Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft vertreten durch das

Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie

Abschlussbericht

zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 13-8802.3529/38

KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe

Teil 2:

Weiterentwicklung von WaSiM-ETH sowie Durchführung von Testsimulationen

Jörg Scherzer, Hannaleena Pöhler, Karsten Jasper, Dietrich Sames

Durchführende Institutionen:



08. Dezember 2006

Berichtskennblatt

1. Zwischen- bzw. Abschlussberichts-Nr.:	2. Berichtszeitraum			
Abschlussbericht KliWEP Teil 2	Juli 2005-November 2006			
3. Titel des Berichts	•			
KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Was- ser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe - Teil 2: Weiterentwicklung von WaSiM-ETH sowie Durch- führung von Testsimulationen				
4. Autoren	5. Abschlussdatum			
Dr. Jörg Scherzer Dr. Hannaleena Pöhler Dr. Karsten Jasper Dr. Dietrich Sames	30.11.2006			
6. Durchführende Institution(en), Projektleiter	7. Aktenzeichen			
UDATA, Inh.: Dr. Jörg Scherzer (federführend) Maconring 98a, 67434 Neustadt/Wstr. Buchstr. 27, 09599 Freiberg Tel.: 06321/35 43 79 Fax: 06321/92 15 41 info@udata.de www.udata.de Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (Unterauftragnel	13-8802.3529/38			
Nonnenstraße 9, 04229 Leipzig				
Dr. Karsten Jasper (Unterauftragnehmer) Postweg 11, CH 8143 Stallikon				
Projektleiter: Dr. Jörg Scherzer				
8. Fördernde Institution(en)	9. Gesamtlaufzeit			
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwin Vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie	tschaft 25.07.2005-30.11.2006			
10. Zusätzliche Angaben, Sonstiges	11. Seitenzahl			
	151			
	12. Tabellen (Anzahl)			
	26			
	13. Abbildungen (Anzahl)			
	76			
	14. Anlagen (Anzahl)			
	1			
	·			

15. Kurzfassung:

Das Wasserhaushaltsmodell für Flusseinzugsgebiete WaSiM-ETH wurde um prozessorientierte Komponenten und ein online-Kopplungsmodul zu einem externen Grundwassermodell (hier: PCGEOFIM[®]) erweitert. Die neue Modellversion ermöglicht eine verbesserte Berücksichtigung komplexer Vegetationsstrukturen (z. B. Oberbestand, Strauch- und Krautschicht in Wäldern) und differenzierter Bodeneigenschaften. Das erweiterte Modell wurde zunächst auf Grundlage bodenhydrologischer Messdaten von Monitoringstandorten des Staatsbetriebes Sachsenforst, der Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft und der Landesanstalt für Landwirtschaft getestet. Die Teststandorte repräsentieren ein weites Spektrum an Bodeneigenschaften, Klimabedingungen und Landnutzungen. Die Funktion des neuen Kopplungsmoduls wurde durch eine Online-Kopplung mit dem Grundwassermodell PCGEOFIM[®] auf Tagesschrittweite am Beispiel des Einzugsgebietes des Schnellbachs, einem Parthezufluss südlich von Leipzig, getestet. Die Testsimulationen für das Schnellbachgebiet wurden für den Zeitraum 1980–2004 durchgeführt und die Simulationsergebnisse sowohl insgesamt als auch für die einzelnen Modellkompartimente (Vegetation, Boden, Grundwasser, Abfluss) ausgewertet.

16. Schlagwörter, Deskriptoren

Simulationsmodell, WaSiM-ETH, Modellentwicklung, Schnellbach, Parthe, Wasserhaushalt, Testsimulationen, Einzugsgebiet, Modellkopplung, PCGEOFIM[®], Geofim, Vegetationsstrukturen, differnzierte Bodeneigenschaften

Inhaltsverzeichnis

	Inhaltsverzeichnis		
	Tabellenverzeichnis		
	Abbildungsverzeichnis		
	Anlagenverzeichnis		
	Abkü	rzungsverzeichnis	11
1	Aufga	benstellung	14
-			
2	Daten	grundlage	16
2.1		Datenübergabe	16
2.2		Datenprutung	17
3	Mode	llbeschreibungen	19
3.1		WaSiM-ETH.	19
3.	1.1	Übersicht	19
3.	1.2	Modellstruktur	20
3.	1.3	Modellumgebung	21
3.	1.4	Modellkomponenten	22
3.	1.5	Güte der Modellierung	23
3.2		PCGEOFIM [®]	24
3.	2.1	Physikalische Grundlagen	24
3.	2.2	Die numerische Lösung der Strömungsgleichung	27
3.	2.3	Programmsystem PCGEOFIM [®]	29
4	Waita	rentwicklung von WaSiM ETH	21
4	wente	Modellkonnlung WoSiM ETH mit DCCEOEIM [®]	21
4.1	1 1	Dringinialla Vargahangwaiga	
4. 1	1.1	Physikalisch korrakte Übergehme der Grundwassereberfläche	
4. 1	1.2	Ausweisung der Grundwasserneubildung als Grid	
4. 1	1.5	Konnlung des oberirdischen Abflusses und des Interflows	
ч. 4	1.4	Struktur des WaSiM-FTH Moduls zur externen Konnlung	
ч. Д	1.5	Aufruf von WaSiM-ETH durch Geofim	
ч. Д	1.0	Zugriff auf WaSiM-FTH-interne Parameter der Wasserhaushaltsbilanzierung	37
4	1.7	Erweiterung der Landnutzungtabelle für beliebig viele phänologische Phasen	39
4 2	1.0	Erweiterung von WaSiM-ETH um differenzierte Bodeneigenschaften	41
4	21	Ausgangssituation	41
4.	2.2	Wasserretention (pF-Kurve)	45
4.	2.3	Hydraulische Leitfähigkeit	45
4.	2.4	Oberflächenabfluss	47
4.	2.5	Makroporenfluss	47
4.3		Erweiterung von WaSiM-ETH um komplexe Vegetationsstrukturen	49
4.	3.1	Ausgangssituation	49
4.	3.2	Erweiterung der Landnutzungstabelle für komplexe Vegetationsstrukturen	50
4.	3.3	Potenzielle Evapotranspiration	51
4.	3.4	Interzeption	52
4.	3.5	Transpiration	52
4.	3.6	Evaporation	54
5	Testsi	mulationen mit WaSiM-FTH für Untersuchungsstandorte in Sachsen	55
51	103131	Intersuchungsstandorte	
5.1		Eingangsdaten und Parametrisierung des Modells	
5.2	2.1	Parametrisierung der Vegetation	
5	2.2	Parametrisierung des Bodens	
5	2.3	Kalibrierung	58
5.	2.4	Bilanzierung	58
5.3	-	Laußnitz (Kiefernbestand auf stark podsoliger Braunerde. Düben-Niederlausitzer	
-		Altmoränenland)	59
5.	3.1	Bodenparameter	59
5.	3.2	Vegetationsparameter	60

533	Simulationsergebnisse: Bestandesniederschlag/Interzention	60
5.3.4 Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung		60
5.3.5 Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts		
5.4	Colditz (Eichenbestand auf Pseudogley, Sächsisch-Thüringisches Löss-Hügelland)	
5.4.1	Bodenparameter	64
5.4.2	Vegetationsparameter	64
5.4.3	Simulationsergebnisse: Bestandesniederschlag/Interzeption	
5.4.4	Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung	
5.4.5	Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts	65
5.5	Klingenthal (Fichte auf Podsol-Braunerde, Westliches Oberes Erzgebirge)	68
5.5.1	Bodenparameter	68
5.5.2	Vegetationsparameter	68
5.5.3	Simulationsergebnisse: Bestandesniederschlag/Interzeption	69
5.5.4	Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung	69
5.5.5	Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts	70
5.6	Lüttewitz	72
5.6.1	Bodenparameter	72
5.6.2	Vegetationsparameter	72
5.6.3	Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung, Bodenwassergehalt	72
5.6.4	Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts	72
5.7	Lysimeterstation Brandis	74
5.7.1	Bodenparameter	74
5.7.2	Vegetationsparameter	75
5.7.3	Simulationsergebnisse: Evapotranspiration	76
5.7.4	Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung, Bodenwassergehalt, Sickerwassermenge	80
5.7.5	Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts	82
6 Tes	stsimulationen des gekoppelten Modells (WaSiM-ETH/PCGEOFIM [®]) für das	
Sch	nellbachgebiet	85
6.1	Auswahl eines Teileinzugsgebietes der Parthe als Testgebiet	85
6.2	Eingangsdaten für WaSiM-ETH	85
6.2.1	Meteorologische Stationsdaten (Tageswerte)	88
6.2.2	Hydrologische Stationsdaten	88
6.2.3	Räumliche Daten für das Parthe-Einzugsgebiet als 125 m-Gitterdaten (Grids)	88
6.2.4	Anpassung der bestehenden KliWEP1-Parametrisierung für das Schnellbachgebiet	90
6.2.5	Makroporen	95
6.2.6	Drainagen	95
6.3	Eingangsdaten für PCGEOFIM [®] - das Teilmodell Schnellbachgebiet	96
6.4	Simulationsergebnisse für die ungesättigte Zone, gekoppeltes Modell WaSiM-ETH/	
	PCGEOFIM [®]	97
6.5	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss mit Lysimeterdaten (PCGEOFIM®	
	stand alone)	103
6.6	~·····································	. 105
	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] /	. 105
	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH	. 103
7 711	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH	. 113
7 Zus	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETHsammenfassung	. 113 . 121
7 Zus 8 Lite	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH	. 103 . 113 . 121 . 123
7 Zus 8 Lite 9 An	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127
7 Zus 8 Lite 9 Ani 9.1	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127
7 Zus 8 Lite 9 Ani 9.1 9.2	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung eratur hang Laußnitz Colditz.	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 128
 7 Zus 8 Lite 9 Ani 9.1 9.2 9.3 	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung eratur hang Laußnitz Colditz Klingenthal	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 127 . 128 . 129
 7 Zus 8 Lite 9 Ani 9.1 9.2 9.3 9.4 	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung eratur hang Laußnitz Colditz Klingenthal Lüttewitz	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 127 . 128 . 129 . 130
 Zus Lite Ani Ani Ani Ani Ani Ani 	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung eratur	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 127 . 128 . 129 . 130 . 132
7 Zus 8 Lita 9 Ani 9.2 9.3 9.4 9.5 9.5.1	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 127 . 128 . 129 . 130 . 132 . 132
7 Zus 8 Lite 9 Ani 9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.5.1 9.5.2	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung eratur	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 127 . 128 . 129 . 130 . 132 . 132 . 135
7 Zus 8 Lite 9 Ani 9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.5.1 9.5.2 9.5.3	Simulationsergebnisse Grundwasser und Abfluss, gekoppeltes Modell PCGEOFIM [®] / WaSiM-ETH sammenfassung	. 103 . 113 . 121 . 123 . 127 . 127 . 127 . 128 . 129 . 130 . 132 . 132 . 135 . 137

Tabellenverzeichnis

16
23
45
nter- 55
64
66
71
73
75
83
84
84
91
91
92
ept94
auf 102
auf 102
ums 104
109
ech- 113
113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Relative Sonnenscheindauer (SSD) bei KliWEP1 sowie im Rahmen von KliWEP2 korrigierte Werte	18
Abbildung 2:	Beobachtete und anhand der Inputdateien von KliWEP1 simulierte Durchflüsse am Pegel Großbardau im Jahr 1986	18
Abbildung 3:	Modellkomponenten und Datenflüsse in WaSiM-ETH	20
Abbildung 4:	Simulation der vertikalen Bodenwasserflüsse in WaSiM-ETH-2	21
Abbildung 5:	Topographische Analyse des digitalen Höhenmodells mit TANALYS	22
Abbildung 6:	Schematische Darstellung eines Grundwasserstockwerkes mit zwei geschichteten Grundwasserleitern.	25
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Grundwasserbilanz in einem finiten Volumenelement	26
Abbildung 8:	Horizontale und vertikale Kopplungen eines Restlochs an den Aquifer	27
Abbildung 9:	Diskretisierung des Grundwasserstockwerkes in finite Volumen	28
Abbildung 10:	Das finite Volumenelement ijk mit den Verbindungen zu den Nachbarn	29
Abbildung 11:	Online-Kopplung Geofim und WaSiM-ETH	33
Abbildung 12:	Prinzipielle Möglichkeiten der Datenübergabe von Geofim an WaSiM-ETH. A) Grundwasseroberfläche (GWO) von Geofim zum Zeitpunkt t liegt unterhalb der von WaSiM-ETH berechneten, B) umgekehrter Fall; Θ = akt. Bodenwassergehalt, Θ_{sat} = Bodenwassergehalt bei Sättigung	34
Abbildung 13:	Aufbau der Übergabedatei von WaSiM-ETH zu Geofim, hier: Oberflächenabfluss	36
Abbildung 14:	Aufbau des Parameterblocks [External Coupling] in der WaSiM-ETH-Steuerdatei	36
Abbildung 15:	Bisherige Parametrisierung der Landnutzung in WaSiM-ETH (KliWEP1)	39
Abbildung 16:	Erweiterte Parametrisierung der Landnutzung in WaSiM-ETH. Oben: "multi-line" Format (Parametrisierung mit Zeilenumbruch), unten: "single-line" Format (Parametrisierung ohne Zeilenumbruch))	40
Abbildung 17:	Bisherige Parametrisierung der Bodenarten (Methode 2) in WaSiM-ETH	44
Abbildung 18:	Erweiterte Bodentabelle in WaSiM-ETH mit Definition von 2 Bodenprofilen. Oben: "multi-line" Format (Parametrisierung mit Zeilenumbruch), unten: "single-line" Format (Parametrisierung ohne Zeilenumbruch)	46
Abbildung 19 [.]	Parametrisierung des Makroporenflusses in der erweiterten Bodentabelle	49
Abbildung 20:	Erweiterte 2-teilige Landnutzungstabelle in WaSiM-ETH	
Abbildung 21:	Abhängigkeit der Transpiration vom Bodenwassergehalt. nFK: nutzbare Feldkapazität, DW: Drainwasser (oder Gravitationswasser), PWP: permanenter Welkepunkt, FK: Feldkapazität, Sat: Sättigung, HReduDry: Grenzwert für den Beginn von Trockenstress, TReduWet: Grenzwert für den Beginn von Nässestress, LimitReduWet: max. Reduktion der Transpiration infolge Nässestress	53
Abbildung 22:	Standort Laußnitz: pF-Kurven. Punkte: Messwerte	59
Abbildung 23:	Laußnitz, gemessener und simulierter Bestandesniederschlag; oben: kumulierte Tageswerte; unten: kumulierte Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten.	61
Abbildung 24:	Laußnitz: gemessene und simulierte Saugspannungen. Horizontabfolge und Horizontmächtigkeiten entsprechen den Vorgaben, Courant-Kriterium wird verletzt	62
Abbildung 25:	Laußnitz: gemessene und simulierte Saugspannungen unter Einhaltung des Courant- Kriteriums. Horizontabfolge und Horizontmächtigkeiten wurden modifiziert.	63
Abbildung 26:	Standort Colditz: pF-Kurven. Punkte: Messwerte	65
Abbildung 27:	Colditz, gemessener und simulierter Bestandesniederschlag; oben: kumulierte Tageswerte; unten: kumulierte Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten	66

Abbildung 28:	Gemessene und simulierte Saugspannungen in den drei Untersuchungstiefen in Colditz	.67			
Abbildung 29:	Colditz: Zusammenhang zwischen Direktabfluss und Freilandniederschlag				
Abbildung 30:	Standort Klingenthal: pF-Kurven. Punkte: Messwerte				
Abbildung 31:	Klingenthal. Gemessener und simulierter Bestandesniederschlag: kumulierte Tageswerte sowie die kumulierten Abweichungen zwischen gemessenem um simulierten Werten	.69			
Abbildung 32:	Gemessene und simulierte Saugspannungen in den drei Untersuchungstiefen in Klingenthal.	70			
Abbildung 33:	Klingenthal: Vergleich der kumulierten Direktabflüsse mit und ohne Makroporen	71			
Abbildung 34:	Lüttewitz: Gemessene und simulierte Saugspannungen in 30 cm und 60 cm Tiefe	73			
Abbildung 35:	Lüttewitz: Gemessener und simulierter Wassergehalte in 30 cm und 60 cm Tiefe	74			
Abbildung 36:	Brandis, pF-Kurven. a) Lysimeter 5/6, b) Lysimeter 7/4, c) Lysimeter 8/6	76			
Abbildung 37:	Lysimeter 5/6, Jahresverlauf der ETR, 1997-2000	77			
Abbildung 38:	Lysimeter 5/6, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Evapotranspiration, unten: kumulierte Differenzen	.79			
Abbildung 39:	Lysimeter 7/4, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Evapotranspiration, unten: kumulierte Differenzen	.79			
Abbildung 40:	Lysimeter 8/6, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Evapotranspiration, unten: kumulierte Differenzen	80			
Abbildung 41:	Lysimeter 8/6: gemessene und modellierte Wassergehalte in den drei Tiefen 50 cm, 150 cm und 250 cm.	81			
Abbildung 42:	Lysimeter 8/6: gemessene und modellierte Tensionen in den Tiefen 40 cm, 55 cm, 150 cm und 200 cm.	.82			
Abbildung 43:	Lysimeter 8/6, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Tiefensickerung, unten: kumulierte Differenzen	83			
Abbildung 44:	Einzugsgebiet des Schnellbachs. Der Bildausschnitt zeigt etwa das untere Drittel des Untersuchungsgebietes mit Blickrichtung nach Nordosten; (Datum der Aufnahme: 14.09.2005, Foto: J. Scherzer).	.86			
Abbildung 45:	Schnellbach, etwa 1,7 km oberhalb Pegel; Blickrichtung flussaufwärts. Standort ist ein Feldwegübergang unterhalb der Ortslage Großbuch; (Datum der Aufnahme: 14.09.2005, Foto: J. Scherzer)	.86			
Abbildung 46:	Diskretisierung im Modell Part2004 (500 m x 500 m)	87			
Abbildung 47:	Diskretisierung im Modell Part2005 (125 m x 125 m)	87			
Abbildung 48:	ober- und unterirdisches Einzugsgebiet der Parthe (311.4 km ² bzw. 443.7 km ²) und extrahiertes Schnellbachgebiet (7.9 km ²) sowie Lage der verfügbaren meteorologischen Stationen	.89			
Abbildung 49:	Ausgewählte Raumdaten vom Schnellbachgebiet im 125 m-Grid (Gridbox: 30 x 40 Zellen)	.90			
Abbildung 50:	Parametrisierung der Waldtypen am Beispiel einer Birken-, Kiefer-, Kraut und einer Grassschicht im Einzugsgebiet des Schnellbachs. Oben: Blattflächenindex (LAI), unten: Vegetationsbedeckungsgrad (vcf)	.93			
Abbildung 51:	Lage der Lupe 3 im Modell PART2005 (gelb eingefärbt: Einzugsgebiet des Schnellbachs)	.96			
Abbildung 52:	Beispiel für eine Exportrandbedingung	97			
Abbildung 53:	Modellierte Saugspannungen an Kontrollplot 9, Kiefernmischwald auf Parabraunerde	.99			
Abbildung 54:	Modellierte Wassergehalte an Kontrollplot 9, Kiefernmischwald auf Parabraunerde1	00			
Abbildung 55:	Modellierte Saugspannungen an Kontrollplot 10, Wintergetreide auf Pseudogley- Parabraunerde	01			
Abbildung 56:	Modellierte Grundwasserneubildung für Kontrollplot 9 (Kiefernmischwald auf Parabraunerde) in den Jahren 1997-20031	02			

Abbildung 57:	Vergleichende Auswertung der Jahreswerte von modellierter Interzeption und Transpiration im Schnellbachgebiet, gekoppelter Modus WaSiM-ETH/ PCGEOFIM [®] . Interzeption: hoher Wert = 200 mm, niedriger Wert = 0 mm; Transpiration: hoher Wert = 350 mm, niedriger Wert = 0 mm	03
Abbildung 58:	Vergleichende Auswertung des modellierten mittleren Grundwasserflurabstandes sowie der mittleren jährlichen Direktabflusses im Schnellbachgebiet, gekoppelter Modus WaSiM-ETH/PCGEOFIM [®] . Grundwasserflurabstand: hoher Wert = 0 m, niedriger Wert = 9 m; Direktabfluss: hoher Wert = 208 mm, niedriger Wert = 1 mm 10	04
Abbildung 59:	Bilanz Einzugsgebiet des Schnellbachs (blau: Grundwasservorrat, grün: Grundwasserneubildung, zyan: See am Pegel Großbardau, rot: Summe Basisabflüsse Schnellbach, braun: Abflüsse aus dem Einzugsgebiet); PCGEOFIM [®] stand-alone, GWN auf Grundlage von Lysimeterdaten	05
Abbildung 60:	GWN im Einzugsgebiet des Schnellbachs ermittelt auf der Basis von Lysimeterdaten	06
Abbildung 61:	Grundwasserneubildung bei einem Flurabstand von 0,5 m in Lysimeter 4 10	07
Abbildung 62:	Grundwasserneubildung nach Gleichung 24 bei einem Flurabstand von 1,0 m in Lysimeter 4	07
Abbildung 63:	Grundwasserneubildung nach Gleichung 24 bei einem Flurabstand von 1,5 m in Lysimeter 4	08
Abbildung 64:	Grundwasserneubildung nach Gleichung 24 bei einem Flurabstand von 2,0 m in Lysimeter 4	08
Abbildung 65:	Grundwasserneubildung nach Gleichung 24 bei einem Flurabstand von 0,5 m in Lysimeter 4 mit veränderten Grenzen für fla in Gleichung 24	09
Abbildung 66:	Abfluss am Pegel Großbardau (rot: Berechnungsergebnisse, schwarz: Messwerte); PCGEOFIM [®] stand-alone, GWN auf Grundlage von Lysimeterdaten	10
Abbildung 67:	Hydroisohypsen am 01.01.1984 im Einzugsgebiet des Schnellbachs; PCGEOFIM [®] stand-alone, GWN auf Grundlage von Lysimeterdaten; (Zahlenangaben für die einzelnen GW-Pegel: Pegelnr., Spiegelhöhe in [m ü. NN] modelliert, Beobachtungsdatum, Spiegelhöhe in [m ü. NN] gemessen)	11
Abbildung 68:	Hydroisohypsen am 01.01.2004 im Einzugsgebiet des Schnellbachs; PCGEOFIM [®] stand-alone, GWN auf Grundlage von Lysimeterdaten; (Zahlenangaben für die einzelnen GW-Pegel: Pegelnr., Spiegelhöhe in [m ü. NN] modelliert, Beobachtungsdatum, Spiegelhöhe in [m ü. NN] gemessen)	12
Abbildung 69:	GWN im Einzugsgebiet des Schnellbachs; gekoppeltes Modell Geofim/ WaSiM-ETH	14
Abbildung 70:	Bilanz Einzugsgebiet des Schnellbachs (blau: Grundwasservorrat, grün: Grundwasserneubildung, zyan: See am Pegel Großbardau, rot: Summe Basisabflüsse Schnellbach, braun: Abflüsse aus dem Einzugsgebiet); PCGEOFIM [®] und WaSiM-ETH gekoppelt	14
Abbildung 71:	Vergleich der berechneten Grundwasserneubildung bei Kopplung Geofim/ WaSiM-ETH Bearbeitungsstand 12/2005 (Bodenparametrisierung auf Grundlage von KliWEP1) und 11/2006 (KliWEP2)	15
Abbildung 72.	Flurabstände am 01 01 2004 Zvan: flurnah hellbraun: 1-3 m dunkelbraun: flurfern 11	16
Abbildung 73:	Abfluss am Pegel Großbardau (rot: Berechnungsergebnisse, schwarz: Messwerte); gekoppeltes Modell Geofim/WaSiM-ETH, Endergebnis KliWEP2	17
Abbildung 74:	Hydroisohypsen am 01.01.1984 im Einzugsgebiet des Schnellbachs; gekoppeltes Modell Geofim/WaSiM-ETH; (Zahlenangaben für die einzelnen GW-Pegel: Pegelnr., Spiegelhöhe in [m ü. NN] modelliert, Beobachtungsdatum, Spiegelhöhe in [m ü. NN] gemessen)	18
Abbildung 75:	Hydroisohypsen am 01.01.2004 im Einzugsgebiet des Schnellbachs; gekoppeltes Modell Geofim/WaSiM-ETH; (Zahlenangaben für die einzelnen GW-Pegel: Pegelnr., Spiegelhöhe in [m ü. NN] modelliert, Beobachtungsdatum, Spiegelhöhe in [m ü. NN] gemessen)	19

Abbildung 76: Abfluss am Pegel Großbardau in mm/mon (rot: Berechnungsergebnisse, schwarz:	
Messwerte); gekoppeltes Modell Geofim/WaSiM-ETH, niedrigwasserfokussierte	
Kalibrierung, unter Vernachlässigung von prozessorientierter Modellierung in der	
Bodenzone	.120

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Daten-CD

Inhaltsverzeichnis:

- Unterverzeichnis Bericht
- digitale Versionen des vorliegenden Berichts:
 - Abschlussbericht_KliWEP2.doc (editierbar)
 - Abschlussbericht_KliWEP2.pdf (nicht editierbar)
- Unterverzeichnis Ergebnisse
- Eingangsdateien für die Modellierung, aktuelle Modellversion und Ergebnisdateien
 - Unterverzeichnis Brandis
 - input-Ordner (alle Input-Dateien für die Modellierung)
 - control-Ordner (alle im Bericht zitierten Steuerungsdateien)
 - Ergebnis-Ordner (Ergebnisdateien zu den Steuerungsdateien)
 - Unterverzeichnis Colditz
 - input-Ordner (alle Input-Dateien für die Modellierung)
 - control-Ordner (Steuerungsdatei)
 - Ergebnis-Ordner (Ergebnisdatei)
 - Unterverzeichnis Klingenthal
 - input-Ordner (alle Input-Dateien für die Modellierung)
 - control-Ordner (alle im Bericht zitierten Steuerungsdateien)
 - Ergebnis-Ordner (Ergebnisdateien zu den Steuerungsdateien)
 - Unterverzeichnis Laußnitz
 - input-Ordner (alle Input-Dateien für die Modellierung)
 - control-Ordner (alle im Bericht zitierten Steuerungsdateien)
 - Ergebnis-Ordner (Ergebnisdateien zu den Steuerungsdateien)
 - Unterverzeichnis Lüttewitz
 - input-Ordner (alle Input-Dateien für die Modellierung)
 - control-Ordner (Steuerungsdatei)
 - Ergebnis-Ordner (Ergebnisdateien)
 - Unterverzeichnis Schnellbach
 - Unterverzeichnis WaSiM-ETH
 - input-Ordner (alle Input-Dateien für die Modellierung)
 - control-Ordner (Steuerungsdatei)
 - Ergebnis-Ordner (ausgewählte Ergebnisdateien)
 - Unterverzeichnis PCGEOFIM®
 - installier- und ausführbares PCGEOFIM-Modell, einschließlich Parthe/Schnellbach-Modell ("part2005") und Dokumentation
 - Unterverzeichnis WaSiM-ETH Version 7.2.7
 - ausführbare Version des erweiterten WaSiM-ETH-Modells, Dokumentation

Abkürzungsverzeichnis

Θ	aktueller Wassergehalt [-]					
α	empirischer Parameter [m ⁻¹]					
Ψ	Saugspannung [m]					
τ	Tortuosität, Skalierungsfaktor					
Θ_r	residualer Wassergehalt bei $k(\Theta) = 0$ [-]					
Θ_{s}	Sättigungswassergehalt [-]					
$\Delta \Theta$	Veränderung des Wassergehalts im Bodenspeicher [mm]					
ΔSI	Veränderung des Wassergehalts im Interzeptionsspeicher [mm]					
$\Delta SSTO$	Veränderung des Wassergehalts im Schneespeicher [mm]					
Δt	Zeitschritt [s]					
Δx	räumlicher Knotenabstand [m]					
AG	Auftraggeber					
AltDep	Verschiebung des JulDay pro Höhenmeter [-]					
AN	Auftragnehmer					
a_r	Verhältnis zwischen Dicke der Bodenschicht und Fläche einer Rasterzelle					
a _{scale}	empirischer skalenabhängiger Parameter, der die Aggregatgeometrie erfasst					
c ₀	Tag-Grad-Faktor [mm/(°C * d)]					
d	Schichtmächtigkeit [m]					
d_1	Vegetationsbeginn					
$d_{1,2,3,4}$	Stützstellen in Kalendertagen					
$d_{14,400}$	Bezugswerte für 400 m ü. Meer					
d ₂	volle Entfaltung der Vegetation, d_3 : Beginn und d_4 : Ende des Laubwurfes bzw. Rück gang der Vegetationsintensität					
d _r	Drainagedichte für Interflow [1/m]					
EI	Interzeptionsverdunstung $[mm/\Delta t]$					
ETP	Grasreferenzverdunstung [mm/Zeitschritt]					
ET _{real}	reale Evapotranspiration					
fla	Flurabstand [m]					
FNS	Freilandniederschlag					
Geofim	Simulator des Programmsystems PCGEOFIM [®]					
GWN	Grundwasserneubildung					
GWN_LYSI	gemessene Lysimeterversickerung [mm/Zeitschritt]					
GWO	Grundwasseroberfläche					
Н	Standrohrspiegelhöhe [m]					
h_h	hydraulische Höhe in Abhängigkeit vom Wassergehalt als Summe aus Saugspannung ψ (mit $\psi \leq 0$) und geodätischer Höhe h_{geo} [m]					
h _M	Höhe über Meer [m]					
HReduDry	Minimale Saugspannung, bei der Wasserstress auftritt					
HW	Hochwert					
IBGW	Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, Leipzig					
IntercepCap	Dicke des Wassers auf den Blattoberflächen und in Muldenspeichern					
I _{real}	reale Interzeption					
JulDay	Eckdaten (in julianischen Tagen) für Veränderungen in der Vegetationsentwicklung					

