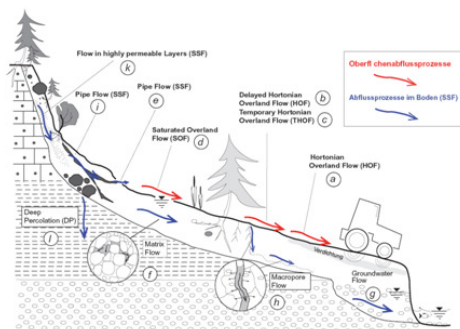
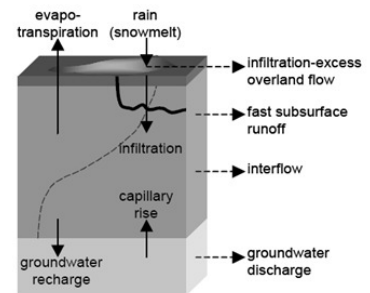


Integration des Abflusspotenzials in das LARSIM-Bodenmodul mit erweiterten Parametern



Aus: Scherrer (1997)



Aus: Haag et al. (2006)

Auftraggeber: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht
Rheinland-Pfalz

Bearbeitung: Dr.-Ing. Ingo Haag-Wanka
Dipl.-Ing. Annette Luce

Berichtsstand: Erstfassung 29.10.2010

Integration des Abflusspotenzials in das LARSIM-Bodenmodul mit erweiterten Parametern

Inhalt

Seite

Zusammenfassung	1
1. Aufgabenstellung	4
2. Datengrundlage und Datenaufbereitung	5
3. Modellkonzept.....	6
3.1 Grundlagen des Konzepts	6
3.2 Das neue Infiltrationsmodul.....	10
3.3 Die Preferential-Flow-Function.....	13
3.4 Anpassung der vertikalen Versickerung	14
3.5 Anpassung der lateralen Drainage zum Gebietsspeicher für Interflow.....	17
3.6 Charakteristische Parameterwerte der bodenhydrologischen Typen	18
3.7 Nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung (Moor bzw. DP=)	22
3.8 Spezielle Landoberflächen	24
4. Beschreibung der Option BODENMODUL Q-TYPEN und der Datei boden.par	25
4.1 Die Option BODENMODUL Q-TYPEN	25
4.2 Die Datei boden.par zur Parametrisierung der Abflusstypen	27
5. Beispielhafte Simulationen mit dem neuen Modellkonzept.....	29
5.1 Ziele und Vorgehensweise bei den Simulationen.....	29
5.2 Untersuchungsgebiete	30
5.3 Umgang mit nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung (DP=) und Grundparametrisierung	34
5.4 Eichung der Untersuchungsgebiete	37
5.5 Vergleich mit dem bisherigen Modell.....	48
6. Folgerungen und Empfehlungen	57
Literatur	58

Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollte das Konzept des Abflusspotenzials soweit möglich in das Wasserhaushaltsmodell LARSIM integriert werden. Hierzu mussten die folgenden Teilaufgaben bearbeitet werden:

- Änderung des Modellkonzepts des Bodenmoduls von LARSIM, um die Integration der Abflussprozesstypen auf der Skala der Unterteilgebiete (Boden-Landnutzungs-Kompartimente) zu ermöglichen. Dabei sollte die grundlegende konzeptionelle Berechnungsweise des Bodenmoduls jedoch nicht geändert werden.
- Modelltechnische Umsetzung der veränderten Konzeption innerhalb des Wasserhaushaltsmodells LARSIM.
- Test und beispielhafte Anwendung des erweiterten Modells auf zwei ausgewählte Einzugsgebiete im Nahegebiet.

Für die Integration der Informationen zum Abflusspotenzial in das Wasserhaushaltsmodell LARSIM waren weitgehende Modifikationen des LARSIM-Bodenmoduls erforderlich. Diese umfassen im Wesentlichen das Folgende:

- Integration eines neuen robusten und zugleich vielseitigen Infiltrationsmoduls, mit dem die Entstehung von Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss (Horton Overlandflow) und auf Sättigungsflächen (Saturation Overlandflow) simuliert werden kann.
- Modifikation der bisherigen Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (BSF), so dass diese als Preferential-Flow-Function (PFF) zur Ausscheidung von schnellem unterirdischem Abfluss genutzt werden kann.
- Anpassung der Drainagefunktionen für Interflow und Basisabfluss an die realen bodenphysikalischen Verhältnisse. Mit dem erweiterten Ansatz nimmt die Drainagerate bei Bodenwassergehalten über der nutzbaren Feldkapazität exponentiell zu.
- Die entscheidenden Parameter des Bodenmoduls werden durch eine abflussprozesstypische Grundparametrisierung festgelegt. Diese Grundparametrisierung kann über Eichfaktoren pegelkontrollbereichsspezifisch angepasst werden. Somit ist einerseits gewährleistet, dass die Unterschiede zwischen den Abflussprozesstypen innerhalb eines Pegelkontrollbereichs erhalten bleiben, andererseits jedoch eine Anpassung an die gemessenen Abflüsse möglich bleibt.
- Für den als „nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung“ (DP=) bezeichneten Abflussprozesstyp wurde ein gesonderter Modellansatz abgeleitet, der sich an der Reaktionsweise von horizontalen Moorflächen orientiert.

Die genannten konzeptionellen Änderungen wurden mit der neuen Option BODENMODUL Q-TYPEN modelltechnisch in das Wasserhaushaltsmodell LARSIM integriert und auf ihre korrekte Funktionsweise getestet. Für die Anwendung der Option ist zusätzlich eine Konfigurationsdatei mit der Grundparametrisierung der einzelnen Abflussprozesstypen vorzuhalten. Die neue Option sowie die neue Konfigurationsdatei BODEN.PAR wurden in der LARSIM-Online-Hilfe beschrieben.

Das weiterentwickelte Modell wurde beispielhaft für die beiden folgenden Einzugsgebiete im Nahegebiet kalibriert und angewandt:

- Kronweiler / Schwoillbach (65 km²)
- Kellenbach / Simmerbach (362 km²)

Die wesentlichen Ergebnisse aus dieser beispielhaften Modellanwendung und des Vergleichs mit dem bisherigen Modell lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der neue Modellansatz kann unter Berücksichtigung der Abflussprozesstypen so kalibriert werden, dass die Abflussreaktionen an den Pegeln ähnlich gut nachgebildet werden wie mit dem bisherigen Modellansatz.
- Auf der Grundlage numerischer Experimente und der Erfahrungen mit den beiden Testgebieten konnte eine Grundparametrisierung für die Abflussprozesstypen abgeleitet werden, die für LARSIM in einer Berechnungsschrittweite von einer Stunde gilt. Mit dieser Grundparametrisierung können die charakteristischen Reaktionen der unterschiedlichen Abflussprozesstypen nachgebildet werden.
- Der für horizontale Moorflächen abgeleitete Modellansatz kann offenbar nicht für alle als „nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung“ (DP=) klassifizierten Bereiche angewandt werden. Mit einer alternativen Grundparametrisierung für diese Flächen können zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Die tatsächliche hydrologische Reaktion auf diesen DP=-Flächen ist jedoch unklar.
- Die zeitliche Dynamik des (grundwasserbürtigen) Basisabflusses kann mithilfe des neuen Modellansatzes offenbar realitätsnäher nachgebildet werden als mit dem bisherigen Ansatz.
- Es ist davon auszugehen, dass die räumliche Verteilung der Abflussdynamik innerhalb der Pegelkontrollbereiche mit dem erweiterten Ansatz ebenfalls realitätsnäher abgebildet wird als mit dem bisherigen Modell (dies wurde bislang jedoch nicht im Detail untersucht).
- Aus den bislang vorliegenden Ergebnissen ergeben sich keine eindeutigen Hinweise darauf, dass Hochwasserabflüsse mithilfe des neuen Modellkonzepts besser nachgebildet (und vorhergesagt) werden können.

Mit Blick auf das weitere Vorgehen leiten sich hieraus vor allem folgende Empfehlungen ab:

- Die grundlegende Umsetzung der kartierten Abflussprozesstypen in LARSIM und die bislang vorliegenden Ergebnisse sollten mit dem Entwickler des Konzepts der Abflussprozesstypen (S. Scherrer) und den Kartierern im Nahegebiet (Soilution) besprochen werden.
- Insbesondere die hydrologische Interpretation der „nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung“ sollte im Dialog mit den oben genannten Partnern geklärt werden. Die hier abgeleitete Grundparametrisierung dieser DP=-Flächen scheint als Zwischenlösung praktikabel, allerdings wird sie den realen Prozessen vermutlich nicht gerecht. Daher sollte auf Grundlage des Dialogs die Grundparametrisierung dieser Flächen oder die eventuell kleinräumigere Nutzung des Mooransatzes nochmals kritisch überarbeitet werden.

- Im Zusammenhang mit der korrekten Interpretation der DP=-Flächen muss insbesondere das Gebiet Kellenbach / Simmerbach nochmals überarbeitet werden. Sofern eine Nutzung des Modells für den operationellen Einsatz angestrebt wird, muss hierbei insbesondere auf den derzeit auftretenden Zeitverzug geachtet werden.
- Nach der endgültigen Festlegung der Grundparametrisierung (auch für die DP=-Flächen) und der Überarbeitung der beiden Modellgebiete, sollten weitere Analysen durchgeführt werden. Von besonderem Interesse erscheint hierbei folgendes:
 - Aussagen zur räumlichen Verteilung der Abflussdynamik z.B. unter Berücksichtigung des Pegels Steinbach / Simmerbach.
 - Detailanalysen der zeitlichen Dynamik unterschiedlicher Abflusskomponenten (z.B. der Tiefenversickerung) und Beurteilung hinsichtlich ihrer Plausibilität.
 - Aussagen zur möglichen Verbesserung der Abflussvorhersage (insbesondere für Hochwasser) mit dem neuen Modellansatz.

Karlsruhe, 29.10.2010

HYDRON GmbH



Dr.-Ing. Ingo Haag-Wanka

1. Aufgabenstellung

Im WHM LARSIM besteht die Möglichkeit, die Infiltration in den Boden unter stark vereinfachten Annahmen mithilfe eines Ansatzes zu simulieren, der auf dem exponentiellen Infiltrationsmodell nach Horton basiert. Dieser Ansatz wurde entwickelt und implementiert, bevor es möglich war, erweiterte Bodenparameter im Gebietsdatensatz von LARSIM zu berücksichtigen.

Zwischenzeitlich sind in den Wasserhaushaltsmodellen für Rheinland-Pfalz nun erweiterte Bodenparameter verfügbar. Innerhalb dieses Konzepts ist für das Nahegebiet auch das bodenhydrologische Potenzial in der Gebietsdatei verfügbar. Daher sollen die zusätzlichen Informationen und hier insbesondere das bodenhydrologische Potenzial zur Verbesserung des Infiltrationsmoduls bzw. des gesamten Bodenmoduls genutzt werden.

In LARSIM wird der Bodenwasserhaushalt über ein vereinfachtes nulldimensionales Modul abgebildet. In diesem Modul ist es nicht möglich, Infiltrationsfronten oder ähnliches explizit abzubilden. Der Bodenwasserhaushalt ist vielmehr durch das maximale Speichervermögen W_m , den aktuellen Wassergehalt im gesamten betrachteten Boden W und den residualen Wassergehalt W_0 gekennzeichnet.

Das existierende einfache Infiltrationsmodul folgt dem Horton-Ansatz, wobei anstelle der Zeit die relative Füllung des Bodenspeichers für das aktuelle Infiltrationsvermögen des Bodens herangezogen wird. Das Infiltrationsmodell hat die drei Parameter i_{\max} (maximale Infiltrationskapazität bei leerem Bodenspeicher), i_{\min} (minimale Infiltrationskapazität bei vollem Bodenspeicher) und b_{\inf} (Formparameter der Exponentialfunktion).

Die erweiterten Bodenparameter enthalten Angaben zum dominanten bodenhydrologischen Abflusstyp (bodenhydrologisches Potenzial, Scherrer-Typ) und folgende zusätzlichen Informationen: nutzbare Feldkapazität (nFK), Luftkapazität (LK), hydraulische Leitfähigkeit (kf-Wert) und Bodenform (BOFA-Kennung).

Ziel der Verbesserung ist es, das Infiltrationsmodul oder nötigenfalls Teile des gesamten Bodenmoduls unter Berücksichtigung des bodenhydrologischen Potenzials zu parametrisieren, um das charakteristische Abflussverhalten der Unterteilgebiete gemäß ihrer bodenhydrologischen Typen abzubilden.

Zunächst ist ein Konzept abzuleiten, mit dem es möglich wird, die Unterschiede in der Abflussreaktion der bodenhydrologischen Typen innerhalb des LARSIM-Bodenmoduls abzubilden. Hierfür sind die sehr unterschiedlichen Voraussetzungen des stark vereinfachten Bodenmoduls einerseits sowie der bodenhydrologischen Typen und der erweiterten Bodenparameter andererseits in Einklang zu bringen.

Die Konzeption stellt die Grundlage für die programmtechnische Umsetzung innerhalb von LARSIM dar. Nach der programmtechnischen Weiterentwicklung von LARSIM, soll das erweiterte Programm beispielhaft auf zwei kleine Einzugsgebiete im Nahegebiet angewandt werden. Die Ergebnisse der Kalibrierung und Simulation dienen als Grundlage für Empfehlungen zum weiteren Vorgehen.

2. Datengrundlage und Datenaufbereitung

Alle für die vorliegende Studie verwendeten Daten wurden vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz LUWG (Herrn Demuth oder Herrn Lehman) zur Verfügung gestellt. Die Arbeiten wurden zudem eng mit Herrn Demuth vom LUWG sowie in Teilbereichen mit Herrn Gronz von der FH / Uni Trier abgestimmt.

Für die Bearbeitung standen dabei im Einzelnen folgende Unterlagen und Daten zur Verfügung:

- Tabelle der Bodenformen in Rheinland-Pfalz (NRBF) inklusive zugehöriger Legende.
- ESRI-Shape-File mit den zugrunde liegende Bodenkennwerten.
- Gebietsdatei (Tape12) für das Nahegebiet mit erweiterten Bodenparametern inklusive der Abflussprozessstypen.
- Stundenwerte der gemessenen Abflüsse an den Pegel Kronweiler/Schwollbach und Kellenbach/Simmerbach für den Zeitraum 1993 bis 2008.
- Mithilfe des Programms InterMet regionalisierte Stundenwerte der meteorologischen Größen Niederschlag, Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Luftdruck für den Zeitraum 1993 bis 2003.
- ESRI-Shape-File des für die Regionalisierung verwendeten Rasters.
- IfU (2004): Analyse der Auswirkungen dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen mit hochauflösenden Wasserhaushaltsmodellen. Ingenieurbüro Ludwig, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Bearbeiter: Haag, Luce, Gerlinger).
- LUWG (2006): Bodenhydrologische Karte Nahe / Rheinland-Pfalz Südwest. Bericht der Soilution GbR im Auftrag des LUWG (Bearbeiter: Steinrücken, Behrens), Stand 12/2006.
- LUWG (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Bericht 18/2006 des LUWG (Bearbeiter: Scherrer).

Neben diesen vom Auftraggeber bereitgestellten Unterlagen, die unmittelbar zur Bearbeitung genutzt wurden, wurden aufbereitete Informationen bzw. grafische Darstellungen zu den beiden hier untersuchten Einzugsgebieten Kronweiler / Schwollbach und Kellenbach / Simmerbach durch Herrn Gronz (FH / Uni Trier) zur Verfügung gestellt. Diese werden in Abschnitt 5.2 zur Beschreibung der beiden Untersuchungsgebiete genutzt.

Über die oben aufgeführten Berichte hinaus wurde weitere Literatur genutzt, die im Einzelnen im Literaturverzeichnis am Ende des Berichts aufgeführt ist.

3. Modellkonzept

3.1 Grundlagen des Konzepts

Das grundlegende Ziel der Modellkonzeption ist es, die unterschiedlichen Abflussreaktionen der bodenhydrologischen Typen auf intensive, ergiebige Niederschläge mithilfe des Bodenmoduls von LARSIM nachzubilden. Dabei wird in den erweiterten Bodenparametersätzen für die Nahe insgesamt zehn unterschiedliche bodenhydrologische Typen unterschieden (LUWG 2006a), die in Tabelle 3.1 näher erläutert sind.

Die bodenhydrologischen Typen lehnen sich dabei eng an die Abflussprozesstypen nach Scherrer an (vgl. LUWG 2000, LUWG 2006a, LUWG 2006b, Scherrer und Naef 2003, Scherrer et al. 2007). Die Typen sind durch eine charakteristische Abflussreaktion gekennzeichnet, welche bei intensiven, ergiebigen Niederschlägen dominiert. Dabei ist zu beachten, dass die Abflussreaktion eine Kombination aus Abflussbildungsprozessen (Aufteilung des Wasserdargebots im Boden) und Konzentrationsprozessen (Fließweg bis zum Vorfluter oder der Sammelstelle) darstellt.

Tabelle 3.1: Im erweiterten Bodenparametersatz berücksichtigte bodenhydrologische Typen.

Nr. im Tape12	Kürzel	Abflusstyp	Beschreibung der dominanten Abflussreaktion bei intensivem, ergiebigem Niederschlag.
10	HOF	1	Oberflächenabfluss infolge Infiltrationshemmnissen oder geringer Infiltrationskapazität.
1	SOF1	1	Oberflächenabfluss mit geringer Verzögerung infolge rascher Sättigung der Fläche.
2	SOF2	2	Verzögerter Oberflächenabfluss infolge Sättigung der Fläche.
3	SOF3	3	Stark verzögerter Oberflächenabfluss infolge langsamer Sättigung der Fläche.
4	SSF1	2	Mit geringer Verzögerung einsetzender lateraler Abfluss im Boden.
5	SSF2	3	Mit Verzögerung einsetzender lateraler Abfluss im Boden.
6	SSF3	4	Mit starker Verzögerung einsetzender lateraler Abfluss im Boden.
8	DP	5	Tiefenversickerung ohne rasche Abflussreaktion.
7	DP=	5	Nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung (nach Angabe des AG vorwiegend Moorflächen ohne Neigung)
9	Risk	5	Potenziell beitragende Flächen, die aber keine Verbindung zum Vorfluter aufweisen. (Liegen in der aktuellen Karte nicht vor).

Die beim jeweiligen bodenhydrologischen Typ dominante Abflussreaktion ist in Tabelle 3.1 kurz beschrieben. Darüber hinaus treten auf den Flächen auch andere Abflussreaktionen auf, die im Falle intensiver, ergiebiger Niederschläge jedoch von geringerer Bedeutung sind.

Die Kennnummer des Abflusstyps steht für die Geschwindigkeit und Intensität der jeweiligen Abflussreaktion. Der Abflusstyp 1 steht dabei für eine sehr schnelle und intensive Abflussreaktion, wohingegen der Abflusstyp 5 eine sehr stark verzögerte und retardierte Abflussreaktion kennzeichnet. Bild 3.1 zeigt charakteristische Abflussreaktionskurven der einzelnen Abflusstypen bzw. der zugehörigen dominanten bodenhydrologischen Typen (vgl. LUWG 2006b, Scherrer und Naef 2003).

Die beiden Typen „DP=“ und „Risk“ haben keine Entsprechung im ursprünglichen Kartierschlüssel von Scherrer. Der Typ „Risk“ kommt in der aktuell vorliegenden Kartierung nicht vor, weshalb er hier nicht weiter behandelt wird. Für den Typ „DP=“ wurde in Absprache mit dem Auftraggeber ein gesondertes Verfahren entwickelt, das in Abschnitt 3.7 beschrieben wird.

Die jeweiligen bodenhydrologischen Typen sind im Tape12 durch die in Tabelle 3.1 angegebenen Nummern in der Spalte BPTy gekennzeichnet.

