

---

# Inhalt

<b>Abbildungen</b>	<b>[IX]</b>
<b>Tabellen</b>	<b>[XIII]</b>
<b>Karten</b>	<b>[XV]</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>[XVII]</b>
<b>Einleitung</b>	<b>[1]</b>
1.1 Problem	1
1.2 Vorgehensweise	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>Grundlagen der Abflussbildung, Unsicherheit(en), Literaturüberblick</b>	<b>[7]</b>
2.1 Abflussbildung	7
2.1.1 Interzeption	8
2.1.2 Schneeakkumulation und Schneeschmelze	8
2.1.3 Evaporation, Transpiration	9
2.2 Unsicherheit(en) - ein Problem jeglicher Modellierung natürlicher Systeme	10
2.3 Erfassung von Niederschlag und Temperatur - Aspekte der Datenunsicherheit	11
2.3.1 Niederschlag	12
2.3.2 Temperatur	13
2.4 Abflussbestimmung - Aspekte der Datenunsicherheit	13
2.4.1 Abflußbestimmung per Durchflußmessung	13
2.4.2 Flügelmessung	14
2.4.3 Fehler der Durchflußmessung	14
2.4.4 Einfluß der Unsicherheit der Durchflußwerte auf die Simulationsgüte	15
2.5 Kenntnisstand zur Simulation der Abflussverhältnisse für Klimaszenarien	15
<b>Das hydrologische Modell HBV-D</b>	<b>[19]</b>
3.1 Historische Entwicklung	19
3.2 Modellbeschreibung	20
3.2.1 Schneemodell	20
3.2.2 Bodenmodell	21
3.2.3 Dynamischer Teil (Speicheransatz)	23
3.2.4 Routing (Abflußkonzentration, Durchflußverlauf)	23

3.3 Dateien, technische Struktur - - - - -	23
3.4 Parameterkalibrierung - - - - -	25
3.5 Die neu entwickelte Arbeitsumgebung HBV-Params - - - - -	27
3.6 Hilfs- und Auswertungsprogramme - - - - -	31
3.7 Sensitivität gegenüber Temperatur- und Niederschlagsänderungen - - - - -	31
3.7.1 Temperaturänderungen, Niederschlagsänderungen - - - - -	32
3.7.2 Niederschlagsänderungen -Einfluß der zeitlichen Verteilung - - - - -	35
<b>Die Untersuchungsgebiete</b>	<b>[39]</b>
4.1 Überblick über die Untersuchungsgebiete - - - - -	39
4.2 Datenlage - - - - -	40
4.2.1 Datengrundlagen - - - - -	40
4.2.2 Aufbereitung der Datengrundlagen - - - - -	41
4.3 Mosel - - - - -	42
4.3.1 Klima - - - - -	42
4.3.2 Geologie, Böden & Landnutzung - - - - -	42
4.3.3 Gewässer & Grundwasser - - - - -	44
4.3.4 Abflußregime, Abflußereignisse - - - - -	44
4.4 Sieg - - - - -	45
4.4.1 Klima - - - - -	45
4.4.2 Geologie, Böden & Landnutzung - - - - -	45
4.4.3 Gewässer & Grundwasser - - - - -	47
4.4.4 Abflußregime, Abflußereignisse - - - - -	47
4.5 Main - - - - -	48
4.5.1 Klima - - - - -	48
4.5.2 Geologie, Böden & Landnutzung - - - - -	48
4.5.3 Gewässer & Grundwasser - - - - -	48
4.5.4 Abflußregime, Abflußereignisse - - - - -	50
<b>Hydrologische Simulation des Ist-Zustandes</b>	<b>[51]</b>
5.1 Mosel - - - - -	52
5.2 Sieg - - - - -	54
5.3 Main - - - - -	56
<b>Simulation von Klimaszenarien</b>	<b>[59]</b>
6.1 Erstellung von Klimaszenarien - - - - -	59
6.1.1 Globale Zirkulationsmodelle (GCMs) als Basis für Tageswertszenarien - -	59
6.1.2 Regionalisierung mit dem Expanded Downscaling (EDS) Verfahren - - - -	61
6.2 Ergebnisse der "GCM-Klimaszenarien" - - - - -	63
6.2.1 Mosel - - - - -	64
6.2.2 Sieg - - - - -	66
6.2.3 Detailuntersuchungen Sieg: Schneebedeckung, Durchflußvariabilität - - - -	68
6.2.4 Main - - - - -	70
6.2.5 Vergleich der Untersuchungsgebiete - Vergleich der Szenarien - - - - -	71
6.3 Abgeleitete synthetische Szenarien - - - - -	72

