommer	Herbst	Winter
1	sehr extrem kalt	≤ -5	≤ 9	≤ -5	≤ -15
2	extrem kalt	-5 - -2	9 - 11	-5 - -2	-15 - -12
3	sehr kalt	-2 - 1	11 - 13	-2 - 1	-12 - -9
4	kalt	1 - 4	13 - 15	1 - 4	-9 - -6
5	leicht unternormal	4 - 7	15 - 17	4 - 7	-6 - -3
6	unternormal	7 - 10	17 - 19	7 - 10	-3 - 0
7	leicht überrnormal	10 - 13	19 - 21	10 - 13	0 - 3
8	warm	13 - 16	21 - 23	13 - 16	3 - 6
9	sehr warm	16 - 19	23 - 25	16 - 19	6 - 9
10	extrem warm	> 19	> 25	> 19	> 9

Bei der Erstellung der Niederschlagsklassen wurde in gleicher Weise vorgegangen wie bei den Temperaturen. In Tabelle 3.3 ist die Klassifizierung nach ENKE (2003a) dargestellt. Er unterscheidet bei Niederschlägen nicht zwischen den Jahreszeiten. Genausowenig wie bei der Klassifizierung der Temperaturen kann beim Niederschlag in der Realität von scharfen Klassengrenzen ausgegangen werden. Niederschläge weisen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität auf, die auch bei Messdaten teilweise nur schwer methodisch nachvollzogen werden kann und die durch die in ENKE (2003a) vorgeschlagene Methodik deshalb nur annähernd wiedergegeben werden kann. Aufgrund des stark streuenden Verhaltens der Niederschlagsdaten innerhalb einzelner Wetterlagen mussten subjektive Annahmen und Verfahren verwendet werden, um die einzelnen Wetterlagen mit ihren Niederschlägen zu Niederschlagsklassen zusammenfassen zu können.

Im Vergleich der Klassenhäufigkeiten in der Realität, in den Reanalysen und der Prognose zeigt sich eine deutliche Unterschätzung der niedrigen Niederschlagsklassen durch die Modellierung (Abbildung 3.8). Doch auch in der Reanalyse ist Klasse 1 (sehr trocken) deutlich weniger häufig vorhanden als in der Realität. Das entspricht Untersuchungen von ENKE (2001), nach denen die erklärte Varianz in Bezug auf das Niederschlagsregime deutlich niedriger ist als beim Temperaturregime. Besonders im Sommer gibt es nach ENKE (2001) starke Variabilitäten wegen der häufig auftretenden kleinräumigen konvektiven Niederschläge. Diese Fehler schlagen sich in der Modellierung in der Regel in einem höher modellierten Abfluss nieder. Da eine veränderte Klassenbildung in bezug auf die niedrigste Niederschlagsklasse zu höheren Fehlern führte, wurde dieser systematische Fehler in Kauf genommen. Er wird bei

der Auswertung der Szenarien in der Form berücksichtigt, dass Vergleiche nur relativ zu nach der gleichen Methodik modellierten Werten für den Ist-Stand gezogen werden und tatsächlich gemessene Werte außer acht gelassen werden bzw. die Werte normiert werden.

Wie bei den Temperaturklassen wurden Vergleiche zu den Stationsdaten im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Es erwies sich als günstig, dies im Untersuchungsgebiet für die vier Jahreszeiten gesondert zu machen. Wenig überraschend ist, dass nicht nur die Setzung der Klassengrenzen rechtsschief ist, sondern auch innerhalb der Niederschlagsklassen in der Regel eine rechtsschiefe Verteilung vorliegt. Daneben zeigt sich, dass die Klassen teilweise „vertauscht“ sind, d.h. die im Deutschlandmittel höhere Niederschlagsklasse, beispielsweise im Herbst Klasse 7 gegenüber Klasse 6, zeigte im Untersuchungsgebiet ein umgekehrtes Verhalten. Das ist darauf zurückzuführen, dass im Gebirge unter anderem Luv- und Lee-Effekte bei der Niederschlagsbildung eine große Rolle spielen und so Wetterlagen in diesem Gebiet ein anderes Verhalten in Bezug auf Niederschläge zeigen als in anderen Gebieten Mitteleuropas.

Tabelle 3.3: Durch ENKE (2001, 2003a) für die Klassifizierung vorgegebene Niederschlagsintervalle

Klasse	Bezeichnung	Niederschlagsintervall [mm]
1	sehr trocken	0 - 0,05
2	trocken	0,05 - 0,5
3	wenig Niederschlag	0,5 - 1
4	leichter Niederschlag	1 - 3
5	mittlerer Niederschlag	3 - 5
6	stärkerer Niederschlag	5 - 10
7	starker Niederschlag	10 - 15
8	sehr starker Niederschlag	> 15

Durch mehrere Versuche zeigte es sich, dass die beste Anpassung an die tatsächlichen Abflussverhältnisse durch die in Tabelle 3.4 dargestellten Zuordnungen erreicht werden konnte. Es war also lediglich im Herbst nötig, die Verteilungen realen Verhältnissen anzupassen. In den anderen drei Jahreszeiten führten Veränderungen in den Niederschlagsklassen nicht zu besseren Anpassungen als unter Verwendung der durch ENKE (2001) vorgegebenen Niederschläge. So wurden letztere bevorzugt verwendet, um das Verfahren möglichst einfach zu halten.

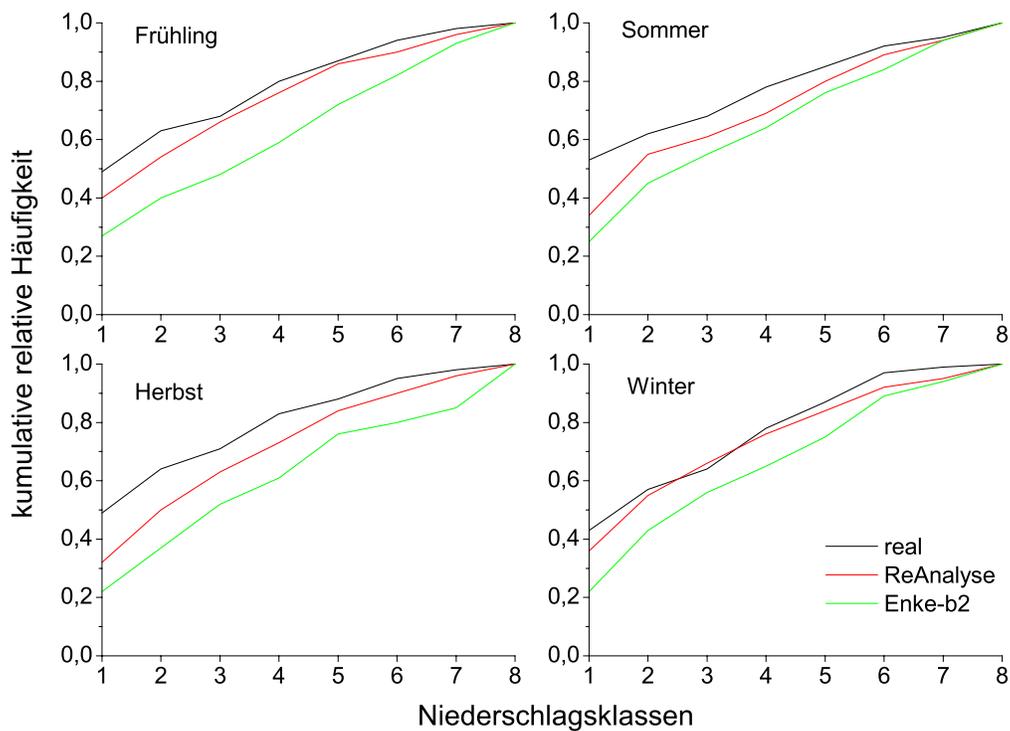


Abbildung 3.8: Niederschlagsklassen für das Weißeritz Einzugsgebiet. Real: Anzahl der Niederschlagsklassen bei Einteilung gemessener Niederschläge nach ENKE (2003); Enke-b2: die von ENKE (2003) ermittelten Klassenhäufigkeiten; ReAnalysen: Klassenhäufigkeiten nach Einteilung von ENKE (2003) in den ReAnalysen

Tabelle 3.4: Niederschlagsintervalle für die unteren Lagen (Messstation Tharandter Wald) im Einzugsgebiet der Weißeritzen

Klasse	Bezeichnung	Niederschlagsintervall [mm]			
		Frühling	Sommer	Herbst	Winter
1	sehr trocken	0	0	0	0
2	trocken	0,05	0,05	0,5	0,05
3	wenig Niederschlag	0,5	0,5	1	0,5
4	leichter Niederschlag	1	1	2	1
5	mittlerer Niederschlag	3	3	3,5	3
6	stärkerer Niederschlag	5	5	5	5
7	starker Niederschlag	10	10	4	10
8	sehr starker Niederschlag	> 15	> 15	> 7	> 15

Der zweite Datensatz, mit dem Klimamodellierungen vorgenommen wurden, geht von den für das engere Mitteleuropa festgelegten Wetterlagen bis 2100 aus. Sie werden mit Hilfe des Programmes WEREX (ENKE 2003a) an ausgewählte Stationen angepasst. Zusätzlich werden die Daten einer multiplen Regression, basierend auf den Stationsdaten, unterworfen. Die Datensätze sind also jeweils auf einzelne Stationen speziell angepasst (siehe auch ENKE et al. 2005). Wie üblich bei Vorgehensweisen nach der Monte-Carlo-Methode wurden für jede Zeitscheibe, d.h. die jeweilige Dekade, zehn verschiedene Datenreihen einer gesamten Länge von 20 Jahren errechnet. Dies trägt nach ENKE et al. (2005) der Erfassung der statistischen Schwankungsbreite Rechnung und erlaubt größere Variationen innerhalb der erzeugten Zeitreihen. Zur Verfügung stehen aktuell Regionalisierungen der landesweiten Wetterlagen für die Stationen Dresden-Klotzsche, Chemnitz, Lauenstein und Tharandt für die Dekaden 1991-2000, 2021-2030, 2031-2040 und 2041-2050, die ich durch die freundliche Unterstützung von Herrn Dipl.-Hydr. U. Mellentin und Herrn Dipl.-Met. W. Küchler vom LfUG in Dresden erhalten habe. Aus verschiedenen Gründen liegen nur für Dresden und Chemnitz Temperaturreihen vor. Um trotzdem eine Berechnung über die gesamte Höhe machen zu können, wurden virtuelle Stationswerte für Zinnwald auf Basis der Werte in Dresden Klotzsche mit Hilfe der Gleichung 2.1 berechnet. Niederschlagsreihen lagen für alle vier Stationen vor.

3.3.3 Ergebnisse

Abflussberechnung 1991-2000

Aufgrund der gegebenen Genauigkeit der Klimaprognosen ist es zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, sich auf genauer aufgelöste Daten als Jahreszeitensummen oder Jahressummen bei der Interpretation der Daten zu stützen. Die Berechnungen mit den WEREX-Daten wurden mit allen zehn Realisierungen durchgeführt, um zu einer Schwankungsbreite der Daten zu gelangen. Zusätzlich wurde die im vorangegangenen Abschnitt besprochene eigene Anpassung in der Auswertung berücksichtigt. In Abbildung 3.9 ist ein Vergleich der modellierten Jahresabflusssummen mit vereinfachter Klassifikation mit dem mittleren Wert aus den zehn Realisierungen (jeweils mit Standardabweichung) der WEREX-Daten zu sehen. Offensichtlich können sowohl mit den klassifizierten Daten aus WEREX als auch mit der vereinfachten Klassifikation der deutschlandweiten Daten die Jahresabflüsse ausreichend gut abgebildet werden. Die in vereinfachter Form angepassten Daten liegen immer innerhalb der durch die Standardabweichung der WEREX-Daten vorgegebenen Schwankungsbreite. Das relativ positive Bild, dass sich bei den jährlichen Abflüssen ergeben hat, schwächt sich bei den Aufteilungen in saisonale Abflusssummen deutlich ab. In den Abbildungen 3.10 ist zu erkennen, dass die Abweichungen von gemessenen Summen erheblich sein können.

