

Das ist einerseits besonders der flächenmäßig weiter verbreiteten und stärker zusammenhängenden Bebauung geschuldet (geringere ETR), andererseits aber Forst- und Landwirtschaftsflächen in Bereichen mit relativ flurnahen Grundwasserständen (höhere ETR).

8.3 Bodenwasservorräte

Der Wassergehalt im Boden wird durch WaSiM-ETH als Anteil an der nutzbaren Feldkapazität ausgegeben (nFK [1/1]: 0,6 bedeutet 60 % der nFK als Wassergehalt). In den Ausgabetafeln sind Werte aus der Wurzelzone sowie aus der gesamten ungesättigten Zone (Tagesmittelwerte in den TEn), in den Ausgabegrids nur die Werte aus der ungesättigten Zone (Mittelwert im Ausgabezeitraum je Gridzelle) zu finden.

Im Weiteren sind nur die die Gesamtfläche betreffenden mittleren Ergebnisse als Übersicht vorgestellt. Nur an gesondert hingewiesenen Stellen werden Tageswerte in einem bestimmten TE diskutiert.

Den Schwankungsbereich der Bodenwassergehalte in der Wurzelzone (SB_05) und in der gesamten Aerationsszone (SB_1) für das Flächennutzungsszenario zum Stand 1992 (FN92) zeigt die Abbildung 53 (alle Monatswerte der entsprechenden Jahre).

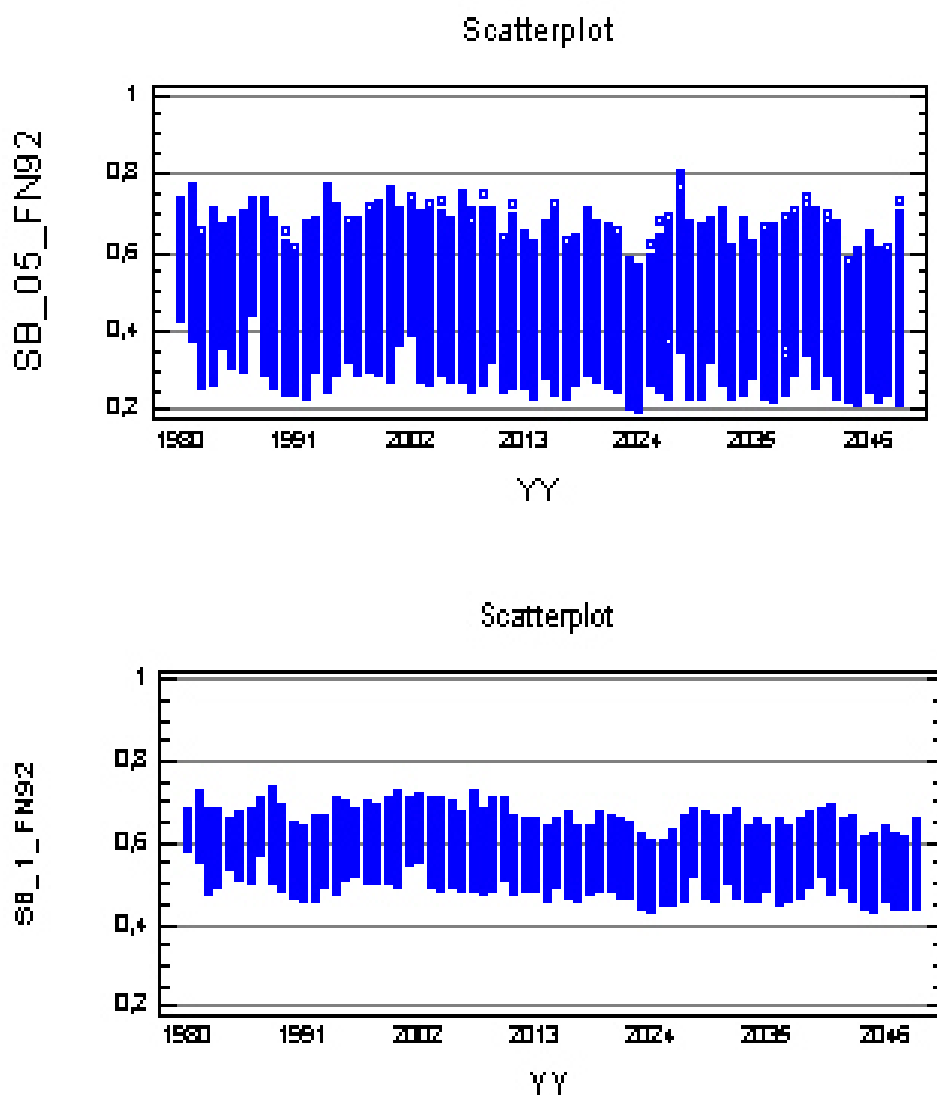


Abbildung 53: Bodenwassergehalte (Anteil (1/1) der nFK) in der Wurzelzone und der gesamten ungesättigten Zone 1980–2050

Die Bodenwassergehalte sind in der Wurzelzone im Schnitt rd. 10 % niedriger als in der gesamten ungesättigten Zone. Ihre Schwankungsbreite ist in den oberflächennahen Bereichen deutlich höher als in den tieferen Bodenbereichen. In der Wurzelzone erreichen die Bodenwassergehalte Werte bis zu 80 % der nFK und können bis zu Werten von unter 20 % der nFK aufgebraucht werden. In der gesamten ungesättigten Bodenzone schwanken die Bodenwassergehalte lediglich zwischen rd. 45-65 % nFK.

Die Jahresmittel der Bodenwassergehalte im Parthegebiet sind für die beiden genannten Bodenbereiche in der Abbildung 54 dargestellt (Wurzelzone: SB_05, ungesättigte Zone: SB_1).

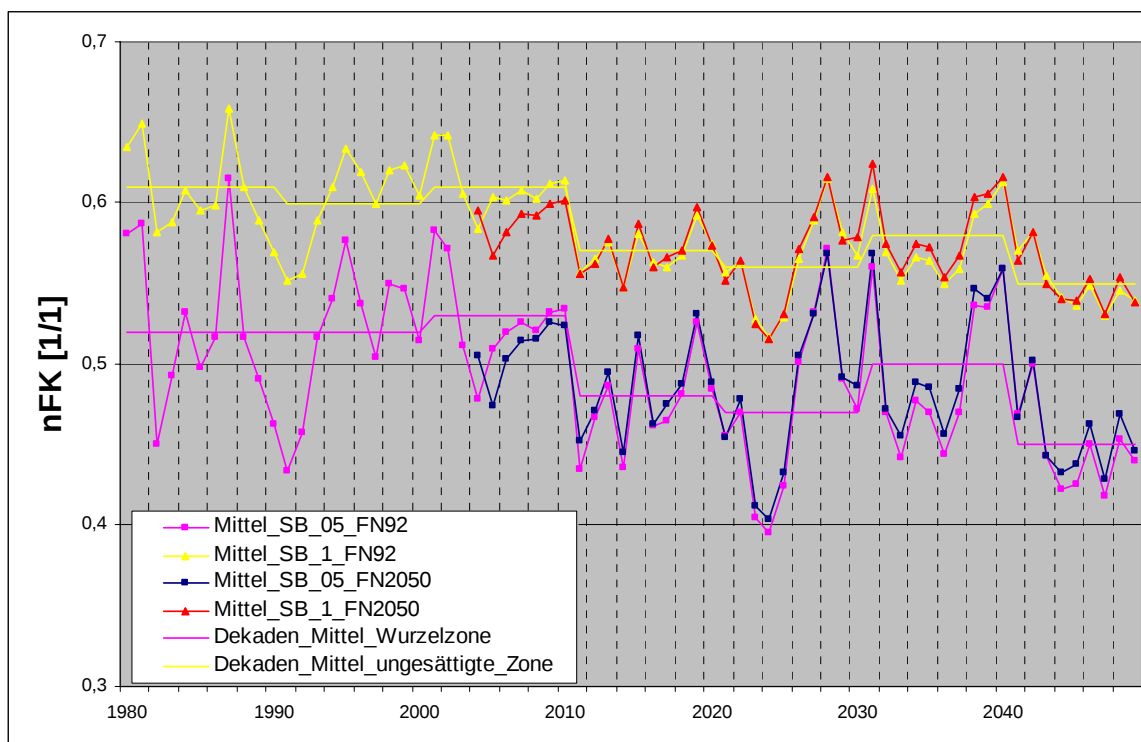


Abbildung 54: Jahresmittel der Bodenwassergehalte (Anteil (1/1) der nFK) in der Wurzelzone und der gesamten ungesättigten Zone 1980-2050

Für beide Bodenbereiche sind große Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren ersichtlich (gelbe und magentafarbene Linien). Der Trend abnehmender Bodenwassergehalte ist für beide Bereiche sehr deutlich ausgeprägt.

Auf der Abbildung 54 sind aber auch die Bodenwassergehalte für das Flächennutzungsszenario zum Stand 2050 (FN2050) dargestellt (dunkelblaue und rote Linien). Sie sind demselben Trend unterworfen und weisen im Schnitt um 1-2 % geringere Gehalte auf als im Flächennutzungsszenario FN92.

Somit ist einzuschätzen, dass die geänderte Flächennutzung FN2050 im Vergleich zur Flächennutzung FN1992 bei der Betrachtung des gesamten UG keinen bzw. sehr wenig Einfluss auf die mittleren Bodenwassergehalte aufweist. Für das gesamte UG scheinen sich die Auswirkungen von erhöhter Flächenversiegelung, Waldmehrung mit veränderten Bestandeszieltypen und geänderter Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen (bodenkonservierende Bearbeitung einerseits und deutliche Erhöhung der Maisanbaufläche andererseits) auf die durchschnittliche Bodenfeuchtigkeit aufzuheben.

Die Monatsmittel der Bodenwassergehalte im Gesamtgebiet zeigt die Abbildung 55.

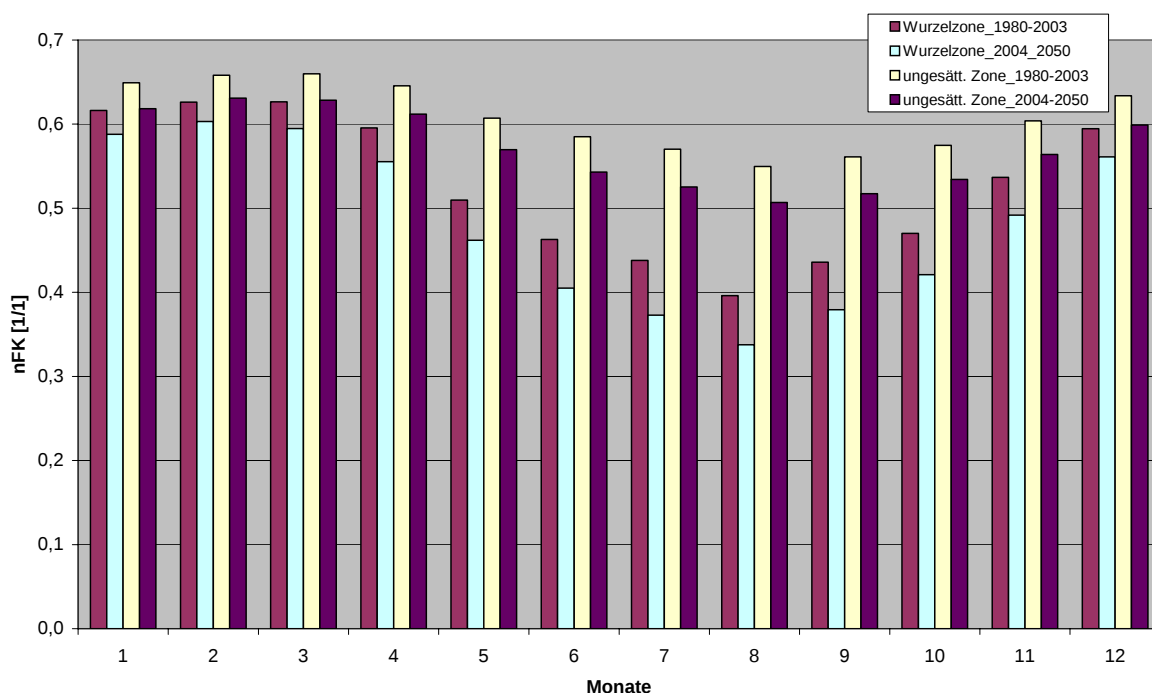


Abbildung 55: Monatsmittel der Bodenwassergehalte (Anteil (1/1) der nFK)

Die Bodenwassergehalte weisen einen deutlichen Jahresgang auf, der die Niederschlagsituation und die realen Evapotranspirationshöhen widerspiegelt.

In der Wurzelzone sind die Unterschiede der Bodenwassergehalte zwischen Mess- und Prognosezeitraum im Sommer größer als in den Wintermonaten. Das trifft im gleichen Maße auf die Gehalte in der gesamten ungesättigten Zone zu.

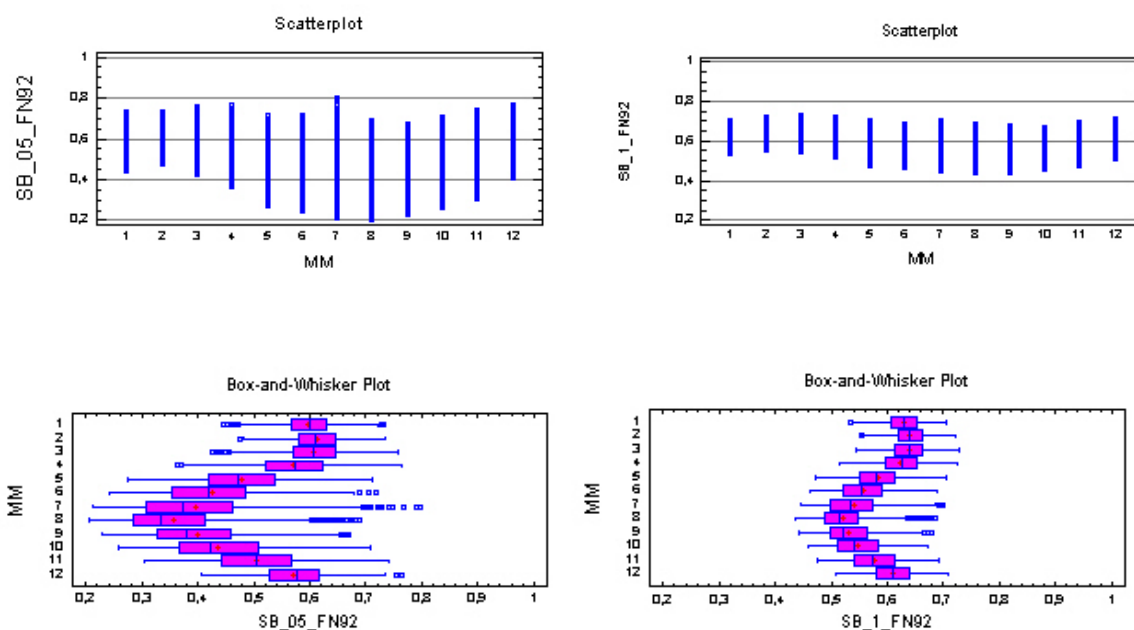


Abbildung 56: Monatliche Schwankungsbreiten der Bodenwassergehalte (Anteil (1/1) der nFK)

Die Schwankungsbreiten der Bodenwassergehalte, aufgeschlüsselt auf die Monate (in den obigen Diagrammen mit "MM" dargestellt) und gültig für das Flächennutzungsszenario FN92, sind in den Bildern der Abbildung 56 dargestellt. Es ist wiederum zu erkennen, dass in der Wurzelzone (SB_05) die Gehaltsschwankungen deutlich größer sind und die Wasservorräte deutlich mehr in Anspruch genommen werden (bis zu 20 % nFK) als im Schnitt der gesamten ungesättigten Zone (SB_1). Dabei treten in der Wurzelzone in den Sommermonaten bei im Mittel von 36-40 % nFK auch mittlere Gehalte bis zu 80 % nFK auf.

Tabelle 31: Bodenfeuchtigkeit in der Wurzelzone, nFK [1/1]

																unges
		Bodenfeuchtigkeit in der Wurzelzone, nFK [1/1]														Zone
	Monate	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	Jahr	
1980 - 2050	min	0,44	0,48	0,43	0,36	0,27	0,24	0,21	0,21	0,23	0,26	0,30	0,41			
	Mittel	0,60	0,61	0,61	0,57	0,48	0,42	0,39	0,36	0,40	0,44	0,51	0,57	0,50	0,58	
	max	0,73	0,73	0,76	0,77	0,71	0,72	0,80	0,69	0,67	0,71	0,74	0,77			
1980 - 2003	min	0,49	0,50	0,50	0,40	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,26	0,30	0,42			
	Mittel	0,62	0,63	0,63	0,60	0,51	0,46	0,44	0,40	0,44	0,47	0,54	0,59	0,52	0,61	
	max	0,73	0,73	0,76	0,77	0,71	0,67	0,73	0,69	0,67	0,71	0,73	0,77			
2004 - 2050	min	0,44	0,48	0,43	0,36	0,27	0,24	0,21	0,21	0,23	0,27	0,30	0,41			
	Mittel	0,59	0,60	0,59	0,56	0,46	0,40	0,37	0,34	0,38	0,42	0,49	0,56	0,48	0,57	
	max	0,73	0,73	0,75	0,75	0,69	0,72	0,80	0,68	0,64	0,65	0,74	0,70			
FN2050	min	0,45	0,49	0,43	0,36	0,26	0,23	0,21	0,20	0,22	0,25	0,30	0,42			
	Mittel	0,60	0,62	0,61	0,56	0,46	0,40	0,37	0,33	0,38	0,43	0,50	0,57	0,48	0,57	
	max	0,74	0,72	0,78	0,73	0,68	0,70	0,77	0,67	0,65	0,64	0,72	0,69			
1980 - 1990	min	0,49	0,50	0,50	0,46	0,30	0,30	0,27	0,25	0,26	0,27	0,35	0,42			
	Mittel	0,62	0,62	0,62	0,59	0,52	0,47	0,42	0,41	0,43	0,46	0,52	0,59	0,52	0,61	
	max	0,62	0,62	0,62	0,59	0,52	0,47	0,42	0,41	0,43	0,46	0,52	0,59			
1991 - 2000	min	0,51	0,54	0,50	0,40	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,26	0,30	0,42			
	Mittel	0,61	0,62	0,63	0,59	0,49	0,44	0,43	0,37	0,44	0,47	0,55	0,59	0,52	0,60	
	max	0,69	0,72	0,76	0,77	0,66	0,67	0,65	0,57	0,67	0,68	0,72	0,68			
2001 - 2010	min	0,53	0,56	0,57	0,47	0,38	0,31	0,28	0,25	0,30	0,29	0,38	0,45			
	Mittel	0,62	0,64	0,66	0,62	0,54	0,46	0,44	0,37	0,42	0,46	0,52	0,60	0,53	0,61	
	max	0,73	0,73	0,75	0,75	0,69	0,65	0,73	0,58	0,61	0,64	0,67	0,70			
FN2050	min	0,50	0,56	0,55	0,44	0,36	0,30	0,26	0,23	0,28	0,30	0,40	0,44			
	Mittel	0,61	0,64	0,65	0,61	0,52	0,43	0,39	0,34	0,41	0,43	0,51	0,58	0,51	0,59	
	max	0,74	0,72	0,78	0,73	0,68	0,64	0,65	0,50	0,60	0,57	0,62	0,69			
2011 - 2020	min	0,52	0,54	0,51	0,46	0,34	0,28	0,25	0,24	0,27	0,28	0,30	0,46			
	Mittel	0,59	0,60	0,60	0,57	0,47	0,43	0,39	0,31	0,35	0,39	0,47	0,56	0,48	0,57	
	max	0,72	0,73	0,67	0,71	0,64	0,63	0,65	0,49	0,49	0,61	0,60	0,67			
FN2050	min	0,53	0,56	0,53	0,45	0,33	0,26	0,24	0,22	0,26	0,26	0,30	0,47			
	Mittel	0,60	0,62	0,61	0,57	0,47	0,43	0,39	0,30	0,36	0,39	0,48	0,57	0,48	0,57	
	max	0,71	0,71	0,67	0,70	0,64	0,64	0,66	0,51	0,51	0,62	0,61	0,66			
2021 - 2030	min	0,46	0,48	0,43	0,38	0,27	0,24	0,21	0,21	0,25	0,27	0,36	0,45			
	Mittel	0,58	0,59	0,58	0,53	0,43	0,38	0,34	0,35	0,38	0,44	0,50	0,56	0,47	0,56	
	max	0,67	0,69	0,69	0,70	0,59	0,72	0,80	0,68	0,63	0,65	0,67	0,67			
FN2050	min	0,48	0,49	0,43	0,38	0,26	0,23	0,21	0,20	0,25	0,25	0,36	0,46			
	Mittel	0,59	0,61	0,59	0,53	0,42	0,37	0,34	0,35	0,39	0,45	0,51	0,57	0,48	0,56	
	max	0,68	0,69	0,69	0,69	0,59	0,70	0,77	0,67	0,62	0,64	0,66	0,66			
2031 - 2040	min	0,48	0,53	0,49	0,40	0,30	0,27	0,24	0,23	0,26	0,27	0,37	0,45			
	Mittel	0,60	0,61	0,60	0,56	0,45	0,42	0,39	0,38	0,41	0,44	0,53	0,58	0,50	0,58	
	max	0,68	0,69	0,71	0,69	0,68	0,62	0,72	0,67	0,64	0,63	0,74	0,69			
FN2050	min	0,51	0,56	0,49	0,39	0,29	0,27	0,24	0,23	0,26	0,27	0,39	0,48			
	Mittel	0,61	0,62	0,61	0,56	0,45	0,42	0,39	0,39	0,42	0,45	0,55	0,60	0,51	0,58	
	max	0,69	0,69	0,71	0,70	0,68	0,63	0,70	0,67	0,65	0,63	0,72	0,69			
2041 - 2050	min	0,44	0,48	0,45	0,36	0,31	0,25	0,24	0,22	0,23	0,27	0,37	0,41			
	Mittel	0,57	0,59	0,57	0,52	0,44	0,35	0,35	0,30	0,34	0,39	0,44	0,51	0,45	0,55	
	max	0,71	0,73	0,71	0,63	0,58	0,56	0,70	0,51	0,48	0,52	0,58	0,65			
FN2050	min	0,45	0,50	0,46	0,36	0,30	0,25	0,24	0,21	0,22	0,27	0,39	0,42			
	Mittel	0,59	0,60	0,58	0,53	0,44	0,35	0,34	0,30	0,35	0,40	0,46	0,53	0,45	0,55	
	max	0,70	0,72	0,70	0,64	0,58	0,58	0,68	0,52	0,51	0,55	0,60	0,65			

Eine zusammenfassende Darstellung der monatlichen mittleren Bodenwassergehalte in der Wurzelzone, inklusive der Werte für das Flächennutzungsszenario FN2050 und aufgeschlüsselt auf den Gesamtzeitraum, den Mess- und Prognosezeitraum und die einzelnen Dekaden, zeigt die Tabelle 31. Jahresmittel sind auch für die gesamte ungesättigte Zone enthalten.