---

6.3.1 Synthetische Szenarien Sieg - - - - -	73
6.3.2 Synthetische Szenarien Main - - - - -	74
6.3.3 Erkenntnisgewinn durch synthetische Szenarien - - - - -	74
6.3.4 Alternative Methoden zur Erstellung synthetischer Szenarien - - - - -	75
6.4 Entwicklung von Abflussexremen (MHQ, HQ100) am Beispiel Cochem, Mosel -	78
6.4.1 Unsicherheitsaspekte - - - - -	80
<b>Diskussion, Ausblick</b>	<b>[81]</b>
7.1 Diskussion - - - - -	81
7.1.1 Simulationsergebnisse, Szenarien - - - - -	81
7.1.2 Auswirkungen in den Untersuchungsgebieten - - - - -	82
7.1.3 Vergleich mit derzeitigem Kenntnisstand und aktueller Methodik - - - - -	83
7.2 Ausblick - - - - -	84
7.2.1 Modellierungstechnik - - - - -	84
7.2.2 Offene Forschungsfragen - - - - -	85
7.2.3 Mögliche Klimaänderungen, Auswirkungen und Handlungsoptionen - - - - -	85
<b>Literatur</b>	<b>[87]</b>
<b>Anhang</b>	<b>[a]</b>

---

# Abbildungen

Abb. 1.1	Modellsystem zur Untersuchung von Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf das Abflußgeschehen (modifiziert nach Menzel & Schwandt, 2002).	3
Abb. 2.1	Quellen der Unsicherheit.	10
Abb. 2.2	Kaskade der Unsicherheiten bei der Modellkette zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaänderungen (nach Mitchell & Hulme, 1999, und Viner, 2002, stark verändert).	11
Abb. 2.3	Prinzip der Flügelmessung von einer Seilkrananlage (LFW Bayern online)	14
Abb. 3.1	Vereinfachte Darstellung der Modellstruktur von HBV-D (nach Schwandt & Menzel, 2001).	21
Abb. 3.2	Einfluß des Parameters BETA auf den Ausfluß der Bodenwasserzone (aus Sælthun, 1999).	22
Abb. 3.3	Aktuelle Evapotranspiration (AE) in Abhängigkeit von aktueller Bodenfeuchte (SM) (aus Sælthun, 1999).	22
Abb. 3.4	Struktogramm Eingangsdaten, Parameterdateien, Steuerdateien, Ergebnis- und Dokumentationsdateien für einen Modellauf des HBV-D Modells.	24
Abb. 3.5	'Tabelle' Menü HBV-Params.	28
Abb. 3.6	'View' Menü HBV-Params.	28
Abb. 3.7	Dialogfenster zur Parametereinstellung in der Datei parbas. dat.	28
Abb. 3.8	Dialogfenster zur Parametereinstellung in der Datei parsubxxx.dat.	29
Abb. 3.9	Dialogfenster zur Editierung und Erstellung der Steuerdatei subbas.fio.	29
Abb. 3.10	Dialogfenster zur Editierung der Steuerdatei default.dat.	30
Abb. 3.11	Menüleiste der ArcView-Erweiterung HBV-Table-Utilities.	30
Abb. 3.12	Änderung des langjährigen (1961-1999) mittleren monatlichen Durchflusses bei Temperaturänderung, Pegel Menden 1, Sieg.	32
Abb. 3.13	Änderung des langjährigen (1961-1999) mittleren monatlichen Durchflusses bei Niederschlagsänderungen und gleichzeitigen Temperaturänderungen, Pegel Menden 1, Sieg.	34
Abb. 3.14	Exemplarische Methoden der Verteilung von erhöhtem Niederschlag [20% der Monatssumme] am Beispiel der Station Netphen-Hainchen, DWD-ID 78002 (TEZ Sieg), für den Monat Juni 1961: (o) Meßwerte, (a) proportionale Änderung aller Niederschlagstage, (b) Änderung der Anzahl der Niederschlagstage, (c) Zunahme der Niederschlagsmenge von starken Niederschlagsereignissen.	36
Abb. 3.15	Niederschlagserhöhung um 20% im TEZ Sieg nach verschiedenen	