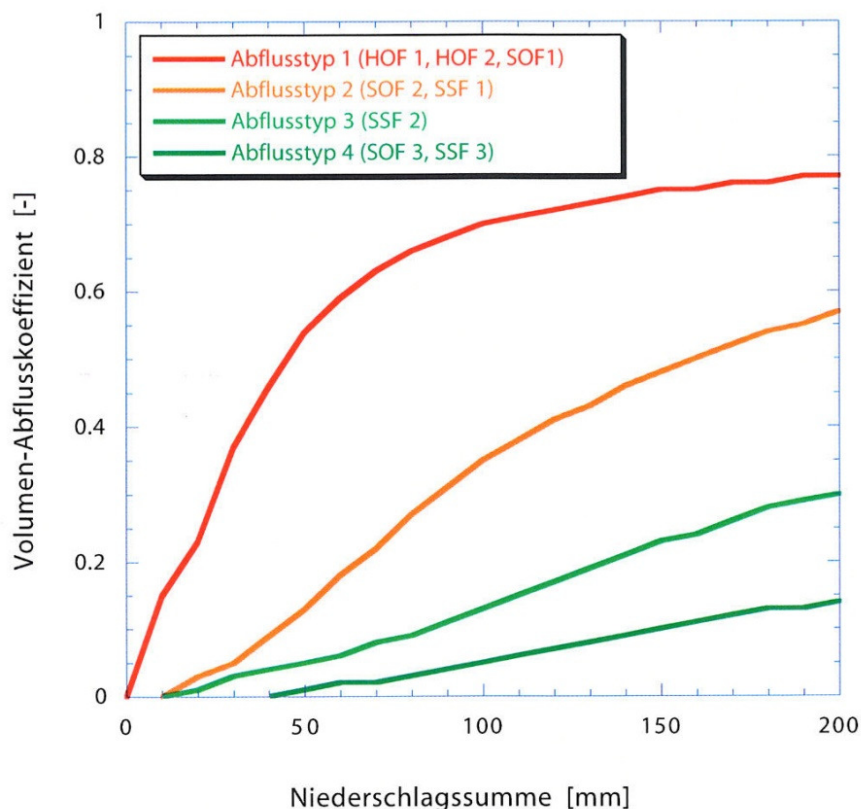


Bild 3.1: Charakteristische Abflussreaktionskurven der Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz (aus LUWG 2006b).

Um das Ziel zu erreichen, die charakteristischen Abflussreaktionskurven mithilfe des LARSIM-Bodenmoduls nachzubilden, wurden unterschiedliche Ansätze hinsichtlich ihrer Erfolgsaussichten überprüft. Hierfür wurden die Modellkonzepte unter anderem mithilfe von EXCEL und VBA umgesetzt und Testrechnungen durchgeführt. Im Zuge dieser Überprüfung und Tests zeigte sich folgendes:

- Eine gleichzeitige direkte Nutzung des bodenhydrologischen Typs und weiterer erweiterter Bodenparameter (z.B. kf-Wert, BOFA-Schlüssel etc.) zur Nachbildung der Abflussreaktionskurven ist nicht zielführend. Teilweise wurden dieselben Bodenkenndaten bereits zur Ableitung des bodenhydrologischen Typs genutzt. Andererseits können sich Widersprüche aus den Daten ergeben.
- Die bodenhydrologischen Parameter nFK und LK werden weiterhin zur Charakterisierung des Speichervermögens des Bodens verwendet ($W_m = nFK + LK$, $W_z = nFK$, $W_b = 0$). Damit beeinflussen sie indirekt die Abflussbildung und somit die Abflussreaktionskurve des jeweiligen Unterteilgebiets.
- Das bisherige Infiltrationsmodul mit dem exponentiellen Ansatz nach Horton ist in seiner derzeitigen Form nicht geeignet, um die unterschiedlichen bodenhydrologischen Typen zu simulieren. Eine geeignete Modifikation des Infiltrationsmoduls ist erforderlich.
- Die Anpassung und Parametrisierung des Infiltrationsmoduls alleine reicht nicht aus, um die angestrebte Nachbildung der Reaktion der bodenhydrologischen Typen zu erreichen. Vielmehr müssen weitere Teile des Bodenmoduls in die Anpassung und die Parametrisierung einbezogen werden.
- Die Parametrisierung des Bodenmoduls muss in Abhängigkeit des bodenhydrologischen Typs so vorgenommen werden, dass für die Unterteilgebiete die charakteristischen Abflussreaktionskurven resultieren. Zudem muss aber weiterhin die Möglichkeit gewahrt bleiben, die betroffenen Parameter pegelkontrollbereichsspezifisch anzupassen. Damit unterscheiden sich die Abflussreaktionen innerhalb eines Pegelkontrollbereichs gemäß der bodenhydrologischen Typen der Unterteilgebiete relativ zueinander. Gleichzeitig ist aber nach wie vor eine pegelkontrollbereichsspezifische Eichung möglich.

Aus den dargestellten Überlegungen und Voruntersuchungen ergibt sich die in Bild 3.2 dargestellte grundsätzliche Modellkonzeption. Dabei ist zu beachten, dass das Modellkonzept nur auf Wasserhaushaltsmodelle mit erweiterten Bodenparametern (inkl. bodenhydrologischen Typen) anwendbar ist.

Die Änderungen der Konzeption gegenüber dem bisherigen Infiltrationsmodul mit 4 Abflusskomponenten (LfU 2004, Haag et al. 2006) sind mit roter Schrift am Rand der Grafik skizziert. Dabei handelt es sich um konzeptionelle Änderungen, deren theoretischen Grundlagen und modelltechnischen Umsetzungen in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich beschrieben werden.

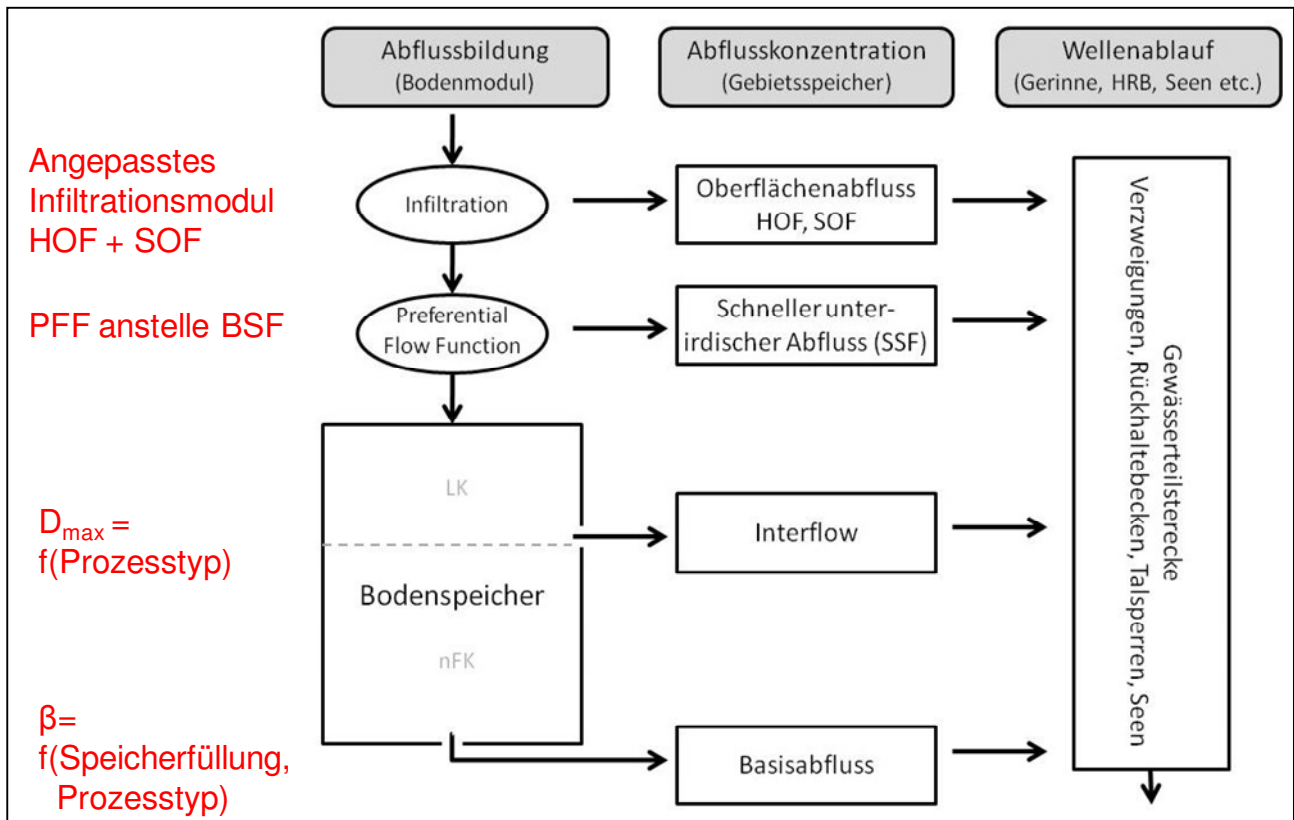


Bild 3.2: Übersicht des Modellkonzepts zur Berücksichtigung der bodenhydrologischen Typen.

3.2 Das neue Infiltrationsmodul

Das bisher in LARSIM implementierte Infiltrationsmodul basiert auf dem Infiltrationsmodell nach Horton, wobei die Infiltrationskapazität mit zunehmender Füllung des Bodenspeichers exponentiell abnimmt. Dieses Konzept wurde auf Grundlage einer Bodenparametrisierung abgeleitet, die ausschließlich Informationen zur Landnutzung und zur mittleren nFK dieser Landnutzung enthielt (LfU 2004, Haag et al. 2006). Das Infiltrationsvermögen wird dabei durch folgende Formel beschrieben:

$$I_{\text{kap}} = I_{\text{min}} + (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot \exp\left(-b_{\text{inf}} \cdot \frac{W_0 - W_b}{W_m - W_b}\right) \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit:

I_{kap}	[mm/d]	aktuelle Infiltrationskapazität
I_{min}	[mm/d]	minimale Infiltrationskapazität
I_{max}	[mm/d]	maximale Infiltrationskapazität (bei $W_0 = W_m$)
b_{inf}	[-]	Formparameter der Infiltrationskurve
W_0	[mm]	akt. Füllung des Bodenspeichers (Beginn des Berechnungszeitschritts)
W_m	[mm]	maximaler Wasserinhalt des Bodenspeichers
W_b	[mm]	Schwellenwert für den nicht entwässerbaren Inhalt im Bodenspeicher.

Dabei ist zu beachten, dass W_b ohne erweiterte Bodenparameter $= 0,05 \cdot W_m$ gesetzt ist, wohingegen W_b bei Nutzung der erweiterten Bodenparameter gleich Null gesetzt wird.

Im neuen Infiltrationsmodul wird das Infiltrationsvermögen des Bodens nun durch folgende Formel beschrieben:

$$I_{\text{kap}} = I_{\text{min}} + (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot \left(1 - \frac{W_0 - W_b}{W_m - W_b}\right)^{b_{\text{inf}}} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Dabei haben die einzelnen Variablen dieselbe Definition wie in Gleichung 3.1. Die Hauptvorteile des neuen Ansatzes lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

- Das neue Infiltrationsmodul ist so gestaltet, dass es Oberflächenabfluss sowohl infolge von Infiltrationsüberschuss (HOF) als auch infolge von Sättigung (SOF) abbilden kann. Sättigungsflächenabfluss muss somit nicht nochmals über einen zweiten Algorithmus separat ausgewiesen werden.
- Das Infiltrationsmodul ist der einzige Filter der Oberflächenabfluss produziert. Der gesamte Infiltrationsüberschuss gelangt in den Gebietsspeicher für Oberflächenabfluss.
- Die Parameterwahl für das neue Infiltrationsmodul ist gegenüber dem alten einfacher und die Parameter sind eindeutiger interpretierbar. Insbesondere wird I_{min} bei $W=W_m$ auch tatsächlich erreicht.
- Der Infiltrationsprozess lässt sich (nach wie vor) realitätsnah in Anlehnung an die Horton-Formel abbilden.

Die 3 Parameterwerte des Infiltrationsmoduls I_{\max} , I_{\min} und b_{inf} , erlauben es, das Infiltrationsverhalten des Bodens äußerst flexibel abzubilden. Dies ist eine elementare Voraussetzung dafür, die unterschiedlichen Abflussreaktionen der Prozessstypen nachbilden zu können.

Bild 3.3 zeigt die aktuelle Infiltrationskapazität eines Bodens mit $I_{\max}=75 \text{ mm/h}$ und $I_{\min}=15 \text{ mm/h}$ für unterschiedliche Exponenten b_{inf} als Funktion der relativen Füllung des Bodenspeichers. Hieraus wird deutlich, dass bei einer relativen Füllung von 1 immer die minimale Infiltrationskapazität erreicht wird, was mit dem alten Infiltrationsmodul nicht der Fall war (vgl. LfU 2004).

Mit b_{inf} im Bereich von ca. 5 bis 10 wird ein ähnliches Verhalten wie mit dem alten Infiltrationsmodul erzielt: Die Infiltrationskapazität nimmt mit zunehmender Bodenspeicherfüllung exponentiell ab. Umgekehrt kann durch sehr kleine Werte für b_{inf} erreicht werden, dass auch bei hoher Bodenspeicherfüllung die maximale Infiltrationskapazität nahezu vollständig erhalten bleibt.

Für Bild 3.4 wurde beispielhaft ein numerisches Infiltrationsexperiment aus LfU (2004) wiederholt. Das Bild verdeutlicht, dass mit dem neuen Infiltrationsmodul durch die Wahl geeigneter Parameterwerte nahezu identische Ergebnisse hinsichtlich des Infiltrationsverhaltens erzielt werden wie mit dem alten Modul. Somit ist das Modul genau wie das alte Modul dazu geeignet, echten Infiltrationsüberschuss im Sinne Hortons nachzubilden (vgl. Haag et al. 2006). Darüber hinaus ist das neue Modul jedoch einfacher und flexibler zu handhaben.

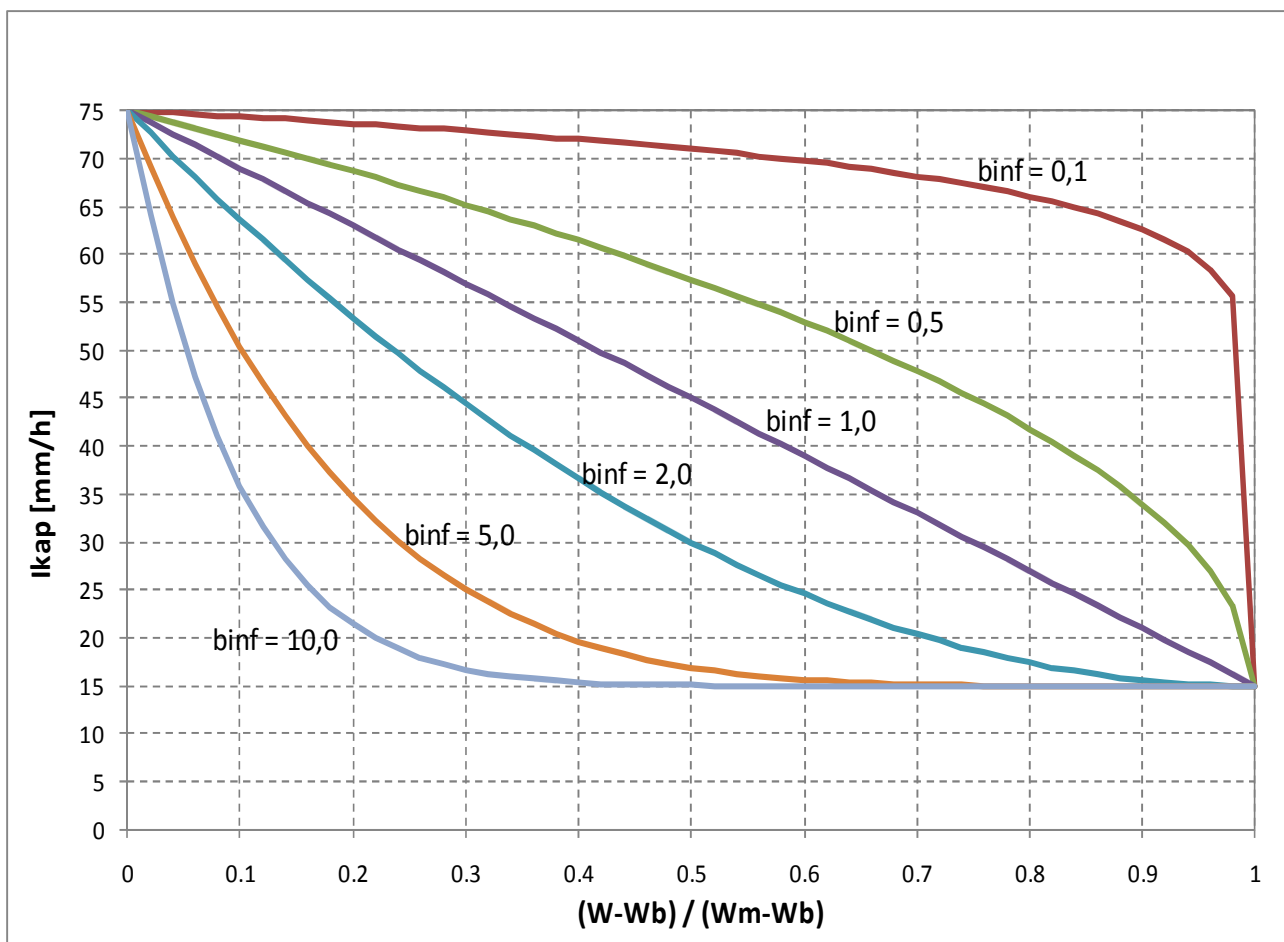


Bild 3.3: Infiltrationskapazität als Funktion der relativen Bodenspeicherfüllung und in Abhängigkeit vom Formparameter b_{inf} .

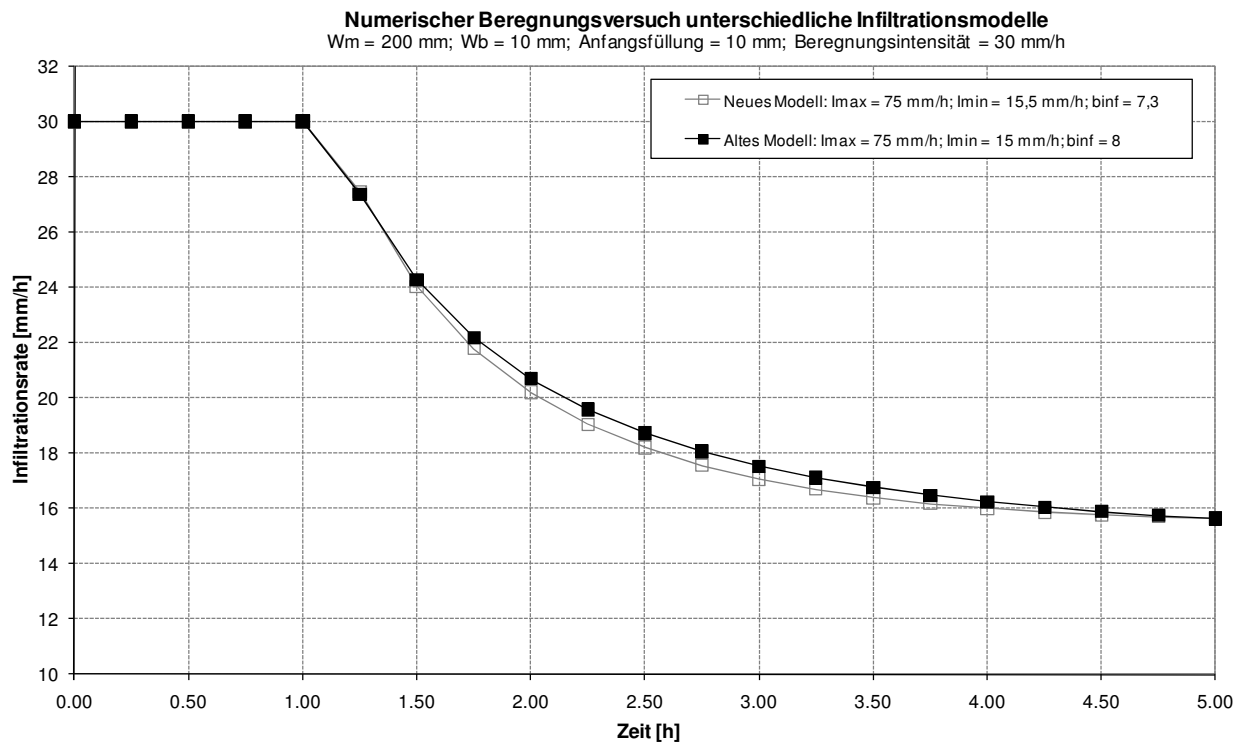


Bild 3.4: Verlauf der Infiltration bei einem „numerischen Infiltrationsexperiment“ mit dem bisherigen Ansatz nach LfU (2004) und mit dem neuen Ansatz.