Die folgende Tabelle 32 enthält neben den Gesamtmittelwerten der Bodenwassergehalte die jeweils höchsten bzw. niedrigsten simulierten Bodenwassergehalte als Tagesmittelwerte.

Tabelle 32: Gesamtmittelwerte und Tagesminima und -maxima Bodenwassergehalte

		FN-Szenario	[1/1 nFK]	
			Wurzelzone	ungesättigte Zone
Gesamtmittelwerte		FN92	0,50	0,58
		FN2050	0,48	0,57
Tageswerte	Min.	FN92	0,09	0,28
		FN2050	0,09	0,29
	Max.	FN92	0,98	0,93
		FN2050	1,00	0,99

Die Tageswerte zeigen, dass in der Wurzelzone sowohl Tage mit Bodenwassergehalten am **PWP**, aber auch bei 100 % nFK simuliert werden. In der gesamten ungesättigten Zone werden bis 99 % nFK erreicht, bei der Ausschöpfung aber im Tagesmittel nur 28-29 % nFK.

Unterschiede zwischen den beiden Flächennutzungsszenarios bestehen praktisch nicht.

Griddarstellungen sind von WaSiM-ETH im gegebenen Falle leider nicht richtig ausgegeben worden (alle Werte gleich 1). Deshalb sind Bezüge zur Geologie (ungesättigte Zone) sowie flächenkonkrete Bezüge zu den Flächennutzungen nicht herstellbar.

8.4 Abflüsse

8.4.1 Oberflächenwasser

Die Abflüsse am Pegel Thekla sind in der folgenden Tabelle 33 zusammengestellt.

Tabelle 33: Hauptzahlen Durchflüsse Pegel Thekla, FN92

	[m³/s]	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Som	Jahr
1980 bis 2050	NQ	0,053	0,073	0,085	0,039	0,003	0,006	0,005	0,004	0,004	0,003	0,008	0,023	1,042	0,391	0,715
	MNQ	0,547	0,680	0,666	0,472	0,248	0,186	0,215	0,130	0,150	0,165	0,225	0,378			
	MQ	1,140	1,255	1,384	0,965	0,422	0,407	0,653	0,393	0,242	0,230	0,463	1,047			
	MHQ	2,339	2,553	3,316	2,198	1,155	1,368	1,961	1,206	0,719	0,683	1,100	2,254			
	HQ	7,380	10,407	10,595	13,000	11,500	13,521	23,183	10,688	5,869	3,255	6,880	10,070			
1980 bis 1997	NQ	0,220	0,360	0,300	0,300	0,130	0,220	0,170	0,110	0,180	0,180	0,140	0,200	1,266	0,700	0,981
	MNQ	0,647	0,742	0,860	0,772	0,604	0,541	0,424	0,371	0,403	0,422	0,482	0,550			
	MQ	1,185	1,391	1,720	1,481	0,975	0,797	0,667	0,583	0,592	0,586	0,712	1,105			
	MHQ	2,584	2,928	3,899	3,591	2,214	1,459	1,237	1,202	1,057	0,938	1,225	2,641			
	HQ	7,380	9,680	17,700	13,000	11,500	4,310	3,110	6,650	3,030	2,370	4,780	8,300			
1998 bis 2050	NQ	0,053	0,073	0,085	0,039	0,003	0,006	0,005	0,004	0,004	0,003	0,008	0,023	0,996	0,376	0,683
	MNQ	0,516	0,658	0,599	0,368	0,124	0,063	0,143	0,047	0,063	0,076	0,136	0,318			
	MQ	1,093	1,288	1,395	0,833	0,327	0,377	0,743	0,368	0,225	0,212	0,404	0,972			
	MHQ	2,246	2,424	3,114	1,716	0,788	1,337	2,211	1,207	0,602	0,594	1,057	2,120			
	HQ	5,677	10,407	10,595	8,072	4,582	13,521	23,183	10,688	5,869	3,255	6,880	10,070			

Fortsetzung Tabelle 33

	[m³/s]	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Som	Jahr
1980 bis 1990	NQ	0,320	0,360	0,400	0,360	0,400	0,320	0,180	0,180	0,180	0,180	0,140	0,280	1,419	0,769	1,092
	MNQ	0,759	0,834	1,023	0,807	0,684	0,592	0,523	0,458	0,455	0,463	0,534	0,629			
	MQ	1,386	1,638	1,931	1,474	1,117	0,828	0,695	0,700	0,620	0,654	0,777	1,311			
	MHQ	3,058	3,599	4,378	3,502	2,771	1,480	1,030	1,421	1,054	1,007	1,389	3,215			
	HQ	7,380	9,680	17,700	11,300	11,500	4,310	2,620	6,650	3,030	2,230	4,780	8,300			
1991 bis 1997	NQ	0,220	0,360	0,300	0,300	0,130	0,220	0,170	0,110	0,200	0,200	0,200	0,200	1,024	0,591	0,806
	MNQ	0,471	0,599	0,604	0,716	0,480	0,461	0,269	0,234	0,320	0,359	0,401	0,426			
	MQ	0,845	0,986	1,302	1,384	0,735	0,744	0,595	0,389	0,539	0,479	0,586	0,742			
	MHQ	1,840	1,874	3,146	3,731	1,339	1,426	1,561	0,857	1,063	0,830	0,967	1,740			
	HQ	4,000	3,700	13,000	13,000	2,430	4,230	3,110	1,360	2,830	2,370	2,900	3,850			
1998 bis 2010	NQ	0,158	0,299	0,334	0,133	0,063	0,020	0,012	0,006	0,011	0,011	0,012	0,035	1,379	0,426	0,894
	MNQ	0,600	0,914	1,079	0,642	0,226	0,099	0,170	0,061	0,055	0,134	0,191	0,387			
	MQ	1,176	1,644	2,289	1,352	0,476	0,318	0,924	0,170	0,324	0,269	0,589	1,052			
	MHQ	2,493	2,750	4,679	2,518	0,904	1,269	2,995	0,434	0,998	0,675	1,382	2,337			
	HQ	5,677	5,117	10,595	8,072	2,643	8,155	12,505	0,864	5,869	3,255	6,880	4,806			
2011 bis 2020	NQ	0,200	0,183	0,156	0,139	0,026	0,013	0,009	0,005	0,008	0,003	0,008	0,056	0,798	0,225	0,507
	MNQ	0,516	0,554	0,455	0,325	0,113	0,075	0,080	0,021	0,018	0,025	0,084	0,200			
	MQ	0,988	1,030	0,984	0,777	0,317	0,465	0,346	0,074	0,049	0,103	0,196	0,833			
	MHQ	1,968	2,137	2,373	1,668	0,721	1,335	0,755	0,202	0,105	0,347	0,417	1,831			
	HQ	5,419	6,054	5,996	5,664	2,941	7,195	3,734	0,539	0,172	1,774	1,357	3,563			
2021 bis 2030	NQ	0,095	0,073	0,087	0,039	0,003	0,006	0,005	0,004	0,004	0,003	0,011	0,046	0,808	0,507	0,656
	MNQ	0,412	0,618	0,434	0,246	0,053	0,028	0,242	0,050	0,097	0,078	0,145	0,253			
	MQ	0,968	1,142	0,889	0,565	0,187	0,624	0,969	0,760	0,257	0,242	0,460	0,834			
	MHQ	2,015	2,092	1,645	1,369	0,531	2,461	2,694	2,567	0,679	0,674	1,311	1,772			
	HQ	3,036	4,067	3,746	3,951	1,531	13,521	23,183	10,688	3,238	2,060	4,101	3,969			
2031 bis 2040	NQ	0,126	0,223	0,085	0,062	0,014	0,015	0,010	0,007	0,008	0,006	0,016	0,061	1,112	0,462	0,784
	MNQ	0,483	0,602	0,475	0,336	0,125	0,064	0,066	0,066	0,119	0,089	0,175	0,545			
	MQ	1,210	1,234	1,397	0,828	0,356	0,335	0,650	0,755	0,344	0,320	0,523	1,460			
	MHQ	2,589	2,424	3,631	1,724	0,978	1,151	2,114	2,643	0,755	0,926	1,562	3,100			
	HQ	3,930	3,608	8,853	4,040	4,582	4,432	12,624	9,650	2,883	2,690	5,883	10,070			
2041 bis 2050	NQ	0,053	0,177	0,105	0,048	0,023	0,014	0,008	0,007	0,004	0,007	0,017	0,023	0,751	0,231	0,489
	MNQ	0,531	0,488	0,329	0,162	0,059	0,032	0,132	0,032	0,017	0,019	0,046	0,131			
	MQ	1,049	1,292	1,002	0,412	0,229	0,111	0,757	0,127	0,080	0,074	0,116	0,651			
	MHQ	1,925	2,607	2,440	0,923	0,736	0,273	2,301	0,382	0,233	0,240	0,317	1,478			
	HQ	3,938	10,407	5,318	1,919	3,855	0,976	15,973	1,450	0,958	0,777	0,776	2,979			

Als Grundlage für die Tabelle dienten Messwerte bis zum Jahre 1997 und die mit WaSiM-ETH simulierten Werte ab 1998.

Im Vergleich zwischen Mess- und Prognosezeitraum werden für den Letzteren in allen Monaten geringere bis deutlich geringere MQ und MHQ berechnet; eine Ausnahme bildet der Juli mit im Mittel etwas höherem MQ (MQ 0,667 m³/s gegenüber MQ 0,743 m³/s und MHQ 1,237 m³/s zu MHQ 2,211 m³/s). Beim HQ sind die Verhältnisse stark differenziert: im Messzeitraum werden in den Monaten März bis Mai höhere HQ beobachtet, in den anderen niedrigere.

Die Vergleiche der Niedrigwasserabflüsse gestalten sich schwieriger, da WaSiM-ETH meist viel zu geringe Trockenwetterabflüsse simuliert und sich deshalb viel kleinere Werte ergeben. Aus diesem Grunde sind in allen Monaten des Messzeitraumes die MNQ und NQ deutlich geringer als im Prognosezeitraum.

Im Vergleich der beiden Dekaden 1981-1990 und 2041-2050 zeigt sich darüber hinaus eine gewisse zeitliche Verschiebung der Abflussspitzen (Abbildung 57, Abbildung 58). MHQ und HQ hatten das erste Mal im Jahr im März Spitzenwerte und danach wieder im August. Im Prognosezeitraum verschiebt sich das Frühjahrshochwasser in den Februar und im Sommer treten die größten Spitzen im Juli auf.

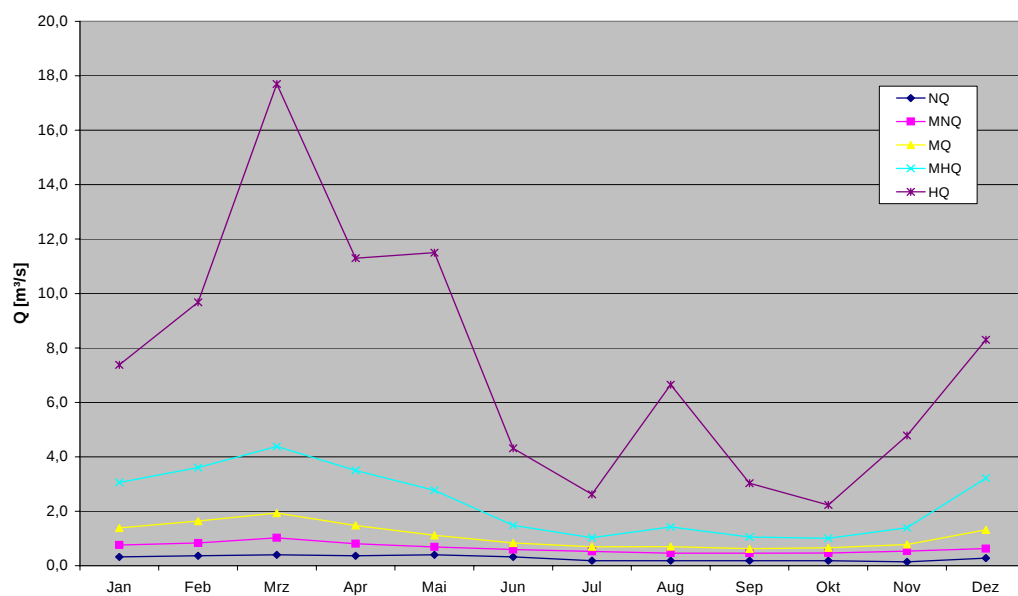


Abbildung 57: Hauptzahlen Durchflüsse Pegel Thekla, 1980-1990, FN92

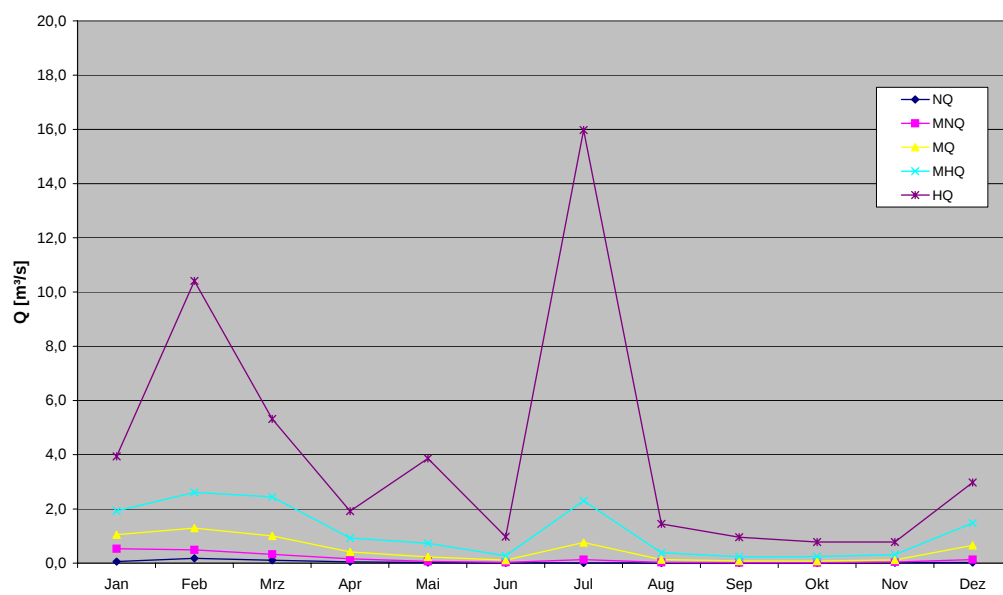


Abbildung 58: Hauptzahlen Durchflüsse Pegel Thekla, 2041-2050, FN92

Unter Berücksichtigung des Flächennutzungsszenarios FN2050 ergeben sich auf der Grundlage der gekoppelten WaSiM-ETH-Modellierung folgende Durchflüsse am Pegel Thekla (Tabelle 34).

Tabelle 34: Hauptzahlen Durchflüsse Pegel Thekla, FN2050

	[m³/s]	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Som	Jahr
2004	NQ	0,150	0,091	0,128	0,084	0,040	0,028	0,028	0,035	0,045	0,014	0,044	0,108	1,173	0,487	0,828
bis	MNQ	0,618	0,728	0,590	0,419	0,170	0,099	0,179	0,130	0,146	0,105	0,181	0,468			
2049	MQ	1,353	1,599	1,470	0,928	0,411	0,503	0,824	0,581	0,323	0,267	0,455	1,335			
	MHQ	2,861	2,986	3,435	2,006	1,082	1,901	2,643	1,891	0,755	0,762	1,194	2,817			
	HQ	7,420	13,54	10,67	9,409	6,337	18,14	29,50	15,45	4,057	3,756	7,613	12,297			
2004	NQ	0,150	0,332	0,359	0,173	0,143	0,054	0,043	0,052	0,061	0,044	0,060	0,138	1,423	0,393	0,904
bis	MNQ	0,672	0,965	1,107	0,702	0,279	0,096	0,143	0,081	0,131	0,075	0,137	0,437			
2010	MQ	1,372	1,593	2,311	1,524	0,636	0,311	0,618	0,187	0,422	0,181	0,396	1,324			
	MHQ	3,455	2,783	4,947	3,097	1,361	2,117	2,381	0,467	1,289	0,635	1,037	3,143			
	HQ	6,837	5,366	10,67	9,409	3,018	11,54	12,87	0,787	3,228	1,830	2,937	6,070			
2011	NQ	0,244	0,193	0,198	0,192	0,072	0,046	0,030	0,035	0,059	0,014	0,065	0,213	1,082	0,329	0,702
bis	MNQ	0,620	0,632	0,518	0,422	0,163	0,115	0,120	0,085	0,097	0,071	0,149	0,401			
2020	MQ	1,286	1,378	1,272	1,009	0,396	0,633	0,475	0,153	0,144	0,177	0,304	1,236			
	MHQ	2,716	3,060	3,357	2,271	0,933	1,894	1,124	0,325	0,226	0,519	0,580	2,573			
	HQ	7,420	8,273	7,866	7,512	3,230	10,01	5,364	0,982	0,341	2,583	1,892	5,013			
2021	NQ	0,150	0,091	0,132	0,084	0,040	0,028	0,028	0,055	0,045	0,034	0,056	0,193	1,036	0,640	0,835
bis	MNQ	0,530	0,760	0,477	0,340	0,113	0,088	0,273	0,165	0,172	0,141	0,218	0,409			
2030	MQ	1,262	1,463	1,027	0,721	0,274	0,863	1,142	1,097	0,360	0,353	0,631	1,176			
	MHQ	2,623	2,755	1,940	1,699	0,741	3,396	3,521	3,678	0,892	0,939	1,744	2,442			
	HQ	4,075	5,116	4,540	5,211	2,358	18,14	29,50	15,45	4,057	2,698	5,598	5,244			
2031	NQ	0,224	0,292	0,155	0,110	0,050	0,060	0,042	0,058	0,048	0,037	0,070	0,203	1,390	0,664	1,030
bis	MNQ	0,619	0,712	0,591	0,440	0,208	0,121	0,120	0,200	0,224	0,155	0,275	0,771			
2040	MQ	1,498	1,479	1,661	1,007	0,506	0,476	0,885	1,137	0,514	0,457	0,730	1,931			
	MHQ	3,118	2,891	4,245	1,979	1,394	1,581	2,954	3,859	1,082	1,262	2,045	3,957			
	HQ	4,601	4,566	10,06	4,178	6,337	6,402	17,76	13,88	3,712	3,756	7,613	12,297			
2041	NQ	0,162	0,220	0,128	0,147	0,064	0,037	0,029	0,049	0,046	0,027	0,044	0,108	0,996	0,352	0,671
bis	MNQ	0,671	0,630	0,394	0,258	0,110	0,071	0,234	0,100	0,094	0,069	0,104	0,295			
2049	MQ	1,352	2,080	1,329	0,558	0,310	0,176	0,940	0,214	0,207	0,143	0,194	1,032			
	MHQ	2,538	3,422	3,108	1,236	1,063	0,437	3,216	0,568	0,410	0,378	0,445	1,985			
	HQ	4,910	13,54	7,013	2,725	5,540	1,406	22,18	1,853	1,476	1,104	1,108	4,106			

Im Vergleich zum Flächennutzungsszenario FN92 ergeben sich in allen Monaten höhere MQ, MHQ und HQ (im Schnitt um jeweils 51 %, 38 % bzw. 43 %) (Abbildung 59).

