Simulation der Niederschlag-Abfluss-Verhältnisse zur Rekonstruktion von Hochwasserabflüssen in einem Kleinsteinzugsgebiet der Wilden Weißeritz, östliches Erzgebirge



Diplomarbeit

eingereicht am Geographischen Institut der Freien Universität Berlin

von

Robert Wenzel

Gutachter: Prof. Dr. Achim Schulte Prof. Dr. Brigitta Schütt

Danksagung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Menschen beigetragen. Im Verlauf meines Studiums habe ich große Hilfsbereitschaft und tatkräftige Unterstützung erfahren.

Besonders möchte ich mich bei Prof. Dr. Achim Schulte bedanken, der es mir durch die Schaffung der erforderlichen Rahmenbedingungen ermöglicht hat, diese Arbeit zu erstellen und mir mit wertvollen Ratschlägen und Weitsicht zur Seite stand.

Auch möchte ich mich bei Bettina Mueller sowie Judith und Jens Bölscher bedanken, die die Bürde des Korrekturlesens auf sich genommen haben und wiederholt halfen, meine Gedanken zu ordnen.

Bei der Erstellung des digitalen Geländemodells habe ich Unterstützung von Jan Krause und Dr. Kai Hartmann erfahren. Dafür sei ihnen herzlich gedankt.

Für die fachliche und organisatorische Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit möchte ich mich bedanken bei

- dem Sächsischen Landesamt f
 ür Umwelt und Geologie und hier namentlich Frau Mitzschke, die mir freundlicherweise Wasserstandsdaten zur Verf
 ügung gestellt hat,
- den Mitarbeitern des Forstamtes Bärenfels, Herrn Kubatzsch und Herrn Teubner, die mir bereitwillig Auskünfte und Karteneinsicht gewährten,
- Herrn Kleditzsch vom Grenzschutzamt Chemnitz, der für die benötigte Grenzerlaubnis sorgte,
- Frau Deppe, Mitarbeiterin der Hydrotec GmbH, die mir einen NASIM-Lizenzschlüssel für meinen heimischen Rechner zukommen ließ.

Ferner möchte ich mich für die vierjährige vertrauensvolle und innovative Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe der Angewandten Physischen Geographie der FU bedanken. Hier besonders bei Prof. Dr. Peter Ergenzinger, Dr. Peter Obenauf, Dr. Gerhard Rappold und Carsten Wirtz, die meinen Weg durch das Studium entscheidend mitgeprägt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die zum Gelingen dieser Arbeit mit moralischem Beistand und tatkräftiger Unterstützung beigetragen haben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
2.	EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	3
	2.1 Lage und Erstreckung	3
	2.2 Landschaftsgenese und Geologie	5
	2.3 Anthropogene Nutzung des Raumes	7
	2.3.1 Bergbauliche Nutzung	7
	2.3.2 Bestedlung	8 8
	2.4 Boden	ð
	2.5 Vegetation und Landnutzung	.11
	2.5.2 Rezente Vegetation und Nutzung	. 11
	2.5.3 Versickerung	. 13
	2.5.4 Interzeption	. 13
	2.5.5 Evapotranspiration	. 14
	2.5.6 Waldsterben	. 14
	2.5.7 MOOIE	. 13
	2.6 Geländeklima und spezielle Wetterlagen	.18
	2.6.1 Temperatur	. 18
	2.6.2 Nebel	20
	2.6.4 Luftfeuchte	. 21
	2.6.5 Niederschlag	. 21
	2.6.6 Hochwasserauslösende Niederschlagsereignisse	. 23
	2.7 Hydrologie	. 25
	2.7.1 Allgemeiner Überblick	. 25
	2.7.2 Abflüsse	. 27
	2.7.3 Hochwasser	. 28
	2.8 Zusammenfassende Darstellung der Problematik des Gebietes	. 30
3.	GRUNDLAGEN DER NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-MODELLIERUNG	32
	3.1 Modelltypen	. 32
	3.1.1 Stochastische Modelle	. 32
	3.1.2 Deterministische Modelle	. 32
	3.2 Parameter und Datenzeitreihen	. 33
	3.3 Einsatzgebiete von Niederschlag-Abfluss-Modellen	. 34
	3.4 Zusammenfassung und potentielle Fehlerquellen	. 34
4.	METHODISCHES VORGEHEN BEI DER MODELLERSTELLUNG	36
	4.1 NASIM – Einordnung des Modells	. 36
	1 ? Verarbeitung der Parameter in NASIM	36
	4.2.1 Belastungsbildung	. 37
	4.2.2 Belastungsverteilung	. 37
	4.2.3 Belastungsaufteilung	. 37
	4.2.4 Abflusskonzentration	. 38
	4.2.5 Translation der Welle	. 38

0	
4.3.1 Kartengrundlage	39
4.3.2 Erstellung der Zeitflächenfunktion (ZFL)	39
4.3.3 Abbildung der Böden	43
4.3.4 Bildung der Elementarflächen	43 11
4.5.5 Ors-import and Emittentiang des IVASINI-Systemptans	++
4.4 Zusammenfassende Darstellung der Modellerstellung	45
5. ERGEBNISSE DER MODELLIERUNG	46
5.1 Erstellung der Zeitflächenfunktion	46
5.2 Bildung der Elementarflächen	48
5.3 Einrichtung des Systemplans	49
5 4 Zeitreihen	50
5.4.1 Niederschlag:	
5.4.2 Temperatur.	52
5.4.3 Verdunstung	52
5.4.4 Abfluss	53
5.5 Modellierung der Monatsperiode 15. Juni bis 15. Juli 1999	54
5.5.1 Modellierungsdurchlauf mit Standardparametern	54
5.5.2 Modellierungsdurchlauf mit optimierten Parametern	57
5.6 Modellierung der Jahresperiode 01. April 1999 his 31. März 2000	
5.6.1 Modellierungsdurchlauf mit Standardparametern	60
5.6.2 Modellierungsdurchlauf mit optimierten Parametern	62
5.7 Zusammenfassung	65
6. DISKUSSION UND BEWERTUNG DER MODELLIERUNG	66
6.1 Güte der Modellparameter	66
6.1 Güte der Modellparameter	 66
6.1 Güte der Modellparameter 6.1.1 Meteorologische Messreihen 6.1.2 Böhmischer Nebel	66 66
6.1 Güte der Modellparameter 6.1.1 Meteorologische Messreihen 6.1.2 Böhmischer Nebel 6.1.3 Böden	66 66 66 67
6.1 Güte der Modellparameter 6.1.1 Meteorologische Messreihen 6.1.2 Böhmischer Nebel 6.1.3 Böden 6.1.4 Auftauprozesse	66 66 66 67 67
6.1 Güte der Modellparameter 6.1.1 Meteorologische Messreihen 6.1.2 Böhmischer Nebel 6.1.3 Böden 6.1.4 Auftauprozesse 6.1.5 Moore	66 66 66 67 67 68
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 68 68
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 67 68 68 68
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 68 68 68 68 69 69
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 67 68 68 68 69 69 69
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 68 68 68 69 69 69 69
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 67 68 68 68 69 69 69 69 69 69
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 68 68 68 69 69 69 69 69 70
 6.1 Güte der Modellparameter	
 6.1 Güte der Modellparameter	
 6.1 Güte der Modellparameter	
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 68 68 68 69 69 69 69 70 71 72 75 77
 6.1 Güte der Modellparameter	66 66 67 67 68 68 68 69 69 69 69 69 69 70 71 72 75 77 79 79
 6.1 Güte der Modellparameter	
 6.1 Güte der Modellparameter	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes, Entwässerungssystem der Weißeritz	3
Abb. 2: Karte des Untersuchungsgebietes	4
Abb. 3: Geologie des Untersuchungsgebietes	6
Abb. 4: Foto: Grabung in Hanglage auf der Westflanke des Berges Pramenac	10
Abb. 5: Prozentualer Flächenanteil der wichtigsten Baumarten des Forstamtes Bärenfels (2003).	13
Abb. 6: Erzgebirge. Jahresdurchschnittstemperatur (C) (1901 – 1950)	18
Abb. 7: Erzgebirge. Mittlere Schneehöhe (mm Niederschlag) (1901 – 1950)	19
Abb. 8: Erzgebirge. Summe des Jahresniederschlages (mm) (1901 – 1950)	22
Abb. 9: Monatlicher Niederschlag (mm) an der Station Zinnwald-Georgenfeld (1951 – 1980)	22
Abb. 10: Niederschlagsverteilung in Mitteleuropa (10. – 13. August 2002)	25
Abb. 11: Überblick über das Entwässerungssystem des Erzgebirges	26
Abb. 12: Einzugsgebiete der Wilden und der Roten Weißeritz	27
Abb. 13: Höhenraster des Untersuchungsgebietes	41
Abb. 14: Teilgebietsgrenzen des Untersuchungsgebietes	41
Abb. 15: Das digitalisierte Bach- und Grabensystem des Untersuchungsgebietes	42
Abb. 16: Modellhafte Abbildung der Böden des Untersuchungsgebietes	43
Abb. 17: Isochronen des Abflusses im Untersuchungsgebiet	47
Abb. 18: Lokale Fliessgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet	48
Abb. 19: Elementarflächen des Untersuchungsgebietes	49
Abb. 20: NASIM-Systemplan mit N-A-Modell des Untersuchungsgebietes	50
Abb. 21: Maske zur Eingabe der Gerinneparameter eines Teilgebietes	50
Abb. 22: Station Zinnwald-Georgenfeld. Niederschlagswerte (mm/h)	51
Abb. 23: Station Zinnwald-Georgenfeld. Stündliche Temperaturwerte (C).	52
Abb. 24: Station Zinnwald-Georgenfeld. Potentielle Evapotranspiration (Haude) (mm/d)	53
Abb. 25: Station Zinnwald-Georgenfeld. Abflusswerte (m ³ /s) (01.04.1999 – 31.03.2000)	54
Abb. 26: NASIM: Eingabemaske Eichparameter (Standardwerte)	55
Abb. 27: Standardparameter	55
Abb. 28: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (15.06.1999 – 15.07.1999)	56
Abb. 29: Modellierter und gemessener Abfluss (m ³ /s) (15.06.1999 – 15.07.1999)	56
Abb. 30: NASIM: Eingabemaske Eichparameter (optimierte Werte)	57
Abb. 31: Optimierte Parameter	58
Abb. 32: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (15.06.1999 – 15.07.1999)	59
Abb. 33: Modellierter und gemessener Abfluss (m ³ /s) (15.06.1999 – 15.07.1999)	59
Abb. 34: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (01.04.1999 – 31.03.2000)	61
Abb. 35: Modellierter und gemessener Abfluss (m ³ /s) (01.04.1999 – 31.03.2000)	61
Abb. 36: NASIM: Eingabemaske Eichparameter (optimierte Werte)	62

Abb. 37: Optimierte Parameter	62
Abb. 38: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (01.04.1999 – 31.03.2000)	64
Abb. 39: Modellierter und gemessener Abfluss (m ³ /s) (01.04.1999 – 31.03.2000)	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gewässerkundliche Hauptwerte des Pegels Rehefeld (1961–1995); Abflüsse in m ³ /s	3 28
Tabelle 2: Übersicht über Tabellen des GIS-Imports	44
Tabelle 3: Niederschlagsmaxima der Station Zinnwald-Georgenfeld (mm/h)	51

1. EINLEITUNG

Im August 2002 kam es aufgrund von Starkniederschlägen zu einem Hochwasser in Tschechien und Deutschland. Der Niederschlagsschwerpunkt lag über dem östlichen Erzgebirge und löste hier teils bisher nicht gemessene Pegelstände und Überschwemmungen aus. Einer der am stärksten vom Hochwasser betroffenen Flüsse war die Weißeritz, die aufgrund ihrer extremen Wasserführung große Schäden verursachte.

In der Vergangenheit kam es im betroffenen Raum wiederholt zu Hochwasserereignissen unterschiedlichen Ausmaßes. Im Anschluss an das besonders große Hochwasser von 1897 begann man mit dem Bau von Wasserrückhaltemaßnahmen in den Mittelläufen verschiedener Erzgebirgsflüsse. So wurden in das Entwässerungssystem der Weißeritz drei Talsperren integriert (SIEBER 2002).

Diese zentralen Hochwasserschutzmaßnahmen werfen verschiedene Probleme auf. Die Durchgängigkeit des Gewässers wird unterbrochen und es kommt zur Sedimentakkumulation in den Staubereichen (DYCK&PESCHKE 1990).

Im Zuge des Hochwassers 2002 kam es ferner zu einer Überflutung der Talsperren, da diese die großen Wassermassen nicht mehr aufnehmen konnten. Es stellt sich daher die Frage nach Alternativen zu den bestehenden Hochwasserschutzeinrichtungen.

Als ein gangbarer Weg bietet sich die Nutzung von dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen an, bei denen der Abfluss des Niederschlagswassers mit Hilfe von Rückhaltebecken, die in die Oberläufe der Bäche integriert sind, verzögert wird. Dadurch kommt es zu einer Abflachung der Abflussganglinie und zur Reduktion des Sedimenttransportes unterhalb der Becken (ASSMANN et al. 1996, ASSMANN 1999).

Die richtige Dimensionierung der Rückhaltebecken setzt allerdings genaue Kenntnisse über die hydrologischen Gegebenheiten des Einzugsgebietes voraus. Eine Möglichkeit, die vielfältigen beteiligten Faktoren abbilden und bewerten zu können, bietet der Einsatz eines deterministischen Niederschlag-Abfluss-Modells (ASSMANN 1999).

Mit dem Programm NASIM steht am Institut für Geographische Wissenschaften der Freien Universität Berlin ein solches Modell zur Verfügung.

Mit Blick auf die Ereignisse des August 2002 sollen im Rahmen dieser Diplomarbeit mit Hilfe des Modells exemplarisch die hydrologischen Verhältnisse eines Teileinzugsgebietes der Weißeritz dargestellt werden. Daraus ergibt sich die Fragestellung dieser Arbeit:

Ist es möglich, die Niederschlag-Abfluss-Vorgänge, insbesondere die Hochwasserabflüsse, an der Wilden Weißeritz mit Hilfe eines NASIM-Modells in der benötigten Qualität abzubilden?

Als Untersuchungsgebiet wurde das 15,3 km² große Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz oberhalb des Pegels Rehefeld ausgewählt. Zur Bearbeitung der Themenstellung ist die Erhebung und Gewinnung von verschiedenen Modellparametern notwendig. Informationen zu Böden, Gerinnen, Hydrologie und Vegetation wurden während dreier Geländeaufenthalte erhoben sowie durch Karteninterpretation gewonnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in Kapitel 2 vorgestellt. Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die Grundlagen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung gegeben. Anschließend wird der Aufbau des Modells mit Erstellung der Zeitflächenfunktion und Elementarflächen dargestellt. Kapitel 5 beschreibt die Parametrisierung der Modellierungsläufe und zeigt die Modellergebnisse der untersuchten Perioden. Mit der Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und

einem zusammenfassenden Ausblick schließt die Arbeit.

2. EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

In diesem Kapitel soll die naturräumliche Ausstattung des Untersuchungsgebietes beschrieben werden, um Risiken und Potentiale des Hochwasserschutzes aufzuzeigen.

2.1 Lage und Erstreckung

Das im Rahmen der Fragestellung bearbeitete Untersuchungsgebiet liegt im südlichen Sachsen am Erzgebirgskamm (Position: $13^{\circ} 43^{\prime}$ Ost, $50^{\circ} 43^{\prime}$ Nord). Es handelt sich um das Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz oberhalb des Pegels Rehefeld (Abb. 1), welches sich etwa 60 km südlich von Dresden befindet.



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes, Entwässerungssystem der Weißeritz (Diercke Weltatlas 1996: 21, verändert)

Das Gebiet mit einer Fläche von 15,3 km² hat eine Nord-Süd-Erstreckung von 6,5 km und eine Ost-West-Erstreckung von 4 km (LFUG 1997a). Das Untersuchungsgebiet ist eingebettet in die Kammlage des Osterzgebirges im Grenzgebiet zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Tschechischen Republik und liegt zu etwa 80 % auf tschechischem Gebiet.

Die Quelle der Wilden Weißeritz liegt auf einer Höhe von 850 m an der Ostflanke des Berges Oldrissky Vrch. Der Pegel Rehefeld liegt auf einer Höhe von 685 m über NN, die Wasserscheide des Gebietes erreicht Höhen bis zu 909 m über NN und liegt im Durchschnitt bei 850 m über NN.

Im Norden wird das Einzugsgebiet durch den 796 m hohen Gießhübel begrenzt, im Südosten durch den 909 m hohen Pramenac. Im Westen schließt sich der 875 m hohe Oldrissky Vrch an, im Nordwesten liegt der 845 m hohe Hemmschuh (Abb. 2).



Abb. 2: Karte des Untersuchungsgebietes (Ausschnitt: Topographische Karten 5248 Altenberg und 02-321 Dubi).

Seite 5

Westlich des Untersuchungsgebietes schließt sich das Einzugsgebiet der Flöha an, das in die Mulde entwässert. Im Osten liegt das Einzugsgebiet der Müglitz, die bei Dohna in die Elbe fließt. Südlich der Wasserscheide des Untersuchungsgebietes liegt das Flusssystem der Bilina, die bei Usti Nad Labem in die Elbe mündet.

Das Untersuchungsgebiet liegt in dem Bereich des Erzgebirges, welcher im Vorfeld des Elbehochwassers im August 2002 die höchste gemessene Niederschlagssumme erhielt.

2.2 Landschaftsgenese und Geologie

Die Entstehungsgeschichte der untersuchten Landschaftsstruktur ist bis auf die Variskische Gebirgsbildung zurückzuverfolgen, die vom Devon bis zum Perm (350 – 200 Mio. Jahre vor heute) andauerte (AHNERT 1996). Erosionsvorgänge führten zu einer Einebnung des Gebirges und schließlich wurde der gesamte Raum während des Mesozoikums vom Meer überdeckt, das Sedimente in Form von Sand und Ton ablagerte. Aus dieser Phase sind im Osterzgebirge nur wenige Spuren wie z.B. die kristallinen Kalksteininseln im Untersuchungsgebiet erhalten geblieben. Die meisten Sedimente wurden durch Erosion abgetragen. Ein weiteres Relikt aus dem Mesozoikum stellt das an der Elbe gelegene Elbsandsteingebirge dar.

Eine starke Hebung erfuhr der Erzgebirgsraum im Zuge der alpidischen Faltung während des Miozäns und Pliozäns (20 – 2 Mio. Jahre vor heute). Die tektonischen Bewegungen während des Tertiärs waren von basaltischem Vulkanismus begleitet. Zeugen des einstigen Vulkanismus sind die über den Erzgebirgskamm und den sich im Süden anschließenden Egergraben verteilten Vulkankegel.

Zeitgleich mit der Anhebung des Erzgebirges senkte sich das Böhmische Becken ab und es kam zur Ausbildung des Egergrabens. Geomorphologisch betrachtet handelt es sich beim Erzgebirge um eine nach Norden einfallende Pultscholle mit einer steilen Südabdachung zum Egergraben. Der Pultschollencharakter ist jedoch nur im Osterzgebirge modellhaft ausgebildet. Die sanft einfallende Nordabdachung hat eine Länge von 35 – 40 km, während die steile Südabdachung sich nur über 5 km erstreckt (LIEDTKE&MARCINEK 2002). Die Ost-West-Erstreckung des Gebirges erreicht ca. 150 km.

Eine weitere Hebung erfuhr das Erzgebirge während des Quartärs. Während der Elster-Eiszeit war das Erzgebirgsvorland von Inlandeismassen überdeckt, das Erzgebirge selber war jedoch nicht vergletschert (LIEDTKE&MARCINEK 2002). Die geologische Situation des Untersuchungsgebietes ist vielgestaltig. Auf dem Ausschnitt der geologischen Karte 1:50.000 Altenberg-Zinnwald (Abb. 3) sind im Einzugsgebiet drei große geologische Komplexe vorhanden:

- Im Osten des Untersuchungsgebietes wird Teplitz-Altenberger Quarzporphyr angetroffen. Dieser mächtige nordnordwestlich streichende Gang ist deckenförmig ausgebreitet und überlagert in der Tiefe liegende karbonische Ablagerungen (GEOL. KARTE ER-LÄUTERUNGEN 1906).
- Das westliche Untersuchungsgebiet ist von Muscovitgneis bedeckt, in den Gänge von Quarzporphyr eingelagert sind (ebd.).
- Das nördliche Untersuchungsgebiet ist durch glimmerig glänzende Phyllite gekennzeichnet, in die vereinzelt kristalliner Kalkstein eingelagert ist. Die Einlagerungen erreichen Längen zwischen 50 und 150 m und sind auf den südlichen Teil des Rehefeld-Zaunhauser Phyllitgebietes beschränkt. Die Kalkvorkommen wurden schon seit dem Mittelalter abgebaut und ihre Standorte sind heute noch durch die verbliebenen Pingen gekennzeichnet (ebd.).



Abb. 3: Geologie des Untersuchungsgebietes (Geologische Karte 5248 Altenberg-Zinnwald, verändert)

Auf den Hochflächen entlang der Wasserscheide des Einzugsgebietes finden sich Moorflächen. Das westlich und südwestlich von Georgenfeld gelegene Georgenfelder

Hochmoor wies eine beträchtliche Erstreckung auf und erreichte vereinzelt eine Mächtigkeit von mehreren Metern (GEOL. KARTE ERLÄUTERUNGEN 1906).

Auch auf der Ostflanke des Berges Oldrissky Vrch kam es zur Ausbildung von Moor, jedoch nicht mit den eben genannten Mächtigkeiten und Erstreckungen. Die Moorflächen wurden durch Torfstich und Entwässerungsmaßnahmen stark reduziert und nur durch frühzeitigen Schutz konnte die Georgenfelder Hochmoorfläche in Teilen erhalten bleiben (HEILMANN et al. 1993).

2.3 Anthropogene Nutzung des Raumes

Der Bergbau und die Besiedlung spielen eine wichtige Rolle bei der hydrologischen Umgestaltung des Untersuchungsgebietes.

2.3.1 Bergbauliche Nutzung

Die Geschichte des Bergbaus begann im Jahre 1168, als in Christiansdorf, in der heutigen Altstadt von Freiberg, Silbererz gefunden wurde. Dies führte zu einer schnellen Ausdehnung der Stadt und einer intensiven Suche nach Erz in der Umgebung. Auf der Suche nach Gold und Silber in den Bächen wurde auch Zinnstein gefunden, der aus den Bachsedimenten, den sogenannten Seifen, ausgewaschen wurde. Die Suche wurde flussaufwärts fortgesetzt bis die erzführenden Formationen erreicht wurden. So entwickelte sich der Freiberger Erzbergbau zum bedeutendsten im Erzgebirge (WAGENBRETH& WÄCHTLER 1990).