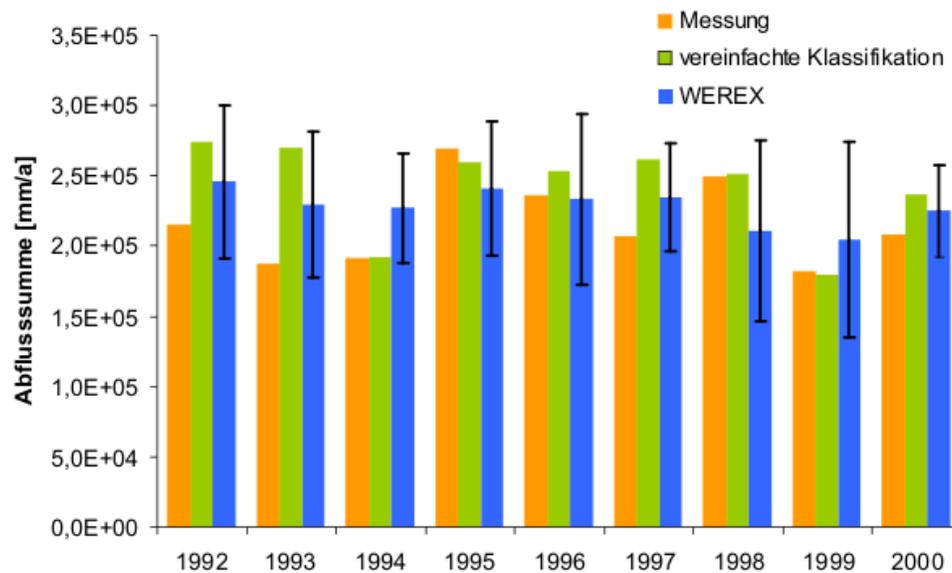


Abbildung 3.9: Modellierte Jahresabflusssummen 1991-2000 mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten am Beispiel des Pegels Ammeldorf

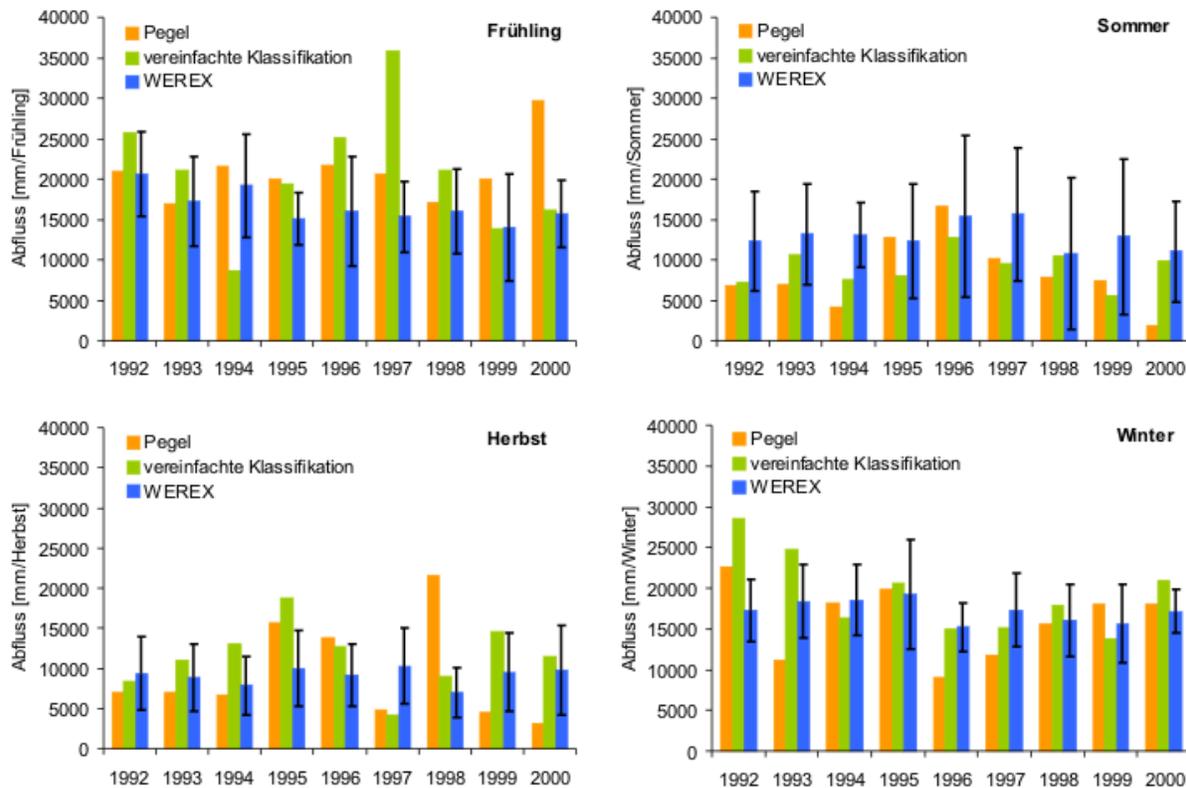


Abbildung 3.10: Modellerte Abflusssummen 1991-2000 in den einzelnen Jahreszeiten mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten am Beispiel des Pegels Ammeldorf.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass jährliche Abflüsse mit der vorgeschlagenen Methodik modelliert werden können, jedoch bereits die saisonalen Abflüsse, die aus einer Modellierung mit den klassifizierten Daten resultieren, mit größter Vorsicht betrachtet werden müssen.

Abflussberechnung 1991-2050 mit den klassifizierten Daten

Die Überprüfung des Vorhandenseins eines Trends wurde mit dem Mann-Kendall-Test durchgeführt, die Trendanalyse selbst mit dem Sen-Test (vgl. Abschnitt 1.2.4). Die Signifikanz der ermittelten Trends wurde mit einem T-Test überprüft. Im Folgenden sind die Ergebnisse aus der Klimamodellierung dargestellt.

In Abbildung 3.11 sind alle Jahresabflusssummen, die sich aus den elf Realisierungen der Klimaprognosen für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung ergeben, für das Gesamtgebiet dargestellt. Um die Darstellung möglichst übersichtlich zu halten, wurden nicht alle Trends in die Abbildung integriert. Der dunkelblau dargestellte Trend in Abbildung 3.11 ist derjenige, der sich aus der vereinfachten Klassifikation ergibt. Er stellt gleichzeitig das eine Extrem der sich aufklappenden Schere dar. Der hellblaue Trend ist der Trend mit der insgesamt höchsten Signifikanz, er stellt den zweiten Teil der Schere dar.

Es ist also unter Berücksichtigung aller impliziten Unsicherheiten in der Prognose anzunehmen, dass im Einzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz der jährliche Abfluss

nicht steigt, sondern tendenziell eher sinken wird. Das entspricht im Ergebnis den bereits zitierten prognostizierten Abflusstrends im gesamten Elbeinzugsgebiet (z.B. WECHSUNG 2005) und den Ergebnissen aus einem Teileinzugsgebiet der Zschopau im mittleren Erzgebirge (PÖHLER 2006).

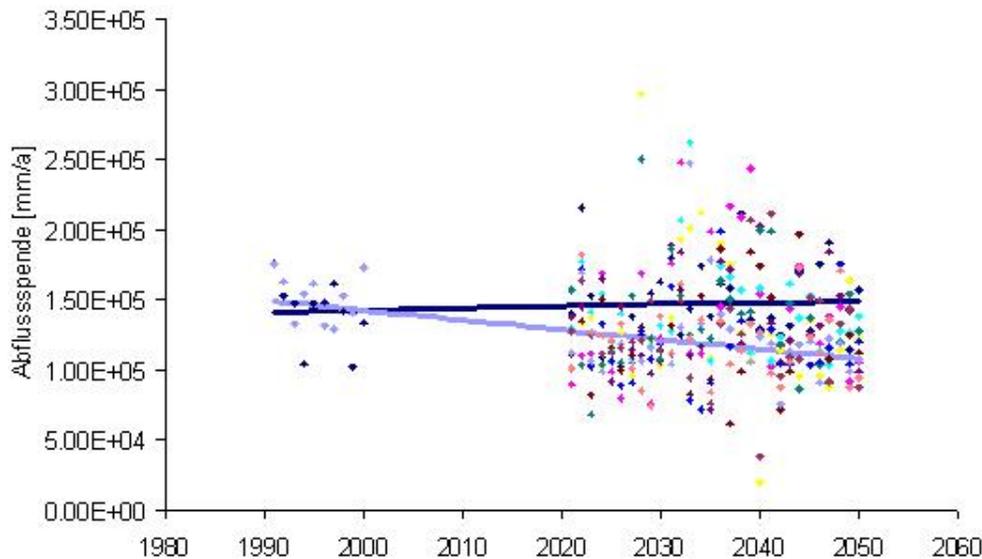


Abbildung 3.11: Modellierte Abflusssummen 1991-2000 und 2021-2050 für das Einzugsgebiet der Vereinigten Weißeritz. In den verschiedenen Farben sind die 10 Realisierungen durch WEREX sowie die eigene Klassifikation dargestellt, die beiden dargestellten Regressionsgeraden schließen alle Trends ein

Trotz der im vorangegangenen Abschnitt ausgewiesenen Schwächen in der Modellierung saisonaler Abflüsse sollen hier die jahreszeitlichen Veränderungen der Abflüsse im Untersuchungsgebiet betrachtet werden. Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge bzw. Unterschiede zwischen der vereinfachten Klassifikation und den Klimazeitreihen durch das Programm WEREX wurden die sich ergebenden Abflusshöhen zwischen diesen beiden Methoden durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Keiner der jahreszeitlichen Trends im Gesamteinzugsgebiet der gesamten Weißeritz ist signifikant. In Abbildung 3.12 ist als Beispiel der Frühling dargestellt, da er bei den Ergebnissen der saisonalen Modellierung im Jahrzehnt 1991-2000 im Vergleich zu den gemessenen Daten relativ am besten abschnitt. Zudem sind im Frühjahr die stärksten Veränderungen im Abfluss zu beobachten.

Je kleiner das betrachtete Einzugsgebiet ist, desto größer werden die der Methodik innewohnenden Unsicherheiten. Da aber im EMTAL-Projekt explizit gefordert ist, die Auswirkungen von Landnutzungs- und Klimaveränderungen auf die Talsperrenbewirtschaftung über Szenarien zu erforschen, wurden auch die Trends betrachtet, die sich an den Pegeln Ammeldorf und Dippoldiswalde ergaben. Am Pegel Dippoldiswalde zeigte sich das gleiche Verhalten wie im Gesamtgebiet, das Einzugsgebiet Ammeldorf dagegen zeigte einen deutlicheren Abwärtstrend (siehe PÖHLER 2005a). Dies ist insbesondere auf abnehmende Abflüsse im Frühjahr zurückzuführen (Abbildung 3.13). Ein leicht positiver Abflusstrend im Winter lässt den nahe-

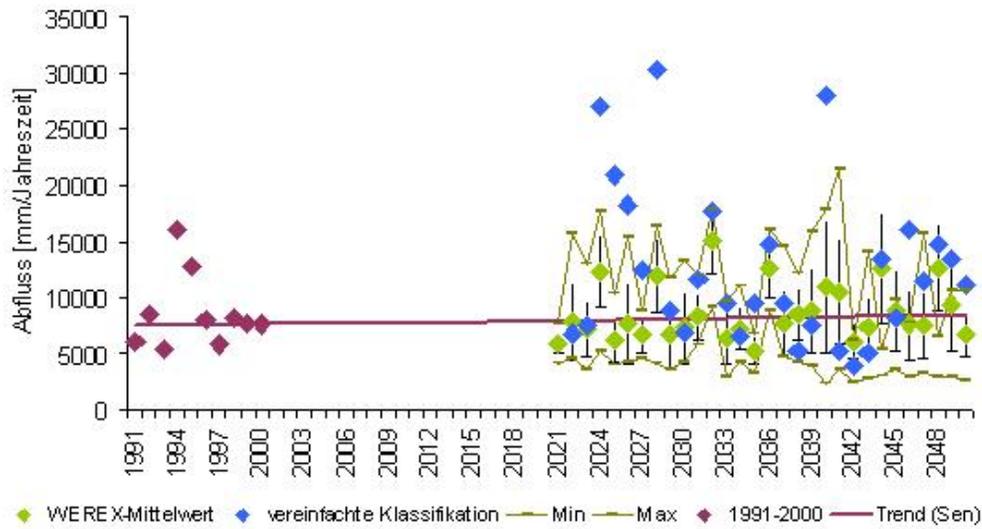


Abbildung 3.12: Modellierte Abflusssummen 1991-2000 und 2021-2050 im Frühling mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten an der Elbemündung

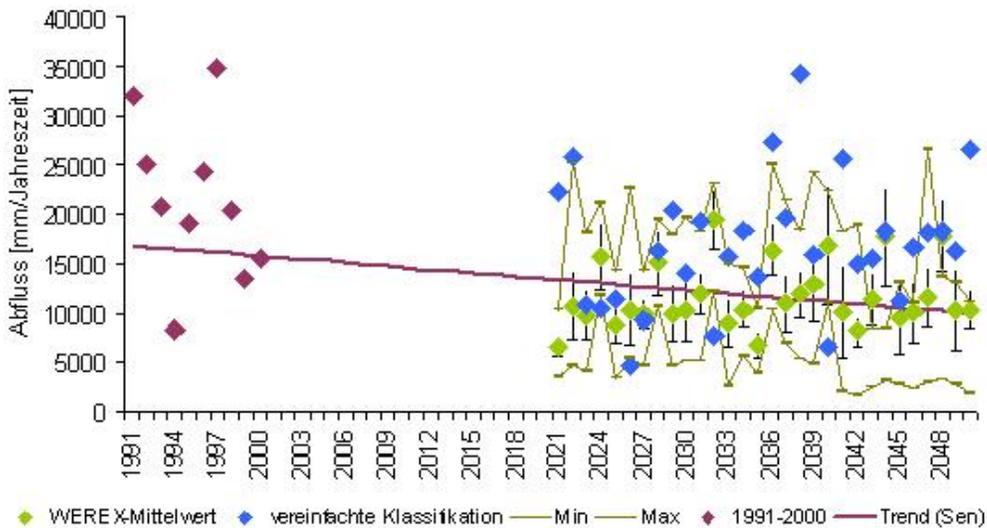


Abbildung 3.13: Modellierte Abflusssummen 1991-2000 und 2021-2050 im Frühling mit vereinfachter Methode und WEREX-Daten am Pegel Ammeldorf

liegenden Schluss zu, dass aufgrund der steigenden Temperaturen der Niederschlag im Winter in steigendem Maße in flüssiger Form fällt und sich so der Abfluss im Winterhalbjahr vergleichmäßigt. Zudem spielt hier der von ENKE (2001, 2003) prognostizierte allgemein abnehmende Niederschlag in der Untersuchungsregion eine Rolle.