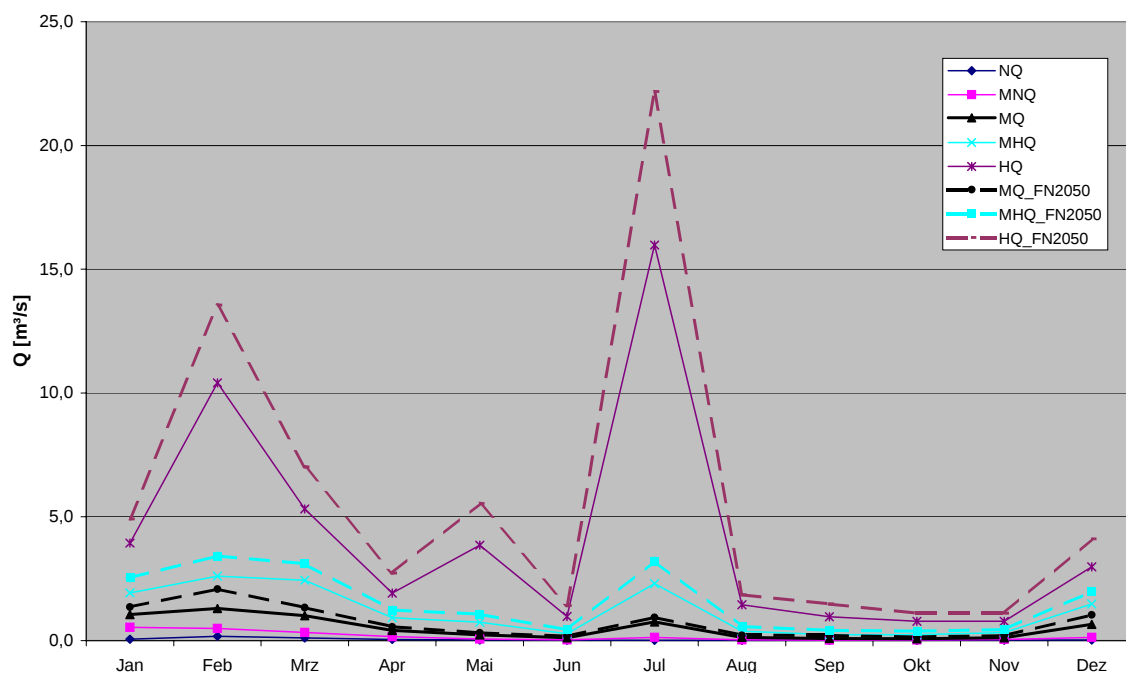


Abbildung 59: Hauptzahlen Durchflüsse Pegel Thekla 2041-2050, FN92 und FN2050

Beim MNQ und NQ sind zum FN2050 ebenfalls die Werte der Durchflüsse in allen Monaten deutlich höher als im FN92 (48 %, 290 %). Die deutlich höheren NQ sind dem knapp 1 m höheren Grundwasserspiegel geschuldet, den WaSiM-ETH ab ca. 2030 prognostiziert. Deshalb kann mehr Basisabfluss realisiert werden, was sich deutlich auf die Trockenwetterabflüsse im Vorfluter auswirken wird.

8.4.2 Landoberflächenabfluss, Interflow und Basisabfluss

Die Werte des Direktabflusses (Q_{dir}), des Interflows (Q_{in}) und des Basisabflusses (Q_{bas}) sind als Mittelwert für das gesamte Untersuchungsgebiet und das Flächennutzungsszenario **FN92** in Tabelle 35 bis Tabelle 37 zusammengestellt (Monatssummen bzw. Jahressumme in mm/Einzugsgebiet):

Tabelle 35: Direktabfluss im Parthe-Einzugsgebiet, FN92

	[mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1980-2050	5,342	5,162	5,884	3,043	1,129	2,322	3,665	2,486	1,185	1,161	2,507	5,946	39,8
1980-2003	5,612	5,418	7,159	4,441	1,454	2,281	3,877	2,350	1,833	1,530	3,884	6,589	46,4
2004-2050	5,204	5,028	5,220	2,314	0,960	2,343	3,555	2,557	0,847	0,969	1,788	5,610	36,4
1980-1990	6,951	4,522	5,246	5,143	1,850	1,964	1,050	4,035	0,791	1,559	3,369	6,691	42,9
1991-2000	4,846	5,975	8,379	4,058	1,309	2,930	4,035	0,972	3,302	1,483	4,045	6,251	47,6
2001-2010	5,190	5,792	9,678	3,701	0,923	1,613	5,509	0,474	1,339	0,753	2,692	6,481	44,0
2011-2020	4,377	4,322	3,942	2,748	0,648	2,919	1,847	0,359	0,259	0,783	0,862	5,469	28,6
2021-2030	4,780	4,828	2,854	1,745	0,483	4,416	4,701	5,408	0,650	1,301	2,423	4,496	38,1
2031-2040	5,993	4,736	7,238	2,344	1,590	1,721	4,116	5,341	1,452	1,725	3,389	7,835	47,5
2041-2050	5,232	6,123	3,699	1,166	1,019	0,548	4,771	0,453	0,473	0,412	0,480	4,141	28,5

Tabelle 36: Interflow im Parthe-Einzugsgebiet, FN92

	[mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1980-2049	4,586	4,687	5,857	4,691	2,435	1,955	2,985	1,685	1,188	1,283	2,030	3,945	37,3
1980-2003	5,814	5,599	7,598	6,740	3,879	2,665	3,321	2,323	1,859	2,162	3,455	5,494	50,9
2004-2049	3,958	4,212	4,948	3,622	1,681	1,584	2,810	1,353	0,838	0,824	1,287	3,137	30,2
1980-1990	6,921	5,925	7,176	7,018	5,016	2,688	1,973	3,310	1,401	2,142	3,454	6,439	53,3
1991-2000	4,768	5,115	7,956	6,425	2,925	2,762	2,985	1,168	2,319	1,976	3,527	4,256	46,2
2001-2010	5,428	6,415	8,857	7,455	3,343	1,720	4,252	1,137	1,147	1,343	1,640	4,194	46,8
2011-2020	3,883	3,528	3,981	3,442	1,830	2,324	1,795	0,369	0,225	0,565	1,021	2,854	25,8
2021-2030	3,337	3,812	3,876	2,474	0,930	1,954	4,376	2,320	1,330	1,156	1,749	2,887	30,2
2031-2040	4,062	3,928	4,675	3,554	1,562	1,566	2,835	2,597	1,499	1,247	1,917	4,578	34,0
2041-2050	3,697	3,885	4,176	1,962	1,039	0,445	2,755	0,627	0,285	0,373	0,621	1,956	21,8

Tabelle 37: Basisabfluss im Parthe-Einzugsgebiet, FN92

	[mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1980-2050	1,731	1,710	1,864	1,519	1,045	0,739	0,686	0,529	0,521	0,595	0,900	1,565	13,4
1980-2003	1,847	1,822	2,067	1,729	1,398	1,123	1,016	0,849	0,867	0,937	1,237	1,798	16,7
2004-2050	1,672	1,652	1,759	1,409	0,861	0,538	0,514	0,363	0,340	0,417	0,724	1,443	11,7
1980-1990	1,732	1,656	1,815	1,680	1,534	1,223	0,799	0,915	0,719	0,842	1,050	1,645	15,6
1991-2000	1,921	1,928	2,193	1,748	1,232	1,022	1,084	0,641	0,980	0,944	1,297	1,783	16,8
2001-2010	1,762	1,809	2,223	1,738	1,391	0,842	0,834	0,532	0,530	0,587	0,905	1,700	14,8
2011-2020	1,545	1,574	1,745	1,499	0,856	0,758	0,633	0,209	0,057	0,188	0,531	1,394	11,0
2021-2030	1,709	1,646	1,653	1,241	0,643	0,384	0,395	0,429	0,513	0,604	0,948	1,526	11,7
2031-2040	1,869	1,743	1,769	1,477	0,926	0,603	0,688	0,673	0,659	0,777	1,174	1,804	14,2
2041-2050	1,567	1,614	1,633	1,200	0,643	0,238	0,318	0,239	0,128	0,155	0,319	1,042	9,1

Stellvertretend auch für die anderen Abflussarten zeigen die Bilder der Abbildung 60 die Unterschiede zwischen den Basisabflüssen der Dekaden 1991-2000 und 2040-2050. Während sich die Verhältnisse in den Wintermonaten nicht grundlegend unterscheiden, werden zum Ende der Prognoseperiode in den Sommermonaten deutlich weniger Abflüsse realisiert, zusätzlich ist in dieser Zeit eine deutlich größere Streubreite der Werte abzulesen.

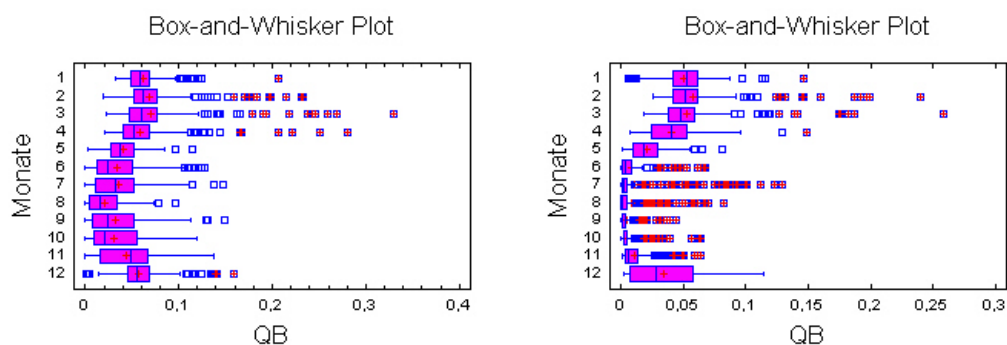


Abbildung 60: Basisabfluss, FN92, 1991-2000 und 2041-2050

Die Werte Q_{dir} , Q_{iff} und Q_{bas} sind als Mittelwerte für das gesamte Untersuchungsgebiet und das Flächennutzungsszenario **FN2050** in den folgenden Tabelle 38 bis Tabelle 40 zusammengestellt.

Tabelle 38: Direktabfluss im Parthe-Einzugsgebiet, FN2050

FN2050	[mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
2004-2050	7,294	7,294	7,053	3,299	1,463	3,336	4,964	3,587	1,220	1,379	2,472	7,757	51,1
2004-2010	6,140	6,462	11,572	4,933	1,814	2,419	3,014	0,620	2,277	0,623	2,179	8,032	50,1
2011-2020	7,317	7,408	6,630	4,436	1,121	4,239	2,806	0,546	0,409	1,092	1,244	7,820	45,1
2021-2030	7,342	7,381	4,073	2,569	0,773	6,131	6,373	7,576	0,944	1,805	3,418	6,567	55,0
2031-2040	7,808	6,325	8,913	3,098	2,244	2,475	5,550	7,327	2,058	2,445	4,582	10,572	63,4
2041-2050	7,539	8,800	5,252	1,799	1,471	0,895	6,661	0,683	0,677	0,626	0,666	5,669	40,8

Tabelle 39: Interflow im Parthe-Einzugsgebiet, FN2050

FN2050	[mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
2004-2050	3,715	3,783	4,481	3,254	1,429	1,347	2,568	1,329	0,832	0,844	1,290	2,948	27,8
2004-2010	5,194	5,424	7,821	6,441	2,706	1,053	1,663	0,443	0,775	0,700	0,874	2,749	35,9
2011-2020	3,197	2,860	3,240	2,847	1,499	1,936	1,548	0,348	0,256	0,587	1,029	2,652	22,0
2021-2030	2,878	3,342	3,490	2,259	0,801	1,700	3,728	2,057	1,221	1,144	1,700	2,635	27,0
2031-2040	4,193	4,097	4,860	3,714	1,537	1,485	2,849	2,834	1,528	1,263	1,948	4,535	34,9
2041-2050	3,541	3,670	3,940	1,822	0,938	0,376	2,804	0,629	0,311	0,442	0,719	2,016	21,2

Tabelle 40: Basisabfluss im Parthe-Einzugsgebiet, FN2050

FN2050	[mm]												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
2004-2050	1,546	1,488	1,536	1,254	0,806	0,513	0,498	0,370	0,344	0,431	0,708	1,417	10,9
2004-2010	1,352	1,377	1,657	1,356	1,150	0,567	0,436	0,185	0,297	0,294	0,555	1,350	10,6
2011-2020	1,569	1,478	1,567	1,356	0,774	0,704	0,604	0,196	0,065	0,210	0,512	1,394	10,4
2021-2030	1,504	1,494	1,380	1,063	0,626	0,421	0,397	0,434	0,502	0,604	0,905	1,454	10,8
2031-2040	1,681	1,498	1,573	1,376	0,928	0,619	0,689	0,695	0,661	0,792	1,147	1,764	13,4
2041-2050	1,568	1,567	1,539	1,141	0,637	0,244	0,327	0,272	0,161	0,187	0,337	1,067	9,1

Die folgende synoptische Tabelle 41 zeigt, dass mit der Änderung der Flächennutzung eine Vergrößerung des Gesamtabflusses um rd. 15 % einhergeht, die nur durch den Oberflächenabfluss gesteuert ist. Die Summen an Q_{fl} und Q_{Bas} nehmen in FN2050 kleinere Werte an als in FN92.

Die Anteile zwischen den verschiedenen Abflusskomponenten verändern sich ebenfalls mit der Änderung der Flächennutzung von FN92 zu FN2050: der relative Anteil des Direktabflusses erhöht sich von rd. 47 % auf rd. 57 %, die relativen Anteile von Interflow und Basisabfluss verringern sich von 39 % auf 31 % bzw. von 15 % auf 12 %. Diese Verhältnisse sind sicherlich durch die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen begründet, die den Versiegelungsgrad der Gesamtfläche erhöhen.

Tabelle 41: Zusammenstellung der Abflusskomponenten im Parthe-Einzugsgebiet, FN92 und FN2050

		2004-2050		2011-2020		2031-2040		2041-2050	
		FN92	FN2050	FN92	FN2050	FN92	FN2050	FN92	FN2050
QDir	[mm]	36,4	51,1	28,6	45,1	47,5	63,4	28,5	40,8
Anteil a. Summe	[%]	46,5	56,9	43,7	58,2	49,6	56,8	48,0	57,4
Diff. Zw. FN	[%]		40,6		58,0		33,5		42,9
Qifl	[mm]	30,2	27,8	25,8	22,0	34,0	34,9	21,8	21,2
Anteil	[%]	38,6	31,0	39,5	28,4	35,6	31,2	36,7	29,9
Diff.	[%]		-7,9		-14,8		2,4		-2,8
QBas	[mm]	11,7	10,9	11,0	10,4	14,2	13,4	9,1	9,1
Anteil	[%]	14,9	12,1	16,8	13,5	14,8	12,0	15,3	12,7
Diff.	[%]		-6,5		-5,1		-5,2		-0,6
Summe	[mm]	78,3	89,9	65,4	77,6	95,7	111,7	59,5	71,1
Diff.	[%]		14,8		18,6		16,7		19,4
P _{korr}	[mm]			640		738		624	

Werden die einzelnen Abflusskomponenten auf die Flächennutzungsarten Landwirtschaft (Ackernutzung) und Siedlungsflächen aufgeschlüsselt, dann erhält man folgendes Bild (Tabelle 42, Abbildung 61). Der Direktabfluss von Landwirtschaftsflächen nimmt im Flächennutzungsszenario FN2050 im Verhältnis zu FN92 ab. Der Betrag erscheint unter Berücksichtigung der vorgenommenen Parameteränderungen in FN2050 ("konservierende Bodenbearbeitung") nicht groß, ist aber zu relativieren, wenn man die Unterschiede in der Ackerbelegung zwischen den beiden Szenarien kennt (z. B. erhöht sich der Anteil von Mais von FN92 zu FN2050 auf das Dreifache, wobei der Vegetationsbedeckungsgrad zu den Terminen d₁ und d₄ hier sehr viel geringer und demzufolge die Oberflächenabflussbereitschaft deutlich größer ist als bei anderen Kulturen).

Laut Tabelle 42 wird auf den Landwirtschaftsflächen ein negativer Basisabfluss realisiert. Er wäre mit einer Zehrung gleichzusetzen.

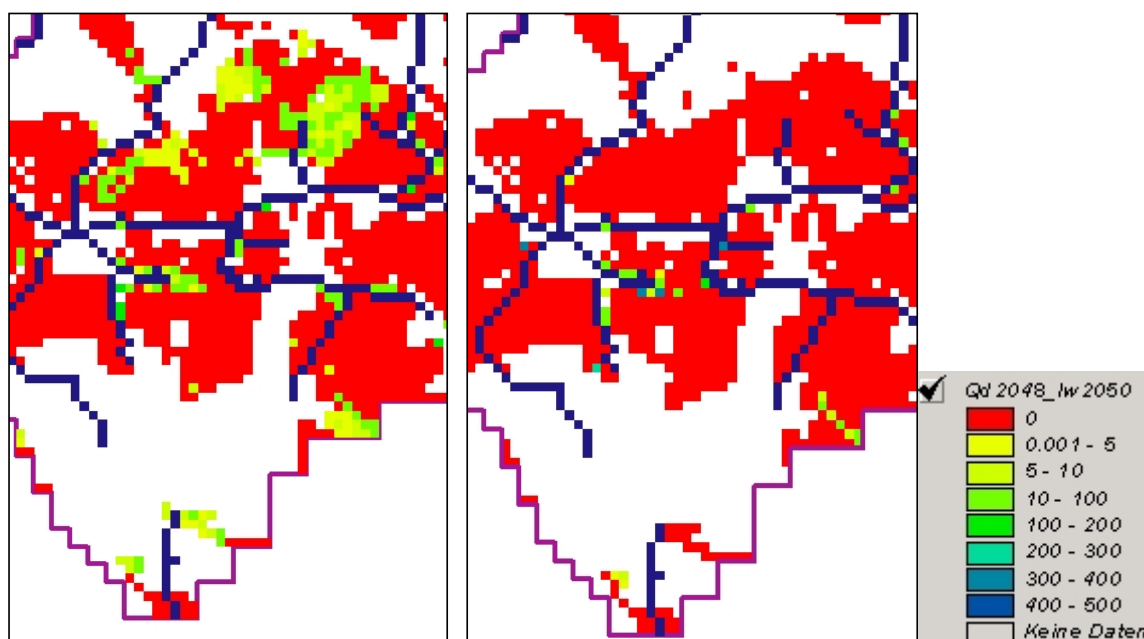
Die Siedlungsflächen weisen insgesamt einen reichlich 10mal höheren Direktabfluss auf als die Landwirtschaftsflächen. Mit der Flächennutzungsänderung von FN92 zu FN2050 geht eine insgesamt etwas geringere Direktabflusshöhe einher (rd. 4 %). Da die Parameter der Siedlungsflächen dabei nicht geändert worden sind, ist diese Größenordnung in den Fehlerbereich der Simulation einzuordnen.

Tabelle 42: Abflüsse auf Landwirtschafts- und Siedlungsflächen

2048		Landwirtschaft		Siedlungsflächen	
		FN92	FN2050	FN92	FN2050
QDir	[mm]	11,64	9,92	143,99	138,50
Anteil a. Summe	[%]	78,6	82,5	87,5	85,3
Diff. Zw. FN	[%]		-14,8		-3,8
Qifl	[mm]	8,92	6,41	9,98	12,20
Anteil	[%]	60,3	53,3	6,1	7,5
Diff.	[%]		-28,1		22,2
QBas	[mm]	-5,76	-4,30	10,58	11,60
Anteil	[%]	-38,9	-35,7	6,4	7,1
Diff.	[%]		-25,3		9,6
Summe	[mm]	14,80	12,03	164,55	162,30
Diff.	[%]		-18,7		-1,4

Auf der folgenden Abbildung 61 ist ein Ausschnitt aus dem Südwesten des UG mit den Gridwerten des Direktabflusses auf den Landwirtschaftsflächen dargestellt (Jahressumme 2048). Auf dem linken Bild sind die Verhältnisse zur FN92, auf dem rechten zur FN2050 ersichtlich.

Die allermeisten Landwirtschaftsflächen weisen Direktabflusswerte von 0 mm auf (Jahressumme 2048) (Betrachtung der Gridergebnisse – reichlich 96 % der Zellen). Nur wenige Zellen besitzen Werte von Qdir >0. Sie sind auf den Besatz mit Futtermais, Wintergetreide und Raps konzentriert.