Die charakteristischen Parameterwerte des neuen Infiltrationsmoduls werden in Abhängigkeit des dominanten bodenhydrologischen Prozesses festgelegt und bewirken in Verbindung mit weiteren Parameterwerten (siehe unten) charakteristische Abflussreaktionen. Diese vorgegebenen charakteristischen Parameterwerte wurden anhand numerischer Experimente ermittelt. Sie werden in Abschnitt 3.6 erläutert.

Zudem muss jedoch eine pegelkontrollbereichsspezifische Kalibrierung anhand der Abflussmessungen am Pegel möglich sein. Um dies zu ermöglichen, können pegelkontrollbereichsspezifische Multiplikationsfaktoren zur Eichung verwendet werden. Der im Modell verwendete Parameterwert ergibt sich dann aus der Multiplikation der vorgegebenen charakteristischen Werte (je bodenhydrologischen Typs) mit den Eichfaktoren. Bei einem Eichfaktor von 1 werden die vorgegebenen charakteristischen Werte unverändert beibehalten.

$$I_{\max} = I_{\max, \text{char}} \cdot I_{\max, \text{faktor}} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

$$I_{\min} = I_{\min, \text{char}} \cdot I_{\min, \text{faktor}} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

$$b_{\text{inf}} = b_{\text{inf, char}} \cdot b_{\text{inf, faktor}} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

mit:

$I_{\max, \text{char}}$ [mm/d] Vorgegebene charakteristische maximale Infiltrationskapazität des bodenhydrologischen Typs

$I_{\max, \text{faktor}}$ [-] Pegelkontrollbereichsspezifischer Eichfaktor für I_{\max}

3.3 Die Preferential-Flow-Function

Modelltechnisch kann das oben beschriebene Infiltrationsmodul als ein Filter aufgefasst werden, bei dem ein Teil des Wasserdargebots (als Infiltrationsüberschuss oder Sättigungsflächenabfluss) dem Gebietsspeicher für Oberflächenabfluss zugeleitet wird. Das Infiltrationsmodul ist somit der erste dem eigentlichen Bodenmodul vorgeschaltete Filter.

Das verbleibende Wasserdargebot, das nicht dem Oberflächenabfluss zugeordnet wird, gelangt in einen zweiten Filter vor dem eigentlichen Bodenmodul. Dieser zweite Filter wurde im ursprünglichen LARSIM-Ansatz als Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (BSF) bezeichnet (Bremicker 2000). Folglich müsste das hier „abgeschiedene“ Wasser als Sättigungsflächenabfluss interpretiert werden.

Derselbe (empirische) Modellansatz kann jedoch auch zur Abbildung anderer Prozesse verwendet werden (Beven 2001). Bereits beim Infiltrationsmodul nach LfU (2004) wurde die BSF überwiegend als „Direktabflussfilter“ für schnellen unterirdischen Abfluss interpretiert, wobei ein Teil des so ausgeschiedenen Abflusses jedoch wieder dem Oberflächenabfluss zugewiesen werden konnte.

Im neuen Modellansatz dient dieser zweite Filter ausschließlich der Ausweisung von schnellem unterirdischem Abfluss, der infolge der zunehmenden Aufsättigung des Bodens entsteht. Der Algorithmus scheint vor dem Hintergrund der zugrunde liegenden realen Prozesse gut dafür geeignet (vgl. Demuth und Hiltbold 1993, LfU 2004, Beven 2001). Im neuen Ansatz ist es nicht mehr möglich, dass ein Teil des so ausgewiesenen Abflusses wieder dem Oberflächenabfluss zugeschlagen wird. Hierfür ist ausschließlich das Infiltrationsmodul zuständig.

Daher wird im vorliegenden Modellkonzept nicht mehr von der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion gesprochen, sondern von der Preferential-Flow-Function (PFF). Der für die PFF verwendete Algorithmus bleibt jedoch derselbe wie bei der BSF (Formeln siehe Bremicker 2000).

Der einzige kalibrierbare Parameter der PFF (früher BSF) ist der Exponent b . Wie beim Infiltrationsmodul wird diesem Exponenten ein charakteristischer Wert für den bodenhydrologischen Typ zugewiesen. Dieser charakteristische Wert kann dann wiederum durch einen pegelkontrollbereichsspezifisch vorzugebenden Eichfaktor modifiziert werden:

$$b = b_{\text{char}} \cdot b_{\text{faktor}} \quad (\text{Gl. 3.6})$$

mit:

b_{char}	[mm/d]	Vorgegebener charakteristischer Exponent der Preferential-Flow-Function des bodenhydrologischen Typs
b_{faktor}	[-]	Pegelkontrollbereichsspezifischer Eichfaktor für b

3.4 Anpassung der vertikalen Versickerung

Um extrem verzögerte Abflussreaktionen wie DP oder SSF3 nachbilden zu können, muss auch die laterale Drainage zum Interflowspeicher über D_{\max} sowie die vertikale Versickerung zum Basisabflussspeicher über β angepasst werden. Andernfalls würde bei (annähernd) vollem Bodenspeicher immer Direktabfluss (Oberflächenabfluss und/oder schneller unterirdischer Abfluss) auftreten und eine Anpassung an extrem verzögerte Abflussreaktionen wäre nicht möglich.

Im bisherigen Modell wird die Abgabe vom Bodenspeicher in den Gebietsspeicher für Basisabfluss durch folgende einfache Formel abgebildet (Bremicker 2000):

$$zuQB = \beta \cdot (W_0 - W_b) \frac{\Delta t}{24} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

mit:

β	[1/d]	Drainageindex für die Tiefenversickerung
zuQB	[mm]	Zufluss zum Gebietsspeicher für Basisabfluss
Δt	[h]	Berechnungszeitschritt

Folglich nimmt die Tiefenversickerung mit zunehmender absoluter Bodenspeicherfüllung linear zu. In der Realität nimmt die hydraulische Leitfähigkeit mit zunehmender Füllung des Bodenspeichers zu. Insbesondere im Bereich der Grob- und Makroporen ist ein exponentieller Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit mit zunehmendem Wassergehalt zu verzeichnen (Jury et al. 1991, Maidment 1992, Smith 2002). Setzt man stationäre Bedingungen an (Infiltration = Tiefenversickerung), so ergibt sich entsprechend auch eine exponentielle Zunahme der vertikalen Versickerung im Grobporenbereich.

Um das physikalische Verhalten zu verdeutlichen, ist in Bild 3.5 die relative hydraulische Leitfähigkeit eines Sandbodens mit typischen Parameterwerten der Brooks-Corey und der van Genuchten Formel dargestellt (vgl. Maidment 1992). Das Bild verdeutlicht den exponentiellen Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit (und somit der Tiefenversickerung) im Bereich der Grobporen.

Um diese überproportionale Zunahme der Leitfähigkeit im Bereich der groben Poren im Modell besser nachzubilden, wurde die Formel für die vertikale Versickerung wie folgt angepasst:

$$\begin{aligned} \text{für } W > W_z: \quad zuQB[\text{mm}] = & \beta \cdot \left(1 + (fbasis_{Q_{TYP}} - 1) \cdot \frac{(W_0 - W_b) - (W_z - W_b)}{(W_m - W_b) - (W_z - W_b)} \right) \\ & \cdot (W_0 - W_b) \frac{\Delta t}{24} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

$$\text{für } W \leq W_z: \quad zuQB[\text{mm}] = \beta \cdot (W_0 - W_b) \frac{\Delta t}{24}$$

mit:

$fbasis_{Q_{TYP}}$	[-]	Faktor zur Anpassung der Tiefenversickerung im Grobporenbereich.
W_z	[mm]	Schwellenwert für den Wasserinhalt im mittleren Bodenspeicher (bei erweiterten Bodenparametern $W_z = nFK$; $W_m - W_z = LK$)

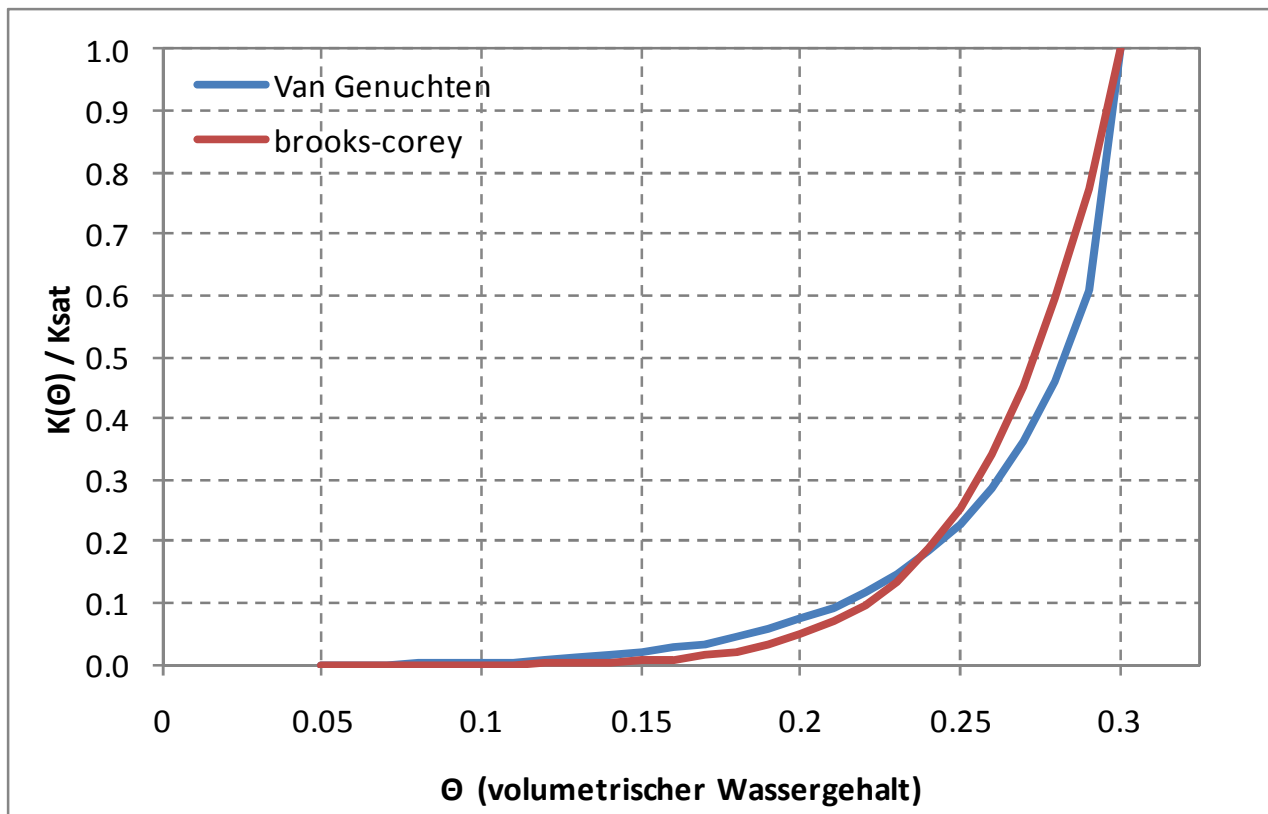


Bild 3.5: Typischer Verlauf der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehalts gemäß der Ansätze nach Van Genuchten und Brooks-Corey.

Bild 3.6 verdeutlicht, welche Wirkung die Anpassung der Formel auf die Tiefenversickerung in Abhängigkeit von der Füllung des Bodenspeichers hat. Dabei ist zu beachten, dass in Bild 3.6 von erweiterten Bodenparametern ausgegangen wird, W_b also gleich Null ist.

Bei kompletter Füllung des Bodenspeichers ($W_0=W_m$), ist die vertikale Drainage um den Faktor $fak_{Q_{TYP}}$ größer als im alten Modell. Im Bereich zwischen W_z und W_m (also im Grobporenbereich bzw. im Bereich der Luftkapazität) nimmt die Drainage entsprechend überproportional zu. Damit werden die realen Verhältnisse in der Natur besser abgebildet (vgl. Bild 3.5).

Zum anderen erlaubt es die verbesserte Abbildung der vertikalen Tiefenversickerung auch, den stark verzögerten Direktabfluss infolge von DP besser nachzubilden. Die Vorteile der erweiterten vertikalen Drainage lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

- Die in den meisten Böden vorhandene überproportionale Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich der groben Poren kann realitätsnäher abgebildet werden.
- Der bodenhydrologische Typ DP mit seiner dominanten Tiefenversickerung (selbst bei intensiven, ergiebigen Niederschlägen) kann besser nachgebildet werden.
- Auf der anderen Seite läuft der Bodenspeicher bei Unterschreiten des Schwellenwertes W_z (also im Bereich der Feldkapazität) nur noch langsam aus, was den realen Verhältnissen entspricht (Definition der Feldkapazität!).

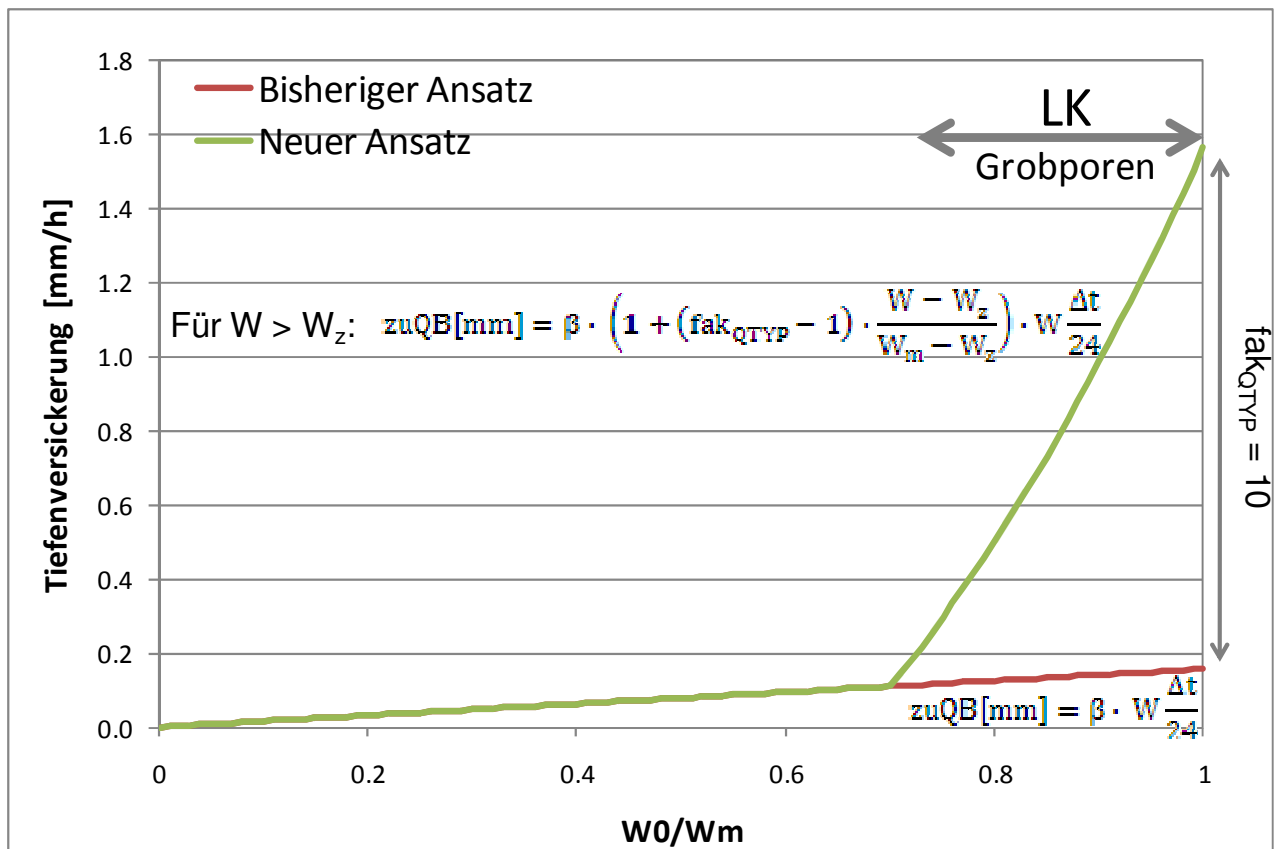


Bild 3.6: Tiefenversickerungsrate als Funktion der relativen Füllung des Bodenspeichers im bisherigen Bodenmodell und im neuen Ansatz.

In der erweiterten Form wird die Tiefenversickerung somit über zwei Parameter, β und fak_{QTYP} , gesteuert. Der Parameter β , der die Tiefenversickerung bei Bodenwassergehalten kleiner nFK steuert, soll wie bislang auch ausschließlich pegelkontrollbereichsspezifisch geeicht werden.

Im Gegensatz dazu wird der Parameter $fbasis_{QTYP}$ wie beim Infiltrationsmodul und der PFF als charakteristischer Wert in Abhängigkeit des bodenhydrologischen Typs vorgegeben. Diese vorgegebenen Werte können dann wiederum mithilfe eines multiplikativen Eichfaktors pegelkontrollbereichsspezifisch angepasst werden. Somit gilt dann:

$$fbasis_{QTYP} = fbasis_{QTYP,char} \cdot fbasis_{QTYP,faktor} \quad (Gl. 3.9)$$

mit:

$fbasis_{QTYP,char}$	[-]	Vorgegebener charakteristischer Faktor des bodenhydrologischen Typs zur Anpassung der Tiefenversickerung im Groporenbereich
$fbasis_{QTYP,faktor}$	[-]	Pegelkontrollbereichsspezifischer Eichfaktor für $fbasis_{QTYP,char}$

3.5 Anpassung der lateralen Drainage zum Gebietsspeicher für Interflow

Die für die vertikale Tiefenversickerung beschriebenen Phänomene hinsichtlich der Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit gelten analog auch für die laterale Drainage in den Interflowspeicher. Dort wo laterale Drainage in den Interflowspeicher auftritt (z.B. episodische Grundwasserlinsen, Hangschuttfolgen u.ä.), verstärkt sich diese bei Aufsättigung des Bodens bis in den Grobporenbereich.