3.3.4 Diskussion

Prinzipiell ist es möglich, die Szenarien von ENKE (2003a) in einer Wasserhaushaltsberechnung für Zukunftsszenarien zu verwenden. Sowohl die Szenarien, die für den mitteleuropäischen Raum erstellt wurden als auch jene, die durch das Programm WEREX an einzelne Klimastationen angepasst sind, liefern Daten, die als Eingabe in das Niederschlag-Abfluss- und Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH genutzt werden können. Das Verfahren zur Erstellung der Klimaprognosen ist in verschiedenen Regionen getestet worden und so weit das bei Prognosen möglich ist, validiert worden. Bei einigen Stationen stehen neben Niederschlag und Temperatur auch andere Klimainformationen wie relativer Dampfdruck und Globalstrahlung zur Verfügung. Dies ist im Osterzgebirge nicht der Fall, so dass als Eingabe in das Modell die klassifizierten Niederschläge und Temperaturen auf Tagesbasis genutzt wurden. Allgemein reicht auf Basis von Jahreszeitensummen und Jahressummen - Auswertungen in höherer Auflösung sind aufgrund der Struktur der vorgegebenen Klimaprognosen nicht sinnvoll - die Eingabe von prognostizierten Niederschlägen und Temperaturen aus, um mit Hilfe vereinfachter Verfahren, z.B. Schneemodell mit dem Grad-Tag-Verfahren oder einer vereinfachten Verdunstungsberechnung nach HAMON (in FEDERER U. LASH 1983) gute Werte zu berechnen.

Bereits bei den Kontrollrechnungen im Einzugsgebiet zeigt sich, dass die Übereinstimmung von Reanalysen und modellierten Werten zwar bei der Temperatur gut ist, beim Niederschlag aber Defizite aufweist. Dies ist wahrscheinlich auf das relativ kleine Einzugsgebiet zurückzuführen sowie auf seine Lage im Mittelgebirge. Luv- und Leeeffekte, die in größeren Räumen durch die verwendete Methodik (z.B. in SMUL 2005; ZEBISCH et al. 2005) abgebildet werden können, sowie orographische Effekte werden offenbar kleinräumig nicht genügend erfasst. Genauso, wie Niederschlagsstationen für sich betrachtet nur selten auswertbare Trends aufweisen, in der Gesamtheit aber eine eindeutige Tendenz zeigen (PÖHLER 2005a), müssen die durch ENKE (2001, 2003a) ermittelten Trends in ihrem größeren geographischen Zusammenhang, nämlich dem, der durch die einzelnen Wetterlagen vorgegeben ist, gesehen werden.

Die sich ergebenden Abweichungen schlagen sich in der Abflussberechnung nieder. Als Ergebnis der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass in mesoskaligen Einzugsgebieten in Mittelgebirgsregionen die Klassifizierung der Daten möglich ist und dass die klassifizierten Daten als meteorologischer input dem Modell übergeben werden können. Die Auswertung dieser Szenarie ist auf Jahresbasis möglich. Bereits auf Jahreszeitenbasis sind allerdings die Abweichungen von den gemessenen Abflusssummen zu hoch, als dass robuste Aussagen getroffen werden könnten. Es wird deshalb vorgeschlagen, in ähnlichen Einzugsgebieten Analysen auf Jahresbasis vorzunehmen und die ergebenden Abflüsse bei Aggregation in Jahreszeiten nur als Hinweis auf mögliche Prozesse zu werten, besser aber die vorgeschlagene Methodik in größeren Regionen wie z.B. dem gesamten Einzugsgebiet der oberen Elbe oder dem Einzugsgebiet der Vereinigten Mulde zu verwenden.

In Abbildung 3.14 wurden die gleichen Trends wie in Abbildung 3.11 als Beispiele für künftige Trends genutzt, d.h. der Trend, der sich aus der vereinfachten Klassifikation ergibt sowie der Trend mit der höchsten Signifikanz, der in Ammeldorf auf der gleichen Realisierung beruht

wie beim Gesamteinzugsgebiet der Roten, Wilden und Vereinigten Weißeritz. Die Erstellung der vergangenen Trends beruht auf Anwendung derselben Methodik wie bei Prognosen (Mann-Kendall-Test, Sen-Test) auf Basis gemessener Werte. Aufgrund der starken Streuung der gemessenen Abflüsse um die ermittelten Trends, sind letztere analog zu den Niederschlag-trends (siehe Abschnitt 3.3.1) eher als Hinweise auf Entwicklungen, denn als Tatsachen zu verstehen. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wurden die Trends auf das Jahr 1991 normiert. Der WEREX-Datensatz, der einer multiplen Regression auf Basis der Stationsdaten unterzogen wurde, lässt eine Fortsetzung des Trends vermuten, den die Daten in der Klimanormalperiode 1960-1990 aufweisen, nicht aber den des beispielsweise in ENKE et al. (2005) als Datengrundlage zitierten Zeitabschnitts 1951-2000. Dagegen weist das andere Extrem der sich nach den Ergebnissen der Modellierung in Zukunft öffnenden Schere, nämlich die Klassifizierung auf Basis der für den mitteleuropäischen Raum prognostizierten Wetterlagen nach selbst angepasster Klassifizierung, eher einen Zusammenhang mit dem langjährigen Trend am Pegel Ammeldorf seit 1931 auf. Insgesamt zeigen sich je nach gewähltem Zeitabschnitt voneinander stark abweichende Tendenzen. Dasselbe Phänomen zeigte sich beim Pegel Dippoldiswalde (PÖHLER 2005a). Außerdem ist zu erkennen, dass auf Grundlage der verwendeten Prognosen eine Umkehr der bisher vorhandenen, im Mittel eher gleichbleibenden bis steigenden Tendenz im Einzugsgebiet zu erwarten ist. Aufgrund der klimatischen Prozessen innewohnenden Nichtlinearität ist solch ein Verhalten nicht unwahrscheinlich, Beweise für die Richtigkeit oder Falschheit dieser Prognose werden sich allerdings erst in den künftigen Jahrzehnten sammeln lassen.

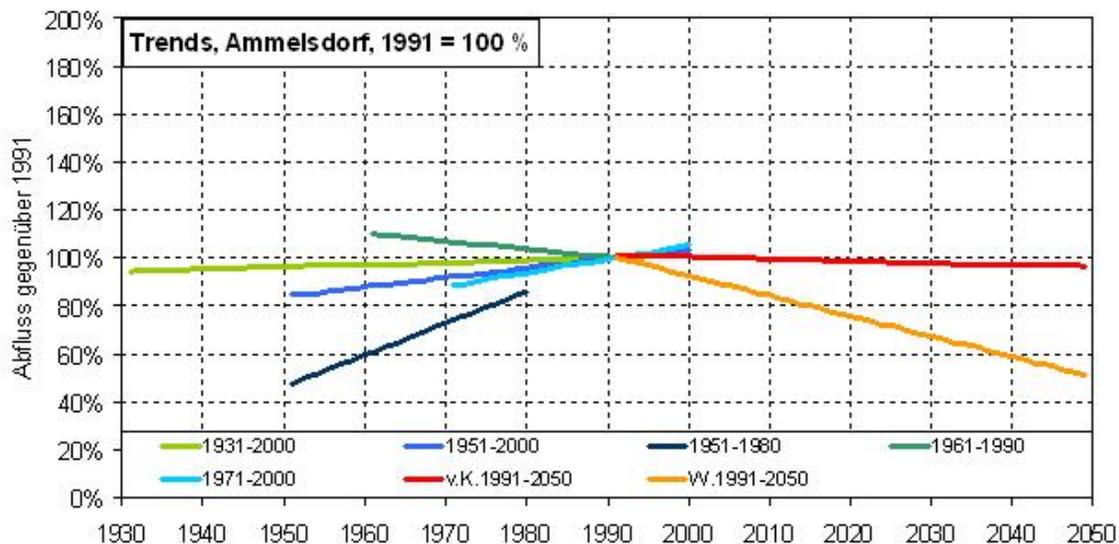


Abbildung 3.14: Abflusstrends am Pegel Ammeldorf zwischen 1931 und 2000 im Vergleich mit prognostizierten künftigen Trends. v.K. = vereinfachte Klassifikation, W. = WEREX

Robuste Tendaussagen bei den Jahressummen sind also für das untersuchte Einzugsgebiet nicht möglich, Tendenzen können dagegen identifiziert werden. Diese deuten darauf hin, dass im Osterzgebirge im Mittel wahrscheinlich keine Abflusszunahme bis 2050 erwartet werden

kann. Ähnliche Trends bei Niederschlägen im Erzgebirge, die in Abschnitt 3.3.1 beschrieben wurden, stützen diese Aussage.

3.4 Zusammenfassung

Das Modell WaSiM-ETH wurde ursprünglich zur Darstellung von Abflussprozessen, der Wasserhaushaltskomponenten auf Einzugsgebietsebene sowie die Modellierung von Klimaänderungen geschrieben (SCHULLA 1997). Diese ursprüngliche Zielsetzung hat Auswirkungen auf die Modellgüte in Bezug auf Landnutzungs- und Klimaszenarien. So zeigen sich die Grenzen der Modellierung von Landnutzungsveränderungen sowohl im Prozessverständnis und der Parametrisierung der bekannten oder vermuteten Prozesse wie auch in der rechen-technischen Darstellung der Prozesse im Modell. So kann WaSiM-ETH beispielsweise bezüglich der Veränderung von Anbautechniken, in dieser Arbeit am Beispiel von konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung dargestellt, die entscheidenden Prozesse nicht adäquat nachbilden. Da aktuell bei der genannten Fragestellung weder das Prozessverständnis noch die Umsetzung der Erkenntnisse in Algorithmen für eine modelltechnisch korrekte Darstellung vorhanden sind, kann dieses Szenario auch von anderen Modellen noch nicht korrekt dargestellt werden. Zudem werden allgemein die bodenphysikalischen Zusammenhänge in WaSiM-ETH für Szenarien, die den Bodenwasserhaushalt konkret betreffen, in der verwendeten Version nicht zufriedenstellend dargestellt. Für diese Szenarien müssen die Randbedingungen und Geltungsbereiche sehr klar festgelegt werden, um eine Auswertung zu ermöglichen. Dadurch geht ihnen jedoch die Übertragbarkeit verloren. Trotzdem sind die errechneten Ergebnisse im Vergleich mit Erkenntnissen aus Freilandversuchen in der Literatur und im Vergleich mit anderen Modellrechnungen im gleichen Gebiet (z.B. mit Erosion 3D in WEIGERT U. SEIDEL 2005), die die Veränderungen im Boden anders als WaSiM-ETH umsetzen, plausibel. Um aber die Interpretation von starkregeninduzierten Hochwässern auch auf Mittel- und Niedrigwasser und auf Schneeschmelzen ausdehnen zu können, und um die Parametrisierung in andere Einzugsgebiete übernehmen zu können, müssen die Prozesse besser verstanden, in Algorithmen dargestellt und in geeigneter Weise in WaSiM-ETH implementiert werden. Die Modellierung der Szenarien im Bereich Wald/Forst brachte ähnliche Ergebnisse. Innerhalb streng festgelegter Randbedingungen können plausible Erkenntnisse durch WaSiM-ETH erlangt werden. Für weitergehende Analysen ist jedoch eine detailliertere Abbildung der Prozesse innerhalb von Wäldern und in Waldböden nötig, wie sie wahrscheinlich ab Ende 2006 in der neuesten WaSiM-ETH-Version verfügbar sein werden.

Zur Darstellung der Effekte von Klimaänderungen auf den Abfluss ist das Modell sehr gut geeignet. Hier liegen die Grenzen der Modellierung eindeutig nicht im Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH, sondern in der Güte der Eingangsdaten aus den Klimaprognosen. Wie bereits erwähnt, wurde WaSiM-ETH ursprünglich für die Anwendung in der Klimamodellierung entwickelt (SCHULLA 1997) und mehrfach mit sehr gutem Erfolg für die Modellierung von Wettervorhersagen oder Klimaprognosen angewendet (z.B. AHRENS 2003; KUNSTMANN U. STADLER 2003; KUNSTMANN et al. 2004). Im vorliegenden Fall sind also die Eingangsdaten aus den Klimaprognosen entscheidend für die Interpretierbarkeit und Güte der Modellergebnisse. Allgemein sind die Daten von ENKE (2003a) für den Zweck der Modellierung gut geeignet. Es ist möglich, Aussagen über das mittlere Verhalten des Abflusses zu geben. Dies kann eine Hilfe für die mittel- und langfristige Bewirtschaftung der Talsperren sein. Aussa-

gen über das Auftreten von Hochwässern sind nicht möglich, hier muss auf andere Methoden (z.B. Extremereignisanalysen) zurückgegriffen werden. Im speziellen Fall aber hat sich gezeigt, dass das Einzugsgebiet, in dem die Modellierung vorgenommen wurde, möglicherweise zu klein ist. Trotz der erfolgten Skalenübertragung auf regionalen Maßstab ist letzterer für Modellierungen in mesoskaligen Einzugsgebieten zu grob. Aufgrund der raschen Fortschritte in der Klimamodellierung und in Regionalisierungstechniken kann damit gerechnet werden, dass die hydrologische Modellierung von Klimaprognosen in Zukunft besser gelingen kann. Bis dahin wird aufgrund der vorliegenden Erfahrungen empfohlen, das Modell WaSiM-ETH in deutlich größeren Einzugsgebieten, als es hier geschehen ist, anzuwenden.