Abbildung 61: Q_{Direkt} auf LW-Flächen FN92 und FN2050

8.5 Grundwasserneubildungsrate (WaSiM-ETH)

Die durch WaSiM-ETH berechneten Grundwasserneubildungsraten (GWN) weisen eine starke Differenzierung auf (Tabelle 43). Im Messzeitraum liegen sie mit durchschnittlich 111 mm/a genau bei den Werten wie sie von den Lysimetermessungen abgeleitet wurden (Eingangswerte für das Parthe-Modell von PCGEOFIM). Im Prognosezeitraum steigt die mittlere GWN auf 148,8 mm/a. Im Schnitt des Gesamtzeitraumes beträgt die GWN 128,8 mm/a.

Tabelle 43: Langjährige Mittelwerte der GWN im Parthegebiet [mm]

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	gesamt
1980-2050	FN92	15,8	14,1	13,0	10,3	7,4	4,2	5,7	8,6	10,5	14,5	15,2	17,0	136,1
1980-2003	FN92	13,9	10,4	10,2	8,7	4,7	1,9	5,6	7,5	8,7	13,6	12,7	13,4	111,0
2004-2050	FN92	16,8	16,1	14,5	11,1	8,9	5,6	5,8	9,1	11,5	14,9	16,5	18,9	149,5
	FN2050	16,9	13,8	10,8	7,5	3,0	4,8	8,3	11,8	16,2	18,5	19,9	20,2	151,6
1980-1990	FN92	11,9	8,6	8,4	6,4	3,4	1,2	4,6	3,8	8,2	10,4	9,7	10,8	86,5
1991-2000	FN92	15,9	12,7	12,4	11,0	6,0	3,7	7,0	11,1	10,0	17,0	16,1	16,5	139,4
2001-2010	FN92	8,3	13,8	10,2	7,0	5,8	0,2	-0,3	6,3	6,0	9,6	8,6	15,6	91,3
	FN2050	12,4	10,4	9,3	6,5	2,8	0,0	3,7	8,6	13,6	14,8	13,6	13,5	109,3
2011-2020	FN92	11,6	14,0	10,6	7,4	3,7	4,3	5,4	6,5	10,2	12,8	13,2	13,5	113,2
	FN2050	16,4	12,4	10,3	6,9	1,5	4,8	5,8	8,0	13,1	16,7	18,2	20,0	133,9
2021-2030	FN92	15,2	13,6	11,4	8,9	5,2	7,2	9,8	12,1	15,9	17,2	18,3	17,1	152,1
	FN2050	18,4	16,1	11,9	8,9	3,6	7,5	12,0	15,6	19,6	21,8	23,8	22,7	181,9
2031-2040	FN92	16,6	13,9	11,6	8,3	6,0	8,0	9,7	12,5	16,7	17,7	19,5	18,8	159,3
	FN2050	15,7	12,8	9,7	6,3	2,8	5,5	7,9	12,2	15,7	17,3	19,2	19,2	144,3
2041-2050	FN92	19,9	17,1	13,8	11,1	9,1	9,4	14,1	17,2	20,7	23,0	24,2	24,4	204,0
	FN2050	20,0	16,2	12,1	8,7	4,1	4,4	10,3	13,7	17,9	20,9	22,2	23,4	174,1

Weniger erklärlich ist der starke Anstieg der GWN zum Ende der Prognoseperiode (Abbildung 62), wenn die Neubildungsraten rd. 205 mm/a erreichen - mit den zu diesen Zeiten prognostizierten Winterniederschlägen vielleicht schon, nicht aber mit dem ebenso für diesen Zeitraum prognostizierten Absinken der Grundwasserflurabstände (Kapitel 8.6). Nach der Philosophie von WaSiM-ETH (Kapitel 9.2.1, Kapitel 4) müsste sehr viel Grundwasser abgefließen sein, ohne dass adäquate Mengen in die Vorfluter entlasten (Kapitel 8.4.1). Letzteres wird durch die prognostizierten Abflüsse in der Parthe am Pegel Thekla auch simuliert. Das ist erklärlich, da durch die gesunkene GW-Oberfläche weniger Basisabfluss realisiert wird. Für den Weiterbetrieb des gekoppel-

ten Modells ist die Anpassung der kf-Werte (in horizontale x- und y-Richtungen) zwischen den beiden Modellen WaSiM-ETH und Parthe/PCGEOfIM notwendig.

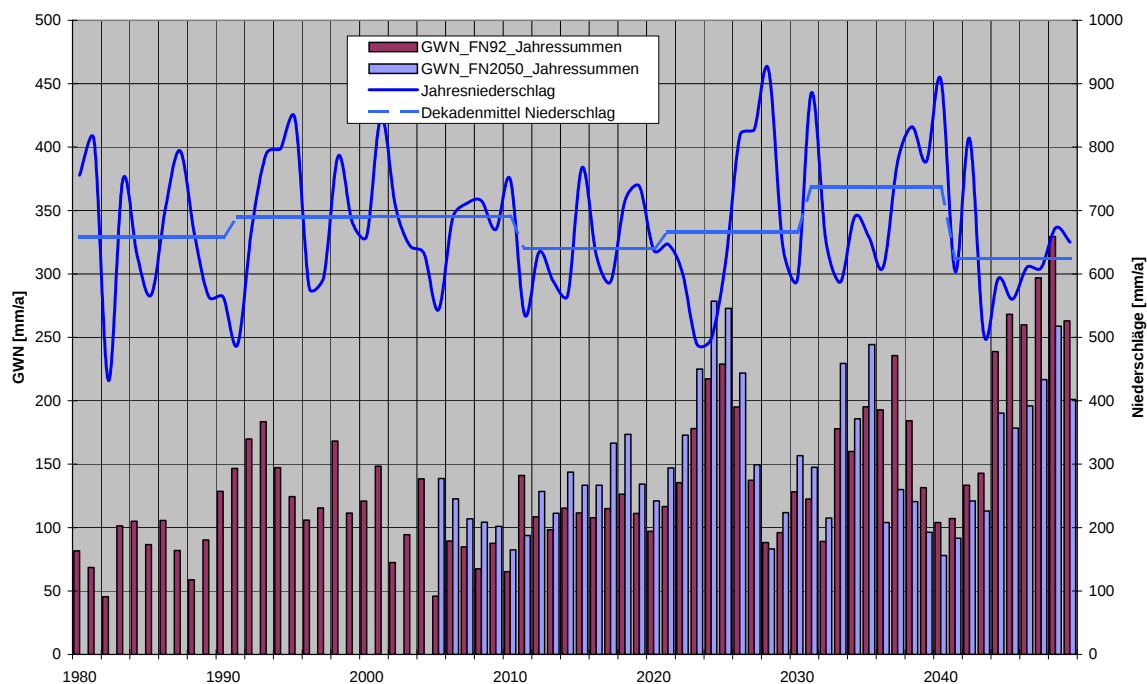


Abbildung 62: Jährliche Grundwasserneubildungsrate, FN92 und FN2050

Im Zeitraum 2004-2035 wird für das prognostische Flächennutzungsszenario FN250 immer eine höhere GWN simuliert als für das Szenario FN92. Ab 2035 kehrt sich diese Tendenz um und das Szenario FN2050 zieht stetig geringere GWN nach sich.

Die Abbildung 63 zeigt die monatliche Verteilung der GWN für beide Flächennutzungsszenarien und aufgeschlüsselt auf die einzelnen Dekaden zwischen 1980-2050. Die geringsten Raten werden für die Monate Mai und Juni berechnet, die höchsten für November bis Januar/Februar.

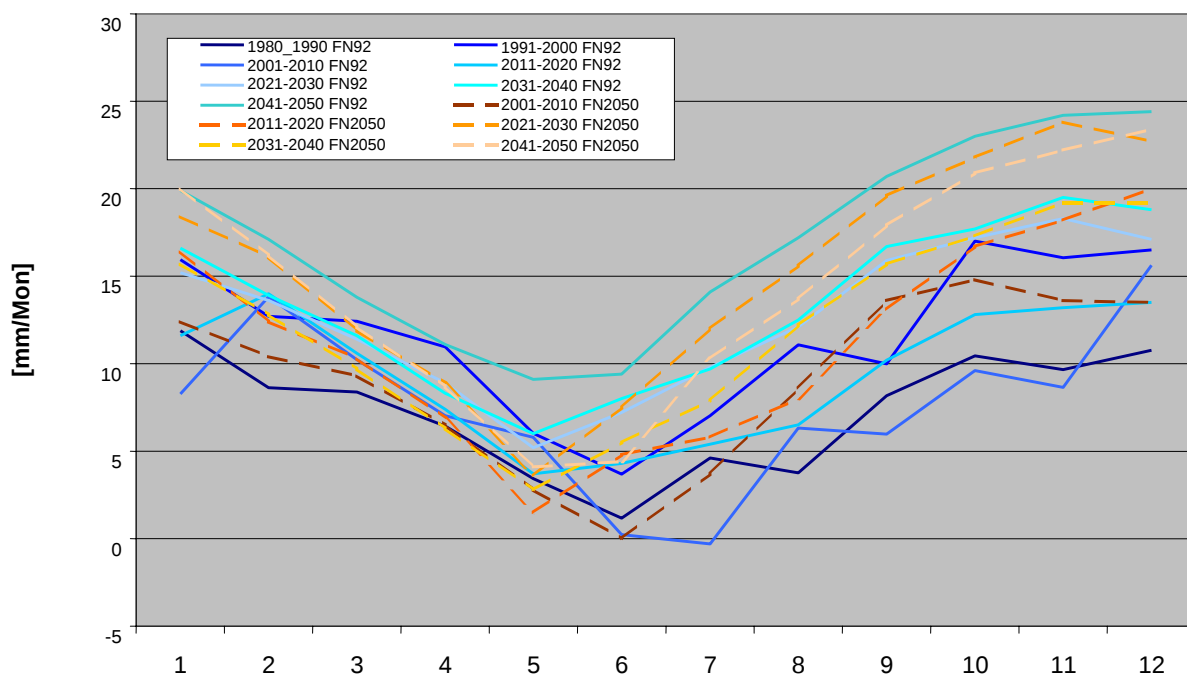


Abbildung 63: Monatliche Grundwasserneubildungsrate, FN92 und FN2050

Werden die GWN-Dekadengrids (langjährige mittlere Grundwasserneubildungsraten) (Abbildung 64) bezüglich der unterschiedlichen Flächennutzungen ausgewertet, dann lässt sich folgendes qualitatives Ergebnis ableiten:

Siedlungsflächen weisen die geringste GWN auf, meist sind sie als Zehrflächen ausgewiesen. Die prognostische FN2050 ergibt keine Änderung der mittleren GWN. Durch ihren erhöhten Flächenanteil wird aber die Fläche mit Zehrung ebenfalls erhöht (Abbildung 65).

Die **Grünlandflächen** haben eine GWN, die bei rd. 70 % der GWN der Ackerflächen liegt.

Die **Ackerflächen** besitzen im langjährigen Schnitt eine GWN von 118 mm/a. Mit dem Einsatz der konservierenden Bodenbearbeitung zum Flächennutzungsszenario FN2050 erhöht sich die GWN um rd. 34 %. Diese Steigerung ist durch die gewählte Parameteränderung erklärbar (erhöhte Infiltration in den Boden).

Die mit **Wald** bestandenen Flächen ergeben im Schnitt die höchsten GWN. Das ist an sich nicht zu erklären, da die Flächen ansonsten die höchste ETR, die negativste KWB und die maximalen Interzeptionsverdunstungen aufweisen. Die prognostische FN2050 ergibt eine Erhöhung der mittleren GWN um rd. 12 %. Die im Schnitt sehr großen absoluten Werte der GWN auf Waldflächen dürften mit den Bewegungen der GW-Oberfläche (Absinken/Ansteigen) zu tun haben, die bei WaSiM-ETH in die Berechnung der Höhe der GWN eingehen. Aus den Bildern der Abbildung 64 und Abbildung 65 ist aber auch ersichtlich, dass nur die Waldflächen im Westen des UG diese hohen Werte aufweisen (dunkelgrüne Farben), die Waldflächen des gesamten Ostrandes des UG bis hinunter zum TE Glasten hingegen sind durch hellgrüne Farbtöne gekennzeichnet, die für diese Flächen eine GWN zwischen 0 und -5 mm/a ausweisen.

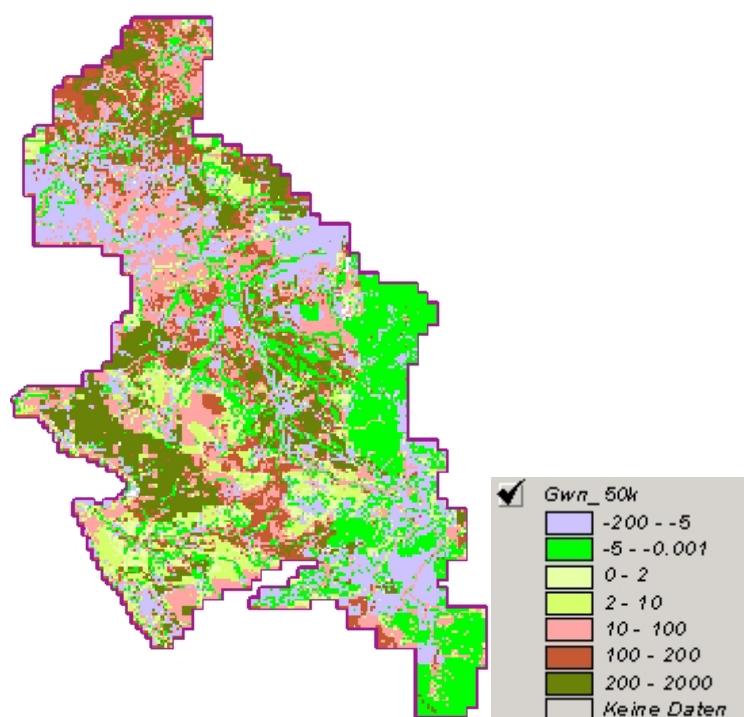


Abbildung 64 GWN 1991-2000, FN92

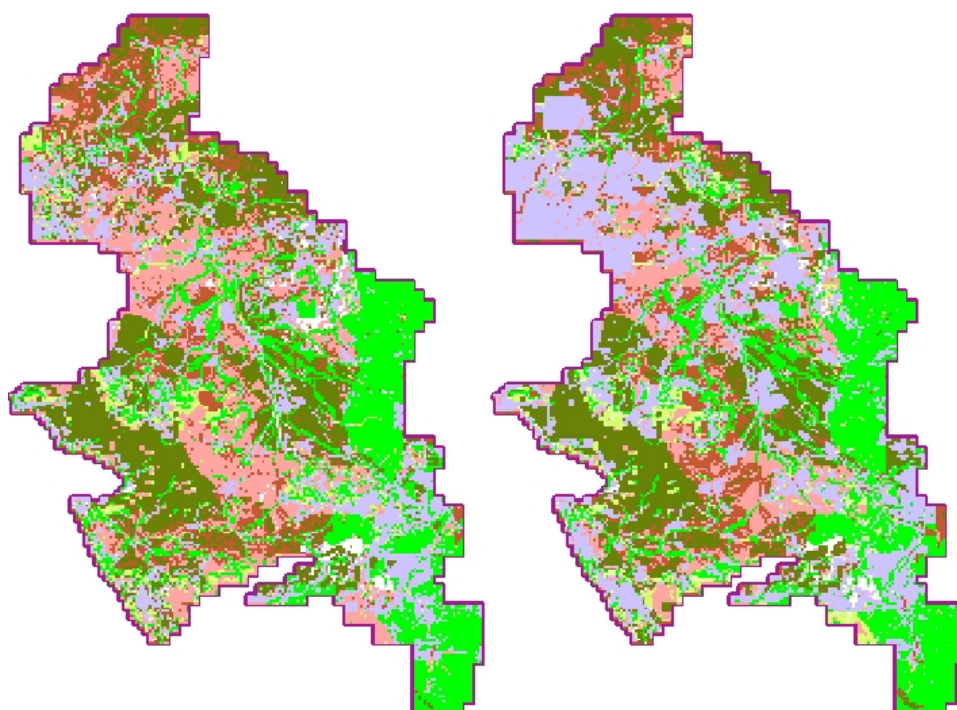


Abbildung 65: GWN 2041-2050, FN92 und FN2050 (Legende vgl. Abbildung 64)

8.6 Grundwasserflurabstand (WaSiM-ETH)

Die Grundwasserflurabstände werden in Tabellenform als **Mittelwerte für die TE** bzw. für das gesamte UG ausgegeben. Nachfolgend wird das TE Pegel Thekla betrachtet (Abbildung 66). In diesem Gebiet sind sowohl die externen Zu- bzw. Ableitungen angesiedelt.

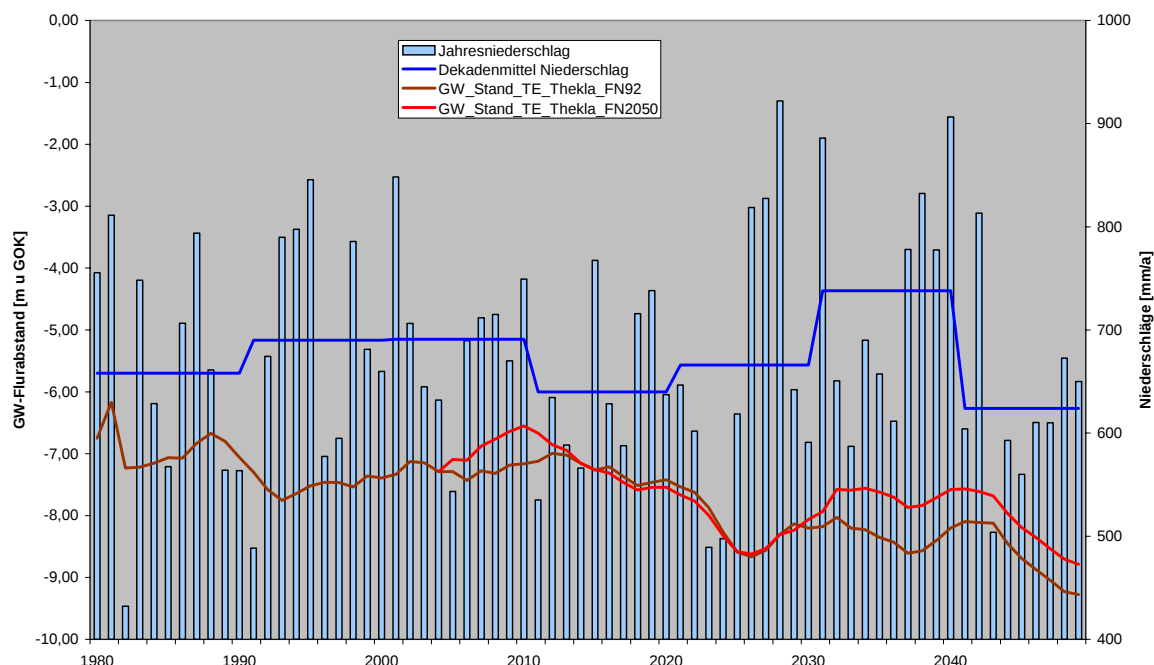


Abbildung 66: GW-Flurabstände TE Thekla, FN92 und FN2050

Insgesamt sinken die mittleren GW-Stände im Zeitraum von 1980-2050 um rd. 2 m ab. Allgemein ist eine Abhängigkeit der Flurabstände von den langjährigen Niederschlagsereignissen ersichtlich. So sinken die GW-Stände nach 2-3 Jahren deutlich geringerer Niederschläge schnell um 8-10 dm ab. Der Widerspruch zwischen steigenden GWN und sinkenden GW-Ständen ist derzeit nicht befriedigend erklärbar. Eventuell ist dies auf die nicht adäquate Reaktion von WaSiM-ETH auf die Kopplung mit dem externen Oberflächen-/Grundwassermodell PCGEOFIM zurückzuführen.

Im Vergleich der beiden Flächennutzungsszenarien ist anfangs (2012) bis ca. 2030 eine Entwicklung der Flurabstände auf gleichem Niveau ersichtlich. (Wodurch die anfängliche Differenz ab 2004 begründet ist, kann nicht erklärt werden.) Ab 2030, der Dekade mit den höchsten Niederschlagssummen, steigt die mittlere GW-Oberfläche um rd. 8 dm. Dafür könnten einerseits die erhöhten Winterniederschläge und andererseits die in der konservierenden Bodenbearbeitung begründeten erhöhten Infiltrationsraten verantwortlich sein. Am Ende dieser Dekade fallen die GW-Stände um rd. 2-3 dm ab, um bis zum Ende der Prognoseetappe 2050 wiederum parallel der Kurve von FN92 zu verlaufen.

Der mittlere GW-Stand mit dem Flächennutzungsszenario FN2050 sinkt zwischen 2004-2050 um rd. 1,5 m ab und wiederholt damit genau den Trend des Szenarios FN92.

In Anlage 14 und Anlage 15 sind die Grundwasserstände an den konkreten GW-Messstellen aufgezeigt. Demnach sind zum Ende der Prognoseperiode keine Absenkungsbeträge ersichtlich. Die in Abbildung 66 gezeigten Mittelwerte mitteln zwischen den Höhen im obersten und, wo er leergelaufen war und die GW-Oberfläche sich rund 10 m tiefer im zweiten GWL befindet, dem zweiten GWL.