Um 1300 wurde Zinn aus verschiedenen Seifen gewonnen und im Bergbau gefördert. Im Jahre 1463 wurde das wohl wichtigste Zinnlager des späten Mittelalters, die Altenberger Zinngranitlagerstätte entdeckt. Sie wurde mit Unterbrechungen bis in das Jahr 1990 betrieben. Aufgrund der reichen Ausbeute und der hohen Gewinnspannen wurde gegen Ende des 15. Jahrhunderts viel Kapital, insbesondere aus dem Nürnberger Raum, angezogen, das zu einer weiteren Intensivierung des Bergbaus in Altenberg führte. Die eingesetzten Technologien zur Förderung von Erz, zur Hebung des Wassers aus den Gruben und zur Aufbereitung der Erze entsprachen um 1530 dem höchsten technischen Standard ihrer Zeit (WA-GENBRETH&WÄCHTLER 1990).

Die technische Vorgehensweise erforderte unter anderem einen großen Bedarf an Wasserkraftanlagen und Holz für Schmelz- und Stützzwecke. Im Zuge dieser Tätigkeiten kam es zu einer intensiven forstwirtschaftlichen Nutzung mit dem Umbau der Wälder zu Fichtenmonokulturen (WAGENBRETH&WÄCHTLER 1990).

Seite 8

Ferner wurden für die Bereitstellung des für den Bergbau benötigten Wassers zwischen den Jahren 1545 und 1553 der kleine und der große Galgenteich bei Altenberg angelegt. Zur gesicherten Füllung dieser Wasserspeicher sind in den Jahren 1550 bis 1559 der Neugraben und der Quergraben angelegt worden.

Auch im benachbarten Zinnwald wurde intensiv Bergbau nach Lithium, Zinnstein und Wolframit betrieben, der um 1750 seinen Höhepunkt erreichte und um 1800 mangels Ausbeute wieder zum Erliegen kam. Mit nachlassender Abbauwürdigkeit der Erze wurde der Bergbau in Zinnwald 1924 stillgelegt, der Altenberger Bergbau extensiviert (WA-GENBRETH&WÄCHTLER 1990).

Der Umbau des Waldes und die Veränderung der Entwässerungssysteme im Zuge der bergbaulichen Nutzung haben auch nach der Stilllegung der Erzförderung weiterhin entscheidenden Einfluss auf die hydrologischen Gegebenheiten des Raumes.

2.3.2 Besiedlung

Das Untersuchungsgebiet ist im Vergleich zu den tieferen Tallagen des Erzgebirges sehr dünn besiedelt. Im Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz liegen drei Siedlungen oberhalb des Pegels Rehefeld. Im Nordwesten des Untersuchungsgebietes liegt der Grenzort Rehefeld-Zaunhaus, der aus etwa 15 Häusern besteht. Der Pegel Rehefeld liegt im Ort Rehefeld-Zaunhaus, wobei nur etwa zehn Gebäude des Ortes auf der Einzugsgebietsfläche liegen. Die größte Siedlung, Nove Mesto, liegt am Südende des Einzugsgebietes nahe des Gebirgskamms. Der Ort besteht aus ungefähr 60 Häusern, die im Bereich des Oberlaufs der Wilden Weißeritz erbaut wurden. Alle Ortschaften sind Streusiedlungen und zeichnen sich durch wenig versiegelte Flächen aus. Nach Aussage von Einwohnern erfolgt die Abwasserentsorgung über Sickergruben, so dass kein Anschluss an das öffentliche Abwassersystem besteht. Daher wurde auf eine besondere Berücksichtigung der Siedlungswasserwirtschaft bei der Modellerstellung verzichtet.

2.4 Böden

Bei den Böden des Erzgebirges handelt es sich in erster Linie um Braunerdegesellschaften, die sich auf den kristallinen und metamorphen Gesteinen der Grundgebirge gebildet haben. Ihre weitere Differenzierung ist abhängig vom Ausgangsgestein, der Art und Intensität der periglazialen Verwitterung, vom Lösseinfluss und den orographisch-klimatischen Gegebenheiten (LIEDTKE&MARCINEK 2002).

In den unterschiedlichen Lagen des Erzgebirges herrschen sehr wechselhafte Bodenverhältnisse vor. Für die höheren Lagen des Erzgebirges oberhalb 500 – 700 m sind Brauner-

Seite 9

de-Podsol-Gesellschaften charakteristisch. Diese bilden sich über grobschuttreichen Decken und in Folge der feuchtkühlen Klimabedingungen kommt es verstärkt zu Podsolierungsvorgängen (LIEDTKE&MARCINEK 2002).

Das Erzgebirge lag während des Pleistozäns im vegetationslosen Periglazialbereich. Dadurch kam es in der sommerlichen Auftauzone ab Hangneigungen von zwei Grad zu Gelisolifluktion, die hangabwärts zur Bildung der typischen grobbodenarmen Fliesserden führte. Freigelegtes Gestein wurde durch Temperatureinwirkung in Frostschutt umgewandelt und durch die Gefrier- und Auftauprozesse ebenfalls hangabwärts verlagert (HEILMANN et al. 1993).

Die Bewegungen führten einerseits zu einer Beseitigung der voreiszeitlichen Bodendecken und andererseits zu einer starken Durchmischung des bewegten Bodenmaterials¹. Zur Bodenbildung trugen Lösseinwehungen bei, die auch am 905 m hohen Kahleberg in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes in Spuren nachgewiesen wurden. Die Flusstäler hingegen füllten sich unter periglazialen Bedingungen mit mächtigen Schotter- und Kiesbetten (Forsteinrichtungswerk Sachsen 1999 – 2008). In den Tallagen der Wilden Weißeritz werden im Untersuchungsgebiet verbreitet vernässte Böden angetroffen, die mittels Grabensystemen entwässert werden (EIGENE BEOBACHTUNG).

Im Untersuchungsgebiet stehen als Ausgangsgesteine Muscovitgneis, Phyllit und Quarzporphyr an, die zu unterschiedlichen Ausgangsbedingungen für die Bodenbildung führen.

Über dem im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes anstehenden Quarzporphyr kommt es in den Hoch- und Hanglagen zur Bildung von (Georgenfelder Porphyr-)Braunerde und (Altenberger Porphyr-)Podsol. Diese Böden erreichen eine Mächtigkeit von 35 - 65 cm und bestehen aus schwach blockigem, stark steinigem und grusigem Substrat.

Bei dem im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes anstehenden Gestein handelt es sich um Phyllit. Auf diesem kommt es zur Bildung von (Zwotaer Phyllit-)Braunerde und

¹ Die forstliche Standortkartierung hat den im Pleistozän unter periglazialen Bedingungen neu entstandenen Decken vier typische Schichtfolgen zugeordnet.

Die Gamma-Schicht bildet den obersten, an Skelett reichen und Feinmaterial armen Horizont.

Die sich darunter anschließende **Delta-Schicht** besteht aus locker steinigem Frostschutt mit unregelmäßiger Einlagerung von Skelettbrocken. Die stark vertretene Schlufffraktion ist durch Lösseinwehung oder intensive Frostverwitterung zu erklären. Repräsentativ für diese Schicht sind Kryoturbationen und Solifluktion.

Die unterhalb gelegene **Zeta-Schicht** stellt den Übergang von den durch Solifluktion geprägten oberhalb gelegenen Schichten zur Basisfolge dar.

Die Basisfolge, oder **Epsilon-Schicht**, ist der Zerfalls- oder Zersatzzone aufgelagert und besteht aus schluffarmem, dichtem Schutt, der durch den Transport oberflächenparallel eingeregelt ist.

Im Rahmen der forstlichen Standortkartierung wird holozänes Bodenmaterial als **Beta-Schicht** ausgewiesen. Hierbei handelt es sich um unter rezenten Klimabedingungen gebildete Moore und alluviale Flussablagerungen (Forsteinrichtungswerk Sachsen 1999 – 2008).

(Hemmschuh-Phyllit-)Braunerde. Diese Böden weisen ebenfalls je nach Lage eine Mächtigkeit von 35 - 65 cm auf und bestehen aus steinigem und z.T. stark grusigem Substrat.

Im westlichen Untersuchungsgebiet steht Muscovitgneis an. Hier tritt (Neuhausener Gneis-)Braunerdepodsol auf. Er weist ebenfalls eine Mächtigkeit von 35 – 65 cm auf, sein Substrat ist teilweise stark steinig und grusig (FORSTEINRICHTUNGSWERK SACH-SEN 1999 – 2008).

Die Bodenmächtigkeiten sind allgemein an den Hängen geringer als auf den Flachbereichen. In den Tallagen sind in der Regel Gleyböden anzutreffen, die wechselnde Mächtigkeiten aufweisen.

In vernässten Mulden und den flachen Kammlagen treten anmoorige Humusstaugleye und Moorheiden auf. Die Torfmächtigkeiten variieren zwischen wenigen Dezimetern und 2,5 m. Durch Moorentwässerung und Torfstich sind die Moorflächen stark reduziert worden (FORSTEINRICHTUNGSWERK SACHSEN 1999 – 2008).



Abb. 4: Foto: Grabung in Hanglage auf der Westflanke des Berges Pramenac

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die allgemein geringmächtigen Böden auf steinigem bis grusigem Material ein schwach ausgeprägtes Wasserspeicherpotential haben und die Wasserbewegung durch die Grobanteile der Böden vergleichsweise schnell erfolgen kann (Abb. 4).

Daher ist eine hohe Variabilität der Abflüsse auf diesen Standorten zu erwarten. Bei Starkniederschlägen tendieren sie aufgrund ihrer Geringmächtigkeit und ihres groben Substrates zu einer schnell eintretenden Sättigung und direkten Ableitung des Wassers. Während längerer Trockenperioden nimmt der Abfluss stark ab.

2.5 Vegetation und Landnutzung

Jede Form der Landnutzung hat einen spezifischen Einfluss auf den Wasserhaushalt des betreffenden Gebietes. Am deutlichsten werden die Unterschiede bei einem Vergleich der Nutzungsformen Forst- und Landwirtschaft sowie Siedlungsflächen. Der Wasserhaushalt der land- und forstwirtschaftlichen Nutzflächen wird durch die Vegetationsarten bzw. -formen der Pflanze (z.B. durch ihre Wuchshöhe und Wurzeltiefe) geprägt, wobei letztlich in hydrologischer Hinsicht die Betrachtung der Verdunstung, Interzeption, Grundwasserneubildungsrate und des Hochwasserschutzes im Vordergrund steht (WOHLRAB et al. 1992, BOLTE&WOLFF 2003).

2.5.1 Potentielle natürliche Vegetation

Unter potentieller natürlicher Vegetation versteht man die Vegetationsgesellschaft, die ohne anthropogene Einflüsse an einem Standort existieren würde. Die Karte der potentiellen natürlichen Vegetation des Freistaates Sachsen (LFUG 2002b) zeigt für das Erzgebirge drei große Vegetationskomplexe:

In den tieferen Lagen zwischen 250 und 400 m über NN bestimmen hochkolline Zittergrasseggen-Eichen-Buchenwälder das Erscheinungsbild der natürlichen Vegetation.

Die mittleren Lagen zwischen 400 und 650 m über NN werden von submontanem Eichen-Buchenwald eingenommen. In den Hochlagen über 650 m sind Hainsimsen-(Tannen-Fichten-)Buchenwälder als potentielle natürlichen Vegetation angegeben. Im Bereich des Untersuchungsgebietes werden auf deutscher Seite vier Waldgesellschaften ausgewiesen, die alle zu den Fichten-Buchenmischwäldern zählen. Hierbei handelt es sich um (Tannen-Fichten)-Buchenwälder, die jeweils durch Hainsimsen, Farne, Flattergras oder Wollreitgras begleitet werden (LFUG 2002b).

2.5.2 Rezente Vegetation und Nutzung

Die natürliche Vegetation des Erzgebirges ist durch anthropogene Einflüsse erheblich umgestaltet worden. Nur 4,6 % der sächsischen Waldfläche können heute als natürliche Waldgesellschaften angesehen werden (LFUG 2002b). Seit der konsequenten Besiedelung des Gebirges sind durch agrarische und bergbauliche Maßnahmen bedeutende Eingriffe in die Vegetationsgesellschaften erfolgt. Der vorhandene Wald wurde gerodet, um Holz zum Feuersetzen in den Gruben, zum Abstützen der Grubengänge und zur Herstellung von Holzkohle für die Verhüttung der Erze zu erhalten (WAGENBRETH&WÄCHTLER 1990).

Die gerodeten Flächen wurden teilweise einer landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt. Aufgrund der Nährstoffarmut der Böden wurde dem umgebenden Wald die Streu entnommen und als Dünger eingesetzt. Zusätzlich weideten die Nutztiere im Wald (Hutung). Diese Maßnahmen führten zu einer Devastation der erzgebirgischen Wälder, die um 1800 ihr größtes Ausmaß erreichte. Als Reaktion wurden daraufhin umfangreiche Aufforstungsmaßnahmen zur Anlage großflächiger schnellwachsender Fichtenmonokulturen durchgeführt. Durch Melioration und Dränung der moorigen Hochflächen ab 1800 dehnte man die Forstflächen weiter aus (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄRENFELS, 08.04.2004).

Fichtenholz war im Bergbau aufgrund seiner Warneigenschaft (Fichtenholzstützen "knarren" bevor sie brechen) und aufgrund der früheren Einschlagreife im Vergleich zu Buchen besonders begehrt.

Im Forstrevier Rehefeld, das den deutschen Teil des Untersuchungsgebietes verwaltet, betrug der Anteil an Laub-Mischwald um 1750 noch ca. 50 %, während Fichtenwald nur 16 % der Forstfläche bedeckte, die restliche Fläche wurde durch Laub- und Nadelwald-Mischbestände eingenommen. Um 1900 hingegen bedeckten Fichtenwälder 85 % der Forstfläche, während der Anteil der Laubwälder auf 7 % zurückgegangen war (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄRENFELS, 08.04.2004).

Seit dem Jahr 1990 wird ein ökologischer Umbau der Waldgesellschaften betrieben, der den Anteil der Laubbaumbestände der Mischwälder steigern soll. Momentan setzen sich die Forstbestände auf der deutschen Seite des Untersuchungsgebietes folgendermaßen zusammen (Abb. 5):



Abb. 5: Prozentualer Flächenanteil der wichtigsten Baumarten des Forstamtes Bärenfels (2003) (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄRENFELS, 08.04.2004)

In der Phase der intensiven bergbaulichen Nutzung kam es zu einem umfassenden Umbau der natürlichen Vegetationsgesellschaften, dessen Auswirkungen bis heute andauern.

2.5.3 Versickerung

Die Versickerung von Niederschlagswasser reduziert den schnellen Oberflächen- und Zwischenabfluss und unterstützt die Grundwasserneubildung, die zu einer Vergleichmäßigung des Abflusses führt. Unter alten Buchenbeständen versickern ca. 350 mm des Freilandniederschlages pro Jahr, bei ca. 50-jährigen Fichtenbeständen sind es nur ca. 200 mm/a. Fichtenbestände weisen daher eine deutlich geringere Grundwasserneubildungsrate auf als Buchenbestände. Dies ist auf die geringere Durchwurzelungstiefe, die der Perkolation abträglich ist, und die dauerhafte Nadelbedeckung der Fichten, die eine erhöhte Evapotranspiration zur Folge hat, zurückzuführen. Für Buschbrachen, die sich im Untersuchungsgebiet auf den vom Waldsterben betroffenen Flächen gebildet haben, wird ein Versickerungswert von ca. 360 mm/a angegeben (WOHLRAB et al. 1992).

2.5.4 Interzeption

Die Interzeptionswerte von Nadelbäumen liegen allgemein deutlich über denjenigen von Laubbäumen. Werden bei 90-jährigen Fichtenbeständen Interzeptionskapazitäten von 4,7 mm angegeben, so sind es bei 140-jährigen Eichen-Buchenbeständen im Sommer 1,7 mm und im Winter nur 0,7 mm. Verbuschte Flächen weisen eine Speicherkapazität von 2 mm auf (WOHLRAB et al. 1992).

Innerhalb von Fichtenbeständen erreicht somit deutlich weniger Niederschlagswasser den Waldboden, als dies, insbesondere im Winter, unter Laubbäumen oder auf Buschbrachen der Fall ist. Allerdings bilden hierbei die Kammlagen des Erzgebirges eine Ausnahme. Die

Seite 14

durch den "Böhmischen Nebel" (Kap. 2.9.5) verursachten Wasserablagerungen an den Zweigen der Bäume führen durch Abtropfen zu einem Flüssigkeitsgewinn für den Waldboden. Diese Interzeptionswirkung ist bei Nadelbäumen besonders groß. Auf diese Weise kommt es in den Kammlagen zu einem Zugewinn zum Freilandniederschlag in der Größenordnung von 20 - 40 % (WOHLRAB et al. 1992).

2.5.5 Evapotranspiration

Der Wasserhaushalt eines Gebietes wird entscheidend durch dessen Verdunstungswerte mitbestimmt. WOHLRAB et al. (1992) geben die Transpirationsrate für die drei wichtigsten Vegetationsformen im Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz an. So weist mittelalter Fichtenforst eine tatsächliche Transpirationsrate von 680 mm/a auf, der Wert für alte Buchenbestände wird mit 570 mm/a angegeben, die Verdunstung von Buschbrache beträgt 560 mm/a (WOHLRAB et al. 1992). Die weit verbreitete Fichte entzieht dem Boden also etwa 100 mm/a mehr Wasser durch Transpiration als vergleichbare Buchenbestände.

2.5.6 Waldsterben

Die Immission von Schadgasen ins Untersuchungsgebiet führte insbesondere während der 70er und 80er Jahre des 20. Jahrhunderts zu einer maßgeblichen Schädigung der Waldökosysteme. Die bei der Verstromung von Braunkohle im nahen Egergraben freigesetzten Schwefeldioxidverbindungen führten bis 1990 am Erzgebirgskamm zu Konzentrationen von bis zu 100 µg/m³ Luft. Durch Reaktion mit der Luftfeuchtigkeit bildet sich aus diesen Verbindungen schwefelige Säure. Diese Immissionen führten zu einer Schädigung der Vegetation und zu einer Versauerung der Böden. Hiervon waren besonders die Fichtenbestände betroffen, die vergleichsweise sensibel auf Säureeinträge reagieren. Infolgedessen kam es zu einem großflächigen Absterben von Fichtenforsten. Als Ersatz wurden auf deutscher und tschechischer Seite Lärchen und Blaufichten gepflanzt, die aufgrund ihrer physiologischen Eigenschaften eine höhere Säuretoleranz aufweisen. Auf den vom Waldsterben betroffenen Flächen entwickelten sich Buschbrachen, die eine Veränderung der hydrologischen Verhältnisse bewirkten. Der Abfluss wurde ungleichmäßiger, die Abflussspitzen fielen höher aus, die Trockenwetterabflüsse niedriger (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄRENFELS, 08.04.2004).

Der Einbau von Filteranlagen seit Beginn der 1990er Jahre und der Niedergang der Industrie, insbesondere in der Tschechischen Republik, führten bis 1999 zu einer Reduktion der Schwefeldioxidkonzentrationen in den Kammlagen auf maximal $10 \,\mu g/m^3$ Luft. Dadurch entspannte sich die Situation und es kam zu einer deutlichen Regeneration der Waldbestände. Zur Abpufferung der Bodenversauerung sind bei Neupflanzungen jedoch weiterhin direkte Kalkgaben ins Pflanzloch notwendig. Ferner erfolgt in einem Turnus von vier Jahren eine Kalkung der Forsten per Hubschrauber mit CaCO₃/MgCO₃ (3 t/Hektar). Durch die verringerten Schadstoffimmissionen und die intensivierten Waldpflegemaßnahmen erhöhte sich die Festholzmenge je Hektar beträchtlich. Standen 1980 nur 170 m³ Festholz pro Hektar, waren es im Jahr 2000 bereits 260 m³ (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄREN-FELS, 08.04.2004).

Nach Aussage des Forstamtes Bärenfels wird im Revier Rehefeld ökologischer Waldumbau betrieben. Die Zahl der Buchen wird zu Lasten der Fichten erhöht. Dabei werden die jungen Buchensetzlinge unter die alten Fichtenbestände gepflanzt. Durch die Umgestaltung der Vegetationsgesellschaft verändert sich sowohl die Zusammensetzung der Streuauflage der Waldböden als auch die Durchwurzelung des Bodens. Böden unter Mischwaldbeständen erzeugen im Vergleich zu Böden unter Fichtenmonokulturen erst bei deutlich höheren Niederschlagswerten Oberflächenabfluss.

Ferner wird im Rahmen des Hochwasserschutzes erwogen, Entwässerungsgräben zu verschließen, um den Rückhalt des Wassers in der Fläche zu fördern (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄRENFELS, 08.04.2004).

Ein Beispiel für den durch ökologischen Waldumbau angestrebten Zustand stellt das Naturschutzgebiet Hemmschuh dar. Dieses am Nordwestrand des Untersuchungsgebietes gelegene 89 ha große Gebiet ist mit einem Buchen-Eichen-Fichtenmischwald bestanden (LFUG 2002b).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der ökologische Waldumbau und die Aufforstung der abgestorbenen Forstflächen eine wichtige Rolle bei der Konzeption des Hochwasserschutzes spielen können. Der Umbau der Waldgesellschaft zu Laub-Mischwäldern führt zu einer erhöhten Perkolation und damit Grundwasserneubildung (BOLTE&WOLFF 2003). Die Folge davon ist eine Vergleichmäßigung des Basisabflusses und somit eine beständigere Abflussbildung mit Blick auf die sichere Trinkwasserversorgung der Unterlieger.

2.5.7 Moore

Das Erzgebirge bietet in seinen Hochlagen aufgrund der hohen Niederschläge und seiner breiten Verebnungsflächen günstige Voraussetzungen zur Bildung von vorwiegend regenwassergespeisten Mooren. Auf der tschechischen Seite gab es früher 280 Moore, auf deutscher Seite 50 (SUCCOW 1990). Die meisten Moore im Erzgebirge liegen auf Höhen zwischen 500 und 900 m über NN. Vorwiegend handelt es sich hierbei um Kammoore, die in den Hochlagen als Sattelmoore, in den tieferen Lagen als Hangmuldenmoore ausgebildet sind. In den Tallagen existierten früher auch Talsohlenmoore, jedoch wurden diese schon früh einer Nutzung zugeführt, so dass nur sehr wenige erhalten blieben (SUCCOW 1990).