	Methoden - Auswirkung auf das langjährige (1961-1999) Monatsmittel von MQ. -----	37
Abb. 4.1	Langjährige Monatsmitteltemperaturen (rot) und Niederschlagssummen (blau) im TEZ zwischen den Moselpegeln Perl und Trier. -----	42
Abb. 4.2	Langjähriger mittlerer monatlicher Durchfluß am Pegel Cochem. -----	44
Abb. 4.3	Langjährige Monatsmitteltemperaturen (rot) und Niederschlagssummen (blau) des Untersuchungsgebietes Sieg. -----	45
Abb. 4.4	Langjähriger mittlerer monatlicher Durchfluß am Pegel Menden 1. -----	47
Abb. 4.5	Langjährige Monatsmitteltemperaturen (rot) und Niederschlagssummen (blau) des Untersuchungsgebietes Main bis Pegel Kemmern. -----	48
Abb. 4.6	Langjähriger mittlerer monatlicher Durchfluß am Pegel Kemmern. -----	50
Abb. 5.1	Simulationsgüte für Mosel (Pegel Cochem), Sieg (Pegel Menden 1) und Main (Pegel Kemmern). -----	51
Abb. 5.2	Gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Cochem, Mosel. -----	52
Abb. 5.3	Mittlere Monatswerte des Durchflusses am Pegel Cochem, Mosel. -----	53
Abb. 5.4	Gemessener und simulierter Durchfluß (und Abflußvolumen) am Pegel Cochem, Mosel beim Frühjahrshochwasser 1988. Die Zahlen in der rechten Teilgrafik geben die über den betrachteten Zeitraum aufsummierten Abflußvolumina wieder. -----	53
Abb. 5.5	Histogramm der relativen Häufigkeit gemessener und für den Ist-Zustand simulierter Tagesdurchflußwerte am Pegel Cochem, Mosel. -----	54
Abb. 5.6	Gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Menden 1, Sieg. -----	54
Abb. 5.7	Mittlere Monatswerte des Durchflusses am Pegel Menden 1, Sieg. -----	55
Abb. 5.8	Histogramm der relativen Häufigkeit gemessener und für den Ist-Zustand simulierter Tagesdurchflußwerte am Pegel Menden 1, Sieg. -----	55
Abb. 5.9	Gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Kemmern, Main. -----	56
Abb. 5.10	Mittlere Monatswerte des Durchflusses am Pegel Kemmern, Main. -----	56
Abb. 5.11	Histogramm der relativen Häufigkeit gemessener und für den Ist-Zustand simulierter Tagesdurchflußwerte am Pegel Kemmern, Main. -----	57
Abb. 6.1	Struktur des HADCM3-Modells (Quelle: <a href="http://www.cru.uea.ac.uk/link/hadcm3/">http://www.cru.uea.ac.uk/link/hadcm3/</a> ). -----	60
Abb. 6.2	Europa, Gitterpunkte HADCM3. -----	61
Abb. 6.3	EDS-Verfahren, Ermittlung der linearen Beziehung zwischen Stations- meßwerten (Zeitreihen) und beobachteten Zirkulationsfeldern (nach Menzel et al., 2002). -----	62
Abb. 6.4	EDS-Verfahren, Erzeugung von Zeitreihen (Stationswerte) aus simulierten Zirkulationsfeldern von GCM-Modellläufen (nach Menzel et al., 2002). -----	62
Abb. 6.5	Gebietsniederschlag (Jahressummen), Gebietstemperatur (Jahresmittel) im TEZ Sieg. -----	63
Abb. 6.6	Änderungen von Temperatur, Niederschlag (Teileinzugsgebiete 1, 2, 3) und Durchfluß im Einzugsgebiet der Mosel bis zum Pegel Cochem; Monatsmittel der Periode 1961-1995 (Ist-Zustand) gegenüber 2061-2095 (sca) (links) bzw. 2061-2095 (hdl) (rechts). -----	65
Abb. 6.7	Monatsmittel des Durchflusses am Pegel Cochem nach Szenario sca	