4 Zusammenfassung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts EMTAL (Einzugsgebietsmanagement von Talsperren in Mittelgebirgslandschaften), das unter anderem der Methodenentwicklung zur Klärung ökologischer und hydrologischer Fragen dient. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Teilaspekt der quantitativen Hydrologie im Allgemeinen und mit der Niederschlag-Abfluss-Modellierung im Besonderen.

Von großer Wichtigkeit für das EMTAL-Projekt ist die Auswahl geeigneter Modelle, mit denen relevante Prozesse in Einzugsgebieten mit Talsperren abgebildet werden können. Das genutzte Niederschlag-Abfluss-Modell muss die Abflussprozesse reproduzieren können und die Parametrisierung muss mit allgemein verfügbaren Daten möglich sein. Dabei soll das Modell soweit prozessorientiert arbeiten, dass es auf ähnliche Einzugsgebiete übertragbar ist und Szenarierechnungen durchgeführt werden können. Bestimmte Landnutzungs- und Klimaänderungen sollen abgebildet und deren Wirkungen auf die Gebietshydrologie nachvollzogen werden können. Diese Anforderungen wurden für das Niederschlag-Abfluss- und Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH überprüft.

In Bezug auf die Zielstellung des EMTAL-Projekts genügt WaSiM-ETH den gestellten Anforderungen. Es konnte gezeigt werden, dass das Modell die Abflüsse und Abflusskomponenten sowie die Wasserhaushaltskomponenten der Gegenwart und Vergangenheit im Untersuchungsgebiet sowie in verschiedenen Vergleichsgebieten im mittleren Erzgebirge gut reproduzieren kann. WaSiM-ETH ist rasterbasiert und kann in nahezu beliebiger zeitlicher und räumlicher Diskretisierung verwendet werden. Umfangreiche Testrechnungen machen deutlich, dass mit verschieden genauen räumlichen Diskretisierungen in Bezug auf die Auflösung der Eingangsdaten und die daraus erstellen Rasterweiten korrekte Ergebnisse errechnet werden können. In Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße unterscheiden sich die modellierten Abflussganglinien in Rasterweiten zwischen 20 und 500 m kaum. Berechnungen in Rasterweiten von 1000 m zeigen dagegen erhebliche Abweichungen zu gemessenen Werten. Zudem kann das Modell mit nur geringen Anpassungen der Parametersätze, die im vorliegenden Fall vor allem auf die schlechtere Qualität der Eingangsdaten in kleinerer zeitlicher Auflösung zurückzuführen sind, in verschiedenen Zeitschrittweiten gemessene Abflüsse gut abbilden. Die dadurch entstehende große Spannweite in Bezug auf verwendete Raum- und Zeitskalen macht das Modell flexibel und breit anwendbar. Dadurch kann sich der Modellierer öffentlich erhältliche Daten gut nutzbar machen.

WaSiM-ETH bietet dem Anwender für jeden Teilaspekt der Niederschlags-Abfluss- oder Wasserhaushaltsmodellierung verschiedene konzeptionelle und physikalische Ansätze an, die nahezu beliebig untereinander kombiniert werden können. Die Verwendung der unterschiedlichen Ansätze in den einzelnen Modulen hängt vor allem vom Vorhandensein und der Qualität der Eingangsdaten und der gewählten zeitlichen Diskretisierung ab. Allerdings ist es anzuraten, sich nach Möglichkeit auf Modellkomponenten zu stützen, die physikalisch begründbar

sind. Auch wenn beispielsweise das Bodenmodell unter Verwendung des Richards-Ansatzes durch modellinterne und durch die Größe des Einzugsgebietes bedingte Vereinfachungen deutlich konzeptionelle Züge zeigt, sind seine Ergebnisse besser nachvollziehbar als bei Verwendung des Bodenmodells auf Basis des TOPMODEL-Ansatzes. Die direkte Übertragbarkeit des Speicheransatzes ist in der Regel nicht gegeben, während WaSiM-ETH bei Anwendung des Richards-Ansatzes im Bodenmodul eine gute Übertragbarkeit aufweist. In der Arbeit wurde das deutlich durch Analysen der Übertragbarkeit des kalibrierten Modells in beiden Ausführungen innerhalb des Untersuchungsgebiets und auf vergleichbare Einzugsgebiete im mittleren Erzgebirge.

Dass das Modell WaSiM-ETH ursprünglich zur Darstellung von Abflussprozessen, der Wasserhaushaltskomponenten auf Einzugsgebietsebene und für die Modellierung von Klimaänderungen geschrieben wurde, hat deutliche Auswirkungen auf die Modellgüte in Bezug auf Landnutzungs- und Klimaszenarien. So zeigen sich die Grenzen der Modellierung von Landnutzungsveränderungen sowohl im Prozessverständnis und der Parametrisierung der bekannten oder vermuteten Prozesse wie auch in der rechentechnischen Darstellung der Prozesse im Modell. Wie am Beispiel der Umstellung von konventioneller auf konservierender Landwirtschaft gezeigt wurde, stellt die verwendete Version von WaSiM-ETH allgemein die bodenphysikalischen Zusammenhänge für Szenarien, die den Bodenwasserhaushalt konkret betreffen, nicht zufriedenstellend dar. Für diese Szenarien müssen die Randbedingungen und Geltungsbereiche sehr klar festgelegt werden, um eine Auswertung zu ermöglichen. Dadurch geht ihnen jedoch die Übertragbarkeit verloren. Trotzdem sind die errechneten Ergebnisse, nämlich eine deutliche Verringerung der Direktabflüsse bei konservierender gegenüber konventioneller Bearbeitung bei sehr geringem Rückgang der Gesamtabflüsse, im Vergleich mit Erkenntnissen aus Freilandversuchen in der Literatur und im Vergleich mit anderen Modellrechnungen im gleichen Gebiet plausibel. Die Modellierung der Szenarien im Bereich Wald/Forst brachte ähnliche Ergebnisse. Obwohl die Prozesse nur in der Fläche, nicht im Bestand selbst, abgebildet werden können, ist das errechnete Ergebnis, dass sich nämlich durch Aufforstung die Abflüsse in nur sehr geringem Maß verringern, unter den vorgegebenen Bedingungen in den untersuchten Teileinzugsgebieten der Vereinigten Weißeritz nachvollziehbar.

Innerhalb streng festgelegter Randbedingungen können also durch WaSiM-ETH bei Landnutzungsszenarien plausible Erkenntnisse erlangt werden. Für weitergehende Analysen ist jedoch eine detailliertere Abbildung der Prozesse innerhalb von Wäldern und in Waldböden nötig, wie sie beispielsweise in der neuesten WaSiM-ETH-Version oder in physikalisch basierten Standortmodellen umgesetzt werden. Für die Anwendung im Talsperrenmanagement, das auf längeren Zeiträumen beruht und mehr am mittleren Abflussverhalten als an kurzfristigen Veränderungen interessiert ist, ist das Modell geeignet.

Zur Darstellung der Effekte von Klimaänderungen auf den Abfluss ist das Modell sehr gut geeignet. Hier liegen die Grenzen der Modellierung in erster Linie nicht beim Wasserhaushaltsmodell, sondern in der Güte der Eingangsdaten aus den Klimaprognosen. Allgemein können die Datenreihen, die ENKE (2003a) durch ein statistisches Downscaling der gemessenen und prognostizierten globalen Wetterlagen für den sächsischen Raum erstellt hat, für die Modellierung von Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Niederschlag-Abflussprozesse mit WaSiM-ETH verwendet werden. Es ist möglich, Aussagen über das mittlere Verhalten des Abflusses zu geben. Dabei muss beachtet werden, dass die Schwankungsbreite und der Unsicherheitsgrad von Abfluss- und Niederschlagstrends bereits in der Vergangenheit und viel

mehr noch in der Zukunft sehr groß ist. Trotzdem können die in dieser Arbeit errechneten künftigen, tendenziell bis 2050 abnehmenden Abflüsse im Untersuchungsgebiet eine Hilfe für das mittel- und langfristige Einzugsgebiets- und Talsperrenmanagement darstellen. Aussagen über das Auftreten von Hochwässern sind nicht möglich, hier muss auf andere Methoden (z.B. Extremereignisanalysen) zurückgegriffen werden.

Trotz der erfolgten Skalentübertragung auf regionalen Maßstab ist allerdings der räumliche Bezug der Prognosen wahrscheinlich noch zu grob für eine Modellierung in mesoskaligen Einzugsgebieten. Aufgrund der raschen Fortschritte in der Klimamodellierung und in Regionalisierungstechniken kann damit gerechnet werden, dass die hydrologische Modellierung von Klimaprognosen in Zukunft besser gelingen kann. Bis dahin wird aufgrund der vorliegenden Erfahrungen empfohlen, das Modell WaSiM-ETH für die Abbildung hydrologischer Auswirkungen von künftigen Klimaveränderungen in deutlich größeren Einzugsgebieten, als es hier geschehen ist, anzuwenden.

5 summary

This dissertation is part of a project named EMTAL (Reservoir Catchment Management in Mountainous Regions, supported by the BMBF - German Ministry of Education and Research). One of the aims of the project is to develop a methodology to work on ecological and hydrological questions in mesoscale catchment areas in Central European mountains.

For the success of the EMTAL project it is important to choose a model which reproduces all relevant hydrological processes in catchments with reservoirs and which works with public data. Important hydrological processes include the regionalization of input data in different spatial resolutions, the calculation of interception, evapotranspiration, infiltration, the production of surface runoff, interflow, baseflow and groundwater and the routing of the water in channels. The precipitation-runoff-model must be able to calculate hydrological responses to changes in land use and climate.

The model WaSiM-ETH was chosen for the EMTAL project as it contains all these processes. The model reproduces very well total runoff in different catchment areas now and in the past. This was proven through comparison with data from several gauges. It also reproduces direct runoff, interflow and base flow. The hydrological processes leading from precipitation to runoff are calculated well. WaSiM-ETH is based on rasters and can be used in a wide range of time steps and spatial resolutions. It was shown that calculated runoff does not differ much in raster sizes between 20 m and 500 m. This means that input data in a wide range of available resolutions can be used for modelling. Modelling in raster sizes of 1000 m thus results in a much larger bias. Only small changes in parameters are needed in order to use the model in different time steps. WaSiM-ETH is therefore highly flexible and can be used with publicly available data for the catchment area of interest.

The model is built of several modules which each represent one main process in the hydrology of a catchment area. For each aspect several different algorithms can be chosen which are more or less conceptual or physical. The module and algorithm chosen by the modeler depend on availability and quality of the input data and on the chosen time step. The different algorithms were tested for every hydrological process and with only one exception - the snow model - the more physical ones were found to be more appropriate. The soil module with the Richards equation shows some conceptual aspects which are necessary for modelling a mesoscale catchment area. However, it is easier to follow the processes than by using the fully conceptual algorithms based on a approach similar to TOPMODEL (BEVEN U. KIRKBY 1979). The latter cannot be transferred into different areas or times whereas this is possible using the soil module based on the Richards equation. This could be clearly shown by using the calibrated model with both algorithms in the soil module in different subcatchments within catchment area of Vereinigte Weißeritz and within a similar catchment area of the river Zschopau some kilometers to the west.

The model WaSiM-ETH has been developed to reproduce precipitation-runoff processes in a changing climate. This fact has a direct impact on the ability of the model to calculate the

effects of changing land use and changing climate. There are certain restrictions for modelling land use changes. These restrictions originate in the existing and not-existing knowledge about processes especially in the soil, in the representation of these processes in the model and in the ability to find suitable parameters for the algorithms used. This was shown for different types of scenarios which are all based on real trends or official measures within the regions looked at. One example is changing methods in agriculture. These methods cannot be portrayed in the model in all necessary aspects, but it is possible to define conditions in which modelling of a scenario can be done. For these kinds of scenarios it is very important to be aware of the area of validity of the algorithms and parameters used. This means each scenario must be produced and calculated individually and is not directly transferable in space or time. In spite of this the scenarios calculated within this work show plausible results. So changing agriculture to one without tilling and with higher vegetation coverage leads to decreasing surface runoff but not to a decrease in total runoff. The scenarios where the catchment area is afforested in parts leads to similar results. This means in catchment areas as those of the rivers Rote Weißeritz and Wilde Weißeritz there will always be flash floods, be there only forest or the current land use. For more specified analyses a more detailed and more process-oriented model should be used. The model WaSiM-ETH is suitable for use in management of catchment areas of reservoirs for which average behaviour and long-term changes are of interest.