Daher wurde auch die laterale Drainage zum Gebietsspeicher für Interflow analog zur Tiefenversickerung angepasst. Die ursprüngliche Formulierung für die laterale Drainage lautet dabei für $W_0 > W_z$ (Bremicker 2000):

$$zuQI[mm] = \left(D_{\min} \cdot \frac{W_0}{W_m} + (D_{\max} - D_{\min}) \cdot \left(\frac{W_0 - W_z}{W_m - W_z} \right)^{1,5} \right) \cdot \frac{\Delta t}{24} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

mit:

D_{\max}	[mm/d]	Maximale laterale Drainage des oberen Bodenspeichers bei Füllung W_m
D_{\min}	[mm/d]	Drainage des mittleren Bodenspeichers bei Füllung W_z
$zuQI$	[mm]	Zufluss zum Gebietsspeicher für Interflow

Um die verzögerte und gedämpfte Abflussreaktion bei dominanter lateraler Drainage abbilden zu können, wurde diese ursprüngliche Formulierung angepasst. Mithilfe eines Faktors wird es möglich, den verstärkten lateralen Zufluss zum Interflowspeicher im Bereich der Grobporen (Bereich der Luftkapazität, Bereich oberhalb W_z) abzubilden. Eine verstärkte Drainage bei Bodenspeicherfüllungen kleiner W_z erscheint hingegen bodenphysikalisch nicht realistisch und wird daher in dem neuen Ansatz nicht umgesetzt. Daher ergibt sich folgende neue Formulierung für die laterale Drainage des Bodenspeichers in den Gebietsspeicher für Interflow für $W_0 > W_z$:

$$zuQI[mm] = \left(D_{\min} \cdot \frac{W_0}{W_m} + (D_{\max} \cdot finter_{QTYP} - D_{\min}) \cdot \left(\frac{W_0 - W_z}{W_m - W_z} \right)^{1,5} \right) \cdot \frac{\Delta t}{24} \quad (\text{Gl. 3.11})$$

mit:

$finter_{QTYP}$	[-]	Faktor zur Anpassung der lateralen Drainage im Grobporenbereich.
-----------------	-----	--

Der Parameter $finter_{QTYP}$ wird wie bei der vertikalen Drainage als charakteristischer Wert in Abhängigkeit des bodenhydrologischen Typs vorgegeben. Diese vorgegebenen Werte können dann wiederum mithilfe eines multiplikativen Eichfaktors pegelkontrollbereichsspezifisch angepasst werden. Somit gilt dann analog zur Tiefenversickerung:

$$finter_{QTYP} = finter_{QTYP,char} \cdot finter_{QTYP,faktor} \quad (\text{Gl. 3.12})$$

mit:

$finter_{QTYP,char}$	[-]	Vorgegebener charakteristischer Faktor des bodenhydrologischen Typs zur Anpassung der lateralen Drainage im Grobporenbereich
$finter_{QTYP,faktor}$	[-]	Pegelkontrollbereichsspezifischer Eichfaktor für $finter_{QTYP,char}$

3.6 Charakteristische Parameterwerte der bodenhydrologischen Typen

Die oben beschriebenen charakteristischen Abflussreaktionen der bodenhydrologischen Typen werden durch charakteristische Parameterwerte für die Prozesse bzw. Berechnungsalgorithmen der Infiltration (Kap. 3.2), der Preferential-Flow-Function (Kap. 3.3), der lateralen Drainage (Kap. 3.5) und der Tiefenversickerung (Kap. 3.4) im Modell nachgebildet.

Die Festlegung der charakteristischen Parameterwerte erfolgte auf der Grundlage theoretischer Überlegungen und numerischer Experimente. Dabei wurde nach folgenden Grundsätzen verfahren:

- Bei der Abbildung der Abflussreaktionskurven soll in die jeweils dominanten Abflussprozesse (Oberflächenabfluss, schneller unterirdischer Abfluss, Tiefenversickerung) unterschieden werden (prozessbasiert).
- Im zweiten Schritt soll die Intensität bzw. die Verzögerung des jeweils dominanten Abflussprozesses berücksichtigt werden.
- Aus dem Zusammenwirken des dominanten Prozesses und der Abflussintensität infolge extremer (intensiver, ergiebiger) Niederschläge ergeben sich die charakteristischen Reaktionskurven (vgl. Bild 3.1).
- Dominanter Oberflächenabfluss (sowohl Infiltrationsüberschuss HOF als auch Sättigungsflächenabfluss SOF) wird ausschließlich über das Infiltrationsmodul ausgeschieden. Der resultierende Oberflächenabfluss (als dominante Reaktion) gelangt in den Gebietsspeicher für Oberflächenabfluss (QD2). Die Dämpfung bzw. Verzögerung der Abflussreaktion (SOF2, SOF3) wird über die charakteristischen Faktoren für die laterale Drainage und die Tiefenversickerung erreicht.
- Dominanter schneller unterirdischer Abfluss (SSF) wird über die Preferential-Flow-Function ausgewiesen. Dabei wird das Infiltrationsmodul durch die Wahl geeigneter charakteristischer Parameterwerte de facto ausgeschaltet. Der resultierende SSF wird ausschließlich in den Gebietsspeicher für schnellen unterirdischen Abfluss geleitet (QD). Auch hier wird die Dämpfung bzw. Verzögerung der Abflussreaktion (SSF2, SSF3) über charakteristische Faktoren für die laterale Drainage und die Tiefenversickerung erreicht.
- Die durch Tiefenversickerung stark gedämpfte Reaktion des bodenhydrologischen Typs DP wird über einen charakteristischen Faktor für die Tiefenversickerung erreicht.
- Für den bodenhydrologischen Typ DP= (nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung) wurde ein gesondertes Vorgehen erarbeitet, das im folgenden Kapitel erläutert wird.

Im Einzelnen wurden somit für folgende Parameter charakteristische Werte in Abhängigkeit von den einzelnen bodenhydrologischen Typen festgelegt:

- $I_{\max, \text{char}}$, $I_{\min, \text{char}}$ und $b_{\text{inf, char}}$ des Infiltrationsmoduls
- b_{char} der Preferential-Flow-Function
- $f_{\text{inter, QTYP, char}}$ für die Anpassung der lateralen Drainage im Grobporenbereich
- $f_{\text{basis, QTYP, char}}$ für die Anpassung der Tiefenversickerung im Grobporenbereich

Die so vorgegebenen charakteristischen Parameterwerte können durch pegelkontrollbereichsspezifische Eichfaktoren (Multiplikationsfaktoren der charakteristischen Werte) zur Kalibrierung des Modells verwendet werden. Der Standardwert dieser Eichfaktoren ist 1,0 (Beibehaltung der charakteristischen Werte).

Die hier zunächst ermittelten charakteristischen Parameterwerte sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Diese charakteristischen Werte des jeweiligen bodenhydrologischen Typs können mittels einer externen Datei vorgegeben werden (boden.par, siehe unten). Somit können diese bei Bedarf also angepasst werden. Weiterhin ist zu beachten, dass die Parameterwerte für die Infiltration ($I_{\max, \text{char}}$, $I_{\min, \text{char}}$) in Tabelle 3.2 in der Einheit [mm/h] angegeben sind. In der zum Modell gehörigen Parameterdatei boden.par sind diese Werte in der Einheit [mm/d] anzugeben (vgl. LfU 2004).

Bei den Oberflächenabflussprozessen wird die Wirkung der PFF durch den sehr kleinen charakteristischen Parameterwert von 0,01 für b sehr gering gehalten. Entsprechend dominiert bei diesen Typen im Falle intensiver, ergiebiger Niederschläge der Oberflächenabfluss den Direktabfluss eindeutig.

Tabelle 3.2: Charakteristische Parameterwerte der bodenhydrologischen Typen (Abflussprozessstypen) (Berechnungsschrittweite: 15 Minuten).

Bodenhydrologischer Typ		Charakteristische Parameterwerte					
		Infiltrationsmodul			PFF		
		$I_{\max, \text{char}}$ [mm/h]	$I_{\min, \text{char}}$ [mm/h]	$b_{\text{inf}, \text{char}}$	b_{char}	$f_{\text{inter}, \text{char}}$	$f_{\text{basis}, \text{char}}$
Oberflächenabfluss	HOF	20	5	5	0,01	1	1
	SOF1	75	5	5		1	1
	SOF2	75	5	1		10	1
	SOF3	150	30	1		50	200
Schneller unterirdischer Abfluss	SSF1	150	30	0,1	0,35	1	1
	SSF2				0,15	50	50
	SSF3				0,05	50	200
DP	DP	150	30	0,1	0,01	1	500
Sonderflächen	DP=	150	30	0,1	0,01	1	1
	Risk	Hier nicht ermittelt					

Bei HOF liegt generell eine recht geringe Infiltrationskapazität vor, die zudem mit steigendem Bodenwassergehalt rasch auf den Minimalwert von 5 mm/h absinkt. Daher tritt auf den HOF-Flächen recht schnell Infiltrationsüberschuss und folglich Horton Overland Flow auf.

Bei SOF1 tritt eine stärkere Abhängigkeit von der Vorsättigung auf. Bei sehr trockenen Anfangsbedingungen kann zunächst relativ viel Wasser infiltrieren. Die Infiltrationskapazität nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte jedoch rasch ab. Bei normalen Bodenwassergehalten im Bereich von nFK reagiert SOF1 nahezu gleich wie HOF. Eine Dämpfung oder Verzögerung der Reaktion durch laterale oder vertikale Drainage liegt nicht vor.

Bei SOF2-Flächen handelt es sich (im Nahegebiet) überwiegend um gewässernahe Kolluvien. Hier liegt eine stärkere Abhängigkeit von der Vorfeuchte vor. Das Infiltrationsvermögen nimmt mit zunehmendem Bodenwassergehalt mäßig (linear) ab. Zudem wird die Abflussreaktion dadurch gedämpft, dass ein Teil des infiltrierten Wassers als Interflow in das (nahegelegene) Gewässer abgeführt werden kann. Diesem Effekt wird durch ein $f_{inter_{char}}$ von 10, also eine leicht verstärkte laterale Drainage im Grobporenbereich Rechnung getragen.

Bei SOF3-Flächen handelt es sich um zumeist landwirtschaftlich genutzte, schwach bis mäßig geneigte, gewässerferne Bereiche. Das Infiltrationsvermögen ist recht hoch und nimmt nur mäßig ab. Zudem wird der Oberflächenabfluss durch verstärkte laterale und vertikale Drainage deutlich verzögert und gedämpft.

Bei Dominanz des schnellen unterirdischen Abflusses wird die Wirkung des Infiltrationsmoduls durch hohe Infiltrationskapazitäten und einen sehr kleinen Exponenten b_{inf} sehr gering gehalten. Das Auftreten von nennenswertem Oberflächenabfluss ist praktisch ausgeschlossen. Vielmehr sind die Parameterwerte der PFF sowie der lateralen und der vertikalen Drainage so gewählt, dass der Gebietsspeicher für schnellen unterirdischen Abfluss die Direktabflussreaktion dominiert.

Bei SSF1-Flächen, die meist in versteilten Unterhangbereichen liegen, wird eine rasche und intensive Reaktion durch einen hohen Wert für den Exponenten der PFF erzeugt. Eine Dämpfung oder Verzögerung der Reaktion durch verstärkte laterale oder vertikale Drainage liegt nicht vor.

Für die SSF2-Flächen tritt infolge des mittleren Wertes für den Exponenten b der PFF erst bei höheren Bodenwassergehalten eine deutliche Reaktion des schnellen unterirdischen Abflusses auf. Zudem tragen die mäßig verstärkte laterale und vertikale Drainage bei hohen Bodenwassergehalten zur Verzögerung und Abschwächung der Abflussreaktion bei.

Bei SSF3-Flächen handelt es sich zumeist um Waldgebiete im schwach bis mäßig geneigten Oberhangbereich. Der schnelle unterirdische Abfluss tritt hier erst mit großer Verzögerung und stark gedämpft auf. Dies wird im Modell dadurch erreicht, dass ein kleiner Wert für den Exponenten b der PFF angesetzt wird und zudem die laterale und vor allem die vertikale Drainage im Falle hoher Bodenwassergehalte deutlich erhöht werden.

Auf den Flächen mit DP (Tiefenversickerung) tritt selbst bei intensiven, ergiebigen Niederschlägen nur sehr wenig Direktabfluss mit starker Dämpfung auf. Vielmehr versickert auf diesen Flächen nahezu das gesamte Wasserdargebot und trägt zur Grundwasserneubildung bei. Diese Reaktion wird im Modell dadurch erreicht, dass eine massive Erhöhung der Tiefenversickerung bei hohen Bodenwassergehalten aufgeprägt wird.

Bei den DP=-Flächen handelt es sich nach Angaben des Auftraggebers vor allem um moorige Gebiete ohne oder mit allenfalls geringer Neigung. Diese Flächen tragen nicht wesentlich zu Hochwasserabflüssen bei, obwohl weder die Tiefenversickerung noch die laterale Drainage erhöht sind. Daher werden die DP=-Flächen mit einem speziellen Ansatz simuliert, der im folgenden Abschnitt beschrieben ist.

Bild 3.7 zeigt die charakteristischen Abflussreaktionen der einzelnen bodenhydrologischen Typen aus einem numerischen Experiment mit den oben beschriebenen charakteristischen Parameterwerten. Für das numerische Experiment wurden typische Bodenkennwerte von $n_{FK}=100$ mm und $LK=45$ mm, Anfangsfüllungen von $W_0=n_{FK}$ und eine Niederschlagsintensität von 50 mm/h verwendet. Der Berechnungszeitschritt betrug 15 Minuten.

Das Bild verdeutlicht, dass die typischen Abflussreaktionen der unterschiedlichen bodenhydrologischen Typen mit den hier ausgewiesenen charakteristischen Parameterwerten gut nachvollzogen werden können (vgl. Bild 3.1).

Allerdings ist zu beachten, dass die Ergebnisse aufgrund der rein expliziten Berechnungsweise innerhalb von LARSIM und der Mittelung über den Zeitschritt erheblich vom gewählten Berechnungszeitschritt abhängen können. Insbesondere bei kleinräumigen Betrachtungen kann die übliche Berechnungszeitschrittweite von einer Stunde zur numerischen Dämpfung der Reaktionen führen. Daher wurde für die LARSIM-Berechnungen in 1-Stundenzeitschritten andere Grundparametrisierungen gewählt als die hier abgeleiteten (vgl. Abschnitt 5).

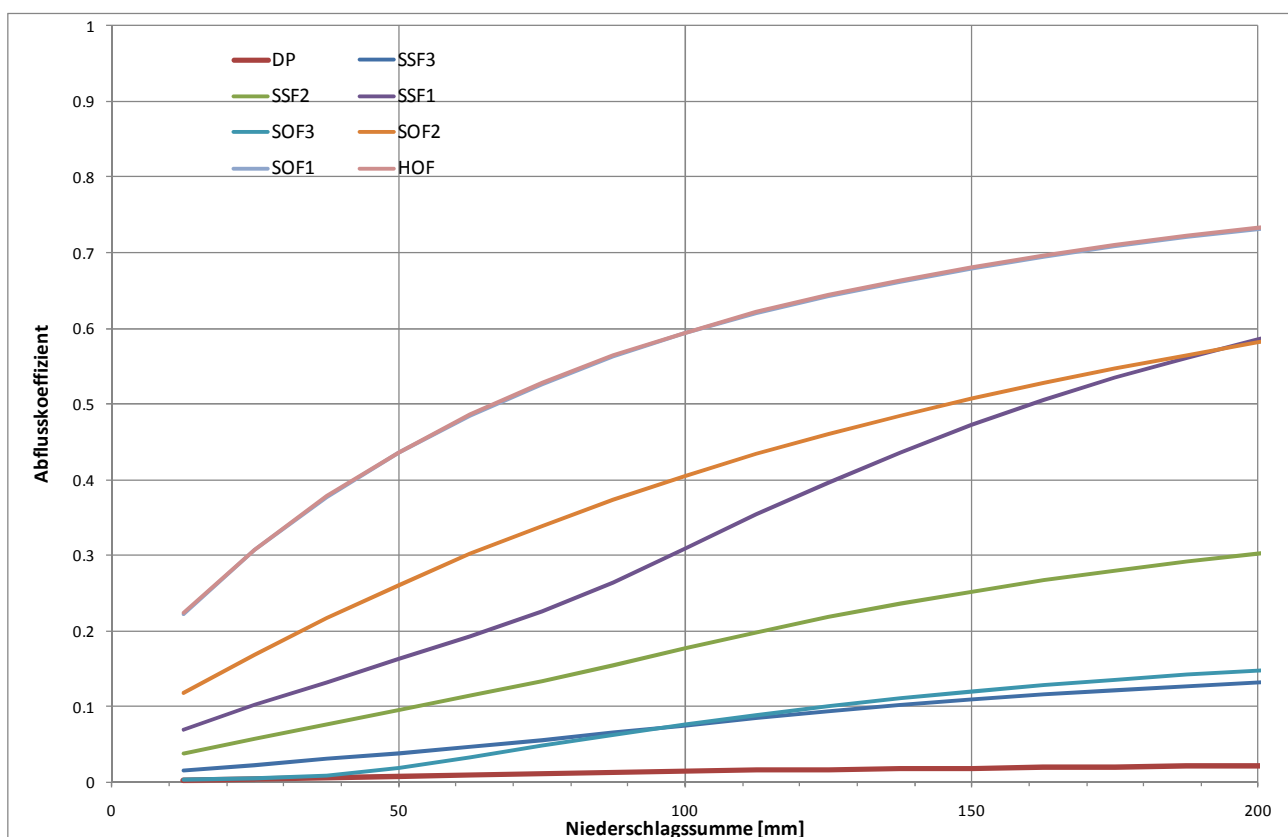


Bild 3.7: Mit den charakteristischen Parameterwerten aus Tabelle 3.2 simulierte Abflussreaktionskurven für unterschiedliche bodenhydrologische Typen.

3.7 Nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung (Moor bzw. DP=)

DP=-Flächen sind Bereiche, die nicht signifikant zu Hochwasserabflüssen beitragen jedoch keine verstärkte Tiefenversickerung (oder laterale Drainage) aufweisen. Hierbei handelt es sich nach Angaben des Auftraggebers vor allem um Moorflächen ohne bzw. mit allenfalls geringer Neigung. Auf diesen Flächen wird ein zusätzliches Wasserdargebot also (ähnlich wie bei einem See) durch steigende Wasserstände bzw. die horizontale Ausdehnung der gesättigten Fläche abgefangen. Gemäß der bodenhydrologischen Kartierung ist davon auszugehen, dass hierdurch kein nennenswerter zusätzlicher Direktabfluss entsteht.

Dieser Prozess ist mit den herkömmlichen Ansätzen innerhalb von LARSIM nicht abzubilden. Daher wurde für die DP=-Flächen ein alternativer Simulationsansatz entwickelt. Dieser ist in Bild 3.8 schematisch dargestellt: Der über das Infiltrationsmodul und die PFF ausgewiesene Direktabfluss wird in einen Zwischenspeicher abgeführt. Somit ist sichergestellt, dass aus den Flächen kein Direktabfluss in die Gewässer gelangt.

Der Zwischenspeicher entwässert in den eigentlichen Bodenspeicher. Sobald Speicherkapazität im Boden verfügbar ist, wird diese aus dem Zwischenspeicher aufgefüllt, bis dieser wieder leer ist. Dies entspricht in etwa dem oben beschriebenen angenommenen realen Prozess. Hierdurch ist der Bodenspeicher über wesentlich längere Zeit annähernd gefüllt. Entsprechend wird die Verdunstung (im Modell) nicht durch Wassermangel beschränkt. Auch dies kommt den realen Verhältnissen auf moorigen Flächen nahe.

Bei diesem Vorgehen bestünde allerdings (bei mäßiger Tiefenversickerung und lateraler Drainage) die Gefahr, dass der Zwischenspeicher auf lange Sicht immer voller wird. Dies würde dann die Realität nicht mehr widerspiegeln und zu einer Verfälschung der Wasserbilanz führen. Um dies zu verhindern, wird auf den DP=-Flächen die Summe der Bodenspeicherfüllung und der Füllung des Zwischenspeichers verwendet, um die Tiefenversickerung zu berechnen (Gl. 3.8). Folglich nimmt die Tiefenversickerung auf den DP=-Flächen bei steigender Füllung des Zwischenspeichers langsam linear zu.