$k_{(eff)}$	(effektive) hydraulische Leitfähigkeit [m/s]			
$k(\theta)$	ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei gegebenem Wassergehalt [m/s]			
k _B	Rezessionskonstante für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [m]			
k _D	Speicherkoeffizient für Oberflächenabfluss [h]			
k _f	gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) [m/s]			
k _i	Speicherkoeffizient für Interflow [h]			
KliWEP	Abschätzung der Auswirkung der für prognostizierten <u>Kli</u> maveränderungen auf den <u>W</u> asser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der <u>P</u> arthe			
k _{mat}	maximale Leitfähigkeit der Bodenmatrix [m/s]			
k _{rec}	Rezessionskonstante [-]			
k_s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]			
$k_{s,z}$	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in der Tiefe z [m/s]			
LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex) [m ² /m ²]			
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft			
LfUG	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie			
LimitReduWet	Relativer minimaler Wert, um den die Transpiration bei Wassersättigung reduziert werden kann			
т	empirischer Parameter [-], nach Mualem (1976) gilt m = 1-1/n			
\overline{x}	mittlerer gemessener Abfluss			
n	empirischer Parameter [-]			
n _e	entwässerbare Porosität (-)			
NN	Normalnull			
	Programsystem for Computation of GEOFIltration and geoMigration			
PCGEOFIM [®]	Programsystem for Computation of GEOFI ltration and geoMigration			
PCGEOFIM [®] pF	<u>Programsystem for C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>Migration</u> ¹⁰ log (ψ)			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR	<u>Programsystem for Computation of GEOFI</u> ltration and geo <u>Migration</u> ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF	<u>Programsystem for Computation of GEOFI</u> ltration and geo <u>Migration</u> ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i>	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>M</u> igration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q ₀	Programsystem for Computation of GEOFIItration and geoMigration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q ₀ Q _{bas}	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>M</u> igration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h] Basisabfluss [mm/ Δt]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q ₀ Q _{bas} <i>q</i> _{bypass}	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>M</u> igration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h] Basisabfluss [mm/ Δt] vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q ₀ Q _{bas} <i>q</i> _{bypass} Q _{dir}	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>M</u> igration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h] Basisabfluss [mm/ Δt] vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0 Oberflächenabfluss [mm/ Δt]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q ₀ Q _{bas} <i>q</i> _{bypass} Q _{dir} QD _{snow}	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>M</u> igration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h] Basisabfluss [mm/ Δt] vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0 Oberflächenabfluss [mm/ Δt] rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>M</u> igration ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h] Basisabfluss [mm/ Δt] vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0 Oberflächenabfluss [mm/ Δt] rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01] Gesamtabfluss [mm/ Δt]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges Qifl	Programsystem for Computation of GEOFIItration and geoMigration 10 log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zwischenabfluss [mm/Δt]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges Qifl <i>qin</i>	Programsystem for <u>C</u> omputation of <u>GEOFI</u> ltration and geo <u>Migration</u> ¹⁰ log (ψ) korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt] Pedotransferfunktion Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s] Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h] Basisabfluss [mm/ Δt] vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0 Oberflächenabfluss [mm/ Δt] rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01] Gesamtabfluss [mm/ Δt] Zwischenabfluss [mm/ Δt] Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges Qifl <i>qin</i> <i>qout</i>	Programsystem for Computation of GEOFIProgramsystem for Computation of GEOFIItration and geoMigration10log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zwischenabfluss [mm/Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges Qifl <i>qin</i> <i>qout</i> <i>R</i> ²	Programsystem for Computation of GEOFIItration and geoMigration $^{10}log(\psi)$ korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zwischenabfluss [mm/Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]Korrelationskoeffizient			
PCGEOFIM [®] pF PM_KORR PTF q Q_0 Q_{bas} q_{bypass} Q_{dir} QD_{snow} Q_{ges} Q_{ifl} q_{in} q_{out} R^2 r_c	Programsystem for Computation of GEOFI ¹⁰ log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zwischenabfluss [mm/Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]KorrelationskoeffizientVerdunstungswiderstand [s/m]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> <i>Q</i> ₀ <i>Q</i> _{bas} <i>q</i> _{bypass} <i>Q</i> _{dir} <i>QD</i> _{snow} <i>Q</i> _{ges} <i>Q</i> _{ifl} <i>q</i> _{in} <i>q</i> _{out} <i>R</i> ² r _c r _s _evap	Programsystem for Computation of GEOFI ¹⁰ log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/ Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/ Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/ Δt]Zwischenabfluss [mm/ Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]KorrelationskoeffizientVerdunstungswiderstand [s/m]Verdunstungswiderstand (Evaporation) [s/m]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges Qifl <i>qin</i> <i>qout</i> <i>R</i> ² r _c rs_evap rs_intercept	Programsystem for Computation of GEOFI ltration and geoMigration 10 log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zwischenabfluss [mm/Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]KorrelationskoeffizientVerdunstungswiderstand [s/m]Verdunstungswiderstand (Interzeption) [s/m]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> <i>Q</i> ₀ <i>Q</i> _{bas} <i>q</i> _{bypass} <i>Q</i> _{dir} <i>QD</i> _{snow} <i>Q</i> _{ges} <i>Q</i> _{ifl} <i>q</i> _{in} <i>q</i> _{out} <i>R</i> ² r _c r _s _evap rs_intercept rsc	Programsystem for Computation of GEOFI ¹⁰ log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/ Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/ Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/ Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]KorrelationskoeffizientVerdunstungswiderstand [s/m]Verdunstungswiderstand (Interzeption) [s/m]Verdunstungswiderstand (Transpiration) [s/m]			
PCGEOFIM [®] <i>pF</i> PM_KORR PTF <i>q</i> Q0 Qbas <i>qbypass</i> Qdir QD _{snow} Qges Qifl <i>qin</i> <i>qout</i> <i>R</i> ² r _c rs_evap rs_intercept rsc RW	Programsystem for Computation of GEOFI ltration and geoMigration 10 log (ψ)korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell) [mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]KorrelationskoeffizientVerdunstungswiderstand [s/m]Verdunstungswiderstand (Interzeption) [s/m]Verdunstungswiderstand (Transpiration) [s/m]Rechtswert			
PCGEOFIM [®] pF PM_KORR PTF q Q_0 Q_{bas} q_{bypass} Q_{dir} QD_{snow} Q_{ges} Q_{ifl} q_{in} q_{out} R^2 r_c r_s_evap $r_s_intercept$ r_{sc} RW S_0	Programsystem for Computation of GEOFIltration and geoMigration $^{10}log(ψ)$ korrigierter Niederschlag [mm/Zeitschritt]PedotransferfunktionFluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]Skalierungsparameter für Basisabfluss (relevant für Simulationen ohne GW-Modell)[mm/h]Basisabfluss [mm/Δt]vertikaler Wasserfluss in Makroporen zwischen den Bodenschichten bei z>0Oberflächenabfluss [mm/Δt]rel. Anteil oberflächlich abfließender Schneeschmelze [01]Gesamtabfluss [mm/Δt]Zwischenabfluss [mm/Δt]Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]KorrelationskoeffizientVerdunstungswiderstand [s/m]Verdunstungswiderstand [s/m]Verdunstungswiderstand (Interzeption) [s/m]Verdunstungswiderstand (Transpiration) [s/m]Rechtswertspezifischer Speicherkoeffizient [1/m]			

SBS	Staatsbetrieb Sachsenforst (ehemals LFP)		
$\mathbf{S}_{\mathrm{Ende}}$	Summe aller Speicherfüllungen zu Ende eines Bilanzierungszeitraumes		
S _{mat}	Grenzwert, ab welchem Makroporenfluss entsteht		
t	Zeit [s]		
TReduWet	Relativer Wassergehalt des Bodens für beginnenden Wasserstress [-]		
UBG	Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft		
ν	Geschwindigkeit [m/s]		
V _A	Flächenstromdichte [m/s]		
vcf	Vegetationsbedeckungsgrad		
$V_{\rm V}$	Volumenstromdichte [1/s]		
WaSiM-ETH	Water Flow and Balance Simulation Model		
x_i	gemessener Abfluss		
\mathcal{Y}_i	simulierter Abfluss		
Ζ	Tiefe [m]		
Z ₀	effektive Vegetationshöhe [m]		
ZB	Zwischenbericht		
ΔS	Speicheränderung		
Θ	Wassergehalt [m ³ /m ³]		
ψ	Saugspannung [mm]		

1 Aufgabenstellung

Klimastudien zeigen für Sachsen gravierende Auswirkungen eines bereits beobachteten und noch zu erwartenden Klimawandels. Für die Fachplanungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG) und des Staatsbetriebes Sachsenforst (SBS) besteht die Notwendigkeit, die Folgen sowohl von Klimaveränderungen als auch von Landnutzungsänderungen auf Wasser-, Land- und Forstwirtschaft abzuschätzen. Zu untersuchen sind u. a. die Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen, Waldmehrung und Waldumbau auf den Wasserhaushalt und das Abflussgeschehen in mikro- bis mesoskaligen Gewässereinzugsgebieten. Hierfür stellen prozessorientierte Gebietswasserhaushaltsmodelle wie WaSiM-ETH ein geeignetes Tool dar.

In einer Voruntersuchung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG) wurde Wa-SiM-ETH bereits für das Einzugsgebiet der Parthe kalibriert und eine erste Kopplung mit dem Grundwasser-/Oberflächenwassermodell Geofim durchgeführt (Projekt "KliWEP1"). Hierbei ergab sich konkreter Weiterentwicklungsbedarf für das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH. Zur standardisierten Anwendung des Modells in den Geschäftsbereichen des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) bedarf es prozessorientierter Weiterentwicklungen vor allem in den Modulen "Verdunstung" (Penman-Monteith-Ansatz) und "Boden" (Richards-Ansatz) sowie an der Schnittstelle zum Grundwassermodell.

Aus Wasserhaushaltsuntersuchungen zum Waldumbau und dem forsthydrologischen Monitoring des SBS ist bekannt, dass die Evapotranspirationsdynamik von Wäldern in erheblichem Umfang von Strukturparametern der Bestände (u. a. Haupt- und Nebenbaumarten, Unterbau, Bestandeshöhe und -dichte) abhängt. Ein zentraler Aspekt von KliWEP2 ist daher die Erweiterung von WaSiM-ETH für die Berücksichtigung derart komplexer Vegetationsstrukturen. Hierzu muss die verwendete Penman-Monteith-Methode zur Evapotranspirationsberechnung so modifiziert werden, dass der Energiefluss konkret für diejenigen Orte im Bestand berechnet wird, an welchen der Energieumsatz stattfindet bzw. die höchsten Widerstände auftreten. Der bisher singuläre Interzeptionsspeicher wird im Rahmen der Erweiterung als Speicherkaskade unter Berücksichtigung artspezifischer Blattspeichereigenschaften sowie der Bedeckungsgrade der einzelnen Vegetationskomponenten realisiert. Aufbauend auf die Modellerweiterungen sollen weitere Ausgabeparameter realisiert und eine beliebige Anzahl phänologischer Phasen ermöglicht werden.

Ein weiteres Ziel von KliWEP2 sind prozessorientierte Modellerweiterungen im Bereich der Speicherund Transporteigenschaften der Böden, welche u. a. durch die vertikale Abfolge von Bodenhorizonten sowie durch Makroporenabfluss entscheidend beeinflusst werden. Es ist daher eine horizontweise Parametrisierung der Retentionskurve (pF-Kurve) und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion in WaSiM-ETH zu implementieren. Diese Modifikationen ermöglichen zukünftig insbesondere auch eine verbesserte Abbildung wald- und landwirtschaftsspezifischer Horizontabfolgen bei der Einzugsgebietsmodellierung und der Abschätzung von Klimafolgen.

Darüber hinaus ist im Rahmen von KliWEP2 der Datenaustausch zwischen dem hydrologischen Einzugsgebietsmodell WaSiM-ETH und dem Grundwasserströmungs- und -transportmodell PCGEOFIM[®] (bzw. dessen Simulator Geofim) entscheidend zu verbessern. Hierbei müssen insbesondere die Kopplungsmechanismen zwischen den beiden Modellen überarbeitet und erstmals eine echte online-Kopplung ermöglicht werden, was eine entscheidende Verkürzung der Intervalle für den Datenaustausch mit sich bringt: Während in KliWEP1 die Kopplung zwischen PCGEOFIM[®] und WaSiM-ETH auf Monatsschrittbasis vollzogen wurde, hat nun der Datenabgleich zwischen den Modellen pro Rechenzeitschritt, d. h. auf Tagesschrittbasis, zu erfolgen. Damit soll insbesondere gewährleistet werden, dass beide Modelle jeweils mit identischen Grundwasseroberflächen rechnen. Darüber hinaus ist auch die Weitergabe des oberirdischen Abflusses und des Zwischenabflusses an PCGEOFIM[®] zu optimieren.

Zum Nachweis der erfolgreichen Erweiterung von WaSiM-ETH um komplexe Vegetationsstrukturen und prozessorientierte Bodeneigenschaften werden umfangreiche Testsimulationen auf Grundlage von bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Messdaten von Level II - Standorten des SBS (Laußnitz, Colditz, Klingenthal), dem Versuchsstandort Lüttewitz der LfL und drei Lysimetern der Station Brandis durchgeführt. Abschließend wird das gekoppelte Modellsystem WaSiM-ETH / PCGEOFIM[®], aufbauend auf einer erweiterten KliWEP1- Parametrisierung, an einem Teileinzugsgebiet der Parthe, dem ca. 8 km² umfassenden Schnellbachgebiet, getestet.

Durch die Implementierung bzw. Erweiterung der Modellkomponenten ist zu erwarten, dass die Prognosefähigkeit des Modellsystems WaSiM-ETH bzw. WaSiM-ETH / PCGEOFIM[®] hinsichtlich Klimawandel, Landnutzungsszenarien und Waldumbau wesentlich verbessert wird.

2 Datengrundlage

2.1 Datenübergabe

Wesentliche Grundlage für das Projekt KliWEP2 sind modell- sowie einzugsgebietsspezifische Daten aus dem Projekt KliWEP1, welche zu Projektbeginn bzw. während der Projektlaufzeit vom Auftraggeber (AG) an den Auftragnehmer (AN) übergeben wurden (vgl. Tabelle 1).

lfd. Nr.	Daten- träger	Datenbezeich- nung	übergeben am	übergeben durch	Inhalt
1	CD	KliWEP1	09.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	Ordner "Bericht", "Input", "Karten"
2	email	wasimvcz.exe	18.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	Wasimvcz.exe Version 4.0e
3	email	Anlagen 10 - 15	29.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	Digitale Versionen der Anla- gen 10 - 15 aus KliWEP Teill
4	CD	Input-Ordner, wasimvcz.exe (Version 5.0, "Revision 18"), wasimvcz.ctm	29.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	von IBGW zur Modellierung im Rahmen von KliWEP Teil1 verwendete Daten
5	CD	LTV Gewässer- profile Parthe 2004 CD 1 und 2	09.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	Gewässerprofile der Parthe
6	DVD	Out- put_2050_FN92_ mit Kopplung	31.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	Ordner "output"; "save", "von_IBGW"
7	DVD	Out- put_2050_FN205 0_mit Kopplung	31.08.2005	Frau Dr. Kaltz (LfUG)	Ordner "output_FN2050_mit Kopplung"; "sa- ve_FN2050_mit Kopplung", "von_IBGW"
8	email	Daten Lüttewitz	19.09.2005	Herr Schinde- wolf (LfL)	bodenhydrologische Daten und klimatische Daten LfL Standort Lüttewitz
9	email	schnellbn.xls, schnellbach.xls	13.10.2005	Frau Dr. Hafer- korn über Herrn Dr. Sames	Pegeldaten (Abflüsse) Schnellbach 01/1980 – 07/2005
10	email	Lüttewitz.xls	31.01.2006	Herr Dr. Zacha- rias (LfL)	bodenhydrologische Daten LfL Standort Lüttewitz
11	email	Daten Brandis	10.02.2006 17.02.2006 23.02.2006	Frau Dr. Hafer- korn (UBG)	bodenhydrologische Daten Lysimeterstation Brandis
12	Ordner, CD	Fotodokumentati- on (Leitz-Ordner und CD), Kopien	27.02.2006	Frau Dr. Hafer- korn (UBG)	phänologische Daten Lysime- terstation Brandis

 Tabelle 1:
 Datengrundlage für KliWEP2

UDATA - Umweltschutz und Datenanalyse (federführend), Maconring 98a, 67434 Neustadt/Wstr. Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, Nonnenstraße 9, 04229 Leipzig Dr. Karsten Jasper, Postweg 11, CH 8143 Stallikon

2.2 Datenprüfung

Die aus dem Projekt KliWEP1 übernommenen Daten (vgl. Tabelle 1) wurden intensiv auf Konsistenz und auf ihre Eignung zur weiteren Verwendung im Projekt KliWEP2 geprüft.

Wasimvcz.exe-Versionen Es wurden zwei unterschiedliche wasimvcz.exe-Versionen zur Verfügung gestellt: (2) wasimvcz.exe (Version 4.0e) und (4) wasimvcz.exe (Version 5.0, "Revision 18") [Hinweis: die Zahlen in Klammern beziehen sich hier auf die "lfd. Nr." in Tabelle 1]. Version (2) wurde bei Kli-WEP1 für die WaSiM-ETH Simulationen verwendet (Herr Dr. Hertwig, BEAK Consultants GmbH, persönl. Mitteilung vom 18.08.2005), Version (4) wurde bei IBGW GmbH zur Simulation mit dem gekoppelten Modell verwendet (Dr. Sames, IBGW GmbH, persönl. Mitteilung vom 29.08.2005). Version (2) erwies sich in unseren Tests als inkompatibel mit allen uns aus KliWEP1 vorliegenden Steuerdateien. WaSiM-ETH bricht jeweils mit der Fehlermeldung "error in control file, Writegrid Ausfluss fuer snow_model not found!" die Simulation ab. Bei Version (4) tritt dieser Fehler nicht auf. Version (4) ist lauffähig, weist allerdings am Ende der Simulation auf den sogenannten "debug"-Modus hin.

Steuerdateien Es wurden insgesamt vier Steuerdateien übergeben: (1) r125part_125.txt, (2) wasimvcz_Bericht_FN92_Kopplung.ctl, (3) wasimvcz_Bericht_FN2050_Kopplung.ctl und (4) wasimvcz.ctm. Steuerdatei (1) rechnet mit Landnutzungen und Böden von 2025, kann aber nicht kompiliert werden (Bildschirmausgabe: "possible error in control file! undefied symbol at line 528"). Steuerdatei (2) ist lauffähig und simuliert mit Landnutzungen und Böden von 1992. Steuerdatei (3) ist ebenfalls lauffähig und verwendet Landnutzungen und Böden von 2050. Steuerdatei (4) ist identisch mit Steuerdatei (2). Die Versionen (2) und (4) erwiesen sich nach (Um-)Definition einiger für die Simulation notwendiger Variablen als lauffähig.

Input-Ordner Es wurden zwei Input-Ordner zur Verfügung gestellt (lfd. Nr. 1 und 4 in Tabelle 1). Die Inhalte der Ordner sind weitgehend identisch. U. a. ist in einem der Ordner die für die Berechnung von Gütemaßen notwendige Datei "SpendePart.txt" enthalten. Die an den Pegeln beobachteten Durchflüsse sind hier in Form von Abflüssen (mm/d) angegeben und werden mit den von WaSiM-ETH gerouteten Abflüssen verglichen (Datei qgkor125.sJahr). In den Steuerdateien (1) bis (4) ist allerdings die Ausgabe der gerouteten Abflüsse in m³/s eingestellt. Für die Berechnung der Gütemaße werden somit Abflüsse (mm/d) mit Durchflüssen (m³/s) verglichen. Der Abschlussbericht KliWEP1 (Seite 60, Abbildung 27) zeigt u. a. die beobachteten Durchflüsse am Pegel Großbardau (Schnellbach) des Jahres 1986. Der AN geht davon aus, dass es sich hierbei um die tatsächlich am Pegel gemessenen Durchflüsse (Urdaten) in m3/s handelt. In der Datei "SpendePart.txt" sind allerdings Abflüsse in mm/d enthalten. Diese wurden ausgehend von einer Einzugsgebietsfläche von 8,6 km² aus den am Pegel beobachteten Durchflüssen errechnet. Im Kapitel [routing model] der Steuerdateien (1) bis (4) ist allerdings ersichtlich, dass modellintern mit einer abweichenden Einzugsgebietsgröße von lediglich 7,67 km² gerechnet wird (vgl. auch Abschlussbericht KliWEP1, Seite 59). Es wurde deshalb im Rahmen von KliWEP2 eine erneute topographische Analyse durchgeführt, bei welcher eine Einzugsgebietsgröße von 7,88 km² berechnet werde. Diese ergibt sich aus 504 Gridelementen zu jeweils 125 · 125 m (vgl. Kapitel 6.2.3). Für den Vergleich gemessener und modellierter Spenden wurden in KliWEP2 deshalb die übergebenen Abflussspenden auf die modellinterne Einzugsgebietsgröße von 7,88 km² umgerechnet.

Die Datei "ssd__80-50.tab" enthält in täglicher Auflösung die bei KliWEP1 verwendete relative Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1980 – 2050. Die relative Sonnenscheindauer wurde hier offensichtlich auf die Gesamtlänge eines Tages bezogen (24 h) (vgl. Abbildung 1). WaSiM-ETH benötigt als Eingangsgröße allerdings Daten der relativen Sonnenscheindauer, bezogen auf die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer. Als Folge davon wurde bisher durchgehend mit erheblich zu niedrigen Werten für die relative Sonnenscheindauer gerechnet (vgl. Abbildung 1). Die aufgezeigte Diskrepanz zwischen angenommener und tatsächlicher Sonnenscheindauer hat Auswirkungen auf die Berechnung der Verdunstung nach Penman-Monteith und führt in Abhängigkeit von der Vorgehensweise bei der Kalibrierung entweder zu Fehlern bei der Abflussberechnung oder zu nur eingeschränkt realistischen Parameterannahmen im Bereich der Oberflächenwiderstände. Auch diese Daten wurden für die Berechnungen in KliWEP2 korrigiert.

Output Ordner Es wurden zwei undokumentierte DVDs mit Output-Ordnern übergeben: DVD (1): "Output_2050_FN92_mit Kopplung", DVD (2): "Output_2050_FN2050_mit Kopplung"). Diese DVDs verfügen über 16945 bzw. 12542 Dateien. DVD (1) enthält im Ordner "vonIBWG" Dateien, die geroutete

Abflüsse für jeweils den Dezember der Jahre 1980 bis 2004 enthalten. Allerdings enthält keine dieser Dateien geroutete Abflüsse am Pegel Großbardau für das gesamte Jahr 1986 (wie sie im Abschlussbericht KliWEP1, Abbildung 27, Seite 60 dargestellt sind) bzw. vollständige Darstellungen für andere Jahre des Zeitraums 1980-2004.

Nachbildung der im Rahmen von KliWEP1 erzeugten Durchflüsse am Pegel Großbardau Als Ausgangspunkt für das Projekt KliWEP2 wurde versucht, die modellierten Durchflüsse des Schnellbachs (Abschlussbericht KliWEP1, Seite 60, Abbildung 27) nachzubilden. Dafür wurden die identischen Versionen (2) bzw. (4) der Steuerdatei verwendet.

Trotz intensiver Bemühungen gelang es nicht, die im KliWEP1 – Abschlussbericht dargestellte Durchflusskurve auch nur näherungsweise zu reproduzieren. Die von uns auf Grundlage der vorliegenden Parametrisierung erzeugten Abflüsse weisen wesentlich höhere Spitzen und ein realitätsfernes Abklingverhalten auf (vgl. Abbildung 2). Auch ein vorgeschalteter Simulationslauf des Jahres 1985 mit anschließendem Einlesen aller Speicherfüllungen vom 31.12.1985, 24 Uhr brachte lediglich eine geringfügige Veränderung der Ganglinie, aber keine Annäherung an die im KliWEP1 – Bericht dargestellte Durchflussganglinie.



Abbildung 1: Relative Sonnenscheindauer (SSD) bei KliWEP1 sowie im Rahmen von KliWEP2 korrigierte Werte



Abbildung 2: Beobachtete und anhand der Inputdateien von KliWEP1 simulierte Durchflüsse am Pegel Großbardau im Jahr 1986

3 Modellbeschreibungen

3.1 WaSiM-ETH

3.1.1 Übersicht

WaSiM-ETH ist ein rasterbasiertes flächendifferenziert arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell, welches sich durch ein hohes Maß an Elastizität und Flexibilität auszeichnet. Es wurde zwischen 1993 und 1996 von Jörg Schulla am Geographischen Institut (heute: Institut für Atmosphäre und Klima) der ETH Zürich entwickelt (Schulla 1997). Die Arbeiten zur Entwicklung des Modells waren Bestandteil des EU Projektes "Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources in the European Community" (Kwadaijk und Rotmans 1995) und zielten auf die Erfassung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den regionalen Abfluss und Wasserhaushalt. Damaliges Zielgebiet für den Einsatz von WaSiM-ETH war das voralpine/alpine Thurgebiet (1700 km²) in der Nordost-Schweiz.

In den Folgejahren wurde WaSiM-ETH fortlaufend erweitert und für die Lösung verschiedenster hydrologischer Aufgabenstellungen eingesetzt, z. B. für die Bewässerungssteuerung in ariden und semi-ariden Einzugsgebieten (Schulla et al. 1997), zur Untersuchung des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf Abfluss und Wasserhaushalt (Niehoff et al. 2002), zur gekoppelten Hochwasservorhersage (Jasper et al. 2002), zur Rekonstruktion von historischen Extremabflüssen (Reist et al. 2002) oder zur Simulation von Gletscherschmelze und -abfluss (Klok et al. 2001, Verbunt et al. 2003). WaSiM-ETH wird in etwa 40 Institutionen angewendet, vor allem in Universitäten, Forschungsinstituten, Landesbehörden und Ingenieurbüros. Diese Anwendungen haben sich in zahlreichen Veröffentlichungen niedergeschlagen. Derzeit (Stand 11/2006) existieren mehr als 20 "peer reviewed" Publikationen in internationalen Zeitschriften. Darüber hinaus war WaSiM-ETH bereits Grundlage für mindestens 10 Dissertationen, 12 Diplomarbeiten sowie zahlreiche weitere wissenschaftliche Beiträgen (u. a. auf Konferenzen).

Das Modell WaSiM-ETH kann in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenbereichen angewendet werden. Bisherige Modellanwendungen erstrecken sich von Lysimeterstandorten (z. B., Gurtz et al. 2003) bis hin zu makroskaligen Anwendungen (z. B., Schulla et al. 1999, Kleinn 2002). Zeitliche Auflösungen reichen von Minuten bis zu mehreren Tagen. Prinzipiell können mit WaSiM-ETH sowohl Kurzfrist-(Hochwasserereignisse) als auch Langfristsimulationen (langjährige Wasserhaushaltssimulationen) durchgeführt werden. In Abhängigkeit von der allgemeinen Datenverfügbarkeit und der hydrologischen Aufgabenstellung gestattet WaSiM-ETH die optionale Auswahl von Algorithmen für die Simulation desselben Prozesses. Die minimalen Datenanforderungen an das Modell sind Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur sowie Rasterdaten zur Topographie, der Landnutzung und den Bodeneigenschaften.

Es sind 2 Modellvarianten von WaSiM-ETH verfügbar:

(1) Die ursprüngliche Variante, WaSiM-ETH-1, basiert auf der Anwendung des TOPMODEL-Ansatzes (Beven und Kirbky 1979) zur Simulation der Abflussbildung. Dementsprechend wird in WaSiM-ETH-1 das "Konzept der variablen Sättigungsflächen" verfolgt, ein konzeptioneller Ansatz zur Beschreibung der Abflusskomponenten zwischen und innerhalb der gesättigten und ungesättigten Bodenzone. Die Verwendung dieses Ansatzes verlangt die Einführung einer Reihe von konzeptionellen (physikalisch nicht begründbaren) Parametern, die im Zuge der Modellkalibrierung anzupassen sind.

(2) Der allgemeine Wunsch nach einem physikalisch besser begründeten Modell wurde schließlich mit der Entwicklung von WaSiM-ETH-2 erfüllt. Diese erweiterte Modellvariante wurde ab 1998 entwickelt und enthält als wesentlichen Unterschied zur Vorgängervariante ein verbessertes Bodenmodell, welches auf der Anwendung der "Richards-Gleichung" (Richards 1931) beruht. Gleichzeitig mit dem neuen Bodenmodell wurde auch ein zweidimensionales Grundwasserströmungs- und Transportmodul in WaSiM-ETH-2 integriert. Gegenüber der TOPMODEL-Variante ist die aktuelle Modellvariante (WaSiM-ETH-2) um eine Vielzahl von Modellerweiterungen bereichert: z. B. erweiterte Interpolations-Routinen für meteorologische Daten oder Module zur Erfassung von Gletschern, Be- und Entwässerung, Stofftransport, künstlichen Speichern sowie externen Zu-, Um- und Ableitungen. Grundlage der im aktuellen Projekt KliWEP2 durchgeführten Weiterentwicklungen und Simulationen ist die Modellvariante WaSiM-ETH-2 (Richards-Gleichung), welche zum Projektstart im Juli 2005 in der Version 5.0 / Rev. 18 vorliegt.

WaSiM-ETH ist sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache voll dokumentiert (Schulla und Jasper 1998, 2000) und wird von der Entwicklergruppe, Dr. Jörg Schulla und Dr. Karsten Jasper, kostenfrei zur Verfügung gestellt (http://homepage.hispeed.ch/wasim/download.html).

3.1.2 Modellstruktur

Abbildung 3 veranschaulicht den modularen Aufbau von WaSiM-ETH. Es sind sowohl die Modellkomponenten als auch die simulierten vertikalen und lateralen Wasserflüsse skizziert. Die Module im grau unterlegten Bereich berechnen den Wasserfluss pro Gitterzelle, wohingegen Prozesse wie die Abflusskonzentration auf der Basis von Teilgebieten abgebildet werden.



Abbildung 3: Modellkomponenten und Datenflüsse in WaSiM-ETH

Eine bedeutende Modellkomponente stellen Tools zur räumlichen Interpolation der meteorologischen Daten auf das Modellgitter dar, welche in WaSiM-ETH mit unterschiedlich komplexen Verfahren durchgeführt werden kann. Daneben bietet das Modell auch Werkzeuge, um die Effekte von Hangneigung und Hangausrichtung auf Abschattung und einfallende Strahlung und Temperatur zu berücksichtigen (Ansatz nach Oke 1987). Die Prozesse von Schneeakkumulation und Schneeschmelze können mit Hilfe von Temperatur-Index-Verfahren oder einfachen Energiebilanz-Verfahren modelliert werden (Braun 1985). Der Einfluss von vergletscherten Flächen auf die Wasserbilanz und das Abflussregime wird über ein separates Teilmodell erfasst (Ansatz nach Hock 1999). Die Evapotranspiration wird vorzugsweise nach Penman-Monteith simuliert. Sie kann aber alternativ auch über weniger datenintensive Verfahren wie den Ansätzen von Wendling (1975), Hamon (1961) oder Haude (1955) berechnet werden. Das Eindringen von Wasser in den Boden wird durch das auf den Infiltrationsansatz nach Green und Ampt (1911) aufbauende "Zweistufenmodell von Peschke" beschrieben (1977, 1987). Dieses Infiltrationsmodell ist in WaSiM-ETH-2 vollständig ins Modell der ungesättigten Bodenzone integriert. Die vertikalen Wasserflüsse zwischen den Bodenschichten werden auf Basis der Richards-Gleichung bilanziert (vgl. Abbildung 4). Für das Abflussrouting im Gerinne verwendet WaSiM-ETH den kinematischen Wellenansatz.