Das Untersuchungsgebiet weist zwei Moorstandorte auf. Im Nordosten des Gebietes liegt auf der Südwestflanke des Kleinen Lugstein das Georgenfelder Hochmoor. Es besitzt heute eine Fläche von etwa 120 ha, von der etwa ein Zehntel auf deutschem Gebiet liegt. Insbesondere vor 1900 wurde hier intensiv Torf zu Streu- und Heizzwecken gestochen, so dass heute nur noch ein Drittel der ursprünglichen Fläche übrig blieb (SCHREIBER 1921).

Die hydrologischen Verhältnisse des Georgenfelder Hochmoores wurden schon ab dem 16. Jahrhundert durch den Bau des Grenzgrabens und des Neugrabens verändert (WA-GENBRETH&WÄCHTLER 1990).

Das Moor wurde im Zuge der Aufforstungsmaßnahmen nach 1800 durch den Bau eines dichten Grabennetzes entwässert und trägt heute einen jungen Kiefern- und Fichtenmischforst (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄRENFELS, 08.04.2004, EIGENE BEO-BACHTUNG).

Im südwestlichen Randbereich des Untersuchungsgebietes existiert ein weiteres Moor in Kammlage, das eine Fläche von nur wenigen Hektar umfasst. Es wurde ebenfalls mit Hilfe eines Grabennetzes entwässert, das einen Teil des Niederschlagswassers der Wilden Weißeritz zuführt. Ferner existierte hier ein Torfstich. Auch diese Moorfläche ist mit Kiefern und Fichten bestanden (EIGENE KARTENINTERPRETATION UND BEOBACH-TUNG).

Moore besitzen im Vergleich zu Mineralböden eine geringere Retentionswirkung. Hochwässer und Niedrigwässer fallen extremer aus. Gebirgsmoore sind fast immer wassergesättigt und tragen im Winter lange Zeit eine Eis- und Schneedecke. Durch das vorhandene Gefälle geht der Abfluss bei Starkregen oder Schneeschmelze beschleunigt vor sich. Der Niedrigwasserabfluss im Sommer ist dagegen geringer als bei Mineralböden, weil Moorböden das Wasser bis zum Sättigungspunkt speichern (GÖTTLICH 1990).

Forstwirtschaftlich genutzte ehemalige Moorflächen weisen einen ca. 30 % geringeren Abfluss als unkultivierte und landwirtschaftlich genutzte Moorflächen auf. Die höheren Interzeptionswerte und die gesteigerte Evapotranspiration lassen den Grundwasserspiegel vergleichsweise deutlich absinken. Steht das Grundwasser unter Hochmoor-Grünland nur 10 - 30 cm tiefer als im unberührten Moor, so sind es unter Fichtenforst bis zu 100 cm. Aufgeforstete Moore wirken somit weitaus weniger als Wasserspeicher als unkultivierte Moorflächen, dafür haben sie eine deutlich abflussverzögernde Wirkung (GÖTTLICH 1990).

Der Wassergehalt von Mooren beträgt je nach Torfart und Zersetzungsgrad 70 – 95 Vol.-% (GÖTTLICH 1990). Göttlich stellt die Wasser-, Luft- und Substanzvolumina für verschiedene Moor-Ökosysteme dar. Ein Moor mit einer Callunetum-Vegetation weist die höchsten Wassergehalte auf, während ein fichtenbestandenes Moor den geringsten Wassergehalt bei gleichzeitig größtem lufterfülltem Porenraum hat.

Daher wird leicht deutlich, dass ein fichtenbestandenes Moor erheblich größere Niederschlagsmengen aufnehmen kann bevor Abfluss auftritt, als ein unkultiviertes Moor.

2.6 Geländeklima und spezielle Wetterlagen

Das Klima im Erzgebirge ist nach KOWALKE (2000) durch drei Tendenzen gekennzeichnet:

- Die Kontinentalität nimmt von Westen nach Osten zu.
- Es gibt eine Höhenstufung der Temperatur, der Sonnenscheindauer und der Niederschläge.
- Das Erzgebirgsklima wird deutlich durch Luv- und Leeeffekte bestimmt.

2.6.1 Temperatur

Im Erzgebirge ist eine deutlich höhenabhängige Stufung der Temperatur gegeben. Auf der Erzgebirgssüdseite verlaufen die Isothermen entsprechend des Steilabfalles hangparallel. Auf der Nordseite sind die Isothermen aufgrund der durch Flusstäler zerfurchten Fläche reich gewunden (Abb. 6). Die Durchschnittstemperatur nimmt von West nach Ost zu, da das Gebirge im Osten niedriger ist. Die kältesten Bereiche des Erzgebirges sind die Kammlagen, in denen Jahresdurchschnittstemperaturen von unter 3 °C auftreten.



Abb. 6: Erzgebirge. Jahresdurchschnittstemperatur (C) (1901 – 1950) (Meteorologischer Dienst der DDR 1966)

Die Jahresdurchschnittstemperatur von 4,7 °C an der Station Rehefeld weist das obere Tal der Wilden Weißeritz als einen für diese Höhenlage auffällig kalten Ort aus. Dieser Eindruck wird auch durch die ca. 300 mm als Schnee fallenden Niederschlags in dem Raum

bestätigt (METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1966) (Abb. 7). Die Höhenentwicklung der Schneedecke im Erzgebirge beginnt gegen Ende November und erreicht etwa Mitte des Dezember eine erste Spitze. Zwischen Weihnachten und dem Jahreswechsel verringert sich die Schneedeckenhöhe im Zuge des Weihnachtstauwetters wieder deutlich. Während der Monate Januar und Februar kommt es trotz eingelagerter Tauwetterperioden zu einer Zunahme der Schneedecke, die Mitte bis Ende Februar ihr Maximum erreicht, um dann im Verlauf von März und April wieder vollständig abzutauen (HAAKE&KÖRBER 1973).

Der kälteste Monat im Erzgebirge ist der Januar. Die Station Rehefeld meldet für die Periode 1901 – 1950 eine Januartemperatur von -4,3 °C. Die höchsten Lagen des Erzgebirges erreichen Werte von unter -5 °C.

Der wärmste Monat im Erzgebirge ist der Juli mit durchschnittlich 14 °C. In der Gipfelregion erreicht die maximale Mitteltemperatur wenig über 11 °C (HAAKE&KÖRBER 1973).

In der Höhenstufe zwischen 750 und 950 m über NN, zu der auch der größte Teil des Untersuchungsgebietes zählt, werden Jahresmitteltemperaturen von 4,3 - 5,5 °C angetroffen (KOWALKE 2000).



Abb. 7: Erzgebirge. Mittlere Schneehöhe (mm Niederschlag) (1901 – 1950) (Meteorologischer Dienst der DDR 1966)

Im Erzgebirge existieren deutlich ausgeprägte Jahres- und Tagesgänge der Nebelhäufigkeit. Die Stationen in den tieferen und mittleren Lagen unterscheiden sich dabei von den Stationen in den hohen Lagen. An den Stationen in den Hochlagen gibt es kein ausgeprägtes Minimum der Nebelhäufigkeit, da es praktisch keine nebelfreie Zeit gibt. Das Maximum der Nebelhäufigkeit an den Bergstationen fällt auf die Wintermonate, wobei Nebel besonders häufig in den Nächten auftritt (HAAKE&KÖRBER 1973).

Die große Nebelhäufigkeit in den Kammlagen des Erzgebirges führte zur Einführung des Begriffes "Böhmischer Nebel". Die Nebelfeuchte setzt sich in solchen Mengen an den Ästen und Zweigen der Vegetation ab, dass es im Winter zu Brucherscheinungen durch die schwere Raureifauflage kommt (KOWALKE 2000).

Die Reif- und Tauablagerungen an der Vegetation führen in den Kammlagen des Erzgebirges zu einem Zugewinn zum Freilandniederschlag in der Größenordnung von 20 - 40 % (WOHLRAB et al. 1992).

2.6.3 Wind

Aufgrund des bewegten Reliefs des Erzgebirges finden sich in den tiefen und mittleren Lagen kaum ungestörte Strömungsverhältnisse. Es bildet sich, auch durch Strahlungseinwirkung, eine Vielzahl von lokalen Strömungssystemen. Nur die Gipfelbereiche auf Fichtelberg und Klinovec liegen in einer ungestörten Strömung (HAAKE&KÖRBER 1973).

Auf dem vom Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz 4,5 km entfernten und 823 m hohen Geisingberg werden nur 1,4 % des Messzeitraumes als windstill angegeben. 63 % des Messzeitraumes zeigen Windgeschwindigkeiten von 1 - 3 Bft, 27 % des Zeitraumes zeigen 4 - 5 Bft und in 8 % des Messzeitraumes wurden mindestens 6 Bft gemessen. Auf dem 1213 m hohen Fichtelberg beträgt der Anteil des Windes mit mindestens 6 Bft sogar 31 %. Die ungestörten Strömungsverhältnisse auf dem Fichtelberg zeigen als Hauptwindrichtungen südwestliche, westliche und nordwestliche Winde, während ein sekundäres Maximum auf Ostwinde entfällt.

Auf dem Geisingberg wurden im Messzeitraum von 1956 bis 1965 viermal Windgeschwindigkeiten von 30 m/s erreicht. Auf dem Fichtelberg wurde diese Geschwindigkeit 61 mal erreicht, zweimal wurden sogar 50 m/s gemessen (HAAKE&KÖRBER 1973).

Aufgrund seiner Ausformung als Pultscholle stellt das Erzgebirge ein Hindernis für anströmende Luftmassen dar. Dies führt im Luv zu Staueffekten mit Wolken- und Niederschlagsbildung und auf der Leeseite zu Wolkenauflösung und Trockenheit. Dieser Föhneffekt erklärt die lokale Nähe niederschlagsreicher Kammregionen mit bis zu 1200 mm und trockener Regionen im Egergraben mit nur 450 mm Niederschlag im Jahr (KOWALKE 2000).

2.6.4 Luftfeuchte

Die Werte der gemessenen relativen Luftfeuchte sind an den Stationen z.T. sehr unterschiedlich, was auf den großen Einfluss ihrer lokalen Lage zurückzuführen ist. Die trockensten Monate im Erzgebirge sind Mai und Juni. Die feuchtesten Monate sind November und Dezember. Entsprechend den Bewölkungsverhältnissen nimmt die relative Feuchte mit der Höhe zu. Besonders deutlich zeigt sich diese Tendenz bei der Betrachtung der Luftfeuchtigkeit um 14:00 Uhr. Die absoluten Minima der relativen Feuchte werden jedoch auf den Gipfeln von Fichtelberg (1213 m) und Klinovec (1244 m) erreicht. Die Jahresschwankung der relativen Mittagsfeuchte ist in den Kammlagen weitaus schwächer ausgeprägt als in den Vorländern. Beträgt sie auf dem Fichtelberg nur 17 % zwischen den Monaten Juni und November, so sind es in Karlovy Vary im Egergraben 31 % (HAA-KE&KÖRBER 1973).

Die mittlere Verdunstung in den Hochlagen des Erzgebirges beträgt 400 – 450 mm/a (METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1966).

2.6.5 Niederschlag

Die Niederschläge sind im Erzgebirge grundsätzlich niedriger als in anderen deutschen Mittelgebirgen mit vergleichbaren Höhenstufen. Dieser Umstand ist bedingt durch die Leewirkung der westlich und nordwestlich gelegenen Gebirge wie dem Harz, dem Thüringer Wald und dem Rothaargebirge. Das Niederschlagsmaximum liegt mit 1200 mm/a in der Nähe der Carlsfeldtalsperre auf einer Höhe von ca. 900 m über NN im westlichen Erzgebirge (Abb. 8). Auf dem weiter östlich gelegenen 1213 m hohen Fichtelberg fallen hingegen nur 1134 mm/a (KOWALKE 2000).

Ein weiteres Niederschlagsmaximum mit ca. 1100 mm/a befindet sich im Osterzgebirge auf dem Westhang des 905 m hohen Kahlebergs in unmittelbarer Nähe des Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz. Sowohl beim Kahleberg als auch im Bereich der Carlsfeldtalsperre handelt es sich um nach Westen ausgerichtete schräge Flächen, die eine Stauwirkung bei aus Westen heranziehenden Niederschlägen entwickeln.



Abb. 8: Erzgebirge. Summe des Jahresniederschlages (mm) (1901 – 1950) (Meteorologischer Dienst der DDR 1966)

Ein abrupter Rückgang der Niederschlagsmengen ist am Übergang zum südlich gelegenen Egergraben zu verzeichnen. Den 1100 mm/a am Kahleberg stehen nur 450 mm/a im 10 km entfernten Egergraben gegenüber (HAAKE&KÖRBER 1973).

An der Station Zinnwald-Georgenfeld, die sich in unmittelbarer Nähe des Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz befindet, wird ein Jahresniederschlag von 1020 mm gemessen (Abb. 9).



Abb. 9: Monatlicher Niederschlag (mm) an der Station Zinnwald-Georgenfeld (1951 – 1980) (Meteorologischer Dienst der DDR 1987)

Generell ist festzustellen, dass die Niederschläge im Erzgebirge von Westen nach Osten abnehmen. Ergiebige Niederschläge sind hierbei zumeist an den Durchzug dynamischer Tiefdruckgebiete aus nordwestlichen und westlichen Richtungen gekoppelt. Der Hauptniederschlagsmonat ist der Juli. Bei den im Erzgebirge vorhandenen meteorologischen Stationen handelt es sich nur um solche des Sommerregentyps, d.h. die Niederschlagssumme des Sommers überwiegt diejenige des Winters. In der Kammlage des Erzgebirges kommt es zu ca. 30 Gewittern im Jahr, die vornehmlich in den Monaten April bis September auftreten (HAAKE&KÖRBER 1973).

Ein beträchtlicher Anteil des Jahresniederschlages im Erzgebirge fällt als Schnee. In den mittleren und höheren Lagen sind dies 200 - 400 mm/a. Die Kammregion ist hierbei im Zeitraum zwischen November und April an ca. 120 Tagen im Jahr mit Schnee bedeckt (HAAKE&KÖRBER 1973). Durch hohe Windgeschwindigkeiten kommt es im Winter zu Schneeverwehungen von beträchtlicher Höhe (EIGENE BEOBACHTUNGEN).

2.6.6 Hochwasserauslösende Niederschlagsereignisse

Verschiedene meteorologischer Ereignisse können im Erzgebirge Hochwassersituationen auslösen. Die Schwerpunkte der Hochwasserentstehung liegen am Anfang und am Ende der Winterperiode und im Sommer.

Advektive Ereignisse

Im Zusammenhang mit durchziehenden Tiefdruckgebieten kommt es zu lang anhaltenden Niederschlagsereignissen. Zumeist entstehen Hochwässer hierbei in Verbindung mit Schneeschmelze in Folge der zusätzlichen Freisetzung von Niederschlagswasser.

Konvektive Ereignisse

Im Rahmen konvektiver Ereignisse, die oft an Gewitter gekoppelt sind, sind im Erzgebirge wiederholt Hochwassersituationen aufgetreten. Hierbei fielen innerhalb weniger Stunden große Regenmengen. Aufgrund des geringen Speichervermögens der Böden kommt das Niederschlagswasser schnell zum Abfluss und verursacht vielfach Überschwemmungen.

Vb-Zyklonen

Bei Vb-Zyklonen handelt es sich um wetterintensive Tiefdruckzellen, die in Folge des Alpeneinflusses über der Adria gebildet werden.

Sie entstehen auf der Vorderseite eines quasistationären Höhentroges an der Bodenkaltfront und verlagern sich mit der Höhenströmung nordwärts. Dabei lenkt ein über dem Nordmeer liegendes Bodentief auf seiner Rückseite Kaltluft nach Mitteleuropa. Unter dem Gebirgseinfluss der Alpen bildet sich ein Hochkeil nördlich des Gebirges, während auf der Südseite ein Wellentief entsteht. Das entstandene Wellentief verlagert sich um die Ostflanke der Alpen nach Norden. Beim Verlagerungsprozess der Zyklone kommt es, verursacht durch Aufgleitvorgänge der warmfeuchten Mittelmeerluft auf die trocken-kalte Polarluft nördlich der Alpen, zu anhaltenden und ergiebigen Niederschlägen, die sich insbesondere über dem östlichen Mitteleuropa abregnen (MALBERG 1997).

Zyklonen diesen Typs führten im Vorfeld des Elbehochwassers 2002 und des Oderhochwassers 1997 zu lang anhaltenden und sehr ergiebigen Niederschlägen. Entlang der Mittelgebirge an der deutsch-polnischen und deutsch-tschechischen Grenze haben Vb-Wetterlagen wiederholt teilweise langanhaltende und großflächige Überschwemmungen ausgelöst (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG 1998).

Die Niederschläge des Hochwassers vom August 2002

Im Zuge der Hochwasserereignisse im August 2002 wurden an der meteorologischen Station Zinnwald-Georgenfeld innerhalb von 24 Stunden 348,2 mm Niederschlag registriert (EIGENE AUSWERTUNG DATENREIHEN DWD). Diese Menge stellt die größte je in Deutschland innerhalb von 24 Stunden gemessene Niederschlagsmenge dar. Ausgelöst wurden die Starkniederschläge durch eine Vb-Zyklone, die ihren Niederschlagsschwerpunkt über dem Osterzgebirge hatte (Abb. 10).



Abb. 10: Niederschlagsverteilung in Mitteleuropa (10. – 13. August 2002) (DWD 2002)

2.7 Hydrologie

Die hydrologische Situation des Untersuchungsgebietes ist aufgrund seiner Morphologie, seiner klimatischen Bedingungen und seiner anthropogenen Beeinflussung als sehr variabel einzustufen.

2.7.1 Allgemeiner Überblick

Die Ausbildung des Erzgebirges als gekippte Pultscholle führt zu einer besonderen hydrologischen Situation. 90 % der Gesamtfläche entwässern vom Kamm des Gebirges nach Norden, nur 10 % nach Süden in die Tschechische Republik (Abb. 11). Das Flusssystem der Mulde ist für die Entwässerung von 70 % der Fläche der Erzgebirgsnordabdachung verantwortlich (METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1966).



Abb. 11: Überblick über das Entwässerungssystem des Erzgebirges (Diercke Weltatlas 1996)

Das Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz oberhalb des Pegels Rehefeld umfasst 15,3 km². Der Pegel liegt linksseitig, 46,2 km oberhalb des Zusammenflusses von Wilder Weißeritz und Roter Weißeritz auf einer Höhe von 685 m über NN. Es handelt sich um einen Schreibpegel mit Messwertaufnehmer und Schwimmersystem, ausgestattet mit Fernübertragung und Messwertansager, der in das sächsische Hochwasserwarnsystem integriert ist. Gemessene Zeitreihen liegen für den Pegel seit 1961 vor (LFUG 2002a).

Innerhalb des Untersuchungsgebietes hat der Lauf der Wilden Weißeritz eine Länge von ca. 7 km, wobei zwischen Quelle und Pegel ein Höhenunterschied von 164 m besteht. Das Sohlgefälle beträgt somit 2,3 %.



Abb. 12: Einzugsgebiete der Wilden und der Roten Weißeritz (Meteorologischer Dienst der DDR 1966, verändert)

2.7.2 Abflüsse

Die Ganglinien der Pegel an der Weißeritz weisen eine hohe Variabilität auf. So wurde am Pegel Dölzschen an der Vereinigten Weißeritz mit einem Einzugsgebiet von 366 km² im Juli 1958 ein Abfluss von 230 m³/s gemessen, während im August 1975 der Abfluss nur 0,03 m³/s, also 30 l/s, betrug (LFUG 1997c). Die zu diesen Durchflüssen gehörenden Ab-

flussspenden liegen bei 628 l/s*km² und 0,08 l/s*km². Diese Differenz entspricht dem Faktor 7666.

Der Pegel Rehefeld weist ebenfalls eine hohe Variabilität auf (Tabelle 1). Das Maximum des Abflusses für die Periode zwischen 1961 und 1995 lag im Juli 1980 bei 23,6 m³/s, das Minimum im Dezember 1969 bei 0,0 m³/s (LFUG 1997c).

Wilde Weißeritz, Pegel Rehefeld							NNQ	25.+Dez	1969	0,000	1961/1995				
Pegelnummer: 55130.0					HHQ	22. Jul	1980	23,6	15,3 km ²						
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Win	Som	Jahr
Jahr	1965+	1969	1970	1970	1970	1975	1975	1968+	1975+	1975	1975	1975+	1969+	1975+	1969+
NQ	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,040	0,040	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MNQ	0,135	0,160	0,145	0,164	0,185	0,352	0,174	0,133	0,104	0,103	0,095	0,097	0,082	0,067	0,052
MQ	0,331	0,517	0,374	0,356	0,579	0,917	0,454	0,287	0,252	0,241	0,196	0,213	0,514	0,274	0,393
MHQ	1,26	2,33	1,59	1,27	2,27	2,38	1,75	1,50	1,94	1,92	0,875	0,909	4,02	4,13	5,59
HQ	4,64	11,8	7,92	4,84	10,6	8,82	6,88	7,99	23,6	15,3	5,14	2,84	11,8	23,6	23,6
Jahr	1981	1974	1976	1987	1981	1987	1965	1987	1980	1983	1995	1986	1974	1980	1980

Tabelle 1: Gewässerkundliche Hauptwerte des Pegels Rehefeld (1961–1995); Abflüsse in m³/s(Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 1997c).

Im Zuge der Hochwasserereignisse im August 2002 liegen für den Pegel Rehefeld Wasserstandsdaten vor, die darauf hindeuten, dass der Abfluss am 12. August 2002 bei etwa 60 m^3 /s lag. Dieser Wert entspricht einer Abflussspende von 3921 l/s*km².

Gegenüber dem durchschnittlichen Abfluss der Periode November 1999 bis Juli 2002 in Höhe von 0,376 m³/s stellt die Abflussspitze vom August 2002 eine Steigerung um den Faktor 10429 dar (ZEITREIHE DES SÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (LFUG)). Nach Aussage des LFUG handelte es sich bei diesem Ereignis um ein 500- bis 1000-jährliches Hochwasser.