WaSiM-ETH is able to calculate effects of climate changes on precipitation-runoff processes. Limits in modelling here do not primarily result from the precipitation-runoff model, but from the quality of input data produced by climate models. The data from global models must be regionalized first to the scale of Central Europe and then to the scale of the catchment area looked at. This was done by means developed by ENKE (2003a). By statistical downscaling, data for single stations is produced, which can be used in WaSiM-ETH. It is important to pay attention to the fact that there is a huge range and great uncertainty in trends in precipitation and runoff and thus an even greater uncertainty in the future. Even so the trends calculated in this work can be of great use for long-term reservoir management. Very likely runoff will not increase in the catchment area of Vereinigte Weißeritz but will probably decrease especially in spring. The methodology used cannot provide any information about extremes. If information in this field is needed, statistical means must be used.

Although a statistical downscaling was made, the region may be too small for modelling hydrological response to climate change. That is true regarding the spatial resolution of climate scenarios and the methodology of generating station data. Methods for downscaling climate data are improving continually and it is very likely that modelling effects of climate change on hydrology will become much more precise. Until then the methodology presented can be used in mesoscale catchment areas such as in this work, but it should not be used in smaller ones.

6 Literatur

- Abbot M B, Bathurst J C, Cunge A, O'Connell P E, Rasmussen J (1986) An introduction to the SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87: 61-77
- AG Boden (1996) *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 4. Auflage. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Ahnert F (1996) *Einführung in die Geomorphologie*. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart
- Ahrens B (2003) Evaluation of precipitation forecasting with the limited area model ALADIN in an alpine watershed. *Meteorol. Zeitschrift* 12(5): 245-255
- Aitken A P (1973) Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 20: 121-136
- Alcamo J (Hrsg., 2001) *Scenarios as tools for international environmental assessments*. Environmental issue report No. 24, European Environmental Agency, Copenhagen.
- Anderson E A (1973) National Weather Service river forecast system - snow accumulation and ablation model. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), Tech. Mem., NWS-HYDRO-17, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, MD
- Balzer K, Enke E, Wehry W (1998) *Wettervorhersage: Mensch und Computer - Daten und Modelle*, Springer Berlin
- Baratta M (Hrsg., 1998) *Der Fischer Weltalmanach 1999*, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main
- Bardossy A (1997) Downscaling from GCMs to Local Climate through Stochastic Linkages. *Journal of Environmental Management* 49: 7-17
- Bartels H (2005) Vergleich regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland. *Kliwa-Berichte*, Heft 2: 73-86
- Battaglia G J (1996) Mean Square Error. *AMP Journal of Technology* 5: 31-36
- Becker A, Klöcking B, Lahmer W, Pfützner B (2002) The Hydrological Modelling System ARC/EGMO. In: Singh V P, Frevert D K (Eds.): *Mathematical Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton/Colorado, S. 321-384
- Berger A (2005) *Niederschlag-Abfluss-Modellierung für das obere Einzugsgebiet der Zschopau mit WaSiM-ETH*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Bergström S, Forsman A (1973) Development of conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Nordic Hydrology* 4: 47-70
- Bernhardt A (1995) Osterzgebirge - In: Mannsfeld K, Richter H (Hrsg.) *Naturräume in Sachsen*. - Forschung zur Deutschen Landeskunde, Selbstverlag Trier, S. 188-192
- Beven K J (1989) Changing ideas in hydrology: the case of physically based models. *J. of Hydrol.* 105: 157-172
- Beven K J (2001) *Rainfall-runoff Modelling. The Primer*. John Wiley
- Beven K J, Hornberger G M (1982) Assessing the Effect of Spatial Pattern of Precipitation in Modeling Stream Flow Hydrographs. *Water Res. Bull.* 8/5: 823-829

- Beven K J, Kirkby M J (1979) A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1): 43-69
- Beyer P (1973) *Das Erzgebirge*. VEB F.A. Brockhaus Verlag, Leipzig
- Bianchin S (2003) Einfluss sozioökonomischer und naturräumlicher Faktoren auf die Änderung der landwirtschaftlichen Flächennutzung im Gebiet der Roten Weißeritz (Osterzgebirge) seit der politischen Wende in Ostdeutschland. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden
- Bicker E (1998) Strukturelle Wirkungen von volks- und betriebswirtschaftlichen Kosten staatlicher Regulierungen, dargestellt am Beispiel der Agrarpolitik in Deutschland und der Europäischen Union, Peter Lang-Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt a. M.
- Blaschke K (1967) *Bevölkerungsgeschichte Sachsens bis zur industriellen Revolution*. Böhlau-Verlag Weimar
- Blöschl G (1996) *Scale and scaling in hydrology*. Habilitationsschrift, Technische Universität Wien
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2004) *Qualität hat Vorrang - Die Agrarwende in Deutschland ist da*. Druckerei Dehl, Düsseldorf
- Braun L N (1985) Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. *Zürcher Geographische Schriften* 21, ETH Zürich
- Bronstert A (2004) *Wasserhaushalt und Abfluss*. - In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): *Flussgebietsbewirtschaftung - quo vadis Modellierung*, Koblenz.
- Bronstert A, Bárdossy A (2003) Uncertainty of runoff modelling at the hillslope scale due to temporal variations of rainfall intensity. *Physics and Chemistry of the Earth* 28: 283-288
- Bronstert A, Carrera J, Kabat P, Lütke-meier S (Hrsg., 2005) *Coupled Models for the Hydrological Cycle*. Springer Verlag Berlin
- Brown A E, Zhang L, McMahon T A, Western A W, Vertessy R A (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. of Hydrol.* 310: 28-61
- Buchner W (2003) Bodengefüge im Rahmen der Fruchtfolge stabilisieren. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) *Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung - Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung*. Texte 35/04: 36-45
- Cameron D, Beven K, Naden P (2000) Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 4(3): 393-405
- David V, Dostal T, Novakova H, Vrana K (2005) Structured approach of surface runoff production from small catchments - application in small catchments. Tagungsband des EMTAL-workshop 6./7.10.2005 in Freiberg, S. 135-142
- Dawdy D R, Bergmann J M (1969) Effect of Rainfall Variability on Streamflow Simulation. *Water Resources Research* 5/5: 958-966
- Deutsch M (2004) Anmerkungen zum Schutz des Wassers in historischer Zeit in Thüringen. In: Deutsch M, Hack H-P, Pörtge K-H, Rost K T, Teltscher H (Hrsg.) *Wasser - Lebensnotwendige Ressource und Konfliktstoff*, Erfurter Geographische Studien. Heft 11: 9-16
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (Hrsg.) (1996) *Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen*. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (Hrsg., 1999) Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK-Schriften, Heft 127. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (1997) Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA: Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung. Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- Dyck S, Peschke G (1995) Grundlagen der Hydrologie, Verlag für Bauwesen Berlin.
- Eckhardt K (2001) Vergleich zweier Verfahren zur automatischen Modellkalibrierung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 46/2: 69-73
- Eckhardt K, Breuer L, Frede H-G (2003) Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. J. of Hydrol. 273: 164-176
- EEA (2004) Impacts of Europe's changing climate, An indicator-based assessment, Rep. No. 2. European Environment Agency (EEA), Luxembourg
- Eisold B (2002) Überprüfung der Eignung des physikalisch begründeten Ansatzes „BROOK90“ für die Berechnung von N-A Charakteristika im Einzugsgebiet der Weißeritz. Diplomarbeit, TU Dresden
- Enke W (2001) Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen - Abschlussbericht (SMUL), Dresden
- Enke, W (2003) Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulation, Zusammenfassender Bericht zum Forschungsvorhaben. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Zusammenfassender Bericht, Dresden
- Enke, W (2003a) Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulationen. Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Aktenzeichen 13-8802.3521/51
- Enke W, Deutschländer T, Schneider F, Küchler W (2005) Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulation. Meteorologische Zeitschrift 14/2: 247-257
- Estler M, Knittel H (1996) Praktische Bodenbearbeitung. 2. völlig überarbeitete Auflage, Verlagsunion Agrar, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt
- Europäische Gemeinschaft (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. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L327
- Federer C A, Lash D (1983) BROOK - a hydrological simulation model for eastern forests. Water Resources Research Center, University of New Hampshire.
- Flemming G (1993) Das Klima des Tharandter Waldes - Basis und Zustandsklima im Überblick. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 42/1: 73-77
- Forstamt Tharandt (2001): Waldmehrungsplanung FoA Tharandt, unveröffentlicht
- Franke J, Bernhofer C (2005) Regionalisierung des Niederschlages in hoher raumzeitlicher Auflösung im Mittelgebirge. Tagungsband des EMTAL-workshop 6./7.10.2005, Freiberg, S. 238-244
- Frei C (2003) Der Nachweis von Trends stößt an Grenzen. In: OcCC (Hrsg.) Extremereignisse und Klimaänderung. ProClim, Bern. S. 25-27
- Frerichs W, Kübler K (1980) Gesamtwirtschaftliche Prognoseverfahren. Verlag Franz Vahlen München

- Frey W, Lösch R (1998) Lehrbuch der Geobotanik. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- Friese H (2002) Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat 33 - Oberirdische Gewässer, schriftliche Mitteilung am 21. April 2002, Auszug aus dem sächsischen Wasserlaufverzeichnis, Stand 26.4.2002
- Fritsch U (2002) Entwicklung von Landnutzungsszenarien für landschaftsökologische Fragestellungen. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Potsdam
- Gerlinger K (2004) Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) Tagungsband des 2. Symposium zum Projekt „Klimaveränderung und Wasserwirtschaft“ (KLIWA). S. 87-102
- GKB (Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V.) (2005) <http://www.gkb-ev.de>, Stand 15.5.2006
- Gömann H, Kreins P, Julius C (2003) Regionalisierung des makroskaligen Angebotsverhaltens landwirtschaftlicher Landnutzer im Elbeinzugsgebiet bei Szenarien zu Klima- und Agrarmarktänderungen. Endbericht des Teilvorhabens im Rahmen des Projektes: GLOWA-Elbe - Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft im Elbegebiet. Bonn
- Goddard L, Mason S J, Zebiak S E, Ropelewski C F, Basher R, Cane M A (2001) Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *Int. J. Climatol.* 21: 1111-1152
- Goldberg V, Frühauf C, Bernhofer C, Wienhaus O, Zimmermann F, Seelig U (1998) Regional- und Lokalklima des Osterzgebirges - In: Nebe W, Roloff A, Vogel M (Hrsg.) Untersuchung von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldumbau, Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, TU Dresden, S. 28-38
- Green W H, Ampt G A (1911) Studies on Soil Physics: I. The flow of air and water through soils, *Journal of Agricultural Sciences* 4: 1-24
- Groß U (1996) Einfluß unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Verschlammungsneigung und Aggregatstabilität verschiedener Böden. Wissenschaftlicher Fachverlag Dr. Fleck, Langdöns. Dissertation
- Grube J (2003) Beurteilung von konservierenden Bodenbearbeitungssystemen zur Bewirtschaftung peripherer Ackerbaustandorte - unter Berücksichtigung verfahrenstechnischer, ökonomischer, ökologischer sowie pflanzenbaulicher und bodenphysikalischer Parameter. Dissertation. Cuvillier Verlag Göttingen
- Gruber W (1993) Auswirkung der Bodenbelastung mit landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen auf der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge. Wissenschaftlicher Fachverlag Dr. Fleck, Langdöns. Dissertation
- Grünwald U (2005) Hochwasser als Natur-, Schadens- und Politikerereignis. In: Böhme M, Krüger F, Ockenfeld K, Geller W (Hrsg.) Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002 : Eine Kurz-Darstellung der Fakten und Hilfen zu deren Bewertung. S. 74-89
- HAD (Hydrologischer Atlas von Deutschland) (2000) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Bonn
- Hagedorn C (2003) Kalibrierung des Wasserhaushalts-Simulations-Modells WaSiM-ETH für das Einzugsgebiet des Reichstädter Bachs. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Hertwig T, Legler C, Pöhler H, Sames D (2004) Parametrisierung, Anpassung und Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH für das Einzugsgebiet der Parthe

- sowie Berechnung von drei Landnutzungsszenarien auf Grundlage der Klimaprognose von Sachsen. Abschlussbericht. Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden
- Hey T (2004) Flutkatastrophe 2002: Das Augusthochwasser in Dresden. CD-ROM, Umweltamt Dresden
- Hisdal H, Stahl K, Tallaksen L M, Demuth S (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *Int. J. Climat.* 21: 317-333 (2001)
- Houghton J T, Callander B A, Varney S K (Hrsg., 1992) *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment; Supplementary Report.* Cambridge University Press, Cambridge
- Ihringer J (2004) Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasserstatistik. Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) Tagungsband 2. Symposium zum Projekt „Klimaveränderung und Wasserwirtschaft“ (KLIWA). S. 153-168
- Irrgang S (2003) Waldstruktur und Waldverteilung - Optimierung der Funktion des Waldes für den Landschaftswasserhaushalt und den Hochwasserschutz. Veröffentlichungen der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, Dresden
- Jacob D, Podzun R (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics* 63: 119-129
- Jähnichen R (1998) Die Privatisierung der sächsischen Landwirtschaft - Zwischenbilanz eines Neuaufbaus. - Freistaat Sachsen, Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Dresden
- Jenkins L (1997) Selecting a Variety of Futures for Scenario Development. *Technological Forecasting and Social Change* 55/1: 15-20
- Jordan H, Weder H-J (1995) *Hydrogeologie: Grundlagen und Methoden; Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen.* 2. Auflage, Stuttgart, Enke-Verlag
- Joschko M, Rogasik H, Brunotte J (1996) Einfluß konservierender Bodenbearbeitung auf Bodentiere und Bodengefüge von Lehmböden. in: *Wissenschaftliche Mitteilung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAI), SH 178: 69-82*
- Kaulfuß W (1999) Im Quellgebiet der Müglitz, Natur- und Kulturraumführer im Sächsisch-böhmischen Grenzgebiet. - In: *Dresdner Geographische Beiträge Sonderheft 1 - Technische Universität Dresden, Institut für Geographie*
- Kaulfuß W, Kramer M (2000) Naturlandschaften und Nutzungspotentiale Sachsens. In: *Kowalke H (Hrsg.) Sachsen. Perthes Länderprofile. Klett-Perthes-Verlag Gotha, S. 71-73*
- Kendall M G (1975) *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London
- Kleinhans A (2003) Einfluss der Waldkonversion auf den Wasserhaushalt eines tropischen Regenwaldeinzugsgebietes in Zentral Sulawesi (Indonesien). Dissertation. Universität Göttingen
- Klemeš V (1986) Operational testing for hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31, 1, 3/1986
- Klöcking B, Haberlandt U (2002) Impact of land use changes on water dynamics - a case study in temperate meso and macroscale riverbasins. *Physics and Chemistry of the Earth* 27: 619-629
- Komischke H (2005) Hydrologische Modellierung der Weißeritzen für die Jahre 1970 bis 1990 und Vergleich mit der Modellierung im letzten Jahrzehnt. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Kotlarski S, Block A, Böhm U, Jacob D, Keuler K, Knoche R, Rechid D, und A Walter (2004) Regional climate model simulations as input for hydrological applications: evaluation of uncertainties. *Advances in Geosciences* 5: 119-125