Abbildung 4: Simulation der vertikalen Bodenwasserflüsse in WaSiM-ETH-2

Bei der Anwendung von WaSiM-ETH müssen jeweils nicht alle Teilmodelle zur selben Zeit aktiviert sein. Vielmehr kann der Nutzer in Abhängigkeit von der Zielstellung seiner Anwendung und der Datenverfügbarkeit entscheiden, welche Teilmodelle durchlaufen werden. Eine sogenannte Steuerdatei teilt dem Modell mit, welche aktuelle Modellkonfiguration zu nutzen ist. Diese Steuerdatei ist das zentrale Instrument, mit dem der Anwender auf die Modellierung Einfluss nehmen kann (z. B. Festlegung der Parameterwerte und Modellausgaben).

3.1.3 Modellumgebung

Es existieren zahlreiche WaSiM-ETH Zusatz-Tools, mit deren Hilfe der Anwender aufwändige Prozeduren im Pre- und Postprocessing verkürzen kann (siehe Schulla und Jasper 1998, 2000). Hervorhebenswert sind Werkzeuge zur zeitlichen und räumlichen Interpolation von meteorologischen Stationsdaten (z. B. Berechnung von Regressionsbeziehungen) sowie diverse Gridbearbeitungs- und -visualisierungstools, darunter das topographische Analyse-Programm TANALYS. In Abbildung 5 ist die Funktionsweise dieses Tools skizziert. Basierend auf einem digitalen Höhenmodell werden mit Hilfe von TANALYS automatisiert verschiedene raumbezogene Datensätze generiert, von denen die grau hinterlegten Daten als Eingangsdatensätze für WaSiM-ETH genutzt werden können.



Abbildung 5: Topographische Analyse des digitalen Höhenmodells mit TANALYS

Die WaSiM-ETH Toolbox unterstützt den Anwender nicht nur bei der statistischen Analyse der Eingangs- und Ausgabedaten, sondern stellt auch Werkzeuge zu deren Weiterverarbeitung und Visualisierung bereit. Da WaSiM-ETH standardisierte Datenformate verwendet (z. B. Gridformat entsprechend dem GIS Arc/Info), ist jedoch auch eine unkomplizierte Nutzung von externen Software-Produkten für die Datenanalyse möglich. Prinzipiell ist WaSiM-ETH sowohl in einer Windows- als auch in einer Linuxoder Unix-Systemumgebung lauffähig. Bedingung ist das Vorhandensein eines Ansi-C++ Compilers.

3.1.4 Modellkomponenten

Auf eine detaillierte Beschreibung der in WaSiM-ETH implementierten Teilmodelle wird in diesem Bericht bewusst verzichtet. Hierzu wird auf die ausführlichen Darstellungen im KliWEP1-Bericht 2004 (vgl. Kapitel 4.2.3) sowie auf die umfangreiche WaSiM-Dokumentation (Schulla und Jasper 1998, 2000) verwiesen. Im Folgenden erfolgt lediglich eine Auflistung der Modellkomponenten mit den derzeit implementierten Ansätzen.

Modellkomponente	Verwendeter Ansatz
Niederschlagskorrektur	temperatur- und windabhängige Korrektur (Sevruk 1986); Korrek- tur erfolgt getrennt für Regen und Schnee
Interpolation der meteorologi- schen Eingangsdaten	 inverse distanzgewichtete Interpolation (IDW) höhenabhängige Regression Kombination aus (1) und (2) Interpolation nach Thiessen-Polygon bilineare Interpolation bilineare Interpolation der Gradienten und Residuen bikubische Spline-Interpolation der Gradienten und Residuen bikubische Spline-Interpolation der Gradienten und Residuen
Abschattungs-, Hangneigungs- und Expositionskorrektur für Strahlung und Temperatur	Oke (1987)
Evapotranspiration	 (1) Penman-Monteith (Monteith und Unsworth 1990) (2) Wendling (1975) (3) Hamon (1961) (4) Haude (1955)
Schneeakkumulation und Schnee- schmelze	 (1) (klassische) Temperatur-Index-Methode (2) Temperatur-Wind-Index-Methode (Braun 1985) (3) einfache Energiebilanz-Methode (Anderson 1973)
Gletscherschmelze und –abfluss	(1) (klassische) Temperatur-Index-Methode(2) Hock (1999)
Interzeption	einfaches Überlaufmodell
Bodenwasserdynamik	Infiltration nach Green und Ampt (1911) mit Erweiterung nach Peschke (1977, 1987); vertikale Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone basie- rend auf der Richards-Gleichung (1931) mit Parametrisierung nach van Genuchten (1980)
Grundwasserdynamik	Finite Elemente Methode; iterative Lösung der Strömungs- und Transportgleichung; Berücksichtigung geschichteter Grundwasserleiter
Stofftransport	Berücksichtigung von radioaktiven und nichtradioaktiven Tracern; Berechnung von (Mischungs-)Konzentrationen in allen Teilmodel- len
Abflusskonzentration	ELS-Kaskade mit Berücksichtigung von Translationszeiten
Abflussrouting	kinematischer Wellenansatz (Lighthill und Witham 1955)

 Tabelle 2:
 WaSiM-ETH Modellkomponenten und implementierte Ansätze

3.1.5 Güte der Modellierung

WaSiM-ETH berechnet verschiedene Gütekriterien, um die Qualität der Modellierung einzuschätzen. Bei diesen "goodness-of-fit" Berechnungen werden die gemessenen und simulierten Abflussdaten miteinander verglichen. Als Gütemaß wird das in der hydrologischen Modellierung weit verbreitete Effizienzkriterium R^2 nach Nash-Sutcliffe (1970) verwendet. Es berechnet sich nach

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - y_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2}}$$

Gleichung 1

In dieser Gleichung sind x_i der gemessene Abfluss, y_i der simulierte Abfluss, \overline{x} der mittlere gemessene Abfluss und *n* die Anzahl der Intervalle, für die R^2 berechnet wird. R^2 kann zwischen minus unendlich und 1 liegen. Werte nahe 1 signalisieren eine rechnerisch gute Anpassung des simulierten an den gemessenen Abfluss. WaSiM-ETH ermittelt sowohl das lineare als auch das logarithmische Effizienzkriterium. Während das lineare Kriterium vor allem die Wiedergabe der Hochwasserspitzen berücksichtigt, wird durch R^2 -log eher die Anpassungsgüte für den Mittel- und Niedrigwasserbereich erfasst.

Ein weiteres Gütemaß, welches von WaSiM-ETH ausgegeben wird, ist das Maß der erklärten Varianz (EV, explained variance coefficient). Gegenüber R^2 zeichnet sich die erklärte Varianz dadurch aus, dass sie systematische Ordinatenverschiebungen der modellierten gegenüber den gemessenen Daten erkennt und diesen Einfluss eliminiert.

3.2 PCGEOFIM[®]

3.2.1 Physikalische Grundlagen

Grundwasser ist das Wasser, welches Hohlräume im Gestein ausfüllt. Es unterliegt der Schwerkraft und den aus der Bewegung herrührenden Reibungskräften. Als Grundwasserleiter (Aquifer) bezeichnet man einen Gesteinskörper, der Hohlräume enthält und so eine Wasserbewegung und Wasserspeicherung erlaubt. Er kann auch geschichtet sein, d. h. verschieden durchlässige Materialien lagern übereinander (vgl. Abbildung 6).

Mehrere Grundwasserleiter können durch schlechter leitende Schichten voneinander getrennt sein. Man spricht dann von Grundwasserstockwerken. Die Eigenschaften der Grundwasserleiter werden mit Hilfe der Durchlässigkeit (k_f -Wert) und dem Speichervermögen (S_0 -Wert) charakterisiert. Der Grundwasserstand wird in Pegeln beobachtet, die im Grundwasserleiter verfiltert und mit einem Standrohr versehen sind. Es stellt sich im Standrohr ein Wasserspiegel ein, den man als Standrohrspiegelhöhe bezeichnet. Man unterscheidet den freien bzw. ungespannten und den gespannten Spiegel. Im ersten Fall ist die obere Berandung des Strömungsraumes durch den wassergefüllten Bereich gegeben. Die Standrohrspiegelhöhe beschreibt die Lage des wassergefüllten Bereichs im Aquifer. Im zweiten Falle begrenzt eine undurchlässige Schicht den Strömungsraum. Die Standrohrspiegelhöhe ist dann ein Maß für den im Grundwasser herrschenden Druck. In unserem Beispiel ist der Grundwasserleiter 1 bis auf das Zehrungsgebiet ungespannt und der Grundwasserleiter 2 bis auf den Bereich der Verbindung immer gespannt.



Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Grundwasserstockwerkes mit zwei geschichteten Grundwasserleitern

Die Bewegung des Grundwassers wird durch Standrohrspiegelhöhenunterschiede im Grundwasserleiter bzw. im Grundwasserstockwerk bewirkt. Das Wasser bewegt sich vom höheren zum niedrigeren Standrohrspiegel. Die Fließgeschwindigkeit hängt dabei ganz wesentlich von der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters ab. Je größer die Durchlässigkeit ist, umso größer ist bei gleicher Potenzialdifferenz die Fließgeschwindigkeit. Der französische Ingenieur Henry d'Arcy entdeckte 1856 für poröse Medien das nach ihm benannte Gesetz

$$v_{Dar} = -k_f \text{ grad } h$$
 Gleichung 2

mit h - Standrohrspiegelhöhe, k_f - Durchlässigkeit und v_{DAR} - die Darcy- bzw. Filtergeschwindigkeit. Die Darcy-Geschwindigkeit ist eine fiktive Geschwindigkeit. Messbar sind nur der Volumenstrom und die Abstandsgeschwindigkeit. Die Grundwasserströmung kann mathematisch durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben werden:

$$n_e \partial \rho / \partial t + div (\rho v_{Dar}) = q$$
 Gleichung 3

mit ρ - Dichte des Grundwassers, n_e - entwässerbare Porosität und q - Massenstromdichte. Die Kontinuitätsgleichung beinhaltet das physikalische Gesetz der Massenerhaltung: Die zeitliche Änderung des Grundwasservorrates wird hervorgerufen von der Grundwasserströmung (mathematisch beschrieben durch die Divergenz) und von Quellen (q > 0) und Senken (q < 0). Am Beispiel eines finiten Volumenelementes soll der physikalische Hintergrund der Kontinuitätsgleichung erläutert werden. In Abbildung 7 ist ein solches Element dargestellt. Es wurde ein Element mit freier Oberfläche ausgewählt. Die Vorratsänderung im finiten Volumenelement, die sich im Ansteigen oder Sinken des Grundwasserspiegels ausdrückt, wird hervorgerufen durch Flüsse zu den Nachbarn im gleichen Grundwasserleiter, durch einen Zu- oder Abfluss zu einem darunter liegenden Grundwasserleiter, durch die Grundwasserneubildung und durch innere Quellen bzw. Senken. Ein Beispiel für innere Quellen sind Infiltrationsbrunnen, Förderbrunnen sind innere Senken. Die Kontinuitätsgleichung enthält implizit die Standrohrspiegelhöhe h(x,y,z,t) als abhängige Variable, da die Dichte, das Speichervermögen und die Darcy-Geschwindigkeit als Funktion von h dargestellt werden können. Je nach dem, ob der Grundwasserspiegel gespannt oder ungespannt ist, erhält man zwei verschiedene partielle Differenzialgleichungen zur Berechnung der Standrohrspiegelhöhe. Sie sind Grundlage für alle Grundwassermodellierungen.

ungespannter Spiegel:

div (
$$k_f h \text{ grad } h$$
) = $n_e \partial h / \partial t - V_A$ Gleichung 4

Gleichung 5

gespannter Spiegel:

div (
$$k_f$$
 grad h) = $S_0 \partial h / \partial t$ - V_V

mit:

 $\begin{array}{lll} k_f: & kf\text{-Wert }[m/s] \\ n_e: & entwässerbare Porosität [-] \\ S_0: & spezifischer Speicherkoeffizient [1/m] \\ H: & Standrohrspiegelhöhe [m] \\ V_A: & Flächenstromdichte [m/s] \\ V_V: & Volumenstromdichte [1/s] \end{array}$



Abbildung 7: Schematische Darstellung der Grundwasserbilanz in einem finiten Volumenelement

Aus der Mathematik ist bekannt, dass die Lösung einer partiellen Differenzialgleichung nur möglich ist, wenn neben den Parametern der Differenzialgleichung auch die Anfangs- und die Randbedingungen bekannt sind.

Anfangs- und Randbedingungen

Die Modellierung der Grundwasserströmung ist nur möglich, wenn im gesamten Untersuchungsgebiet die Standrohrspiegelhöhe als Funktion des Ortes zu Beginn der Berechnung bekannt ist. Die bei einer Stichtagsmessung ermittelten Spiegelhöhen werden im Allgemeinen als Linien gleicher Grundwasserstände (Isolinien) dargestellt und gehen als Anfangsbedingung in die Berechnung ein. Randbedingungen stellen die Kenntnis der Standrohrspiegelhöhe oder des jeweiligen Randzu- bzw. abflusses oder eine Kombination von beiden an den Rändern des Aquifers dar. Ohne die Kenntnis dieser Randbedingungen als Funktion der Zeit ist die Lösung der Grundwasserströmungsgleichung nicht möglich. Die Randbedingungen beeinflussen die Lösung ganz wesentlich, so dass die Randbedingungen besonders sorgfältig zu formulieren sind. Man unterscheidet:

- Randbedingungen 1. Art (Vorgabe der Standrohrspiegelhöhe), beispielsweise Wasserspiegel von Oberflächengewässern, die vom Grundwasser unbeeinflusst bleiben, weit entfernte Ränder, die von der Grundwasserströmung im zu modellierenden Gebiet unwesentlich beeinflusst werden, künstlich gestützte Potenziale durch Infiltration oder Entnahme;
- Randbedingungen 2. Art (Vorgabe einer Zu- oder Abströmung), beispielsweise ein von außen eingespeister Grundwasserstrom und die undurchlässige Barriere;
- Randbedingungen 3. Art (gemischte Randbedingung), beispielsweise kolmatierte Oberflächengewässer.

Die Ränder werden im Allgemeinen so gewählt, dass sich einfache Randbedingungen formulieren lassen, diese bekannt sind oder gemessen werden können und von der Grundwasserströmung möglichst nicht verändert werden.

Im Programmsystem PCGEOFIM[®] sind neben den hier aufgeführten Randbedingungen gekoppelte Randbedingungen 3. Art implementiert worden, um die zeitliche und örtliche Entwicklung des Grund-wasserstandes in einem vom Bergbau beeinflussten Gebiet modellieren zu können. Mit Hilfe gekoppelter Randbedingungen 3. Art werden Vertikal- und Horizontalfilterbunnen, Stand- und Fließgewässer adäquat beschrieben.

Am Beispiel Standgewässer soll die Vorgehensweise vorgestellt werden. Das Standgewässer geht mit seiner Hohlform in die Berechnung ein. Das Restloch besitzt einen Wasserstand und ist, wie Abbildung 8 zeigt, über viele horizontale und vertikale Leitwerte mit dem Aquifer verbunden.



Abbildung 8: Horizontale und vertikale Kopplungen eines Restlochs an den Aquifer

3.2.2 Die numerische Lösung der Strömungsgleichung

Nur für sehr einfache Problemstellungen existieren analytische Lösungen der partiellen Differenzialgleichung der Grundwasserströmung. Im Allgemeinen werden komplexe Problemstellungen numerisch gelöst. Die im Programmsystem PCGEOFIM[®] verwendete numerische Lösung basiert auf der Finite-Volumen-Methode, einem sehr modernen numerischen Lösungsverfahren, das sich durch Bilanztreue und relativ flexible Gitterstrukturen auszeichnet. Die Flexibilität der Gitterstruktur ergibt sich aus der im Programmsystem PCGEOFIM[®] implementierten Möglichkeit, das Gitternetz lokal durch Lupen zu verfeinern. Die Vorgehensweise soll an dem in Abbildung 6 dargestellten Beispiel erläutert werden. Das gesamte zu untersuchende Gebiet wird in finite Volumen unterteilt. Die Größe der finiten Volumen wird so gewählt, dass die Geometrie, die hydrogeologischen Eigenschaften der Grundwasserleiter und die Randbedingungen genügend genau erfasst werden. In Abbildung 9 ist die Diskretisierung des eingangs vorgestellten Beispiels visualisiert.



Abbildung 9: Diskretisierung des Grundwasserstockwerkes in finite Volumen

Seite 28

Für jedes Volumenelement sind der Schwerpunkt, die Abmessungen, die Durchlässigkeit, die entwässerbare Porosität, der spezifische Speicherkoeffizient, die Grundwasserneubildung, innere Quellen bzw. Senken, der Anfangswasserstand und eventuell wirkende Randbedingungen vorzugeben. Die zu untersuchenden Gebiete erstrecken sich im Allgemeinen über viele Quadratkilometer und verfügen über mehrere, teilweise gekoppelte Grundwasserleiter, so dass oft mehr als 100 000 finite Volumenelemente benötigt werden, um das Geschehen im Aquifer mit ausreichender Genauigkeit beschreiben zu können. Die der finiten Volumenmethode angepasste Darstellung der partiellen Differenzialgleichungen (vgl. Gleichung 4) erhält man, wenn diese Gleichungen in die Integraldarstellung überführt werden:

(Vorratsänderung = Zu- und Abflüsse + Quellen und Senken)

Die Vorratsänderung im finiten Volumenelement wird bewirkt durch Zu- und Abflüsse über die Berandung und durch innere Quellen und Senken. Für jedes finite Volumenelement ijk wird die Grundwasserbilanz aufgestellt. Die zeigt ein solches Element und die Verknüpfungen zu den Nachbarn in positiver und negativer x- und y-Richtung und zum darunter liegenden Grundwasserleiter. In jedem finiten Volumenelement wird der Grundwasserstand zur Zeit t durch die Variable h(i,j,k,t) repräsentiert. Durch die Verknüpfung zu den benachbarten, den darüber- und den darunter liegenden finiten Volumenelementen entsteht so ein sehr großes Gleichungssystem zur Berechnung der Standrohrspiegelhöhen h(i,j,k,t+dt), wenn der Zustand zur Zeit t und die Standrohrspiegelhöhen auf dem Rand bekannt sind. Ausgehend vom Anfangszustand können so die Standrohrspiegelhöhen für jeden beliebigen Zeitpunkt danach berechnet werden.



Abbildung 10: Das finite Volumenelement ijk mit den Verbindungen zu den Nachbarn

3.2.3 Programmsystem PCGEOFIM[®]

Realisiert wurde der beschriebene Algorithmus im Programmsystem PCGEOFIM[®]. Es ist ein Programmsystem zur Berechnung der Geofiltration und der Geomigration (**P**rogramsystem for Computation of **GEOFI**ltration and geo**M**igration). Unter Geofiltration wird die Grundwasserströmung verstanden. Geomigration charakterisiert den Transport, den Abbau und mögliche Wechselwirkungen (Reaktionen) von löslichen Stoffen (in der Regel Wasserschadstoffen) im Wasser und mit der Bodenmatrix.

In Tabelle 3 sind die zum Programmsystem gehörenden Komponenten aufgelistet und ihre Funktion kurz erläutert.

Die im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens KliWEP realisierte Kopplung des Simulators Geofim mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

Komponente	Funktion	
Pcgedit	dBASE™-Routine zur Redigierung von dBASE-Dateien für Nutzer, die kein dBASE besitzen.	
Geofim	Mengenströmung: Berechnung der Grundwasserströmung nach der Finite-Volumen-Methode, 1, 2- oder 3-dimensional, Grundwasserneubildung flurabstands- und zeitabhängig, Randbedingungen 1., 2. und 3. Art mit Beschränkungen, Berücksichtigung von Einzelbrunnen, Brunnengruppen, Brunnengalerien, Kopplung von Grund- und Oberflächenwasser (Flüsse, Seen und Restlöcher), Berechnung von Isochronen und Bahnlinien	
	Transport: Berechnung des Transportes von bis zu 15 Migranden im Grundwasser nach dem Front-Limitation-Algorithmus, Berechnung des Transportes eines Migranden im Grundwasser mit Hilfe des Random-Walk-Verfahrens, Berechnung des reaktiven Stofftransports im Grundwasser durch Kopplung mit PHREEQC	
	Parameteridentifikation: Mit Hilfe der Sensitivitätsmethode werden die Parameter, welche die Prozesse Strömung und Transport beschreiben, gezielt verändert, so dass die gemessenen Spiegelhöhen oder Konzentrationen mit minimaler Abweichung widergespiegelt werden.	
PCGEOFIM [®]	Sammlung von 30 Tools zur Unterstützung des Anwenders bei der Erstellung der Datenbasis und zur Auswertung von Ergebnissen. Eingabedaten und Ergebnisse können in tabellarischer und in graphischer Form visualisiert werden. Die Ausgabe erfolgt am Bildschirm, auf Druckern und Plottern und kann zu GIS mit Hilfe der AutoCAD [™] -Schnittstelle exportiert werden.	

 Tabelle 3:
 Komponenten des Programmsystems PCGEOFIM[®]

4 Weiterentwicklung von WaSiM-ETH

4.1 Modellkopplung WaSiM-ETH mit PCGEOFIM®

Eines der zentralen Anliegen von KliWEP2 besteht darin, den Datenaustausch zwischen dem Grundwasserströmungs- und -transportmodell Geofim und dem hydrologischen Einzugsgebietsmodell WaSiM-ETH zu verbessern. Dazu sollen insbesondere die Kopplungsmechanismen zwischen den beiden Modellen überarbeitet werden. Eine signifikante Verkürzung der Intervalle für den Datenaustausch ist vorzusehen. Während in KliWEP1 die Kopplung zwischen PCGEOFIM[®] (oder präziser formuliert seines Simulators Geofim) und WaSiM-ETH auf Monatsschrittbasis vollzogen wurde, soll nun der Datenabgleich zwischen den Modellen pro Rechenzeitschritt, d. h. auf Tagesschrittbasis, erfolgen. Damit soll insbesondere eine Minimierung der Unterschiede in den von beiden Modellen berechneten Grundwasseroberflächen erreicht werden. In der Aufgabenstellung zu KliWEP2 heißt es weiter, dass die Übergabe der Grundwasseroberfläche von Geofim an WaSiM-ETH "physikalisch korrekt", d. h. mit der notwendigen Anpassung aller vom Grundwasserstand beeinflussten Parameter, zu erfolgen hat.

Gegenüber der in KliWEP1 realisierten Kopplung Geofim/WaSiM-ETH enthält die aktuelle Modellkopplung die in Tabelle 4 benannten Erweiterungen (vgl. auch ausführlichere Darstellung in den Kapiteln 4.1.2-4.1.4).

Neu (KliWEP2)	Risher (KliWEP1)
Geofim und WaSiM-ETH:	
Datenaustausch pro Rechenzeitschritt (1 Tag) mit Hilfe von Syn- chronisationsdateien (ohne Notwendigkeit von Modellneustarts)	Datenaustausch einmal pro Monat mit jeweils neuen Modellstarts
WaSiM-ETH:	
physikalisch korrekte Übernahme der von Geofim bereitgestellten Grundwasseroberfläche; Mitführung eines Bilanzengrids	kein bilanzreiner Datenabgleich zwischen Geofim und WaSiM- ETH
WaSiM-ETH:	
separate Ausweisung der Bodenwasserflüsse (1) Perkolation (Grundwassernährung = positive Grundwasserneubildung), (2) kapillarer Aufstieg (Grundwasserzehrung = negative Grundwasser- neubildung) und (3) Netto-Grundwasserbildung	Ausweisung der Netto- Grundwasserneubildung
WaSiM-ETH: zeitschrittweise Bereitstellung von geroutetem Direktabfluss (ober- irdischer Abfluss) und Interflow (an Teilgebietsauslässen) in sepa- raten Statistik-Files	Berücksichtigung des ungerouteten Direktabflusses und Interflow

Tabelle 4: Realisierte Erweiterungen in der Online-Kopplung Geofim/WaSiM-ETH

4.1.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Das Simulationsprogramm Geofim berechnet aus dem Parametermodell und dem Signalmodell die Grundwasserstände und die Wasserstände in den Fließ- und Standgewässern. Das Einzugsgebietsmodell WaSiM-ETH berechnet aus meteorologischen Daten, einem digitalen Geländemodell, der Bodennutzung, der Bodenart und dem Grundwasserflurabstand den Oberflächenlandabfluss, den Interflow und die Grundwasserneubildung.

Bei der Online-Kopplung übergibt das Programm Geofim dem Modell WaSiM-ETH die aktuelle Grundwasseroberfläche und übernimmt die drei Komponenten Grundwasserneubildung, Oberflächenlandabfluss und Interflow. In Tabelle 5 ist die realisierte Online-Kopplung Geofim/WaSiM-ETH schematisch dargestellt. Geofim und WaSiM-ETH werden gleichzeitig gestartet. Die Synchronisation beider Programme erfolgt über die Synchronisations-Files geofim.inf und wasim.inf, die bei Existenz anzeigen, dass die Austauschdaten im Exchange-Directory abgelegt worden sind.

Iteration	Geofim	WaSiM-ETH
	Einlesen der Datenbasis	Einlesen der Steuerdatei und aller benötigten Daten
	Aufbau der internen Geofim-Strukturen	Aufbau der internen WaSiM-ETH-Strukturen
do $t = ta$, te, 1 d	Ausgabe Grundwasseroberfläche als binäres Grid für den Zeitpunkt t: home\wasim\exchange\gwstand.grd Schreiben des Synchronisations-Files:	Wait bis Synchronisations-File home\wasim\exchange\wasim.inf existiert. Löschen der Synchronisations-Files, Übernahme der Grundwasseroberfläche
	home\wasim\exchange\wasim.inf	Simulation des Bodenwasserhaushaltes für einen Tag
Wait bis Synchronisations-File home\wasim\exchange\geofim.inf existiert. Löschen der Synchronisatio Übernahme der Grundwasserneublic Oberflächenlandabflusses und des Inf	Wait bis Synchronisations-File home\wasim\exchange\geofim.inf	Ausgabe Grundwasserneubildung als binäres Grid in [mm/d] für den Zeitraum t bis t+1 d: home\wasim\exchange\gwn.grd
	Übernahme der Grundwasserneubildung, des Oberflächenlandabflusses und des Interflow	Ausgabe des Oberflächenlandabflusses und des Interflow in [mm/d] für jedes Einzugsge- biet als ASCII-Tabelle für den Zeitraum t bis t+1 d: home\wasim\exchange\qdir.tab, ho- me\wasim\exchange\qifl.tab
		Schreiben des Synchronisations-Files
		home\wasim\exchange\geofim.inf
	Simulation der Grund- und Oberflächenwas- serströmung für 1 d	
enddo	eventuell Ausgabe von Zwischenergebnissen	eventuell Ausgabe von Zwischenergebnissen
	Endausgabe	Endausgabe

Tabelle 5: Online-Kopplung Geofim/WaSiM-ETH

Nach dem Einlesen der benötigten Daten und dem Aufbau der internen Geofim-Strukturen wird der gesamte Betrachtungszeitraum in Tagesschritte unterteilt. Bevor die Simulation der Grund- und Oberflächenwasserströmung erfolgt, wird ein binäres Grid der Grundwasseroberfläche und die Synchronisationsdatei wasim.inf im Exchange-Directory abgelegt. Die Geofim-Simulation wird erst fortgesetzt, wenn das Modell WaSiM-ETH mit Hilfe der von Geofim übergebenen Grundwasseroberfläche die Grundwasserneubildung, den oberirdischen Abfluss und den Interflow berechnet hat. Abbildung 11 zeigt, wie Geofim und WaSiM-ETH gleichzeitig auf einem PC abgearbeitet werden.

C:\WINNT\system32\cmd.exe - wasimvcz sbach.ctl	
snow_evaporation 8.12.2001 24. h (time of meteo data) interception_model 8.12.2001 24. h (time of meteo data) unsatzon_model 8.12.2001 24. h (time of meteo data)+ft, real evapotranspir. 8.12.2001 24. h (time of meteo data) groundwater_flow 8.12.2001 24. h (time of meteo data) GWlevel 1, Steps 36 err 0, SOR 1.17625, osc. at 0 points (av: 0, max 0) routing model 8.12.2001 24. h (time of meteo data)	
actual parameters 8.12.2001 24. h waiting for external synchronisation file c:\pcgeofim\partscha\wasim\excha im.inffound it! reading c:\pcgeofim\partscha\wasim\exchange\qutable and for defaults	nge\was
c:\pcgeofim\partscha\wasim\exchange\gwtable.grd checking nodata values place precipitation 9.12.2001 24. h	and re
temperature 9.12.2001 24. h air_humidity 9.12.2001 24. h sunshine_duration 9.12.2001 24. h wind_speed 9.12.2001 24. h radiation_correction 9.12.2001 24. h (time of meteo data)	
pot. evaptranspir. 9.12.2001 24. h (time of meteo data) snow_model 9.12.2001 24. h (time of meteo data) snow_evaporation 9.12.2001 24. h (time of meteo data) interception_model 9.12.2001 24. h (time of meteo data) unsatzon_model 9.12.2001 24. h (time of meteo data)+ft,	
🐃 C: \pcgeofim \partscha \geofim.exe	<u>_ 🗆 ×</u>
Partscha: GEOFIL Return: 13:36:37:26 Time: 2.74	S
Information: Vorrat im Aquifer am 01.11.2001 : 6.42693E+07 m3 Vorratsänderung insgesamt :-8.40063E+04 m3 Summe Ein- und Ausspeisung :-8.40101E+04 m3 Einspeiserate pro Zeitschritt : 8.36193E+00 m3/m Ausspeiserate pro Zeitschritt : 1.02439E+01 m3/m Volumenbilanzfehler : 3.89580E+00 m3 Grundwasserneubildung : 5.37747E-01 m3/m	
Partscha: GEOFIL Return: 13:36:56:91 Time: 2.86	S
Information: Vorrat im Aquifer am 01.12.2001 : 6.43111E+07 m3 Vorratsänderung insgesamt : 4.18497E+04 m3 Summe Ein- und Ausspeisung : 4.18285E+04 m3 Einspeiserate pro Zeitschritt : 1.09042E+01 m3/m Ausspeiserate pro Zeitschritt : 9.93591E+00 m3/m Volumenbilanzfehler : 2.11772E+01 m3 Grundwasserneubildung : 4.66282E+00 m3/m	
Partscha: GEOFIL Return: 13:37:15:71 Time: 2.80	s 🗸

Abbildung 11: Online-Kopplung Geofim und WaSiM-ETH

4.1.2 Physikalisch korrekte Übernahme der Grundwasseroberfläche

Die Übernahme der Grundwasseroberfläche von Geofim in WaSiM-ETH erfordert eine umfassende Anpassung von Zustandsvariablen im Bodenmodell von WaSiM-ETH. Die Durchführung dieser Anpassung ist nicht trivial. Innerhalb der KliWEP2-Bearbeitergruppe wurden die notwendigen Modifikationen von WaSiM-ETH eingehend diskutiert und intensiv getestet. Hierbei musste berücksichtigt werden, dass Geofim und WaSiM-ETH unterschiedliche Bodenmodelle (Struktur und Parametrisierung) nutzen und ein unmittelbarer Datenaustausch nicht möglich ist. In den folgenden Kapiteln (Variante 1, Variante 2) sind zwei mögliche Kopplungsalternativen und der Diskussionsprozess innerhalb der Bearbeitergruppe skizziert, welcher schließlich zu der Favorisierung von Variante 2 führte.