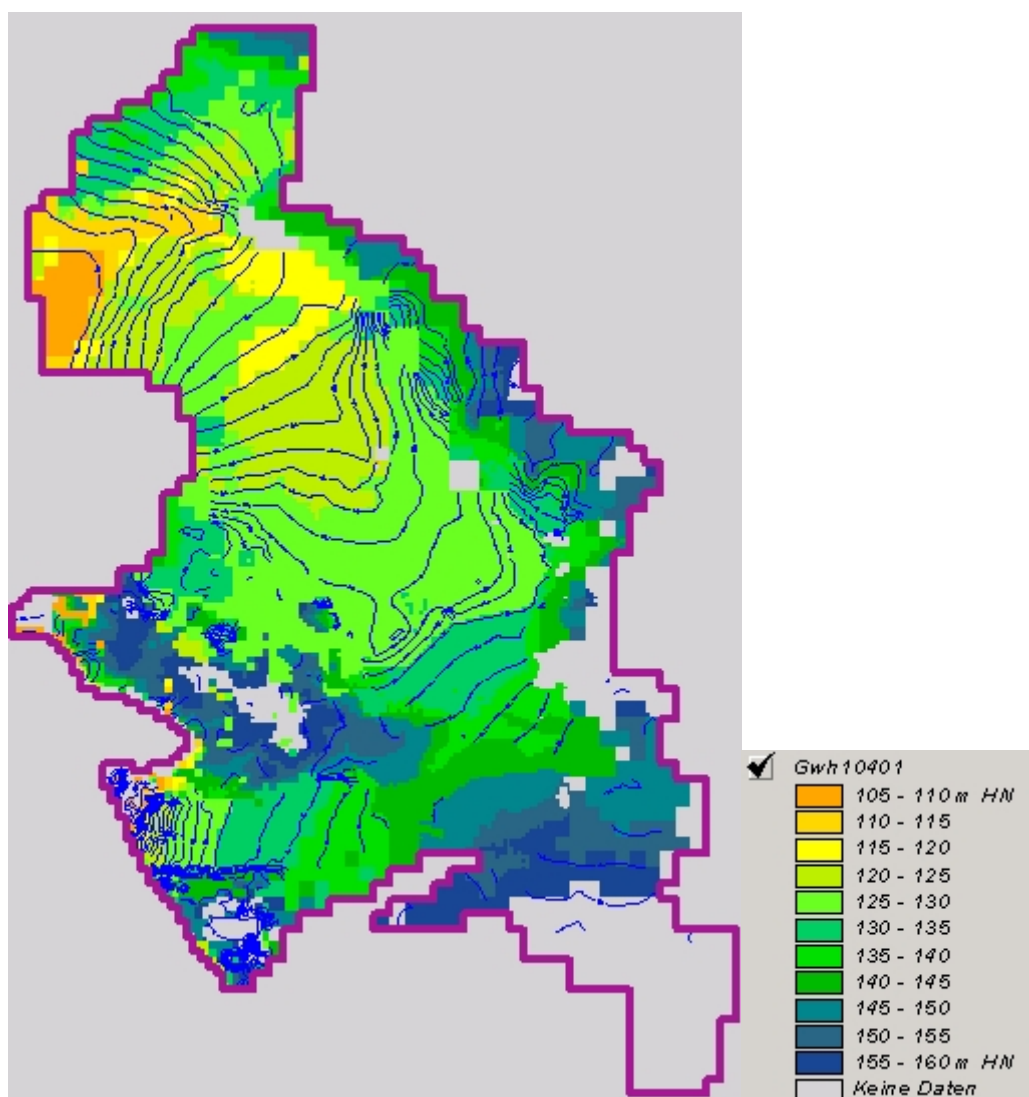


Abbildung 67: GW-Stand (Grid) und Isohypsen, 01.01.2004

Die Abbildung 67 zeigt die flächenhafte Verbreitung der Grundwasserstände im gesamten UG. In den frei gebliebenen Flächen existiert der oberste GWL nicht. Das Grid stellt ein WaSiM-ETH-Ergebnis dar, der Isohypsenplan ist das Ergebnis der PCGEFIM-Berechnungen. Im Wesentlichen ist eine sehr gute Übereinstimmung erkennbar. Lediglich am äußersten Nordwestrand ist eine deutliche Nichtübereinstimmung zwischen Gridergebnis und Isohypse ersichtlich. Während die Isohypsen rd. 15–20 m GW-Flurabstand anzeigen, beträgt er im Grid nur rd. 1–2 m. Die Diskrepanz erklärt sich dadurch, dass die Isohypsen hier den GWL 1.6 beschreiben, da der oberste GWL 1.5 nur wenige dm mächtig und darüber hinaus sehr absetzig ist. Das WaSiM-ETH-Grid hingegen beschreibt immer den obersten GWL, der hier in Natura die durch das Grid bezeichneten Grundwasserhöhen aufweist.

Die Gegenüberstellung von WaSiM-ETH-Modellierungsergebnissen und Messwerten in den einzelnen GW-Messstellen ist in der Anlage 13 in Ganglinienform graphisch abgelegt. Die Darstellung auf der Karte erfolgt in den Anlagen 16–19 für den 01.01.1984, 01.01.1994 und 01.01.2004, auf denen die Modellierungsergebnisse in Isohypsenform und die Daten der Messstellen aufgetragen sind.

Einen Vergleich der durch WaSiM-ETH und PCGEFIM erhaltenen Modellierungsergebnisse zum Stichtag 01.01.2004 zeigt die Anlage 19.

Für den Prognosezeitraum 2004–2050 sind die modellierten Ganglinien für die GW-Messstellen und die beiden Flächennutzungsszenarien FN92 und FN2050 in den Anlagen 14–15 zusammengestellt. Die prognostische Entwicklung des Grundwasserstandes für die beiden genannten Flächennutzungsszenarien in Isohypsenform zeigen die Anlagen 20–22:

9 Modellkopplung PCGEOFIM – WaSiM-ETH

9.1 Methodik der Kopplung PCGEOFIM/WaSiM-ETH

Im Modell PART2004/Lysimeterdaten wird im Falle flurnaher Grundwasserstände als Grundwasserneubildung die Differenz aus korrigiertem Niederschlag und Grasreferenzverdunstung angenommen. Im Bereich "flurnah bis flurfern" erfolgt eine lineare Interpolation zwischen diesem Wert und dem gemessenen Lysimeterwert. Wenn der Grundwasserstand flurfern ist, werden die Lysimeterdaten als GWN interpretiert.

Bevor die Kopplung der beiden Programme näher erläutert werden kann, muss auf das Datenaustauschformat eingegangen werden. WaSiM-ETH verwaltet einen großen Teil der Daten als Grids. Ein Grid beschreibt ein zweidimensionales Feld. Nach dem Header, der den Koordinatenursprung, die Zellgröße, die Anzahl der Zeilen (nrow) und Spalten (ncol) und den Nodata-Value enthält, folgen nrow*ncol Werte. Grids können sowohl als Text als auch binär gespeichert sein. Das Programm PCGEOFIM verarbeitet beide Formate, wobei für den Datenaustausch das binäre Format gewählt wurde.

Im Modell PART2004/WaSiM-ETH wird die Grundwasserneubildungsberechnung wie folgt realisiert: Bevor PCGEOFIM die Grundwasserströmung berechnet, schreibt das Programm PCGEOFIM die GW-Oberfläche als Grid in ein spezielles Verzeichnis und ruft das Programm WaSiM-ETH auf. WaSiM-ETH berechnet für einen vorgegebenen Zeitraum aus meteorologischen Daten, einem digitalen Geländemodell, der Bodennutzung, der Bodenart und dem mit Hilfe des GW-Oberflächengrids ermittelten GW-Flurabstand, Oberflächenlandabfluss, Interflow und flurabstandsabhängige GW-Neubildung als Grids. Nach dem Speichern dieser Grids erhält das Programm PCGEOFIM die Steuerung zurück. Das Programm PCGEOFIM wertet die Grids aus und berechnet die Grundwasserströmung für den vorgegebenen Monat. Die folgende Tabelle 44 zeigt den realisierten Ablauf.

Tabelle 44: Online-Kopplung PCGEOFIM/WaSiM-ETH

Iteration	PCGEOFIM	WaSiM-ETH
	Einlesen der Datenbasis	
	Aufbau der internen PCGEOFIM-Strukturen	
do t = ta, te, 1 Monat	Ausgabe Grundwasseroberfläche als Grid für den Zeitpunkt t	
	Aufruf des Programms WaSiM-ETH für den Zeitraum t bis t + 1 Monat	Einlesen der Steuerdatei und aller benötigten Daten
		Simulation des Bodenwasserhaushaltes für 1 Monat
	Einlesen und Überführung in interne PCGEOFIM-Strukturen: - Oberflächenlandabfluss - Interflow - Grundwasserneubildung	Ausgabe des Oberflächenlandabflusses, des Interflow und der Grundwasserneubildung als Grid in [mm/Mon] Ausgabe weiterer Daten für die Fortsetzung der Berechnung
enddo	Simulation der Grund- und Oberflächenwasserströmung für 1 Monat	
	Endausgabe	

9.2 Probleme bei der Kopplung PCGEOFIM/WaSiM-ETH

9.2.1 Berechnung der Grundwasserneubildung

Das WaSiM-ETH-Grundwasserneubildungsgrid wurde analysiert. Die folgende Abbildung 68 zeigt einen Ausschnitt aus der von WaSiM-ETH ausgewiesenen Neubildung bzw. Zehrung im Monat August 1982 zusammen mit den Grundwasserflurabständen.

Das von WaSiM-ETH ausgegebene Grundwasserneubildungsgrid beschreibt die Änderung des Grundwasservorrates infolge des über die Aerationzone die Grundwasseroberfläche erreichenden Wassers und das durch die Grundwasserströmung der betrachteten Zelle zu- bzw. abfließenden Wassers in mm/Zeiteinheit.

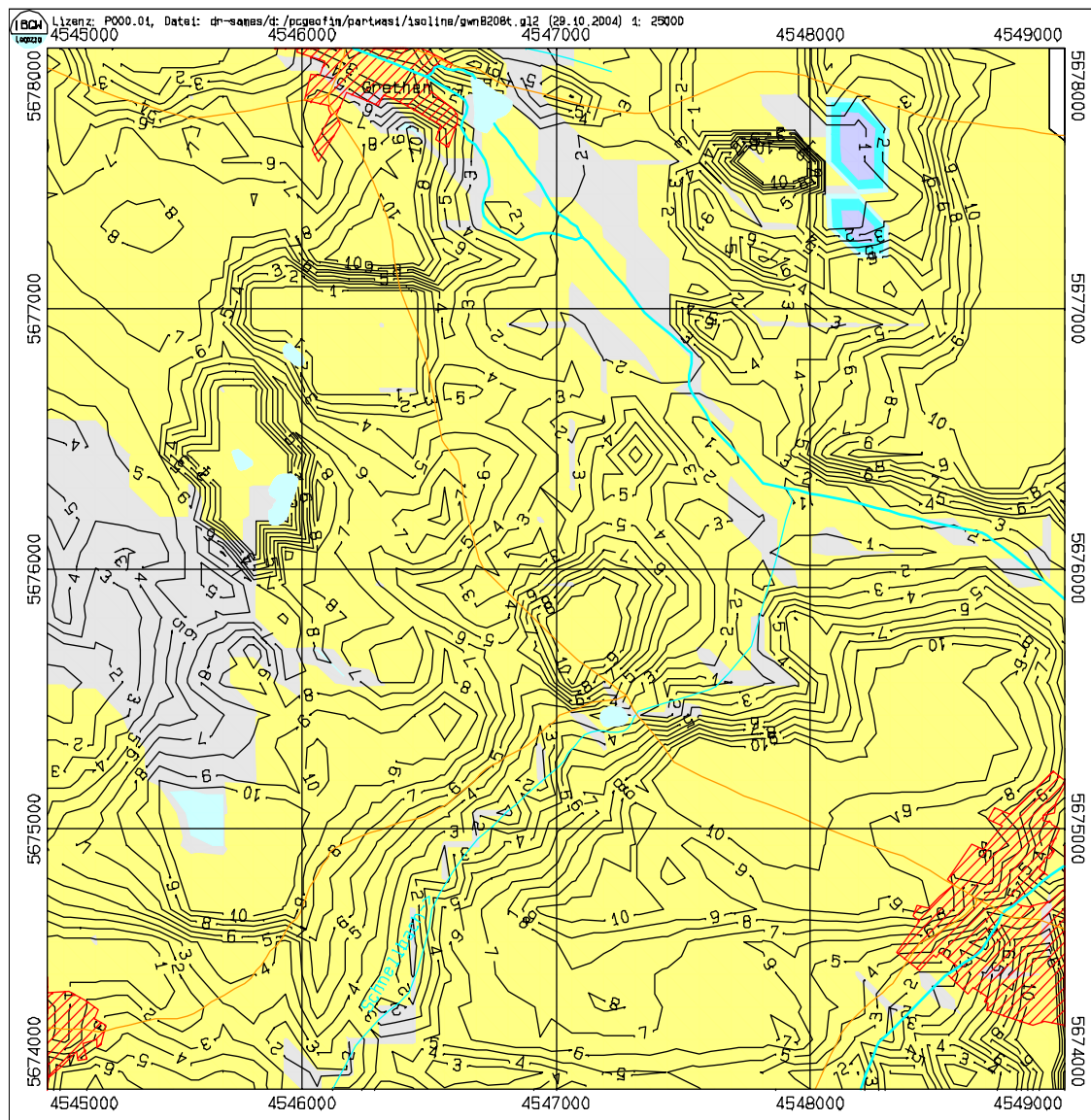


Abbildung 68: Grundwasserneubildung und Grundwasserflurabstand im August 1982 nach WaSiM-ETH (gelb: $GWN \leq -1 \text{ mm/Mon}$, grau: $-1 \text{ mm/Mon} < GWN < 1 \text{ mm/Mon}$, zyan: $GWN \geq 1 \text{ mm/Mon}$, Isolinien: Grundwasserflurabstand [m])

Dies zeigen die Abbildung 68 und Abbildung 69. Wasser, welches die verdunstungsbeeinflusste Zone verlassen hat, erreicht auf jeden Fall die Grundwasseroberfläche. Daraus folgt, dass bei einem Flurabstand von fünf und mehr Metern keine Zehrung möglich ist. Die von WaSiM-ETH im GWN-Grid ausgewiesene Zehrung ist das Ergebnis der Grundwasserströmung, die im betrachteten Gebiet vorrangig von Süd nach Nord in Richtung des Gefälles fließt. Auf Grund des geringen Niederschlags und der hohen Verdunstung in den Sommermonaten 1982 erreicht kaum Wasser die Grundwasseroberfläche. Infolge des Gefälles fließt aber weiterhin Grundwasser nach Norden ab, so dass der Grundwasserstand sinkt. Die Speicheränderung wird von WaSiM-ETH im GWN-Grid ausgewiesen.

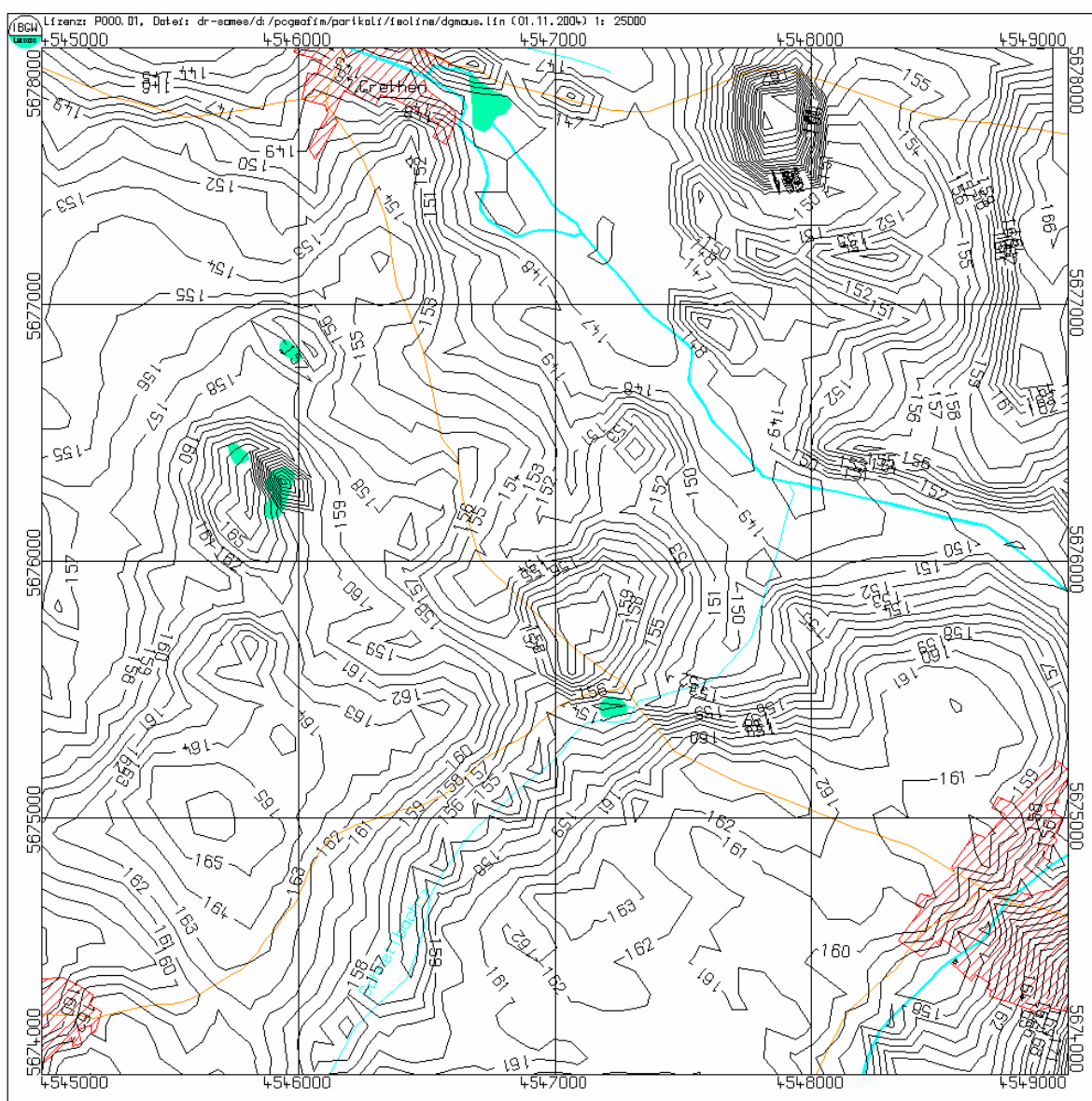


Abbildung 69: Ausschnitt aus dem von WaSiM-ETH genutzten digitalen Geländemodell

Das Programm PCGEOFIM benötigt für die Simulation nur das zur Grundwasseroberfläche gelangende Wasser bzw. bei flurnahen Wasserständen die kapillare Aufstiegsrate. Die Berechnung der Speicheränderung ist gerade das Ergebnis der PCGEOFIM-Berechnung.

Diese Doppelbewertung der Speicheränderung kann nur umgangen werden, wenn im Programm WaSiM-ETH das die Grundwasseroberfläche erreichende Grundwasser als Grid ausgewiesen wird. Im Rahmen des im März 2005 geplanten Workshops in Zürich sollten die Möglichkeiten einer Erweiterung des Programms WaSiM-ETH mit den Programmautoren erörtert werden.

Im Zeitrahmen des Forschungsauftrages KliWEP ist die oben beschriebene Programmänderung nicht realisierbar.

Um die beschriebene Doppelbewertung zu umgehen, werden Zehrungen bei flurfernen Grundwasserständen von PCGEOFIM nicht übernommen.

9.2.2 Oberflächenlandabfluss und Interflow

Es war ursprünglich geplant, dass PCGEOFIM vom Bodenwasserhaushaltsmodell die aktuellen Flusswasserstände oder die Volumenströme in den Fließgewässern in jedem Flussabschnitt übernimmt. Da WaSiM-ETH diese Größen nicht detailliert ausgibt, wurde folgender Weg gewählt:

- Summierung der beiden Grids Oberflächenlandabfluss und Interflow
- Transport der Wassermenge gemäß der WaSiM-ETH-Fließrichtung zu einem PCGEOFIM-Vorfluter

Die Abbildung 70 zeigt den so berechneten Oberflächenlandabfluss und Interflow am Pegel Thekla. Zu beachten ist, dass die Graphik Monatsmittelwerte darstellt. Trotzdem sind die von PCGEOFIM gerooteten Wassermengen viel zu niedrig.