Für die DP=-Flächen wird die Tiefenversickerung daher wie folgt berechnet:

$$\text{für } W > W_z: \quad \text{zuQB[mm]} = \beta \cdot \left(1 + (fbasis_{Q_{TYP}} - 1) \cdot \frac{(W_0 + W_{sp} - W_b) - (W_z - W_b)}{(W_m - W_b) - (W_z - W_b)} \right) \cdot (W_0 + W_{sp} - W_b) \frac{\Delta t}{24}$$

(Gl. 3.8)

$$\text{für } W \leq W_z: \quad \text{zuQB[mm]} = \beta \cdot (W_0 + W_{sp} - W_b) \frac{\Delta t}{24}$$

mit:

W_{sp} [mm] Füllung des Zwischenspeichers

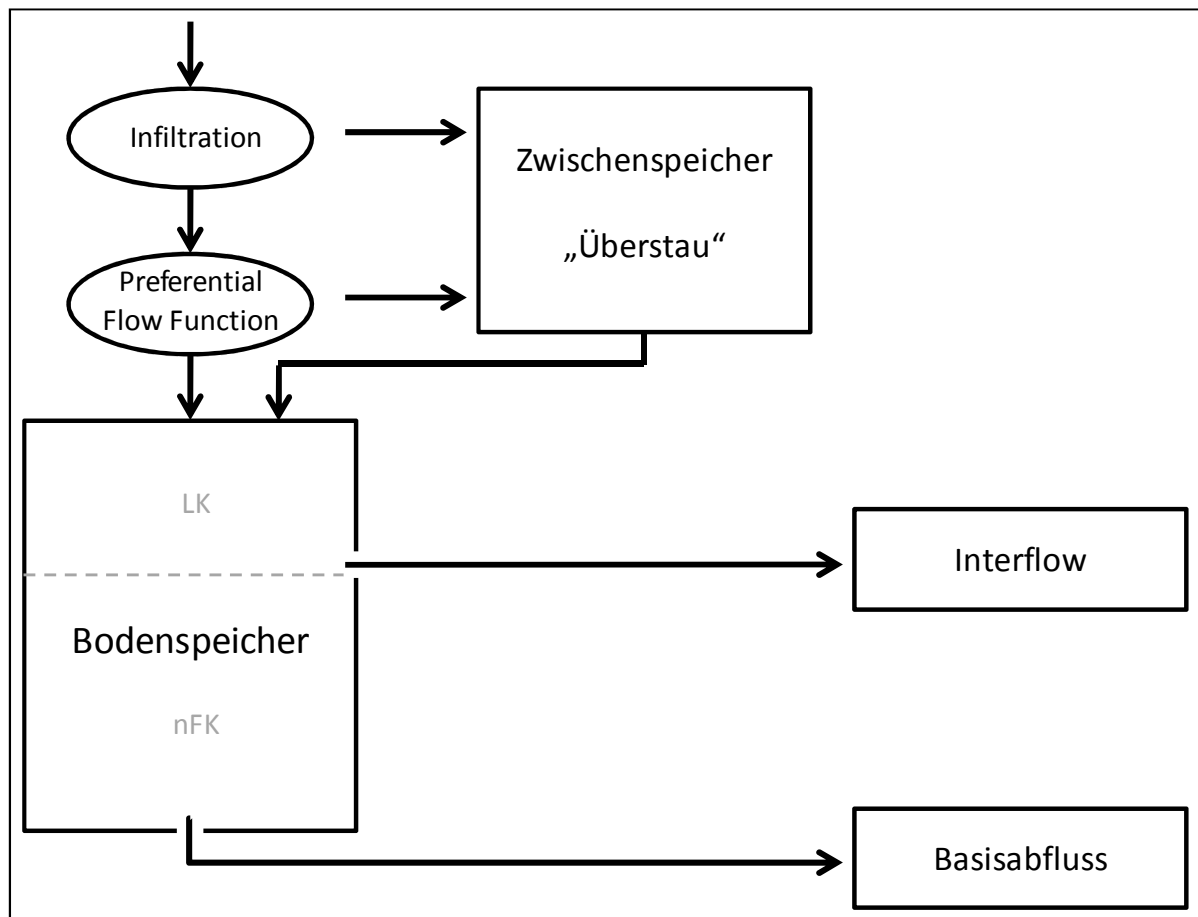


Bild 3.8: Schema des Modellansatzes für die DP=- bzw. Moorflächen.

Die DP=-Flächen werden in der boden.par als „Moor“ charakterisiert. Der Modellansatz garantiert, dass auf diesen Flächen kein Direktabfluss gebildet wird, die Bildung von Basisabfluss bei erhöhter Wasserspeicherung nur geringfügig ansteigt und die Verdunstung über lange Zeit nicht durch Wassermangel begrenzt wird.

Alternativ können die DP=-Flächen wie jeder andere bodenhydrologische Typ behandelt werden. Hierfür muss ihnen in der boden.par eine beliebige andere Kennung als „Moor“ gegeben werden. Dann werden diese Flächen gleich behandelt wie alle anderen bodenhydrologischen Typen.

3.8 Spezielle Landoberflächen

Wasserflächen:

In der vorliegenden Gebietsdatei (Tape12) für die Nahe ist die Landnutzung Wasser ebenfalls mit (unterschiedlichen) bodenhydrologischen Typen charakterisiert. Da Wasserflächen jedoch eine andere Abflussreaktion als die oben beschriebenen bodenhydrologischen Typen aufweisen, werden Wasserflächen auch in dem hier beschriebenen Ansatz (unabhängig davon welcher bodenhydrologischer Typ ihnen zugewiesen wurde) gesondert behandelt. Wie in allen anderen Modellansätzen in LARSIM wird der Niederschlag, der auf Wasserflächen fällt, auch hier direkt dem Gerinnespeicher zugewiesen.

Versiegelte Flächen:

In dem hier vorgestellten neuen Modellansatz wird das Wasserdargebot auf versiegelten Flächen (inklusive des versiegelten Anteils von Siedlungsflächen) immer dem Gebietsspeicher für Oberflächenabfluss zugewiesen (vgl. LfU 2004).

Da der bodenhydrologische Typ bei den Landnutzungen „versiegelt“ und „Wasser“ keine Wirkung auf die Abflussbildung hat, kann bei diesen Landnutzungen im TAPE12 ausnahmsweise auch der Wert „0“ als Kennung für den bodenhydrologischen Typ angegeben werden.

4. Die Option BODENMODUL Q-TYPEN und die Datei boden.par

4.1 Die Option BODENMODUL Q-TYPEN

Das oben dargelegte Modellkonzept kann in LARSIM über die Option BODENMODUL Q-TYPEN aktiviert werden.

Bei Vereinbarung der Option BODENMODUL Q-TYPEN in Verbindung mit der Option ERW. BODENPARAMETER erfolgt die Berechnung des Bodenspeichers im Wasserhaushaltsmodell unter Berücksichtigung der dominanten bodenhydrologischen Abflusstypen nach Scherrer.

Dazu muss die Eingabedatei <boden.par> mit den folgenden charakteristischen Parameterwerten für die bodenhydrologischen Typen (Abflusstypen) vorgehalten werden:

- I_{max_c} : Charakteristische maximale Infiltrationskapazität [mm/d]
- I_{min_c} : Charakteristische minimale Infiltrationskapazität [mm/d]
- $binf_c$: Charakteristischer Formparameter der Infiltrationskurve [-]
- $bPFF_c$: Charakteristischer Exponent b der Preferential-Flow-Function [mm/d]
- $fint_c$: Charakteristischer Faktor zur Anpassung der lateralen Drainage im Grobporenbereich [-]
- $fbas_c$: Charakteristischer Faktor zur Anpassung der Tiefenversickerung im Grobporenbereich [-]

Im erweiterten <tape12> wird jedem Unterteilgebiet die Nummer eines bodenhydrologischen Typs (BPTy) zugeordnet. Über diese Nummer können dem Unterteilgebiet dann die charakteristischen Parameterwerte zugewiesen werden.

Darüber hinaus ist die Eingabedatei <tape35> um die folgenden Eichparameter zu erweitern:

- I_{max_fak} : Eichfaktor für maximale Infiltrationskapazität [-]
- I_{min_fak} : Eichfaktor für minimale Infiltrationskapazität [-]
- $binf_fak$: Eichfaktor für Formparameter der Infiltrationskurve [-]
- $bPFF_fak$: Eichfaktor für Exponent b der Preferential-Flow-Function [-]
- $fint_fak$: Eichfaktor zur Anpassung der lateralen Drainage im Grobporenbereich [-]
- $fbas_fak$: Eichfaktor zur Anpassung der Tiefenversickerung im Grobporenbereich [-]

Die Eichfaktoren dienen zur pegelkontrollbereichsspezifischen Kalibrierung des Bodenmoduls, wobei für die Berechnung eines Unterteilgebiets jeweils die charakteristischen Parameterwerte eines Abflusstyps mit den Eichfaktoren des übergeordneten Teilgebiets multipliziert werden.

Zur Integration des Abflusspotentials wird für die Berechnung der Wasserabgabe zum Gebietsspeicher für Oberflächenabfluss eine abgewandelte Form des Infiltrationsmodells nach Horton (Option 4 Q-KOMP INFILTRATION) eingesetzt. Das Infiltrationsmodell ist so gestaltet, dass es Oberflächenabfluss sowohl infolge von Infiltrationsüberschuss als auch infolge von Sättigung abbilden kann.

Da der Sättigungsflächenabfluss bereits über das Infiltrationsmodell abgebildet wird, wird der Modellansatz der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion ausschließlich zur Bestimmung der Wasserabgabe zum Gebietsspeicher für Direktabfluss (schneller unterirdischer Abfluss) genutzt und erhält daher den Namen Preferential-Flow-Function.

Der herkömmliche Modellansatz für die Bestimmung der lateralen Drainage zum Gebietsspeicher für Interflow wird für Bodenspeicherfüllungen, die den Schwellenwert des mittleren Bodenspeichers (WZ) überschreiten, modifiziert. Im herkömmlichen Modellansatz nimmt die laterale Drainage mit zunehmender absoluter Bodenspeicherfüllung linear zu. Im neuen Modellansatz wird dagegen der exponentielle Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich der Grobporen durch eine überproportionale Zunahme der lateralen Drainage in diesem Bereich wiedergegeben.

In gleicher Weise wird für die Simulation der vertikalen Versickerung zum Gebietsspeicher für Basisabfluss eine Modifikation des herkömmlichen Algorithmus für Bodenspeicherfüllungen größer WZ vorgenommen. Auch hier wird mit dem veränderten Modellansatz die überproportionale Zunahme der Leitfähigkeit im Bereich der Grobporen berücksichtigt.

Eine gesonderte Behandlung erhalten die Unterteilgebiete mit der Abflusstyp-Bezeichnung 'MOOR' in der Datei <boden.par>. Flächen dieses Abflusstyps tragen weder signifikant zum Hochwasserabfluss bei, noch weisen sie eine verstärkte Tiefenversickerung auf. Es handelt sich hierbei vor allem um Moorflächen ohne bzw. allenfalls mit geringer Neigung. Auf diesen Flächen wird ein zusätzliches Wasserdargebot durch steigende Wasserstände bzw. horizontale Ausdehnung der gesättigten Flächen abgefangen, so dass kein nennenswerter Direktabfluss entsteht.

Aus diesem Grund wird im Bodenmodul für derartige Flächen die über das Infiltrationsmodell und die Preferential-Flow-Function errechnete Wasserabgabe in einen Zwischenspeicher abgeführt. Dieser Zwischenspeicher entwässert in den eigentlichen Bodenspeicher bis dieser aufgefüllt ist, so dass die Verdunstung nicht durch Wassermangel beschränkt wird. Der Bodenspeicher wird in jedem Rechenzeitschritt wieder durch den Zwischenspeicher aufgefüllt bis dieser leer ist. Die Füllung des Zwischenspeichers am Ende des Berechnungszeitraums wird zusammen mit der Füllung des Bodenspeichers in der WHM-Zustandsdatei festgehalten, wenn die Option WHM-ZUSTAND AUS SORTIERT NACH ELEMENTEN gesetzt ist.

Die Vereinbarung der Option BODENMODUL Q-TYPEN ist nicht in Verbindung mit der Option 4 Q-KOMP INFILTRATION oder der Option 4 Q-KOMP MIT A2 zulässig.

4.2 Die Datei boden.par zur Parametrisierung der Abflusstypen

Bei Vereinbarung der Option BODENMODUL Q-TYPEN ist die Eingabedatei <boden.par> vorzusehen, welche die charakteristischen Parameterwerte für die bodenhydrologischen Typen (Abflusstypen) enthält.

Bei der Berechnung eines Wasserhaushaltsmodells im HVZ-WHM-MODUS ist die Datei im Systemverzeichnis (Pfad 'System-/Stammdaten:' laut <pfade.dat>) abzulegen, andernfalls im Arbeitsverzeichnis.

Die Liste der Parameterwerte wird mit dem Schlüsselwort 'Anzahl Q-Typen:' und der Anzahl der Abflusstypen (Integer) eingeleitet. Davor dürfen beliebig viele Kommentarzeilen eingefügt werden (Kennzeichnung von Spalte 1 mit '*' oder ';' oder '#').

Spalte 1 enthält die Nummerierung der Abflusstypen entsprechend des Tape12. Die Nummerierung muss grundsätzlich mit dem Wert 1 beginnen und fortlaufend sein. Liegt keine Parametrisierung für eine der Nummern vor und wird diese auch nicht im Tape12 verwendet, sollte für alle Parameter dieses Abflusstyps ein Fehlwert (-1.) vorgesehen werden. Ab Spalte 2 folgen die jeweils 6 charakteristischen Parameterwerte pro Abflusstyp.

Spalte 8 enthält eine Bezeichnung für den Abflusstyp. Die einzige Bezeichnung, die für die Berechnung von Relevanz ist, lautet 'MOOR'. Wird einem Abflusstyp diese Bezeichnung zugeordnet, wird bei der Berechnung des Bodenspeichers ein Zwischenspeicher berücksichtigt, der das Verhalten von Flächen wiedergibt, die weder signifikant zum Hochwasserabfluss beitragen noch eine verstärkte Tiefenversickerung aufweisen (z.B. Moorflächen). Alle anderen Bezeichnungen haben keine Auswirkung auf die Berechnung und sind rein informativ.

Die einzelnen Spalten enthalten die folgenden Informationen bzw. Parameter:

- Spalte 01: Nr: Nummer des Abflusstyps im Tape12 (Format: i5)
- Spalte 02: lmax_c: Charakteristische maximale Infiltrationskapazität [mm/d] (Format: f10.x)
- Spalte 03: lmin_c: Charakteristische minimale Infiltrationskapazität [mm/d] (Format: f10.x)
- Spalte 04: binf_c: Charakteristischer Formparameter der Infiltrationskurve [-] (Format: f10.x)
- Spalte 05: bPFF_c: Charakteristischer Exponent b der Preferential-Flow-Function [mm/d] (Format: f10.x)
- Spalte 06: fint_c: Charakteristischer Faktor zur Anpassung der lateralen Drainage im Grobporenbereich [-] (Format: f10.x)
- Spalte 07: fbas_c: Charakteristischer Faktor zur Anpassung der Tiefenversickerung im Grobporenbereich [-] (Format: f10.x)
- Spalte 08: Q-Typ: Bezeichnung des Abflusstyps (nur die Bezeichnung MOOR hat Auswirkungen auf die Berechnung) (Format: a20)

Nachfolgend ist ein Beispiel für die Eingabedatei <boden.par> aufgeführt:

```
* =====
*  Nr      Imax_c      Imin_c      binf_c      bPFF_c      fint_c      fbas_c      Q-Typ
*  =====
Anzahl Q-Typen:      10
   1      1800.0      120.0        5.0        0.01        1.0        1.0      SOF1
   2      1800.0      120.0        1.0        0.01       10.0        1.0      SOF2
   3      3600.0      720.0        1.0        0.01       50.0      200.0      SOF3
   4      3600.0      720.0        0.1        0.35        1.0        1.0      SSF1
   5      3600.0      720.0        0.1        0.15       50.0       50.0      SSF2
   6      3600.0      720.0        0.1        0.05       50.0      200.0      SSF3
   7      3600.0      720.0        0.1        0.01        1.0        1.0      MOOR
   8      3600.0      720.0        0.1        0.01        1.0      500.0      DP
   9        -1.0       -1.0       -1.0      -1.00       -1.0      -1.0      Risk
  10       480.0      120.0        5.0        0.01        1.0        1.0      HOF
```

5. Beispielhafte Simulationen mit dem neuen Modellkonzept

5.1 Ziele und Vorgehensweise bei den Simulationen

Das in Abschnitt 3 abgeleitete Modellkonzept sollte am konkreten Beispiel von zwei Einzugsgebieten im Nahegebiet angewendet und getestet werden. Die beiden im Abstimmung mit dem Auftraggeber und der FH / Uni Trier (Herr Gronz) ausgewählten Einzugsgebiete Kronweiler / Schwoillbach und Kellenbach / Simmerbach werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

Anhand der beiden Testgebiete sollte vor allem folgendes untersucht werden:

- Können mit dem neu abgeleiteten Modellansatz unter Berücksichtigung der bodenhydrologischen Typen im Rahmen einer Eichung Modellparametersätze gefunden werden, mit denen die beobachteten Abflussreaktionen an den Pegeln in geeigneter Weise nachgebildet werden?
- Ist der für Moorflächen abgeleitete spezifische Modellansatz für Moore für (alle) nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung (DP=-Flächen) geeignet?
- Welche Grundparametrisierung in der Datei <boden.par> eignet sich für die Simulation in der Zeitschrittweite von einer Stunde?
- Wie unterscheiden sich die Ergebnisse mit dem neuen Ansatz von den Ergebnissen mit dem bislang verwendeten Ansatz?

Die Beantwortung dieser Fragen erforderte zumindest teilweise ein iteratives Vorgehen. So musste beispielsweise die Grundparametrisierung in der Datei <boden.par> ausgehend von den Ergebnissen in Abschnitt 3 iterativ anhand der Ergebnisse für die beiden Einzugsgebiete modifiziert werden.

Ebenso konnte für den Pegel Kronweiler / Schwoillbach eine erfolgreiche Kalibrierung mit Berücksichtigung des Ansatzes für die DP=-Flächen durchgeführt werden, während sich für Kellenbach / Simmerbach zeigte, dass diese Modellvorstellung nicht zielführend ist. Folglich wurde anhand des Pegels Kellenbach ein anderer Ansatz für die DP=-Flächen abgeleitet und für Kronweiler / Schwoillbach dann nochmals eine zweite Eichung durchgeführt, bei der dieser modifizierte Ansatz für die DP=-Flächen ebenfalls erfolgreich angewandt wurde.

Nachfolgend wird nicht jeder einzelne Iterationsschritt im Detail dargestellt, vielmehr wird auf die Endergebnisse und die wichtigsten Erkenntnisse aus den Zwischenschritten eingegangen. Hierzu werden im Abschnitt 5.2 zunächst die beiden Beispielgebiete kurz charakterisiert. Im Abschnitt 5.3 wird die Problematik der nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung (DP=) erläutert und die hierfür zunächst gewählte Lösung dargestellt. Außerdem wird in Abschnitt 5.3 die letztlich gewählte Grundparametrisierung für das Stundenwertmodell in der Datei <boden.par> vorgestellt. Im Abschnitt 5.4 wird auf die Eichergebnisse eingegangen. Der Vergleich mit dem bisherigen Modell wird in Abschnitt 5.5 dargestellt.

Die aus den Ergebnissen der beispielhaften Simulationen und dem Modellkonzept abgeleiteten Folgerungen und Empfehlungen werden erst im nachfolgenden Abschnitt 6 kurz erläutert.

5.2 Untersuchungsgebiete

Nachfolgend werden die für die Eichung und die Simulationsergebnisse wesentlichen Charakteristika der beiden hier untersuchten Beispieleinzugsgebiete kurz vorgestellt. Hierfür wird weitgehend auf die durch Herrn O. Gronz (FH / Uni Trier) aufbereiteten und dankenswerterweise zur Verfügung gestellten Informationen zurückgegriffen.

Die Untersuchung wurde für die beiden folgenden Einzugsgebiete durchgeführt:

- Kronweiler / Schwoillbach
- Kellenbach / Simmerbach

Beide Gewässer entspringen im Hunsrück und fließen von Norden her in die Nahe, wobei der Schwoillbach ca. 25 km weiter westlich (oberstrom) in die Nahe mündet als der Simmerbach. Die wichtigsten Charakteristika der beiden Einzugsgebiete sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Die Bilder 5.1 und 5.3 zeigen die prozentualen Flächenanteile der Landnutzungen und der Abflussprozesstypen für die beiden Einzugsgebiete. In den Bildern 5.2 und 5.4 sind die räumlichen Verteilungen der Abflussprozesstypen innerhalb der beiden Einzugsgebiete dargestellt. Weiterführende Informationen zum Nahegebiet und insbesondere zum Schwoillbach können auch Henn (2010) entnommen werden.