2.7.3 Hochwasser

Im Zusammenhang mit der hohen Abflussvariabilität der Weißeritz kam es wiederholt zu großen Hochwasserereignissen, die z.T. erhebliche Beschädigungen von Siedlungen zur Folge hatten. Das Hochwasser von 1897 war eines der größten an der Weißeritz im 19. Jahrhundert. Die Erfahrungen aus diesem Ereignis und der steigende Bedarf an Trinkund Brauchwasser in Dresden und im Erzgebirgsvorland führten zur Integration von drei Talsperren in das Entwässerungssystem der Weißeritz (Abb. 12) (LANDESTALSPER-RENVERWALTUNG DES FREISTAATES SACHSEN 1992:

- In den Jahren 1908 1914 wurde im Mittellauf der Wilden Weißeritz die Talsperre Klingenberg gebaut. Die Talsperre hat ein Einzugsgebiet von 89,4 km² und einen Gesamtstauraum von 17,5 Mio. m³.
- Oberhalb der Talsperre Klingenberg wurde im Oberlauf der Wilden Weißeritz in den Jahren 1926 - 1931 die Talsperre Lehnmühle gebaut. Sie umfasst ein Einzugsgebiet von 60,4 km² und hat einen Gesamtstauraum von 23,5 Mio. m³.
- Von 1911 bis 1913 wurde im Lauf der Roten Weißeritz die Talsperre Malter errichtet, die ein Gesamtstauvolumen von 8,9 Mio. m³ aufweist. Ihr Einzugsgebiet hat eine Fläche von 73 km².

Aus Gründen des Hochwasserschutzes werden ca. 13 % des Gesamtstauvolumens der Talsperren freigehalten. Damit ist die Absicherung gegen ein 50-jährliches Hochwasserereignis gegeben (LANDESTALSPERRENVERWALTUNG DES FREISTAATES SACHSEN 1992).

Die außerordentliche Variabilität des Abflusses ist auf die Gegebenheiten des Einzugsgebietes zurückzuführen. Ein Faktor sind die besonderen Wetterlagen, besonders die Vb-Zyklonen, die sich im Raum des Erzgebirges abregnen und innerhalb weniger Tage sehr große Niederschlagsmengen produzieren. Ein weiterer hochwasserfördernder Faktor sind die geringmächtigen Bodenauflagen und die geringe Wasserführung des anstehenden Gesteins, die eine starke und schnelle Reaktion des Abflusses auf den Niederschlag verursachen (METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1966).

Das Einzugsgebiet oberhalb des Pegels Rehefeld ist durch bergbauliche und forstwirtschaftliche Maßnahmen in hydrologischer Sicht verändert worden. Der Mitte des 16. Jahrhunderts an der Westflanke des Kahlebergs angelegte Neugraben führt zur Vergrößerung der Einzugsgebietsfläche der Altenberger Galgenteiche. Durch diese Baumaßnahme wurde die Einzugsgebietsfläche der Wilden Weißeritz oberhalb des Pegels Rehefeld um ca. 2 km² verkleinert (WAGENBRETH&WÄCHTLER 1990).

Im Zuge der Aufforstung der gerodeten Flächen im 19. Jahrhundert wurden auch Moorstandorte durch Grabenentwässerung forstwirtschaftlich nutzbar gemacht. Das weiterhin bestehende Grabennetz führt zu einer raschen Ableitung des Niederschlagswassers aus der Fläche und wirkt somit Hochwasser fördernd (mündliche Mitteilung FORSTAMT BÄ-RENFELS 08.04.2004). Auf der Einzugsgebietsfläche von 15,3 km² verlaufen Gerinne mit einer Gesamtlänge von fast 60 km. Die Flussdichte beträgt somit 3,88 km/km². Bei annähernd 40 % dieser Gerinne handelt es sich um künstlich angelegte und zur Entwässerung genutzte Gräben. Ohne diese künstlichen Gerinne läge die Flussdichte bei 2,33.

2.8 Zusammenfassende Darstellung der Problematik des Gebietes

Rückblickend auf die Geschichte der Hochwasserereignisse im Erzgebirgsraum ist erkennbar, dass es immer wieder zu Unwetterkatastrophen kam. Die Hochwasserproblematik des Erzgebirges lässt sich zusammenfassend wie folgt darstellen:

 Über dem östlichen Mitteleuropa kommt es im Abstand weniger Jahre zu langanhaltenden und ergiebigen Niederschlagsvorgängen. Diese Niederschlagsereignisse werden durch sogenannte Vb-Zyklonen ausgelöst, die im Mittelmeerraum große Mengen feuchtwarmer Luftmassen aufnehmen und auf ihrer weiteren Zugbahn nordöstlich der Alpen auf trocken-kalte Luftmassen nordeuropäischen Ursprungs stoßen. Der große Temperaturgegensatz führt zu oft lokal begrenzten sehr ergiebigen Niederschlägen.

Eine Wetterlage dieses Typs brachte den deutschen Rekordniederschlag von 348,2 mm innerhalb von 24 Stunden, der zum Hochwasser an der Elbe und ihren Nebenflüssen im August 2002 führte (DWD, 2002).

Eine Vb-Zyklone war es auch, die im Vorfeld des Oderhochwassers 1997 in Tschechien innerhalb von vier Tagen 586 mm Niederschlag brachte (LANDESUMWELT-AMT BRANDENBURG 1998).

- In geologisch-geomorphologischer und hydrologischer Sicht kann das Erzgebirge als ein "Hochwassergunstraum" bezeichnet werden. Beim Ausgangsgestein des Gebirges handelt es sich um kristalline Gesteine, in der Hauptsache Gneise und Granite. Diese weisen nur eine geringe Klüftigkeit und ein sehr geringes Infiltrationsvermögen auf, so dass ein Perkolieren von Niederschlagswasser praktisch nur bis zur Oberkante des anstehenden Gesteins möglich ist (HEILMANN et al. 1993).
- Aufgrund der Verwitterungsbeständigkeit der kristallinen Gesteine und der klimatischen Gegebenheiten werden in den exponierten Hochlagen des Erzgebirges Bodenmächtigkeiten von nur wenigen Dezimetern erreicht (BODENKARTE DES FREI-STAATES SACHSEN L5346 OLBERNHAU, FORSTSTATIONIERUNGS-KARTE FORSTAMT BÄRENFELS). Dies führt zu einer geringen Wasserspeicherkapazität der Böden.
- Eine weitere Folge der geringmächtigen Bodenauflage und der schwachen Klüftigkeit des Gebietes ist die geringe Grundwasserkapazität des Erzgebirges. Zu Hochwasserschutzzwecken und um den Wasserbedarf des Erzgebirgsvorlandes, insbesondere der Städte Dresden und Chemnitz, zu decken, wurden schon vor 100 Jahren in Tallagen des Erzgebirges Talsperren errichtet und Stauseen angelegt (Landestalsperrenverwaltung 1992). Diese konnten zwar schon wiederholt Hochwasserwellen aufnehmen, jedoch
übertrafen die Wassermassen des Augusthochwassers 2002 die Kapazitäten und ließen die Talsperren überlaufen. Ein Problem aller Staueinrichtungen ist der insbesondere in Hochwassersituationen ausgeprägte Sedimenteintrag, der zu einer kontinuierlichen Verringerung des Stauvolumens führt (DYCK&PESCHKE 1995, HERRMANN 1977).

- Einen weiteren den Abfluss beschleunigenden Komplex stellen die bergbaulichen Tätigkeiten in dem Raum dar. Der große Holzbedarf dieses Wirtschaftszweiges führte schon am Ende des Mittelalters zur Rodung der natürlich vorhandenen Waldgesellschaft und der Anlage von Fichtenmonokulturen, die zu einer hydrologischen Umgestaltung des Raumes führte. Für die verstärkte Nutzung der Ressource Wasser wurden Grabensysteme und Entwässerungsgräben angelegt, die eine beschleunigte Ableitung von Niederschlagswasser in Speichereinrichtungen zur Folge haben (WA-GENBRETH&WÄCHTLER 1990).
- Als weiterer, die Abflusssituation verschärfender Faktor, ist die langjährige starke Luftverschmutzung mit Schwefeldioxid zu nennen. Die ökologische Belastung der Pflanzengesellschaften führte zu einem flächenhaften Absterben von Forstbeständen, insbesondere den Fichtenwäldern. Dadurch wurde das Interzeptionsvermögen der Forstbestände wie auch das Infiltrationsvermögen der Waldböden eingeschränkt. Erst durch den Einbau moderner Filteranlagen Anfang der 1990er Jahre und den Niedergang der Industrie in Tschechien und Ostdeutschland gingen die Immissionen stark zurück. Dadurch hat sich die Situation des Waldes maßgeblich verbessert. Regelmäßige Kalkungen der Forsten zur Neutralisation der Säurealtlasten und ein Umbau der Fichtenmonokulturen zu Mischwäldern sollen in Zukunft eine Vergleichmäßigung des Abflusses mit reduzierter Erosionsrate und Sedimentfracht der Bäche bewirken.

3. GRUNDLAGEN DER NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-MODELLIERUNG

Die Erstellung und Berechnung von Niederschlag-Abfluss-Modellen (N-A-Modellen) mit Hilfe von EDV-Anlagen blickt auf eine ca. 30jährige Geschichte zurück. Ursprünglich war ihr Einsatz auf die Untersuchung von Hochwässern beschränkt. Heute werden sie jedoch auch zur Modellierung von Niedrigwasserereignissen und von Abflussganglinien pegelloser Entwässerungssysteme sowie zur Siedlungsentwässerungsmodellierung eingesetzt. N-A-Modelle eignen sich weiterhin zur Bearbeitung von Fragestellungen der Bemessung von Brücken und Hochwasser-Rückhaltebecken und für die Untersuchung von hydrologischen Auswirkungen von Landnutzungsänderungen.

3.1 Modelltypen

Hydrologische N-A-Modelle beschreiben die kausalen Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss mathematisch und dienen zur Ermittlung der Abflüsse aus Einzugsgebieten (DVWK 1999).

3.1.1 Stochastische Modelle

Bei stochastischen Modellen wird die Funktion der Übertragung des Niederschlages in den Abfluss ohne eine weitere Untergliederung des Systems erstellt. Die Variablen werden als zufällige Größen angesehen, die einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gehorchen. Die Beziehung zwischen Niederschlag und dem daraus resultierenden Abfluss wird statistisch ermittelt. Dieser Modelltyp wird in erster Linie zur Berechnung von Wiederkehrintervallen verschiedener Ereignisse genutzt und eignet sich nicht zur Berechnung der Auswirkungen von Parameteränderungen im Einzugsgebiet. Stochastische Modelle eignen sich allgemein nicht zur Darstellung der hydrologischen Vorgänge in kleinen Einzugsgebieten (DVWK 1982a).

3.1.2 Deterministische Modelle

Bei deterministischen Modellen wird zwischen Block-Modellen (Black Box Modelle) und detaillierten Modellen unterschieden.

Block-Modelle

Block-Modelle beschreiben die Wirkung des Einzugsgebietes pauschal mit Hilfe eines einzigen empirischen Modellansatzes. Beispiele für diesen Modelltyp sind das Einheitsganglinienverfahren (Unit-Hydrograph) und das lineare Einzelspeicherverfahren (DVWK 1982a). Das Einheitsganglinienverfahren erlaubt eine Abflussvorhersage für ein bestimmtes Einzugsgebiet, für das Niederschlagswerte und Abflussganglinie vorliegen (HERRMANN 1977).

Detaillierte Modelle

Bei detaillierten Modellen werden die hydrologischen Teilprozesse Abflussbildung und Abflusskonzentration flächenhaft und nach Komponenten unterschieden. Die Erstellung eines detaillierten Modells ist z.B. dann notwendig, wenn nicht nur die Abflussganglinie am Gebietsauslass, sondern an mehreren Punkten innerhalb des Einzugsgebietes berechnet werden soll. Der Grad der räumlichen Aufgliederung des Modells wird durch die Genauigkeitsanforderungen, die gestellt werden, bestimmt. Die Heterogenität eines Gebietes und der Grad der Verästelung des Entwässerungssystems bestimmen den Grad der räumlichen Aufgliederung des Gebietes mittels der Bildung von Teilflächen. Die Translation des Niederschlages in den resultierenden Abfluss erfolgt beim detaillierten Modell auf der Ebene der Teilflächen. Die Teilflächen stellen jeweils hydrologisch homogene Einheiten dar, für die mittels hydrologischer und hydraulischer Parameter die Abflussganglinie modelliert wird. Hierbei geben die oberhalb gelegenen Teilgebiete ihren Abfluss an den jeweiligen Unterlieger ab. Das gesamte Modell umfasst dann die aus der "Durchreichbewegung" des Wassers modellierte Abflussganglinie (DVWK 1999).

3.2 Parameter und Datenzeitreihen

Detaillierte Modelle erfordern eine Vielzahl von Informationen. Die Flächenverteilung innerhalb des Einzugsgebietes, das Gebiets- und Gerinnegefälle und weitere gerinnespezifische Informationen, die hydrologischen und hydraulischen Bodeneigenschaften, Informationen zur Landnutzung und eine Vielzahl weiterer Gebietskennwerte gehen in das Modell ein. Die benötigten Daten stammen u.a. aus topographischen und pedologischen Karten. In zunehmendem Maße werden auch digitale Quellen genutzt (DVWK 1999).

Des weiteren werden die Zeitreihen für verschiedene meteorologische Größen benötigt. Einerseits gehen für die Bestimmung der Gebietsbelastung die Zeitreihen des Niederschlags ein. Andererseits sind zur Errechnung der potentiellen Gebietsverdunstung Zeitreihen für Temperatur, Wind und Strahlung notwendig. Zur Überprüfung des Modells werden die Abflussdaten des dem Gebiet zugeordneten Pegels benötigt. Die Feinanpassung der Modellparameter bewirkt hierbei eine Abstimmung zwischen den simulierten und den tatsächlichen Abflussverhältnissen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob die Niederschlag-Abfluss-Vorgänge eines konkreten Ereignisses modelliert werden sollen oder ob ein längere Zeitraum betrachtet werden soll. Einerseits werden unterschiedlich lange Zeitreihen benötigt, andererseits muss die Anpassung der Gebietsparameter an die natürlichen Gegebenheiten für die Modellierung eines längeren zu betrachtenden Zeitraums mit besonders großer Sorgfalt vorgenommen werden.

3.3 Einsatzgebiete von Niederschlag-Abfluss-Modellen

Der hohe Detaillierungsgrad der heute zur Verfügung stehenden N-A-Modelle erlaubt neben der Hochwassersimulation auch die Erstellung kompletter Wasserbilanzen über das gesamte Abflussgeschehen einschließlich Hochwasser und Niedrigwasser (DVWK 1999).

Die bearbeiteten Fragestellungen umfassen laut DVWK (1999):

- a) Ermittlung von Bemessungsabflüssen für wasserwirtschaftliche Maßnahmen
 - Scheitelabflüsse HQ für die Dimensionierung von Bauwerken
 - Scheitelabflüsse HQ zum Nachweis der vorhandenen Hochwassersicherheit des Gewässers durch Vergleich mit der hydraulischen Leistungsfähigkeit Q_{voll}
 - Hochwasserganglinien Q(t), z.B. zur Planung von Hochwasserrückhaltebecken
 - Abflusskontinua, z.B. zum Nachweis des zeitlichen Auftretens von Ausuferungen, zum Nachweis der Entlastung aus Mischwasser-Kanalisationen u.s.w.
- b) Wirkungsnachweise für wasserwirtschaftliche Maßnahmen
 - an der Stelle der Maßnahme ("örtlich")
 - an anderen Stellen oder f
 ür Ma
 ßnahmen an mehreren verschiedenen Stellen ("
 überörtlich")
- c) Auswirkungen anthropogener Veränderungen
 - in Teilflächen (Siedlungen, Landwirtschaft)
 - in Gewässerteilstrecken (Ausbau, Renaturierung)

Ein besonderes Augenmerk wird auf die Berechnung von Hochwasserganglinien nach gegebenen Starkregenereignissen, bzw. während der Schneeschmelze, gerichtet. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Fokus auf die Modellierung von Hochwasserereignissen durch Starkniederschlag und Schneeschmelze gelegt werden. Stadthydrologische Fragestellungen werden nicht bearbeitet.

3.4 Zusammenfassung und potentielle Fehlerquellen

Aufgrund der Fragestellung dieser Arbeit bietet sich der Einsatz eines flächendetaillierten, deterministischen Niederschlag-Abfluss-Modells an. Es bietet die Möglichkeit, die hydro-

logische Heterogenität eines Einzugsgebietes abzubilden und die Abflussvorgänge des Gebietes lokal zu differenzieren. Voraussetzung für die Nutzung eines solchen Modells ist die Existenz möglichst genauer Informationen zu den hydrologischen Gegebenheiten des Gebietes und den eingehenden meteorologischen Größen.

Bei der Nutzung von Niederschlag-Abfluss-Modellen ist zu bedenken, dass eine Vielzahl von Fehlermöglichkeiten existiert.

Die benutzten Zeitreihen können Erfassungs- oder Übertragungsfehler beinhalten, die eine Abbildung der natürlichen Vorgänge erschweren. Ferner weist das zu modellierende Einzugsgebiet in der Regel eine Komplexität auf, die es nicht zulässt, alle in ihm ablaufenden Prozesse physikalisch richtig und detailliert abbilden zu können. Ein Modell kann lediglich die wesentlichen Prozesse abstrahiert beschreiben. Selbst wenn im kleinräumigen Maßstab sehr genaue Kenntnisse über die hydrologischen Verhältnisse vorliegen, so können diese meist aufgrund der Gebietsheterogenität nicht auf die Gesamtfläche des Einzugsgebietes übertragen werden (DVWK 1999).

4. METHODISCHES VORGEHEN BEI DER MODELLERSTELLUNG

Zur Erstellung der Niederschlag-Abfluss-Simulation für das Untersuchungsgebiet wurde das Modellierungsprogramm NASIM der Hydrotec GmbH, Aachen verwendet.

4.1 NASIM – Einordnung des Modells

Bei NASIM handelt es sich um ein deterministisches, flächendetailliertes Modell, das sich laut NASIM-Handbuch (2003) durch folgende Merkmale auszeichnet:

- Mit hoher zeitlicher Auflösung ist die kontinuierliche Simulation der vollständigen Wasserbilanz über beliebig lange Zeiträume möglich.
- Es werden alle wesentlichen physikalischen Prozesse der Speicherung und Wasserbewegung abgebildet (Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser, Gewässer).
- Zur modellhaften Darstellung der Flächennutzung und der Böden werden physikalische Größen und Rechenwege verwendet.
- Unter Berücksichtigung sämtlicher hydraulisch wirkender Elemente eines Kanalnetzes können urbane Abflüsse simuliert werden.
- Bei Bedarf können Berechnungen auf Basis der kleinsten räumlichen Einheiten im Modell, der Elementarflächen, durchgeführt werden. Die Ergebnisse können automatisch auf Basis der nächstgrößeren Einheiten, der Simulationsflächen, aggregiert werden.
- NASIM bietet die Möglichkeit der Erstellung eines Gebietsniederschlagsmodells.
- Über die ArcView-Schnittstelle wird die direkte Nutzung digitaler Karteninformationen ermöglicht.

Das Programm NASIM bietet im Gegensatz zu Blockmodellen die Möglichkeit, die natürlichen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes modellhaft abzubilden. Dadurch wird die Möglichkeit eröffnet, mittels der Veränderung von Parametern, wie beispielsweise der Landnutzung, virtuell die potentiellen Veränderungen auf die hydrologischen Verhältnisse darzustellen.

4.2 Verarbeitung der Parameter in NASIM

Im Folgenden werden die fünf im NASIM-Modell bearbeiteten Elemente der Generierung von Niederschlag in die resultierende Abflussganglinie vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird der Begriff Belastung verwendet. Unter Belastung versteht man die Beaufschlagung eines Gebietes mit Niederschlagswasser, die entweder direkt über Regen oder indirekt über Schneeschmelze zustande kommt.

Die fünf Elemente des NASIM-Modells sind:

- Belastungsbildung
- Belastungsverteilung
- Belastungsaufteilung
- Abflusskonzentration
- Translation der Welle

4.2.1 Belastungsbildung

Die Belastungsbildung erfolgt durch Niederschlag auf das Einzugsgebiet. In Abhängigkeit von der herrschenden Temperatur kann dieser in Form von Regen oder Schnee fallen. Während Regen unmittelbar zu einer Gebietsbelastung führt, erfolgt die Gebietsbelastung durch Schneefall verzögert. Das Gebiet wird erst während der Schneeschmelze belastet. Dieser Vorgang wird in NASIM mit Hilfe des Temperatur-Faktor/Snow-Compaction-Verfahrens beschrieben (NASIM-HANDBUCH 2003).

4.2.2 Belastungsverteilung

Die Belastungsverteilung, also die Verteilung des punktuell erfassten Niederschlags auf die Fläche kann auf drei verschiedene Weisen vorgenommen werden (NASIM-HANDBUCH 2003):

- Die entsprechenden Niederschlagszeitreihen können den Teilgebieten des Modells manuell zugeordnet werden (Thiessen-Verfahren).
- Die Zuordnung kann automatisch erfolgen. Hierbei richtet sich die Zuordnung nach der Höhenlage und dem Abstand der Teilgebietsflächenschwerpunkte zur Niederschlagsstation.
- Zuordnung von Niederschlagszeitreihen je Teilgebiet.

4.2.3 Belastungsaufteilung

Die Belastungsaufteilung wird bei NASIM mit Hilfe der Bodenfeuchtesimulation berechnet. Die Gebietsbelastung wird für die unversiegelten Flächen in die Prozesse Interzeption, Infiltration, potentielle Evapotranspiration und Perkolation bzw. Exfiltration überführt. Besonders intensiv wird hierbei die Evapotranspiration betrachtet, da sie einen hohen quantitativen Anteil am Gesamtwasserhaushalt hat. Die Zeitreihen der potentiellen Verdunstung nach Haude bzw. Penman gehen darum direkt in das Modell ein. Bei geringem Detaillierungsgrad der flächenhaften Bodenfeuchteinformationen ist es ausreichend, die lineare Bodenfeuchtesimulation zu durchlaufen. Bei einem hohen Detaillierungsgrad ist es ratsam, die nichtlineare Bodenfeuchtesimulation zu nutzen, da der Zusammenhang zwischen hydrologischen Prozessen und Bodenfeuchte nicht linear verläuft (NASIM-HANDBUCH 2003).

4.2.4 Abflusskonzentration

Bei natürlichen Flächen werden Transport und Verzögerung von Interflow und Basisabfluss durch je einen Einzellinearspeicher beschrieben. Für die Darstellung des Oberflächenabflusses kommt eine vom Hersteller erarbeitete Variante des Isochronen-Verfahrens mit nachfolgender Retention zum Einsatz.

Liegen keine digitalen Informationen zu den Geländehöhen vor, so muss die Gebietstopographie manuell in das Modell eingepflegt werden, um die Isochronen erstellen zu können. Hierbei wird jedes einzelne Tal des Einzugsgebietes als linker und rechter Hang mit dazwischenliegender Übergangsfläche, dem "Zwickel" definiert. Für diese Elemente werden dann Hanglänge und –gefälle eingegeben.