	(links) und Szenario hdl (rechts). Simulationswerte Ist-Zustand (1961-1995) mit lila Dreieck markiert. -----	66
Abb. 6.8	Untersuchungsgebiet Mosel, Pegel Cochem, Histogramm der relativen Häufigkeit von Tagesdurchflußwerten für den Szenarienz Zeitraum 2061-2095 (Szenario sca und hdl) im Vergleich zum Histogramm der Werte für den simulierten Ist-Zustand (1961-1995). -----	66
Abb. 6.9	Änderungen von Temperatur, Niederschlag und Durchfluß im Einzugsgebiet der Sieg bis Pegel Menden 1; Monatsmittel der Periode 1961-1999 (Ist-Zustand) gegenüber 2061-2099 (sca) (linke Teilgrafik) bzw. 2061-2099 (hdl) (rechte Teilgrafik). -----	67
Abb. 6.10	Langjährige mittlere Monatswerte (Monatssumme) der Evapotranspiration im Einzugsgebiet der Sieg. -----	67
Abb. 6.11	Monatsmittel des Durchflusses am Pegel Menden 1 nach Szenario sca (links) und Szenario hdl (rechts). Simulationswerte Ist-Zustand (1961-1999) mit lila Dreieck markiert. -----	67
Abb. 6.12	Änderung der Anzahl der Tage pro Kalenderjahr mit großräumiger Schneebedeckung (>20% der Einzugsgebietsfläche) (linke Teilgrafik); langjährige mittlere Anzahl der Schneetage pro Kalenderjahr: simuliert (Ist-Zustand) und Szenarien sca und hdl (rechte Teilgrafik). -----	68
Abb. 6.13	Durchflußvariabilität (im Gesamtzeitraum von ca. 40 Jahren) am Pegel Menden 1, Sieg. -----	69
Abb. 6.14	Variabilität des Durchflusses der Einzelmonate am Pegel Menden 1, Sieg : simuliert (Ist-Zustand) vs. gemessen (1961-1999) (links) und Szenario sca vs. Szenario hdl (2061-2099) (rechts). -----	69
Abb. 6.15	Änderungen von Temperatur, Niederschlag und Durchfluß im Untersuchungsgebiet Main (bis Pegel Kemmern); Monatsmittel der Periode 1961-1999 (Ist-Zustand) gegenüber 2061-2099 (sca) (links) bzw. 2061-2099 (hdl) (rechts). -----	70
Abb. 6.16	Monatsmittel des Durchflusses am Pegel Kemmern nach Szenario sca (links) und Szenario hdl (rechts). Simulationswerte Ist-Zustand (1961-1999) mit lila Dreieck markiert. -----	70
Abb. 6.17	TEZ Sieg, Temperatur- und Niederschlagsänderungen (Monatsmittel) zwischen Meßzeitraum und GCM-Klimaszenarien sca und hdl. Halbjahresmittel sind mit W (Winter) bzw. S (Sommer) gekennzeichnet. -	73
Abb. 6.18	Monatsmittel des Durchflusses am Pegel Menden 1 nach Szenarien synA (links) und synB (rechts). Simulationswerte Ist-Zustand (1961-1999) mit lila Dreieck markiert. -----	74
Abb. 6.19	TEZ Main, Temperatur- und Niederschlagsänderungen (Monatsmittel) zwischen Meßzeitraum und GCM-Klimaszenarien sca und hdl. Halbjahresmittel sind mit W (Winter) bzw. S (Sommer) gekennzeichnet. -	74
Abb. 6.20	Monatsmittel des Durchflusses am Pegel Kemmern nach Szenarien synA (links) und synB (rechts). Simulationswerte Ist-Zustand (1961-1999) mit lila Dreieck markiert. -----	75
Abb. 6.21	Grid (2 x 2) der GCMs HADCM3 und ECHAM4/OPYC3, das die Untersuchungsgebiete Sieg und Main (und den größten Teil der BRD)	