Im Vergleich der beiden Untersuchungsgebiete fällt vor allem das Folgende auf:

- Beide Einzugsgebiete haben ähnliche Landnutzungen, die durch Wälder, Acker- und Grünland bestimmt werden. Dabei ist im Schwoillbachgebiet jedoch der Ackeranteil deutlich geringer und der Waldanteil entsprechend höher als im Simmerbachgebiet.
- Im Schwoillbachgebiet wurden insgesamt 75% der Fläche den wenig reaktiven Abflussprozesstypen (SSF3, SOF3, DP und DP=) zugewiesen. Ca. 15% der Fläche werden als SSF2 klassifiziert. Die relativ reaktiven Prozesstypen SOF2 und SOF1 nehmen zusammen knapp 10% der Einzugsgebietsfläche ein.
- Im Simmerbachgebiet nehmen die wenig reaktiven Abflussprozesstypen (SSF3, SOF3, DP und DP=) über 87% der Fläche ein. Der prozentuale Anteil der SOF2- und SOF1-Flächen beträgt zusammen knapp 7%.
- Auffällig ist der sehr hohe Anteil von DP=-Flächen im Einzugsgebiet des Simmerbachs, die dort über ein Drittel der Gesamtfläche einnehmen.
- Innerhalb des Simmerbachgebiets zeigt sich eine deutliche Struktur in der räumlichen Verteilung der Abflussprozesstypen: Während im südöstlichen Einzugsgebietsbereich SSF3- und DP-Flächen dominieren, überwiegen im restlichen Einzugsgebiet zumeist DP=- und SOF3-Flächen.
- Die spezifischen Mittelwasserabflüsse (M_q) und vor allem die spezifischen Hochwasserabflüsse (MH_q , HH_q) sind im Schwoillbach deutlich höher als im Simmerbach. Im Gebiet des Schwoillbachs scheint also die Abflussreaktion merklich stärker ausgeprägt zu sein als im Simmerbach, was sich mit den Angaben der Flächenanteile der Abflussprozesstypen deckt.

Tabelle 5.1: Wesentliche Charakteristika der Untersuchungsgebiete.

		Kronweiler / Schwoillbach		Kellenbach / Simmerbach	
Einzugsgebietsfläche [km ²]		64,6		361,8	
Minimale Höhe des EZG [m üNN]		295		220	
Maximale Höhe des EZG [m üNN]		722		654	
MQ [m ³ /s]	Mq [l/(km ² s)]	0,917	14,2	2,66	7,35
MNQ [m ³ /s]	MNq [l/(km ² s)]	0,049	0,759	0,296	0,818
MHQ [m ³ /s]	MHq [l/(km ² s)]	22,8	353	49,7	137
NQ [m ³ /s]	Nq [l/(km ² s)]	0,008	0,124	0,027	0,0746
HQ [m ³ /s]	Hq [l/(km ² s)]	60,6	938	149	412

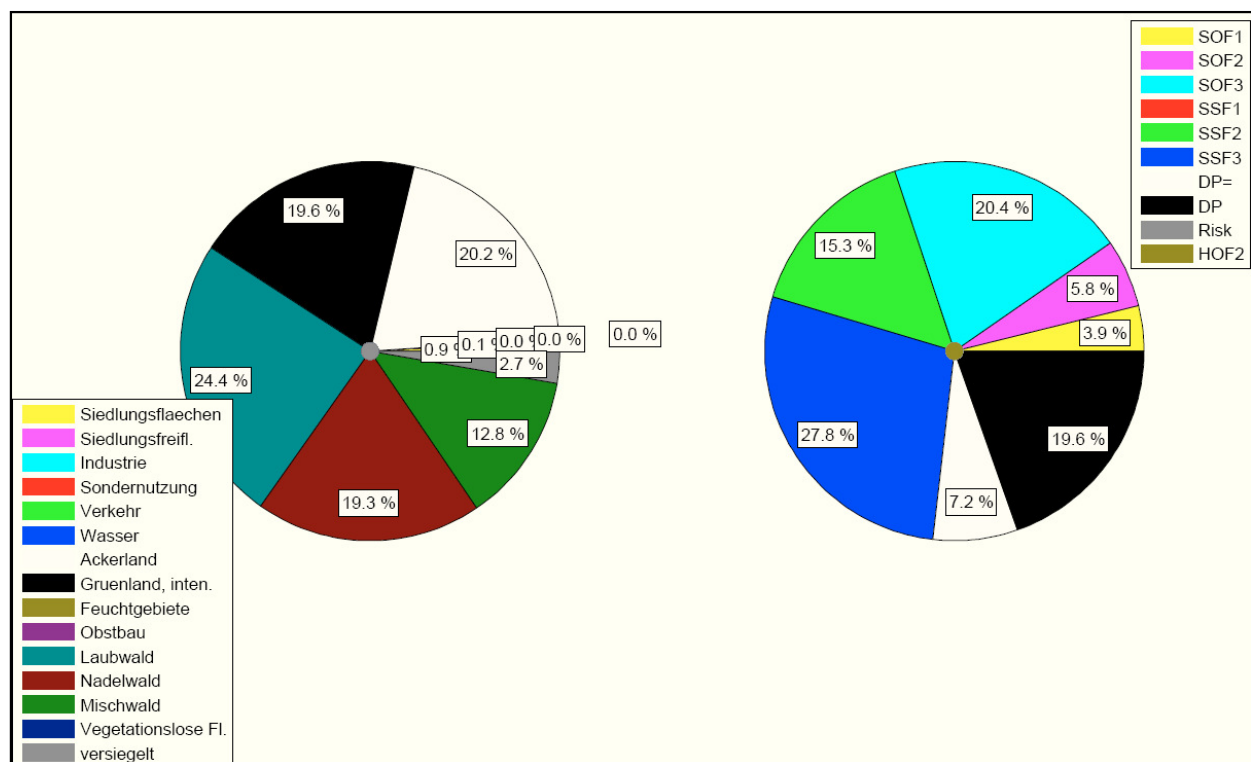


Bild 5.1: Flächenanteile der einzelnen Landnutzungsklassen und der Abflussprozesstypen am Einzugsgebiet des Pegels Kronweiler / Schwoillbach (Quelle: O. Gronz).

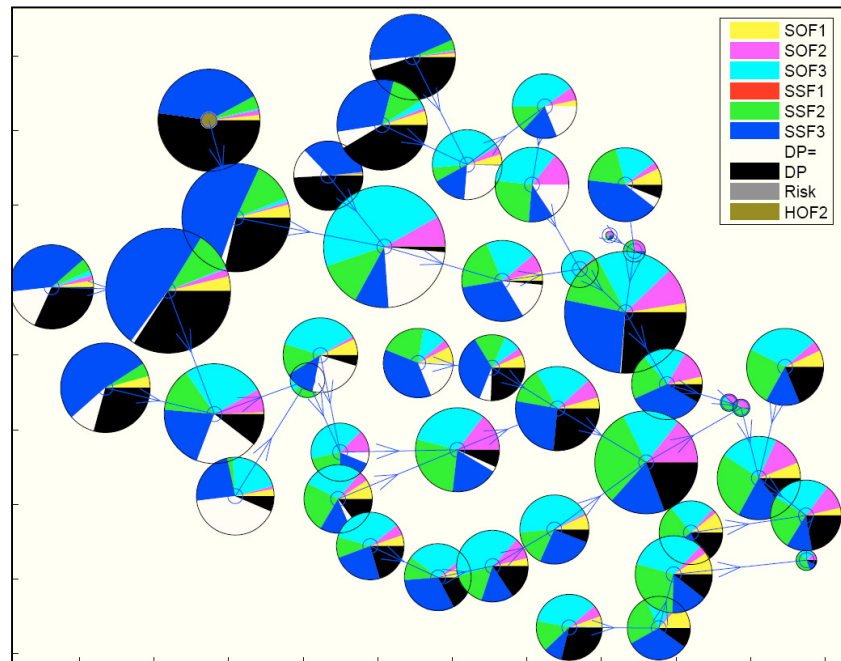


Bild 5.2: LARSIM-Einzugsgebietsstruktur für den Schwallbach bis zum Pegel Kronweiler und Flächenanteile der Abflussprozessstypen an den einzelnen Teilgebieten (Quelle: O. Gronz).

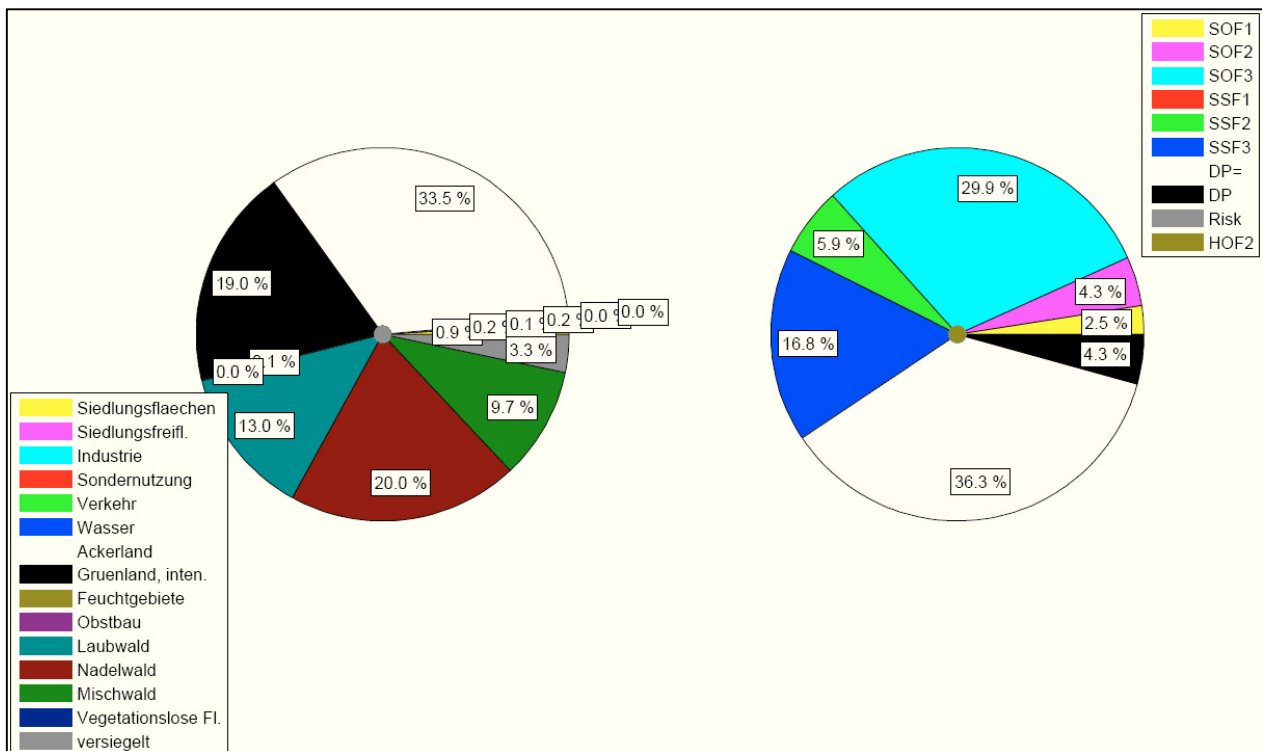


Bild 5.3: Flächenanteile der einzelnen Landnutzungsklassen und der Abflussprozessstypen am Einzugsgebiet des Pegels Kellenbach /Simmerbach (Quelle: O. Gronz).

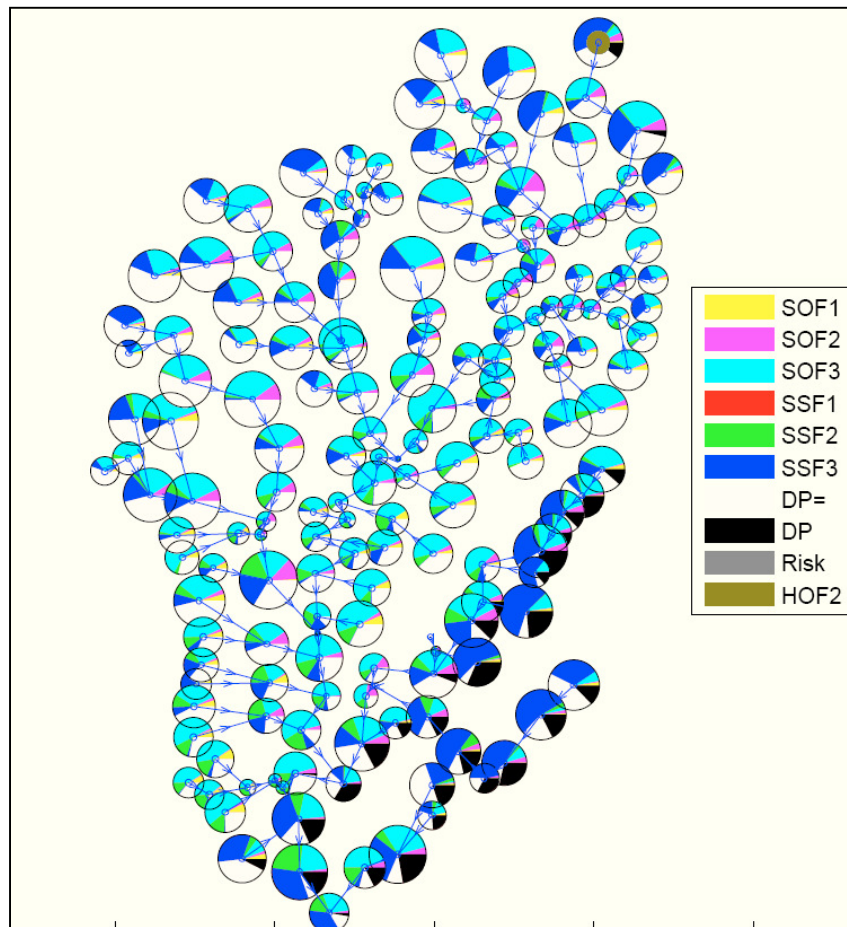


Bild 5.4: LARSIM-Einzugsgebietsstruktur für den Simmerbach bis zum Pegel Kellenbach und Flächenanteile der Abflussprozessstypen an den einzelnen Teilgebieten (Quelle: O. Gronz).

Zusätzlich ist anzumerken, dass im Einzugsgebiet des Pegels Kellenbach / Simmerbach ein Teileinzugsgebiet durch den Pegel Steinbach abgegrenzt wird. Die Messungen an diesem Pegel sollen zu einem späteren Zeitpunkt für eine weiterführende Analyse der hier durchgeführten Modellerweiterung genutzt werden. Im Rahmen der hier vorliegenden Studie wurde der Pegel Steinbach im Simmerbachgebiet jedoch nicht genutzt.

5.3 Umgang mit nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung (DP=) und Grundparametrisierung

Nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung (DP=):

Bei den als „nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung“ bzw. „DP=“ klassifizierten Flächen war nicht völlig klar, wie diese hinsichtlich des dominanten Abflussprozesses zu interpretieren sind. In Absprache mit dem Auftraggeber wurde für diese Flächen daher zunächst davon ausgegangen, dass sie ähnlich wie Moorflächen reagieren: Auf diesen Flächen sollte demnach kein Direktabfluss auftreten und vermehrtes Niederschlagsdargebot sollte allenfalls zu einer geringfügigen Erhöhung der Tiefenversickerung führen. Zudem wurde davon ausgegangen, dass die Verdunstung auf diesen Flächen erhöht (bzw. nicht durch Wassermangel eingeschränkt) ist.

Entsprechend wurde für diese DP=-Flächen ein gesonderter Modellansatz umgesetzt, der in Abschnitt 3.7 beschrieben ist (Mooransatz).

Als erstes Testgebiet war der Schwoillbach bis Kronweiler vorgegeben. Für dieses Einzugsgebiet konnten mit dem „Mooransatz“ zufriedenstellende Eichergebnisse erzielt werden. Das Abflussverhalten konnte nachgebildet werden und die Gesamtwasserbilanz war plausibel. Allerdings haben die DP=-Flächen im Einzugsgebiet Kronweiler / Schwoillbach lediglich einen Flächenanteil von gut 7% (Bild 5.1). Daher sind die Effekte des für sie gewählten Berechnungsansatzes gering.

Im zweiten Schritt erfolgte die Eichung des Einzugsgebiets Kellenbach / Simmerbach, in dem DP= über 36% der Gesamtfläche einnimmt (Bild 5.3). Folglich ist hier der Effekt des für DP= gewählten Berechnungsansatzes wesentlich stärker als für Kronweiler / Schwoillbach.

Für das von DP=-Flächen geprägte Gebiet Kellenbach / Simmerbach war mit dem „Mooransatz“ gemäß Abschnitt 3.7 keine zufriedenstellende Eichung möglich: Die für den Pegel simulierten Abflussreaktionen waren mit realistischen Parameterwerten immer deutlich schwächer als die gemessenen Reaktionen. Auch der Gesamtabfluss wurde (unter Verwendung realistischer Parameterwerte) immer unterschätzt. Die Gebietsverdunstung wurde entsprechend deutlich überschätzt.

Diese Erfahrungen für den Pegel Kellenbach / Simmerbach zeigten, dass die durchgehende Anwendung des in 3.7 beschriebenen „Mooransatzes“ für die DP=-Flächen offensichtlich nicht zielführend ist. Die als DP= kartierten Flächen können hinsichtlich ihres hydrologischen Verhaltens nicht (bzw. zumindest nicht alle) mit diesem Mooransatz beschrieben werden. Vor dem Hintergrund der unzureichenden Abbildung der Wasserbilanz erscheint es insbesondere unrealistisch, dass Niederschlagsüberschüsse auf all diesen Flächen vollständig abgepuffert werden und diese Überschüsse später der Verdunstung zur Verfügung stehen.

Im nächsten Schritt wurde daher untersucht, ob für den Simmerbach mithilfe einer normalen Grundparametrisierung für DP= zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können. Bei der hierfür angesetzten Grundparametrisierung wurde von den bekannten Charakteristika der DP=-Flächen ausgegangen (vgl. LUWG 2006a). Es wurde also berücksichtigt, dass diese Flächen nur stark abgeschwächt und verzögert auf ergiebige Niederschläge reagieren sollten, andererseits diese massive Dämpfung aber nicht überwiegend durch verstärkte Tiefenversickerung bedingt wird.

Vor diesem Hintergrund wurde für die DP=-Flächen eine Grundparametrisierung abgeleitet, die vor allem Elemente von SSF3 und SOF3 beinhaltet (siehe Tabelle 5.2).

Mit dieser Grundparametrisierung der DP=Flächen konnte eine zufriedenstellende Eichung des Pegels Kellenbach / Simmerbach sowie eine plausible Abbildung der Wasserbilanz erzielt werden. Um die gleiche Grundparametrisierung für beide Testgebiete zu gewährleisten, wurde zudem der Pegel Kronweiler / Schwoillbach nochmal nachgeeicht. Mit der neuen Grundparametrisierung konnten für Kronweiler / Schwoillbach sogar etwas bessere Ergebnisse erzielt werden als mit der ersten Eichung.

Die hier für DP= abgeleitete Grundparametrisierung (Tabelle 5.2) erscheint also als Zwischenlösung praktikabel und plausibel. Allerdings ist es sehr wünschenswert, dass die bestehenden Unklarheiten bezüglich der hydrologischen Reaktion dieser Flächen im Dialog mit den Kartierern soweit wie möglich geklärt werden. Danach sollte die Parametrisierung oder die (kleinräumigere) Nutzung des „Mooransatzes“ nochmal überdacht werden.

Grundparametrisierung:

Wie bereits in Abschnitt 3.6 angemerkt, sind die Parameterwerte der konzeptionellen Berechnungsansätze von LARSIM von der Berechnungszeitschrittweite abhängig. Dies ist einerseits auf die rein explizite Berechnungsweise von LARSIM zurückzuführen. Andererseits kommt es bereits durch die zeitliche Mittelung der Antriebsgrößen zu einem „Verschmieren“ der Prozesse. So wird beispielsweise ein kurzes sehr intensives Niederschlagsereignis (Gewitter) durch die Stundensumme des Niederschlags naturgemäß nur unzureichend abgebildet. In Wirklichkeit treten kurzfristig wesentlich höhere Intensitäten auf als in der Stundensumme zum Ausdruck kommt.