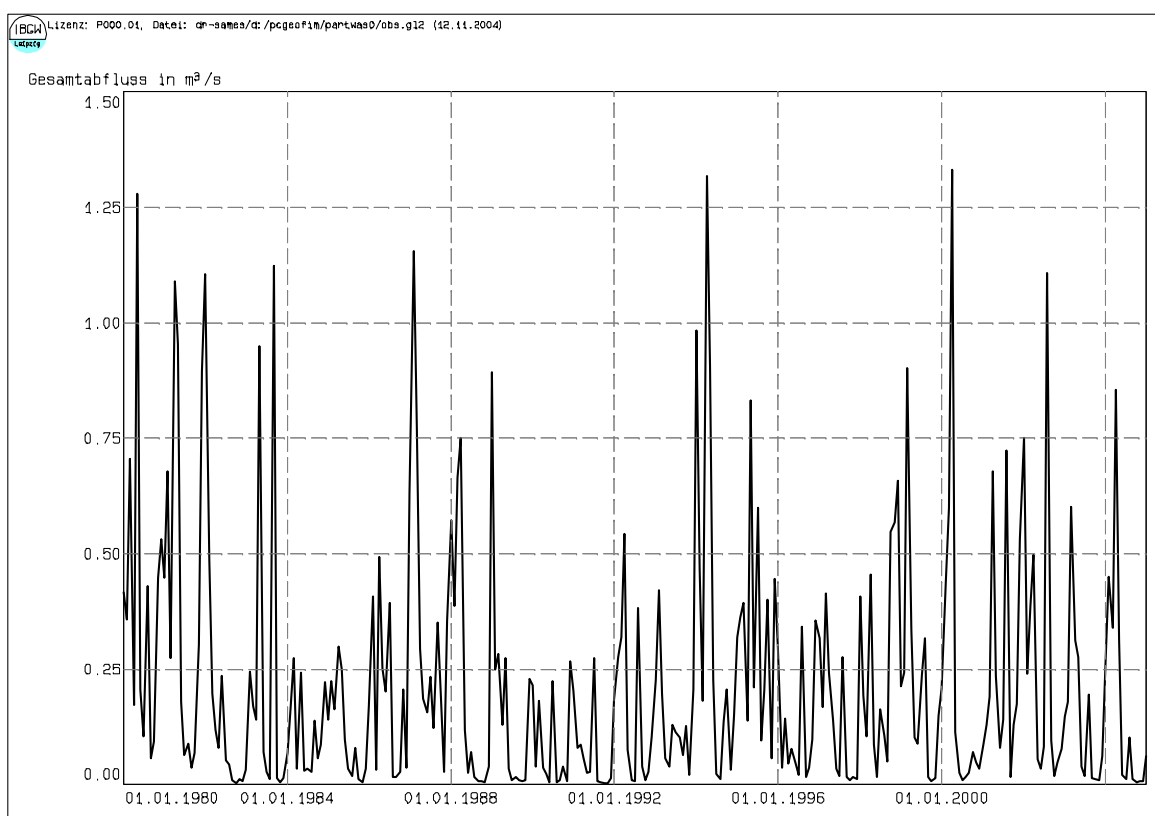


Abbildung 70: Oberflächenlandabfluss und Interflow am Pegel Thekla

Auch in diesem Falle sollte zusammen mit den WaSiM-ETH-Autoren nach einer besseren Lösung gesucht werden.

9.3 Kalibrierung des Modells PART2004/WaSiM-ETH

Auf Grund der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Probleme bei der Kopplung von PCGEOFIM und WaSiM-ETH kann eine vollständige Kalibrierung des Modells PART2004/WaSiM-ETH erst nach einer Programmerweiterung von WaSiM-ETH realisiert werden.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen aber, dass das Modell PART2004/WaSiM-ETH die im Einzugsgebiet der Parthe in den Jahren 1980-2004 angetroffenen Verhältnisse beschreibt. Die Abbildung 71 zeigt die zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes für eine bei Naunhof liegende Messstelle. Dargestellt sind die gemessenen Grundwasserstände und die mit den Modellen PART2004/WaSiM-ETH und PART2004/Lysimeter berechneten Grundwasserstände. Die mit Hilfe von Lysimeterdaten berechnete Grundwasserstandsentwicklung an der Messstelle 47410222 beschreibt die Messwerte wesentlich besser als die WaSiM-ETH-Simulation.

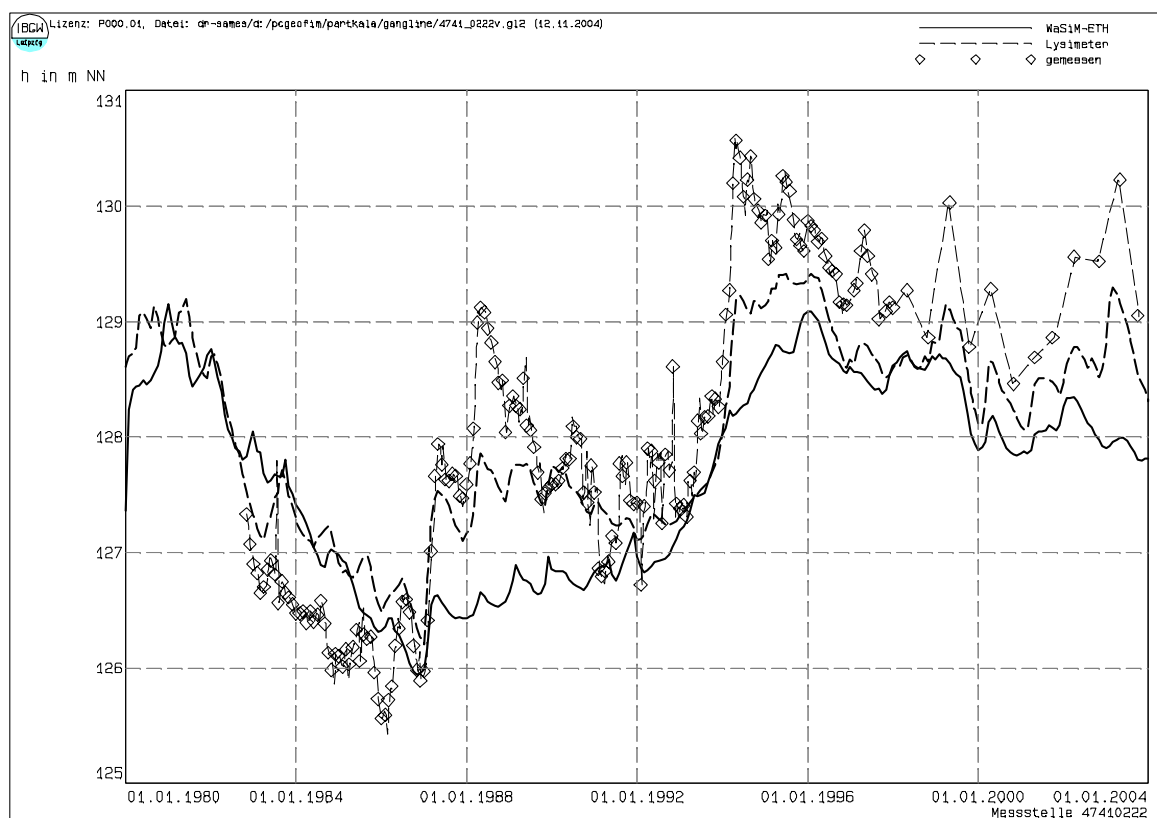


Abbildung 71: Messstelle 47410222

Die Abbildung 72 zeigt die mit dem Modell PART2004/WaSiM-ETH berechnete Grundwasserneubildung. Im Mittel werden 105 mm/a Grundwasser neu gebildet. In der Abbildung 73 ist die mit dem Modell PART2004/Lysimeter bestimmte Neubildung zu sehen. Die mittlere Neubildung liegt in der gleichen Größenordnung.

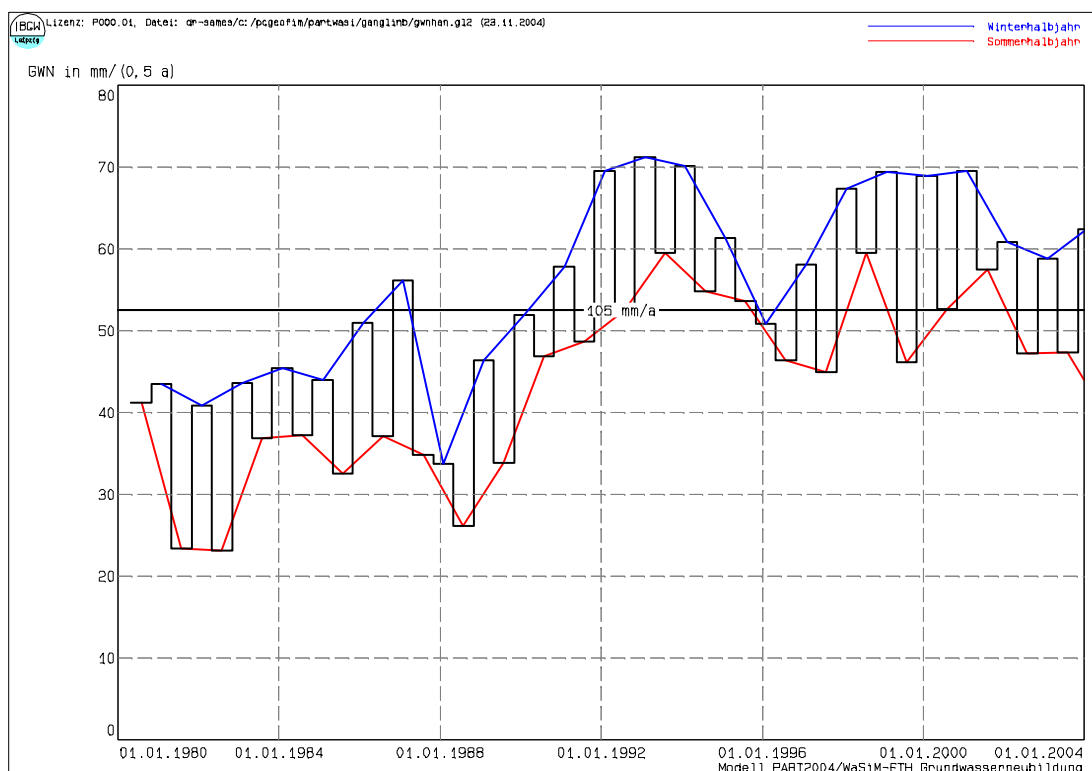


Abbildung 72: Berechnete Grundwasserneubildung Modell PART2004/WaSiM-ETH

Die Neubildung im Winter- und im Sommerhalbjahr unterscheiden sich bei der WaSiM-ETH-Berechnung im Vergleich zur Lysimetersimulation relativ wenig. Bei der Vorgabe von Lysimeterdaten bleibt die Speicherung der Grundwasserneubildung in der Aerationsszone unberücksichtigt, WaSiM-ETH hingegen berücksichtigt diese Passage, was zum Abbau der Extrema führt.

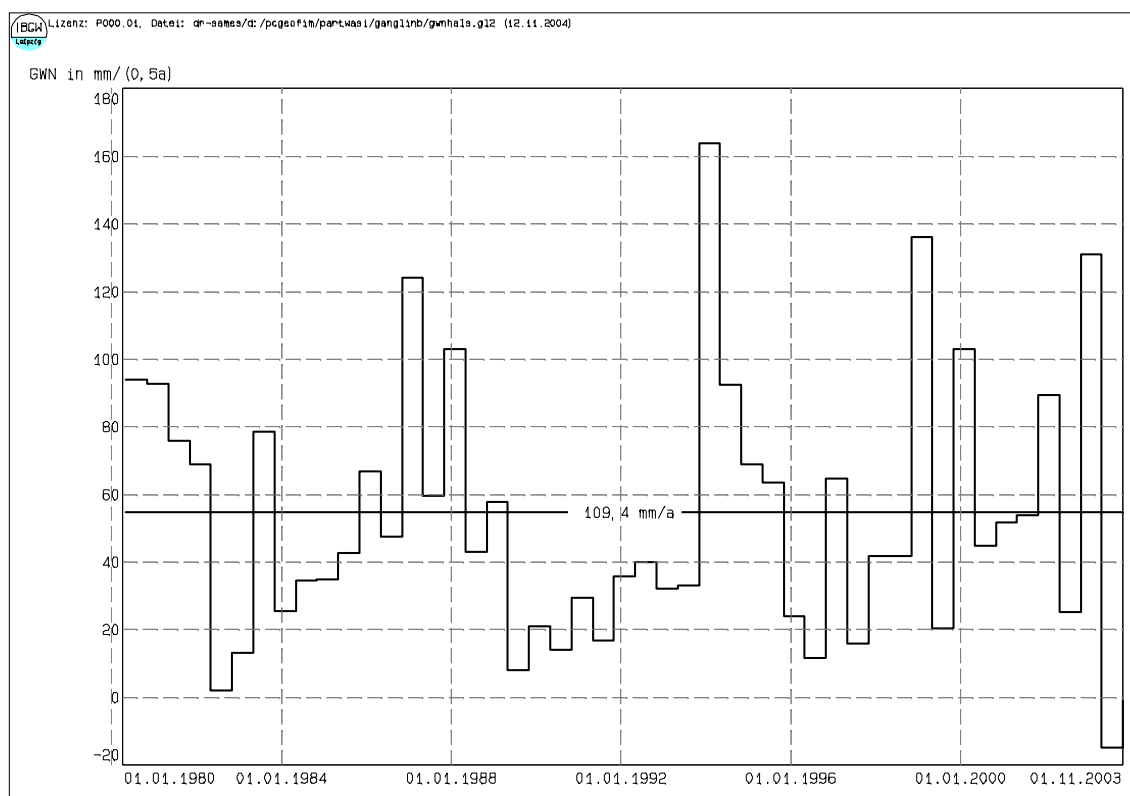


Abbildung 73: Berechnete Grundwasserneubildung Modell PART2004/Lysimeter

In der Anlage "Kalibrierung der Kopplung PCGEOFIM/WaSiM-ETH" sind berechnete und gemessene Grundwasserstände von 20 ausgewählten Messstellen graphisch dargestellt. Fast alle Messstellen zeigen ein ähnliches Bild wie die Messstelle 47410222.

Auch die Entwicklung des Wasserstandes der Seen Großsteinberg, Kleinsteinberg, Naunhof 1 und Naunhof 2 ist in der Anlage "Kalibrierung der Kopplung PCGEOFIM/WaSiM-ETH" dargestellt.

Die Anlage enthält auch die Förderung der Wasserwerke Naunhof 1 und Naunhof 2, die das gesamte Parthegebiet wesentlich beeinflussen. Man beachte, dass beide Wasserwerke zusammen über ein Drittel der jährlichen Grundwasserneubildung fördern. In der Abbildung 74 sind die von den beiden Modellen berechneten Isolinen für die GWL 1.5, GWL 1.6 und GWL 1.7 graphisch dargestellt.

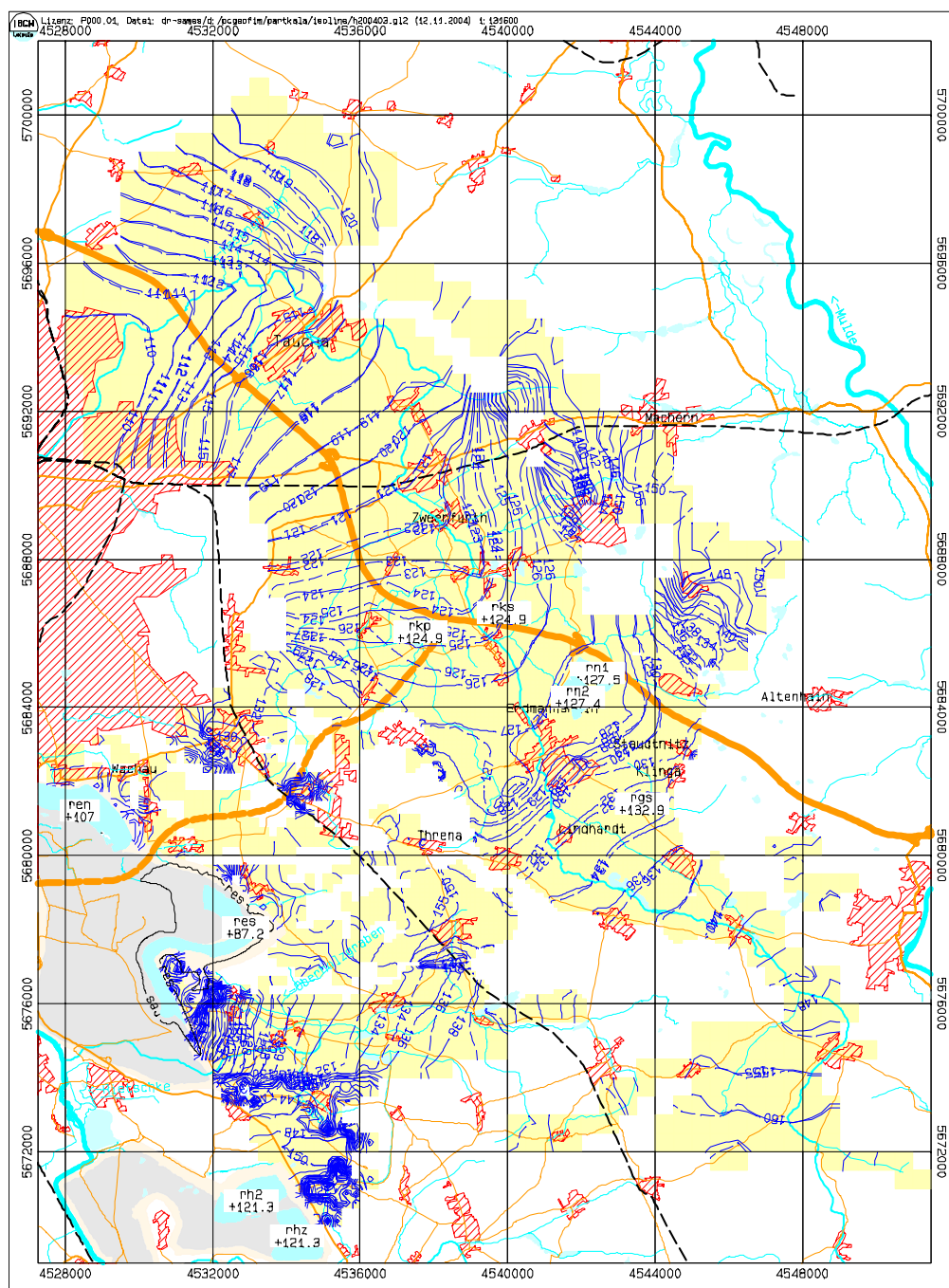


Abbildung 74: Vergleich der mit dem Modell PART2004/Lysimeter (durchgezogene Linien) und PART2004/WaSiM-ETH-ETH (gestrichelte Linien) berechneten Grundwasserstände im GW 1.5, GWL 1.6 und GWL 1.7 am 01.01.2004

9.4 Schlussfolgerungen zur Modellkopplung

Es ist gelungen, das Programm PCGEOFIM mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH zu koppeln. Eine Simulation der Grundwasserströmung für den Zeitraum 1980-2004 wurde erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse können aber noch nicht voll befriedigen.

In Zusammenarbeit mit den Autoren von WaSiM-ETH sollten folgende Forderungen an das Bodenwasserhaushaltsmodell gestellt und kurzfristig erfüllt werden:

BEAK Consultance GmbH, Freiberg/IBGW GmbH, Leipzig

- die mit dem Simulator PCGEOFIM generierten Grundwasserstände sind in geeigneter Weise in das Bodenwasserhaushaltsmodell einfließen zu lassen,
- die Grundwasserneubildung und die Volumenströme oder Flusswasserstände in den Fließgewässern müssen berechnet und von WaSiM-ETH in der vom Simulator PCGEOFIM benötigten Form für weitere Berechnung zur Verfügung gestellt werden.

10 Sensitivitätsanalyse

In der WaSiM-ETH-Programmbeschreibung (S. 97-112) sind eingehende Betrachtungen zur Parametersensitivität enthalten.

Es sind die Teilmodelle Verdunstungsmodell, Interzeptionsmodell, Schneemodell und Bodenmodell behandelt. Dabei sind nur solche Parameter in die Betrachtungen einbezogen worden, die entweder einen großen möglichen Wertebereich besitzen oder aber die, die schwer messbar bzw. bestimmbar sind oder die "zur Parametrisierung von überwiegend empirischen Prozessbeschreibungen eingeführt wurden" (S. 97).

Verdunstungsmodell: Die Höhe des Oberflächenwiderstandes (Bestandeswiderstandes) r_{sc} [$s \cdot m^{-1}$] wirkt stark auf die berechnete Verdunstungshöhe. Dabei kann bei verkleinerten Oberflächenwiderständen durch Verdunstung mehr Wasser aus dem Boden entnommen werden. Zum Teil können Niederschläge dadurch erst zur Auffüllung des Bodenspeichers herangezogen werden, ehe sie zur Bildung von Abflussspitzen im Vorfluter führen.