Variante 1

WaSiM-ETH übernimmt im Kopplungsmodus zu Beginn eines jeden Simulationszeitschrittes die von Geofim im Exchange-Directory bereitgestellten Daten zur aktuellen Grundwasseroberfläche. Dieser Datensatz wird mit der zuvor von WaSiM-ETH ermittelten Grundwasseroberfläche verglichen und die Differenz aus beiden mit der entwässerbaren oder auffüllbaren Porosität multipliziert und in einen Volumenstrom umgerechnet. Mit Hilfe des Zeitintervalls kann dieser Volumenstrom anschließend auf ein absolutes Volumen überführt werden.

Dieses Volumen entspricht der Wassermenge, welche neu in der Bodenwasserbilanz von WaSiM-ETH berücksichtigt werden muss. Die Differenz zwischen der von Geofim übernommenen und von WaSiM-ETH ermittelten Grundwasseroberfläche muss ausgeglichen werden; d. h. die zuvor ungesättigte Bodenzone über der alten Grundwasseroberfläche (WaSiM-ETH) wird unter Berücksichtigung der auffüllbaren Porosität in eine gesättigte Bodenzone überführt. Im anderen Fall, also wenn die von Geofim ermittelte Grundwasseroberfläche unterhalb der von WaSiM-ETH berechneten liegt, muss ein zuvor vom Grundwasser gesättigter Bodenbereich teilweise entleert und in eine ungesättigte Bodenzone umgewandelt werden (vgl. Abbildung 12). Für diesen Austauschvorgang werden Bodenwassergehalte verwendet, die oberhalb der alten Grundwasseroberfläche anzutreffen waren.





Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung dieser Auffüllungs- und Entleerungsmechanismen ist die Nutzung identischer bzw. weitestgehend ähnlicher (Speicher)kennwerte für den Untergrund durch die beiden Modelle Geofim und WaSiM-ETH. Anderenfalls kann es zu größeren Abweichungen kommen, und zwar nicht nur im projizierten Grundwasserstand, sondern auch in den vom Grundwasser beeinflussten Größen wie z. B. Abfluss, Grundwasserneubildung und Evapotranspiration. Dieser Umstand ist insbesondere mit Blick auf die von WaSiM-ETH an Geofim zu übergebenden Parameter von Bedeutung.

Im Lauf der Projektbearbeitung zeigte sich, dass die unterschiedlich strukturierten Modelle WaSiM-ETH (hochaufgelöste Parametrisierung des Bodens mittels Saugspannungs-Sättigungs-Beziehungen nach van Genuchten) und Geofim (Beschreibung der ungesättigten Bodenzone auf Basis von Volumenelementen und auffüllbaren Porositäten) eine Homogenisierung der relevanten Prozesse im Schnittstellenbereich der ungesättigten Bodenzone nur sehr eingeschränkt zulassen. Dies hatte zur Folge, dass trotz technisch korrekter Übernahme (Grundwasseroberfläche) und Anpassung (Wassergehalte in ungesättigter Bodenzone) die von WaSiM-ETH an Geofim rückübergebenen Grundwasserneubildungsraten teilweise unrealistische Werte annahmen.

Die durchgeführten Kopplungstests zeigten darüber hinaus, dass die Höhe der Grundwasserneubildung sensibel auf Unterschiede in den auszutauschenden Grundwasseroberflächen reagiert. Wird beispielsweise vom externen Modell (Geofim) eine wesentlich tiefer liegende Grundwasseroberfläche an WaSiM-ETH zurückgegeben, wird diese Differenz von WaSiM-ETH intern in einen gesunkenen Grundwasserstand umgesetzt. Ehemals gesättigte Bodenwasserbereiche müssen sprunghaft in ungesättigte Bodenwasserbereiche (die zuvor unmittelbar über dem alten Grundwasserspiegel anzutreffen waren) überführt werden. Letztere können jedoch aufgrund hoher Bodenwassergehalte Versickerung zulassen. Erreicht dieses zusätzliche Versickerungswasser die Grundwasseroberfläche, so wird Grundwasserneubildung ausgewiesen. Dieser Vorgang kann in der Summe dazu führen, dass zu hohe Grundwasserneubildungsraten an Geofim übergeben werden.

Variante 2

Die Erfahrungen aus Variante 1 nutzend, wurde nun eine direkte Übernahme der Grundwasseroberfläche des externen Modells (Geofim) in WaSiM-ETH favorisiert (d. h. keine Berücksichtigung der Porosität und der daraus berechneten Wasservolumen). Nunmehr werden unmittelbar nach dem Einlesen der externen Grundwasseroberfläche alle wichtigen Zustandsgrössen im WaSiM-ETH Bodenmodell angepasst (Theta, hydraulische Höhen, Grundwasserstand etc.). Die notwendigen "Be- und Entwässerungen" des Bodens, die für den Abgleich der internen Grundwasseroberfläche mit der externen notwendig sind, werden in einem mitgeführten Bilanzengrid berücksichtigt, in dem die Differenzen fortlaufend aufsummiert werden. Bei höherer externer Grundwasseroberfläche wird für die betroffenen Bereiche der aktuelle Bodenwassergehalt auf θ_{sat} erhöht. Im umgekehrten Fall wird der betroffene Bodenbereich entwässert. Die Grundwasserstand sowie seitlichen Zu- und Abflüssen, sondern als Fluss zwischen der letzten ungesättigten und der ersten gesättigten Bodenschicht dargestellt.

Variante 2 erwies sich bei den Tests als der bessere Weg und wird nun für die Kopplung von WaSiM-ETH und PCGEOFIM[®] genutzt.

4.1.3 Ausweisung der Grundwasserneubildung als Grid

In der im Rahmen von KliWEP2 erstellten erweiterten Modellversion ermöglicht WaSiM-ETH nicht nur die Ausgabe der Grundwasserneubildung, sondern auch die ihrer gegenläufigen Komponenten Perkolation (Grundwasserspeisung = positive Grundwasserneubildung) und kapillarer Aufstieg (Grundwasserzehrung = negative Grundwasserneubildung). Die Grundwasserneubildung kann ebenso wie Perkolation und kapillarer Aufstieg, zeitschrittweise oder als Summengrid ausgegeben werden. Dazu sind in der WaSiM-ETH Steuerdatei im Kapitel [unsatzon_model] die gewünschten Ausgabeoptionen für die nachfolgend benannten Variablen zu definieren.

GWNgrid	Grid mit der effektiven Grundwasserneubildung [mm]
UPRISEgrid	Grid mit der Menge an kapillarem Aufstiegswasser [mm]
PERCOLgrid	Grid mit der Menge an Versickerungswasser [mm]

4.1.4 Kopplung des oberirdischen Abflusses und des Interflows

Die Ausweisung von Direktabfluss (Oberflächenabfluss) und Interflow auf Gitternetz- oder Gridzellenbasis ist in WaSiM-ETH aus konzeptionellen Gründen nur für den ungerouteten Zustand möglich. Entsprechend der in der Leistungsbeschreibung aufgeführten Alternativlösung werden daher in WaSiM-ETH geroutete Abflüsse, d. h. Daten zur Abflusskonzentration auf der Landfläche und im Gerinne (Berücksichtigung von Translations- und Speichereffekten), auf Teilgebietsbasis bereitgestellt. WaSiM-ETH erlaubt eine horizontale Gliederung von Einzugsgebieten in beliebig viele Teileinzugsgebiete. Es ist daher theoretisch möglich, ein Flussgebiet beliebig fein zu untergliedern und für alle Teilgebietsauslässe geroutete Daten zum Oberflächenabfluss und Interflow auszugeben.

Im gekoppelten Modus erhält Geofim von WaSiM-ETH somit am Ende eines jeden Berechnungszeitschrittes jeweils eine Datei zum gerouteten Oberflächenabfluss und zum gerouteten Interflow. Diese Dateien werden im Ascii-Tabellenformat übergeben. Dem Tabellenkopf folgen zeilenweise Einträge zu den Wertepaaren {Teilgebiets-Code; aktueller Wert} (vgl. Abbildung 13).

```
direct discharge [mm per Zone] (QD) unsatzon_model; 4 zones

1 0.128897

2 1.3298

3 4.5257

4 2.14858
```

Abbildung 13: Aufbau der Übergabedatei von WaSiM-ETH zu Geofim, hier: Oberflächenabfluss

4.1.5 Struktur des WaSiM-ETH Moduls zur externen Kopplung

Die programmtechnische Realisierung der oben beschriebenen Modellkopplung ist in WaSiM-ETH über die Implementierung eines zusätzlichen Modellbausteines (Moduls) vorgenommen worden. Das Modul ist flexibel gestaltet und kann bei Bedarf leicht erweitert werden. Es kann sowohl mit als auch ohne Zuschaltung des WaSiM-Grundwassermoduls betrieben werden. Die Parametrisierung des Kopplungsmoduls erfolgt entsprechend der üblichen Vorgehensweise in der WaSiM-ETH-Steuerdatei. Hier findet sich nun ein neuer Kapitel mit der Bezeichnung [ExternalCoupling]. Der Aufbau dieses Parameterblockes (eingefärbt) ist in Abbildung 14 vorgestellt. Eine zeilenweise Erläuterung desselben schließt sich an.

Zeile	[ExternalCoupling]	
1	1	# 0 = no coupling, 1 = coupling
2	<pre>\$exchngpath//wasim.inf</pre>	<pre># name of the semaphore file provided by the external model</pre>
3	100	# wait interval [ms]
4	D	# Coupling mode
5	1440	# time interval used by the external model [min]
6	1	<pre># number of grids provided by the external model</pre>
7	<pre>\$exchngpath//gwtable.grd</pre>	GWTableExtern 1 0
8	#\$exchngpath//bh.grd	gw_boundary_fix_h_1 0 0
9	2	# number of grids written before next synchronisation can be done
10	<pre>\$exchngpath//gwn.grd groundwater recharge</pre>	
11	<pre>\$exchngpath//balance.grd Balance SumTotal MY</pre>	
12	#\$exchngpath//gwstand.grd groundwater_distance	
13	2	<pre># number of subbasin-correlated statistics</pre>
14	<pre>\$exchngpath//qdir.tab</pre>	# direct flow per subbasin/zone [mm]
15	<pre>\$exchngpath//qifl.tab</pre>	# interflow per subbasin/zone [mm]
16	<pre>\$exchngpath//geofim.inf</pre>	<pre># name of the semaphore file provided by wasim</pre>
17	geofim	# content of the semaphore file written by wasim

Abbildung 14: Aufbau des Parameterblocks [External Coupling] in der WaSiM-ETH-Steuerdatei

- Zeile 1: Schalter für die Aktivierung/Deaktivierung der externen Modellkopplung
- Zeile 2: Pfad und Name der vom externen Modell bereitgestellten Synchronisationsdatei
- Zeile 3: Warteintervall für das Scannen des Datenaustauschverzeichnisses (Exchange-Directory) nach der neuen Synchronisationsdatei
- Zeile 4: Kopplungsintervall pro I = Simulationszeitschritt, H = Stunde, D = Tag, M = Monat, Y = Jahr
- Zeile 5: Simulationszeitschritt des externen Modells in Minuten. Diese Angabe ist wichtig, um Änderungen im externen Grundwasserstand in bilanzreine WaSiM-ETH Flüsse umzurechnen.
- Zeile 6: Anzahl der Grids, die vom externen Modell für die Kopplung bereitzustellen sind, sobald die Synchronisationsdatei wasim.inf vorliegt.
- Zeile 7: 1. Eintrag: Pfad und Name der vom externen Modell bereitgestellten Datei der Grundwasseroberfläche; 2. Eintrag: modellintern benutzter Dateiname; 3. Eintrag: "Grid-Auffüllparameter"
 (fillMissing parameter) mit den Optionen: 0 = no fill, 1 = fill with nearest neighbour values;
 4. Eintrag: "Umbenennen_Löschen-Parameter" (rename_delete parameter) mit den Optionen:
 1 = rename, 0 = delete
- Zeile 8: im Beispiel als Kommentarzeile deklariert (#). Prinzipiell können in dieser und nachfolgenden Zeilen weitere Datensätze übergeben werden, z. B. Daten für die Randbedingungen des 1. Grundwasserleiters oder aber auch Daten für veränderte Landnutzungen.
- Zeile 9: Anzahl der Grids, die von WaSiM-ETH am Ende des Synchronisationszeitschrittes bereitzustellen sind
- Zeile 10: 1. Eintrag: Pfad und Name des Grids mit der Grundwasserneubildung; 2. Eintrag: modellintern benutzter Dateiname
- Zeile 11: 1. Eintrag: Pfad und Name des Bilanzengrids (dieser enthält die durchgeführten Anpassungen im WaSiM-ETH-Bodenwassergehalt infolge Übernahme der externen Geofim-Grundwasseroberfläche; im Bilanzen-Grid sind zeitschrittweise aufsummierte Werte abgelegt); 2. Eintrag: modellintern benutzter Dateiname; 3. Eintrag: Ausgabeoption (D = täglich, M = monatlich, Y = jährlich; auch gekoppelte Ausgaben möglich, z. B. MY = sowohl monatliche als auch jährliche Werte)
- Zeile 12: im Beispiel als Kommentarzeile deklariert (#). Hier könnten weitere Ausgaben definiert werden.
- Zeile 13: Anzahl der von WaSiM-ETH zu übergebenden Statistik-Dateien. Diese Dateien werden nicht im Gridformat, sondern in Tabellenform bereitgestellt
- Zeile 14: 1. Eintrag: Pfad und Name der Tabellendatei mit dem Direkt- oder Oberflächenabfluss; 2. Eintrag: modellintern benutzter Dateiname
- Zeile 15: 1. Eintrag: Pfad und Name der Tabellendatei mit dem Interflow; 2. Eintrag: modellintern benutzter Dateiname
- Zeile 16: Pfad und Name der von WaSiM-ETH bereitgestellten Synchronisationsdatei
- Zeile 17: Inhalt der von WaSiM-ETH bereitgestellten Synchronisationsdatei

4.1.6 Aufruf von WaSiM-ETH durch Geofim

Die Realisierung des Aufrufs von WaSiM-ETH durch Geofim ist in Kapitel 4.1 dargelegt.

4.1.7 Zugriff auf WaSiM-ETH-interne Parameter der Wasserhaushaltsbilanzierung

Die bilanzreine Simulation der Wasserflüsse lässt sich über die Lösung der folgenden grundlegenden Bilanzgleichung überprüfen:

$$\sum$$
 Zuflüsse - \sum Abflüsse - \sum Speicheränderungen = 0 Gleichung 8

WaSiM-ETH gestattet dem Anwender die Überprüfung der Modellergebnisse und damit der Wasserflüsse und -bilanzen über die optionale Ausgabe von zonenorientierten (z. B. gemittelte oder aggregierte Daten für Teileinzugsgebiete) und gerasterten Datensätzen (Grids, Stacks) sowie über Kontrollpunktausgaben. Die Ausgaben können für jeden individuellen Simulationszeitschritt oder aber für aggregierte bzw. gemittelte Zeitschritte abgespeichert werden.

Im Folgenden werden die WaSiM-ETH-Modellausgaben gelistet, die für eine Überprüfung der berechneten Wasserflüsse und -speicher genutzt werden können. Die Ausgabeparameter sind nach Flussvariablen, Speichervariablen und Zustandsvariablen unterteilt. Kursiv dargestellte Zustandsvariablen stellen keine Elemente der Wasserhaushaltsbilanzierung dar, sondern beschreiben entweder die Geländestruktur oder die Vegetationsentwicklung und wirken daher nur indirekt auf den modellinternen Wasserkreislauf ein.

Ausgangslage

In seiner bisherigen Version 5.0 (KliWEP1) können durch WaSiM-ETH folgende relevante Ausgabegrößen für die Wasserhaushaltsbilanzierung bereitgestellt werden (ohne Berücksichtigung der Ausgaben vom Gletscher-Modul):

Flussvariablen:

- Niederschlag [mm/ Δt]
- Bestandesniederschlag $[mm/\Delta t]$ _
- Schneedeckenausfluss (Niederschlag + Schneeschmelze) $[mm/\Delta t]$ _
- Schneeschmelze $[mm/\Delta t]$
- potenzielle Evapotranspiration $[mm/\Delta t]$
- reale Evapotranspiration (ohne Interzeptionsverdunstung) $[mm/\Delta t]$
- Interzeptionsverdunstung $[mm/\Delta t]$
- Direktabfluss (Oberflächenabfluss als Gridausgabe nicht geroutet) [mm/Δt]
- Interflow aus der ungesättigten Bodenzone (als Gridausgabe nicht geroutet) $[mm/\Delta t]$
- Basisabfluss (Grundwasserabfluss, nicht geroutet) $[mm/\Delta t]$
- Infiltrationsüberschuss $[mm/\Delta t]$ -
- Infiltration vom Gerinne ins Grundwasser oder in die ungesättigte Bodenzone $[mm/\Delta t]$ -
- Exinfiltration vom Grundwasser ins Gerinne $[mm/\Delta t]$ -
- Drainageabfluss $[mm/\Delta t]$ -
- Netto-Grundwasserneubildung als Summe aus vertikalem Grundwasserzu- und -abfluss und aus lateralem Grundwasserfluss $[mm/\Delta t]$
- Flüsse zwischen den Bodenschichten [m/s]

Speichervariablen:

- Schneespeicher (fest) [mm]
- Schneespeicher (flüssig) [mm]
- Inhalt des Interzeptionsspeicher [mm]
- Inhalt des Landoberflächenspeichers (pond storage) [mm]
- relative Bodenfeuchtigkeit in der durchwurzelten Bodenzone [0..1]
- relative Bodenfeuchtigkeit in der gesamten ungesättigten Bodenzone [0..1]
- mittlerer Wassergehalt für jede Bodenschicht [0.01 Vol %]

Zustandsvariablen:

- Grundwasserstand unter Gelände [m]
- Bodenschichtindex der Grundwasserspiegellage [-]
- hydraulische Höhe an der Bodenschichtgrenze [m]
- durch Infiltration gesättigte Flächen (1 = gesättigt, 0 = ungesättigt)
- geodätische Geländehöhe [m] _

Implementierte Erweiterungen

Gegenüber der in KliWEP1 genutzten Modellversion weist die aktuelle Version (WaSiM-ETH 7.2.7) die folgenden zusätzlichen Ausgabeoptionen auf:

Flussvariablen:

- Regen (flüssiger Niederschlagsanteil) $[mm/\Delta t]$
- Schnee (fester Niederschlagsanteil) $[mm/\Delta t]$
- Schneeverdunstung $[mm/\Delta t]$ _
- Bestandesniederschlag für Vegetationskomponenten [mm/Δt] -
- potenzielle Interzeptionsverdunstung für Vegetationskomponenten [mm/\Deltat]
- reale Interzeptionsverdunstung für Vegetationskomponenten [mm/\Deltat] -
- potenzielle Evapotranspiration für Vegetationskomponenten [mm/\Deltat] -
- reale Transpiration für Vegetationskomponenten [mm/ Δt] -
- _ Infiltration in die oberste Bodenschicht $[mm/\Delta t]$
- potenzielle Evaporation aus der obersten Bodenschicht $[mm/\Delta t]$
- reale Evaporation aus der obersten Bodenschicht $[mm/\Delta t]$
- vertikaler Grundwasserspeisung (Perkolation) $[mm/\Delta t]$
- vertikale Grundwasserzehrung (kapillarer Aufstieg) $[mm/\Delta t]$
- tiefendifferenzierte Entnahme von Bodenwasser durch Transpiration [mm/Δt]
- tiefendifferenzierter Interflow $[mm/\Delta t]$
- Makroporeninfiltration $[mm/\Delta t]$

Speichervariablen:

- Interzeptionsspeicherfüllung für Vegetationskomponenten [mm/Δt]
- Schneespeicher (gesamt) $[mm/\Delta t]$
- Bodenwassergehalt integriert über das gesamte Bodenprofil [mm/Δt]
- Bilanz aller Bodenwassergehaltsänderungen durch die Kopplung mit Geofim [mm/ Δt]

Zustandsvariablen:

- Grundwasserstand mit geodätischen Höhenangaben (im Kopplungsmodus) [m üNN]

4.1.8 Erweiterung der Landnutzungtabelle für beliebig viele phänologische Phasen

Die Landnutzung oder Landbedeckung stellt eine maßgebliche Steuergrösse für den Energie-, Stoff- und Wasserhaushalt von terrestrischen Ökosystemen dar. Nach Seidler (1996) beeinflusst sie beispielsweise

- den meteorologischen Input in die Bodenzone durch Strahlungs- und Niederschlagsinterzeption,
- den Entzug von Energie und Wasser durch Transpiration,
- das Verhältnis von Oberflächenabfluss und Infiltration,
- das Verhältnis Hoch- und Mittelabfluss (Anm. der Autoren: in der hier verwendeten Terminologie entspricht dies "Oberflächenabfluss und Interflow")
- die mikrometeorologische Zirkulation,
- den Stoffkreislauf durch Entzug, Streufall, Humusbildung und Mineralisierung.

Infolge ihrer Bedeutsamkeit sollten Wasserhaushaltsmodelle die Landnutzung möglichst detailliert erfassen und parametrisieren können. Ein Ziel von KliWEP2 bestand daher darin, die Möglichkeiten für die Parametrisierung der Landnutzung in WaSiM-ETH zu verbessern. Dazu sollte die in WaSiM-ETH integrierte Landnutzungstabelle von derzeit einer (z. B. Albedo), vier (z. B. Blattflächenindex) bzw. zwölf (Verdunstungswiderstand) auf beliebig viele Stützstellen erweitert werden, um dadurch den jahreszeitlichen Gang für die erfassten landnutzungsabhängigen Parameter wie z. B. den Blattflächenindex oder die effektive Bewuchshöhe detaillierter beschreiben zu können.

In der bisherigen Landnutzungstabelle können beliebig viele Landnutzungstypen erfasst und parametrisiert werden. Die Parametrisierung hat dabei nach einer fest vorgegebenen Tabellenstruktur zu erfolgen. Pro Landnutzungstyp werden die in Abbildung 15 gezeigten Parametereinträge verlangt.

# In # Co [lan	# In the real file, the land-use table has too long lines to show them here as complete lines. # Consequently word wrap is done by arrows in this documentation only! [landuse_table]															
10		# numb	ber d	of fo	llow	ring	land-	-use	code	s; p	er rot	w one	land-	use t	суре	
#Co	name of the	albe- surface resistances rsc as monthly values Julian day for							ian day for 🛛							
#de	land-use type	do	1	2	3	4	5	6	7	8	9 10	11	12	the	paramsets	
#																
1	water	0.05	20	20	20	20	20	20	20	20	20 20	0 20	20	110	150 250 280	
2	settlements	0.1	100	100	100	100	100 1	LOO 1	00 1	00 1	00 10	0 100	100	110	150 250 280	
3	pine_forest	0.12	80	80	75	65	55	55	55	55	55 7	5 80	80	110	150 250 280	
4	decidous_forest	0.17	100	100	95	75	65	65	65	65	65 8	5 100	100	110	150 250 280	\rightarrow
5	mixed forest	0.15	90	90	85	70	60	60	60	60	60 80) 90	90	110	150 250 280	(
6	agriculture	0.25	80	80	75	75	65	65	65	65	65 7	5 90	90	110	150 250 255	
7	grass	0.25	90	90	75	65	50	55	55	55	60 70) 90	90	110	150 250 280	
8	bushes	0.20	80	80	70	70	50	50	50	55	55 70	0 80	80	110	150 250 280	
15	rock	0.12	250	250	250	250	250 2	250 2	50 2	50 2	50 250	250	250	110	150 250 280	
19	horticulture	0.25	100	100	90	70	60	60	60	60	60 80	0 100	100	110	150 250 280	_
	•															\rightarrow
	<pre> # second pai</pre>	t of t	the l	andı	ise t	able	9									
	LAI		(eff	. ve	eg. h	leigh	nt) ve	eg. c	over	ing	root	t dep	th [m]		Param. root	h-value
	1 2 3	4	z01	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	distribution.	etp-red
\		1	0.1	01	01	01	1	1	1	1	0 01	0 01	0 01	0 01	1 0	2 45
		1	.01	.01	.UI	.01	• 1	• 1	• 1	• 1	0.01	0.01	0.01	0.01	1.0	3.45
	$\prec \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\$	1	10	10	10	10	.5	. 5	.5	. 5	0.2	0.2	0.2	0.2	1.0	3.45
	8 12 12	8	10	10	10	10	.9	.9	.9	.9	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	3.45
	.5 8 8 .	. 5	.3	10	10	.3	• /	.95	.95	• /	1.4	1.4	1.4	1.4	1.0	3.45
	2 10 10	2	3	10	10	3	.8	.92	.92	.8	1.3	1.3	1.3	1.3	1.0	3.45
	1 5 3	1	.05	.5	.2	.05	.3	.8	. 7	.3	0.05	0.4	0.3	0.05	1.0	3.45
	2 4 4	2	.15	.4	.3	.15	.95	.95	.95	.95	0.4	0.4	0.4	0.4	1.0	3.45
	3 5 5	3	1.5	2.5	2.5	1.5	.9	.95	.95	.9	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	3.45
	1111	1	.05	.05	.05	.05	.8	.8	.8	.8	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	0.5
	.5 5 5 .	. 5	.4	3	3	.4	.75	5.75	.75	.75	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	3.45

Abbildung 15: Bisherige Parametrisierung der Landnutzung in WaSiM-ETH (KliWEP1)

Im Vergleich zur bisherigen WaSiM-ETH-Landnutzungstabelle enthält die modifizierte Tabelle einige wesentliche Erweiterungen, die dem Modellnutzer eine flexiblere Parametrisierung der Vegetation ermöglichen. Es ist nun möglich, für jeden Landnutzungstyp eine individuelle und beliebige Anzahl an Stützstellen zu vergeben. Zwischen den Stützstellen wird weiterhin linear interpoliert; ebenso wird die letzte Stützstelle eines Jahres mit der ersten des Folgejahres interpoliert. Die Parametrisierung eines Landnutzungstyps kann sowohl mit als auch ohne Zeilenumbrüche vorgenommen werden. Jeder landnutzungsspezifische Parameterblock beginnt und endet mit einer geschweiften Klammer. Parametergruppen sind durch Strichpunkte voneinander getrennt. Der Methodenbezeichner "VariableDayCount" signalisiert WaSiM-ETH, dass ein erweiterter Landnutzungseintrag einzulesen ist. Das Format der erweiterten (variablen) Einträge in der Landnutzungstabelle ist in Abbildung 16 dargestellt.

[landuse table]												
1 # number of following land-use codes												
#co- name of the												
#de land-use type												
#												
7 grass {method = VariableDayCount;												
RootDistr	= 1.0;											
TReduWet	= 0.95;											
LimitReduWet	= 0.5;											
HReduDry	= 3.45;											
IntercepCap	= 0.75;											
Juldays	= 15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349;
Albedo	= 0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25;
rsc	= 90	90	75	65	50	55	55	55	60	70	90	90;
rs interceptior	n = 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5;
rs evaporation	= 130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130;
LAI	= 2	2	2	2	3	4	4	4	4	2	2	2;
zO	= 0.15	0.15	0.15	0.15	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.15	0.15	0.15;
VCF	= 0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95;
RootDepth	= 0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4;
AltDep	= 0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02;}

Abbildung 16: Erweiterte Parametrisierung der Landnutzung in WaSiM-ETH. Oben: "multi-line" Format (Parametrisierung <u>mit</u> Zeilenumbruch), unten: "single-line" Format (Parametrisierung <u>ohne</u> Zeilenumbruch)) Die verwendeten Abkürzungen in Abbildung 16 bezeichnen:

	# Englische Beschreibung
RootDistr TReduWet LimitReduWet HReduDry Juldays Albedo rsc rs interception rs_evaporation LAI z0 VCF RootDepth AltDep	<pre>: parameter for root density distribution : relative theta value for beginning oxygen stress [-] : relative reduction factor of real transpiration for water-saturated soils [-] : hydraulic head for beginning dryness stress [m] : Julian days for all following rows : albedo (snow free) [01] : leaf surface resistance [s/m] : interception surface resistance [s/m] : soil surface resistance (for evaporation only) [s/m] : leaf area index [m²/m²] : aerodynamic roughness length [m] : vegetation covered fraction [01] : root depth [m] : shift per metre altitude [Julian day]</pre>
*	
	# Deutsche Beschreibung
RootDistr	: Parameter für die Wurzeldichteverteilung
TReduWet	: Grenzwert der relativen Bodenfeuchte (nahe Sättigung), bei dem eine Reduktion des
LimitReduWet	transpirativen Bodenwasserentzugs infolge Sauerstoffmangel beginnt [-] : max. relative Reduktion des transpirativen Bodenwasserentzugs bei Sättigung [-]
нкеаиргу	: Grenzwert der Saugspannung, bei dem eine Reduktion des transpirativen Rodenwasserentzuns infolge Trockenbeitsstress beginnt [m]
Juldays	: Stützstellen der phänologischen Entwicklung in Kalendertagen (gültig für alle
Albedo	: Albedo für die schneefreie Zeit [01]; gilt für erste (= oberstgelegene) Vegetationskomponente
rsc	: Oberflächenwiderstand der Vegetation [s/m]
rs_interception	: Oberflächenwiderstand des interzipierten Wassers [s/m]
rs_evaporation	: Evaporationswiderstand der Bodenoberfläche [s/m]
LAI	: Blattflächenindex [m²/m²]
z0	: aerodynamische Rauhigkeitslänge [m]
VCF	: Vegetationsbedeckungsgrad [01]
RootDepth	: Wurzeltiefe [m]
нтспер	verschlebung der Schlzstelle pro Meter Honendillerenz [uhllan day]; positiver Wert: Stützstelle wird nach "hinten" verschoben, negativer Wert: Stützstelle wird nach "vorn" verschoben. Einschränkung: Wenn zwei Stützstellen aufeinander treffen, dann erfolgt keine weitere Verschiebung.

Die erweiterte Landnutzungstabelle kann in gemischter Form verwendet werden; d. h. es können in einer Tabelle sowohl Landnutzungen im "single-line" als auch im "multi-line" Format parametrisiert werden. Darüber hinaus ist die aktuelle WaSiM-ETH Modellversion auch in der Lage, mit den bisherigen (alten) Landnutzungstabellen zu arbeiten, oder beide Varianten parallel zu nutzen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit empfehlen die Autoren jedoch die Nutzung eines einheitlichen Parametrisierungsformates.