	abdeckt. -----	76
Abb. 6.22	TEZ Sieg, Monatswerte der Temperatur- und Niederschlagsdifferenz zwischen Meßzeitraum und GCM-Modellläufen (2 x 2 Grid, Methode A) 2061-2099. Halbjahresmittelwerte sind mit W (Winter) bzw. S (Sommer) gekennzeichnet. -----	76
Abb. 6.23	TEZ Sieg, Monatswerte der Temperatur- und Niederschlagsdifferenz zwischen Meßzeitraum und GCM-Modellläufen (1 Gridzelle, Methode B) 2061-2099. Halbjahresmittelwerte sind mit W (Winter) bzw. S (Sommer) gekennzeichnet. -----	77
Abb. 6.24	TEZ Main, Monatswerte der Temperatur- und Niederschlagsdifferenz zwischen Meßzeitraum und GCM-Modellläufen (2 x 2 Grid, Methode A) 2061-2099. Halbjahresmittelwerte sind mit W (Winter) bzw. S (Sommer) gekennzeichnet. -----	77
Abb. 6.25	TEZ Main, Monatswerte der Temperatur- und Niederschlagsdifferenz zwischen Meßzeitraum und GCM-Modellläufen (1 Gridzelle, Methode B) 2061-2099. Halbjahresmittelwerte sind mit W (Winter) bzw. S (Sommer) gekennzeichnet. -----	77
Abb. 6.26	Cochem, Mosel - Extremwertstatistik (empirische Wahrscheinlichkeiten nach Weibull, Gumbelverteilung) für Zeitreihen jährlicher Maximaldurchflüsse aus gemessenen und simulierten (Ist-Zustand, Szenarien hdl & sca) Werten (nach Thielen, Merz, Menzel, Bürger, Schwandt, 2003a).-----	79
Abb. 6.27	Cochem, Mosel - Prozentuale Abweichungen des mittleren Hochwassers (MHQ), linke Teilgrafik, bzw. des "100jährigen Hochwassers" (HQ100), rechte Teilgrafik, simulierter Zeitreihen (Ist-Zustand) und Szenarienzitreihen (1961-1990, 2061-2090) gegenüber gemessenen bzw. mit Gumbelverteilung berechneten Werten für MHQ und HQ100. Die Darstellung für den Kontrolllauf ctl zeigt die Spannweite der Kennwerte aller gleitenden Teilerien (30 Jahre) und den Mittelwert für den gesamten Zeitraum von 300 Jahren (nach Thielen, Merz, Menzel, Bürger, Schwandt, 2003a, verändert). -----	80
Abb. 9.1	Untersuchungsgebiet Sieg, Pegel Menden 1, Histogramm der relativen Häufigkeit von Tagesdurchflußwerten für den Szenarienzeitraum 2064-2099 (Szenario sca und Szenario hdl) im Vergleich zu Werten für den simulierten Ist-Zustand (1964-1999). -----	c
Abb. 9.2	Untersuchungsgebiet Main, Pegel Kemmern, Histogramm der relativen Häufigkeit von Tagesdurchflußwerten für den Szenarienzeitraum 2061-2099 (Szenario sca und Szenario hdl) im Vergleich zu Werten für den simulierten Ist-Zustand (1961-1999). -----	c
Abb. 9.3	Gebietsniederschlag (Jahressummen), Gebietstemperatur (Jahresmittel) im Teileinzugsgebiet des Mains bis zum Pegel Kemmern. -----	d