In SCHULLA & JASPER (1998) wird für die Sensitivitätsbetrachtungen der Wert für die Oberflächenwiderstände r_{sc} zwischen 25 % und 200 % variiert und damit eine weite Variation der Gesamtverdunstung erreicht. In SCHULLA & JASPER (1998) sind ebenfalls Variationsbreiten von r_{sc} beschrieben. Für die Anpassung der ETR an die Lysimetermessungen sind im Rahmen der vorliegenden Arbeiten teilweise auch die Oberflächenwiderstände für die einzelnen Flächennutzungsarten verändert worden. Obwohl die modellierten ETR im Schnitt kleiner blieben als die gemessenen, konnten die r_{sc} nur in einem gewissen Rahmen verändert werden. Als Beispiel soll die Abbildung 75 dienen, die eine Verringerung des Oberflächenwiderstandes um 10 [$s \cdot m^{-1}$] veranschaulicht. Dabei werden die täglichen Verdunstungshöhen um bis zu 1 mm erhöht, an Einzeltagen um bis zu 2 mm.

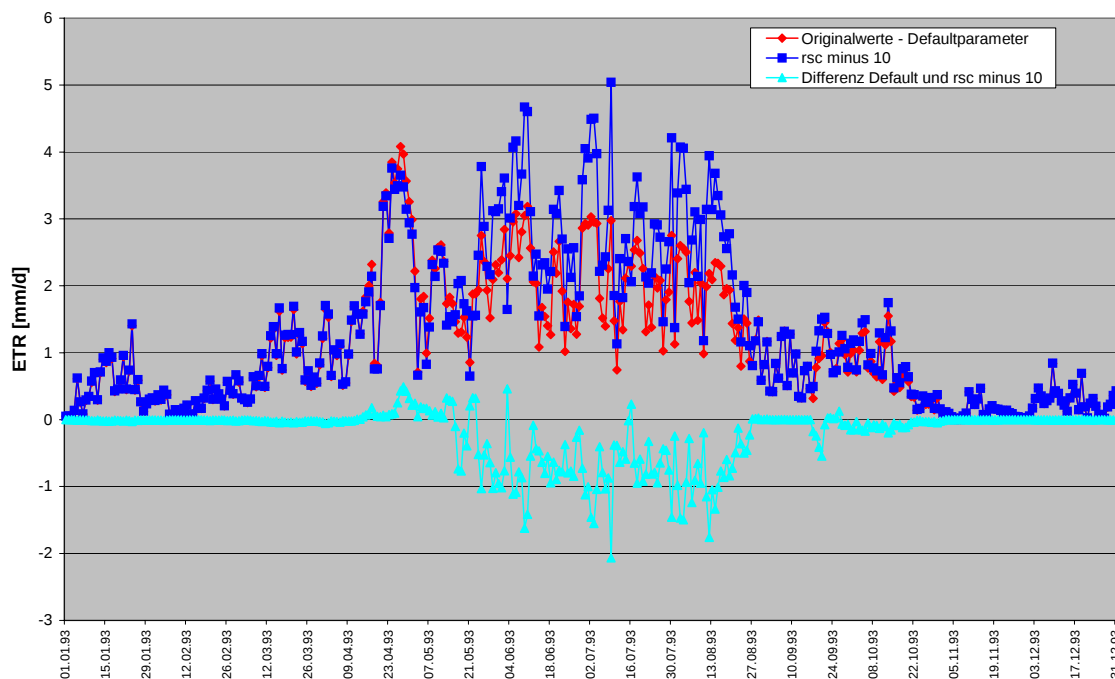


Abbildung 75: Erhöhung der ETR bei Verringerung von Rsc

Interzeptionsmodell: Die maximale Füllhöhe des Interzeptionsspeichers wirkt wenig sensitiv auf die Gesamtverdunstung, aber deutlich auf das Aufteilungsverhältnis zwischen Transpiration und Interzeptionsverdunstung. Ein Wert für die Füllhöhe von 0,35-0,4 mm führt zu Speicherkapazitäten von bis zu 4 mm bei Nadelwald, was einen Anteil von 25-30 % der Interzeptions- an der Gesamtverdunstung bewirkt (SCHULLA & JASPER, 1998).

Schneemodell: Die Programmautoren geben vier zu kalibrierende Parameter des Schneemodells an, von denen drei sich für die Ergebnisse als sensitiv erwiesen: Übergangstemperatur Regen/Schnee, die Grenztemperatur für die Schneeschmelze und der Tag-Grad-Faktor.

Für das Parthegebiet sind die Programm-Vorgabewerte mit den an das Osterzgebirge angepassten Werten verglichen und geringfügig in das "wärmere" Flachland verschoben worden.

Bodenmodell: In der Modellversion mit Richards-Ansatz sind lediglich drei Parameter zu kalibrieren, da solche Parameter wie Bodeneigenschaften als gegebene Parameter verstanden werden, die keiner Kalibrierung unterliegen sollten. Zu kalibrieren sind:

- die Abnahmekonstante der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe k_{rec} ,
- die Entwässerungsdichte d_r und
- das maximale Verhältnis der relativen hydraulischen Leitfähigkeiten benachbarter Schichten c_k .

Der erste und letzte Parameter sind speziell für die verschiedenen geologischen Profile verändert worden (z. B. in den Bereichen geringmächtiger periglazialer Überdeckung über anstehenden Festgesteinen).

Die Entwässerungsdichte erforderte größere Kalibrierungsanstrengungen, um die Abflussspitzen und ihr Rückgangsverhalten besser an die Messwerte anzupassen.

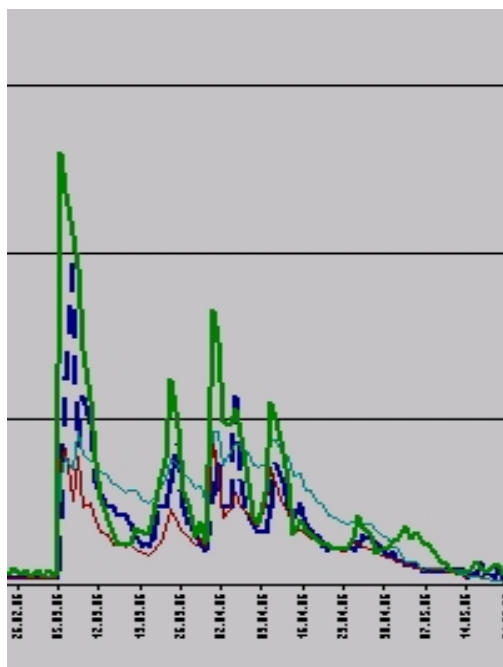


Abbildung 76: Abflüsse Pegel Glasten, unterschiedliche Entwässerungsdichten (verschiedene Farben)

In der Abbildung 76 zeigt die grüne Linie die Verhältnisse bei Entwässerungsdichte von 24 und die etwas schwächere, türkisgrüne Linie die bei Entwässerungsdichte von 30. Eine höhere Entwässerungsdichte lässt stärkere Infiltration zu, was zu geringeren Abflussspitzen im Gerinne und einem langsameren Rückgang der Spitzen führt.

11 Bilanzbetrachtungen

Die Jahressummen von Niederschlag und ETR im Gesamtgebiet sowie den Abflüssen am Pegel Thekla zeigt die Abbildung 77. Die Differenz zwischen Niederschlägen und Verdunstung ist durch die gelb eingefärbte Fläche dokumentiert. Somit stehen im Schnitt der Jahre immer Wassermengen zur Versickerung zur Verfügung. Ihr Volumen ist in den ersten Jahrzehnten am größten, was auch durch die größeren Abflüsse am Pegel Thekla dokumentiert wird. In der letzten Dekade 2041-2050 sind die zu infiltrierende Niederschlagsmenge und der Abfluss am Pegel Thekla am geringsten.

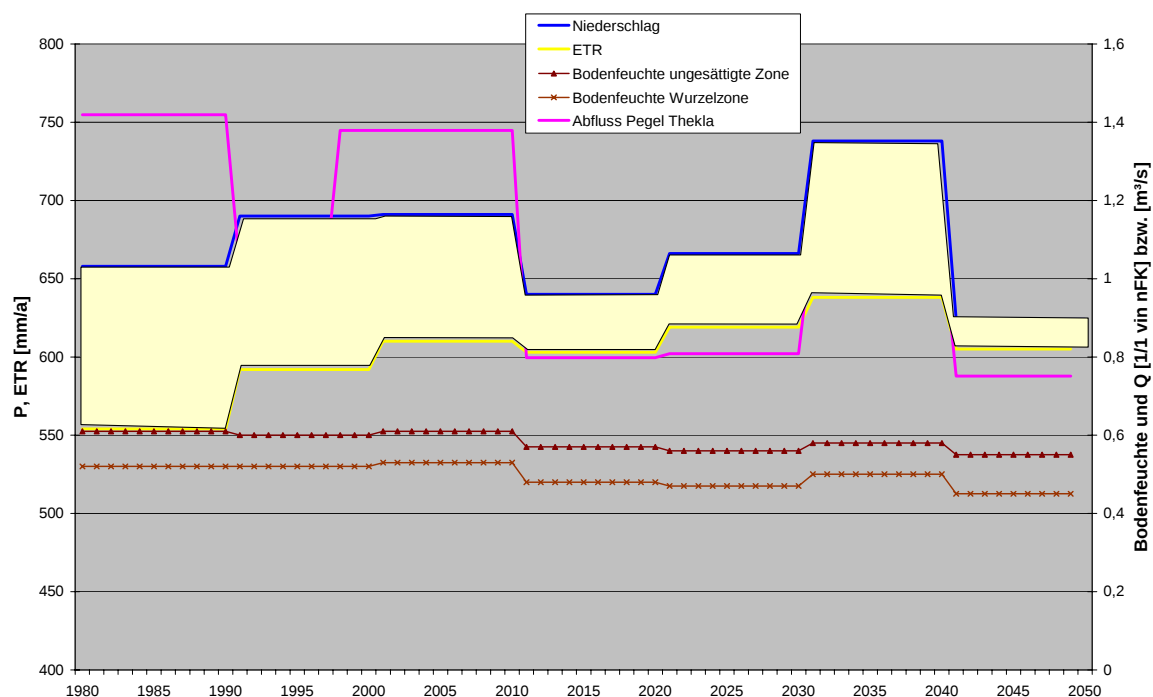


Abbildung 77: Bilanz Niederschlag, ETR und Abfluss

Diese summarischen Bilanzen sind für die Jahre 1984-1986 und 1994-1996 in der Tabelle 45 noch einmal aufgeschlüsselt.

In den Jahren 1984-1986 beträgt der Überschuss aus Niederschlag minus Verdunstung $90,044 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, die Summe aus dem Abfluss am Pegel Thekla und der durch die Wasserwerke Naunhof 1 und Naunhof 2 (WW 1 + 2) entnommenen Wassermengen, die sich nur aus diesem Überschuss rekrutieren können, $84,92 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Daraus ist ein Bilanzfehler von -6 % abzuleiten, der als minimal zu bezeichnen ist.

Für die Jahre 1994-1996 beträgt die Differenz in den Bilanzbetrachtungen gar nur -1,5 %. Beide Werte stellen einen sehr geringen Fehler dar und sind in den Bereich des "Rauschens" der Modellierung einzustufen.

Tabelle 45: Bilanzen 1984-1986 und 1994-1996

	[mm/a]			[10 ⁶ m ³]	[m ³ /s]	[10 ⁶ m ³]
	P	ETR	P - ETR	P - ETR	Q Thekla	WW 1+2
1984-1986	1.903	1.610	293	90,044	56,64	28,28
						84,92
						-6 %
1994-1996	2.221	1.756	465	143,4	113,0	28,28
						141,3
						-1,5 %

Im Schnitt der Dekaden beträgt der Bilanzfehler +34 % (Tabelle 46). Diese Größenordnung sollte den Fehlerbereich in der Summe der Modellierungsmethoden ausmachen.

Werden die Verdunstungshöhen aber als Beispiel nur um 5 % verringert, dann stellt sich ein Bilanzfehler von lediglich +6,4 % ein.

Tabelle 46: Bilanzen 1981-2050 (Dekadenwerte)

	[mm/a]			[1·10 ⁶ m ³ 10 a]	[m ³ /s]	[1·10 ⁶ m ³ 10 a]
	P	ETR*	P - ETR	P - ETR	Q Thekla	Q Thekla inkl. WW 1+2
1981-1990	658	526	131,7	406,505	1,419	447,4958
1991-2000	690	562	127,6	393,850	1,024	322,9286
2001-2010	691	580	111,5	344,156	1,379	434,8814
2011-2020	640	573	67,15	207,265	0,798	251,6573
2021-2030	666	588	77,95	240,600	0,808	254,8109
2031-2040	738	606	131,9	407,123	1,112	350,6803
2041-2050	624	575	49,25	152,015	0,751	236,8354
Summe				2.151,51		2.299,29
ETR* = ETR – 5 %						+6,4 %
ETR						+34,0 %

Diese kurzen Ausführungen zu den Bilanzen der Wassermengen im Untersuchungsgebiet sollen die Anwendbarkeit der verwendeten Ausgangsdaten, der Programmparameter sowie des Modellansatzes und der Modellierung mit WaSiM-ETH insgesamt belegen.

12 Zusammenfassende Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Klimatische Entwicklung:

Bei ca. gleichbleibenden Niederschlagssummen im Mess- und Prognosezeitraum (662 mm/a bzw. 660 mm/a) nehmen im Prognosezeitraum die Niederschläge in den Monaten Dezember bis Februar deutlich zu. In den Sommermonaten werden meist niedrigere Niederschläge erwartet. Die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen in den Sommermonaten nimmt zu, ebenso ihre Ergiebigkeit (bis 2003 maximale monatliche Niederschläge <150 mm, ab 2025 Einzelmonate mit >200 mm/Mon bis ca. 250 mm/Mon). In der Dekade 2031-2040 werden mit 738 mm/a die höchsten, in der Dekade 2041-2050 mit 624 mm/a die geringsten Niederschlagshöhen prognostiziert.

Die mittleren Tagestemperaturen für beide Perioden betragen 9,1 °C bzw. 10,4 °C. Im Prognosezeitraum werden für alle Monate höhere mittlere Tagestemperaturen prognostiziert. Der deutlichste Anstieg betrifft die Monate Dezember bis Februar.

Diese Ergebnisse decken sich im Wesentlichen mit den Ausführungen von Küchler (2004). Allerdings muss vermerkt werden, dass die WEREX-Daten der Meteo-Research GmbH im Verhältnis zu anderen Klimaszenarien (für Süddeutschland) um das Mehrfache höhere Winterniederschläge prognostizieren (Zimmermann, 2004).

Klimatische Wasserbilanz (KWB):

Die KWB fällt im Prognosezeitraum deutlich negativer aus als für den Messzeitraum. Im Jahresmittel treten in der Zukunft weniger häufig Jahre mit positiver KWB auf und es kommen häufig zusammenhängende Jahre mit negativer KWB vor. In den Monaten Dezember und Januar ist aber eine höhere KWB prognostiziert als für den Messzeitraum berechnet, in den Monaten Mai bis August ist für den Prognosezeitraum eine deutlich negativere KWB berechnet als für den Messzeitraum. Die Vergrößerung der positiven und negativen Abweichungen vom Istzustand wird sich direkt auf das Verhalten von Verdunstung, Bodenfeuchte und Abflüssen auswirken.

Die geänderte Flächennutzung im Prognosezeitraum (FN2050) bringt keine nennenswerten Unterschiede zum Flächennutzungsszenario Stand 1992 (FN92).

ETR:

Es lässt sich ein Trend einer geringen, aber stetigen Erhöhung der ETR bis zum Jahre 2050 ablesen. Der Unterschied zwischen den beiden Flächennutzungsszenarios ist bei der Betrachtung der jährlichen Verdunstungshöhen dabei fast unerheblich. In der Aufschlüsselung der monatlichen Verdunstungshöhen erbringt das prognostische Flächennutzungsszenario FN2050 deutlich höhere Verdunstung in den Sommer- und deutlich geringere Verdunstung in den Wintermonaten.

Aus der flächenmäßigen Darstellung der ETR sind Abhängigkeiten vom Grundwasserstand ersichtlich, indem Wald- und Landwirtschaftsflächen höhere Verdunstungsleistungen auf Flächen flurnahen Grundwassers aufweisen.

Im Vergleich der beiden Flächennutzungsszenarios FN92 und FN2050 weist das Prognoseszenario die etwas geringeren jährlichen ETR auf, wobei aber eine stärkere Differenzierung der Werte auf der Gesamtfäche zu erkennen ist.

Bodenwassergehalte:

Der Wassergehalt im Boden wird durch WaSiM-ETH als Anteil an der nFK ausgegeben.

Die Bodenwassergehalte sind in der Wurzelzone im Schnitt rd. 10 % niedriger als in der gesamten ungesättigten Zone. Ihre Schwankungsbreite ist in den oberflächennahen Bereichen deutlich höher als in den tieferen Bodenbereichen. In der Wurzelzone erreichen die mittleren Bodenwassergehalte Werte bis zu 80 % der nFK und können bis zu Werten von unter 20 % der nFK aufgebraucht werden. In der gesamten ungesättigten Bodenzone schwanken die mittleren Bodenwassergehalte lediglich zwischen rd. 45-65 % nFK. Die Tageswerte zeigen, dass in der Wurzelzone sowohl Tage mit Bodenwassergehalten am PWP, aber auch bei 100 % nFK simuliert werden. In der gesamten ungesättigten Zone werden bis 99 % nFK erreicht, bei der Ausschöpfung aber im Tagesmittel nur 28-29 % nFK. Unterschiede zwischen den beiden Flächennutzungsszenarios bestehen praktisch nicht.

Für beide Bereiche ist ein Trend kontinuierlich abnehmender Bodenwassergehalte sehr deutlich ausgeprägt. Für sie sind große Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren ersichtlich.

Die Bodenwassergehalte für die beiden Flächennutzungsszenarios zum Stand 1992 (FN92) und 2050 (FN2050) sind demselben Trend unterworfen und weisen im Prognoseszenario im Schnitt um 1-2 % geringere Gehalte auf als im Flächennutzungsszenario FN92. Offensichtlich weist die geänderte Flächennutzung im UG keinen bzw. sehr wenig Einfluss auf die mittleren Bodenwassergehalte auf.

Abflüsse im Gerinne:

Im Prognosezeitraum werden in allen Monaten geringere bis deutlich geringere MQ und MHQ berechnet, als im Messzeitraum festgestellt (Pegel Thekla). Beim HQ weisen die Monate März bis Mai niedrigere Werte im Prognosezeitraum auf, in den anderen Monaten höhere Werte als im Messzeitraum. Dieses entspricht den vorhergesagten meteorologischen Verhältnissen für den Prognosezeitraum, dass im Sommer die Häufigkeit und Intensität der Starkniederschlagsereignisse zunehmen wird, im Schnitt aber keine Erhöhung der Sommerniederschläge zu erwarten sein wird (Abbildung 9, Abbildung 10).

Da WaSiM-ETH meist zu geringe Trockenwetterabflüsse simuliert, sind Vergleiche der Niedrigwasserabflüsse derzeit wenig sinnvoll.

Der Vergleich der beiden Dekaden 1981-1990 und 2041-2050 zeigt, dass der HQ im Frühjahr im Messzeitraum mit rd. 18 m³/s fast doppelt so hoch ist wie im Prognosezeitraum. Dahingegen erreichen im Sommer die Prognose-HQ doppelt so hohe Werte wie 1981-1990.

Für das Flächennutzungsszenario FN2050 werden in allen Monaten höhere bis deutlich höhere MQ, MHQ und HQ prognostiziert als für das Szenario FN92. Das trifft auch auf die MNQ und NQ zu. Da WaSiM-ETH ab ca. 2030 für FN2050 einen knapp 1 m höheren Grundwasserspiegel prognostiziert, kann mehr Basisabfluss realisiert werden, was den NQ und MNQ ansteigen lässt. Die höheren Abflussspitzen sind sicherlich dem erhöhten Versiegelungsgrad bei FN2050 geschuldet.

Direkt-, Zwischen- und Basisabfluss:

Im Schnitt des gesamten UG betragen die jährlichen Direkt-, Zwischen- und Basisabflüsse rd. 40 mm, 37 mm bzw. 13 mm. Sie sind im Prognosezeitraum immer niedriger als im Messzeitraum. Mit der veränderten Flächennutzung FN2050 vergrößert sich der Oberflächenabfluss deutlich um rd. 40 %, wodurch Interflow und Basisabfluss deutlich zurückgehen. Gleichzeitig verändern sich auch die Anteile der verschiedenen Abflusskomponenten untereinander: der relative Anteil des Direktabflusses vergrößert sich von 47 % auf 57 %, die relativen Anteile von Interflow und Basisabfluss verringern sich von 39 % auf 31 % bzw. von 15 % auf 12 %. Diese Verhältnisse

sind sicherlich durch die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen begründet, die den Versiegelungsgrad der Gesamtfläche erhöhen.

Die Siedlungsflächen weisen insgesamt einen reichlich 10mal höheren Direktabfluss auf als die Landwirtschaftsflächen. Mit der Flächennutzungsänderung von FN92 zu FN2050 geht eine insgesamt etwas geringere Direktabflusshöhe einher (rd. 4 %, diese Größenordnung ist in den Fehlerbereich der Simulation einzuordnen).