4.2 Erweiterung von WaSiM-ETH um differenzierte Bodeneigenschaften

4.2.1 Ausgangssituation

Anwendung der diskreten Richards-Gleichung

Die vertikale Bodenwasserbewegung kann in WaSiM-ETH-2 seit Version 2 (Schulla und Jasper 1998, 2000) auf Grundlage der allgemeinen Fließgleichung für Wasser im ungesättigten Boden, der sogenannten Richards-Gleichung (Richards 1931), modelliert werden. Die Richards-Gleichung beruht auf einer Erweiterung des Darcy-Gesetzes (Buckingham 1907) auf nichtstationäre Verhältnisse unter Einbeziehung der Kontinuitätsgleichung. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Veränderung des Wassergehaltes eines Bodenvolumens in einer Zeiteinheit und dem Fluss, der durch einen Potenzialgradienten hervorgerufen wird. Bei der Richards-Gleichung handelt es sich um eine parabolische, nichtlineare partielle Differenzialgleichung zweiter Ordnung, die in den meisten Anwendungsfällen numerisch gelöst werden muss. In WaSiM-ETH wird dafür ein eindimensionales Finite-Differenzen-Verfahren angewandt. Bei diesem approximativen Lösungsansatz wird das Raum-Zeitkontinuum in ein diskretes Analogon überführt. Entsprechend wendet WaSiM-ETH die Richards-Gleichung in ihrer diskreten Form an (siehe auch Schulla & Jasper 2000):

Gleichung 9

$$\frac{\Delta\Theta}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta z} = q_{in} - q_{out}$$

mit Θ Wassergehalt [m³/m³]

t Zeit [s]

q spezifischer Fluss [m/s]

z Vertikalkoordinate [m]

 q_{in} Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]

 q_{out} Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht [m/s]

Bei der Ermittlung der Flüsse q_{in} und q_{out} werden die Abhängigkeiten der hydraulischen Bodenparameter vom Wassergehalt des Bodens berücksichtigt. Für den Fluss q zwischen zwei Schichten mit den Indizes u (upper) und l (lower) gilt:

$$q = k_{eff} \cdot \frac{h_h(\Theta_u) - h_h(\Theta_l)}{0.5 \cdot (d_u + d_l)}$$
 Gleichung 10

und

mit

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{d_u}{d_l + d_u} \cdot \frac{1}{k(\Theta_u)} + \frac{d_l}{d_l + d_u} \cdot \frac{1}{k(\Theta_l)}$$
Gleichung 11

q	Fluss zwischen zwei Diskretisierungsschichten [m/s]
$k_{(eff)}$	(effektive) hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
h_h	hydraulische Höhe in Abhängigkeit vom Wassergehalt als Summe aus Saugspannung ψ
	(mit $\psi \leq 0$) und geodätischer Höhe h_{geo} [m]
d	Schichtmächtigkeit [m]

Gemäß Gleichung 12 wird k_{eff} als harmonisches Mittel der Leitfähigkeiten beider Schichten gebildet, wobei unterschiedliche Schichtdicken über die Fraktion der jeweiligen Schicht an der Gesamtdicke beider Schichten berücksichtigt werden. Somit können beliebige Schichtdicken genutzt werden.

Bisherige Parametrisierung der Bodeneigenschaften

In WaSiM-ETH können die hydraulischen Eigenschaften des Bodens bisher auf zwei unterschiedlichen Wegen parametrisiert werden:

<u>Methode 1</u>: Es können für jede Bodenart beliebig viele Wertepaare $[\Theta, \psi(\Theta)]$ und $[\Theta, k_{rel}(\Theta)]$ in Tabellenform angegeben werden. k_{rel} ist dabei die relative hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad des Bodens. Zwischen den Tabelleneinträgen wird vom Modell linear interpoliert. Diese Methode bietet den Vorteil, dass das Verhalten von ψ und k_{rel} optimal an Messwerte angepasst werden kann. Nachteilig ist hingegen der hohe Datenbedarf. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s kann bei dieser Methode für jede Bodenschicht gesondert angegeben werden.

<u>Methode 2</u>: Es wird die Beziehung nach van Genuchten (1980) genutzt, um die gesuchten bodenartspezifischen Kennlinien zu ermitteln.

$$\psi(\Theta) = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/n}$$
Gleichung 12

und

$$\frac{k(\Theta)}{k_s} = \left[\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right]^{1/2} \cdot \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right)^{1/m} \right\}^m \right]^2$$
Gleichung 13

mit

- ψ Saugspannung [m]
- α empirischer Parameter [m⁻¹]
- *m* empirischer Parameter [-], nach Mualem (1976) gilt m = 1-1/n
- *n* empirischer Parameter [-]
- Θ aktueller Wassergehalt [-]
- Θ_r residualer Wassergehalt bei $k(\Theta) = 0$ [-]
- *Θ*_s Sättigungswassergehalt [-]
- k_s gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

Unter Nutzung von Gleichung 12 kann die Berechnung des Wassergehaltes in Abhängigkeit von der aktuellen Saugspannung dargestellt werden:

$$\Theta = \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) \left(\frac{1}{1 + (\psi\alpha)^n}\right)^m$$
 Gleichung 14

Im Gegensatz zur Parametrisierung nach "erweiterter Wertetabelle" (Methode 1) erlaubt die Methode 2 keine schichtweise Definition von k_s , sondern ermittelt anhand eines funktionalen Zusammenhangs die Veränderung (Abnahme) von k_s mit zunehmender Bodentiefe.

$$k_{s,z} = k_s \cdot k_{rec}^{\ z}$$
 Gleichung 15

mit $k_{s,z}$ gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in der Tiefe z [m/s] k_s gesättigte hydraulische Leitfähigkeit an der Bodenoberfläche [m/s] k_{rec} Rezessionskonstante [-]zTiefe [m]

Die bodenphysikalischen Eigenschaften werden in der WaSiM-ETH Steuerdatei durch entsprechende Einträge in der Bodenartentabelle repräsentiert (vgl. Abbildung 17).

# Lik # com [soil	e fo: plete _tabl	r the landus e lines. The le]	se table, e arrows s	in the hould :	real : indicat	file t te tha	he soi t fact	l table ha	s too long documentat	lines to show	w them here as
14		#	number o	f follo	owing e	entrie	s; per	row one s	oil textur	e	
#Code	nar	ne			FC	m	SB	ksat	suction	Readpar	
#				[]	/ol.%]	[V	ol.%]	[m/s]	[mm]	1=par 2=tab	
#											
1	Sand	d (S)			6.21	3	8.5	8.25E-5	385	1	
2	loar	my sand (LS)			10.91	3	7.3	4.05E-5	373	1	
3	sand	dy loam (SL)			12.28	3	4.5	1.23E-5	345	1	
4	silt	ty loam (SII	L)		22.58	3	8.3	1.25E-6	383	1	
5	loar	n (L)			12.90	3	5.2	2.89E-6	352	1	
6	sand	dy clay (SC)			19.43	2	8.0	3.33E-7	280	1	\succ
7	silt	ty clay (SIC	2)		27.65	2	9.0	5.56E-8	290	1	
8	clay	y (C)			29.12	3	1.2	5.56E-7	312	1	
9	moor	r (M)			47.31	7	5.0	8.25E-5	750	1	
10	set		ck (R)		14.00	1	5.0	1.00E-9	50	1	
11	clay	v loam (CL)			21.24	3	1.5	7.22E-7	315	1	
12	silt	t (SI)			28.17	4	2.6	6.94E-7	426	1	
13	silt	tv clav loam	n (SICL)		28.16	3	4.1	1.94E-7	341	1)
14	sand	dv clav loam	(SCL)		13.35	2	9.0	3.64E-6	290	1	
	>	·									
		theta sat	theta res	alpha	n	Layer	thick	maxratio	k-rec	ession	
		[1/1]	[1/1]	[l/m]	[-]	[-]	[m]	ko rel/ku	rel per m	ku/ko	
		.43	.045	14.5	2.68	31	.3333	90		 7	
		.43	.057	7.00	1.70	31	.3333	90		7	
		.41	.065	7.50	1.89	31	.3333	90		7	
		.45	.067	2.00	1.41	31	.3333	90		7	
		.43	.078	3.60	1.56	31	.3333	90		7	
	\prec	.38	.100	2.70	1.23	31	.3333	90		7	
		.36	.070	0.50	1.09	31	.3333	90		7	
		.38	.068	0.80	1.09	31	.3333	90		7	
		.80	.200	4.00	1.23	31	.3333	90		7	
		.20	.040	8.00	1.80	31	.3333	90		7	
		.41	.095	1.90	1.31	31	.3333	90		7	
		.46	.034	1.60	1.37	31	.3333	90		7	
		.43	.089	1.00	1.23	31	.3333	90		7	
		.39	.010	5.90	1.48	31	.3333	90		7	

Abbildung 17: Bisherige Parametrisierung der Bodenarten (Methode 2) in WaSiM-ETH

Die verwendeten Abkürzungen in Abbildung 17 bezeichnen:

	# Die folgenden Parameter werden ausschliesslich für die Parametrisierung der WaSiM- # ETH Topmodel-Variante benötigt.
FC	: nutzbare Feldkapazität [Vol. %]
mSB	: maximaler Bodenwasserspeicher [Vol. %]; entspricht dem Wassergehalt zwischen per- manenten Welkepunkt und Porosität
suction	: Saugspannung an Feuchtefront (nach Peschke 1977, 1987) [mm]
	# Nun folgen die Parametereinträge mit Relevanz für WaSiM-ETH Richards-Gleichung.
ksat	: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, k _s [m/s]
theta_sat	: Sättigungswassergehalt, Θ_s [0.01 Vol. %]; Θ_s entspricht nicht der Porosität, son- dern ist in der Regel 5-10% kleiner wegen des im Bodenwasser gelösten Luftanteils (van Genuchten et al. 1991).
theta_res	: residualer Wassergehalt, Θ _r [0.01 Vol. %]; Θ _r ist ein extrapolierter Parameter, der nicht notwendigerweise den kleinstmöglichen Wassergehalt im Boden repräsentieren muss (van Genuchten et al. 1991). Er ist damit auch nicht mit dem Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt gleichzusetzen.
alpha	: empirischer Parameter, α [1/m] (Formparameter der van Genuchten-Kurve)
n	: empirischer Parameter [-] (Formparameter der van Genuchten-Kurve)
	# Anmerkung: Die Literatur weist für die van Genuchten-Parameter (Θ_s , Θ_r , α , n) keine # einheitlichen Werte aus. Die Werte in Abb. 15 entstammen den Angaben nach Carsel & # Parrish (1988). Der Ansatz nach van Genuchten ist für die Modellierung von sehr # trockenen Verhältnissen (Bereich zwischen Welkepunkt und Adorptionswasserbereich) # als eher ungeeignet einzustufen.
layer	: Anzahl der Bodenschichten
thick	: Schichtmächtigkeit, d [m]
maxratio ku re	<pre>el/ko rel : maximaler Leitfähigkeitssprung zwischen zwei benachbarten Bodenschichten zur Flussberechnung [-]</pre>
k-recession	: Rezessionsparameter k _{rec} zur Beschreibung der k _{sat} -Abnahme mit zunehmender Bodentiefe

Defizite in der Bodenparametrisierung (KliWEP1)

Die bisherige Parametrisierung der Bodeneigenschaften (vgl. Abbildung 17) ist mit verschiedenen vereinfachenden Annahmen verbunden, die eine prozessorientierte Simulation der Bodenwasserbewegung nur bedingt zulassen (vgl. Tabelle 6). Deshalb wurde in KliWEP2 die erweiterte Parametrisierung von WaSiM-ETH um differenzierte Bodeneigenschaften als ein vordringliches Projektziel formuliert.

 Tabelle 6:
 Bisherige Defizite in der Parametrisierung der ungesättigten Bodenzone

Annahmen	\rightarrow	Limitierungen
homogenes Bodenprofil mit "mittleren" oder "effektiven" van Genuchten-Parameter	\rightarrow	keine Möglichkeit, Bodenprofile hori- zontweise zu parametrisieren
einheitliche Schichtmächtigkeiten	\rightarrow	keine Möglichkeit, spezifische Horizontab- folgen und –mächtigkeiten zu definieren
Abnahme von k_s mit zunehmender Tiefe	\rightarrow	keine Möglichkeit, k _s -Werte horizontwei- sen zuzuordnen
homogene, monoporöse Bodenprofile mit do- minierendem Matrixfluss	\rightarrow	keine Möglichkeit, explizit Makroporen- fluss zu simulieren

4.2.2 Wasserretention (pF-Kurve)

Zur Erfüllung der Vorgabe einer horizontweisen Parametrisierung der Bodeneigenschaften wurde die in Abbildung 17 dargestellte Bodenartentabelle analog zur Struktur der erweiterten Landnutzungstabelle umgeformt. Nun können Parametrisierungen von Bodeneinheiten sowohl mit als auch ohne Zeilenumbrüche vorgenommen werden. Jeder Parameterblock ist von geschweiften Klammern eingefasst, Parametergruppen sind durch Strichpunkte voneinander getrennt. Der Methodenbezeichner "MultipleHorizons" signalisiert WaSiM-ETH, dass ein erweiterter Tabelleneintrag einzulesen ist (vgl. Abbildung 18).

In der erweiterten Bodentabelle lassen sich beliebig viele Bodenprofile mit beliebigen Horizontabfolgen parametrisieren. Dem Modellanwender ist es nun möglich, horizontspezifische Parameterwerte für die Wasserretentionskurve (van Genuchten-Parameter) zu vergeben. Zudem kann er die Mächtigkeit des aktuellen Bodenhorizonts über die Anzahl und Dicke von horizontbezogenen Bodenschichten definieren. Aus modelltechnischen Gründen ist es erforderlich, dass alle Bodenprofile die gleiche Anzahl an Bodenschichten haben. Aufgrund unterschiedlicher Schichtdicken können die Profiltiefen von Gridzelle zu Gridzelle variieren. Bei der Parameterfestlegung ist darauf zu achten, dass die gewählte Gesamttiefe des Bodenprofils nicht oberhalb der Oberfläche des obersten (ungespannten) Grundwasserleiters liegt. Andernfalls können Konflikte während des Betriebes des WaSiM-ETH Grundwassermodells auftreten, wenn der Grundwasserspiegel unter die letzte Bodenschicht absinkt.

4.2.3 Hydraulische Leitfähigkeit

Die Umsetzung der horizontweisen Parametrisierung der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion (k_s bzw. k_{θ}) ist eng mit der Implementierung horizontspezifischer pF-Kurven verknüpft. Die entsprechenden Erweiterungen von WaSiM-ETH wurden daher bereits im vorherigen Kapitel 4.2.2 beschrieben.

Als Folge dieser Erweiterung wurde der Anwendungsbereich der bisherigen tiefenbedingten k_s -Abnahmefunktion (vgl. Gleichung 15) vom Gesamtbodenprofil auf Einzelhorizonte verlagert. So kann der Anwender nun die k_s -Abnahme interaktiv horizontweise vorgeben. Eine Deaktivierung der k_s -Abnahme wird durch eine Festlegung des Parameters k_recession auf den Wert 1.0 erreicht. Die effektive Leitfähigkeit wird nun automatisch von der Schicht genommen, die den größeren k-Wert besitzt und nicht mehr anhand des geometrischen Mittels berechnet (vgl. Gleichung 11).

	DMagra@hrach	= Multipl	eHorizon	s;			
	horizon	= 1	2	3:			
	Name	= SL	sc	L;			
	ksat	= 1.2e-5	3.3e-7	3.0e-6;			
	k recession	= 0.4	0.4	0.8;			
	theta sat	= 0.41	0.38	0.43;			
	theta res	= 0.065	0.10	0.078;			
	alpha	= 7.50	2.70	3.60;			
	Par_n	= 1.89	1.23	1.56;			
	Par_tau	= 0.5	0.3	0.5;			
	thickness	= 0.10	0.20	0.40;			
	layers	= 3	2	25;	}		
2 pro:	file 2 {method	= Multipl	eHorizon	.s;			
	horizon	= 1	2	з	4.		
	Name	= SL	SC	T.	SICL:		
	ksat	= 4.0e-5	1.0e-7	3.0e-6	2.0e-7:		
	k recession	= 1.0	1.0	1.0	1.0;		
	theta sat	= 0.43	0.39	0.43	0.43;		
	theta res	= 0.057	0.10	0.078	0.089;		
	alpha	= 7.50	5.90	3.60	1.00;		
	Par_n	= 1.89	1.48	1.56	1.23;		
	Par tau	= 0.5	0.3	0.5	0.5;		
		0 1 5	0 10	0.20	0.50;		
	thickness	= 0.15	0.10	0.20			

```
2 profile_2 {method = MultipleHorizons; ... ; thickness = 0.15 0.10 0.20 0.50; layers = 2 1 3 24;}
Abbildung 18: Erweiterte Bodentabelle in WaSiM-ETH mit Definition von 2 Bodenprofilen. Oben: "mul-
ti-line" Format (Parametrisierung mit Zeilenumbruch), unten: "single-line" Format (Pa-
```

1 profile_1 {method = MultipleHorizons; ... ; thickness = 0.10 0.20 0.40; layers = 3 2 25;}

rametrisierung ohne Zeilenumbruch)

Die verwendeten Abkürzungen in Abbildung 18 bezeichnen:

horizon	: Bodenhorizont, Horizontcodierung (von links nach rechts) entspricht der aktuellen
	Horizontabfolge (yon oben nach unten)
	norrzoncabrorge (von oben nach unten)
Name	: Name/Symbol des Horiontes
k recession	: Abnahme von ksat mit der
ksat	: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
theta sat	: Sättigungswassergehalt [0.01 Vol. %]
theta_res	: residualer oder Restwassergehalt [0.01 Vol. %]
alpha	: empirischer Parameter [1/m]
Par_n	: empirischer Parameter [-]
Par tau	: Porenkonnektivitätsparameter in der Wassergehalts-Leitfähigkeits-Funktion nach
	Mualem / van Genuchten
thickness	: Schichtmächtigkeit [m]
layers	: Anzahl der Bodenschichten

Im Vergleich zur alten Version entfällt in der erweiterten Bodentabelle der Parameter zur Beschreibung des maximalen Leitfähigkeitsprungs zwischen benachbarten Bodenschichten (maxratio ku_rel/ko_rel). Da die Versickerung jetzt nur noch vom k-Wert der Ausgangsschicht abhängt, wird der Versickerungsvorgang nun gleichmäßiger und schneller als bisher simuliert. Überdies trägt die neue Methode dazu bei, dass sich die Gefahr von Schwingungen in den Flüssen zwischen den Schichten reduziert.

Die neue Bodentabelle enthält im Gegensatz zur alten einen zusätzlichen Form-Parameter für die ungesättigte Leitfähigkeitsfunktion. Während in der bisherigen Modellversion der sogenannte Mualem-Parameter *Tau* (Porenkonnektivitätsparameter) auf den Standardwert 0.5 fixiert war (Empfehlung von Mualem (1976)), ist dieser nun interaktiv wählbar. So ist in WaSiM-ETH nun eine flexiblere Parametrisierung der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion auf Grundlage von Pedotransferfunktionen (z. B. Wösten, vgl. Kapitel 5.2) möglich.

4.2.4 Oberflächenabfluss

Mit der erweiterten Bodentabelle (vgl. Kapitel 4.2.2, Kapitel 4.2.3) lassen sich beliebige Horizontmächtigkeiten definieren und somit auch Verschlämmungseffekte und damit verknüpfter Oberflächenabfluss simulieren. Bei der Anwendung sollte jedoch beachtet werden, dass eine sehr feine Diskretisierung des Oberbodens mit einer Überprüfung des aktuellen Simulationsintervalls einherzugehen hat. Insbesondere ist zu prüfen, dass die sogenannte Courant-Bedingung, welche eine numerisch stabile Lösung der Richards-Gleichung garantiert, zumindest näherungsweise erfüllt wird. Das Courant-Kriterium *Co* wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Co = \left| \frac{\Delta t \cdot v}{\Delta x} \right| \le 1$$
 Gleichung 16

mit	Δt	Zeitschritt [s]
	v	Geschwindigkeit [m/s]
	Δx	räumlicher Knotenabstand [m]

Nach Umformung von Gleichung 16 ergibt sich:

$$\Delta x \ge \Delta t \cdot v$$
 bzw. $\Delta t \le \frac{\Delta x}{v}$ Gleichung 17

Setzt man für Δx die Dicke der jeweiligen Bodenschicht, für Δt den Simulationszeitschritt und für v die hydraulischen Leitfähigkeit ein, so ergeben sich die Randbedingungen, in denen die numerische Lösung der Modellgleichung stabil bleiben sollte.

Die Courant-Bedingung hat weitreichende Konsequenzen für die räumliche und zeitliche Diskretisierung einer Modellanwendung. So wäre nach Gleichung 17 für die Simulation der Wasserbewegung in einer Bodenschicht mit der Dicke $\Delta x = 0.1$ m und einer angenommenen Leitfähigkeit von k = 3.33e-4 m/s ein Δt von ≤ 5 Minuten erforderlich, während für $\Delta x = 0.03$ m und k = 8.3e-6 m/s ein Δt von 1 Stunde genügen würde, um die Courant-Bedingung erfüllen zu können. Verschlämmte Oberböden mit k = 1.0e-7 sollten sich hingegen sogar mit $\Delta x = 0.01$ m und $\Delta t = 1$ Tag numerisch stabil modellieren lassen.

Verschlämmungseffekte, d. h. die Bildung einer geringdurchlässigen Schicht an der Bodenoberfläche, sind erfahrungsgemäß häufig mit Starkniederschlägen verknüpft, welche einer hohen zeitlichen Dynamik unterliegen. So sind nach Roth et al. (1995) Starkniederschläge mit einer Intensität von mindestens 5-10 mm/h Auslöser für Verschlämmung. Simulationen des Oberflächenabflusses infolge von Verschlämmung sollten deshalb unter der Verwendung kleiner Zeitschrittweiten ($\Delta t \le 1$ Stunde) erfolgen.

4.2.5 Makroporenfluss

Die Berücksichtigung von Makroporenabfluss war bisher nur in der Topmodel-Version von WaSiM-ETH möglich (Niehoff 2001). In dieser Modellversion werden Makroporen als zusätzlicher Speicherraum aufgefasst, der sowohl zur Bodenoberfläche als auch zur Bodenmatrix Kontakt hat. Das Fassungsvermögen der Makroporen errechnet sich aus der *Makroporosität* des Bodens sowie der *Tiefe*, bis zu der sich (die nach der Modellvorstellung vertikalen) Makroporen erstrecken. Diese beiden Grössen wurden bisher in der WaSiM-ETH Landnutzungstabelle für jede Landnutzung getrennt erfasst. Die Füllung des Makro-

porenraums erfolgt in der Topmodel-Version durch Infiltrationsüberschuss und Sättigungsüberschuss der Bodenmatrix. Die Entleerung des Wassers aus den Makroporen in die Bodenmatrix erfolgt ausschließlich in den Grobporenspeicher des Bodenmodells. Dabei ist die Abgabe von Wasser an den Grobporenspeicher abhängig vom *Bodenfeuchtedefizit* und der *Speicherkonstante* des Makroporenspeichers, die in der Steuerdatei des Modells teilgebietsbezogen definiert wird.

In KliWEP2 wurden zunächst verschiedene Konzepte zur Umsetzung von Makroporenfluss in richardsbasierten Modellen geprüft, u. a. auch das von Jansson und Karlberg (2001) entwickelte "Bypass-Flow-Konzept". Nach diesem konzeptionellen Ansatz wird der Makroporenfluss innerhalb einer aktuellen Bodenschicht durch die Infiltrationsrate und dem vertikalen Fluss in den Makroporen der darüberliegenden Bodenschicht bestimmt. Der in einer aktuellen Bodenschicht gebildete Makroporenfluss wird der darunterliegenden Schicht direkt und ohne zeitliche Verzögerung als Input zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen von KliWEP2 wurde schließlich ein modifizierter Jansson-Karlberg-Ansatz zur Berechnung von Makroporenfluss in WaSiM-ETH implementiert. Dieser modifizierte Ansatz erlaubt es, Makroporen für Bodenprofile zu definieren. Dabei kommen drei Parameter zur Anwendung: Makroporentiefe, Makroporenkapazität und Reduktion der Makroporenkapazität pro Meter Bodentiefe (vgl. Abbildung 19). Anhand dieser Parameter lässt sich für jede Schicht im Bodenprofil ein maximal möglicher Zufluss aus den Makroporen ableiten (potenzieller Makroporenfluss). Über einen vierten Parameter (PMacroThresh) wird festgelegt, ab welcher Niederschlagsintensität das Makroporensystem in der betrachteten Bodensäule aktiviert werden soll. Nur nach Überschreiten einer definierten Niederschlagsintensität (Angabe in [mm/h]) kann Wasser in die Makroporen infiltrieren und Makroporenabfluss gebildet werden. Die tatsächliche Menge an Makroporeninfiltration hängt dann von der aktuellen Wasseraufnahmekapazität der an die Makroporen angrenzenden Bodenschicht ab. Wasser, welches diese Aufnahmekapazität überschreitet, kann nicht mehr von den Makroporen aufgenommen werden. Im Rahmen dieser modellseitigen Überprüfung wird auch untersucht, wie der Makroporenzufluss auf die Bodenschichten verteilt werden kann. Dazu wird die verfügbare Makroporenzuflussmenge von unten nach oben auf die angrenzenden Bodenschichten aufgeteilt, und zwar immer so, dass die gerade betrachtete Bodenschicht bis zur Sättigung aufgefüllt wird. Der verbleibende Makroporenzufluss wird zum Auffüllen der jeweiligen darüberliegenden Schicht verwendet. Das in die Makroporen infiltrierte Wasser wird dabei immer noch im selben Zeitschritt auf die Bodenschichten aufgeteilt. Da der Makroporenversickerung von der Wasseraufnahmekapazität des Bodens abhängig ist, kann der aktuelle Makroporenfluss gegenüber dem potenziellen reduziert sein.

Die Parametrisierung der Makroporen in der WaSiM-ETH Bodentabelle ist optional. Werden vom Anwender keine Einträge zu den Makroporen vorgenommen, so werden die Parameter modellintern wie folgt gesetzt:

- PMacroThresh = 1000
- MacroCapacity = 0
- CapacityRedu = 1.0
- MacroDepth = 1.0

Die Festlegung von MacroCapacity auf den Wert Null bedeutet, dass kein Makroporenfluss und damit auch keine schnellere Verlagerung von Infiltrationswasser in tiefere Bodenschichten berechnet wird. In diesem Fall ist das Makroporenmodul deaktiviert.

Abbildung 19: Parametrisierung des Makroporenflusses in der erweiterten Bodentabelle

Die in Abbildung 19 verwendeten Abkürzungen bezeichnen:

```
PMacroThresh: notwendige Niederschlagsintensität für die Bildung von Makroporenabfluss [mm/h]MacroCapacity: Kapazität der Makroporen [mm/h]CapacityRedu: Reduktion der Makroporenkapazität mit der Tiefe (Reduktion pro Meter) [-]MacroDepth: maximale Tiefe der Makroporen [m]
```

4.3 Erweiterung von WaSiM-ETH um komplexe Vegetationsstrukturen

4.3.1 Ausgangssituation

WaSiM-ETH verfügt in der bisherigen Modellversion über vier alternative Verfahren zur Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration (ET_{pot}):

- Penman-Monteith (Monteith und Unsworth 1990)
- Wendling (1975)
- Hamon (1961)
- Haude (1955)

Von diesen vier Verfahren stellt die Methode nach Penman-Monteith den am stärksten prozessorientierten Ansatz dar. Im Gegensatz zu den drei letztgenannten Verfahren berücksichtigt sie das spezifische Verdunstungspotenzial der Vegetation und lässt zudem die Berechnung von ET_{pot} in Zeitschritten <1 Tag zu (z. B. $\Delta t = 1$ h). Die Weiterentwicklung von WaSiM-ETH im Rahmen von KliWEP2 konzentriert sich daher auf die Modifizierung/Erweiterung der Penman-Monteith-Methode sowie auf die verbesserte Wiedergabe von Vegetationsstrukturen.

Gemäß der Modellstruktur von WaSiM-ETH wird die räumliche und zeitliche Simulation der Vegetationsentwicklung über eine sogenannte Landnutzungstabelle gesteuert, die wiederum über entsprechende Codierungen einem x-y-orientierten Landnutzungsgrid zugeordnet ist (vgl. Kapitel 4.1.8). Die Landnutzungstabelle stellt die zentrale Plattform für die Verwaltung von vegetationsabhängigen Modellparametern dar und beeinflusst über die darin definierten Parameterwerte (z. B. für Blattflächenindex, Verdunstungswiderstände, Wurzeltiefe) entscheidend das Ausmaß und die Dynamik der simulierten Evapotranspiration. In der Landnutzungstabelle können beliebig viele Vegetationsarten und -typen definiert werden. Eine Berücksichtigung von mehrschichtiger Vegetation ist bisher nicht möglich.

Die im KliWEP2-Projekt durchgeführten Erweiterungen zielen auf die Erfassung von komplexeren Vegetationsstrukturen ab. Entsprechend der Leistungsbeschreibung wird darunter vor allem die Abbildung mehrerer Baumschichten im Oberbestand sowie Verjüngungs-, Strauch- und Krautschicht verstanden. Für diese Vegetationskomponenten sollen die Teilprozesse der Evapotranspiration, d. h. Interzeption, Transpiration und Evaporation, getrennt ausgewiesen werden.

4.3.2 Erweiterung der Landnutzungstabelle für komplexe Vegetationsstrukturen

Die Erfassung von komplexen Vegetationsstrukturen wird durch eine Erweiterung der bisherigen WaSiM-ETH Landnutzungstabelle um eine Zusatztabelle realisiert, in der die Strukturkomponenten der Vegetation definiert werden können. Beide Landnutzungstabellen sind in der WaSiM-ETH Steuerdatei lokalisiert. Das Design der Implementierung ist in Kapitel 4.1.8 exemplarisch dargestellt. In der neuen [multilayer_landuse]-Tabelle werden den Codes des Landnutzungsgrids komponentenbezogene Struktur-Codes zugeordnet. Diese Codes sind dann in der [landuse_table] definiert, welche die grundlegenden Informationen für die Parametrisierung der einzelnen Vegetationskomponenten enthält (vegetation layers).

Prinzipiell können den Landnutzungseinträgen in der [multilayer_landuse]-Tabelle beliebig viele Vegetationskomponenten der [landuse_table] zugeordnet werden. Bei der Festlegung der Vegetationsstrukturen ist darauf zu achten, dass die komponentenbezogenen Einträge in der [multilayer_landuse]-Tabelle beginnend mit der obersten Vegetationsschicht bzw. -komponente erfolgen, d. h. der erste (linksstehende) Layer-Eintrag bezieht sich immer auf die oberste Vegetationskomponente, der zweite Eintrag auf die darunterliegende Komponente, usw.