---

# Tabellen

Tab. 2.1 Durchfluß Pegel Perl, Mosel (W - Wasserstand, Qgem - "gemessener Durchfluß", QAT - aus Abflußtafel ermittelter Durchfluß). -----	15
Tab. 2.2 Spannweite der Simulationsgüte bei zufallsgesteuerter Änderung des gemessenen Durchflusses. -----	15
Tab. 3.1 Erfahrungswerte Parameterspannweiten & Sensitivität wichtiger Parameter von HBV-D -----	26
Tab. 4.1 Extremdurchflüsse am Pegel Cochem (7 Hochwasser, 3 Niedrigwasserereignisse). -----	44
Tab. 4.2 Extremdurchflüsse am Pegel Menden 1 (7 Hochwasser, 3 Niedrigwasserereignisse). -----	47
Tab. 4.3 Extremdurchflüsse am Pegel Kemmern (7 Hochwasser, 3 Niedrigwasserereignisse). -----	50
Tab. 5.1 Simulationsgüte für das TEZ Mosel als Effizienz bzw. logarithmierte Effizienz nach Nash/Sutcliffe. -----	53
Tab. 5.2 Simulationsgüte für das TEZ Sieg als Effizienz bzw. logarithmierte Effizienz nach Nash/Sutcliffe. -----	55
Tab. 5.3 Statistische Maßzahlen gemessener und für den Ist-Zustand simulierter Tagesdurchflußwerte am Pegel Menden 1, Sieg. -----	55
Tab. 5.4 Simulationsgüte für das TEZ Main als Effizienz bzw. logarithmierte Effizienz nach Nash/Sutcliffe. -----	57
Tab. 6.1 Hauptcharakteristika der GCMs ECHAM4/OPYC3 & HADCM3. -----	61
Tab. 6.2 Innerhalb dieser Arbeit verwendete, auf regionalisierten GCM-Modellläufen (EDS-Verfahren) beruhende Klimaszenarien. -----	63
Tab. 6.3 Änderung (Differenz) der langjährigen mittleren Jahreswerte zwischen den Meßwerten (Temperatur und Niederschlag) sowie dem simulierten Ist-Zustand (Durchfluß) (Zeitraum 1961-1995/1999) und den "GCM-Klimaszenarien" sca und hdl im Szenarienzeitraum (2061-2095/2099). -----	72
Tab. 6.4 Langjährige mittlere Jahressumme des Gebietsniederschlags [mm] in den Untersuchungsgebieten Sieg (bis Pegel Menden 1) und Main (bis Pegel Kemmern) für Meßzeitraum und Szenarienzeitraum nach unterschiedlichen Methoden (HADCM3-GCM). -----	78
Tab. A.1 Digitale räumliche Gebietsinformation sowie meteorologische und hydrologische Daten für die Untersuchungsgebiete. -----	a



---

# Karten

Karte 4.1 Lage der Untersuchungsgebiete im Rheineinzugsgebiet (Maxau - Emmerich). -----	40
Karte 4.2 Untersuchungsgebiet Mosel bis Pegel Cochem: Meßstationen (Klima, Niederschlag), Topographie, Landnutzung. -----	43
Karte 4.3 Untersuchungsgebiet Sieg bis Pegel Menden 1: Meßstationen (Klima, Niederschlag), Topographie, Landnutzung. -----	46
Karte 4.4 Untersuchungsgebiet Main bis Pegel Kemmern: Meßstationen (Klima, Niederschlag), Topographie, Landnutzung. -----	49