Der Direktabfluss von Landwirtschaftsflächen nimmt im Flächennutzungsszenario FN2050 im Verhältnis zu FN92 ab. Der Betrag ist nicht groß. Er ist aber zu relativieren, wenn man die Unterschiede in der Ackerbelegung zwischen den beiden Szenarien kennt (z. B. erhöht sich der Anteil von Mais von FN92 zu FN2050 auf das Dreifache, wobei der Vegetationsbedeckungsgrad zu den Terminen d1 und d4 hier sehr viel geringer und demzufolge die Oberflächenabflussbereitschaft deutlich größer ist als bei anderen Kulturen).

Grundwasserneubildungsrate (GWN):

Im Messzeitraum liegt sie mit durchschnittlich 111 mm/a fast genau bei den Werten, wie sie von den Lysimetermessungen abgeleitet wurden (109 mm Eingangswerte Lysimeter für das Parthe-Modell von PCGEFIM). Im Prognosezeitraum steigt die mittlere GWN auf 148,8 mm/a. Im Schnitt des Gesamtzeitraumes beträgt die GWN 128,8 mm/a.

Im Zeitraum 2004-2035 wird für das prognostische Flächennutzungsszenario FN2050 immer eine höhere GWN simuliert als für das Szenario FN92. Ab 2035 kehrt sich diese Tendenz um und das Szenario FN2050 zieht stetig geringere GWN nach sich.

Siedlungsflächen weisen die geringste GWN auf, meist sind sie als Zehrflächen ausgewiesen. Die prognostische FN2050 ergibt keine Änderung der mittleren GWN. Durch ihren erhöhten Flächenanteil aber wird die Fläche mit Zehrung ebenfalls erhöht.

Die **Grünlandflächen** haben eine GWN, die bei rd. 70 % der GWN der Ackerflächen liegt.

Die **Ackerflächen** besitzen im langjährigen Schnitt eine GWN von 118 mm/a. Mit dem Einsatz der konservierenden Bodenbearbeitung zum Flächennutzungsszenario FN2050 erhöht sich die GWN um rd. 34 %. Diese Steigerung ist durch die gewählte Parameteränderung erklärbar (erhöhte Infiltration in den Boden).

Die mit **Wald** bestandenen Flächen ergeben im Schnitt die höchsten GWN. Das ist an sich nicht zu erklären, da die Flächen ansonsten die höchste ETR, die negativste KWB und die maximalen Interzeptionsverdunstungen aufweisen.

Grundwasserflurabstand:

Insgesamt sinken die mittleren GW-Stände im Zeitraum von 1980-2050 um rd. 2 m ab. Allgemein ist eine Abhängigkeit der Flurabstände von den langjährigen Niederschlagsereignissen ersichtlich. So sinken die GW-Stände nach 2-3 Jahren deutlich geringerer Niederschläge schnell um 8-10 dm ab.

Im Vergleich der beiden Flächennutzungsszenarios ist anfangs (2012) bis ca. 2030 eine Entwicklung der Flurabstände auf gleichem Niveau ersichtlich. Ab 2030, der Dekade mit den höchsten Niederschlagssummen, steigt die mittlere GW-Oberfläche um rd. 8 dm. Dafür könnten einerseits die erhöhten Winterniederschläge und andererseits die in der konservierenden Bodenbearbeitung begründeten erhöhten Infiltrationsraten verantwortlich sein. Am Ende dieser Dekade fallen die GW-Stände um rd. 2-3 dm ab, um bis zum Ende der Prognoseetappe 2050 wiederum parallel der Kurve von FN92 zu verlaufen.

Der mittlere GW-Stand mit dem Flächennutzungsszenario FN2050 sinkt zwischen 2004 und 2050 um rd. 1,5 m ab und wiederholt damit genau den Trend des Szenarios FN92.

Schlussfolgerungen:

Es wird eingeschätzt, dass die geänderte Flächennutzung FN2050 im Vergleich zur Flächennutzung FN1992 bei der Betrachtung des gesamten UG keinen bzw. sehr wenig Einfluss auf die mittleren Bodenwassergehalte aufweist. Für das gesamte UG scheinen sich die Auswirkungen von erhöhter Flächenversiegelung, Waldmehrung mit veränderten Bestandeszieltypen und geänderter Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen (bodenkonservierende Bearbeitung einerseits und deutliche Erhöhung der Maisanbaufläche andererseits) auf die durchschnittliche Bodenfeuchtigkeit aufzuheben.

Der Widerspruch zwischen steigenden GWN und sinkenden GW-Ständen ist derzeit nicht befriedigend erklärbar. Eventuell ist dies auf die nicht adäquate Reaktion von WaSiM-ETH auf die Kopplung mit dem externen Oberflächen-/Grundwassermodell PCGEFIM zurückzuführen.

Verbesserungen im BWH-M WaSiM-ETH sind notwendig, um die begonnene Kopplung mit dem externen GW-M mit weiteren Kalibrierungen so zu verbessern, dass belastbarere Ergebnisse zur zeitlichen Entwicklung der verschiedenen Parameter, wie Abflüsse in den Vorfluter, Grundwasserstände, Grundwasserneubildungsraten usw. erzielt werden können:

Verbesserung der Abflusskalibrierung, indem Basisabfluss erhöht und Interflow verringert werden;

- Verbesserungen der Parametrisierung:

Themen:

- Siedlungsflächen auf geologischen Einheiten (Problem: zu hohe Abflussspitzen, geringere Infiltration),
- Konservierende Bodenbearbeitung (evtl. auch andere Bodenschichtung als bisher „normal“ einführen),
- Parameter zur Waldnutzung,
- Möglichkeiten der Verringerung der Flächennutzungsparameter.

Zur Weiterentwicklung des gekoppelten Modells sind folgende Aktivitäten notwendig:

- Anpassungsarbeiten an WaSiM-ETH
 - Bodentabelle 2 lauffähig machen,
 - Programm ist im Debug-Modus und hat deshalb lange Laufzeiten, es sollte in den optimierten Modus überführt werden,
 - verdunstungsrelevante Parameter der Flächennutzung sollten nicht nur mit 4, sondern mit min. 12 Stützstellen pro Jahr zu beschreiben sein und das für mehrere Jahre in Folge,
 - Steuerbarkeit der Grundwasserneubildung (Basisabfluss) bei angeschaltetem Grundwassermodell, d. h. Berechnung der Höhe der Grundwasserneubildung (Basisabfluss) nicht aus der Grundwasserstandsänderung,
 - Ausgabe der Grundwasserneubildung als Wassermenge, die bis zur Grundwasseroberfläche gelangt, als Grid
 - Möglichkeit der Versickerung von Interflow und Direktabfluss auf dem Weg zu einem Vorfluter fehlt,
 - Ausgabe der gerouteten Wassermengen und Aufspaltung in die einzelnen Abflusskomponenten (Direktabfluss, Interflow, Basisabfluss) im Gerinne an jedem Gerinneabschnitt als Grid wird benötigt.
- Fortführung der Kalibrierung, beginnend mit kleinen TEN und verringerter Gridzellengröße unter Beachtung der o. g. Themen zu Parametrisierung und Kalibrierung.
- Weiterhin sollte nicht versäumt werden, die gesamte Schwankungsbreite der prognostizierten meteorologischen Parameter ("Wiederholungsvarianten 00 bis 09") als Grundlage der Modellierungen mit WaSiM-ETH zu benutzen. Damit wäre eine weitere, bisher nicht zu quantifizierende Einflussgröße auf die Prognoseergebnisse des BWH-M und GW-M berücksichtigt.

Die Kopplung WaSiM-ETH und PCGEOFIM ergab im Grunde ausgezeichnete Ergebnisse.

Die Aufgabenstellung, die hauptsächlich den Aufbau, die Parametrisierung und Kalibrierung des BWH-M umfasste, konnte erfüllt werden. Das zwischenzeitliche Flächennutzungsszenario 2025 ist nicht in die Modellierungen einbezogen worden, da die Unterschiede zwischen den Szenarios 1992 und 2050 sich als nicht so groß darstellten. Wenn die WaSiM-ETH-Modellanpassungen, weitere Kalibrierungen und die Einbeziehung aller prognostischen meteorologischen Parameter durchgeführt und belastbarere Ergebnisse erhalten worden sind, kann über die Modellierung von Zwischenstufen der Flächennutzungsänderung nachgedacht werden.

Wenn in die Weiterentwicklung des Modells ebenso viel Kraft gesteckt werden kann wie in das GW-M PCGEOFIM/Parthe in den letzten Jahren, dann wird auch das WaSiM-ETH/Parthe zu einem hervorragenden Werkzeug für die Nachbildung des Wasserhaushaltes im Parthegebiet werden und immer mehr die Möglichkeit bieten, auf die vielfältigen Vorgaben der Klimaprognose durch Szenariorechnungen bezüglich unterschiedlicher Flächennutzungen usw. Antworten zu geben.

13 Literatur

- HERTWIG, Th. (2002): Bodenwasserhaushalts- und Sickerwassermodell für 9 verschiedene Böden der Lysimeterstation Brandis. Beak Consultants GmbH, Freiberg, im Auftrage der staatlichen Umweltbetriebesgesellschaft Radebeul. Freiberg, 23.08.2002.
- NITSCHKE, C. (2001): Sickerwasserprognose, Teil 1: Laborative Untersuchungen. – Materialien des DGFZ e. V.
- DREYHAUPT, J. (2002): Die Bedeutung der Heterogenität von Boden, Klima und Landnutzung für die Regionalisierung von Modellzustandsgrößen. Dissertation; Lehrstuhl Bodenkunde und Bodengeographie Uni Bayreuth. Bayreuth, Juni 2002.
- ZÖRNER, D. (2003): Modellierung des Wasserhaushaltes und Betrachtung ausgewählter Wasserbeschafftheitsparameter an einem Waldstandort im Parthe-Einzugsgebiet. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum.
- PÖHLER, H. (in Vorb): Niederschlags-Abfluss-Modellierung im Einzugsgebiet der Roten und Wilden Weißeritz unter dem Aspekt von Nutzungs- und Klimaänderungen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum.
- HAGEDORN, C. (2003): Kalibrierung des Wasserhaushalts-Simulationsmodells WaSiM-ETH für das Einzugsgebiet des Reichstädter Bachs. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 1995.
- ENKE, W. (2004): Abschlussbericht zum Forschungsthema: Teil I: Erweiterung des Simulationszeitraumes der wetterlagenbasierten Regionalisierungsmethode auf der Basis des ECHAM4-OPYC3-Laufes für die Dekaden 2001/2010 und 2011/2020, Szenario B2 für Sachsen. Teil II: Repräsentativitätsuntersuchungen von Klima- und Niederschlagsstationen für das Einzugsgebiet der Parthe im Rahmen von KLiWEP. Meteo-Research, Waltraudstraße 20, 14532 Stahnsdorf, Juli 2004. Im Auftrage des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.
- SOMMER, Th. (2003): Modellierung der Auswirkungen von Landnutzungs- und Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt des Einzugsgebietes der Elbe (Teil Grundwassermodellierung). Einzelvorhaben 3.3 des Teilprojektes 3 ("Unstrutgebiet") des BMBF-Forschungsprojektes "GLOWA-Elbe". Dresden, 31.10.2003.
- KRÖNERT, R. u. a. (1999): Gebietswasserhaushalt und Stoffhaushalt in der Lößregion des Elbegebietes als Grundlage für die Durchsetzung einer nachhaltigen Landnutzung (BMBF FKZ: 0339586). UFZ Leipzig-Halle GmbH, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Staatliche Umweltbetriebesgesellschaft, Lysimeterstation Brandis. Statusbericht, Leipzig, Halle, Dresden 30.04.1999.
- BIEMELT, D. u. a. (2003): Entwicklung des Oberflächenabflussverhaltens und der Erosion in verschiedenen Stadien der Kippenentwicklung (Sektoralmodell OFFENLAND) im SFB 565 "Entwicklung und Bewertung gestörter Kulturlandschaften" – Fallbeispiel Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft. Arbeitsstand Mai 2003.
- SIEKER, F. (2002): Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße. Endbericht DBU-Projekt AZ 15877. Februar 2002.
- ZIMMERLING, B. u. a. (2001): Wasserinfiltration auf konventionell und konservierend bearbeiteten Ackerböden bei Simulation von Intensivniederschlägen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 96, H. 2, S. 791-792.
- PIEPHO, B. (2003): Untersuchungen zum hydrologischen Reaktionsverhalten eines kleinen Einzugsgebietes unter Verwendung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH - Eine Fallstudie im Rahmen des IPMS-Projektes in Nepal. Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. 27.06.2003.
- ATV-DVWK-Regelwerk (2002): Merkblatt ATV-DVWK-M 504: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. September 2002.

- DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft (238/1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 1996.
- MÜNCH, A. & I. DITTRICH (2004): Hochwasserminderung und Wasserhaushaltsänderung durch Aufforstung und Waldumbau in den Einzugsgebieten des Osterzgebirges. Teil 2: Parametrisierung von Waldtypen für das Wasserhaushaltsmodell AKWA-M. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH im Auftrage der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen. Unveröffentlichter, vorläufiger Zwischenbericht, Bearbeitungsstand 12.06.2004.
- KUMMER, Y. (2004): Zusammenstellung ausgewählter Parameter von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Literaturzusammenstellung zu Albedo, LAI, Vegetationshöhe, Bedeckungsgrad, Wurzeltiefe und Stomatawiderständen. 25.06.2004-10-21.
- SCHULLA, J. & K. JASPER (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH (Wasserhaushalts-Simulations-Modell ETH). ETH Zürich. Stand 21.12.1998.
- SCHULLA, J. & K. JASPER (2000): Model Description WaSiM-ETH (Water balance Simulation Model ETH). Zürich, 16.10.2000.
- <http://www.gkb-ev.de/konservierende%20BB/%F6kologische%20Vorteile.pdf>
- KATZENMAIER, D. FRITSCH, U., BRÖNSTERT, A. (2000): Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung und dezentraler Versickerung auf die Hochwasserentstehung – <http://www.umweltbundesamt.de/wasser/veroeffentlich/download/29724508>, Stand: Mai 2003.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen (Dissertation an der ETH Zürich).
- KÜCHLER, W. (2004): Projektion des Klimawandels in Sachsen für die Dekade 2041 – 2050. Wasser und Abfall **11** 2004, S. 10 – 14.
- ZIMMERMANN, L. u. a. (2004): Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von süddeutschen Flussgebieten. Wasser und Abfall **11** 2004, S. 15 – 19.
- HUPFER, P. & W. KUTTLER (1998): Witterung und Klima, Teubner-Verlag, Stuttgart, 413 S..
- PEIXOTO, J.P. & A.H. OORT (1992): Physics of Climate. American Institute of Physics, New York.
- WEISCHET, W. (2002): Einführung in die Allgemeine Klimatologie- Physikalische und meteorologische Grundlagen. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin. 276 Seiten.
- METEOSAT: <http://www.geografforlaget.dk/course/ENGLISH/basic/vejsat.htm>
- LANDSAT-TM: http://www.unibas.ch/geo/mcr/Projects/ERSCLIP/res_alb.dt.htm
- MÜNCH, A. (1994): Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung, Dissertation TU Dresden, 159 S.
- FREY, W. & R. LÖSCH (1998): Lehrbuch der Geobotanik. Gustav Fischer Verlag Stuttgart, 436 S.
- ANDERSON, E.A. (1973): National Weather Service river forecast system - snow accumulation and ablation model. *National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), Tech. Mem., NWS-HYDRO-17, U. S. Department of Commerce*, Silver Spring, MD. 217 S.
- BRAUN, L.N. (1985): Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. *Zürcher Geographische Schriften, ETH Zürich*, 21, 166 S.
- GREEN, W.H. and AMPT, G.A. (1911): Studies on Soil Physics: I. The flow of air and water through soils, *Journal of Agricultural Sciences*, 4, S. 1-24.
- Van GENUCHTEN, M.T. (1976): A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sciences Society of American Journal*, Vol. 44(5), S. 892-898.
- DYCK, S. und PESCHKE, G. (1989): Grundlagen der Hydrologie. 2. Aufl., Verlag für Bauwesen, Berlin, 408 S.

Weiterführende Literatur zum Thema:

- HAFERKORN, U. (2000): Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Dissertation. Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen. 22.06.2000.
- GEISLER, A. (1997): Auswertung von Lysimeterdaten im Hinblick auf die Wasser- und Stoffflüsse innerhalb von rekultivierten Kippen des industriellen Braunkohlenbergbaus. Diplomarbeit. Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Grundwasserwirtschaft der Technischen Universität Dresden. Dresden, 23.12.1997.
- KEESE, U. & S. KNAPPE (1996): Problemstellung und allgemeine Angaben zu vergleichenden Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. Arch. Acker-Pfl. Boden., Vol. 40, pp. 409-429.
- KEESE, U, C. NITSCHKE, S. KNAPPE und U. WALDSCHMIDT (1997): Vergleichende bodenphysikalische Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. I. Mitteilung: Ermittlung bodenphysikalischer Kenngrößen. Archives of Agronomy and Soil Science, 1997, Vol. 41, pp. 209-231.
- MATERIALIEN zur Wasserwirtschaft (2002): Grundwassersituation in Sachsen 1996 – 2000 – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, März 2002.
- KNAPPE, S., U. HAFERKORN und R. MEISSNER (2002): Influence of different agricultural management systems on nitrogen leaching: results of lysimeter studies.- J. Plant Nutr. Soil Sci. (2002), 165, 73-77.
- DUNGER, V. (2002): Dokumentation des Modells BOWAM (Version 2002 zur Simulation des Wasserhaushaltes in der wasserungesättigten Bodenzone (Aerationszone)).- Langenau, 05/2002.
- HERTWIG, TH. (2001): Auswerte- und Handlungskonzept für Boden-Dauerbeobachtungsflächen. Bericht BDF II Colditz. Beak Consultants GmbH, Freiberg, im Auftrage der staatlichen Umweltbetriebgesellschaft Ra-debeul. Freiberg, 29.03.2001
- SIMUNEK, J.; M. SEJNA, and M. TH. van GENUCHTEN (1998): The HYDRUS1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variable-saturated media. Version 2.01. U. S. Salinity Laboratory, ARS-USDA, Riverside, CA
- RAMSBECK-ULLMANN, M. und U. FRANKO (1999): Der Einfluss der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. 8. Gumpensteiner Lysimetertagung, 13. und 14. April 1999.
- HAFERKORN, U, K. MÜLLER und S. KNAPPE (2003): Möglichkeiten und Grenzen der Stofftransportmodellierung (Nitrat) am Beispiel des Einzugsgebiets der Parthe. 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, 29. und 30. April 2003.
- SCHRAMM, D. (2004): Quantifizierung des Abflussverhaltens im Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung. Diplomarbeit (eingereicht), TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum.
- SEQUEIRA, M. (2003): Landnutzungsänderungen und deren Folgen auf den Wasserhaushalt – Niederschlags-Abfluss-Modellierungen im Einzugsgebiet der Weißeritz, Sachsen. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum.

Vorschlag zur Anbindung eines Stickstoffmodells in der ungesättigten Zone:

WaSiM-ETH ist in der Lage, Tracer zu modellieren, z. B. Salze, radioaktive Tracer oder ähnliches. Über die Angabe von Halbwertszeiten kann der Abbau der Substanzen berücksichtigt werden. Außerdem kann berücksichtigt werden, ob der Stoff verdunstet oder nicht. Da allerdings Stickstoff nicht einem solchen Abbau unterliegt, sondern andere hochkomplexe Prozesse ablaufen, kann sein Transport nicht einfach über dieses Modul im Modell berechnet werden. Zudem wird hier lediglich Stofftransport in den Abflussrinnen, sprich in den oberirdischen Gewässern, modelliert.

Es gibt bereits einen Modellansatz (ASGi), mit dem der laterale Stofftransport (Sediment, P, N) in Oberflächengewässern gekoppelt mit der N-A-Berechnung durch WaSiM-ETH flächendetailliert modelliert werden kann. Genutzt wird dafür allerdings eine ältere Form des WaSiM-ETH, in der ausschließlich mit dem TOPMODEL-Ansatz gerechnet wird. Gekoppelt wird daran das Modell AGNPS (Agricultural Nonpoint Source, entwickelt von USDA-ARS North Central Soil Conservation Research Laboratory in Morris, Minnesota). Näheres, allerdings nicht sehr detailliert, ist zu erfahren unter

- MOLNAR, T., H.-B. KLEEBERG, K. JASPER et al. (1996). ASGi - ein GIS-gestütztes hydrologisches Modellsystem. In: P. MANDL, Hg., Modellierung und Simulation räumlicher Systeme mit Geographischen Informationssystemen. Workshop-Unterlagen zu Informatik '96 / GISMODSIM am 23.09.1996 in Klagenfurt. URL <http://www.uni-klu.ac.at/groups/geo/gismosim/paper/molna/molna.htm> (Stand 07.06.97).
- <http://www.bayern.de/lfw/technik/gkd/kurzinfo/untersuch/asgi/>,
- http://www.bauv.unibw-muenchen.de/institute/inst6_2/

Die Programmdokumentation ist nicht veröffentlicht. Zu der Aufgabenstellung, wie sie oben erläutert ist, gibt es keine Veröffentlichung.