Alle Landnutzungen in der [multilayer_landuse]-Tabelle müssen die gleiche Anzahl an Vegetationskomponenten aufweisen. Landnutzungstypen, für die keine erweiterten Vegetationsstrukturen definiert werden sollen, erhalten nur die für die Basiskomponente gültigen Code-Zuordnungen. Die restlichen (in der Tabelle weiter rechts stehenden) Vegetationskomponenten sind mit dem Ignoranzparameter "-9999" zu belegen (vgl. Abbildung 20).

Neben den Code-Zuordnungen für die Vegetationskomponenten können für jede Landnutzung noch zwei weitere Parameter vom Modellanwender vorgegeben werden, k_extinct und LAI_scale. Während der Extinktionskoeffizient k_extinct in die Berechnung der Nettostrahlung im Bestand eingeht, werden über den Skalierungsfaktor LAI_scale die aerodynamischen Widerstände der Vegetationskomponenten im Bestand angepasst (vgl. CoupModel in Jansson und Karlberg 2001):

Der Parameter $k_{extinct}$ bezeichnet den Licht-Extinktionskoeffizient zur Reduktion der einfallenden Strahlung bei ihrem Weg durch den Bestand. Der diffuse Strahlungsanteil wird hier nicht berücksichtigt. Nach dem Lambert-Beer-Gesetz lässt sich folgende Beziehung nutzen:

$$\begin{aligned} f\ddot{u}r \ i &= 1: \quad R_{use,i} = VCF_i \cdot R_n \cdot (1 - e^{-k_-extinct \cdot LAI_i}) \\ f\ddot{u}r \ i &= 2: \quad R_{use,i} = VCF_i \cdot (R_n - R_{use,i-1}) \cdot (1 - e^{-k_-extinct \cdot LAI_i}) \\ f\ddot{u}r \ i &= 3: \quad R_{use,i} = VCF_i \cdot (R_n - R_{use,i-2} - R_{use,i-1}) \cdot (1 - e^{-k_-extinct \cdot LAI_i}) \end{aligned}$$
 Gleichung 18

(entsprechende Vorgehensweise für i > 3)

mit

R_{use}	nutzbare Nettostrahlung [Wh/m ²]
i	Vegetationskomponente mit i = 1 als oberstgelegene Komponente (z. B. Kronen-
	raum)
R_n	verfügbare (Gesamt-)Nettostrahlung (gemessen oder simuliert) [Wh/m ²]
VCF	Vegetationsbedeckungsgrad [-]
LAI	Blattflächenindex $[m^2/m^2]$

[mu 4 1 2 3 4	ltilayer_landu urban_areas mixed_forest decidous_fores pasture	se] # count { Lar { Lar t { Lar { Lar { Lar	of m nduse nduse nduse nduse	ltilayer _Layers = _Layers = _Layers = _Layers =	- landu = 7, -9 = 8, = 9, = 1, -9	se cod 999, - 4, 2, 999, -	es 9999; 1 3; 1 1; 1 9999; 1	k_exti k_exti k_exti k_exti	.nct = (.nct = (.nct = (0.3; Li 0.3; Li 0.3; Li 0.3; Li	AI_sca AI_sca AI_sca AI_sca	le = 10 le = 10 le = 10 le = 10	0; } 0; } 0; } 0; }	
[la	[landuse_table]													
7	7 # number of following land-use codes													
#co	- name of the													
#de	land-use type	e												
1	<pre># 1 grass low {method = VariableDayCount;</pre>													
	RootDist:	r	= 1.);	,,									
	TReduWet													
	LimitRed	uWet	= 0.	5;										
	HReduDry		= 3.	45;										
	Intercep	Cap	= 0.	75;										
	Juldays		= 15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349;
	Albedo		= 0.1	25 0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25;
	rsc		= 90	90	75	65	50	55	55	55	60	70	90	90;
	rs_inter	ception	= 0.	5 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5;
	rs_evapo:	ration	= 13	J 130	230	130	130	130	130	130	130	130	130	130;
	LAT			4	2 0 15	4 0 15	03	÷	±	÷	÷	4	∠ 0 15	4; 0 15.
	20 VCF		= 0.1	95 0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	RootDept	h	= 0	4 0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4:
	AltDep		= 0.	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02;}
2	grass_high	{method	= Va:	riableDay	Count;	RootD	istr =	1.0;	; ;	AltDep	= 0.0	25	-0.02	5;}
3	fern	{method	= Va:	riableDay	Count;	RootD	istr =	1.0;	; 1	AltDep	= 0.0	25	-0.02	5;}
4	shrubbery	{method	= Va:	riableDay	Count;	RootD	istr =	1.0;	; 1	AltDep	= 0.0	25	-0.02	5;}
7	urban_grass	{method	= Va:	riableDay	Count;	RootD	istr =	1.0;	; 2	AltDep	= 0.0	25	-0.02	5;}
8	pine	{method	= Va:	riableDay	Count;	RootD	istr =	1.0;	; 2	AltDep	= 0.0	25	-0.02	5;}
9	birch	{method	= Va:	riableDay	Count;	RootD	istr =	1.0;	;]	AltDep	= 0.0	25	-0.02	5;}

Abbildung 20: Erweiterte 2-teilige Landnutzungstabelle in WaSiM-ETH

Der empirische Parameter *LAI_scale* dient zur Berechnung des aerodynamischen Widerstandes ra,i > 1 unterhalb der Baumkrone (Vegetationskomponenten 2..n).

$$r_{a,i>1} = r_{a,i=1} + LAI _scale \cdot LAI_{kum}$$
 Gleichung 19

mit

 $r_{a, i=1}$ aerodynamischer Widerstand für die Bestandeskomponente mit der größten Vegetationshöhe [s/m]

 LAI_{kum} kumulierter Blattflächenindex oberhalb der aktuellen Bestandeskomponente $[m^2/m^2]$

Die Defaultwerte für die oben beschriebenen Parameter sind: $k_{extinct} = 0.3$ und LAI_scale = 10. Diese werden auch verwendet, wenn die Einträge in der [multilayer_landuse]-Tabelle nur Angaben zur Vegetationsschichtung enthalten.

Die Parameter k_extinct und LAI_scale haben signifikanten Einfluss auf die Höhe der Evapotranspiration im Bestand. Sie sind daher im Rahmen der Modellkalibrierung sorgfältig zu ermitteln. In der Literatur werden für k_extinct Werte zwischen 0.25 und 0.85 angegeben (z. B. für Gras: 0,5). LAI_scale kann (nach bisherigen Erfahrungen) zwischen 1 und 30 liegen.

4.3.3 Potenzielle Evapotranspiration

Die potenzielle Evapotranspiration ET_{pot} bezeichnet die maximale Menge Wasser, die pro Zeiteinheit bei gegebenen meteorologischen und pflanzenphysiologischen Bedingungen sowie optimaler Wasserversorgung aus dem Boden direkt und/oder über die Pflanzen in die Atmosphäre transferiert werden kann. Ist die Wasserversorgung eingeschränkt, dann ist die reale Evapotranspiration kleiner als die potenzielle Evapotranspiration. Zur Berechnung der realen Evapotranspiration ET_{akt} wird ET_{pot} auf die Komponenten Interzeptionsverdunstung, Transpiration und Evaporation aufgeteilt. Bei optimaler Wasserversorgung sind ET_{pot} und ET_{akt} identisch. Wasserstress (Wassermangel) oder Wasserexzess (Sauerstoffstress für die Vegetation infolge anaerober Bodenwasserverhältnisse) führen zu einer Reduktion von ET_{akt} gegenüber ET_{pot} .

Die KliWEP2-Leistungsbeschreibung sieht eine Modifizierung der Penman-Monteith-Methode für Bestandeskomponenten vor, so dass der Energiefluss konkret für diejenigen Orte im Bestand berechnet wird, an welchen der Energieumsatz stattfindet. Diese Vorgabe wird durch die 2-teilige Landnutzungstabelle (vgl. Kapitel 4.3.2) erfüllt. Mit ihr ist es dem Modellnutzer möglich, mehrschichtige Bestandesstrukturen zu definieren und zu parametrisieren. Die durch die Bestandesstruktur veränderten Energieumsätze im Bestandesinneren werden über eine Anpassung der Terme für die Nettostrahlung und für den aerodynamischen Widerstand berücksichtigt. Die Berechnung von ET_{pot} bzw. ET_{akt} kann im Modell in Zeitschrittweiten von 1 Minute bis zu 1 Tag vorgenommen werden (vgl. Kapitel 4.3.1). Maßgebend für die im Modell nutzbare Zeitschrittweite ist die Zeitschrittweite der vorliegenden meteorologischen Inputdaten.

4.3.4 Interzeption

Die Interzeption bezeichnet den Vorgang des Zurückhaltens von Niederschlagswasser auf Pflanzenoberflächen, von wo aus dieses Wasser anschließend verdunstet. Entsprechend bewirkt die Interzeption eine Verringerung des auf die Bodenoberfläche auftreffenden Niederschlags. Die Interzeption ist stark vegetationsabhängig und vor allem für den Wasserhaushalt von Waldgebieten von erheblicher Bedeutung, da durch sie alle folgenden hydrologischen Prozesse, wie z. B. Infiltration, Evapotranspiration und Grundwasserneubildung, maßgeblich beeinflusst werden.

Die Erweiterung von WaSiM-ETH hinsichtlich seines Interzeptionsmoduls orientiert sich an der Leistungsbeschreibung des LfUG sowie an den Detailvorgaben der "Vorstudie zu Erweiterungsmöglichkeiten des Gebietswasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH für die Berücksichtigung differenzierter Vegetationsstrukturen und waldspezifischer Bodeneigenschaften" (Schramm & Scherzer 2004). Dementsprechend wurden die folgenden beiden Modellerweiterungen umgesetzt:

- 1. Integration eines landnutzungsspezifischen Parameters *IntercepCap* (Angabe in [mm]) zur Beschreibung der maximalen Schichtdicke des Wassers auf der Vegetationsoberfläche. *Intercep-Cap* kann entsprechend der überarbeiteten Struktur der WaSiM-ETH [landuse_table] für jede Bestandeskomponente spezifiziert werden (vgl. Kapitel 4.1.8, Kapitel 4.3.2).
- 2. Ausbau des singulären Interzeptionsspeichers zu einer Speicherkaskade unter Berücksichtigung des Bedeckungsgrades der einzelnen Vegetationskomponenten.

Darüberhinaus erfolgte die Integration eines weiteren interzeptionsspezifischen Parameters in die WaSiM-ETH Landnutzungstabelle. Der Modellanwender kann nun den bei der Interzeptionsverdunstung wirksam werdenden Oberflächenwiderstand (*rs_interception*) separat für beliebige Vegetationskomponenten in seiner zeitlichen Entwicklung auflösen und parametrisieren. Die Einführung des Oberflächenwiderstandes *rs_interception* erlaubt die Interzeptionsverdunstung prozessorientierter als bisher zu modellieren, da nun auch spezifische Merkmale des interzipierten Wassers (z. B. Halbkugelform der Tropfen auf Blättern) berücksichtigt werden können.

Durch das erweiterte Interzeptionsmodul können die folgenden Wasserbilanzgrößen analysiert und als Grids und Statistiken ausgegeben werden (vgl. Kapitel 4.1.7) (Ausgaben separat für einzelne Vegetationskomponenten und als Integral oder Mittel über alle Komponenten):

- potenzielle Interzeptionsverdunstung $[mm/\Delta t]$
- reale Interzeptionsverdunstung $[mm/\Delta t]$
- reale Interzeptionsspeicherfüllung [mm/Δt]

4.3.5 Transpiration

Der Transpiration kommt im interaktiven System Boden-Pflanze-Atmosphäre eine wichtige Bedeutung zu. Das Saugspannungsgefälle zwischen Boden und Atmosphäre wirkt dabei als treibende Kraft des Wassertransportes durch die Pflanze (Transpirationssog). Die Transpiration erfolgt sowohl über die Stomata (stomatäre Transpiration) als auch über die Blattoberfläche (kutikuläre Transpiration). Für den Wasserhaushalt der Pflanzen ist die stomatäre Transpiration, also die Wasserdampfabgabe über aktiv regulierba-

re Spaltöffnungen, entscheidend. Sie macht etwa 90-95 % der gesamten Transpiration aus (Dyck und Peschke 1995). Aufgrund ihrer Bedeutung muss sie in der Modellierung des Wasserhaushalts berücksichtigt werden.

Die in WaSiM-ETH implementierte Penman-Monteith-Gleichung verwendet mehrere vegetationsspezifische Parameter zur Berechnung der potenziellen Transpiration. Neben dem stomatären Widerstand *rsc* sind die Parameter Blattflächenindex *LAI*, Vegetationsbedeckungsgrad *VCF*, aerodynamische Rauhigkeitslänge z0 und Albedo α von Bedeutung. Die Wertezuordnung für diese Parameter wird in der [landuse_table] vorgenommen (vgl. Kapitel 4.1.8). Die reale Transpiration kann gegenüber der potenziellen durch das verfügbare Bodenwasser limitiert sein. WaSiM-ETH berücksichtigte diesen Umstand bisher durch die Einführung von Grenzwerten zum Trocken- und Nässestress, bei deren Erreichen die reale Transpiration eingeschränkt bzw. (im Extremfall) eingestellt wird.

Entsprechend den Anforderungen der KliWEP2-Leistungsbeschreibung wurde WaSiM-ETH so erweitert, dass nun diese Bodenfeuchtegrenzwerte für das Einsetzen von Trocken- bzw. Nässestress (*HReduDry* und *TReduWet*) für jede einzelne Vegetationskomponente interaktiv vorgegeben werden können. Zusätzlich wurde ein vegetationsspezifischer Parameter *LimitReduWet* eingeführt, der die Reduktion des transpirativen Bodenwasserentzugs bei Sättigung begrenzt. Auch dieser Parameter ist interaktiv veränderbar. Abbildung 21 zeigt die Beeinflussung der Transpiration durch den Bodenwassergehalt.

Modelltechnisch gesehen findet die transpirative Bodenwasserentnahme ausschließlich im Bereich der durchwurzelten Bodenzone statt. Deshalb müssen im Modell die Wurzeleigenschaften der Vegetation bekannt sein. In WaSiM-ETH können die Wurzeleigenschaften über zwei vegetationsspezifische Parameter definiert werden: zum einen über die Durchwurzelungstiefe *RootDepth* (für zeitlich variabel definierte Stützstellen), zum anderen über die Wurzeldichteverteilung *RootDist* (vgl. Kapitel 4.1.8).

Aufgrund der engen Verknüpfung von Transpiration und Bodenfeuchte ist eine möglichst physikalisch begründete Modellierung der Bodenwasserdynamik unter Einbeziehung von Kapillarwasseraufstieg, Perkolation, lateralem Abfluss (Interflow) und Grundwasserschwankungen wünschenswert. In WaSiM-ETH wird durch die Anwendung der Richards-Gleichung (vgl. Kapitel 4.2) dieser Forderung nach physikalisch-basierter Bodenwassersimulation Rechnung getragen.



Abbildung 21: Abhängigkeit der Transpiration vom Bodenwassergehalt. nFK: nutzbare Feldkapazität, DW: Drainwasser (oder Gravitationswasser), PWP: permanenter Welkepunkt, FK: Feldkapazität, Sat: Sättigung, HReduDry: Grenzwert für den Beginn von Trockenstress, TReduWet: Grenzwert für den Beginn von Nässestress, LimitReduWet: max. Reduktion der Transpiration infolge Nässestress

Im Rahmen der Modellerweiterung wurde die Ausgabe der folgenden Berechnungsergebnisse in WaSiM-ETH implementiert:

- potenzielle Transpiration f
 ür einzelne Vegetationskomponenten sowie als Integral
 über alle Komponenten (inkl. potenzieller Evaporation) [mm/Δt]
- reale Transpiration f
 ür einzelne Vegetationskomponenten sowie als Integral
 über alle Komponenten (inkl. realer Evaporation) [mm/Δt]
- transpirative Wasserentnahme pro Bodenschicht $[mm/\Delta t]$

4.3.6 Evaporation

Die Hydrologie fasst unter dem Begriff Evaporation die nach physikalischen Gesetzmässigkeiten erfolgende Verdunstung der unbewachsenen Erdoberfläche (Boden-, Schnee- und Eisverdunstung), des auf die Pflanzenoberflächen zurückgehaltenen Niederschlags (Interzeptionsverdunstung, vgl. Kapitel 4.3.4) und von freien Wasserflächen (Gewässerverdunstung) zusammen (Dyck und Peschke 1995).

In WaSiM-ETH kann aus der obersten Bodenschicht dann Wasser verdunsten, wenn genug Energie nach Interzptionsverdunstung und Transpiration der Pflanzen bleibt. Der Verdunstungswiderstand für die Evaportation konnte bisher nicht extern vorgegeben werden, sondern war intern auf 150 s/m festgelegt (Schulla 1997).

Im aktuellen Projekt wurde gemäß der Aufgabenstellung das WaSiM-ETH Modell im Bereich der Bodenverdunstung erweitert. Die Anpassungen (Erweiterungen) sahen u. a. eine prozessorientiertere Berechnung der Bodenevaporation über eine modifizierte Penman-Monteith-Gleichung vor, bei der im Gegensatz zur herkömmlichen Gleichung ein neu eingeführter landnutzungsabhängiger Bodenoberflächenwiderstand *rs_evaporation* Berücksichtigung findet. Dieser Widerstand kann in der erweiterten WaSiM-ETH [landuse_table] interaktiv für jede Vegetation als zeitlich variabler Wert vorgegeben werden (vgl. Kapitel 4.1.8).

WaSiM-ETH berechnet sowohl eine potenzielle als auch eine reale Bodenevaporation. Gegenüber der potenziellen Evaporation *EVAP* ist die reale Evaporation *EVAR* durch den nach der transpirativen Wasserentnahme verbleibenden (und ausschöpfbaren) Wassergehalt der ersten Bodenschicht limitiert. Die Ausgabe der Berechnungsergebnisse von *EVAP* und *EVAR* kann im Grid- und Tabellenformat erfolgen.

5 Testsimulationen mit WaSiM-ETH für Untersuchungsstandorte in Sachsen

5.1 Untersuchungsstandorte

Die Testsimulationen des erweiterten Modells wurden für die Level II-Flächen Laußnitz, Colditz, Klingenthal (SBS), Lüttewitz (LfL) und für drei Lysimeter in Brandis (UBG) durchgeführt. Diese Standorte repräsentieren ein weites Spektrum von typischen Klima- und Bodenbedingungen sowie Landnutzungen in Sachsen (vgl. Tabelle 7). Die gewonnen Erfahrungen bei der Parametrisierung der erweiterten Modellkomponenten und bei der Berechnung verschiedener Wasserhaushaltskomponenten an den ausgewählten Standorten werden anschließend bei der Modellierung des Einzugsgebiets des Schnellbachs (vgl. Kapitel 6) umgesetzt.

Tabelle 7:Charakterisierung der Untersuchungsstandorte für die Testsimulationen im Untersu-
chungszeitraum

Standort	HW	RW	Höhe ü. NN [m]	Bodentyp	Land- nutzung	Jahresmittel- temperatur [°C]	Mittlerer Jah- resniederschlag [mm]
Laußnitz	5680172	4627075	170	stark podsolige	Kiefer	9,0	748,9
				Braunerde			
Colditz	5672430	4557709	185	Pseudogley	Eiche	9,3	753,1
Klingenthal	5587650	4538020	840	Podsol-	Fichte	5,8	1368,2
				Braunerde			
Lüttewitz	5666900	4586300	182	Parabraunerde-	Acker	9,4	578,8
				Pseudogley	(Mulch)		
Brandis	5688180	4541620	136	erodierte	Acker	9,7	647,5
Lysimeter 5/6				Braunerde			
Brandis	5688180	4541620	136	Parabraunerde-	Acker	9,7	647,5
Lysimeter 8/6				Braunerde			
Brandis	5688180	4541620	136	Braunerde-	Acker	9,7	647,5
Lysimeter 7/4				Pseudogley			

5.2 Eingangsdaten und Parametrisierung des Modells

Für die Anwendung von WaSiM-ETH sind sowohl zeit- als auch raumbezogene Datensätze erforderlich. Als Zeitreihen werden für die Modellierung der Standorte meteorologische Daten genutzt, als Raumdaten müssen dem Modell Informationen zur Höhenverteilung, Landnutzung und zu den Bodeneigenschaften bereitgestellt werden. Diese Daten wurden vom AG für die einzelnen Standorte zur Verfügung gestellt. Da die Qualität der Eingangsdaten sehr großen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse nimmt, wurde der präzisen Datenaufbereitung, d. h. dem Preprocessing, im Rahmen der Modellanwendung große Aufmerksamkeit gewidmet.

5.2.1 Parametrisierung der Vegetation

Durch die im Rahmen von KliWEP2 erfolgte Erweiterung von WaSiM-ETH (vgl. Kapitel 4.3.2) können sowohl die vertikale Bestandesstruktur als auch die zeitliche Veränderung von Vegetationsparametern deutlich besser als bisher berücksichtigt werden. Der jahreszeitliche Verlauf der Vegetationsparameter Albedo, Stomatawiderstand der Vegetation (rsc, nun unterteilt nach rs_evaporation, rs_interception und rsc für die Transpiration), Blattflächenindex (LAI), effektive Vegetationshöhe (z_0), Vegetationsbedeckungsgrad (vcf) und Wurzeltiefe (RootDepth) kann nun über die Angabe beliebig vieler "Eckdaten" dargestellt werden. Die genaue Bedeutung der verschiedenen Parameter ist in Kapitel 4.2.5 beschrieben. Albedo, LAI, vcf und RootDepth konnten teilweise aus bereits vorliegenden Modellanwendungen für die Teststandorte mit COUPMODEL (Scherzer 2005) bzw. aus Literatur- und Erfahrungswerten übernommen werden. Für den Standort Lüttewitz wurden von der LfL Informationen zur Fruchtfolge und die Zeitpunkte verschiedener Bearbeitungen, der Aussaat und Ernte sowie der mittlere Bedeckungsgrad für jeden Kalendermonat zur Verfügung gestellt. Für die Lysimeter der Station Brandis liegen zur Abschätzung von LAI und vcf darüber hinaus auch phänologische Aufzeichnungen und eine umfangreiche Fotodokumentation der Vegetation in mehreren Entwicklungsstadien vor.

Für alle Standorte und Vegetationskomponenten wurde eine exponentielle Abnahme der Wurzeldichte mit der Tiefe angenommen (Parameter Rootdistr = 1). Der relative Wassergehalt des Bodens für beginnenden Wasserstress (TReduWet) liegt für alle Standorte und Vegetationskomponenten bei 0,95, der relative minimale Wert, um den die Transpiration bei Wassersättigung reduziert werden kann (LimitReduWet) bei 0,5 und die minimale Saugspannung, bei der Trockstress auftritt (HReduDry) je nach Standort zwischen 1 m (98,1 hPa) und 3,45 m (338 hPa). Für die Standortsimulationen wurde der Parameter Alt-Dep (Verschiebung des JulDays pro Höhenmeter) mit Null belegt. Für eine realistische Nachbildung von Evaporation, Transpiration und Interzeption waren in der Regel bei den Parametern rsc, rsc_evap, vcf und IntercepCap Nachjustierungen gegenüber Literatur- bzw. *first-guess*-Schätzungen erforderlich. Auf das Vorgehen bei der Kalibrierung der einzelnen Parameter wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

5.2.2 Parametrisierung des Bodens

Die Böden wurden horizontspezifisch auf Grundlage der vom Auftraggeber vorgelegten Profilbeschreibungen parametrisiert (für die SBS-Standorte vgl. auch Scherzer 2005). Bei waldbestockten Standorten wurde ggf. zusätzlich auch die organische Auflage im Modell berücksichtigt.

Für die Parametrisierung von pF-Kurven existieren verschiedene Ansätze u. a. von Brooks und Corey (1964), Clapp und Hornberger (1978) und van Genuchten (1980). Mit dem Modell nach van Genuchten (1980) wird der gesamte Saugspannungsbereich durch eine einzige dreiparametrige Funktion abgedeckt. Da mit diesem Ansatz darüber hinaus auch eine größere Bandbreite von Retentionskurven angepasst werden kann als mit anderen Konzepten, ist das Modell nach van Genuchten (1980) inzwischen der am weitesten verbreitete Ansatz zur Bescheibung von pF-Kurven. Die grundlegende Gleichung hierbei ist

$$S_e = \frac{1}{\left(1 + \left(\alpha\psi\right)^n\right)^m}$$
 Gleichung 20

mit α , *n* und *m* als empirische Parameter. Der van Genuchten-Parameter α entspricht in etwa dem Kehrwert des Lufteintrittspunkts (ψ_a). Für die Bestimmung der Parameter *n* und *m* wird in der Regel die Restriktion m = 1 - 1/n verwendet.

Zur Bestimmung der Parameter der van Genuchten-Funktion aus gemessenen Retentionsdaten entwickelten van Genuchten et al. (1991) das Programm RETC. Stehen keine gemessene Retentionsdaten zur Verfügung, so werden die van Genuchten-Parameter häufig indirekt mit Hilfe von sogenannten Pedotransferfunktionen (PTF) aus bodenphysikalischen Standard-Messgrößen (z. B. Korngrößenverteilung, Trockenrohdichte, Humusgehalt) abgeschätzt. Die indirekte Parameterbestimmung über PTF ist allerdings mit Unsicherheiten behaftet. Insbesondere bei der Verwendung von über PTF bestimmten van Genuchten-Parametern in Wasserhaushaltssimulationen können erhebliche nichtlineare Fortpflanzungsfehler auftreten (Schramm et al. 2006). Soweit keine gemessenen Retentionsdaten vorlagen, wurde im Rahmen der vorliegenden KliWEP2-Studie die PTF nach Wösten et al. (1999) verwendet. Diese PTF bietet Regressionsgleichungen zur Ermittlung sowohl der van Genuchten-Parameter als auch des Mualem-Parameters τ aus absoluten Werten von Schluff, Ton, Trockenrohdichte und organischer Substanz an. Die Mualem-van Genuchten-Parameter werden durch eine multiple Regressionsanalyse abgeleitet. Dabei wird zusätzlich nach Ober- oder Unterboden unterschieden. Zum Einsatz kommen dabei Kombinationen der Basisdaten und ihrer Ableitungen (reziproker und exponentieller Form) sowie Wechselbeziehungen dieser Parameter. Der residuale Wassergehalt (θ r) wird dabei nicht explizit regressiv definiert sondern gleich Null gesetzt. Nach Schramm et al. (2006) liefert die PTF nach Wösten insbesondere für Forstböden bessere Resultate als zahlreiche andere PTFs.

Für die Modellierung des Wassertransportes in Böden benötigt man neben der Parametrisierung der pF-Kurve auch den funktionalen Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit *K* und dem Wassergehalt bzw. dem Matrixpotenzial (auch als *K*-Funktion bezeichnet). Da die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Bereich schwierig und zeitaufwendig ist, wurden verschiedene Vorhersagetheorien zur Bestimmung der *K*-Kurve entwickelt (Childs und Collis-George 1950, Burdine 1953, Millington und Quirk 1961, Mualem 1976). Einen umfassenden Überblick gibt z. B. Durner (1991).

Die aktuell am häufigsten verwendete Funktion wurde von Mualem (1976) veröffentlicht. Die *K*-Funktion ergibt sich dabei aus folgender Gleichung:

$$K_{r} = \frac{K}{K_{sat}} = \Theta^{\tau} \left[\int_{0}^{\theta} \frac{1}{\psi_{m}} d\theta \right]^{\theta_{s}} \frac{1}{\psi_{m}} d\theta \right]^{2}$$
Gleichung 21

mit:Kabsolute Leitfähigkeit
$$[LZ^{-1}]$$
 K_{sat} Leitfähigkeit bei Wassersättigung $[LZ^{-1}]$ K_r relative Leitfähigkeit [-] τ Tortuosität [-] (von Mualem in seiner Originalarbeit (1976) gleich 0,5 gesetzt)

Verknüpft man Gleichung 20 mit der van Genuchten-Funktion und legt den Parameter m durch die Nebenbedingung m = l - l/n fest, lässt sich Gleichung 21 geschlossen lösen und ergibt (van Genuchten 1980):

$$K(\Theta) = K_{sat} \left(\Theta^{\tau} \left(1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right)^2 \right)$$
Gleichung 22

mit: $K(\Theta)$ hydraulische Leitfähigkeit als Funktion der effektiven Sättigung [LZ⁻¹] K_{sat} gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [LZ⁻¹] τ Tortuositätsfaktor (empirisch) [-]m = 1 - 1/nvan Genuchten-Parameter [-]

Zur Bestimmung der $K(\theta)$ -Funktion von Böden wurde bereits eine Reihe von Methoden dokumentiert. Einen Überblick gibt z. B. Klute (1986). Neben in-situ- (z. B. Green et al. 1986) und Standard-Labormethoden (Hartge und Horn 1992) gibt es auch Modelle zur Vorhersage der Leitfähigkeitsfunktion aus der pF-Kurve (z. B. van Genuchten et al. 1991, Durner 1991), aus der Korngrößenverteilung (z. B. Rawls und Brakensiek 1989, Schaap und Leij 1998, Wösten et al. 1999) oder aus inverser Simulation von Laborsäulenversuchen (Schultze 1998). Der Parameter τ kann ebenfalls mit Hilfe des Optimierungsprogramms RETC durch Anpassung an gemessene Leitfähigkeitswerte abgeschätzt werden.

Für die Standorte Laußnitz, Colditz und Klingenthal liegen u. a. aus dem Projekt "Wasserhaushaltssimulationen an acht Untersuchungsstandorten des Staatsbetriebes Sachsenforst für den Zeitraum 1997-2005" (Scherzer und Schultze 2006) Informationen bezüglich Horizontabfolge und -mächtigkeit, Labor-pF-Kurven und hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen Monitoringflächen vor. Die van Genuchten-Parameter konnten somit auf direktem Weg mit Hilfe des Programms RETC bestimmt werden. Für die Böden der Lysimeterstation Brandis liegen keine gemessenen pF-WG-Beziehungen vor. Hier wurden die van Genuchten-Parameter sowie der Mualem-Parameter τ daher mit Hilfe der PTF nach Wösten et al. (1999) abgeschätzt. Für den Standort Lüttewitz stellte die LfL Werte für die van Genuchten-Parameter der einzelnen Horizonte zur Verfügung. Durch die Erweiterung von WaSiM-ETH um ein Makroporenmodul (vgl. Kapitel 4.2.5) können auch präferenzielle Flüsse im Boden dargestellt werden. Eine Anwendung dieses Moduls ist in Kapitel 5.5 für den Standort Klingenthal beispielhaft dargestellt.