Sind die Höhendaten in digitaler Form vorhanden, so ist es möglich, die Zeitflächenfunktion (ZFL) extern mit der ArcView-Erweiterung "ZFL" zu berechnen und dem Modell als Datei zur Verfügung zu stellen.

Bei versiegelten Flächen werden die Abflussprozesse mit Hilfe eines Speicherkaskadenansatzes beschrieben. Dabei werden die versiegelten Einzugsgebietsflächen von der Gesamtfläche abgezogen und gesondert behandelt (NASIM-HANDBUCH 2003).

4.2.5 Translation der Welle

NASIM nutzt zur Berechnung der instationären Hochwasserwellenabläufe in offenen Gerinnen und Kanälen das hydrologische Verfahren nach Kalinin-Miljukov (Rosemann 1970). Hierbei werden mit Hilfe von repräsentativen Gerinnequerprofilen mit einem linearen Verlauf der Wasserspiegellage die stationären Abflussverhältnisse bestimmt. Der Grundgedanke dieses Verfahrens besteht in der Bestimmung des eindeutigen Verhältnisses zwischen Abfluss und Wasservolumen im Gerinne (NASIM-HANDBUCH 2003).

4.3 Vorbereitende Arbeiten für die Modellerstellung

Zur Erstellung der Informationen zur Abflusskonzentration innerhalb des Untersuchungsgebietes benötigt man für die Modellanfertigung ein digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebietes. Aufgrund von Inkompatibilitäten der deutschen und tschechischen kommerziellen Höhenmodelle für das Untersuchungsgebiet wurde das betreffende Höhenmodell durch Digitalisierung der Karteninformationen selbst erstellt.

Das Programm NASIM benötigt zur Simulation der N-A-Vorgänge des Gebietes einerseits eine Zeitflächenfunktion des Abflussgeschehens und andererseits zur Abbildung von Boden und Landnutzung sog. Elementarflächen. Beide Grundlagen können mit Hilfe von ArcView-Erweiterungen erstellt werden.

4.3.1 Kartengrundlage

Folgende Karten wurden als Grundlage für die Durchführung der Digitalisierungsarbeiten im Rahmen der Modellerstellung verwendet:

- Topographische Karte 5248 Altenberg im Maßstab 1:25.000, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden. Erscheinungsjahr: 2000.
- Základní Mapa Ceské Republiky (Topographische Karte) 02-321 Dubi im Maßstab
 1:25.000, Tschechisches Katasteramt, Prag. Erscheinungsjahr: 2002.
- Topographische Karte 5248-SW Altenberg-Rehefeld-Zaunhaus im Maßstab 1:10.000, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden. Erscheinungsjahr: 2001.
- Geologische Karte 5248 Section Altenberg-Zinnwald im Maßstab 1:25.000, Landesvermessungsamt Sachsen (Hrsg.), Dresden. Erscheinungsjahr: 1906.
- Geologická Mapa (Geologische Karte) 02-32 Teplice im Maßstab 1:50.000, Tschechisches Katasteramt, Prag. Erscheinungsjahr: 1992.
- Pudní Mapa (Bodenkarte) 02-32 Teplice im Maßstab 1:50.000, Tschechisches Katasteramt, Prag. Erscheinungsjahr: 1991.
- Forststationierungskarte des Reviers Rehefeld im Maßstab 1:10.000, Forsteinrichtungswerk des Landes Sachsen. In: Landeswald des Forstamtes Bärenfels, Allgemeiner Teil 1999 – 2008.

Die zur Erstellung des digitalen Geländemodells notwendigen Karten wurden mit Hilfe eines Trommelscanners erfasst und unter Zuhilfenahme der Bildbearbeitungssoftware Adobe-Photoshop Version 6.0 aneinandergefügt. Die Georeferenzierung der Karte erfolgte mittels der digitalen Bildbearbeitungssoftware ERDAS IMAGINE 8.6. Als Modelleinheit wurden Meter gewählt. Beim verwendeten Koordinatensystem handelt es sich um das UTM-System der Zone 33.

4.3.2 Erstellung der Zeitflächenfunktion (ZFL)

Sämtliche GIS-Arbeiten wurden mit Hilfe des GIS-Systems ESRI ArcView 3.2 (ESRI INC. REDLANDS, CA USA) durchgeführt.

Die Erstellung der Zeitflächenfunktion in NASIM für das betreffende Untersuchungsgebiet ist eine für die Modellierung der Niederschlag-Abfluss-Vorgänge notwendige Grundlage, da hiermit die Information zur Abbildung der Abflussreaktion des Gebietes zur Verfügung gestellt wird.

Die ArcView-Erweiterung "ZEITFLÄCHENFUNKTION" benötigt verschiedene Informationen zum Untersuchungsgebiet in digitaler Form, die im Folgenden vorgestellt werden.

Höhenraster

Zur Erstellung des digitalen Höhenmodells wurden die Höhenlinien der Kartengrundlage mit einem vertikalen Abstand von 5 m digitalisiert. Aus den so erstellten digitalen Höhenlinien wurde mit Hilfe der ArcView-Erweiterung "3D ANALYST" ein Triangular-Irregular-Network (TIN) erstellt, das durch die ArcView-Funktion "CONVERT TO GRID" in ein Höhenraster umgewandelt wurde (Abb. 13).

Teilgebiete

Ein weiterer Schritt zur Erstellung der Zeitflächenfunktion ist die Festlegung der Teilgebiete, aus denen sich das Gesamteinzugsgebiet zusammensetzt. Die Festlegung der Grenzen zwischen den Teilgebieten orientierte sich in erster Linie an den Wasserscheiden der einzelnen Teileinzugsgebiete der Wilden Weißeritz oberhalb des Pegels Rehefeld. Somit folgen die Grenzen zumeist den Kämmen der Höhenrücken zwischen den einzelnen Bächen im Gebiet (Abb. 14).



Abb. 13: Höhenraster des Untersuchungsgebietes



Abb. 14: Teilgebietsgrenzen des Untersuchungsgebietes

Entwässerungsnetz

Zur Berechnung der Zeitflächenfunktion werden weiterhin digitale Informationen über das Entwässerungsnetz des Untersuchungsgebietes benötigt. Daher wurden die Bachläufe und die Grabensysteme des Gebietes digitalisiert (Abb. 15).



Abb. 15: Das digitalisierte Bach- und Grabensystem des Untersuchungsgebietes

Startmaske der ArcView-Erweiterung "ZEITFLÄCHENFUNKTION"

Die Zeitflächenfunktion des Untersuchungsgebietes wurde mit Hilfe der ArcView-Erweiterung "ZEITFLÄCHENFUNKTION" berechnet. In der Selektionsmaske der Erweiterung wurden folgende Eingaben gemacht:

- Name des Höhenrasters
- Name des SHAPEFILE mit den Informationen über Teilgebiete
- Name des SHAPEFILE mit den Informationen über das Entwässerungssystem
- Berechnungsoptionen für die Kennwertausgabe, Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten

 Parameter f
ür den Oberliegerschwellwert, die Gerinnegeschwindigkeit und die Anfangs- und Endflie
ßtiefe des oberirdischen Abflusses.

4.3.3 Abbildung der Böden

Informationen über die Böden sind auf Grundlage von Interpretation geeigneter Karten und durch Grabungen und Sondierungen gewonnen worden. Abbildung 16 zeigt die in die Modellierung eingehende flächenhafte Verteilung der Bodenarten und Schichtdicken.



Abb. 16: Modellhafte Abbildung der Böden des Untersuchungsgebietes

4.3.4 Bildung der Elementarflächen

Bei den Elementarflächen, aus denen sich die Teilgebiete zusammensetzen, handelt es sich um die kleinsten Simulationseinheiten, für die innerhalb des NASIM-Modells Berechnungen durchgeführt werden. Sie stellen unterschiedlich große Flächen innerhalb des zu modellierenden Teilgebietes dar, die genau einem Bodentyp und einer Landnutzung zuzuordnen sind. Für das aus ihnen gebildete Flächennetz werden die Niederschläge und Abflüsse bzw. Durchflüsse modelliert. Die Elementarflächen können automatisch mit Hilfe der ArcView-Erweiterung "VERSCHNEIDUNG" erzeugt werden. Die Erweiterung bildet die Elementarflächen selbsttätig, indem sie verortete Informationen zu Teilgebieten, Böden und Landnutzung entsprechend kombiniert. Die Informationen zu Böden wurden der deutschen Bodenkarte 1:50.000 L5346 Olbernhau und der tschechischen Bodenkarte 1:50.000 01-32 Teplice entnommen. Die hydrologischen Parameter der modellierten Böden wurden der DVWK-Regel 116 entnommen. Die Landnutzungen des Untersuchungsgebietes wurden aus den topographischen Karten 1:25.000 5248 Altenberg und 1:25.000 02-32 Dubi abgeleitet. Ferner wurden weitere Informationen durch Begehungen während der Geländeaufenthalte gewonnen. Die Verortung der Geländeparameter erfolgte mittels eines GPS vom Typ GARMIN Etrex des Herstellers Garmin, Olathe, Kansas, USA.

Die Startmaske der Erweiterung "VERSCHNEIDUNG" erwartet als Eingabe die Namen der SHAPEFILE zu den Themen Teilgebiete, Bodentypen und Landnutzung. Ferner ist es möglich, die gewünschte Mindestgröße der zu bildenden Elementarflächen anzugeben.

4.3.5 GIS-Import und Einrichtung des NASIM-Systemplans

Die Eingabe der Gebietsparameter zu Boden und Landnutzung in NASIM kann automatisiert durchgeführt werden. Das NASIM-Menü bietet dafür die Funktion "GIS-IMPORT". Bei Ausführung dieses Imports werden die gebietsrelevanten Daten aus einem vorab festzulegenden Verzeichnis in NASIM importiert. Das Verzeichnis muss hierzu verschiedene Dateien, bzw. Tabellen enthalten (Tab. 2).

Lntztyp.dbf	Verortete Informationen zur Nutzung der Flächen.
Bodentyp.dbf	Verortete Informationen zu vorkommenden Bodentypen.
Boart.dbf	Die Tabelle enthält für jede in der Tabelle Bodentyp.dbf vorkommende
	Bodenart die hydrologisch relevanten Parameter.
Tg.dbf	Verortete Informationen zu Fläche und Höhe der Teilgebiete.
Efl.dbf	Die Elementarflächetabelle enthält die Daten zu den Elementarflächen, aus
	denen die Teilgebiete und damit auch das Gesamtgebiet aufgebaut ist:
	- Fläche (m^2)
	- Bodentyp
	- Landnutzung
	- Teilgebietsschlüssel

Tabelle 2: Übersicht über Tabellen des GIS-Imports

Seite 45

Der GIS-Import in NASIM führt zur Einrichtung von Teilgebieten mit Elementarflächen und den zugehörigen hydrologisch relevanten Informationen, die in NASIM betrachtet werden können. Hierzu wird der NASIM-Systemplan, der Editor des NASIM-Modellierungsprogramms, verwendet.

Mit seiner Hilfe ist es möglich, die Teilgebiete entsprechend ihrer natürlichen Abfolge miteinander zu verbinden und den Hauptvorfluter des Modells zu markieren.

Die Teilgebiete erhalten anschließend Informationen zu den Transportelementen, die auf ihrem jeweiligen Gebiet liegen. Hierbei ist das Querprofil des Transportelementes, im vorliegenden Fall das für das Teilgebiet repräsentative Querprofil des natürlichen Baches, anzugeben. Die benötigten Werte wurden durch Geländevermessungen ermittelt und mit Hilfe des CAD-Programms TRIFORMA visualisiert bzw. berechnet (Abb. 21).

Mit der Eingabe der Höhenstufen des Gerinneprofils wurden parallel auch die Rauheiten des Gerinnes eingegeben. Als Grundlage dienten hierbei die Rauigkeitsbeiwerte für den Landoberflächenabfluss nach Manning (DYCK UND PESCHKE 1995, DVWK 1984).

Ferner sind die Länge des Bachsystems und sein Sohlgefälle anzugeben. Die Bachlänge wird hierbei mit Hilfe der Erweiterung "VERSCHNEIDUNG" errechnet, das Sohlgefälle wurde durch das Verhältnis aus Höhendifferenz und Ausmessen der entsprechenden Entfernungen im GIS ermittelt.

4.4 Zusammenfassende Darstellung der Modellerstellung

Eine Schnittstelle zwischen ArcView und NASIM bietet die Möglichkeit, verortete Gebietsinformationen automatisiert in das Niederschlag-Abfluss-Modell einspeisen zu können. Hierdurch entfällt die manuelle Aufgliederung der hydrologisch eigenständigen Komplexe mittels des Modell-GUI (Graphical User Interface). Trotzdem ist die Anpassung einzelner Parametergruppen mittels des NASIM-Systemplan-Editors zur Abstimmung des Modells unerlässlich.

Im Zuge der Modellerstellung und Feinanpassung an die natürlichen Gegebenheiten wurde eine große Zahl von Testläufen mit dem erstellten Modell durchgeführt, die über einen Zeitraum von etwa sechs Wochen andauerten. So wurden die Auswirkungen der Veränderungen von Modellparametern jeweils individuell einzeln untersucht und in einer weiteren Phase die Auswirkungen von untereinander kombinierten Parameterwerten betrachtet. Die im Modell genutzten Parameter- und Eichfaktorkombinationen sind also die Produkte langer Versuchsreihen und werden als die beste Kombination zur Abbildung der hydrologischen Verhältnisse angesehen.

5. ERGEBNISSE DER MODELLIERUNG

Die Fragestellung dieser Arbeit wurde mit Hilfe der Modellierung von Zeitreihen der Periode April 1999 bis März 2000 durchgeführt. Aufgrund der geringen Fläche des Untersuchungsgebietes und der damit verbundenen raschen Abflussreaktion ist die Nutzung zeitlich hoch aufgelöster Datenreihen für meteorologische und hydrologische Größen notwendig. Vor 1999 standen keine zeitlich hoch aufgelösten Wasserstandszeitreihen des Pegels Rehefeld zur Verfügung. Im Zuge des Hochwassers im August 2002 wurde der Pegel beschädigt, so dass ab dem 13. August die vorhandene Pegelkurve nach Aussage des LfUG nicht mehr zutreffend ist. Innerhalb des verbleibenden Zeitraumes zwischen März 1999 und August 2002 hatte die gewählte Periode die größte Variabilität des Abflusses und bot somit die beste Möglichkeit zur Modellprüfung.

Eine erste Modellierungsperiode umfasste dabei den Zeitraum vom 15. Juni bis 15. Juli 1999. Der zweite Modellierungslauf erstreckte sich über den Zeitraum zwischen April 1999 und März 2000. Die Wahl dieser Perioden zielte auf die Untersuchung der potentiell unterschiedlichen Qualität der modellhaften Abbildbarkeit verschieden langer Zeiträume. Die Monatsperiode wurde innerhalb des Jahreszeitraums angesiedelt, um so gezielt einen Vergleich der Ergebnisse beider Modellläufe durchführen zu können.

5.1 Erstellung der Zeitflächenfunktion

Die ArcView-Erweiterung "ZEITFLÄCHENFUNKTION" erstellt folgende Ergebnisse:

- Die Datei TAPE20 wird erstellt. Sie enthält die Zeitflächenfunktion des Untersuchungsgebietes, also die Information, welcher Flächenanteil der Teilgebiete nach welcher Zeit entwässert ist und geht direkt in das Modell ein.
- Ein Isochronenraster, mit dessen Hilfe die Laufzeiten des Wassers im Gelände mittels ArcView dargestellt werden können (Abb. 17).
- Ein Rasterbild zur Visualisierung der errechneten lokalen Fließgeschwindigkeiten des Wassers im Gelände (Abb. 18).
- Ein SHAPEFILE zur Anzeige der errechneten lokalen Fließrichtungen im Gelände.
- Ein SHAPEFILE stellt die Auslasspunkte der Teilgebiete dar.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der ArcView-Erweiterung "ZEITFLÄCHENFUNK-TION" vorgestellt werde. Abbildung 17 zeigt das Isochronenraster des Untersuchungsgebietes, also die Bereiche gleicher Wasserlaufzeiten im Gelände. Deutlich ist hierbei zu erkennen, dass die Randbereiche des Untersuchungsgebietes erheblich dunkler dargestellt sind als der zentrale Bereich.



Abb. 17: Isochronen des Abflusses im Untersuchungsgebiet

Je dunkler die Räume auf dem Rasterbild (Abb. 17) dargestellt werden, desto länger ist die Fliesszeit in dem betreffenden Bereich. Auf der Darstellung spiegeln sich insbesondere in den Randlagen des Einzugsgebietes Bereiche wider, von denen das Wasser eine Zeitspanne von bis zu 19 Stunden bis zum Teilgebietsauslass benötigt. Von den hell dargestellten Bereichen fließt das Wasser hingegen nur wenige Minuten, bzw. maximal eine Stunde.

Das Rasterbild zur Anzeige der lokalen Fliessgeschwindigkeiten (Abb. 18) wird auf Basis der Formen des digitalen Geländemodells und der Parametrisierung der Eingabemaske der "ZEITFLÄCHENFUNKTION" erstellt.



Abb. 18: Lokale Fliessgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet

Es gibt Aufschluss über die Oberflächengeschwindigkeit des Wassers im Untersuchungsgebiet. Hierbei stellen die grünen Farbwerte die Bereiche mit Fließgeschwindigkeiten bis unter 1 cm/s dar. Auf den rot dargestellten Abflussbahnen bewegt sich das Wasser mit bis zu 50 cm/s. Der Wert von 50 cm/s markiert dabei die im Gelände ermittelte mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Gerinne, die sich deutlich in der Abbildung abzeichnen. Dabei tritt das stark verzweigte Entwässerungsnetz der ehemaligen Moorstandorte deutlich hervor.

5.2 Bildung der Elementarflächen

Durch den Programmlauf der ArcView-Erweiterung "VERSCHNEIDUNG" wurde das SHAPEFILE "Elementarflächen" (Abb. 19) erzeugt, das verortete Informationen zu jeder gebildeten Elementarfläche enthält.

Im vorliegenden Fall sind für 15 Teilgebietsflächen 120 Elementarflächen mit Größen zwischen 353 m² und 876.000 m² gebildet worden. Die unterschiedlichen Größen der Elementarflächen resultieren aus der wechselnden Kombination der Eingangsparameter Teilgebiet, Boden und Landnutzung. Die zum Elementarflächen-SHAPEFILE gehörende Attributtabelle wird als Eingabedatei für die Modellerstellung in NASIM genutzt. Sie enthält für jede gebildete Elementarfläche einen Eintrag über die Parameter Boden, Teilgebiet sowie Landnutzung.



Abb. 19: Elementarflächen des Untersuchungsgebietes (Farbdarstellung ist willkürlich)

5.3 Einrichtung des Systemplans

Im Anschluss an den GIS-Import wurden die Teilgebiete im Systemplan, dem NASIM-Editor, miteinander verknüpft und Angaben zu Hydraulik und Geometrie der Vorfluter gemacht (Abb. 20). Der wichtigste Vorfluter wird als "Hauptfluss" markiert. Als Ergebnis erhält man das vollständig aufgebaute Niederschlag-Abfluss-Modell des Untersuchungsgebietes mit flächenhaften Informationen zu Böden und Landnutzung sowie linienhaften Informationen zu den Gerinnen. Die entstandene Baumstruktur zeigt den Aufbau des Entwässerungssystems mit der Benennung der einzelnen Teilgebiete sowie den Pegel am Gebietsauslass. Abbildung 21 zeigt exemplarisch die Maske für die Eingabe der Gerinneparameter eines Teilgebietes. Neben Sohlgefälle und Länge des Vorfluters im Teilgebiet wird hier auch die Dimension seines repräsentativen Gerinnequerprofils eingegeben und visualisiert.





Abb. 20: NASIM-Systemplan mit N-A-Modell des Untersuchungsgebietes

-		NASIM	I: TE-Daten [001	003]		
Bezei	Bezeichnung: Wilde Weißeritz 2800m unterhalb Quelle					
Einlei	tung oben:		m⁰/s 🛓	Sollabfluss [m³/	s]:	
Gang	linie:	Keine	٤	Ganglinier	n [
			— Gerinne —			
Sohlg	gefälle [%]: 🗟	2.3589	Pot. Ve	rsickerung [l/s*km]	0.00	
Länge	e (m):	2162.00	Abflu	sskurven		_
		Der		rofil		
	Höhe	Breite I.	Breite r.	Rauheit I.	Rauheit r.	
	[m]	[m]	[m]	[m¹/² / s]	[m ¹ / ³ / s]	
1	0.00	0.00	0.00	31.40	31.40	+
2	0.10	0.95	1.98	31.40	31.40	
3	0.20	1.47	2.28	31.40	31.40	
4	0.30	1.77	2.33	31.40	31.40	+
	7		Udha			
	5			, ,	7	
		1				
		-				
Brouchet	L.				3.9	uttoria
I Mit	☐ Mit Vorlandspeicher					
		ОК	Abbrechen	Übernehmen	9	?
						است اد

Abb. 21: Maske zur Eingabe der Gerinneparameter eines Teilgebietes

5.4 Zeitreihen

Die meteorologische und hydrologische Situation für das Untersuchungsgebiet der Periode vom 01.April 1999 bis 31.März 2000 wurde mit Hilfe des Programmmoduls TIME-VIEW visualisiert.

5.4.1 Niederschlag:

Die an der Station Zinnwald-Georgenfeld gemessene Gesamtniederschlagsmenge des gewählten Zeitraumes betrug 1158,3 mm. Das Jahresniederschlagsmittel der Periode 1951/80 beträgt für Zinnwald-Georgenfeld 1020 mm. Bei der untersuchten Periode handelte es sich also um ein relativ feuchtes Jahr (Abb. 22).

Insgesamt fünfmal sind in der beobachteten Periode Niederschläge von mehr als 10 mm/h gemessen worden, davon zweimal sogar annähernd 20 mm/h (Tab. 3).





Datum	Niederschlag (mm/h)
19.05.1999	19,6 und 15,8
07.07.1999	12,9
1307.1999	13,1
18.09.1999	19,0

Tabelle 3: Niederschlagsmaxima der Station Zinnwald-Georgenfeld (mm/h) (01.04.1999 - 31.03.2000)

5.4.2 Temperatur

Die niedrigste im Untersuchungszeitraum gemessene Temperatur betrug $-14,0^{\circ}$ C (25.01.2000, 06:00 Uhr), die höchste 26,6°C (05.07.1999, 14:00 Uhr). Der Jahresgang der Temperaturkurve war deutlich ausgeprägt, der Tagesgang der Temperatur wies hingegen geringe Schwankungen auf. Auffallend ist die hohe Variabilität der Temperatur über kurze Perioden (Abb. 23).