Insofern müssen auch die Parameterwerte des Bodenmoduls zwangsläufig an diese zeitlich verschmierte Betrachtungsweise angepasst werden. Daher können beispielsweise für eine Berechnungsschrittweite von einer Stunde im Allgemeinen nicht dieselben Parameterwerte verwendet werden wie bei einer Berechnungsschrittweite von 15 Minuten.

In Abschnitt 3.6 sind charakteristische Parameterwerte für die einzelnen Abflussprozesstypen ermittelt worden (Tabelle 3.2). Hierfür wurde eine Rechenschrittweite von 15 Minuten verwendet, die als klein genug angesehen wurde, um die Dynamik der realen Prozesse abzubilden. Wie Bild 3.7 verdeutlicht, konnten mit dieser Zeitschrittweite die erwarteten Abflussreaktionskurven gut nachvollzogen werden. Allerdings können die dort ermittelten charakteristischen Parameterwerte nicht unmittelbar als Grundparametrisierung für das in Stundenschritten arbeitende LARSIM verwendet werden.

Die in Abschnitt 3.6 abgeleiteten charakteristischen Parameterwerte waren somit zunächst der Startpunkt für die Festlegung der LARSIM-Grundparametrisierung für die Abflussprozesstypen. Bei der weiteren Ableitung der LARSIM-Grundparametrisierung wurde insbesondere darauf geachtet, dass die typischen resultierenden Abflussreaktionen sowie die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Abflussprozesstypen beibehalten wurden. Für die absolute Höhe der Werte der Grundparametrisierung wurden in einem iterativen Verfahren jedoch auch die Ergebnisse der Eichungen für die beiden Testgebiete verwendet.

Die letztlich gewählte LARSIM-Grundparametrisierung ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Diese ist naturgemäß in gewisser Weise subjektiv und Ausdruck der Gebietseigenschaften im Schwollbach- und Simmerbachgebiet. Dabei ist jedoch wichtig, dass die Grundparameter über die entsprechenden Eichfaktoren nach wie vor justierbar sind. Somit ist vor allem das relative Verhältnis zwischen den einzelnen Abflussprozesstypen in der Grundparametrisierung entscheidend und nicht so sehr die absolute Höhe der Parameterwerte in dieser Grundparametrisierung.

Die in Tabelle 5.2 dargestellte Grundparametrisierung wurde in die Datei <boden.par> überführt und für die Eichung der beiden Testgebiete verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die Infiltrationsparameter $I_{\max, \text{char}}$ und $I_{\min, \text{char}}$ in Tabelle 5.2 in der gebräuchlichen Einheit [mm/h] angegeben sind, während sie in der <boden.par> in [mm/d] anzugeben sind (vgl. LfU 2004).

Tabelle 5.2: Grundparametrisierung für die bodenhydrologischen Typen (Abflussprozesstypen) in den LARSIM-Modellen (Berechnungsschrittweite: 1h).

Bodenhydrologischer Typ		Charakteristische Parameterwerte					
		Infiltrationsmodul			PFF	$f_{\text{inter, char}}$	$f_{\text{basis, char}}$
		$I_{\max, \text{char}}$ [mm/h]	$I_{\min, \text{char}}$ [mm/h]	$b_{\text{inf, char}}$	b_{char}		
Oberflächenabfluss	HOF	10,0	1,0	5,00	0,05	1,0	1,0
	SOF1	37,5	1,0	5,00		1,0	1,0
	SOF2	50,0	1,0	2,00		5,0	1,0
	SOF3	100,0	1,0	1,25		25,0	100,0
Schneller unterirdischer Abfluss	SSF1	100,0	15,0	0,10	0,45	1,0	1,0
	SSF2				0,25	25,0	25,0
	SSF3				0,12	25,0	100,0
DP	DP	100,0	15,0	0,10	0,05	1,0	250,0
Sonderflächen	DP=	100,0	1,0	1,25	0,08	50,0	50,0
	Risk	Hier nicht vorhanden					

5.4 Eichung der Untersuchungsgebiete

Für die Eichung der beiden Untersuchungsgebiete wurden Simulationsläufe für den 11-jährigen Zeitraum 1993 bis 2003 durchgeführt. Dabei wurde das Jahr 1993 jeweils zum Einschwingen des Modells verwendet und bei der jahresweisen Auswertung nicht näher betrachtet.

Zudem traten in beiden Gebieten in den Jahren 1996 und 1997 massive Unterschiede zwischen Simulation und Messung auf, die offenbar auf eine Fehleinschätzung des Niederschlags für diesen Zeitraum zurückzuführen sind. Daher wurden auch diese beiden Jahre bei der jahresweisen Betrachtung der Simulationsergebnisse nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich wurde bei der Eichung so vorgegangen, wie dies in der „Kalibrieranleitung“ der HVZ der LUBW beschrieben ist (LUBW et al. 2010). Dabei wurde selbstverständlich das hier angewandte neue Modellkonzept gedanklich in die grundlegende Eichkonzeption integriert. Darüber hinaus wurden die folgenden wichtigen Gesichtspunkte bei der Eichung berücksichtigt:

- Die Parameter A_2 und b_{BSF} stehen im neuen Ansatz nicht mehr zur Kalibrierung zu Verfügung (vgl. Modellgrundlagen in Abschnitt 3).
- Die Parameter β , D_{max} und D_{min} (eigentlich rD_{max} und rD_{min} siehe S. 39) werden durch den neuen Modellansatz unmittelbar beeinflusst. Entsprechend haben die bislang als plausibel angenommenen Wertebereiche für diese Parameter keine Gültigkeit mehr (vgl. Modellgrundlagen in Abschnitt 3).
- Diesen drei direkt beeinflussten Parametern sowie den sechs neuen Parametern des Modellansatzes (vgl. Tabelle 5.3) wurde bei der Eichung besondere Aufmerksamkeit geschenkt.
- Die allgemeinen Gütemaße dienen lediglich als Anhaltspunkte. Das Hauptaugenmerk bei der Ermittlung der Parameterwerte liegt auf dem visuellen Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss.
- Für die Anpassung der hochwasserrelevanten Parameter wurden ausgewählte Hochwasserereignisse unter Anwendung der Option WD-NACH SIMZEITRAUM gesondert betrachtet. Der möglichst optimalen Wahl der Hochwasserparameter wurde dabei eindeutig Vorrang vor einer bestmöglichen Simulation des Langzeitverhaltens gegeben.

Die unter diesen Gesichtspunkten für die beiden Untersuchungsgebiete ermittelten Parameterwerte sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Nachfolgend wird getrennt für die beiden Pegel ausführlicher auf die Ergebnisse der Eichung eingegangen.

Tabelle 5.3: Aus der Eichung abgeleitete Parameterwerte für die beiden Untersuchungsgebiete.

Parameter	Kronweiler / Schwollbach	Kellenbach / Simmerbach	Anmerkungen
EQB	8 000	20 000	
EQI	1 500	700	
EQD	260	190	
EQD2	60	30	
EKM	0.8	0.5	
EKL / EKR	1.0	1.5	
beta	0.000050	0.000082	Vom neuen Modell direkt beeinflusst
rDmin	6.0	8.0	Vom neuen Modell direkt beeinflusst
rDmax	0.025	0.010	Vom neuen Modell direkt beeinflusst
KG	1.00	1.05	
TGr	1.0	1.0	
Abso	0.15	0.15	
A0	2.0	2.0	
A1	1.6	1.6	
lmax_fak	1.25	1.20	Neuer Parameter (siehe Gl. 3.3)
lmin_fak	1.00	0.80	Neuer Parameter (siehe Gl. 3.4)
binf_fak	1.00	1.00	Neuer Parameter (siehe Gl. 3.5)
bPFF_fak	0.50	0.80	Neuer Parameter (siehe Gl. 3.6)
fint_fak	1.20	0.60	Neuer Parameter (siehe Gl. 3.12)
fbas_fak	1.20	0.80	Neuer Parameter (siehe Gl. 3.9)

Kronweiler / Schwollbach:

Bei der Eichung des Pegels Kronweiler / Schwollbach wurde unter Anwendung der in Tabelle 5.2 festgelegten Grundparametrisierung die in Tabelle 5.3 aufgeführten Parameterwerte ermittelt.

Hinsichtlich der bei der Eichung ermittelten Parameterwerte fällt zunächst der im Vergleich zum bisherigen Modellansatz extrem niedrige Wert für den Tiefenversickerungsfaktor β auf. Im neuen hier angewandten Modellansatz bewirkt der geringe Wert für β , dass die Tiefenversickerung bei Bodenwassergehalten bis zur nFK sehr klein ist. Dies spiegelt das reale Verhalten in der Natur wider, wo Bodenwasser bis zur nFK durch das Matrixpotential gegen die Schwerkraft gehalten wird und somit nur sehr geringe Sickerwassermengen anfallen.

Bei den meisten Abflussprozesstypen nimmt die Tiefenversickerung im Modell mit Überschreiten der nFK überproportional zu (vgl. Tab. 5.2), so dass dann trotz des niedrigen β -Werts intensive Tiefenversickerung simuliert wird. Auch dies entspricht dem Verhalten in der Natur, wo die Tiefenversickerung im Grobporenbereich exponentiell zunimmt. Dies führt z.B. dazu, dass die Grundwasserneubildung in den allermeisten Fällen überwiegend im Winterhalbjahr stattfindet.

Der sehr kleine Wert für β ist also durch den neuen Modellansatz bedingt. Dieser kleine Wert ist eine Voraussetzung dafür, dass die zeitliche Dynamik der Tiefenversickerung (wie gewünscht) realitätsnäher simuliert werden kann. Der auffällig kleine β -Wert ist im Rahmen des neuen Modellansatzes somit als plausibel einzustufen.

Neben β fallen die Werte für die Rate der lateralen Drainage zum Interflowspeicher D_{\min} und D_{\max} auf. Hierbei ist anzumerken, dass in LARSIM eigentlich die Parameter rD_{\max} und rD_{\min} als Eichparameter verwendet werden. Diese Eichfaktoren werden LARSIM-intern über eine zeitschrittabhängige lineare Funktion in D_{\max} und D_{\min} umgesetzt. Dabei ist zu beachten, dass der Multiplikationsfaktor für D_{\max} um den Faktor 100 größer ist als der für D_{\min} . Häufig wird vereinfachend nur von D_{\min} und D_{\max} gesprochen. Auch hier wird nachfolgend diese vereinfachende Terminologie genutzt.

D_{\max} ist relativ klein, während gleichzeitig D_{\min} einen hohen Wert (insbesondere im Vergleich zu D_{\max}) aufweist. Bei der Eichung wurde D_{\min} zunächst auf null gesetzt. Allerdings tritt nach dem Ende der zumeist trockenen sommerlichen Periode am Pegel Kronweiler regelmäßig ein rascher Anstieg des „Sockelwerts“ des Abflusses auf. Dieser rasche Anstieg des „Sockelabflusses“ in Zeiten mit zumeist noch geringer Bodenspeicherfüllung kann nur mithilfe des Parameters D_{\min} nachvollzogen werden. Aus diesem Grund war ein relativ hoher Wert für den Parameter D_{\min} unumgänglich.

Hinsichtlich des (insbesondere im Vergleich zu D_{\min}) recht kleinen Werts für D_{\max} ist dasselbe zu beachten, das für den Parameter β oben bereits ausgeführt wurde: Die Wirkung von D_{\max} nimmt für die meisten Abflussprozesstypen mit zunehmendem Wassergehalt des Modellbodens überproportional zu (siehe Abschnitt 3). Insofern sind mit dem neuen Modellansatz im Vergleich zum bisherigen Ansatz deutlich kleinere Werte für D_{\max} (auch im Vergleich zu D_{\min}) zu erwarten. Die für D_{\min} und D_{\max} ermittelten Werte sind im Rahmen des neuen Modellansatzes somit plausibel.

Mit der Grundparametrisierung des neuen Modellansatzes zeigte das Einzugsgebiet des Pegels Kronweiler im Modell insgesamt eine etwas zu rasche und intensive Reaktion auf Niederschlagsereignisse. Entsprechend wurden auch die zusätzlichen Parameter des neuen Modellansatzes, so modifiziert, dass die Reaktion des Einzugsgebiets etwas abgemildert wurde.

Hierfür wurde vor allem $bPFF_fak$ deutlich auf 0.5 reduziert. Durch diese Reduktion wird der Anteil des Niederschlagsdargebots, der in den Gebietsspeicher für schnellen unterirdischen Abfluss gelangt, reduziert.

Durch die Erhöhung von $lmax_fak$ auf 1.25 wird das Infiltrationsvermögen des Bodenspeichers bei geringen Bodenwassergehalten erhöht. Damit wird der Anteil von Oberflächenabfluss bei Niederschlagsereignissen nach zuvor trockenen Verhältnissen etwas reduziert.

Die Erhöhung der Faktoren $fint_fak$ und $fbas_fak$ bewirkt bei hohen Bodenwassergehalten eine verstärkte Drainage in die Gebietsspeicher für Interflow und Basisabfluss und somit insgesamt eine Umverteilung von den schnelleren zu den langsameren Abflusskomponenten.

Alle andern Parameterwerte für den Pegel Kronweiler / Schwoillbach bewegen sich in denselben Wertebereichen, die auch beim bisherigen Modellansatz für vergleichbare Einzugsgebiete üblicherweise ermittelt wurden.

Zur Bewertung der Simulationsgüte sind in Tabelle 5.4 die jahresweisen Gütemaße für den Pegel Kronweiler / Schwoillbach aufgeführt, die mit den Parameterwerten gemäß Tabelle 5.3 erzielt wurden. In den Bildern 5.5 bis 5.7 sind jeweils jahresweise Vergleiche zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss dargestellt. In Tabelle 5.5 sind die Gütemaße für die Simulationen (mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM) für fünf ausgewählte Hochwasser zusammengestellt. Bild 5.8 gibt den Vergleich zwischen Simulation und Messung für vier dieser Ereignisse wieder.

Tabelle 5.4: Gütemaße der berechneten Abflüsse am Pegel Kronweiler / Schwoillbach (Mittelwerte ohne 1993, 1996 und 1997).

Jahr	Lag	r^2	NSC	NSC lnQ	Bilanz
1993	2	0.92	0.88	0.58	0.79
1994	0	0.89	0.85	0.66	0.73
1995	1	0.94	0.94	0.77	0.86
1996	-3	0.67	0.53	0.23	0.55
1997	0	0.84	0.72	-0.21	1.03
1998	-1	0.92	0.86	0.90	1.01
1999	-2	0.90	0.80	0.89	0.95
2000	0	0.64	0.61	0.81	0.91
2001	0	0.91	0.90	0.91	1.05
2002	0	0.91	0.83	0.94	1.13
2003	0	0.95	0.86	0.88	1.17
1994 - 2003	-0.25	0.88	0.83	0.84	0.98

Mit anderen Kalibrierungsvarianten hätten im Mittel etwas bessere Gütemaße erzielt werden können. Das Modell wurde jedoch in erster Linie hinsichtlich des visuellen Vergleichs zwischen Simulation und Messung optimiert, wobei besonderer Wert auf die Nachbildung ausgewählter Hochwasser gelegt wurde.

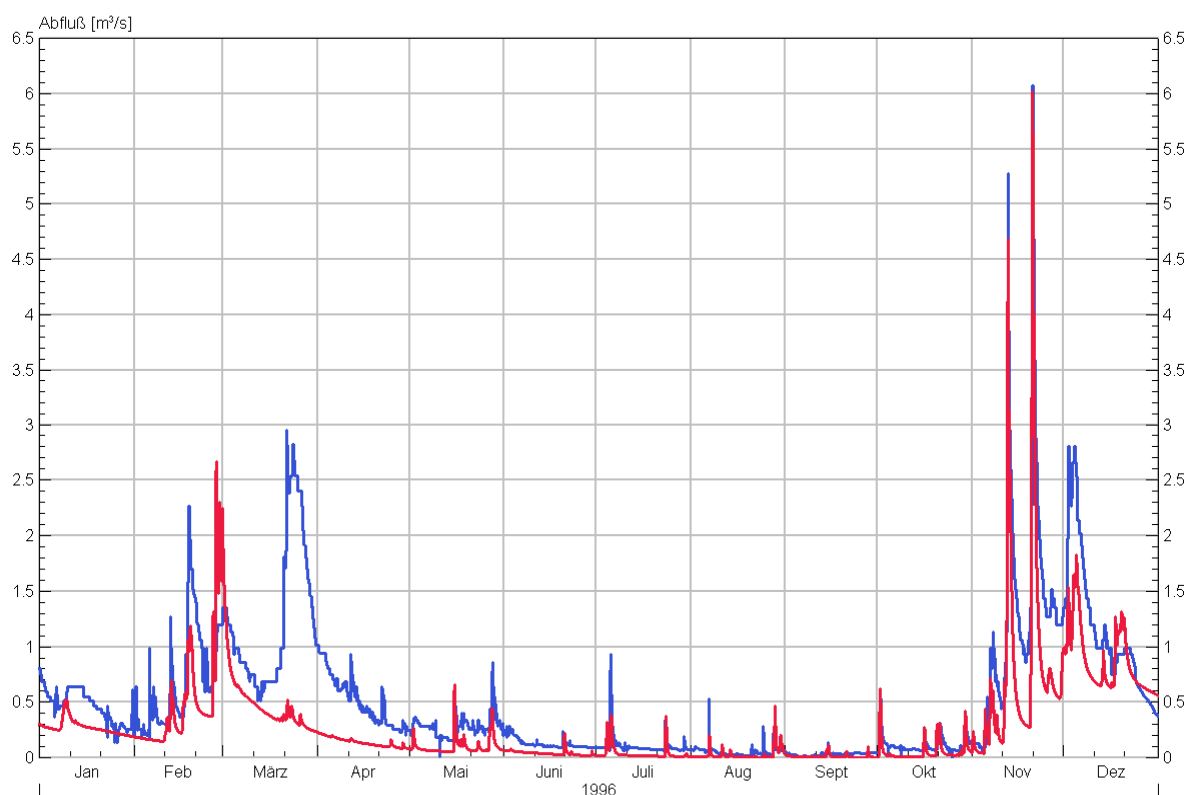


Bild 5.5: Vergleich zwischen simuliertem (rot) und gemessenem (blau) Abfluss am Pegel Kronweiler / Schwoillbach für das Jahr 1996.

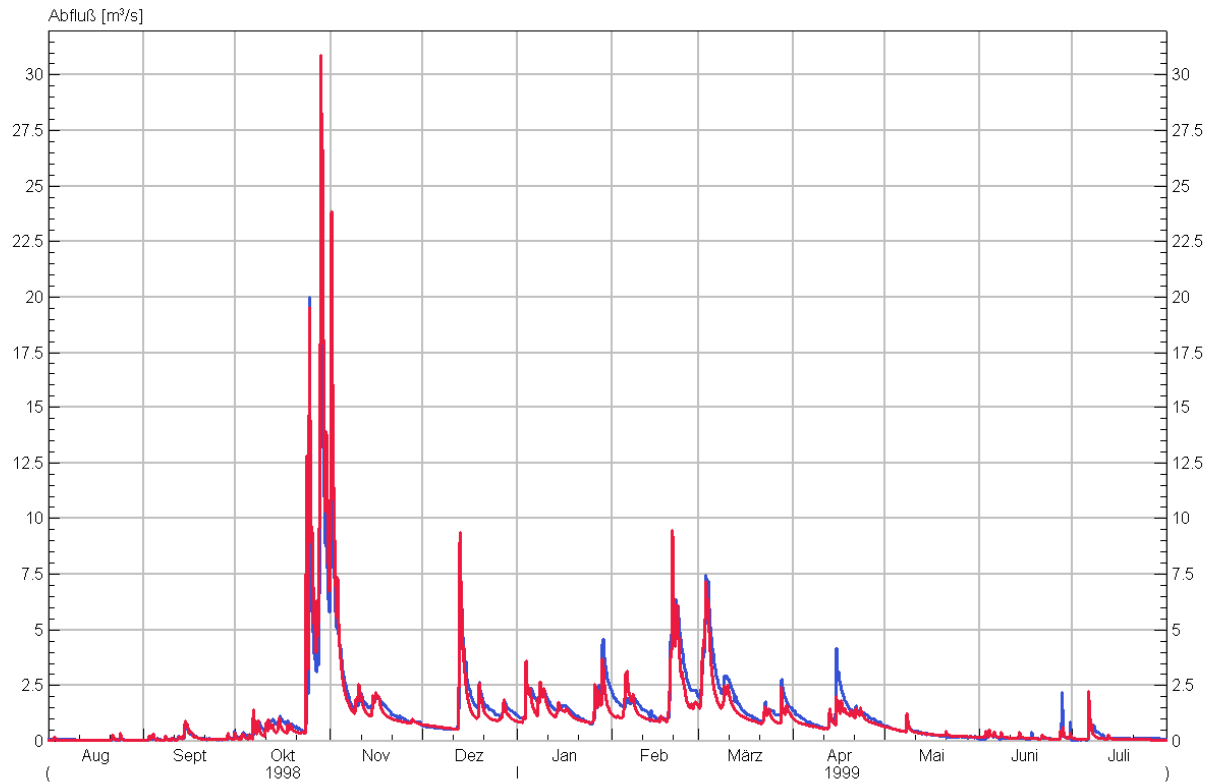


Bild 5.6: Vergleich zwischen simuliertem (rot) und gemessenem (blau) Abfluss am Pegel Kronweiler / Schwoilbach für den Zeitraum August 1998 bis Juli 1999.