- Kowalke H (2000) Die Entwicklung der Raumstrukturen bis zur Industrialisierung und der Industrialisierungsprozeß. In: Kowalke H (Hrsg.) Sachsen. Perthes Länderprofile. Klett-Perthes-Verlag Gotha, S. 101-157
- Kunstmann H, Stadler C (2003) Gekoppelte hochaufgelöste Meteorologie-Hydrologie-Simulationen für das alpine Einzugsgebiet der Mangfall. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 47/4: 151-158
- Kunstmann H, Schneider K, Forkel R, Knoche R (2004) Impact analysis of climate change for an alpine catchment using high resolution dynamic downscaling of ECHAM4 time slices, *Hydrology and Earth System Sciences* 8: 1030 - 1044
- Lammers R B, Band L E, Tague C L (1997) Scaling behaviour of watershed processes. In: Van Gardeningen P R, Foody G M, Curran P J (Ed.) *Scaling up: from cell to landscape; society for experimental biology seminar series 63*. Cambridge University Press, S. 295-317
- Landwirtschaftsamt Pirna (2003) Datenauszug: Anbaustrukturen des Weißeritzkreises 1993-2002
- Lange C A, Matschullat J, Zimmermann F, Sterzik G, Wienhaus O (2003) Fog frequency and chemical composition of fog water - a relevant contribution to atmospheric deposition in the eastern Erzgebirge, Germany. *Atmospheric Environment* 37: 3731-3739
- Lange R (2001) Vergleichende Bewertung und Integration von Verfahren zur quantitativen Abschätzung von unterschiedlichen Abflussanteilen. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU BA Freiberg
- Lauterbach G (2000) Wasser- und Stoffhaushalt dreier Waldökosysteme des Osterzgebirges. Dissertation an der Georg-August-Universität, Institut für Geologie und Dynamik der Lithosphäre. Göttingen
- Legates D R (1999) Evaluating the use of „goodness-of-fit“ measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1): 233-241
- LfUG (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2002a) Hydrologisches Handbuch, Teil 1: Pegelverzeichnis, Dresden
- LfUG (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2002b) Potentiell natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1:200000 - In: *Materialien zur Naturschutz und Landespflege 2002*, Dresden
- Libiseller C, Grimvall A (2002) Performance of Partial Mann-Kendall Test for Trend Detection in the Presence of Covariates. *Environmetrics* 13: 71-84
- Liebscher H-J (2004) Potenzielle und aktuelle Wasserkonflikte in grenzüberschreitenden Flussgebieten. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 48/2: 71-79
- Lüscher P, Zürcher K (2003): Waldwirkung und Hochwasserschutz: Eine differenzierte Betrachtungsweise ist angebracht. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2003, Hrsg.) *Hochwasserschutz im Wald*. lerchl Druck, Freising. S. 30-33
- Lütke-Entrup N L, Schneider M (2003) Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Systeme der Bodennutzung durch Fruchtfolgegestaltung und konservierende Bodenbearbeitung/Direktsaat. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) *Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung - Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung*. Texte 35/04: 7-35
- Luft H (1998) Agrargenossenschaften gestern, heute und morgen - Zur Geschichte der Landwirtschaft in der DDR und ihre Perspektive im vereinten Deutschland - In: *Forscher- und Diskussionskreis DDR-Geschichte, Hefte zur DDR-Geschichte*, 50, Gesellschaftswissenschaftliches Forum Berlin „Helle Panke“

- Madsen J D, Chambers P A, James W F, Koch E W, Westlake D F (2001) The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia* 444: 71-84
- Madsen H, Wilson G, Ammentorp H C (2002) Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *J. of Hydrol.* 261: 48-59
- Mann H B (1945) Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica* 13: 245-259
- Mannsfeld K, Richter H (Hrsg., 1995) *Naturräume in Sachsen. Forschung zur deutschen Landeskunde, Band 238. Zentralausschuss für deutsche Landeskunde, Selbstverlag Trier*
- Maurer T (1997) *Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Universität Karlsruhe; Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Dissertation*
- McGuffie K, Henderson-Sellers A (2001) Forty years of numerical climate modelling. *Int. J. Climatol.* 21: 1067-1109
- Miegel K, Peschke G (1993) Langjährige Windrichtungsbeobachtungen über dem Tharandter Wald. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 42, Heft 1: 78-81
- Mitchell T D, Carter T R, Jones P D, Hulme M, New M (2004) A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). Tyndall Centre for Climate Change Research – Working Paper; http://www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp55.pdf
- Mittelbach H (1992) *Strukturwandel in der Landwirtschaft, Forum Deutsche Einheit, Perspektiven und Argumente Nr. 11. - Friedrich-Ebert-Stiftung Bonn-Bad Godesberg*
- Monteith J L (1965) *Evaporation and environment. - In: Fogy G T (Hrsg.) Sympos. The state and movement of water in living organisms. 205-234, Cambridge Univ Press*
- MPI-M (Max-Planck-Institut für Meteorologie) (2006) *Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg*
- Münch A (1994) *Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. Dissertation, TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften*
- Muschkowski K (2006) *Umweltökonomische Bewertung von Bodenerosionsschäden am Fallbeispiel eines Einzelschlags im Einzugsgebiet des Reichstädter Bachs. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg*
- NABU (2002) *Waldmehrung in Sachsen. Stellungnahme zum Förderprogramm „Förderung der ökologischen Waldmehrung im Freistaat Sachsen“*
- Nash J E, Sutcliffe J V (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - a discussion of principles. *J. of Hydrol.* 10 (3): 238-250
- Nebe W, Vogel M, Kadro A (1998) *Charakterisierung des Untersuchungsgebietes - In: Nebe W, Roloff A, Vogel M (Hrsg.) Untersuchung von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldumbau, Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, TU Dresden, S. 4-6*
- Neitsch S L, Arnold J G, Kinry J R, Williams J R, King K W (2002) *Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation Version 2000. - Temple, Texas USA. Nicholson S E (1989) African drought: characteristics, causal theories and global teleconnections. Geographical Monographs 52: 79-100*
- Niehoff D (2001) *Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation Universität Potsdam, mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät*

- Nielsen D R, Van Genuchten M Th, Biggar J W (1986) Water Flow and Solute Transport Processes in the Unsaturated Zone. *Water Resources Research* 22: 89-108
- Nitzsche O, Schmidt W, Richter W (2000) Minderung des P-Abtrags von Ackerflächen durch konservierende Bodenbearbeitung. *Mittlg. Bodenkundliche Gesellsch.* 92: 178-181
- Obled C, Wendling J, Beven K (1994) The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data. *J. of Hydrol.* 159: 305-333
- OcCC (2002) Extremereignisse und Klimaänderung. ProClim - Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Zürich
- Perrin C, Michel C, Andréassian V (2001) Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. of Hydrol.* 242: 275-301
- Peschke G (1977) Ein zweistufiges Modell der Infiltration von Regen in geschichtete Böden. *Acta hydrophysica* 22 (1): 39 - 48.
- Peschke G (1987): Soil Moisture and Runoff Components from a Physically Founded Approach. *Acta hydrophysica* 31 (3/4): 191-205.
- Pietzsch K (1956) Abriss der Geologie von Sachsen. 2. Auflage. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- Pöhler H (2005a) Future run-off in eastern Erzgebirge (Saxony, Germany) – do we have to expect non-linear changes? Vortrag. 56. Berg- und Hüttenmännischer Tag - TU Bergakademie Freiberg, 2005
- Pöhler H (2005b) Landnutzungsänderungen und Hochwasserschutz: Veränderungen in Wasserhaushalt und Abflussgeschehen am Beispiel konservierender Bodenbearbeitung und Waldmehrung. Tagungsband des EMTAL-workshop 6./7.10.2005 in Freiberg, S. 124-134
- Pöhler H (2006) Projekt Pöhlbach, Landkreis Annaberg für die Stadtwerke Annaberg-Buchholz - Teilbereich hydrologische Modellierung. Zwischenbericht 10.3.2006, Annaberg
- Pöhler H, Dunger V, Matschullat J (2005) Modellansätze und Variablenbewertung bei der hydrologischen Modellierung. - In: Nacken H, Bartussek S, Sewilam H (Hrsg.) Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, Heft 10.05, Aachen
- Ponce-Hernandez R, Koohafkan P, Antoine J (2004) A methodological framework for the assessment of carbon stocks and development of carbon sequestration scenarios: FAO experiences based on the integration of models to GIS. - In: Smith C.A.S. (ed.) *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analysis*. Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.
- Richter D (1995a) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194
- Richter U (1995b) Einfluß langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. - In: *Boden und Landwirtschaft*, Bd. 4, Dissertation Universität Gießen
- Richter U, Terbrügge F (1996) Bearbeitung von Lehmböden und Gefügeveränderungen. - In: *Wissenschaftliche Mitteilung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAI)*, SH 178: 27-42
- Rohdenburg H (1989) Methods for the analysis of agro-ecosystems in Central Europe, with emphasis on geocological aspects. In: *Catena* 16: 1-57
- Sachs L (2002) *Angewandte Statistik*. 10. Auflage. Springer-Verlag Berlin

- Salmi T, Määttä A, Anttila P, Ruoho-Airola T, Amnell T (2002) Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's slope estimates - the excel template application MAKESENS. Publications on air quality No. 31
- Schär C, Frei C, Fukutome S, Lüthi D, Kleinn J, Seneviratne S, Vidale P L (2000) Regionale Klimamodelle - Möglichkeiten und Grenzen. *Kliwa-Berichte*, Heft 1: 93-103
- Schär C, Wernli H, Frei C (2003) Methodik regionaler Klimaszenarien. In: OcCC (Hrsg.) *Extremereignisse und Klimaänderung*. ProClim, Bern. S. 28-34
- Schönwiese C-D (1995) *Klimaänderungen: Daten, Analysen, Prognose*. Springer Verlag Leipzig Heidelberg
- Schönwiese C-D, Böhm R, Claussen M, Cubasch U, Fischer H, Gärtner U, Graßl H, Rahmstorf J, Sündermann J, Wehry W, Kromp-Kolb H, Richner H (2001) Klimastatement anlässlich DACH-MT 2001 vom 18. September 2001. Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG), der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie (ÖGM) und der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie (SGM)
- Schönwiese C-D (2004) *Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland*. 4. Annaberger Klimatage, Vortrag Mai 2004
- Schramm D (2004) Quantifizierung des Abflussverhaltens in Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz mittels Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Schulla J (1997) Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss ETH 12018, Verlag Geographisches Institut ETH Zürich
- Schulla J, Jasper K (1998) Modellbeschreibung WaSiM-ETH, Stand 21. Dezember 1998
- Schulla J, Jasper K (2001) Model Description WaSiM-ETH, last updated 19th july 2001
- Schulla J, Jasper K (2005) Model Description WaSiM-ETH, last updated 23th december 2005
- Schumann A H, Antl M, Geyer J (2001) Probabilistische Abschätzung der Unsicherheit von Aussagen zu hydrologischen Auswirkungen globaler Klimaveränderungen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 45/4: 154-162
- Schwarze R, Hebert D, Opherden K (1995) Zur Altersstruktur des Abflusses in kleinen Einzugsgebieten, *Isotopes Environ. Health Stud.* 31: 15-28
- Schwendel A (2006) Fließgewässer und Aue - Kartierung und Bewertung hydromorphologischer und ökologischer Komponenten am Beispiel der Weißeritz (Osterzgebirge/Sachsen). Unveröffentlichte Diplomarbeit. Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Seidler C, Merta M, Fjodorowa T, Hellie F (2005) Prozessbezogene Verdunstungsuntersuchungen und ihre Nutzung für die Qualifikation hydrologischer Modelle. *IHI-Schriften*, Heft 17, Zittau
- Seitz H (2005) Demographischer Wandel in Sachsen: Teilprojekt: Analyse der Auswirkungen des Bevölkerungsrückgangs auf die Ausgaben und Einnahmen des Freistaates Sachsen und seiner Kommunen. Endbericht
- Sequeira M (2003) Landnutzungsänderungen und deren Folgen auf den Wasserhaushalt. Niederschlags-Abfluss-Modellierungen im Einzugsgebiet der Weißeritz, Sachsen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Sieber H-U (1992) *Talsperren in Sachsen*, Sebald Sachsendruck GmbH, Plauen
- Sivapalan M (2003) Prediction in ungauged catchments: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes* 17(15): 3163-3170