(01.04.1999 - 31.03.2000)

5.4.3 Verdunstung

Die Werte für die potentielle Verdunstung nach Haude wurden mit Hilfe des Zeitreihentools TIME-VIEW (HYDROTEC GMBH, AACHEN) erstellt. In die Berechnung gingen jeweils die täglichen 14-Uhr-Werte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte ein.

Der Minimalwert der potentiellen Verdunstung im beobachteten Zeitraum betrug weniger als 0,02 mm/d (23.10.1999), der Maximalwert lag bei über 4 mm/d (19.07.1999) (Abb. 24). Während der Periode von April bis September 1999 erreichte die potentielle Verdunstung wiederholt Werte von über 2,5 mm/d. Im Anschluss an diese Periode werden zumeist nur noch geringe Verdunstungswerte errechnet.



Abb. 24: Station Zinnwald-Georgenfeld. Potentielle Evapotranspiration (Haude) (mm/d). (01.04.1999 – 31.03.2000)

5.4.4 Abfluss

Der niedrigste am Pegel Rehefeld gemessene Abfluss des Zeitraums betrug 0,001 m³/s (Periode September 1999), der höchste Abfluss 10, 5 m³/s (09.03.2000). Das entspricht Abflussspenden von 0,065 l/s*km² bzw. 686 l/s*km². Der durchschnittliche Abfluss betrug 0,415 m³/s. Das relativ niederschlagsreiche Jahr vom 01.04.1999 bis 31.03.2000 führte wiederholt zu einem deutlichen Anstieg der Pegelganglinie. Deutlich ist auf Abbildung 25 bis in den Mai 1999 der verstärkte Abfluss am Ende des Winters 1998/99 zu erkennen. In der Periode Juni/Juli und September 1999 kam es wiederholt zu Abflussspitzen in der Größenordnung von bis zu 1,5 m³/s, am 27.06.1999 wurden 6 m³/s erreicht. Ab Mitte Januar 2000 stieg der Abfluss bei wechselnden Pegelständen deutlich an und erreichte am 09.03.2000 um 17:00 sein Maximum von 10,5 m³/s in der beobachteten Periode.



Abb. 25: Station Zinnwald-Georgenfeld. Abflusswerte (m³/s) (01.04.1999 – 31.03.2000)

5.5 Modellierung der Monatsperiode 15. Juni bis 15. Juli 1999

Im Vorfeld des Modellierungsdurchlaufes wurde die Zeit-Flächenfunktion nach den Empfehlungen des NASIM-HANDBUCHS (2003) angepasst. Der Entwässerungsbeginn der Flächen soll laut Handbuch nach spätestens fünf Minuten erfolgt sein, im vorliegenden Fall begann die Entwässerung der Teilgebiete nach durchschnittlich vier Minuten.

5.5.1 Modellierungsdurchlauf mit Standardparametern

Der im Folgenden beschriebene Modellierungsdurchlauf wurde mit den Standardwerten für die programminternen Eichwerte (Abb. 26) und mit den Standardparametern für den Anfangszustand Bodenfeuchte, die Retentionszeiten und die Schneeschmelze durchgeführt (Abb. 27).

Eichfaktoren für ausgewählte SE			
Niederschlag:	1.00	Verdunstung:	1.00
Versiegelung: ab Vers.grad [%]:	0.00	Boden: Welkepunkt:	1.0000
Schnee:		Feldkapazität:	1.0000
Schmelzrate Temp.:	1.00	Gesamtporenvolumen:	1.0000
Schmelzrate Strahl.:	1.00	Max. Infiltration:	1.0000
Retentionen:		Horiz. Leitfähigkeit:	1.0000
Oberflächenabfluss:	1.00	Vertik. Leitfähigkeit für	
Interflow:	1.00	e alle Schichten:	1.0000
Basisabfluss:	1.00	 Exfiltrationsschicht; 	
Versiegelte Fläche:	1.00	Gerinne:	
Teilgebiet:		Geschwindigkeit:	1.00
Hangrauhait		Pot. Gerinneversick.:	1.00
Fbe85aie Leakage:	1.00	Aue: Laitishig! eit Gatinne:	
GWTief:		Leiféirigken GMA	
Petentio: Prioritéi		Standardanfangsbed.: Inhalt GW-Speicher:	1.00
Interception:	1.00		

Abb. 26: NASIM: Eingabemaske Eichparameter (Standardwerte)

Anfangszustände Boden:					
-	Der Bodenfeuchtegehalt war laut Standard auf 70 % der Feldkapazität eingestellt.				
-	Der Grundwasserspeicher war auf 20 mm Wasser eingestellt.				
Re	Retentionswerte (zeitliche Abflussverzögerung je Abflusskomponente):				
-	Retention Oberflächenabfluss:	5 Stunden.			
-	Retention Interflow:	50 Stunden.			
-	Retention Basisabfluss:	500 Stunden.			
Schneeschmelzrate für :					
-	Temperatur:	0,25 mm/h/Grad			
-	Strahlung:	0,25 mm/h/Grad			

Abb. 27: Standardparameter

Ergebnisse

Die Darstellung der Abflussganglinien erfolgte mit der Einheit m³/s. Zur Veranschaulichung wurden die entsprechenden Zeitreihen des Niederschlages in mm/h und der Verdunstung nach Haude in mm/d gegenübergestellt (Abb. 28, 29).



Abb. 28: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (15.06.1999 – 15.07.1999)



Abb. 29: Modellierter und gemessener Abfluss (m³/s) (15.06.1999 – 15.07.1999)

Die modellierte Abflussganglinie wies weniger prägnante Änderungen der Abflussmenge auf, als die gemessene Ganglinie. Die am 01. Juli sowie die um den 15. Juli 1999 gemessenen Abflussspitzen zeigten sich in der modellierten Abflussganglinie nicht. Die gemessenen Ereignisse am 19. Juni und am 07. Juli 1999 wurden in der modellierten Ganglinie nur in sehr abgeschwächter Form wiedergegeben. Das größte am 28. Juni 1999 gemessene Ereignis mit einer Abflussspitze von über 5 m³/s wurde in der modellierten Ganglinie zwar abgebildet, jedoch erreichte es mit einem Abfluss von ca. 2 m³/s nicht die gemessenen Dimensionen. Die faktischen Pegelreaktionen wurden durch das Modell nicht vollständig nachvollzogen. Die modellierte Abflussganglinie wies, vom Abflussereignis am 28. Juni 1999 abgesehen, einen zu gleichmäßigen und insgesamt überhöhten Abfluss auf.

5.5.2 Modellierungsdurchlauf mit optimierten Parametern

Der im Folgenden beschriebene Modellierungsdurchlauf wurde mit optimierten programminternen Eichwerten (Abb. 30) und mit den optimierten Parametern für den Anfangszustand Bodenfeuchte, die Retentionszeiten und die Schneeschmelze durchgeführt (Abb. 31).

Eichfaktoren für ausgewählte SE			
Niederschlag:	0.60	Verdunstung:	1.00
Versiegelung:	1.00	Boden:	
ab Vers.grad [%]:	0.00	Welkepunkt:	1.0000
Schnee:		Feldkapazität:	1.0000
Schmelzrate Temp.:	1.00	Gesamtporenvolumen:	0.8000
Schmelzrate Strahl.:	1.00	Max. Infiltration:	
Retentionen:		Horiz. Leitfähigkeit:	2.0000
Oberflächenabfluss:	0.08	Vertik. Leitfähigkeit für	
Interflow:	0.01	elle Schichten:	1.0000
Basisabfluss:	0.01	 Exfiltrationsschicht: 	
Versiegelte Fläche:	1.00	Gerinne:	
Teilgebiet:		Geschwindigkeit:	2.00
Hangrauhait		Pot. Gerinneversick.:	1.00
Fhe84cie		Aue:	
Leakage:		Laitishig) eit Gatione:	
GWTief:		Leifeirigken GM/:	
Platentici:		Standardanfangsbed.:	
Pecolist		Inhalt GW-Speicher:	0.01
Interception:	0.50		

Abb. 30: NASIM: Eingabemaske Eichparameter (optimierte Werte)

Anfangszustände Boden:

- Der Bodenfeuchtegehalt war auf 70 % der Feldkapazität eingestellt.
- Der Grundwasserspeicher war auf 20 mm Wasserinhalt eingestellt.

Retentionswerte (zeitliche Abflussverzögerung je Abflusskomponente):

- Retention Oberflächenabfluss:	2,5 Stunden.
- Retention Interflow:	25 Stunden.
- Retention Basisabfluss:	250 Stunden.
Schneeschmelzrate:	
- Temperatur:	0,25 mm/h/Grad
- Strahlung:	0,25 mm/h/Grad
U	

Abb. 31: Optimierte Parameter

Die Anpassung der Modell- und Eichparameter erfolgte während vielfacher Testläufe im Hinblick auf eine beschleunigte Abflussbildung und verbesserte Abbildung der Abflussspitzen durch das Modell (Vergleiche mit Abb. 26 und 27).

Ergebnisse

Die Gegenüberstellung der modellierten und gemessenen Abflussganglinie für den Zeitraum 15. Juni 1999 bis 15. Juli 1999 ist in den Abbildungen 32 und 33 dargestellt. Das den natürlichen Gegebenheiten angepasste Modell zeigt eine deutlich stärkere Variabilität der Abflussganglinie als die Modellierung mit Standardwerten. Die Abflussereignisse am 01. Juli und um den 15. Juli 1999 werden jetzt abgebildet. Die Pegelreaktionen der Ereignisse am 19. Juni und am 07. Juli 1999 sind deutlich stärker ausgeprägt. Sie übersteigen die gemessenen Abflüsse leicht. Zwischen dem 21. Juni und dem 27. Juni 1999 zeigt die modellierte Abflussganglinie Abflussspitzen, die in der Pegelmessung nicht existieren. Die Überhöhung und die Vergleichmäßigung des Abflusses sind deutlich reduziert. Besonderes Augenmerk wurde bei der Parametrisierung auf die möglichst naturgetreue Abbildung des Abflussereignisses vom 28. Juni 1999 gelegt. Das Modell zeigt mit ca. 6 m³/s annähernd den gleichen Wert wie die Pegelmessung.



Abb. 32: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (15.06.1999 – 15.07.1999)



Abb. 33: Modellierter und gemessener Abfluss (m³/s) (15.06.1999 – 15.07.1999)

5.6 Modellierung der Jahresperiode 01. April 1999 bis 31. März 2000

Im Vorfeld des Modellierungsdurchlaufes wurde wie schon für den Zeitraum 15. Juni bis 15. Juli 1999 die Zeitflächenfunktion laut den Empfehlungen des NASIM-HANDBUCHS (2003) angepasst. Der Entwässerungsbeginn der Flächen soll ebenfalls nach spätestens fünf Minuten erfolgt sein, im vorliegenden Fall beginnt die Entwässerung der Teilgebiete nach durchschnittlich vier Minuten.

5.6.1 Modellierungsdurchlauf mit Standardparametern

Der im Folgenden beschriebene Modellierungsdurchlauf wurde mit den Standardwerten für die programminternen Eichwerte (Abb. 26) und mit den Standardparametern für den Anfangszustand Bodenfeuchte, die Retentionszeiten und die Schneeschmelze durchgeführt (Abb. 27).

Ergebnisse

Zur Veranschaulichung der hydrologischen Vorgänge werden zusätzlich die Zeitreihen des Niederschlages in mm/h und der Verdunstung nach Haude in mm/d gezeigt. Die Abflussganglinien werden mit der Einheit m³/s dargestellt (Abb. 34, 35).

Das Ergebnis der Modellanwendung mit Standard-Parametern zeigt deutliche Unterschiede zur realen Abflussganglinie. In der Periode April und Mai 1999 liegt der modellierte Abfluss kontinuierlich auf sehr niedrigem Niveau unter der gemessenen Ganglinie. Das Abflussereignis vom 28. Juni 1999 wird durch das Modell abgebildet, jedoch erreicht der modellierte Spitzenabfluss mit ca. 2 m^3/s nicht den real gemessenen Abfluss von ca. 6 m^3/s . Die sich an den 28. Juni 1999 anschließenden kleineren Abflussereignisse werden durch das Modell nur in sehr abgeschwächter Form abgebildet. Das Abflussereignis um den 08. August 1999 wird durch die modellierte Ganglinie nicht wiedergegeben. Die sich anschließende Periode bis zum 15. Januar 2000 weist wenige Abflussspitzen auf, die in der modellierten Ganglinie in abgeschwächter und zeitlich verzögerter Form abgebildet werden. Der Zeitraum zwischen dem 15. Januar und dem 31. März 2000 zeigt eine Vielzahl von deutlichen Veränderungen der Abflussganglinie. Die Abflussereignisse am 18. Januar und 01. Februar 2000 sind auch in der modellierten Ganglinie zu finden, sie erreichen hier jedoch nicht die gemessenen Höhen. Der modellierte Pegelabfluss reduziert sich am Ende einer Abflussspitze nicht so zügig wie der gemessene Abfluss. Das größte Abflussereignis der Periode am 10. März 2000 erreicht eine Abflussspitze von 10,5 m³/s. Die modellierte Abflussganglinie zeigt zu diesem Zeitpunkt einen Anstieg des Abflusses von 0,6 auf 1,2 m³/s und bleibt somit weit unter der gemessenen Abflussspitze.



Abb. 34: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (01.04.1999 – 31.03.2000)



Abb. 35: Modellierter und gemessener Abfluss (m³/s) (01.04.1999 – 31.03.2000)

5.6.2 Modellierungsdurchlauf mit optimierten Parametern

Der im Folgenden beschriebene Modellierungsdurchlauf wurde mit optimierten programminternen Eichwerten (Abb. 36) und mit den optimierten Parametern für den Anfangszustand Bodenfeuchte, die Retentionszeiten und die Schneeschmelze durchgeführt (Abb. 37). Die genutzten Eichfaktoren unterscheiden sich von der Parametereinstellung für die 30-tägige Periode, da das Modell an die vielfältigen klimatischen Gegebenheiten der 365tägigen Modellierung angepasst werden musste (Vergleiche mit Abb. 30, 31).

Eichfaktoren für ausgewählte SE				
Niederschlag:	0.65	Verdunstung:	1.10	
Versiegelung:	1.00	Boden:		
ab Vers.grad [%]:	0.00	Welkepunkt:	1.0000	
Schnee:		Feldkapazität:	1.0000	
Schmelzrate Temp.:	0.10	Gesamtporenvolumen:	0.8500	
Schmelzrate Strahl.:	0.10	Max. Infiltration:	0.5000	
Retentionen:		Horiz. Leitfähigkeit:	2.0000	
Oberflächenabfluss:	0.08	Vertik. Leitfähigkeit für		
Interflow:	0.01	Ille Schichten:	1.0000	
Basisabfluss:	0.01	 Exfiltrationsschicht; 		
Versiegelte Fläche:	1.00	Gerinne:		
Teilgebiet:		Geschwindigkeit	2.00	
Hangrauhait		Pot. Gerinneversick.:	1.00	
FlieState		Aue:		
Leakage:	2.00	Laittéhiol eit Garinne:		
GWTief:		Leifelligken GM:		
Pletenitot:		Standardanfangsbed.:		
Pecosil6(Inhalt GW-Speicher:	0.30	
Interception:	0.50			

Abb. 36: NASIM: Eingabemaske Eichparameter (optimierte Werte)

Anfangszustände Boden: Der Bodenfeuchtegehalt war auf 70 % der Feldkapazität eingestellt. Der Grundwasserspeicher war auf 20 mm Wasserinhalt eingestellt. Retentionswerte (zeitliche Abflussverzögerung je Abflusskomponente): Retention Oberflächenabfluss: 2,5 Stunden. Retention Interflow: 25 Stunden. Retention Basisabfluss: 250 Stunden. Schneeschmelzrate: Temperatur: 0,25 mm/h/Grad Strahlung:

Abb. 37: Optimierte Parameter

Ergebnisse

Zur Veranschaulichung der hydrologischen Vorgänge werden zusätzlich die Zeitreihen des Niederschlages in mm/h und der Verdunstung nach Haude in mm/d gezeigt. Die Abflussganglinien werden mit der Einheit m³/s dargestellt (Abb. 38, 39).

Die modellierte Abflussganglinie liegt vom 01. April bis zum 15. Mai 1999 deutlich unter der gemessenen. Sie übertrifft die gemessene Ganglinie leicht während der Abflussereignisse am 16. und 22. Mai 1999 und fällt im Anschluss wieder unter die realen Werte.

Die modellierte Abflussganglinie zeigt während der Abflussereignisse im Juni und Juli 1999 Abflussspitzen, die leicht über den gemessenen Werten liegen, nur das Abflussereignis am 28. Juni 1999 wird mit 4,8 m³/s ca. 1 m³/s zu niedrig abgebildet. Das reale Abflussereignis zwischen dem 06. August und 09. August 1999 wird in der modellierten Abflussganglinie nicht abgebildet.

Die modellierte Abflussganglinie zeigt am 18. September 1999 eine deutlich niedrigere Abflussspitze als die gemessene. In der sich anschließenden Periode zwischen dem 01. Oktober und dem 15. Dezember 1999 kommt es wiederholt zu kleineren Abflussspitzen, die im Modell etwas überhöht abgebildet werden.

Ab dem 18. Januar 2000 bis zum Ende des untersuchten Zeitraumes treten gemessene Abflüsse stark wechselnder Intensität auf. Die modellierte Abflussganglinie zeigt während der Periode vom 18. Januar bis 01. Februar 2000 keine Veränderung des Abflusses auf sehr niedrigem Niveau. Das Modell zeigt hier Abflüsse von ca. 0,005 m³/s, während die gemessenen Abflüsse bei ca. 0,2 m³/s liegen.

Ab dem 01. Februar 2000 steigt die modellierte Abflussganglinie deutlich und erreicht am 07. Februar und 09. Februar 2000 Spitzen, die die gemessene Ganglinie mit 3,4 m³/s bzw. $4,2 \text{ m}^3$ /s um ca. 2 m^3 /s bzw. 1 m^3 /s übertreffen. Im Anschluss an dieses Ereignis fällt die modellierte wieder unter die gemessene Ganglinie ab und übertrifft sie erst wieder während des Abflussereignisses vom 01. März 2000 leicht.

Im Vorfeld der Abflussspitze vom 10. März 2000 liegt die modellierte Abflussganglinie wieder unter der gemessenen, steigt dann mit mehrstündiger Verspätung parallel an und erreicht zeitgleich mit der realen Abflussspitze den Abfluss von ca. 10,5 m³/s.

Im Anschluss an dieses Ereignis fällt die modellierte dann wieder unter die gemessene Ganglinie ab und zeigt während der restlichen Untersuchungsperiode am 12., 15., 25., 27. und 30. März 2000 Abflussspitzen, die jedoch leicht unter den gemessenen Spitzen liegen.



Abb. 38: Niederschlag (mm/h) und Verdunstung (mm/d) (01.04.1999 – 31.03.2000)



Abb. 39: Modellierter und gemessener Abfluss (m³/s) (01.04.1999 – 31.03.2000)

Die jeweils für die 30- und 365-tägigen Modellierungsläufe optimierten Eichparameter unterscheiden sich in Bezug auf die Werte für den Niederschlag, die Verdunstung, das Gesamtporenvolumen des Bodens und die Standardanfangsbedingungen für die Bodenfeuchte (Vergleiche Abb. 30, 31 und 36, 37). Im Zuge der Ausdehnung des Simulationszeitraumes von der 30-tägigen auf die 365-tägige Periode war diese Anpassung notwendig, um eine gute Abbildung der hydrologischen Gegebenheiten der Jahresperiode in Bezug auf die Abflussspitzen, Trockenwetterabflüsse und die Abflussganglinie zu Beginn des Simulationszeitraumes zu erreichen.

5.7 Zusammenfassung

Im Zuge der Erstellung des NASIM-Modells wurden verschiedene Zwischenergebnisse erarbeitet, die eine Visualisierung einzelner Schritte bei der Modellerstellung erlauben. Die sich anschließende Modellierung der ausgewählten Untersuchungsperioden führte zur graphischen Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Ganglinien. Die qualitative Bewertung der Ergebnisse der Modellierung wird Erkenntnisse über die Anwendbarkeit des Programms im betreffenden Raum-Zeit-Gefüge erbringen.

6. DISKUSSION UND BEWERTUNG DER MODELLIERUNG

Die Diskussion teilt sich einerseits in die Bewertung der Ergebnisse der Modellierungsläufe der Monats- und Jahresperiode und in die Beurteilung der Modellierungsgrundlagen und Modellabläufe.

6.1 Güte der Modellparameter

In Bezug auf die Qualität der in die Modellierung eingehenden Parameter und ihre Verarbeitung innerhalb des Modells wurden einige Problembereiche sichtbar.

6.1.1 Meteorologische Messreihen

Da sich im Untersuchungsgebiet keine meteorologische Messstation befindet, wurden zur Erstellung der Zeitreihen für Niederschlag, Temperatur und Verdunstung die Daten der 2,5 km vom Untersuchungsgebietszentrum entfernten Station Zinnwald-Georgenfeld genutzt. In Zinnwald-Georgenfeld werden 10-minütliche Zeitreihen für Niederschlag und Temperatur erfasst. Obwohl die Station nur 800 m von der Untersuchungsgebietsgrenze entfernt liegt, führt die Beschränkung auf die Daten einer Messstelle zwangsläufig zu Ungenauigkeiten bei der modellhaften Verteilung der Niederschläge über das Untersuchungsgebiet. Insbesondere auf kleine Flächen beschränkte konvektive Niederschlagsereignisse werden nur unzureichend im Niederschlagsaufkommen des Gesamtgebietes berücksichtigt. Daher kann es, vor allem im Sommer, durch die Übertragung der Niederschlagswerte der Station Zinnwald-Georgenfeld auf das gesamte Untersuchungsgebiet, zu einer unzureichenden Abbildung der realen Vorgänge kommen.

Weitere meteorologische Stationen befinden sich in Altenberg, Ortsteil Kipsdorf, und in Rechenberg-Bienenmühle in einer Entfernung von ca. 7 km zum Untersuchungsgebiet. Hier werden, wie auch in der 10 km vom Untersuchungsgebiet entfernten tschechischen Station Cesky Jiretin, nur tägliche Messwerte erfasst.

Aufgrund der großen Entfernung zum Untersuchungsgebiet und der unterschiedlichen orographischen Situation der Stationen, vor allem aber aufgrund der zeitlich nicht hoch genug aufgelösten Daten wurde von einer Nutzung dieser Zeitreihen abgesehen.