Bei WaSiM-ETH orientiert sich der interne Rechenzeitschritt an der zeitlichen Auflösung der antreibenden Klimadaten (z. B. Tage, Stunden, Minuten). Das Modell verfügt (bisher) über keine explizite Zeitsschrittsteuerung. Im Rahmen der Modellparametrisierung und -kalibrierung muss sich der Anwender daher intensiv mit dem sogenannten Courant-Kriterium (vgl. Gleichung 16) auseinandersetzen. Das Verhältnis von gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit und vertikaler Mächtigkeit einer Diskretisierungsschicht ist zumindest näherungsweise so zu wählen, dass die Diskretisierungsschicht nicht innerhalb eines Zeitschritts durchflossen werden kann. Aus dieser Bedingung ergeben sich erhebliche Restriktionen bei der prozessorientierten Parametrisierung insbesondere von geringmächtigen Bodenhorizonten oder von Böden mit hohen hydraulischen Leitfähigkeiten. Programmseitig ist daher ein sogenannter Iterationsalgorithmus implementiert, welcher das Modell in die Lage versetzt, anwenderseitige Verletzungen des Courant-Kriteriums zumindest teilweise auszugleichen. Im Rahmen von KliWEP2 waren vor allem organische Auflagen von Wäldern, welche sich durch hohe Wasserleitfähigkeiten auszeichnen, von dieser Restriktion betroffen. Da der Zeitschritt der Klimadaten (jeweils tägliche Auflösung, abweichend davon Lüttewitz: stündliche Auflösung) vorgegeben war, konnte die Einhaltung des Courant-Kriteriums nur über eine Anpassung der Horizontmächtigkeiten und/oder des kf-Wertes ermöglicht werden. Hierbei handelt es sich allerdings insbesondere im obersten Kompartiment um kritische Parameter, da z. B. die Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit unter Umständen zu unerwünschtem Überstau und/oder Oberflächenabfluss führt. Mögliche Folge ist eine ungenügende Simulationsqualität. Am Beispiel des Standortes Laußnitz wurden daher eingehendere Untersuchungen zu numerischen Problemen infolge einer Verletzung des Courant-Kriteriums durchgeführt.

5.2.3 Kalibrierung

An allen Teststandorten konnte ein Vergleich simulierter Zustandsvariablen im Boden mit Messwerten der Bodensaugspannung und/oder Wassergehalten aus mehreren Tiefen durchgeführt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die von WaSiM-ETH ausgegebene Saugspannung bzw. hydraulische Höhe (",hhyd") für die Grenze zwischen zwei numerischen Modellkompartimenten gilt, während sich der Wassergehaltswert "theta" auf die mittlere Bodenfeuchte <u>eines</u> Kompartiments bezieht.

Die Modellkalibrierung für die Standorte Laußnitz, Colditz und Klingenthal stützt sich auf Messungen des SBS (Staatsbetrieb Sachsenforst) im Zeitraum 1997-2004 (v. a. Bestandesniederschlag und Tensionen, siehe auch Scherzer und Schultze 2006). Für die Modellierung der drei Lysimeter der Station Brandis wurden Messwerte zu Bodenfeuchte und Wasserspannung sowie tägliche Sickerwasserraten und Evapotranspirationswerte (berechnet aus der Lysimeterbilanz) für den Zeitraum 1997-2004 bereitgestellt. Grundlage der Modellanpassung für den Standort Lüttewitz der Landesanstalt für Landwirtschaft waren Messdaten der Wasserspannung und der Bodenfeuchte für den Zeitraum 1999-2004.

5.2.4 Bilanzierung

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse auf Standortebene wurden zunächst die mit dem erweiterten WaSiM-ETH-Modell berechneten sogenannten *Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts* Interzeption, Evaporation, Transpiration, Schneeverdunstung, Basisabfluss, Zwischenabfluss, Oberflächenabfluss und Speicheränderung ausgewertet. Diese wurden auf Plausibilität geprüft, mit ggf. vorliegenden Ergebnissen von Vorgängermodellierungen verglichen und im Fall von Brandis und Lüttewitz am 08.09.2006 auch bereits vor Ort mit Vertretern des Projektbeirates und Experten der jeweiligen Monitoring- bzw. Versuchsflächen diskutiert.

Zudem wurde auch die interne Wasserbilanz von WaSiM-ETH nach der Gleichung

$$FNS - (EI + ETR + ETRS + Q_{ors} + \Delta\Theta + \Delta SI + \Delta SSTO) = 0$$

Gleichung 23

mit FNS Freilandniederschlag [mm/Berechnungsintervall] EI Interzeptionsverdunstung [mm/Berechnungsintervall]

ETR	Evapotranspiration [mm/Berechnungsintervall]
ETRS	Verdunstung von der Schneeoberfläche [mm/Berechnungsintervall]
Q _{ges}	Gesamtabfluss: Basisabfluss + Zwischenabfluss + Direktabfluss
-5**	[mm/Berechnungsintervall]
$\Delta \theta$	Veränderung des Wassergehalts im Bodenspeicher [mm/Berechnungsintervall]
ΔSI	Veränderung des Wassergehalts im Interzeptionsspeicher
	[mm/Berechnungsintervall]
Δ SSTO	Veränderung des Wassergehalts im Schneespeicher
	[mm/Berechnungsintervall]

ausgewertet. Diese Betrachtung erlaubt die Kontrolle, ob das erweiterte Modell korrekt rechnet, alle relevanten Wasserflüsse in der Bilanz berücksichtigt sind und insbesondere auch, ob im Verlauf der mehrjährigen Simulation kein Wasser verlorengeht oder dazukommt (Aufdeckung versteckter Quellen und Senken, Erkennung von Programmfehlern in der erweiterten Version usw.).

5.3 Laußnitz (Kiefernbestand auf stark podsoliger Braunerde, Düben-Niederlausitzer Altmoränenland)

5.3.1 Bodenparameter

Das Bodenprofil am Standort Laußnitz umfasst 6 Horizonte. Für jeden dieser Horizonte wurden mit Hilfe des Programms RETC auf Grundlage von gemessenen Druck-Sättigungs-Beziehungen des SBS Modellfunktionen nach van Genuchten bestimmt (vgl. Abbildung 22). Die von Scherzer und Schultze (2006) übernommenen Leitfähigkeiten liegen im Bereich 7,32·10⁻⁵ m/s (Auflage) bis 2,31·10⁻⁶ m/s (Cv-Horizont).



Abbildung 22: Standort Laußnitz: pF-Kurven. Punkte: Messwerte

Die zunächst auf dieser Grundlage durchgeführte Parametrisierung von WaSiM-ETH führte allerdings zu einer deutlichen Verletzung des Courant-Kriteriums. Bei einer Mächtigkeit der obersten Diskretisierungsschicht (organische Auflage) von 0,07 m und einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von 7,32·10⁻⁵ m/s bzw. 633 cm/d beträgt die Mindestverweildauer im ersten Kompartiment lediglich 0,01 d bzw. 16 min.

Aus diesem Grund wurde für den Standort Laußnitz eine zweite, modifizierte Parametrisierung unter Einhaltung des Courant-Kriteriums erstellt. Konkret wurden hierbei Horizont 1 und Horizont 2, die im Verhältnis zu ihrer Schichtmächtigkeit sehr hohe Leitfähigkeiten aufweisen, vernachlässigt. Die Horizon-

te 3-6 wurden mit den für diese Schichten ermittelten van Genuchten-Parametern parametrisiert. Zur Einhaltung der Courant-Bedingung mussten darüber hinaus die Mächtigkeiten der numerischen Diskretisierungsschichten in den verbleibenden Horizonten auf 50 cm (Horizont 3, Horizont 4), 20 cm (Horizont 5) und 30 cm (Horizont 6) vergrößert werden. Eine tabellarische Übersicht aller für den Standort Laußnitz verwendeten Bodenparameter befindet sich in Anhang 9.1.

5.3.2 Vegetationsparameter

Der Blattflächenindex (LAI) der Kiefer wurde nach den Anhaltspunkten von Scherzer und Schultze (2006) zunächst auf 5,5 m²/m² festgesetzt. Da davon auszugehen ist, dass im Winter ein partieller Verlust von ungefähr 10 % der Nadeln erfolgt, der im Frühjahr durch Zuwachs wieder ausgeglichen wird, wurde der LAI zudem im Winter um ca. 10 % verringert und erst im Lauf des Frühjahrs wieder auf den sommerlichen Wert gesteigert. Im Rahmen der Modellkalibrierung (Interzeption und Transpiration) wurde der LAI schließlich auf einen Maximalwert von 4,5 m²/m² verringert. Der LAI der Krautschicht zeigt einen Jahresverlauf zwischen 1 m²/m² und 3,5 m²/m². Als Optimalwerte für die Stomataleitfähigkeit wurden Werte von 110 s/m innerhalb und 200 s/m außerhalb der Vegetationsperiode für die Kiefer und 20 s/m für die Krautschicht ermittelt. rs_intercep wurde auf 0,5 s/m gesetzt, rs_evap auf 1000 s/m optimiert. Der Bedeckungsgrad der Kiefer (vcf) wurde mit 90 % und die Wurzeltiefe mit 1,25 m angenommen, der vcf der Krautschicht variiert im Jahresverlauf zwischen 40 % und 70 %, für die Wurzeltiefe wurden im Jahresverlauf Werte zwischen 20 cm und 50 cm angenommen.

Die Blattspeicherkapazität (IntercepCap) für die Kiefer wurde mit auf 0,55 mm optimiert. Die Schichtdicke des Interzeptionsfilms auf der Krautschicht wurde mit 0,50 mm angenommen. Diese Werte sind im Vergleich mit den Angaben von ca. 0,10-0,50 mm bei Schulla (1997) oder Jansson und Karlberg (2001) relativ hoch. Im erweiterten WaSiM-ETH-Modell wird die Interzeptionskapazität der Vegetation durch die Parameter vcf, LAI und IntercepCap gesteuert. Erstere beide Parameter beeinflussen u. a. auch die Höhe der Transpiration und der Evaporation. IntercepCap stellt somit also den einzigen freien Parameter für die Kalibrierung der Interzeption dar. Der für Laußnitz als optimal befundene Wertebereich von ca. 0,6 mm wurde bei der Modellierung der anderen Standorte bestätigt. Es zeigte sich, dass der Parameter IntercepCap in WaSiM-ETH allgemein relativ hoch eingestellt werden muss. Anhang 9.1 dieses Berichtes enthält auch eine Übersicht aller Parametereinstellungen für das Kompartiment Vegetation.

5.3.3 Simulationsergebnisse: Bestandesniederschlag/Interzeption

Durch die oben dokumentierte inverse Optimierung der Interzeptionsparameter, insbesondere des Parameters IntercepCap, ließ sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Bestandesniederschlag erzielen (vgl. Abbildung 23). Die weitestgehende Deckung der Kurven in Abbildung 23 (oben) über den Gesamtzeitraum 1997-2004 konnte zudem ohne jährliche Variation einzelner Vegetationsparameter erreicht werden. Dies kann als Hinweis auf die Stabilität des Interzeptionsmoduls des erweiterten WaSiM-ETH-Modells bzw. die Verlässlichkeit der BNS-Erfassung durch den SBS gewertet werden.

5.3.4 Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung

Die Simulationsergebnisse, welche unter Berücksichtigung aller vorgegebenen Bodenhorizonte bzw. unter Nichteinhaltung des Courant-Kriteriums (vgl. Kapitel 5.2.2) erzielt wurden, zeigen in den Untersuchungstiefen 27 cm und 67 cm eine realitätsnahe Wiedergabe der gemessenen Bodensaugspannungen am Standort Laußnitz. Dies betrifft sowohl die transpirationsbedingte Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsdynamik als auch die Saugspannungen im sättigungsnahen Bereich in den Wintermonaten als Hinweis für die zutreffende Parametrisierung der Materialeigenschaften. In der untersten Messtiefe von 107 cm allerdings wird die Auswirkung des verletzten Courant-Kriteriums sehr deutlich: Bedingt durch das "Vorbeifließen" des Wassers an einzelnen Diskretisierungsschichten wird während der Sorptionsphase insbesondere in den Wintermonaten 2000/01, 2003/04 sowie 2004/05 im Widerspruch zu den Messwerten keine vollständige Durchfeuchtung des Bv/Cv bzw. des Cv-Horizontes erreicht.



Abbildung 23: Laußnitz, gemessener und simulierter Bestandesniederschlag; oben: kumulierte Tageswerte; unten: kumulierte Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten.

Die zweite Parametrisierungsvariante, in welcher durch Nichtberücksichtigung kritischer Bodenhorizonte sowie durch Anpassung der verbleibenden Kompartimentmächtigkeiten die Einhaltung des Courant-Kriterium als vorrangiges Kriterium betrachtet wurde (vgl. Kapitel 5.2.2), wird in 107 cm Tiefe die Wiederbefeuchtung in den zuvor unbefriedigend simulierten Wintern durch die Simulation wesentlich besser getroffen (vgl. Abbildung 25). Diese positive Veränderung erfolgt allerdings zu Lasten der simulierten Tensionsdynamik insgesamt: Sowohl in 27 cm als auch in 67 cm und 107 cm Bodentiefe liegen die simulierten Bodensaugspannungen während der Wintermonate nun deutlich zu hoch. Zudem wird in 27 cm Bodentiefe die gemessene sommerliche Austrocknung durch das Modell nun deutlich unterschätzt. Diese negativen Veränderungen der Simulationsergebnise in Abbildung 25 gegenüber Abbildung 24 müssen als Folge der nun gegenüber der Profilbeschreibung und den experimentell bestimmten Materialfunktionen abweichenden Bodenparametrisierung in Kauf genommen werden.

Insgesamt zeigt der Vergleich dieser beiden mit unterschiedlichen Prämissen erstellten Parametrisierungen, dass in den oberflächennahen Diskretisierungsschichten der Wasserhaushalt trotz deutlicher Verletzung des Courant-Kriterium besser abgebildet werden kann als dies bei Einhaltung des Kriteriums und damit verbundener artifizieller Modifikation der Materialfunktionen der Fall ist. Für die Simulation der Zustandsvariablen im Unterboden führt die Verletzung des Courant-Kriteriums dagegen zu erheblichen Nachteilen. Zur adäquaten Wiedergabe der Speicherungs- und Transportprozesse innerhalb der Wurzelzone und insbesondere für die Abschätzung der Klimafolgen auf Boden und Vegetation wäre es dringend zu empfehlen, eine explizite Zeitschrittsteuerung im Bodenmmodul zu implementieren.

Die in Kapitel 5.3.5 dargestellten Bilanzkomponenten für den Standort Laußnitz gründen auf der Modellparametrisierung unter Berücksichtigung aller in Laußnitz gemäß Scherzer und Schultze (2006) vorhanden Bodenhorizonte und den zugehörigen Materialfunktionen für pF-WG und $K_{(\Theta)}$.



Abbildung 24: Laußnitz: gemessene und simulierte Saugspannungen. Horizontabfolge und Horizontmächtigkeiten entsprechen den Vorgaben, Courant-Kriterium wird verletzt.

5.3.5 Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die mit WaSiM-ETH ermittelten Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für den Zeitraum 1997-2004 (vgl. Tabelle 8) stimmen hinsichtlich der Anteile von Evapotranspiration einerseits und Abflüssen andererseits sehr gut mit den vorliegenden Ergebnissen von Scherzer (2005) bzw. Scherzer und Schultze (2006), welche das Standortmodell CoupModel verwendeten, überein. Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen beider Modelle ergeben sich insbesondere bei der Aufteilung der Abflüsskomponenten, d. h. Basisabfluss, Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss. WaSiM-ETH modelliert im Vergleich zu CoupModel einen deutlich höheren Direktabfluss und einen höheren Interflow. Grundsätzlich sind in diesem Punkt sind die Ergebnisse beider Modelle plausibel. Eine Validierung der Anteile der einzelnen Abflusskomponenten kann in der Regel lediglich auf der Ebene von Einzugsgebieten, z. B. mit Hilfe einer Ganglinienseparation, erfolgen.



Abbildung 25: Laußnitz: gemessene und simulierte Saugspannungen unter Einhaltung des Courant-Kriteriums. Horizontabfolge und Horizontmächtigkeiten wurden modifiziert.

Die Auswertung der internen Modellbilanz nach Gleichung 23 zeigt einen zu vernachlässigenden Bilanzfehler von -4,7 mm über den Zeitraum 1997-2004 bzw. im arithmetischen Mittel -0.6 mm pro Jahr. Ursache sind Rundungsfehler bei der Zeitschrittweite von einem Tag. Dieser Fehler tritt bei einer Modellierung in Stundenschritten (vgl. Kapitel 5.6) nicht auf.

	FNS	I _{real} Kiefer	I _{real} Kraut	E _{real}	T _{real} . Kiefer	T _{real} Kraut	ETRS	$\mathbf{Q}_{\mathrm{dir}}$	$\mathbf{Q}_{\mathrm{ifl}}$	Q _{bas}	ΔS
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1997	812.8	256.7	46.4	60.2	257.1	60.5	5.3	81.9	0.0	41.6	3.0
1998	896.5	296.5	52.3	66.9	267.9	67.7	12.5	39.2	0.0	47.5	45.9
1999	741.3	252.2	40.8	60.8	280.5	66.6	9.6	35.7	0.0	32.0	-36.8
2000	739.1	264.0	42.6	58.2	252.1	60.7	3.5	34.6	0.0	35.9	-12.5
2001	787.1	257.5	46.9	48.6	207.7	48.2	6.8	63.4	0.4	30.8	76.7
2002	882.4	227.5	42.7	51.5	229.8	50.6	5.6	69.1	44.2	70.9	90.5
2003	437.6	173.3	29.1	56.0	204.1	48.0	6.8	41.4	0.0	22.2	-143.3
2004	694.2	222.0	39.6	51.1	219.9	53.5	8.5	108.2	2.4	15.5	-26.4
Summe	5991.0	1949.7	340.3	453.3	1919.1	455.7	58.6	473.5	47.0	296.6	-2.9
Mittelwert	748.9	243.7	42.5	56.7	239.9	57.0	7.3	59.2	5.9	37.1	-0.4
COUP	749.2	240.1	42.7	58.6	240.0	55.5		123.2	0.0	0.0	-10.8
Differenz	-0.4	3.6	-0.1	-1.9	-0.1	1.5		-64.0	5.9	37.1	10.4

 Tabelle 8:
 Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts am Standort Laußnitz

FNS: Freilandniederschlag, I_{real}: Reale Interzeption; E_{real}: reale Evaporation; T_{real}: reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas}: Basisabfluss, Q_{iff} : Zwischenabfluss, Q_{dir} : Oberflächenabfluss; Δ S: Speicheränderung; COUP: Mittelwert von 1997-2004 bei der Standortsimulation mit CoupModel (Scherzer 2005)

5.4 Colditz (Eichenbestand auf Pseudogley, Sächsisch-Thüringisches Löss-Hügelland)

5.4.1 Bodenparameter

Das Bodenprofil am Standort Colditz umfasst fünf Horizonte. Bei der Parametrisierung und Kalibrierung des erweiterten WaSiM-ETH-Modells für diesen stauwasserbeeinflussten Standort waren komplexe Parameteradaptionen durchzuführen: Mit den unmittelbar auf Grundlage der gemessenen Druck-Sättigungsbeziehung mit Hilfe von RETC bestimmten van Genuchten-Parametern modellierte WaSiM-ETH zunächst deutlich zu viel Direktabfluss und als Folge davon zu wenig Infiltration und Zwischenab-fluss. Dies drückte sich insbesondere in ungenügend nachsimulierten Tensionsverläufen aus (nicht dargestellt). Als Ursache wurden schließlich die Labormesswerte der pF-Kurve bei bei 300 cm und 1000 cm identifiziert, welche mit dem Van Genuchten-Modell, das auf von einer monomodalen Porenverteilung ausgeht, nicht in Einklang zu bringen sind (vgl. Abbildung 26). Diese Ausreißer bei den Labormesswerten sind vermutlich eine Folge von Quellungs- und Schrumpfungsprozessen, welche bei der Laboranalyse der sehr bindigen Stechzylinderproben des Standorts Colditz auftraten (Herr Sawinski, FIB Finsterwalde, persönl. Mitteilung). Abbildung 26 zeigt die ohne Berücksichtigung der Messwerte bei 300 h Pa und 1000 hPa modifizierte pF-Kurve, welche schließlich für die Parametrisierung des Standorts Colditz verwendet wurde.

5.4.2 Vegetationsparameter

Die Parametrisierung der Vegetation und die Kalibrierung der Modellparameter für den Standort Colditz erfolgte analog zu der Vorgehensweise, wie sie am Standort Laußnitz ausführlicher dargestellt wurde. IntercepCap wurde auf 0,75 mm optimiert, der rsc auf 200 s/m außerhalb und 100 s/m innerhalb der Vegetationsperiode und der rsc_evap wurde auf 1200 gesetzt. Da mit einem Lai_scale von 10 zunächst eine sehr hohe Transpiration in der Krautschicht modelliert wurde, wurde dieser Wert für den Eichenbestand Colditz auf 20 erhöht. Die invers optimierten Blattflächenindizes – zwischen 1-4,5 m²/m² (Eiche) und 1-3,5 m²/m² (Krautschicht) – entsprechen weitgehend den Erfahrungen in Scherzer (2005). Vegetationsbedeckungsgrad und Vegetationshöhen wurden entsprechend der Vorgaben eingestellt. Die Wurzeltiefe der Baumschicht wurde gegenüber den ursprünglichen Werten leicht erhöht auf 1,50 m. Die genaue Parametrisierung der Vegetation ist in Anhang 9.2 aufgelistet.



Abbildung 26: Standort Colditz: pF-Kurven. Punkte: Messwerte

5.4.3 Simulationsergebnisse: Bestandesniederschlag/Interzeption

Der kumulierte Bestandesniederschlag stimmt zwischen Messung und Simulation gut überein (vgl. Abbildung 27, oben). Die höher auflösende Betrachtung der "kumulierten Differenzen" (vgl. Abbildung 27, unten) verdeutlicht allerdings eine Trendumkehr um das Jahr 2000: Während im Zeitraum 1997-1999 zunächst der gemessene Bestandesniederschlag etwas höher ausfällt als der simulierte, unterschätzt die Simulation etwa ab dem Jahr 2001 die durchtropfende Wassermenge. Ursache ist ein Schädlingsbefall der Eichen in den späten neunziger Jahren, der zum Absterben und anschließenden Entfernen einzelner Bäume auf der Versuchsfläche führte (Dr. Andreae/Dr. Raben, SBS, persönliche Mitteilung). Im Rahmen der KliWEP2-Testsimulationen mit WaSiM-ETH wurde diese singuläre Kalamität bewusst nicht bei der Parametrisierung berücksichtigt.

5.4.4 Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung

Die Messwerte der Bodensaugspannung an diesem Standort verlaufen zeitweise unterhalb 0 hPa, d. h es herrschen wasserstauende Bedingungen. Dies konnte durch WaSiM-ETH gut nachempfunden werden (vgl. Abbildung 28), nachdem die gesättigten Leitfähigkeiten im Stauhorizont um eine Größenordnung gegenüber den ursprünglichen, durch Scherzer (2005) invers bestimmten Werten, verringert wurden. In Colditz sind die gesättigten Leitfähigkeiten erheblich geringer als in Laußnitz. Eine Verletztung der Courant-Bedingung ist hier daher kaum von Bedeutung bzw. kann durch den Iterationsalgorithmus von WaSiM-ETH vollständig kompensiert werden.

5.4.5 Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die Bilanzkomponenten für den Zeitraum 1997 – 2004 entsprechen weitgehend denjenigen, die durch Scherzer (2005) mit CoupModel ermittelt wurden (vgl. Tabelle 9). Die Evapotranspiration wird bei den Simulationen mit WaSiM-ETH etwas höher dargestellt, da so die Saugspannungsdynamik im Boden besser abgebildet werden kann. Die Unterschiede zwischen den Modellen in der Aufteilung der Abfluss-komponenten sind analog zu den Ausführungen am Beispiel des Standorts Laußnitz (vgl. Kapitel 5.3.5) weniger von Bedeutung und auf Standortebene ohne aufwändige Messungen nicht zu verifizieren oder zu widerlegen.



Abbildung 27: Colditz, gemessener und simulierter Bestandesniederschlag; oben: kumulierte Tageswerte; unten: kumulierte Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten

	FNS	I _{real}	I _{real}	E _{real}	T _{real} .	T _{real}	ETRS	Q _{dir}	Q _{ifl}	Q _{bas}	ΔS
	[mm]	Kiefer [mm]	Kraut [mm]	[mm]	Kiefer [mm]	Kraut [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1997	678.3	184.7	50.1	94.1	110.9	30.2	2.2	9.5	64.8	148.9	-17.1
1998	863.8	207.2	53.5	91.3	95.6	28.1	1.6	94.4	147.9	109.6	34.6
1999	777.6	190.2	55.3	97.8	118.4	32.1	2.1	58.2	87.7	189.5	-53.7
2000	705.8	195.4	58.6	97.8	130.5	32.9	2.5	83.1	102.7	69.3	-67.1
2001	845.9	215.7	57.6	87.7	105.0	27.9	7.5	12.4	74.5	97.4	160.4
2002	917.8	185.2	49.9	87.4	94.4	27.9	5.3	181.3	111.1	199.2	-24.1
2003	493.8	136.2	35.3	102.5	176.5	43.5	6.2	15.3	35.5	132.7	-189.8
2004	741.6	194.9	50.8	90.5	114.9	30.1	7.2	7.7	40.4	53.9	151.2
Summe	6024.6	1509.4	411.1	749.2	946.2	252.8	34.6	462.0	664.6	1000.5	-5.7
Mittelwert	753.1	188.7	51.4	93.7	118.3	31.6	4.3	57.7	83.1	125.1	-0.7
COUP	753.2	177.5	60.5	27.6	119.5	29.9		24.1	27.6	201.9	-2.2
Differenz	-0.1	11.2	-9.1	66.1	-1.2	1.7		33.6	55.5	-76.8	1.4

 Tabelle 9:
 Bilanzkomponenten des Wasserhaushalt am Standort Colditz

FNS: Freilandniederschlag, I_{real}: Reale Interzeption; E_{real}: reale Evaporation; T_{real}: reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas}: Basisabfluss, Q_{iff}: Zwischenabfluss, Q_{dir}: Oberflächenabfluss; Δ S: Speicheränderung; COUP: Mittelwert von 1997 bis 2004 bei der Standortsimulation mit CoupModel (Scherzer 2005)



Abbildung 28: Gemessene und simulierte Saugspannungen in den drei Untersuchungstiefen in Colditz

Die mit WaSiM-ETH simulierte hohe Menge an Oberflächenabfluss ist vor allem auf das Starkregenereignis im August 2002 zurückzuführen. Dieses führt zu einer Abflussspitze von rund 115 mm am 12.08.2002. Der weitere Oberflächenabfluss ist vor allem auf Schneeschmelze und auf zwei Starkregenereignisse 1998 und 1999 zurückzuführen (vgl. Abbildung 29).

Die interne Wasserbilanz von WaSiM-ETH nach Gleichung 24 zeigt für den Standort Colditz eine Abweichung von insgesamt 9,6 mm bzw. eine mittlere Abweichung von 1,2 mm pro Jahr. Die dafür ursächlichen Rundungsfehler treten vor allem in den Jahren 2000 (Abweichung 7,8 mm) und 2003 (Abweichung 4,1 mm) auf. Beide Jahre weisen sehr trockene Sommer auf. Durch die hier sehr geringen Wasserflüsse, die modellintern teilweise durch eine Begrenzung der Anzahl der Nachkommastellen nicht mehr vollständig abgebildet werden, treten offensichtlich höhere Abweichungen in der Bilanz auf als in feuchteren Jahren. Mit lediglich 0,2 % des Niederschlags ist der Rundungsfehler insgesamt allerdings ohne praktische Bedeutung.



Abbildung 29: Colditz: Zusammenhang zwischen Direktabfluss und Freilandniederschlag

5.5 Klingenthal (Fichte auf Podsol-Braunerde, Westliches Oberes Erzgebirge)

5.5.1 Bodenparameter

Das Bodenprofil am Standort Klingenthal umfasst sechs Horizonte. Abbildung 30 zeigt die pF-Kurven, die über das Programm RETC für diesen Standort ermittelt wurden. Die vollständigen für die Modellsimulationen verwendeten Parameter sind in Anhang 9.3 aufgelistet.



Abbildung 30: Standort Klingenthal: pF-Kurven. Punkte: Messwerte

5.5.2 Vegetationsparameter

Der Parameter IntercepCap wurde auf 0,65 mm optimiert, der rsc auf 100 s/m außerhalb und 80 s/m innerhalb der Vegetationsperiode, der rsc_evap wurde auf 3.000 gesetzt. Wie am Standort Colditz zeigte sich auch hier, dass mit einem Lai_scale von 10 eine relativ hohe Transpiration in der Krautschicht modelliert wurde; deshalb wurde er auf 20 erhöht. Die invers optimierten Blattflächenindizes – zwischen 7,2-8 m²/m² (Fichte) und 1-3,5 m²/m² (Krautschicht) – entsprechen weitgehend den Erfahrungen in Scherzer (2005). Vegetationsbedeckungsgrad und Vegetationshöhen wurden analog zu den Vorgaben eingestellt. Die Wurzeltiefe der Baumschicht wurde mit 1,40 m angenommen, die der Krautschicht bewegt sich zwischen 0,2-0,5 m. Die genaue Parametrisierung der Vegetation ist in Anhang 9.3 aufgelistet.

5.5.3 Simulationsergebnisse: Bestandesniederschlag/Interzeption

Die insgesamt sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Bestandesniederschlag (vgl. Abbildung 31) wird lediglich an zwei Zeitpunkten leicht beeinträchtigt: Im Februar 1997 ist der simulierte Wert deutlich höher als die Messung. Ursache könnte möglicherweise ein Messfehler sein, da in dieser Höhenlage häufig Schnee und starke Winde auftreten. Ähnlich dazu sind im ersten Quartal 2000 zwei deutliche Abweichungen von gemessenem und modelliertem Bestandesniederschlag zu erkennen.



Abbildung 31: Klingenthal. Gemessener und simulierter Bestandesniederschlag: kumulierte Tageswerte sowie die kumulierten Abweichungen zwischen gemessenem um simulierten Werten

5.5.4 Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung

In den Messtiefen 67 cm und 107 cm liefert die Simulation mit dem erweiterten WaSiM-ETH-Modell sehr gute Resultate sowohl hinsichtlich Tensionsniveau und Sickerungsdynamik im Winter als auch hinsichtlich der Wiedergabe der gemessenen Desorptions- und Sorptionsdynamik während der Sommermonate (vgl. Abbildung 32). In 27 cm Tiefe gelingt die Nachbildung der Messwerte während der Wintermonate ebenfalls sehr gut, im Sommer wird die Austrocknung unterschätzt. Da die Wasserentnahmen aus dem Boden durch Transpiration und Evaporation plausibel sind (vgl. Tabelle 10), wurde auf eine prinzipiell mögliche Verbesserung der Nachbildung der Tensionen im Oberboden verzichtet. Die WaSiM-ETH-



Ergebnisse können möglicherweise auch als Hinweis auf eine leichte Unterschätzung des Wurzelwasserentzuges durch CoupModel bei Scherzer und Schultze (2006) gewertet werden.