- SMUL (Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) (2001) Sächsischer Agrarbericht 2001
- SMUL (Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) (2005) Klimawandel in Sachsen. saxoprint, Dresden
- SMWA (Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit) (2004) Fortschreibung der Grundzüge sächsischer Tourismuspolitik
- Staatliche Zentralverwaltung für Statistik (1990) Endgültige Ernteermittlung per 31.12.1989: Hektarerträge wichtiger Fruchtarten - Getreide, Ölfrüchte, Kartoffeln, Zuckerrüben - der sozialistischen Betriebe, Abschrift, Abt. 4.5, Dresden
- Tang Z, Engel B A, Pijanowski B C, Lim K J (2005) Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of Environmental Management* 76: 35-45
- Terbrügge F, Abelsova J (1999) Auswirkung der Pflug-Bodenbearbeitung und Direktsaat auf biogene Durchporung und ungesättigte Infiltrationsleistung des Bodens. *Landtechnik* 1/99, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup
- Tüxen R (1956) Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. *Angew. Pflanzensoz.* 13: 5-42. Stolzemann/Weser
- Van Genuchten M T (1976) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. - In: *Soil Sciences Society of American Journal*, Vol. 44(5): 892-898
- Van Genuchten M T, Leij F J, Yates S R (1991) The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. EPA/600/2-917065
- Voigtländer U, Scheller W, Martin C (2001) Ursachen für die Unterschiede im biologischen Inventar der Agrarlandschaften in Ost- und Westdeutschland als Grundlage für die Ableitung naturschutzverträglicher Nutzungsverfahren - Ergebnisse aus dem F+E Vorhaben 808 02 005 des Bundesamts für Naturschutz, Bundesamt für Naturschutz. - Bonn - Bad Godesberg
- Wagenbreth O (1982) Geologische Streifzüge - Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Walther A (2004) Kartierung der Landnutzung und des Gewässernetzes im tschechischen Teil des Einzugsgebiets der Wilden Weißeritz innerhalb des EMTAL-Projektes. Unveröffentlichte Diplomkartierung, TU Bergakademie Freiberg
- Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H (Hrsg., 2001) *Climate Change. Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA
- Wechsung F (2005) THESEN zu den Folgen des globalen Wandels auf Wasserverfügbarkeit und Wassernutzungskonflikte im Elbe-Einzugsgebiet (GLOWA-ELBE). Potsdam-Institut für Klimaforschung e.V.
- Weichselgartner J (2000) Hochwasser als soziales Ereignis - Gesellschaftliche Faktoren einer Naturgefahr. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 44/3: 122-131
- Weigert A, Seidel N (2005) Vergleichende Modellierung des Abflussverhaltens und des erosiven Stoffaustrags für die Einzugsgebiete der Roten und Wilden Weißeritz. Tagungsband des EMTAL-workshop 6./7.10.2005 in Freiberg, S. 113-123
- Weinmeister W (2003): Fähigkeiten des Waldes zur Verminderung von Hochwasser und Erosionsschäden. In: *Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2003, Hrsg.) Hochwasserschutz im Wald*. Lerchl Druck, Freising. S. 15-30

-
- Weiss A (2006) Integrierte Bewertung des ökologischen Zustands eines zentraleuropäischen Mittelgebirgsflusses, Dissertation in prep., Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Werner P C, Gerstengarbe F-W (1997) Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research* 8: 171-180
- Wiegand S (1994) Landwirtschaft in den neuen Bundesländern - Struktur, Probleme und zukünftige Entwicklungen. - Wissenschaftsverlag Vauk Kiel KG
- Wilby R L, Hay L E, Leavesley G H (1999) A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *J. of Hydrol.* 225/1-2: 67-91
- Wolf B (2001) Analyse der Niederschlagstrends in Sachsen nach objektiven Verfahren. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg
- Yarnal B, Comrie A C, Frakes B, Brown D P (2001) Developments and prospects in synoptic climatology. *Int. J. Climatol.* 21: 1923-1950
- Zebisch M, Grothmann T, Schröter D, Hasse C, Fritsch U, Cramer W (2005) Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht 20141253, UBA-FB 000844
- Zentrales Geologisches Institut (Hrsg. 1969) Erläuterungen zur Hydrogeologischen Übersichtskarte der Deutschen Demokratischen Republik. Blatt M33-VIII Dresden, Zentrales Geologisches Institut, Berlin
- Zimmermann L, Zimmermann F (2002) Fog deposition to Norway spruce stands at high-elevation sites in the Eastern Erzgebirge (Germany). *J. of Hydrol.* 256: 166-175
- Zwiers F, von Storch H (2004) On the role of statistics in climate research. *Int. J. Climatol.* 24: 665-680

A Anhang

A.1 Eingangsdaten in WaSiM-ETH - Ist-Stand

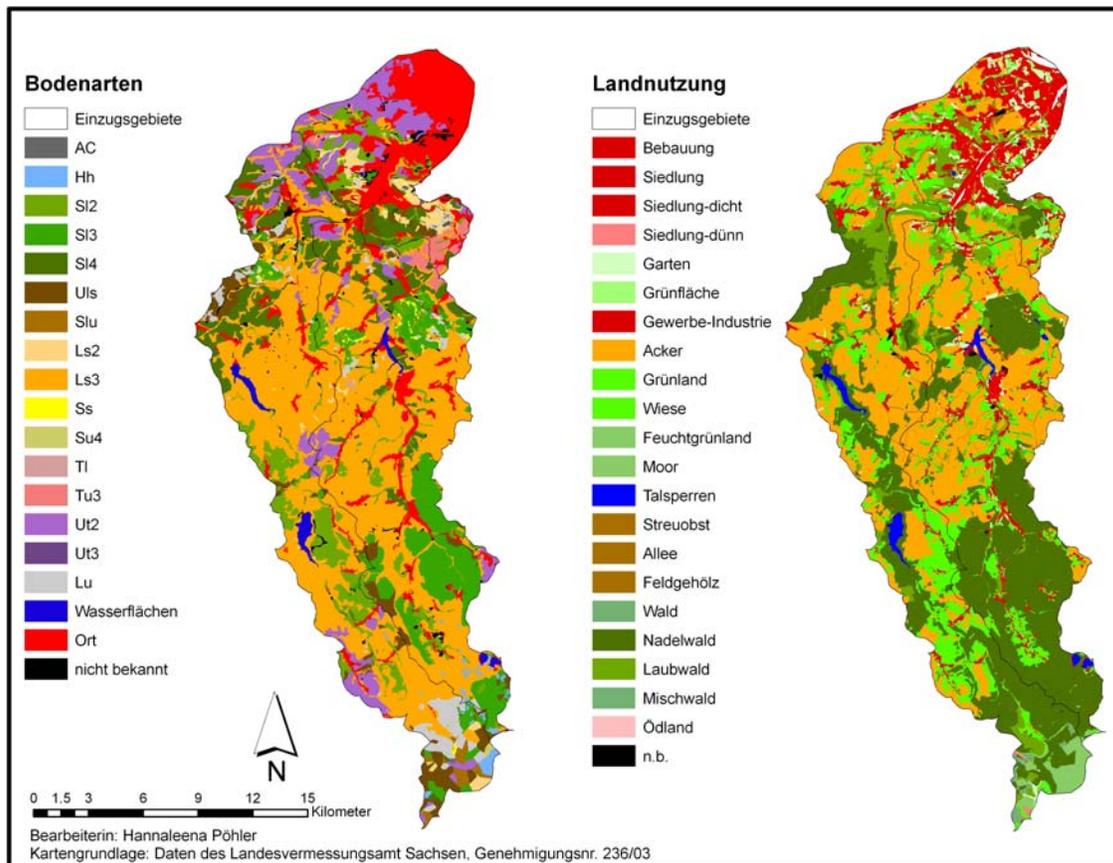


Abbildung A.1: Landnutzung und Bodenarten im Untersuchungsgebiet

Tabelle A.1: ATKIS-Landnutzungskategorien. Aggregierung der vorgegebenen Kategorien des ATKIS-DLM 25 zu in WaSiM-ETH und dem Untersuchungsgebiet sinnvollen Landnutzungseinheiten

Code	Nutzungsart	Code	Nutzungsart
100	Siedlung	110	Siedlung
111	dicht besiedelt	112	dünn besiedelt
113	Garten	114	Grünfläche
120	Verkehrsweg	121	Straße
122	Weg	130	Gewerbe, Industrie
140	Brache	150	Steinwall
200	Acker	300	Grünland
310	Wiese, Weide	320	Feuchtgrünland
321	Quellflur	330	Moor
410	Fließgewässer	420	Standgewässer
421	Talsperre	422	Teich
500	Gehölz	510	Hecke
520	Streuobst	530	Verbuschung
540	Baumschulen	550	Allee
560	Feldgehölz	600	Wald
610	Nadelwald	620	Laubwald
630	Mischwald	700	Ödland
900	unbekannt		

Tabelle A.2: Leitbodenarten für die Parametrisierung in WaSiM-ETH, entnommen der BKKonz und Bodenkartierungen (SCHRAMM 2004, WALTHER 2004, MERTING 2005)

Leitbodenart	zugeordnete Leitbodenprofile im Untersuchungsgebiet	Flächenanteil
Ut2	0003m, 0075m, 0244m, 0481m, 0014m, 0056f, 0166f, 0486m, 0019m, 0070m, 0180m, 0369m, 0468m, 0487m, 0695f	7,52 %
Lu	0043f, 0046f, 0153f, 0157f, 0882f, 0044f, 0154f, 0158f, 0517f, 0877f, 0883f, 0890f, 1454f, 1495f, 0045f, 0150f, 0156f, 0159f, 0888f, 0922f	2,96 %
Ls3	0161m, 0552f, 0849m, 0889f, 0896f, 0899f, 0917f, 1156f, 1217f, 1467f, 1541f, 1820f, 0138m, 0479m, 0763f, 0894f, 0879f, 0914f, 0918f, 0933f, 1273f, 1542f, 1762f, 1822f, 0480m, 0764f, 0847m, 0895f, 0898f, 0915f, 0925f, 0929f, 0934f, 1274f, 1465f, 1767f	40,83 %
Sl2	0371m, 0490m, 0932f, 0940f, 1279f, 1284f, 1574f, 0907f, 1280f, 1575f, 1283f, 1941f	8,61 %
Sl4	0412m, 0470m, 0368m, 0373m, 0413m, 0410m, 1151f, 1549f	7,62 %
Uls	0707f, 0885f, 0893f, 0912f, 0926f, 1452f, 1738f, 0886f, 0910f, 0927f, 0986f, 1157f, 1303f, 0878f, 0892f, 0911f, 1689f	4,48 %
Sl3	0771f, 0903f, 0906f, 0923f, 1981f, 0590f, 0904m, 0924f, 0902f, 0905f, 0908f	9,15 %
Ss	0909f, 0538f, 0884f	0,34 %
Tu3	1029f	1,15 %
Hh	1871f, 1878f, 1874f, 1898f, 1877f	0,59 %
AC	1997f, 1989f, 2003f, 1992f	0,07 %
Slu	0779m, 1162f	0,53 %
Ls2	0900f, 1388f, 1517f	1,54 %
Ut3	1116f	0,01 %
Su4	1026f	0,07 %
Tl	1848f	0,04 %
nk	nk	0,99 %
Ortslage/ versiegelt	ort	12,79 %
Wasser- flächen	wasser	0,96 %

Tabelle A.3: Genutzte meteorologische Stationen für die Modellierung im Untersuchungsgebiet. Zeitraum 1980-2000. Quelle: Sächsische Klimadatenbank. N = Niederschlag, T = Temperatur, RH = relative Luftfeuchte, G = Globalstrahlung, W = Windgeschwindigkeit, SSD = Sonnenscheidauer, D = Dampfdruck, die Großbuchstaben stehen für Daten in täglicher, die entsprechenden Kleinbuchstaben für Daten in stündlicher Auflösung. Datenlücken sind durch Sterne (* Fehlwerte wenige Tage bis ein Monat, ** ein Monat bis ein Jahr, *** länger als ein Jahr in Folge) gekennzeichnet