6.1.2 Böhmischer Nebel

In den Kammlagen des Erzgebirges kommt es häufig zu Nebelbildung, dem sog. "Böhmischen Nebel" (Kap. 2.4.4). Insbesondere die Nebellagen im Winter führen zu bedeutenden
Interzeptionsgewinnen in Form zentimeterstarker Raureifablagerungen an den Nadelbäumen, die während Auftauperioden abtropfen und dem Boden zugeführt werden (METEO-ROLOGISCHER DIENST DER DDR 1987, HAAKE&KÖRBER 1973).

Dieser Wasserzugewinn des Bodens beträgt in den Kammwäldern des Erzgebirges 20-40 % des Freilandniederschlages (WOHLRAB et al. 1992) und kann nur ungenügend mit Hilfe von Niederschlagserfassungsgeräten gemessen werden.

Dies führt zu beträchtlichen Informationslücken bei der Berechnung des Niederschlages im Untersuchungsgebiet.

6.1.3 Böden

Die hydrologischen Parameter der Böden beeinflussen sowohl die Belastungsaufteilung mit Versickerung, Verdunstung und Abfluss als auch die Abflusskonzentration mit Oberflächen-, Zwischen- und Basisabfluss (NASIM-HANDBUCH 2003). Insbesondere die Mächtigkeit der Böden, ihre Schichtung und die vorhandenen Bodenarten sind für die Modellerstellung von zentraler Bedeutung. Informationen über die Verteilung und den Aufbau der Böden im Modell wurden in erster Linie durch Karteninterpretation gewonnen. Für den deutschen Flächenanteil des Untersuchungsgebietes lieferten Forststationierungskarten des Forstamtes Bärenfels die notwendigen Informationen. Die Bodeninformationen über den tschechischen Flächenanteil wurden aufgrund der Interpretation einer tschechischen Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 und einer geologischen Karte 1:50.000 aus dem Jahr 1906, sowie durch Übertragung der Informationen von deutscher Seite, gewonnen. Auf den Karten sind weder vorhandene Bodenarten noch Bodenmächtigkeiten verzeichnet. Zusätzliche Informationen über die pedologische Beschaffenheit des Untersuchungsgebietes wurden mit vier Grabungen und drei Sondierungen am 19. Mai 2004 gewonnen. Die große Variabilität der Bodenarten und Bodenmächtigkeiten des Untersuchungsgebietes konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig dargestellt werden.

6.1.4 Auftauprozesse

Die Schneeschmelze, insbesondere die Auftauprozesse im Frühjahr, stellen im Untersuchungsgebiet einen wichtigen Beitrag zur Abflussbildung dar. Innerhalb des NASIM-Modells wird die Modellierung der Auftauprozesse nach dem kombinierten Temperatur-Faktor/Snow-Compaction-Verfahren berechnet (NASIM-HANDBUCH 2003).

Hierbei werden die Auftauprozesse durch Strahlung und Lufttemperatur gesteuert. Jedoch geht die Temperatur des Bodens in die Berechnung nicht ein. Durch einen gefrorenen Untergrund werden die Tauprozesse des aufliegenden Schnees verlangsamt. Nachdem die Schneedecke abgeschmolzen ist, taut der Boden auf, so dass eine langsame und kontinuierliche Freisetzung des im Boden gebundenen Wassers erfolgt, die zu einem gleichmäßigen und anhaltenden Abfluss auf höherem Niveau führt. Dieser Prozess konnte mit Hilfe des Modells nicht nachgebildet werden.

6.1.5 Moore

Durch Grabenentwässerung trocken gelegte Moore und die sie umgebenden Bereiche nehmen eine Fläche von ca. 1,5 km² des Untersuchungsgebietes ein (EIGENE MES-SUNG). Die Entwässerung durch Gräben erfolgte ab etwa 1800, um die Flächen forstwirtschaftlich nutzen zu können. Die Grabensysteme wurden zwar im Modell vollständig berücksichtigt (Kap. 5.2.1), über die Torfmächtigkeiten und weitere hydrologische Parameter der ehemaligen Moorflächen lagen jedoch keine Informationen vor, so dass ihr Beitrag zur Abflussbildung nur auf Basis von Schätzungen wiedergegeben werden konnte.

6.1.6 Vegetation und Landnutzung

Die Art der Landnutzung und die vorhandene Vegetation haben einen wichtigen Einfluss auf das Abflussgeschehen. Etwa 90 % der Fläche des Untersuchungsgebietes werden forstwirtschaftlich genutzt, ca. 10 % werden als Grünland bewirtschaftet. Die Siedlungsflächen nehmen mit einem Anteil von unter einem Prozent eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Abflussgeschehen ein (EIGENE MESSUNG).

Auf den forstwirtschaftlichen Flächen werden Fichten, Lärchen, Kiefern, Blaufichten, Birken und Buchen angetroffen (Kap. 2.4.2). Große Flächen des Untersuchungsgebietes waren vom Waldsterben der 70er und 80er Jahre betroffen und werden auf der tschechischen Seite wieder mit Fichtensetzlingen aufgeforstet (EIGENE BEOBACHTUNG). Die Forstflächenanteile der Baumarten, ihre Verteilung über das Untersuchungsgebiet und ihre Altersstruktur lagen nicht vor und konnten im Rahmen der Erstellung der Diplomarbeit nicht erhoben werden. Dadurch gehen in die Modellerstellung Informationen zur Vegetation und Landnutzung auf Basis von Schätzungen über die räumliche Verteilung von Interzeptionswerten und Durchwurzelungstiefen ein.

6.1.7 Geländemodell

Als Grundlage für die Berechnung der Zeitflächenfunktion war die Erstellung eines digitalen Höhenmodells notwendig. Dabei wurden auf Grundlage der topographischen deutschen und tschechischen Karten im Maßstab 1:25.000 die vorhandenen 5m-Höhenlinien digitalisiert. Dieser Abstand führte zur unzureichenden Abbildung der kleinräumigen Geländestrukturen im Höhenmodell. So wurden beispielsweise Mulden, die eine Abflussretention bewirken würden, nicht modellhaft nachgebildet und ihre abflussverzögernde Wirkung konnte nicht in die Zeitflächenfunktion eingehen. Dies führte zu zeitlichen Ungenauigkeiten der Modellergebnisse von Abflusswellen.

6.1.8 Zeitflächenfunktion

Die Zeitflächenfunktion liefert Informationen über den zeitlichen und räumlichen Verlauf der Entwässerung einer Fläche an das NASIM-Modell. Sie kann mit Hilfe der ArcView-Erweiterung "ZEITFLÄCHENFUNKTION" auf Basis des digitalen Höhenmodells erstellt werden. Der Beginn der Entwässerung der Fläche sollte nach einer Laufzeit von höchstens fünf Minuten erfolgt sein und nicht mehr als drei zehnminütige Intensitätslücken aufweisen (DOKUMENTATION ZEITFLÄCHENFUNKTION 2002).

Über diese Prüfroutinen hinausgehend besteht nicht die Möglichkeit, die erstellte Zeitflächenfunktion auf Plausibilität und Qualität zu prüfen.

6.1.9 Gerinnegeometrie

Durch den Einfluss der Gerinnegeometrie und der Rauigkeitsbeiwerte erfährt die Abflusswelle eine Translation, d.h. sie wird verformt. Dadurch werden die Abflusszeit und die Abflusshöhe verändert. Dieser Vorgang hat einen entscheidenden Einfluss auf die zeitlich korrekte modellhafte Abbildung der Hochwasserganglinien.

Die Gerinnegeometrie mit den zugehörigen Rauigkeitsbeiwerten wird für jedes Teilgebiet innerhalb des Modells bestimmt. Geometrie und Rauigkeitsbeiwerte eines Gerinnes sind in der Regel sehr variabel (SCHULTE 1995), so dass die Festlegung eines repräsentativen Gerinnequerprofils je Teilgebiet problematisch ist und zu Ungenauigkeiten bei der Modellierung des zeitlichen Ablaufes von Abflusswellen in veränderlichen Gerinnen führen muss.

6.2 Diskussion der Modellierungsergebnisse 15. Juni bis 15. Juli 1999

In dieser Diskussion werden die Ergebnisse der Monatsperiode Juni-Juli 1999 bewertet. Für diesen Zeitraum sind zwei Modellierungsläufe durchgeführt worden. Der erste mit den modellseitig vorbesetzten Standard-Parametern und der zweite mit den durch Versuchsreihen optimierten Parameterwerten.

6.2.1 Modellierungslauf mit Standard-Parametern

Dieser Modellierungslauf gibt die hydrologischen Prozesse unzureichend wieder. Auffällig ist die im Vergleich zur gemessenen Ganglinie extrem verzögerte Darstellung der Abflusskonzentration durch die modellierte Ganglinie. Auch die Abflussspitzen werden nicht in ausreichender Weise abgebildet. Besonders deutlich wird die Diskrepanz zwischen Modell und Wirklichkeit für das Abflussereignis am 28. Juni 1999, bei dem modellierte $2 \text{ m}^3/\text{s}$ einem gemessenen Abfluss von ca. $6 \text{ m}^3/\text{s}$ gegenüberstehen.

Das verzögerte Ansprechen des Modells auf Niederschlagsereignisse und die unzureichende Reduktion des Pegels nach Niederschlagsereignissen können auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sein.

Analyse der modellierten Ganglinie

- Die modellierte Wasserspeicherfähigkeit des Bodens scheint die realen Werte zu übertreffen.
- Die zu hohen Interzeptionswerte im Modell reduzieren den Effektivniederschlag unzulässig stark.
- Die Retentionswirkung durch den Oberflächen-, den Zwischen- und den Basisabfluss ist im Modell offenbar zu groß.
- Das Infiltrationsvermögen des Bodens ist im Modell zu groß abgebildet.
- Die horizontale Wasserleitfähigkeit des Bodens ist im Modell zu gering.
- Die Kapazität zur Wasserabführung innerhalb der Gerinne ist im Modell zu klein.
- Die Abflusskapazität des dichten Netzes der Entwässerungsgräben auf den alten Moorstandorten geht nicht in ausreichendem Maße ins Modell ein.

6.2.2 Modellierungslauf mit optimierten Parametern

Der Modellierungslauf mit optimierten Parametern gibt die Abflussprozesse erheblich genauer wieder als der Lauf mit Standardwerten. Die in Kap. 7.2.1 genannten potentiellen Fehlerquellen bei der Modellierung mittels Standard-Parametern wurden durch Eichung ausgeräumt. Besonderes Augenmerk wurde bei der Anpassung der Parameter auf die wirklichkeitsnahe Modellierung des Spitzenabflusses am 28. Juni 1999 gelegt. So wurden insbesondere Parameter durch Eichung angepasst, die eine Abflussbeschleunigung bewirken.

Die Werte für die Retention des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses wurden jeweils halbiert und durch entsprechende Eichparameter weiter reduziert.

Der Wert für die Interzeption im Modell wurde durch Eichung verringert, der Gerinneabfluss beschleunigt.

Von entscheidender Bedeutung für die Beschleunigung des Abflussvorganges im Modell war die Herabsetzung des Gesamtporenvolumens des Bodens mittels Eichung. Erst diese Maßnahme führte zum schnellen Abfallen der modellierten Pegelganglinie nach Abflussspitzen.

Analyse der modellierten Ganglinie

- Der durch die Modellierungsanfangsbedingungen bestimmte Grundwassergehalt wird während des 15. Juni abgeführt und lässt die Pegelganglinie bis zum 18. Juni deutlich unter die gemessene Pegelganglinie abfallen. Der Grund könnte in zu geringer Retention und einem zu geringen Porenvolumen des Modells zu suchen sein, jedoch deuten die Modellierungsereignisse der restlichen Periode nicht auf diese Gründe hin. Hier ist weiterhin Klärungsbedarf vorhanden.
- Das Abflussereignis vom 19. Juni wird in der modellierten Ganglinie zeitlich sehr gut abgebildet, es erreicht allerdings mit 2 m³/s zu real gemessenen 1,5 m³/s eine überhöhte Spitze, die offenbar auf zu geringe Retention des Oberflächen- und Zwischenabflusses im Modell zurückzuführen ist.
- Der schwächere Rückgang der modellierten Ganglinie im Vergleich zur realen nach dem 19. Juni und die sich anschließenden kleinen Abflussspitzen deuten auf eine zu geringe Retentionszeit des Zwischen- und Basisabflusses hin. Außerdem kann hier eine Überbewertung des Niederschlages vorliegen. Möglicherweise ist zwischen dem 19. und 28. Juni in Zinnwald-Georgenfeld erheblich mehr Niederschlag gefallen als über dem Untersuchungsgebiet.
- Das Hochwasserereignis vom 28. Juni ist modellhaft sehr gut nachgebildet. Sowohl die Höhe der Abflussspitze als auch ihr zeitlicher Verlauf entsprechen weitgehend den natürlichen Gegebenheiten.
- Im Vorfeld der Abflussspitze vom 01. Juli liegt die modellierte Abflussganglinie leicht unter der gemessenen.
- Das Abflussereignis vom 07. Juli wird zeitgenau abgebildet, jedoch übertrifft die modellierte Abflussspitze mit 2,2 m³/s die gemessene mit 1,1 m³/s kurzzeitig um 100 %. Gründe dafür können eine zu schwache Retentionszeit für den Oberflächenabfluss und ein zu geringes Porenvolumen des Bodens sein. Auch ein zu niedriger Interzeptionswert der Vegetation kann vorliegen. Eine weitere Erklärung dieses Sachverhalts könnte eine erhebliche Abweichung der Niederschlagsmengen zwischen der Station Zinnwald-Georgenfeld und dem Untersuchungsgebiet sein.
- Zwischen dem 9. und dem 13. Juli verlaufen die konstant abfallenden realen und modellierten Pegelganglinien fast identisch. Dies deutet auf eine gute Abstimmung von Retentionszeiten und Gesamtporenvolumen im Modell hin.
- Wie schon bei der Abflussspitze am 7. Juli wird auch die modellierte Abflussspitze am 13. Juli mit 1,6 m³/s um etwa 100 % zu hoch dargestellt. Auch hier könnte der Grund in

einer ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung des Raumes und dem Wechselspiel einer ungenügenden Retention des Oberflächenabflusses mit einem zu geringen Porenvolumen des Bodens zu suchen sein.

 Das sich am 14. Juli anschließende Abflussereignis wird in der Modellierung nur gering überhöht dargestellt, auffällig ist hier aber die zeitliche Verzögerung der modellierten Abflussspitze um ca. vier Stunden. Diese zeitliche Diskrepanz könnte in der Zugrichtung des Niederschlagsgebietes von Osten nach Westen, also von Zinnwald-Georgenfeld in Richtung auf das Untersuchungsgebiet begründet sein.

Insbesondere die Anpassung der Bodenparameter für Retention und Gesamtporenvolumen führte zu erheblich stärker den natürlichen Gegebenheiten entsprechenden Modellierungsergebnissen.

Diese Modellierung ist mit dem Fokus auf die Abbildung von Hochwasserereignissen durchgeführt worden und konnte nach Optimierung der eingehenden Parameter die reale Abflussganglinie gut abbilden. Es kommt in der Periode zwar wiederholt zu Abweichungen der modellierten von den realen Gegebenheiten, es ist jedoch gelungen, alle gemessenen Abflussspitzen realitätsnah abzubilden und so eine Grundlage für die Abbildung der großen Variabilität des Abflusses in vergleichbaren Perioden zu schaffen.

6.3 Diskussion der Modellierungsergebnisse 01. April 1999 bis 31. März 2000

Die Modellierung des Zeitraumes April 1999 bis März 2000 wurde einerseits unter Verwendung der modellseitigen Standard-Parameter und andererseits mit durch Versuchsreihen optimierten Parametern durchgeführt.

6.3.1 Modellierungslauf mit Standard-Parametern

Der Modellierungslauf gibt die hydrologischen Prozesse sehr unzureichend wieder. Besonders auffällig ist die mangelhafte Abbildung der Abflussspitzen im Modell. Wird die modellierte Abflussspitze vom 27. Juni 1999, wenn auch nicht in ausreichendem Maße, noch deutlich, so führen Schneeschmelze und Niederschlag am 9. März 2000 nur zu einer Steigerung des Abflusses auf etwa 1,5 m³/s während die gemessene Abflussganglinie einen Wert von 10,5 m³/s aufweist.

Die Niederschläge führen im Modell jeweils zu einer moderaten Steigerung des Abflusses, an die sich ein kontinuierlicher und langsamer Rückgang des Abflusses anschließt. Insbesondere die gemessenen schnellen Rückgänge nach Abflussspitzen werden im Modell nicht realitätsnah abgebildet und führen zu überhöhten Abflusswerten in den sich anschließenden Perioden.

Die ungenaue Abbildung der Abflussereignisse durch das Modell kann auf eine Vielzahl von Faktoren zurückgeführt werden, die im weiteren Verlauf erläutert werden sollen:

Analyse der modellierten Ganglinie

- In der Periode vom 01. April bis 10. Mai 1999 gehen die gemessenen Abflüsse fast kontinuierlich von 1,2 m³/s auf 0,15 m³/s zurück. Die modellierte Ganglinie weist im gleichen Zeitraum einen kontinuierlichen Abfluss von etwa 0,1 m³/s auf. Der hohe Feuchtegehalt des Bodens zum Beginn der modellierten Periode scheint im Modell nicht ausreichend berücksichtigt worden zu sein. Weiterhin kann es sein, dass zum Periodenbeginn noch Reste von Schneedecken im Untersuchungsgebiet existierten, die dann kontinuierlich abschmolzen. Dies scheint jedoch in Anbetracht einer vorhergehenden wärmeren Periode mit Werten über dem Gefrierpunkt und einer Lufttemperatur von +5 - +10°C im betreffenden Zeitraum eher unwahrscheinlich, da diese hohen Temperaturen ein sehr schnelles Abschmelzen der Schneedecke zur Folge gehabt hätten.
- Die Niederschläge im Zeitraum zwischen dem 08. und 22. Mai 1999 führen zu einem andauernden Anstieg des modellierten Abflusses. Die kleinen gemessenen Abflussspitzen im Bereich von ca. 0,3 m³/s werden nicht abgebildet. Dies deutet auf ein zu hohes Gesamtporenvolumen des Bodens im Modell hin, das durch die Niederschläge aufgefüllt wird und über eine leichte Steigerung des Basisabflusses abgeführt wird.
- In der Periode zwischen dem 22. Mai und dem 18. Juni 1999 entspricht die modellierte weitgehend der gemessenen Ganglinie. In diesem Zeitraum tritt wiederholt Niederschlag geringer Ergiebigkeit auf.
- Im Zeitraum zwischen dem 18. Juni und dem 15. Juli 1999 kommt es wiederholt zu Niederschlägen von z.T. hoher Intensität. Die entsprechenden gemessenen Reaktionen des Pegels werden im Modell nur sehr unzureichend abgebildet und führen vorrangig zur Anhebung des modellierten Abflusses auf ein höheres Niveau. Nur das Abflussereignis am 27. Juni und eingeschränkt auch das Ereignis am 07. Juli 1999 führen zu einer Abflussspitze in der modellierten Ganglinie. Als mögliche Gründe für diese Diskrepanz zwischen Modell und Realität können folgende Gründe angeführt werden: Eine zu große Retentionszeit der Abflusskomponenten im Modell, ein zu hoher Interzeptionswert der Vegetation, ein zu großes Gesamtporenvolumen des Bodens, eine zu hohe Infiltrationsrate, eine zu geringe horizontale Leitfähigkeit der Bodenschichten und auch

mögliche Differenzen zwischen der Niederschlagsmenge in Zinnwald-Georgenfeld und dem Untersuchungsgebiet.

- In der Periode zwischen dem 6. und 8. August 1999 kommt es zu einem gemessenen Abflussereignis in der Größe von 1,7 m³/s, das sich in der modellierten Ganglinie in keiner Weise zeigt. Die Form der Abflussganglinie mit ihrem steilen Anstieg und steilen Abfall und der Umstand, dass in der betreffenden Periode und ihrem Vorfeld keine nennenswerten Niederschläge gefallen sind, deutet darauf hin, dass dieses Abflussereignis anthropogen induziert wurde. So wäre es beispielsweise einerseits möglich, dass es sich um einen Messfehler handelt, andererseits wäre es denkbar, dass das abfließende Wasser aus einem Entleerungsvorgang des Schwarzen Teiches, eines Wasserreservoirs im Oberlauf des Großen Warmbachs, stammt.
- In der Zeit zwischen dem 16. Juli und dem 15. September 1999 kommt es aufgrund von geringen Niederschlagsmengen und hoher Verdunstung zu einem stetigen Rückgang beider Pegelganglinien. Die modellierte Ganglinie liegt dabei permanent deutlich oberhalb der gemessenen. Dies kann auf zu geringe errechnete Werte der potentiellen Evapotranspiration, ein zu großes Gesamtporenvolumen des Bodens und eingeschränkt auch auf eine zu große Retentionszeit des Basisabflusses zurückgeführt werden.
- Die gemessene Abflussspitze am 18. September ist in der modellierten Ganglinie vorhanden, weist aber mit 0,35 m³/s nur ein Viertel des gemessenen Abflusses auf. Der Retentionswert für den Oberflächenabfluss, die Infiltrationsrate und das Gesamtporenvolumen des Bodens könnten Gründe für die unzureichende Abbildung der realen Abflussspitze sein.
- Die Niederschlagsereignisse am 10. Oktober und zwischen dem 10. und 14. November werden in der modellierten Ganglinie als gleichmäßige Pegelanstiege abgebildet. Die realen Abflussspitzen treten nicht hervor. Gründe dafür können wieder das zu große Gesamtporenvolumen des Bodens im Modell, eine zu geringe hydraulische Leitfähigkeit der Böden sowie zu große Retentionszeiten für den Basisabfluss sein.
- Der sich anschließende Zeitraum bis zum 18. Januar 2000 ist sowohl im Modell als auch in der gemessenen Ganglinie durch gleichmäßige Abflüsse auf einem Niveau von etwa 0,15 m³/s geprägt. Ab dem 15. Dezember hat sich aufgrund der Temperaturen eine Schneedecke bilden können, die das Niederschlagswasser zurückhalten konnte. Dieser Prozess wird im Modell gut nachgebildet.
- Am 29. Januar beginnt eine Periode, die bis zum 31. März 2000 andauert und durch wiederholte und kräftige Abflussganglinienschwankungen gekennzeichnet ist. Die ge-

messenen Pegelspitzen werden durch die modellierte Ganglinie nur sehr unzureichend nachgebildet. Nur die Ereignisse am 18. und 31. Januar und am 9. März, die jeweils den Beginn von Tauwetterperioden markieren, zeigen Auswirkungen auf die Pegelganglinie des Modells. Dabei kommt es in der modellierten Ganglinie zu abrupten Pegelanstiegen, der sich real anschließende Pegelrückgang wird nicht abgebildet. Die modellierte Ganglinie fällt nach den Abflussspitzen, die deutlich zu niedrig ausfallen, kontinuierlich wieder ab. Der Spitzenabfluss, der am 9. März mit 10,5 m³/s gemessen wurde, wird in der modellierten Ganglinie mit nur 1,3 m³/s wiedergegeben. Die Gründe sind vermutlich in zu großen Retentionszeiten und einem zu großen Gesamtporenvolumen des Bodens im Modell zu suchen. Denkbar wäre aber auch, dass das Modell die durch Frost versiegelte Bodenoberfläche nicht abbilden kann. Das Modell bildet hingegen die Pegelreaktion auf Schneeschmelzvorgänge zeitgenau ab.