Abbildung 32: Gemessene und simulierte Saugspannungen in den drei Untersuchungstiefen in Klingenthal

5.5.5 Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die für den Zeitraum 1997-2004 berechneten Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts (vgl. Tabelle 10) entsprechen weitgehend denjenigen, die durch Scherzer (2005) mit CoupModel ermittelt wurden. Die interne Modellbilanz (vgl. Gleichung 24) ist mit einem Summenfehler von 0,1 mm praktisch ausgeglichen.

	FNS	I _{real}	I _{real}	E _{real}	T _{real} .	T _{real}	ETRS	Q _{dir}	Q _{ifl}	Q _{bas}	ΔS
	[mm]	Kiefer [mm]	Kraut [mm]	[mm]	Kiefer [mm]	Kraut [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1997	1327.9	417.5	33.9	18.2	200.2	3.6	35.2	28.5	0.0	470.2	120.6
1998	1596.8	416.4	32.8	18.0	189.1	3.5	29.8	11.9	0.0	620.4	274.8
1999	1411.9	442.9	39.4	20.2	238.9	4.6	28.3	21.4	0.0	812.4	-196.2
2000	1471.4	466.7	39.0	19.0	223.5	4.3	40.4	50.1	0.0	728.1	-99.8
2001	1336.9	298.9	24.4	15.6	189.1	3.6	19.9	13.9	0.0	588.2	183.2
2002	1537.8	356.3	32.2	16.2	170.6	2.9	27.7	121.5	0.0	678.1	132.3
2003	895.7	299.8	26.3	23.0	366.8	7.8	49.3	13.5	0.0	713.2	-604.0
2004	1367.3	417.1	35.7	17.4	199.8	3.7	42.8	32.8	0.0	462.6	155.4
Summe	10945.7	3115.6	263.7	147.6	1778.1	34.1	273.4	293.6	0.0	5073.2	-33.6
Mittelwert	1368.2	389.5	33.0	18.4	222.3	4.3	34.2	36.7	0.0	634.2	-4.2
COUP	1368.4	392.5	3.4	14.2	219.9	4.5		1.7	0.1	698.1	34.2
Differenz	-0.1	-3.0	29.6	4.2	2.4	-0.2		35.0	-0.1	-63.9	-38.4

Tabelle 10: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalt am Standort Klingenthal

FNS: Freilandniederschlag, I_{real}: Reale Interzeption; E_{real}: reale Evaporation; T_{real}: reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas}: Basisabfluss, Q_{iff}: Zwischenabfluss, Q_{dir}: Oberflächenabfluss; Δ S: Speicheränderung; COUP: Mittelwert von 1997 bis 2004 bei der Standortsimulation mit CoupModel (Scherzer 2005)

Für den Standort Klingenthal wird durch WaSiM-ETH ein relativ hoher Anteil an Direktabfluss ausgewiesen (vgl. Tabelle 10). Aus diesem Anlass wurden hier mit Hilfe des in WaSiM-ETH neu implementierten Makroporenmodul (vgl. Kapitel 4.2.5) zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss von Makroporen auf die Abflussgenese durchgeführt. Wie Abbildung 33 zeigt, führt die Annahme von bis zu 2 m tiefen Makroporen mit einer Kapazität von 50 mm/h (Anspringen der Makroporen bei Niederschlagsintensitäten ab 1 mm/h), zu einer deutlichen Reduzierung des Oberflächenabflusses während der Sommermonate. Dies wird besonders eindrucksvoll am Beispiel des Jahres 2002 mit dem Starkregenereignis um den 12./13.08.2002 belegt: Der Direktabfluss verringert sich hier von 121,5 mm (vgl. Tabelle 10) auf 32,9 mm (vgl. Abbildung 33). Kaum Einfluss auf die Abflussgenese hat die Annahme von Makroporen dagegen bei der Schneeschmelze im Frühling. Diese Resultate stimmen in vollem Umfang mit den Ergebnissen von Scherzer et al. (2005) zu den Auswirkungen von Makroporen bei der Abflussgenese im Erzgebirge überein.



Abbildung 33: Klingenthal: Vergleich der kumulierten Direktabflüsse mit und ohne Makroporen

5.6 Lüttewitz

5.6.1 Bodenparameter

Die von der LfL übergebenen Modellparameter θ_s und θ_r sowie die van Genuchten-Parameter α und n konnten direkt in die Steuerdatei des erweiterten WaSiM-ETH-Modells übernommen werden. Die Modelldiskretisierung orientiert sich an den Horizontmächtigkeiten der Profilbeschreibung. In Übereinstimmung mit Schmidt et al. (2002) wurde angenommen, dass das bodenbildende Material in Lüttewitz eine Mächtigkeiten wurden gegenüber den zunächst übergebenen Werten bei der Kalibrierung etwas verringert und liegen nun bei $1.505*10^{-7}$ m/s bis 20 cm Bodentiefe und darunter bei $1.505*10^{-8}$ m/s.

5.6.2 Vegetationsparameter

Am Standort Lüttewitz werden seit mehreren Jahren die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungstechniken u. a. auf den Wasserhaushalt untersucht (z. B. Schmidt et al. 2002). Dabei wurden bereits für das Modell Erosion 2D/3D (Schmidt et al. 1996) Parameterkataloge erstellt. Für die Modellierung mit WaSiM-ETH wurde der vorliegende Datenbestand für den Acker mit Mulchsaat verwendet. Für diese Bearbeitungsvariante liegen u. a. Angaben zum Bedeckungsgrad und Informationen zu Bearbeitungsterminen, zur Bestandesdichte und zur Fruchtfolge vor. 1999 wurden nach Sommergerste Zuckerrüben angepflanzt, dann folgte zweimal Winterweizen, 2002 wieder Zuckerrüben, 2003 und 2004 erneut Winterweizen. Die Verdunstungswiderstände wurden auf Werte von 0,5 s/m (rs_interception), 400 s/m (rs_evap) und 40 s/m bzw. 20 s/m (rsc, außerhalb und innerhalb der Vegetationsperiode) kalibriert. Die angenommene Wurzeltiefe schwankt je nach Anbaufrucht und Zeitpunkt zwischen 0,2-0,8 m. Der Parameter IntercepCap (Wasserspeicherkapazität der Blätter) wurde auf 0,65 mm festgelegt. Weitere Details zur Parametrisierung befinden sich in Anhang 9.4.

5.6.3 Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung, Bodenwassergehalt

Die für den Zeitraum 1999-2001 vorliegenden Messwertverläufe der Bodensaugspannung (vgl. Abbildung 34) und des Bodenwassergehaltes (vgl. Abbildung 35) werden durch WaSiM-ETH gut nachvollzogen. Im Spätjahr 2001 weisen die Messwerte des Bodenwassergehalts auf eine etwas stärkere Austrocknung hin, was aber durch die gemesssenen Bodensaugspannungen (und WaSiM-ETH) nicht bestätigt wird.

5.6.4 Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die für den Zeitraum 1999-2004 berechneten Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts für den Standort Lüttewitz (vgl. Tabelle 11) wurden am 08.09.2006 gemeinsam mit den Betreuern des Versuchsprogramms an der LfL in Leipzig diskutiert und als uneingeschränkt plausibel bewertet.

Die interne Wasserbilanz von WaSiM-ETH nach Gleichung 24 ist für den Stanort Lüttewitz vollständig ausgeglichen (Summe = 0,1 mm). Wie bereits weiter oben erwähnt, scheinen bei stündlicher Auflösung der Klimadaten keinerlei Rundungsfehler aufzutreten.
	FNS	Ireal	Ereal	Treal.	ETRS	Qdir	Qifl	Qbas	ΔS
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1999	602.2	97.4	243.8	122.5	6.6	117.1	3.3	16.7	-5.2
2000	498.8	85.8	226.4	135.6	3.5	61.8	3.1	15.0	-32.4
2001	539.4	112.1	241.6	96.7	8.3	64.0	1.7	14.1	0.8
2002	758.1	55.1	243.6	148.5	5.1	224.4	2.0	14.0	65.3
2003	396.1	70.6	228.7	77.6	7.3	61.2	1.5	14.0	-64.9
2004	678.0	117.9	252.8	83.9	8.3	138.0	3.2	13.9	60.1
Summe	3472.6	538.9	1436.9	664.8	39.2	666.5	14.8	87.8	23.6
Mittelwert	578.8	89.8	239.5	110.8	6.5	111.1	2.5	14.6	3.9

Tabelle 11: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalt am Standort Lüttewitz

FNS: Freilandniederschlag, I_{real}: Reale Interzeption; E_{real}: reale Evaporation; T_{real}: reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas} : Basisabfluss, Q_{ifl} : Zwischenabfluss, Q_{dir} : Oberflächenabfluss; ΔS : Speicheränderung



Abbildung 34: Lüttewitz: Gemessene und simulierte Saugspannungen in 30 cm und 60 cm Tiefe



Abbildung 35: Lüttewitz: Gemessener und simulierter Wassergehalte in 30 cm und 60 cm Tiefe

5.7 Lysimeterstation Brandis

Für die Testsimulationen mit WaSiM-ETH wurden in Absprache mit der Leiterin der Lysimeterstation Brandis, Frau Dr. Haferkorn, drei Lysimeter ausgewählt, welche typische grundwasserferne Böden des Parthegebietes repräsentieren (vgl. Tabelle 12, vgl. auch Haferkorn 2000). Die Fläche der Lysimeter beträgt jeweils 1 m² und die Lysimetermächtigkeit 3 m. Als Simulationszeitraum wurde analog zu den Forststandorten die Periode 1997-2004 festgelegt.

5.7.1 Bodenparameter

Die Bodenprofile der drei untersuchten Lysimeter umfassen jeweils drei bis fünf Horizonte (vgl. Tabelle 12). Da keine gemessenen Druck-Sättigungsbeziehungen vorliegen, wurden die für die Testsimulationen verwendeten horizontbezogenen van Genuchten-Parameter sowie die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion, wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, mit Hilfe der PTF nach Wösten et al. (1999) bestimmt.

Insbesondere an den Lysimetern 7/4 und 8/6 führten die nach dieser Methode parametrisierten pF-Kurven allerdings zunächst insbesondere in oberflächennahen Horizonten zu realitätsfernen simulierten Saugspannungen, welche selbst in den Wintermonaten 100 hPa kaum unterschritten (nicht dargestellt). Als Folge der Rückkopplung über die k(u)-Beziehung trat in erheblichem Umfang simulierter Oberflächenabfluss auf und das Bodenprofil trocknete über die Jahre hinweg sukzessive aus. Als Ursache konnte eine zu stark ausgeprägte Steilheit der aus der PTF resultierenden pF-Kurve im Grobporenbereich identifiziert werden. Durch eine geringfügige manuelle Erhöhung des Sättigungswassergehaltes konnte dieses Artefakt beseitigt und Tensions- bzw. Wassergehaltsverläufe realitätsnäher abgebildet werden. Diese Beobachtung bestätigt die bereits in Kapitel 5.2.2 erwähnten Unsicherheiten bei der Bestimmung von van Genuchten-Parametern über PTF, welche auch in der Literatur eingehend belegt sind (z. B. Schäfer et al. 1994). Abbildung 36 gibt einen Überblick über die für die Testsimulationen schließlich verwendeten pF-Kurven. Eine Gesamtübersicht der in den Modellsimulationen verwendeten Parameter befindet sich in Anhang 9.5.

	Lysimeter 5/6		Lysime	eter 8/6	Lysimeter 7/4					
Herkunft	Brandis, Muldentalkreis		westl. Brandis,	Muldentalkreis	Beucha, Muldentalkreis					
Bodentyp	Erodierte Braunerde		Parabrauner	le-Braunerde	Braunerde-Pseudogley					
Bodenprofil	0-35 cm Bv-Ap		0-25 cm	Ap	0-35 cm	Ар				
	35-175 cm	II Cv	25-70 cm	Al-Bv	35-50 cm	Bv-Sw				
	175-300 cm	II Cn	70-150 cm	II Bbt	50-135 cm	II Sd				
			150-300 cm	III Bbt-lCv	135-220 cm	II Sd				
					220-300 cm	III lCn				
Vegetation	Vegetation 1997				Sommerweizen (Winterroggen)					
		1998		Winterroggen (Wintergerste)						
		1999		Wintergerste (Senf)						
		2000			Erbsen					
		2001	Winterweizen (Wintergerste)							
2002				Wintergerste (Raps)						
	2003				Raps					
		2004		Winterweizen						

Tabelle 12: Charakterisierung der Lysimeter 5/6, 8/6 und 7/4 der Lysimeterstation Brandis

5.7.2 Vegetationsparameter

Die Lysimeter und der umliegende Schlag werden nach Haferkorn (2000) auf ortsübliche Weise bewirtschaftet. Die Fruchtfolge im Untersuchungszeitraum ist in Tabelle 12 beschrieben. Für die Parametrisierung der Vegetation konnte für die Lysimeter der Station Brandis neben den Angaben bei Haferkorn (2000) auch auf phänologische Erfassungsbögen und auf eine umfangreiche Fotodokumentation zurückgegriffen werden. Für die Kalibrierung und Validierung der Vegetationsparameter stehen für die einzelnen Lysimeter neben Wasserspannungs- und Bodenfeuchtemessungen aus 50 cm, 150 cm und 250 cm auch tägliche Evapotranspirationswerte, welche über die Lysimeterbilanz berechnet wurden, zur Verfügung. Dies ermöglicht für jedes Untersuchungsjahr eine nach Lysimeter und Landnutzung differenzierte Parameterkalibrierung. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle lediglich die Spannweiten der einzelnen Parameter beschrieben: Der rsc liegt außerhalb der Vegetationsperiode bei 40 s/m und innerhalb bei 20 s/m. Der Parameter rs interception wurde wie bei den anderen Standorten auf 0,5 s/m festgelegt. rs evap ergab mit einer Optimierung auf 200-300 s/m die besten Resultate. Der Vegetationsbedeckungsgrad liegt zwischen 5-90 % mit erheblichen Schwankungen zwischen den einzelnen Vegetationsarten und Lysimetern. Die angenommenen Wurzeltiefen liegen in Abhängigkeit vom Lysimeter, vom Bewuchs und vom Zeitraum zwischen 0,1-0,6 m. Der Parameter IntercepCap wurde auf Werte zwischen 0,5-0,65 mm optimiert. Ausführlichere Angaben zur Parametrisierung befinden sich im Anhang (vgl. Kapitel 9.5).



Abbildung 36: Brandis, pF-Kurven. a) Lysimeter 5/6, b) Lysimeter 7/4, c) Lysimeter 8/6

5.7.3 Simulationsergebnisse: Evapotranspiration

Die umfassende Datengrundlage der Lysimeter ermöglichte eine detaillierte Überprüfung der Simulationsergebnisse: Bei allen drei Lysimetern konnte eine annähernd ideale Übereinstimmung von gemessener und simulierter Evapotranspirationsdynamik sowohl auf Tagesebene (vgl. Abbildung 37, dargestellt am Beispiel von Lysimeter 5/6) als auch bei kumulierter Betrachtung über den Zeitraum 1997–2004 (vgl. Abbildung 38-Abbildung 40, dargestellt sind alle Lysimeter) erzielt werden. Alle weiteren Simulationsergebnisse für die Lysimeter befinden sich auf der beiliegenden CD (vgl. Anlagenverzeichnis).



Abbildung 37: Lysimeter 5/6, Jahresverlauf der ETR, 1997-2000



Abbildung 37 (Fortsetzung): Lysimeter 5/6, Jahresverlauf der ETR, 2001-2004



Abbildung 38: Lysimeter 5/6, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Evapotranspiration, unten: kumulierte Differenzen



Abbildung 39: Lysimeter 7/4, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Evapotranspiration, unten: kumulierte Differenzen



Abbildung 40: Lysimeter 8/6, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Evapotranspiration, unten: kumulierte Differenzen

5.7.4 Simulationsergebnisse: Bodensaugspannung, Bodenwassergehalt, Sickerwassermenge

Die in den Lysimetern gemessenen Zeitreihen des Bodenwassergehalts konnten vor allem im Bereich der Wurzelzone sehr gut wiedergegeben werden, wie Abbildung 41 (oben) am Beispiel von Lysimeter 8/6 demonstriert. In 250 cm Tiefe konnten die Messwerte ebenfalls gut abgebildet werden, während die simulierte Dynamik in 150 cm Tiefe deutlich von den Messwerten abweicht (vgl. Abbildung 41 Mitte, unten). Als Ursache für die Abweichung in 150 cm Tiefe kommen neben prinzipiellen Schwierigkeiten bei der messtechnischen Erfassung der Zustandsgrößen mit jeweils nur einer Sondenparallele insbesondere auch nichtlineare Fortpflanzungsfehler bei der Abbildung bodenhydraulischer Speicher- und Transportparameter (pF-Kurven, K_(Θ)-Funktion) über Pedotransferfunktionen infrage. Diese Vorgehensweise weist gegen-über einer experimentellen Bestimmung der Materialfunktionen erfahrungsgemäß erhebliche Unschärfen auf (vgl. auch Kapitel 5.2.2, Kapitel 5.7.1). Zur Verbesserung der Datengrundlage wäre es wünschenswert, vor allem in den Tiefen 50 cm und 150 cm mehrere parallel eingebaute Sonden (Tensiometer, TDR/FDR-Sonden) zu installieren. Dies würde es ermöglichen, in Verbindung mit ebenfalls noch zu erstellenden Labor-pF-Kurven (zur Bestimmung von Sättigungswassergehalt, Welkepunkt usw.) die Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung auf Grundlage von *in situ*-Daten zu optimieren.

In die Darstellung der simulierten Bodensaugspannungen (vgl. Abbildung 42) wurden die Messwerte nicht mit aufgenommen, da die vorliegenden Zeitreihen lückenbehaftet sind. In 40 cm, 55 cm und 150 cm Tiefe erscheinen die simulierten Werte realistisch. In 200 cm Tiefe weist der Boden in der Modellierung dagegen durchgehend relativ hohe Saugspannungen auf. Offensichtliche Ursache sind hier wiederum die über relativ unsichere PTFs bestimmten Transportparameter.

Im Unterschied zum sehr zufriedenstellenden Ergebnis bei der Evapotranspirationsmodellierung (vgl. Kapitel 5.7.3) konnte beim Sickerwasseraustrag der Lysimeter nur die Quantität, nicht aber die Dynamik gut nachvollzogen werden: Die Modellierung weist einen deutlich ausgeglicheneren Sickerungsverlauf auf als die Messwerte (vgl. Abbildung 43, dargestellt am Beispiel von Lysimeter 8/6). Ursache ist wiederum die nicht zutreffende Einschätzung der Transportparameter bei Verwendung von PTF (s. o.) Dieser systematische Fehler zeigt sich später auch bei der Modellanwendung für das Einzugsgebiet des Schnell-

bachs, wo ein vergleichbares PTF-Verfahren angewendet wurde (vgl. Kapitel 6). In diesem Bereich besteht ganz allgemein noch erheblicher Forschungsbedarf (vgl. auch Schramm und Scherzer 2006).

Die Ergebnisse für die Lysimeter 5/6 und 7/4 können der beiliegenden CD entnommen werden.



Abbildung 41: Lysimeter 8/6: gemessene und modellierte Wassergehalte in den drei Tiefen 50 cm, 150 cm und 250 cm



Abbildung 42: Lysimeter 8/6: gemessene und modellierte Tensionen in den Tiefen 40 cm, 55 cm, 150 cm und 200 cm

5.7.5 Simulationsergebnisse: Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

Die für den Zeitraum 1997-2004 berechneten Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts sind in Tabelle 13 (Lysimeter 5/6), Tabelle 14 (Lysimeter 7/4) und Tabelle 15 (Lysimeter 8/6) abgebildet. Sie sind Resultat der in den voranstehenden Kapiteln beschriebenen Verläufe der Zustandsvariablen. Die interne Wasserbilanz von WaSiM-ETH nach Gleichung 23 ist über den Gesamtzeitraum bis auf einen Rundungsfehler von kumuliert -3.9 mm (Lysimeter 5/6), -1,7 mm (Lysimeter 7/4) bzw. -4,2 mm (Lysimeter 8/6) ausgeglichen. Die Simulationsergebnisse für die Lysimeter wurden am 08.09.2006 in Brandis bereits eingehend mit Frau Dr. Haferkorn, der Leiterin der Lysimeterstation, diskutiert. Hierbei wurde insbesondere auch angesprochen, dass es wünschenswert wäre, genauere Informationen zum jeweiligen Anteil von Evaporation und Transpiration an der Gesamtverdunstung zu gewinnen. Die simulierte Evaporation fällt im Verhältnis zur Transpiration bisher teilweise relativ hoch aus (vgl. Tabelle 13ff). Zur Optimierung der Datengrundlage wurde daher vorgeschlagen, einzelne Lysimeter über ein oder mehrere Jahre als Schwarzbrache zu belassen und so die Bedeutung der rein physikalischen Evaporation von der Bodenoberfläche besser eingrenzen zu können.



Abbildung 43: Lysimeter 8/6, oben: Summenkurven der gemessenen und modellierten Tiefensickerung, unten: kumulierte Differenzen

	FNS [mm]	I _{real} [mm]	E _{real} [mm]	T _{real} . [mm]	ETRS [mm]	Q _{dir} [mm]	Q _{ifl} [mm]	Q _{bas} [mm]	ΔS [mm]
1997	547.9	52.1	278.9	67.3	5.3	3.2	0.0	155.8	-14.6
1998	753.9	72.7	359.9	50.5	7.4	31.3	0.0	119.2	112.9
1999	612.2	76.0	359.8	44.0	6.8	11.0	0.0	96.4	18.3
2000	636.1	71.7	345.4	24.7	1.7	1.8	0.0	100.9	89.9
2001	738.5	78.6	321.6	52.7	5.0	32.1	0.0	149.2	99.4
2002	760.9	96.7	319.8	72.8	3.6	22.4	0.0	158.6	87.0
2003	438.4	50.0	282.0	27.8	5.6	0.0	0.0	242.9	-170.0
2004	692.4	128.1	287.9	138.5	8.0	12.6	0.0	247.9	-130.8
Summe	5180.3	626.0	2555.4	478.3	43.4	114.4	0.0	1270.8	92.0
Mittelwert	647.5	78.2	319.4	59.8	5.4	14.3	0.0	158.8	11.5

Tabelle 13: Lysimeter 5/6, Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

 $\label{eq:FNS: Freilandniederschlag, I_{real}: Reale Interzeption; E_{real}: reale Evaporation; T_{real}: reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas}: Basisabfluss, Q_{ifl}: Zwischenabfluss, Q_{dir}: Oberflächenabfluss; \Delta S: Speicheränderung$

	FNS [mm]	I _{real} [mm]	E _{real} [mm]	T _{real} . [mm]	ETRS [mm]	Q _{dir} [mm]	Q _{ifi} [mm]	Q _{bas} [mm]	ΔS [mm]
1997	547.9	115.5	277.0	76.8	5.2	18.6	0.0	94.5	-39.7
1998	753.9	142.5	287.9	136.0	7.8	55.8	0.0	76.6	47.2
1999	612.2	99.7	309.6	75.8	7.2	37.2	0.0	93.5	-10.8
2000	636.1	120.5	293.5	107.3	2.0	79.2	0.0	94.8	-61.3
2001	738.5	134.2	246.6	127.8	5.7	73.3	0.0	85.8	65.2
2002	760.9	126.7	282.6	116.3	3.8	97.4	0.0	90.3	43.9
2003	438.4	105.8	186.3	142.1	5.9	40.4	0.0	94.5	-136.6
2004	692.4	153.3	247.6	162.5	7.5	17.3	0.0	78.9	25.3
Summe	5180.3	998.2	2131.1	944.5	45.1	419.3	0.0	708.9	-66.8
Mittelwert	647.5	124.8	266.4	118.1	5.6	52.4	0.0	88.6	-8.3

Tabelle 14: Lysimeter 7/4, Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

FNS: Freilandniederschlag, I_{real} : Reale Interzeption; E_{real} : reale Evaporation; T_{real} : reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas} : Basisabfluss, Q_{ifl} : Zwischenabfluss, Q_{dir} : Oberflächenabfluss; ΔS : Speicheränderung

Tabelle 15: Lysimeter 8/6, Bilanzkomponenten des Wasserhaushalts

	FNS [mm]	I _{real} [mm]	E _{real} [mm]	T _{real} . [mm]	ETRS [mm]	Q _{dir} [mm]	Q _{ifl} [mm]	Q _{bas} [mm]	ΔS [mm]
1997	547.9	97.5	290.2	91.9	5.6	2.6	0.0	176.0	-116.0
1998	753.9	101.8	310.2	79.5	7.0	42.3	0.0	162.2	50.7
1999	612.2	92.8	337.0	58.0	6.5	0.9	0.0	168.5	-51.4
2000	636.1	95.1	323.3	47.2	1.7	15.9	0.0	168.5	-15.4
2001	738.5	129.7	271.6	88.0	5.4	28.7	0.0	162.0	53.2
2002	760.9	127.6	255.3	125.1	3.4	60.7	0.0	162.8	25.9
2003	438.4	79.3	271.6	83.9	5.5	8.0	0.0	166.6	-176.6
2004	692.4	156.0	258.8	117.7	6.5	0.6	0.0	153.7	-1.0
Summe	5180.3	879.8	2318.0	691.2	41.7	159.9	0.0	1320.4	-230.8
Mittelwert	647.5	110.0	289.7	86.4	5.2	20.0	0.0	165.1	-28.8

FNS: Freilandniederschlag, I_{real}: Reale Interzeption; E_{real}: reale Evaporation; T_{real}: reale Transpiration; ETRS: Schneeverdunstung; Q_{bas}: Basisabfluss, Q_{ifl}: Zwischenabfluss, Q_{dir}: Oberflächenabfluss; Δ S: Speicheränderung

6 Testsimulationen des gekoppelten Modells (WaSiM-ETH/ PCGEOFIM[®]) für das Schnellbachgebiet

6.1 Auswahl eines Teileinzugsgebietes der Parthe als Testgebiet

Die Auswahl eines geeigneten Teileinzugsgebietes für Testsimulationen wurde im Rahmen der Anlaufberatung von KliWEP1 am 09.08.2005 in den Diensträumen des LfUG in Dresden-Klotzsche diskutiert. Es bestand Konsens, dass ein potenzielles Testgebiet im Idealfall eine Größe von ca. 10 km² nicht überscheiten, gut beobachtet sein und ein möglichst großes Spektrum an Landnutzungen abdecken sollte. Prinzipiell geeignet sind somit die Pegel bzw. Teileinzugsgebiete

- Großsteinberg/Gladegraben
- Glasten/Parthe
- Großbardau/Schnellbach.

Gegen die Verwendung des Teileinzugsgebiets Großsteinberg/Gladegraben sprach u. a. die relativ starke anthropogene Beeinflussung durch zwei Stauhaltungen. Das Teileinzugsgebiet Glasten/Parthe eignet sich aufgrund des dort überwiegenden Festgesteinsgrundwasserleiters weniger gut zum Test der Modellkopplung zwischen WaSiM-ETH und Geofim. Aus diesem Grund wurde bis zum 11.08.2005 zwischen allen Beteiligten Konsens erzielt, den Schnellbach bis zum Pegel Großbardau als Testgebiet zu verwenden. Dieses Fläche zeichnet sich u. a. aus durch (Fr. Dr. Haferkorn, UBG, persönliche Mitteilung vom 10.08.2005)

- ein abgeschlossenes Einzugsgebiet (Größe ca. 8,0 km² bis zum Pegel Großbardau)
- das Vorhandensein der zu untersuchenden Landnutzungsarten (Landwirtschaft, Wald, Siedlung, Feuchtgebiet, vgl. Abbildung 49)
- den Hauptgrundwasserleiter 1,5 (Muldeschotter) und daran angrenzende Grundwasserleiter (u. a. Grundwasserleiter 1,6 und 1,7)
- sowohl flurnahe als auch flurferne Grundwasserstände
- verschiedene Messeinrichtungen zum Vergleich mit Modellrechnungen:
 - zwei Niederschlagsmessstellen in Bernbruch und Großbardau (für die am LfUG auch prognostizierte Klimareihen vorliegen)
 - o eine GW-Messstelle im Unterlauf (2 Zoll, ausgebaut in zwei Grundwasserstockwerken)
 - einige Brunnen im Oberlauf, welche zweimal im Jahr beobachtet werden oder werden könnten
 - Abflussmesswerte am Pegel Großbardau/Schnellbach

Für zukünftig geplante Untersuchungen des AGs zum Stickstoffumsatz und -austrag ist im Einzugsgebiet des Schnellbachs derzeit noch keine Grundwasser-Beschaffenheitsmessstelle vorhanden. Ein optimaler Standort könnte allerdings im Bedarfsfall auf Grundlage der vorhandenen Modellrechnungen und geologischen Unterlagen schnell gefunden werden (Fr. Dr. Haferkorn, UBG, persönliche Mitteilung vom 10.08.2005).

Die Rasterweite der Modellrechnungen mit WaSiM-ETH wurde analog zur Vorgehensweise bei KliWEP1 auf 125 m festgelegt. Im Bereich des Schnellbachs wurde im Grundwassermodell bisher allerdings mit einer Rasterweite von 500 m gerechnet, sodass dieses Gebiet grundwasserseitig mit nur ca. 20 finiten Volumina beschrieben wurde (vgl. Abbildung 46). Aus diesem Grund wurde durch das IBGW im Rahmen von KliWEP2 die sogenannte "Lupe Schnellbach" kreiert (vgl. Abbildung 47).

6.2 Eingangsdaten für WaSiM-ETH

Das Einzugsgebiet des Schnellbaches bis zum Pegel Großbardau ist ein etwa 8 km² grosses Zuflussgebiet zur Parthe und wurde bereits in KliWEP1 zusammen mit dem Parthe-Gesamtgebiet simuliert. Als Grundlage für die Modellsimulationen dienten modifizierte Input-Datensätze aus KliWEP1 mit den in Kapitel 2.2 näher erläuterten Restriktionen.



Abbildung 44: Einzugsgebiet des Schnellbachs. Der Bildausschnitt zeigt etwa das untere Drittel des Untersuchungsgebietes mit Blickrichtung nach Nordosten; (Datum der Aufnahme: 14.09.2005, Foto: J. Scherzer).



Abbildung 45: Schnellbach, etwa 1,7 km oberhalb Pegel; Blickrichtung flussaufwärts. Standort ist ein Feldwegübergang unterhalb der Ortslage Großbuch; (Datum der Aufnahme: 14.09.2005, Foto: J. Scherzer)



Abbildung 46: Diskretisierung im Modell Part2004 (500 m x 500 m)



Abbildung 47: Diskretisierung im Modell Part2005 (125 m x 125 m)