Parameter	Hochwert/Rechtswert	Höhe [m ü. NN]	Klimaelement
Lehnmuehle	5634290/5400900	430	N
Klingenberg (LS)	5644040/5396930	395	N
DD-Klotzsche	5664870/5416150	177	N, T, W**, D**
Rotherdbach/ Oberbärenburg	5629010/5410440	720	T***, W***, D*** n, t, g, rh, w
Dippoldiswalde	5641920/5406200	350	N, T***, W***, D*** w, g
Zinnwald-Georgenfeld	5623281/5411750	877	T, W, D, G, SSD
Tharandt	5651380/5400590	214	N, T, W**, D***, G n, t, rh
Grillenburg	5647711/5394590	384	T, W***, D, G*** n, t, w
Altenberg	5630780/5407180	550	N
Malter	5645730/5405170	340	N
Oberbobritzsch	5638490/5392060	430	N
Schellerhau	5628920/5407140	785	N
Schmiedeberg	5636360/5406100	455	N
Wildacker	5649480/5399310	385	N***, T, W***, D***, G*** n, g
Fuerstenwalde- Rudolphstadt	5626840/5421220	679	N
Heidenau-Grosssedlitz	5649110/5420390	122	N
DD-Hosterwitz	5654650/5421640	120	N, T***, W***, D***, SSD***
Lauenstein	5628750/5417720	505	N
Geising	5626950/5414170	578	N
Glashuette	5639890/5416720	235	N
Rabenau	5649360/5405170	317	N
Hartha- Foerdergersdorf	5653200/5398210	335	N
Grumbach	5655030/5399420	290	N
Rechenberg- Bienmühle-Holzau	5621620/5401130	761	N
Wernersbach-N1	5648020/5393790	394	N
Wernersbach-N2	5648630/5392780	401	N
Wernersbach-N3	5649400/5392740	368	N
Wernersbach-N4	5650220/5393850	346	N
Wernersbach-N5	5649130/5393790	370	N
Wernersbach-N6	5648410/5394440	402	N
Lugstein	–	–	w, t, rh, g

A.2 Eingangsdaten in WaSiM-ETH - Szenarien

Tabelle A.4: Standardfruchtfolgen in verschiedenen Höhenlagen im Einzugsgebiet der Wilden und der Roten Weißeritz

Standardfruchtfolgen (Sächsisches Landesamt für Landwirtschaft: schriftl. Mitt. NITZSCHE 11.06.2004)	Flächenhaft angebaute Ackerfrüchte für 1998-2004 (Staatliches Amt für Landwirtschaft Pirna: schriftl. Mitt. NEUMANN 01.07.2004; BIANCHIN 2003)	Genutzte Standardfrucht- folgen
Höhenlage < 400 Meter		
Fruchtfolge I: 1. Winterraps (Zuckerrübe) 2. Winterweizen 3. Wintergerste (Sommergerste oder Triticale, wenn unter 1. Zuckerrübe, dann hier Zwischenfrucht)	1. Winterweizen 2. Winterraps 3. Wintergerste und Sommergerste 4. Silo- und Körnermais	Fruchtfolge I: 1. Winterraps 2. Winterweizen 3. Mais Fruchtfolge II: 1. Winterweizen 2. Mais 3. Sommergerste
Fruchtfolge II: 1. Winterraps 2. Winterweizen 3. Mais, ggf. Zwischenfrucht, Sommergerste (Winterweizen)		Fruchtfolge III: 1. Mais 2. Sommergerste 3. Winterraps
Höhenlage 400 bis 600 Meter		
1. Winterraps 2. Triticale (Winterweizen in tieferen Lagen) 3. Wintergerste, ggf. Zwischenfrucht 4. Mais (alternativ Feldfutter im 1. Nutzungsjahr) 5. Sommergerste (alternativ Feldfutter im 2. Nutzungsjahr)	1. Winterweizen 2. Wintergerste 3. Sommergerste 4. Mais 5. Klee, Gras 6. Raps 7. Triticale	Fruchtfolge I: 1. Winterraps 2. Winterweizen 3. Wintergerste Fruchtfolge II: 1. Winterweizen 2. Wintergerste 3. Mais Fruchtfolge III: 1. Wintergerste 2. Mais 3. Sommergerste
Höhenlage > 600 Meter		
1. Winterraps 2. Wintergerste (Triticale) 3. Sommergerste (Körnererbse), ggf. Zwischenfrucht 4. Mais, ggf. Untersaat Feldgras 5. Feldgras 1. Nutzungsjahr (alternativ Sommergerste oder Körnererbse und weiter bei 1.) 6. Feldgras 2. Nutzungsjahr	1. Sommergerste 2. Triticale 3. Silomais 4. Raps	Fruchtfolge I: 1. Winterraps 2. Wintergerste 3. Sommergerste Fruchtfolge II: 1. Mais 2. Feldgras Fruchtfolge III: 1. Feldgras 2. Wintergerste

Tabelle A.5: Die potentiell natürlichen Vegetation (pnv) im Untersuchungsgebiet n - Niedermoor, k - Komplex, z - Zwischenmoor, h - Hochmoor, o - oligotroph, stark degradiert, s - Schlucht, Hang h - Hangschuttwald, q - Quellwald (LFUG 2002b)

Nummer	Bezeichnung PNV	Bezeichnung in WaSiM-ETH
0.1.1	Offene Wasserflächen	Wasser
0.2.1	Bodensaure offene Zwischen- und Niedermoore	Moor-nzk
1.1	Waldmeister-Buchenwald	Buche
1.1.3	Zwiebelzahnwurz-Buchenwald	Buche
1.1.6	Zittergrasseggen-Waldmeister-Buchenwald	Buche
1.2	Springkraut-Buchenwald	Buche
10.1	Silberweiden-Auenwald	Weide
11.1	Großseggen-Erlen-Bruchwald	Erle-Bruch
11.4	Montaner Sumpfdotterblumen-Erlenwald	Erle
12.1/	Moorbirken-Moorgehölz und -Moorwald im Komplex mit	Moor-nkz
0.2.1/	Vegetation bodensaurer offener Zwischen- und Niedermoo-	
11.4	re und Montanem Sumpfdotterblumen-Erlenwald	
12.3.1	Moorkiefern-Moorgehölz	Moor-Kiefer
12.4.2	Berstrauch-Fichten-Moorwald stark degradiertes, oligo-	Moor-Fichte-o
12.4/	tropher Moorstandorte	
0.2.1	Fichten-Moorwald im Komplex mit Vegetation bodensau-	Moor-Fichte-
13.1	erer offener Zwischen- und Niedermoore	nz
13.2	Eschen-Ahorn-Schlucht- und Schatthangwald	Esche-Ahorn-s
13.3	Ahorn-Eschen-Hangfuß- und Gründchenwald	Esche-Ahorn
15.1	Ahorn-Sommerlinden-Hangschuttwald	Ahorn-Linde-h
16.1	Flechtengesellschaften offener Blockhalden	Fels
16.2	Bergbaugebiete und Deponien	Bau
2.1.1	Dichte Siedlungsgebiete	Siedlung
2.1.2	Submontaner Eichen-Buchenwald	Eiche-Buche
2.1.5	(Hoch)kolliner Eichen-Buchenwald	Eiche-Buche
2.1.6	Heidelbeer-Eichen-Buchenwald	Eiche-Buche
2.1.8	Zittergrasseggen-Eichen-Buchenwald	Eiche-Buche
2.3	Flattergras-Eichen-Buchenwald	Eiche-Buche
2.3.2	Hainsimsen-(Tannen-Fichten-)Buchenwald	Buche-Misch
2.3.3	Heidelbeer-(Tannen-Fichten-)Buchenwald	Buche-Misch
2.3.5/	Farn-(Tannen-Fichten-)Buchenwald	Buche-Misch
1.1.3	Flattergras-(Tannen-Fichten-)Buchenwald im Komplex	Buche-Misch
2.3.6	mit Zwiebelzahnwurz-Buchenwald	
2.3.6/	Zittergrasseggen-(Tannen-Fichten-)Buchenwald	Buche-Misch
8.3.3	Zittergrasseggen-(Tannen-Fichten-)Buchenwald im Kom-	Buche-Misch-
2.5.1	plex mit Schaumkraut-(Eschen-)Erlen-Quellwald	qk
3.1.1	Typischer Fichten-Buchenwald	Fichte-Buche
	Waldziest-Hainbuchen-Stieleichenwald	Hainbuche-
		Eiche

Tabelle A.5: Die potentiell natürliche Vegetation (pnv) im Untersuchungsgebiet - Fortsetzung

Nummer	Bezeichnung PNV	Bezeichnung in WaSiM-ETH
3.1.2	Zittergrasseggen-Hainbuchen-Stieleichenwald	Hainbuche-Eiche
3.2.1	Elsbeeren-Hainbuchen-Traubeneichenwald	Hainbuche-Eiche
3.2.2	Typischer Hainbuchen-Traubeneichenwald	Hainbuche-Eiche
3.2.3	Grasreicher Hainbuchen-Traubeneichenwald	Hainbuche-Eiche
5.2.1	Pfeifengras-(Kiefern-)Birken-Stieleichenwald	Birke-Eiche
5.2.4	Submontaner Fichten-Stieleichenwald	Fichte-Eiche
5.3.1	Typischer Kiefern-Eichenwald	Kiefer-Eiche
5.4	Färberginster-Traubeneichenwald	Eiche
5.4.1	Typischer Färberginster-Traubeneichenwald	Eiche
5.4.2	Thermophiler Färberginster-Traubeneichenwald	Eiche
6.1.1	Typischer Wollreitgras-Fichtenwald	Fichte
6.1.3	Ebereschen-Fichtenwald	Fichte-Eberesche
6.1.5	Torfmoos-Fichtenwald	Fichte-Torf
6.1.6	Rasenschmielen-Fichtenwald	Fichte
6.1.8	Submontaner Pfeifengras-(Kiefern-)Fichtenwald	Fichte
6.1/	Wollreitgras-Fichtenwälder im Komplex mit Vegetation	Fichte-znk
0.2.1	bodensaurer offener Zwischen- und Niedermoore	
6.1/ 11.4	Wollreitgras-Fichtenwälder im Komplex mit Montanem Sumpfdotterblumen-Erlenwald	Fichte-Erle
7.1	Zwergstrauch-Kiefernwald	Kiefer
7.1.1	Typischer Zwergstrauch-Kiefernwald	Kiefer
8.1.1	Typischer Hainmieren-Schwarzerlen-Bachwald	Erle-Bach
8.1.2	Fichten-Schwarzerlen-Bachwald	Fichte-Erle-Bach
8.2	Traubenkirschen-Erlen-Eschenwald	Esche-Misch
8.3.1	Winkelseggen-Erlen-Eschen-Bach- und Quellwald	Erle-Esche-Bach
8.3.3	Schaumkraut-(Eschen-)Erlen-Quellwald	Erle-q
kHK	(Hoch)kolline Hangwaldkomplexe	Misch-h
mHK	Montane Hangwaldkomplexe	Misch-h
sHK	Submontane Hangwaldkomplexe	Misch-h

A.3 Abflusstrends

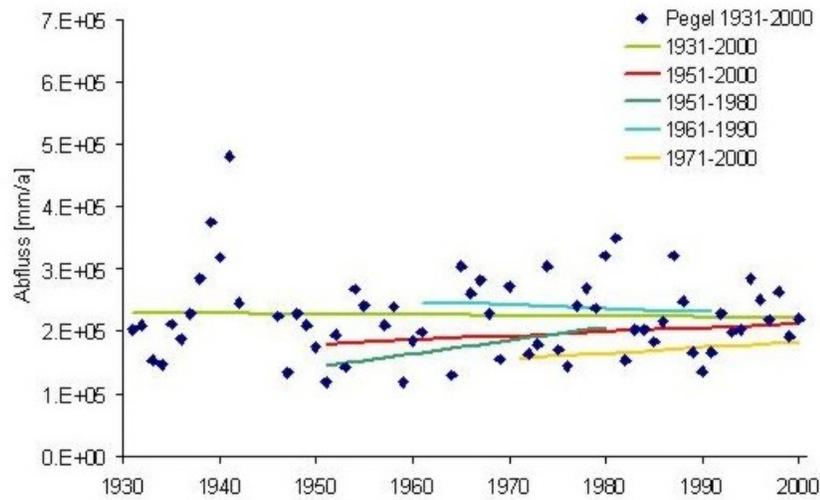


Abbildung A.2: Abflusstrends am Pegel Ammeldorf zwischen 1931 und 2000

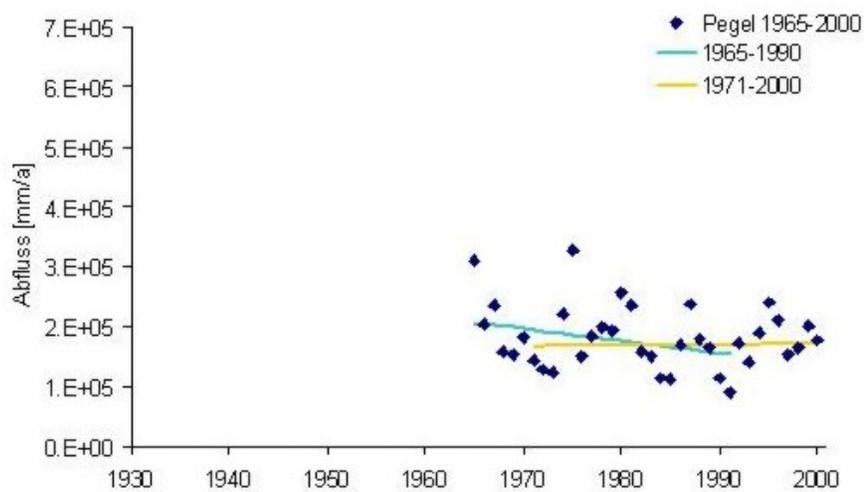


Abbildung A.3: Abflusstrends am Pegel Dippoldiswalde zwischen 1965 und 2000

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.