6.3.2 Modellierungslauf mit optimierten Parametern

Der Modellierungslauf mit optimierten Parametern bildet die Schwankungen der gemessenen Pegelganglinie erheblich besser ab, als der Modellierungslauf mit Standard-Parametern. Insbesondere die Abflussspitzen und der sich jeweils anschließende Rückgang der Ganglinie entsprechen erheblich besser den gemessenen Werten. Dies trifft vor allem für die beiden Hochwasserspitzen am 27. Juni 1999 und 9. März 2000 zu. Erreicht wurde diese Anpassung durch die Verkürzung der Retentionszeiten, eine Unterbewertung des Niederschlages, eine Eichung der Retention im Sinne beschleunigter Abflussbildung, verringerte Interzeptionswerte der Vegetation, ein reduziertes Gesamtporenvolumen und eine erhöhte horizontale Leitfähigkeit der Böden. Wenn auch die Anpassung des Modells im Sinne der verbesserten Abbildung von Hochwasserereignissen gelungen ist, so gibt es im Untersuchungszeitraum doch verschiedene Abflusstituationen, die nicht in zufriedenstellender Weise wiedergegeben werden. Hierfür können verschiedene Gründe angeführt werden.

Analyse der modellierten Ganglinie

In der Periode zwischen dem 1. April und dem 15. Mai sank der gemessene Abflusspegel von 1,27 m³/s fast kontinuierlich auf einen Wert von 0,15 m³/s. Dieser Prozess ist vermutlich durch die Mobilisierung des im auftauenden Boden freiwerdenden Wassers zu erklären und kann im Modell nicht nachgebildet werden. Daher wurde im Modell die im Boden befindliche Anfangsfeuchte sehr schnell freigesetzt und erzeugte kurzfristig sehr hohe Pegelstände von über 30 m³/s. Zur Reduktion dieser Abflussspitze wurde der Eichfaktor für die Bodenanfangsfeuchte drastisch reduziert. Dies hatte zur Folge, dass die vom Modell erzeugte Pegelganglinie in der genannten Periode fast den Wert Null annahm.

- Die durch das Modell erzeugten Pegelspitzen am 15. und 22. Mai 1999 sind auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen, die aufgrund der Eichung des Modells sehr schnell in Abfluss transformiert worden sind. Für diese hydrologische Situation sind die Retentionszeiten zu kurz, das Gesamtporenvolumen zu gering und die horizontale Leitfähigkeit des Bodens zu hoch.
- Das reale Abflussgeschehen zwischen dem 18. Juni und dem 17. Juli 1999 ist im Modell annähernd so zutreffend abgebildet wie in der Modellierung dieser Monatsperiode. Die Pegelanstiege und –rückgänge werden zeitgenau und in der realen Größenordnung wiedergeben. Erreicht wurde dieses Ziel in erster Linie durch die Reduktion der Retentionszeiten, des Gesamtporenvolumens und der Infiltrationsrate des Bodens. Durch die Konzentration auf die korrekte Abbildung des Abflussereignisses am 9. März 2000 wurden die Eichparameter in einer Weise angepasst, die dazu führte, dass die Abflussspitze am 27. Juni 1999 in der modellierten Ganglinie etwa 1 m³/s zu niedrig ausfällt.
- Wie schon in der Modellierung mit Standard-Parametern ist auch bei diesem Modellierungslauf das Abflussereignis zwischen dem 6. und 8. August 1999 nur durch einen Messfehler oder das Ablassen von Wasser aus dem schwarzen Teich zu erklären, da kein nennenswerter Niederschlag in der betreffenden Periode gefallen ist.
- Der sich anschließende Zeitraum bis zum 18. September ist gekennzeichnet durch geringe modellierte und gemessene Abflüsse. Die modellhafte Abbildung dieser durch geringe Niederschläge und eine hohe potentielle Evapotranspiration geprägte Periode stimmt gut mit den gemessenen Abflüssen überein.
- Das Abflussereignis vom 18. September wird durch das Modell nur unzureichend abgebildet. Den gemessenen 1,5 m³/s stehen modellierte 0,35 m³/s gegenüber. Hier sind zwei Erklärungsansätze anzuführen: Einerseits kann die gefallene Niederschlagsmenge an der Station Zinnwald-Georgenfeld und im Untersuchungsgebiet unterschiedlich hoch gewesen sein, andererseits fehlen im Vorfeld des Ereignisses in der Niederschlagszeitreihe die Daten von fünf Tagen. Falls in diesem Zeitraum Niederschlag gefallen sein sollte, kann er nicht modellhaft erfasst werden.
- Die Periode vom 20. September bis zum 15. Dezember 1999 ist durch geringe und wenig veränderliche Abflussmengen gekennzeichnet. Die modellierte Ganglinie kann die

gemessenen Abflüsse gut nachvollziehen, wenngleich sie leicht über den realen Werten liegt.

- Der Zeitraum vom 16. Dezember 1999 bis zum 17. Januar 2000 fällt in eine Kälteperiode und weist geringe kontinuierliche Pegelstände auf. Die modellierte Ganglinie liegt leicht unterhalb der gemessenen, bildet diese aber gut ab.
- Vom 19. bis 27. Januar weist die gemessene Pegelganglinie mehrfach wechselnde Abflüsse in der Größenordnung um 1 m³/s auf, die in der modellierten Ganglinie nicht nachvollzogen werden. In diesem Zeitraum fallen wiederholt Niederschläge, jedoch liegt die Temperatur andauernd deutlich unter dem Gefrierpunkt, so dass nicht geklärt werden konnte, wie der mit großer Sicherheit als Schnee gefallene Niederschlag den Abfluss erhöhen konnte.
- Die modellhafte Abbildung der Abflussvorgänge zwischen dem 30. Januar und dem 10. Februar 2000 gelingt nur unzureichend. Die offenbar durch Tauwetter ausgelöste Schneeschmelze führt zu einem deutlichen Anstieg der gemessenen Ganglinie, die vom Modell erst um zwei Tage verspätet nachvollzogen und dann überhöht dargestellt wird. Hier könnte eine weitere Anpassung der die Schneeschmelzvorgänge steuernden Parameter Abhilfe schaffen, die im Vorfeld auf die Belange der Abflussspitze vom 9. März angepasst wurden.
- Das Abflussereignis am 9. März kann durch das Modell sehr gut abgebildet werden.
 Sowohl der Zeitpunkt des Eintretens als auch die Abflusshöhe der Abflussspitze werden präzise bestimmt, allerdings wurde bei der Eichung des Modells auch das Hauptaugenmerk auf die korrekte Abbildung dieses Ereignisses gelegt.
- Bis Ende März kommt es mehrfach zu deutlichen Abflusspegeländerungen, die von der modellierten Ganglinie nur bedingt nachvollzogen werden. Einerseits ist auffällig, dass der Abfall der Pegelganglinie nach einer Abflussspitze modellhaft sehr schnell nachvollzogen wird und dann zu einer Unterschreitung der gemessenen Ganglinie führt. Dieser Umstand ist durch die verringerten Retentionszeiten der Abflusskomponenten und das verringerte Gesamtporenvolumen zu erklären.

6.4 Zusammenfassung

Die im Rahmen der Eichung als Schwerpunkte bearbeiteten Themenbereiche geben einen Hinweis auf die Schwachstellen des Modells. Der starke Anpassungsbedarf der Bodenparameter deutet auf Defizite bezüglich pedologischer Informationen hin. Zur korrekten Einschätzung des Retentionspotentials, der Infiltration, des Gesamtporenvolumens und hydraulischer Parameter der Böden sind über den Rahmen dieser Diplomarbeit hinausgehende Untersuchungen notwendig. Eine Unsicherheit für die Modellrechnungen war die Beschränkung auf die Daten der meteorologischen Station Zinnwald-Georgenfeld. Obwohl die Station sich in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes befindet, so kann eine einzelne Station nicht durchgängig die räumliche Verteilung der Niederschläge über das gesamte Einzugsgebiet darstellen. Zudem war es mit Hilfe des Modells nicht möglich, die Mobilisierung des während des Bodenauftauprozesses freiwerdenden Wassers modellhaft abzubilden.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Fragestellung, ob und in welcher Qualität es möglich ist, die Niederschlag-Abfluss-Vorgänge im oberen Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz mit Hilfe des flächendetaillierten deterministischen Simulationsmodells NASIM abzubilden. Von Interesse ist diese Frage vor dem Hintergrund der besonderen hydrologischen Situation des Raumes. Das Erzgebirge ist durch seine meteorologische, geomorphologische, pedologische, bergbauliche und seine ökologische Situation als Gunstraum für die Entstehung von Hochwasser anzusehen, was sich insbesondere im Zuge des Hochwassers vom August 2002 gezeigt hat.

Zur Erstellung des Niederschlag-Abfluss-Modells für das Untersuchungsgebiet war es notwendig, die erforderlichen hydrologisch relevanten Parameter wie meteorologische Zeitreihen, Geländeform, Böden, Vegetation und Landnutzung bereitzustellen. Zu diesem Zweck wurden die naturräumlichen Gegebenheiten untersucht. Dies geschah einerseits im Rahmen von Geländeaufenthalten und andererseits durch Literaturrecherche und Interpretation von Kartenmaterial.

Die erarbeiteten Parameter wurden in das NASIM-Modell eingespeist und eine Vielzahl von Testläufen durchgeführt. Die Ergebnisse der Testläufe wurden analysiert und auf Basis der gewonnen Erkenntnisse das Modell und die Modellumgebung den Erfordernissen angepasst.

Die Auswertung weiterer Testläufe zeigte, dass aufgrund von Lücken und Fehlern in den meteorologischen Zeitreihen nur der Zeitraum der Jahre 1999 bis 2000 für eine Modellierung sinnvoll war, der schließlich genutzt wurde. Im weiteren Verlauf wurde je ein Simulationslauf unter Verwendung der NASIM-Standardparameter über eine 30- und eine 365tägige Periode im Zeitraum April 1999 bis März 2000 durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse ausgewertet. Es zeigte sich, dass die natürlichen Abflussganglinien nur bedingt abgebildet werden konnten.

Im Anschluss daran wurde eine erneute Anpassung der Parameter des Modells vorgenommen. Hierbei wurde eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt, die zu einer Feinjustierung der Eingangsgrößen führte. Dabei wurden die gleichen meteorologischen Eingangsgrößen für die Simulation der 30- und 365-tägigen Periode im Zeitraum April 1999 bis März 2000 verwendet.

Es zeigte sich, dass die in diesem Zeitraum vorhandenen Abflussspitzen zufriedenstellend abgebildet werden konnten. Hierbei kann die Darstellung der Ereignisse innerhalb der 30-

tägigen Periode als sehr zutreffend angesehen werden. Die Ergebnisse der 365-tägigen Periode weisen eine hohe Stimmigkeit der Abflussspitzen mit den gemessenen Werten auf, jedoch ist keine durchgehende Übereinstimmung der modellierten mit der realen Ganglinie gegeben. Insbesondere die Abbildung der Infiltration, des Basisabflusses und der Auftauprozesse des Bodens in Verbindung mit Schneeschmelzvorgängen ist hierbei problematisch und führt zu teilweise großen Diskrepanzen. Dieser Umstand deutet auf eine nicht vollständige Abbildung der hydrologischen Gegebenheiten des Raumes hin.

Die Interpretation der Ergebnisse zeigt verschiedene Problemfelder innerhalb der Modellierung auf.

- Im Rahmen der Durchführung der Modellierung standen nur die meteorologischen Daten der Station Zinnwald-Georgenfeld zeitlich hoch aufgelöst zur Verfügung. Obwohl sich die Station in unmittelbarer N\u00e4he zum Untersuchungsgebiet befindet, kann es doch zu Abweichungen der Niederschlagsmengen an der Station und dem Gebiet kommen. Zur pr\u00e4zisen Abbildung des Gebietsniederschlages sollte die Einrichtung eines Niederschlagsmessnetzes innerhalb des Gebietes erwogen werden.
- Die Informationen über Bodenmächtigkeiten, Bodenschichten und Bodenarten gehen als wichtige Informationen in das NASIM-Modell ein. Die Modellierungsergebnisse zeigten einen starken Anpassungsbedarf der Eichparameter für die hydrologischen Bodeneigenschaften. Dies lässt auf eine unzureichende Datengrundlage für die Modellerstellung schließen. Weitere Untersuchungen zu den genannten Bodenparametern sind daher dringend erforderlich, um die abflussrelevanten Parameter der Böden des Untersuchungsgebietes flächendeckend modellhaft abbilden zu können.
- Die Vegetationszusammensetzung des Untersuchungsgebietes hat sich im Verlauf der vergangenen 30 Jahre deutlich verändert. Vor allem die Rauchgasschäden der 1970er und 1980er Jahre und die sich anschließende Regeneration der Forsten im Zuge der Wiederaufforstung nach 1990 haben eine stark differenzierte hydrologische Situation der Wälder und ihrer Böden entstehen lassen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht vollständig berücksichtigt werden konnte. Die genauere Untersuchung und Bewertung der hydrologischen Potentiale der Wälder ist daher unerlässlich.

Abschließend lässt sich feststellen, dass es im Rahmen dieser Diplomarbeit gelungen ist, die hydrologischen Gegebenheiten des oberen Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz insbesondere in Bezug auf Abflussspitzen modellhaft nachzubilden, jedoch sind zur Abbildung der hydrologischen Vorgänge der gesamten Untersuchungsperiode weitergehende Untersuchungen zur Gewinnung detaillierterer Parametergrößen empfehlenswert.

LITERATURVERZEICHNIS

Ahnert, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. Stuttgart.

- Aigner, D., R. Pohl, E. Bielitz, U. Müller (2003): Hochwasserschutz an der Weißeritz. In: Wasserwirtschaft Wassertechnik, 12/2003.
- Assmann, A. (1999): Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen. Kornwestheim. (=Schriftenreihe der Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg Heft 11).
- Assmann, A., B. Friedel, H. Gündra, G. Schukraft, A. Schulte (1996): Dezentraler Hochwasserschutz als Alternative zu großen Rückhaltebecken? In: Der Bürger im Staat. 46. Jg., Heft 1. S. 60-64.
- Barsch, D., R. Mäusbacher, K. Pörtge, K. Schmidt (Hrsg.) (1994): Messungen in fluvialen Systemen. Berlin.
- Bernhardsen, T. (1999): Geographic Information Systems. An Introduction. Arendal. Norwegen.
- Bill, R. (1996): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Bd. 2. Heidelberg.
- Bill, R., D. Fritsch (1994): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Bd. 1. Heidelberg.
- Bolte, A., B. Wolff (2003): Einfluss von realer und natürlicher potenzieller Waldbedeckung auf die Tiefenversickerung. In: Forst und Holz, 58. Jg., Nr. 15-16.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover.
- Clauss, H. (Hrsg.) (1996): Das Erzgebirge. Weltbild Verlag. Augsburg.
- De By, R. (Hrsg.) (2001): Principles of Geographic Information Systems. Enschede.
- DVWK=Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.) (1980): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil 1: Grundansprache der Böden. Bonn. (=DVWK Schriften, H. 115).
- DVWK=Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.) (1982a): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil 1: Analyse. Bonn. (=DVWK Regeln, H. 112).
- DVWK=Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.) (1982b): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil 2: Ermittlung von Standortkennwerten mit Hilfe Grundansprache der Böden. Bonn. (=DVWK Schriften, H. 116).
- DVWK=Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.) (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil 2: Synthese. Bonn. (=DVWK Regeln, H. 113).
- DVWK=Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.) (1995): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung. Teil 1: Ansprache der Böden. Bonn. (=DVWK Schriften, H. 129).

- DVWK=Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.) (1999): Hochwasserabflüsse. Bonn. (=DVWK Schriften, H. 124).
- DWD=Deutscher Wetterdienst (2002): Das Niederschlagsgeschehen in Mitteleuropa in den ersten 12 Tagen des August 2002. Internetseite: www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/ prod/spezial/regen/rr-extrem_200208.pdf, heruntergeladen am 16.06.2004.
- Dyck, S., G. Peschke (1995): Grundlagen der Hydrologie. Berlin.
- Forsteinrichtungswerk Sachsen (o.J.): Landeswald des Forstamtes Bärenfels. Allgemeiner Teil Bd. 1, 1999-2008. O.O.
- Göttlich, K. (Hrsg.) (1990): Moor- und Torfkunde. Stuttgart.
- Gutknecht, D. (Hrsg.) (2000): Niederschlag-Abfluss Modellierung Simulation und Prognose. Wien.
- Haake, R., H. Körber (1973): Klima und Witterung im Erzgebirge. Berlin. (= Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR, Nr. 104).
- Heilmann. H., J. Fischer, R. Symmangk (1993): Die Böden des Osterzgebirges und seines nördlichen Vorlandes. Freiberg. (=Geologie in Sachsen. Exkursionsführer Nr. 1).
- Herrmann, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Stuttgart.
- Hydrotec GmbH, Aachen (2003): Handbuch NASIM Version 3.2.0, Stand 10/2003. Aachen.
- Hydrotec GmbH, Aachen (2002): Handbuch NASIM GIS-Zusatzmodule, Stand 01/2002. Aachen.
- Irrgang, S. (2002): Waldstruktur und Waldverteilung Optimierung der Funktionen des Waldes für den Landschaftswasserhaushalt und für den vorbeugenden Hochwasserschutz. In: 20. Osnabrücker Umweltgespräch "Vorbeugender Hochwasserschutz", Tagung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt 24.-25. Oktober 2002, Osnabrück. Tagungsbeitrag.
- Käubler, R. (1963): Die erzgebirgischen Waldhufendörfer zur Zeit ihrer Entstehung. Halle. (= Wissenschaftliche Zeitschrift der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Heft 12/10).
- Kowalke, H. (Hrsg.) (2000): Sachsen. Gotha. (=Perthes Länderprofile).
- Kunkel, R., F. Wendland (2000): Der Landschaftswasserhaushalt im Flusseinzugsgebiet der Elbe. Jülich.
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (1992): Talsperren in Sachsen. Pirna.
- Landesumweltamt Brandenburg (1998): Das Sommerhochwasser an der Oder 1997. Potsdam.
- Landesvermessungsamt Sachsen (Hrsg.) (1890): Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte des Königreichs Sachsen. Section Altenberg-Zinnwald. Dresden.
- Lauterbach, G. (2000): Wasser- und Stoffhaushalt dreier Waldökosysteme des Osterzgebirges. Dissertation an den Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- LfUG=Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1997a): Hydrologisches Handbuch, Teil 3: Pegelverzeichnis. Radebeul.

- LfUG=Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1997b): Hydrologisches Handbuch, Teil 5: Haupttabelle der oberen Durchflussextremwerte. Radebeul.
- LfUG=Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1997c): Hydrologisches Handbuch, Teil 7: Gewässerkundliche Hauptwerte. Radebeul.
- LfUG=Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1997d): Bodenatlas des Freistaates Sachsen. Radebeul.
- LfUG=Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2002a): Hydrologisches Handbuch. Dresden.
- LfUG=Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2002b): Potentielle Natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1:200 000. Dresden.
- Liebig, W., R. Mummenthey (2002): ArcGIS-ArcView 8. Halmstad.
- Liedtke, H., J. Marcinek (Hrsg.) (2002): Physische Geographie Deutschlands. Gotha.
- Malberg, H. (1997): Meteorologie und Klimatologie. Berlin.
- Merz, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. Dissertation. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- Meteorologischer Dienst der DDR (1966): Hydrographisches Kartenwerk. Berlin.
- Meteorologischer Dienst der DDR (1987): Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik. Bd. 14 "Klimatologische Normalwerte 1951/80". Hauptamt für Klimatologie. Potsdam.
- Rosemann, H. (1970): Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen. München. (=Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde).
- Schreiber, H. (1921): Die Moore und die Torfgewinnung im Erzgebirge. O.O. (= Arbeiten der Deutschen Sektion des Landeskulturrates für das Königreich Böhmen).
- Schulte, A. (1995): Hochwasserabfluss, Sedimenttransport und Gerinnebettgestaltung an der Elsenz im Kraichgau. Heidelberg. (= Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 98).
- Schwaller, G. (2000): Das Geographische Informationssystem als Werkzeug für wasserwirtschaftliche Planungsaufgaben. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Innsbruck. Innsbruck.
- Succow, M. (1990): Moore in der Landschaft. Leipzig.
- Wagenbreth, O., E. Wächtler (Hrsg.) (1990): Bergbau im Erzgebirge. Leipzig.
- Wohlrab, B., H. Ernstberger, A. Meuser, V. Sokollek (1992): Landschaftswasserhaushalt. Hamburg.

Kartenverzeichnis

- Bodenkarte 02-32 Teplice im Maßstab 1:50.000, Tschechisches Katasteramt, Prag. Erscheinungsjahr: 1991.
- Forststationierungskarte des Reviers Rehefeld im Maßstab 1:10.000, Forsteinrichtungswerk des Landes Sachsen. In: Landeswald des Forstamtes Bärenfels, Allgemeiner Teil 1999-2008.
- Geologische Karte 02-32 Teplice im Maßstab 1:50.000, Tschechisches Katasteramt, Prag. Erscheinungsjahr: 1992.
- Geologische Karte 5248 Section Altenberg-Zinnwald im Maßstab 1:25.000, Landesvermessungsamt Sachsen (Hrsg.), Dresden. Erscheinungsjahr: 1906.
- Topographische Karte 02-321 Dubi im Maßstab 1:25.000, Tschechisches Katasteramt, Prag. Erscheinungsjahr: 2002.
- Topographische Karte 5248 Altenberg im Maßstab 1:25.000, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden. Erscheinungsjahr: 2000.
- Topographische Karte 5248-SW Altenberg-Rehefeld-Zaunhaus im Maßstab 1:10.000, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden. Erscheinungsjahr: 2001.
- Diercke Weltatlas (1996). Braunschweig.

Weitere Quellen

Mündliche Mitteilung: Unterredung mit Herrn Kubatzsch und Herrn Teubner, Mitarbeiter des Forstamtes Bärenfels, Sachsen, am 08.04.2004.