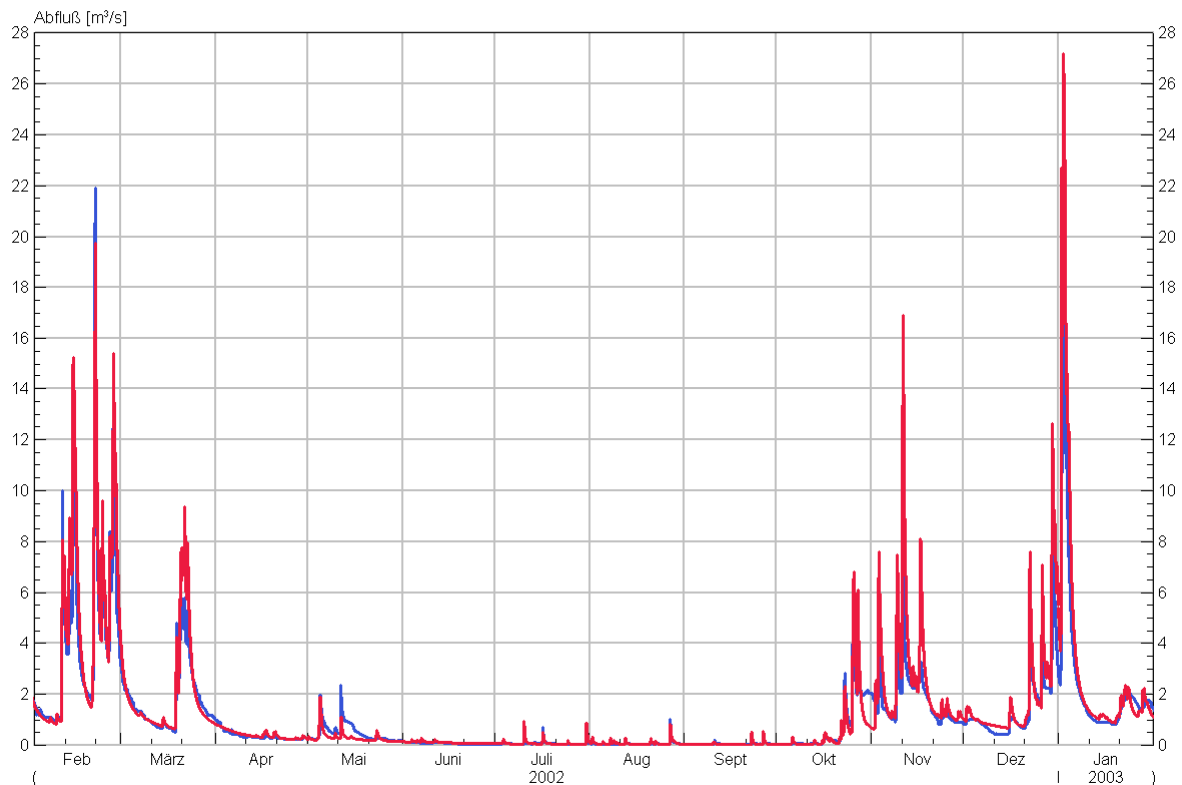


Bild 5.7: Vergleich zwischen simuliertem (rot) und gemessenem (blau) Abfluss am Pegel Kronweiler / Schwoilbach für den Zeitraum Februar 2002 bis Januar 2003.

Bild 5.5 verdeutlicht beispielhaft die typischen Fehleinschätzungen für die Jahre 1996 und 1997: Offenkundig wird der Niederschlag (insbesondere im März) deutlich unterschätzt, was auch in einer Bilanz von 0,55 für 1996 zum Ausdruck kommt (siehe Tab. 5.4). Da diese offenkundigen Fehleinschätzungen auch für den Pegel Kellenbach / Simmerbach in ähnlicher Weise auftraten, wurden die Jahre 1996 und 1997 für beide Pegel aus der näheren Betrachtung ausgeschlossen.

In den Bildern 5.6 und 5.7 sind hingegen typische Jahre dargestellt. Diese Bilder verdeutlichen, dass sowohl der sehr ausgeprägte Jahresgang des Abflusses als auch einzelne Ereignisse mit dem geeichten Modell zufriedenstellend nachvollzogen werden können. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in den Gütemaßen der Tabelle 5.4 wider. Mit einer mittleren Nash-Sutcliffe-Effizienz von 0,83 können die Ergebnisse in Anbetracht der kleinen Einzugsgebietsgröße als recht gut eingestuft werden. Dass auch die Mittel- und Niedrigwasserdynamik gut nachvollzogen werden können, zeigt sich in der Nash-Sutcliffe-Effizienz von 0,84 für die logarithmierten Abflüsse.

Auch die meisten Hochwasserereignisse können mit dem Modell zufriedenstellend nachvollzogen werden (Tab. 5.5, Bild 5.8). Auffällig ist allerdings, dass bei den meisten Ereignissen die simulierte Ganglinie im abfallenden Ast nach dem Ereignis deutlich nachläuft, was sich auch im Lag in Tabelle 5.5 zeigt. Dieser unerwünschte Effekt konnte nicht beseitigt werden, ohne an anderer Stelle eine deutliche Verschlechterung der Simulationsergebnisse zu erzeugen.

Beim HW 01/2003 handelt es sich um ein mehrgipfliges Ereignis, das aus diesem Grund mithilfe der Wasserdargebotsnachführung nicht ideal nachgebildet werden konnte. Daher sind die relativ schlechten Gütemaße für dieses Ereignis nachvollziehbar.

Nicht zufriedenstellend sind jedoch die Ergebnisse für das HW 01/1995. Bei diesem Ereignis handelt es sich um das höchste bislang gemessene Hochwasser (HQ) am Pegel. Wie Bild 5.8 zeigt, konnte der Scheitelwert trotz der Wasserdargebotsnachführung mit dem Modell nicht erreicht werden. Eine weitere Verbesserung für dieses Ereignis hätte deutliche Verschlechterungen für andere Bereiche der Simulation zu Folge gehabt. Deshalb wurde dieses wenig befriedigende Ergebnis für das einzelne Hochwasser im Sinne eines bestmöglichen Gesamtergebnisses in Kauf genommen.

Tabelle 5.5: Gemessene Scheitelabflüsse (Stundenwerte) und Gütemaße der berechneten Abflüsse am Pegel Kronweiler / Schwollbach für ausgewählte Hochwasser (Simulationen mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM).

Hochwasser	Q_{Scheitel} [m ³ /s]	Lag	r ²	NSC	NSC lnQ	Bilanz
HW 12/1993	36	2	0.95	0.92	0.90	1.01
HW 01/1995	58	1	0.83	0.79	0.88	1.01
HW 10/1998	25	-1	0.98	0.97	0.93	0.99
HW 02/2003	22	1	0.95	0.91	0.91	1.01
HW 01/2003	24	0	0.73	0.73	0.75	1.00
Mittelwert		0.6	0.89	0.86	0.87	1.00

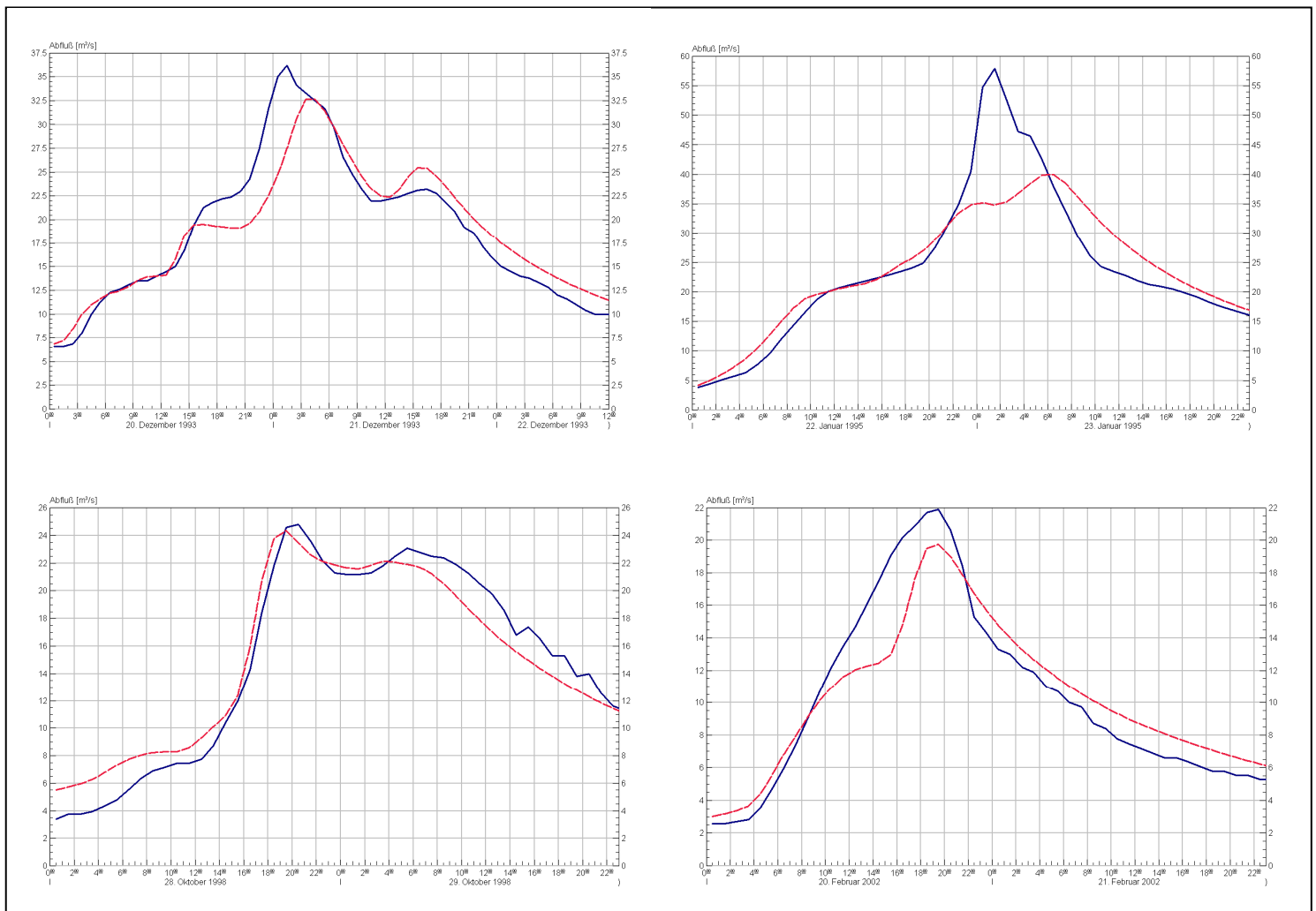


Bild 5.8: Vergleich zwischen simulierten (rot) und gemessenen (blau) Abflüssen am Pegel Kronweiler / Schwoilbach für ausgewählte Hochwasser (Simulation mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM).

Kellenbach / Simmerbach:

Bei der Eichung des Pegels Kellenbach / Simmerbach wurden unter Verwendung der Grundparametrisierung aus Tabelle 5.2 die in Tabelle 5.3 aufgeführten Parameterwerte ermittelt.

Ähnlich wie für Kronweiler / Schwoilbach beschrieben, wurde auch für Kellenbach / Simmerbach ein sehr niedriger Wert für den Tiefenversickerungsparameter β ermittelt. Auch die Parameter für die laterale Drainage D_{\min} und D_{\max} zeigen ähnliche Charakteristika wie für den Pegel Kronweiler. Für die Wahl der Parameterwerte für den Pegel Kellenbach / Simmerbach waren dieselben Ursachen ausschlaggebend, die für den Pegel Kronweiler / Schwoilbach bereits oben beschrieben wurden. Folglich sind diese Parameterwerte im Rahmen des neuen Modellansatzes auch für den Pegel Kellenbach / Simmerbach plausibel.

Tabelle 5.6: Gütemaße der berechneten Abflüsse am Pegel Kellenbach / Simmerbach
(Mittelwerte ohne 1993, 1996 und 1997)

Jahr	Lag	r^2	NSC	NSC lnQ	Bilanz
1993	-3	0.93	0.93	0.87	0.94
1994	-3	0.85	0.80	0.89	0.93
1995	-1	0.86	0.85	0.85	0.99
1996	-6	0.61	0.36	0.54	0.58
1997	-4	0.75	0.72	0.76	0.75
1998	-4	0.87	0.65	0.93	1.03
1999	-4	0.83	0.69	0.89	1.16
2000	-4	0.78	0.60	0.78	1.06
2001	-6	0.85	0.69	0.94	1.10
2002	-4	0.91	0.79	0.83	0.95
2003	-2	0.94	0.91	0.90	1.00
1994 - 2003	-3.5	0.86	0.75	0.88	1.03

Zur Bewertung der Simulationsgüte sind in Tabelle 5.6 die jahresweisen Gütemaße für den Pegel Kellenbach / Simmerbach aufgeführt, die mit den Parameterwerten gemäß Tabelle 5.3 erzielt wurden. In den Bildern 5.9 und 5.10 sind jahresweise Vergleiche zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss dargestellt. In Tabelle 5.7 sind die Gütemaße für die Simulationen (mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM) für fünf ausgewählte Hochwasser zusammengestellt. Bild 5.11 gibt den Vergleich zwischen Simulation und Messung für vier dieser Ereignisse wieder.

Ähnlich wie für den Pegel Kronweiler in Bild 5.5 dargestellt, traten auch am Pegel Kellenbach / Simmerbach in den Jahren 1996 und 1997 drastische Unterschätzungen des Abflusses auf, die auf einen fehlerhaften Niederschlagsinput zurückgeführt wurden. Daher wurden diese beiden Jahre auch beim Pegel Kellenbach nicht für die jahresweise Auswertung herangezogen (Tab. 5.6).

Wie die Bilder 5.9 und 5.10 beispielhaft verdeutlichen, konnte der gemessene Abfluss in den anderen Jahren mit den gewählten Parameterwerten zufriedenstellend nachvollzogen werden. Auch das mittlere Bestimmtheitsmaß ($r^2 = 0.86$) sowie die mittlere Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Abflüsse (NSC lnQ = 0.88) belegen die guten Simulationsergebnisse hinsichtlich einer jahresweisen Betrachtung.

Die Nash-Sutcliffe-Effizienz ist mit einem Mittelwert von nur 0.75 hingegen allenfalls zufriedenstellend. Hierzu ist anzumerken, dass die Parameterwerte im Fall des Pegels Kellenbach bei der spezifischen Betrachtung der größten Hochwasser nochmals deutlich verändert wurden, um eine bestmögliche Anpassung an diese Hochwasser zu erreichen. Bei der Eichung, die ausschließlich auf einer jahresweisen Betrachtung beruhte, ergab sich noch eine mittlere Nash-Sutcliffe-Effizienz von 0,81 ($r^2 = 0.88$; NSC lnQ = 0.90).

Im Sinne einer bestmöglichen Anpassung an extreme Hochwasser mussten die Parameterwerte jedoch nochmals deutlich modifiziert werden. Dies hat zur Folge, dass kleinere Hochwasser nun tendenziell überschätzt werden. Folglich ist die Nash-Sutcliffe-Effizienz in den Jahren 1998 bis 2001, in denen mehrere kleine Hochwasser auftraten, relativ schlecht. In den Jahren mit den höchsten Hochwassern (1993, 1995, 2003) werden hingegen besonders hohe Nash-Sutcliffe-Effizienzen erreicht.

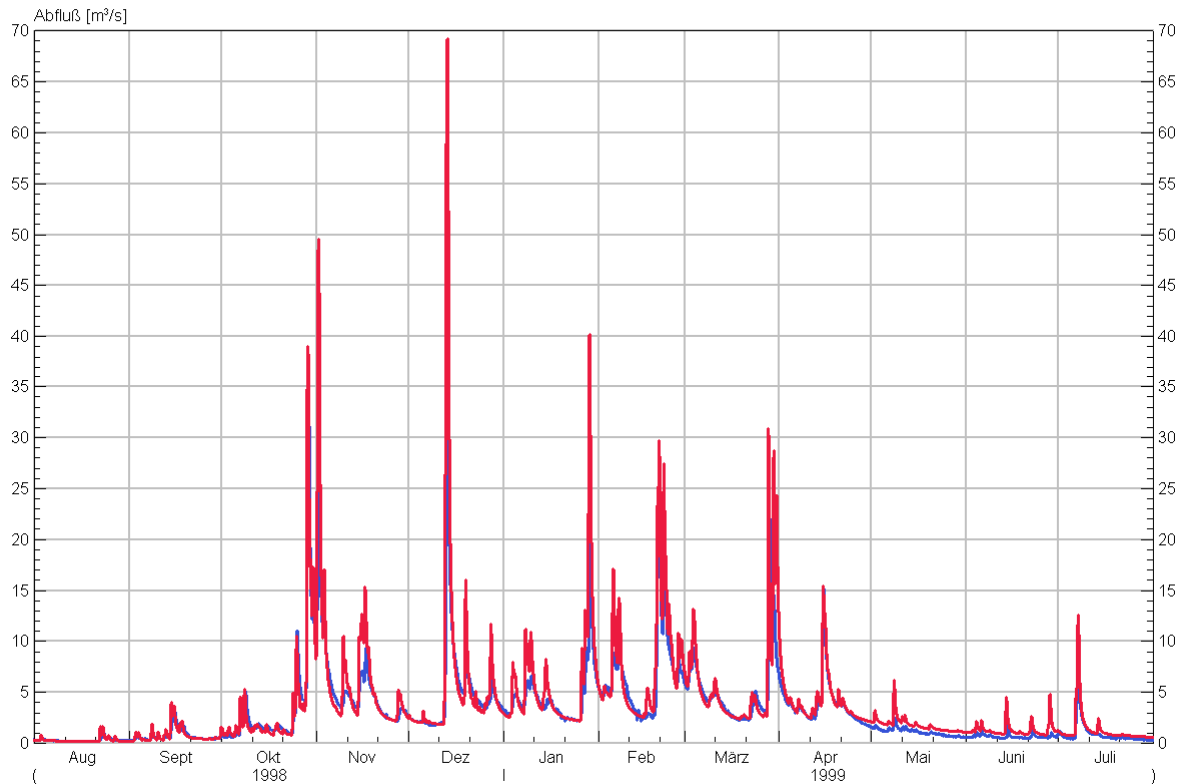


Bild 5.9: Vergleich zwischen simuliertem (rot) und gemessenem (blau) Abfluss am Pegel Kellenbach / Simmerbach für den Zeitraum August 1998 bis Juli 1999.

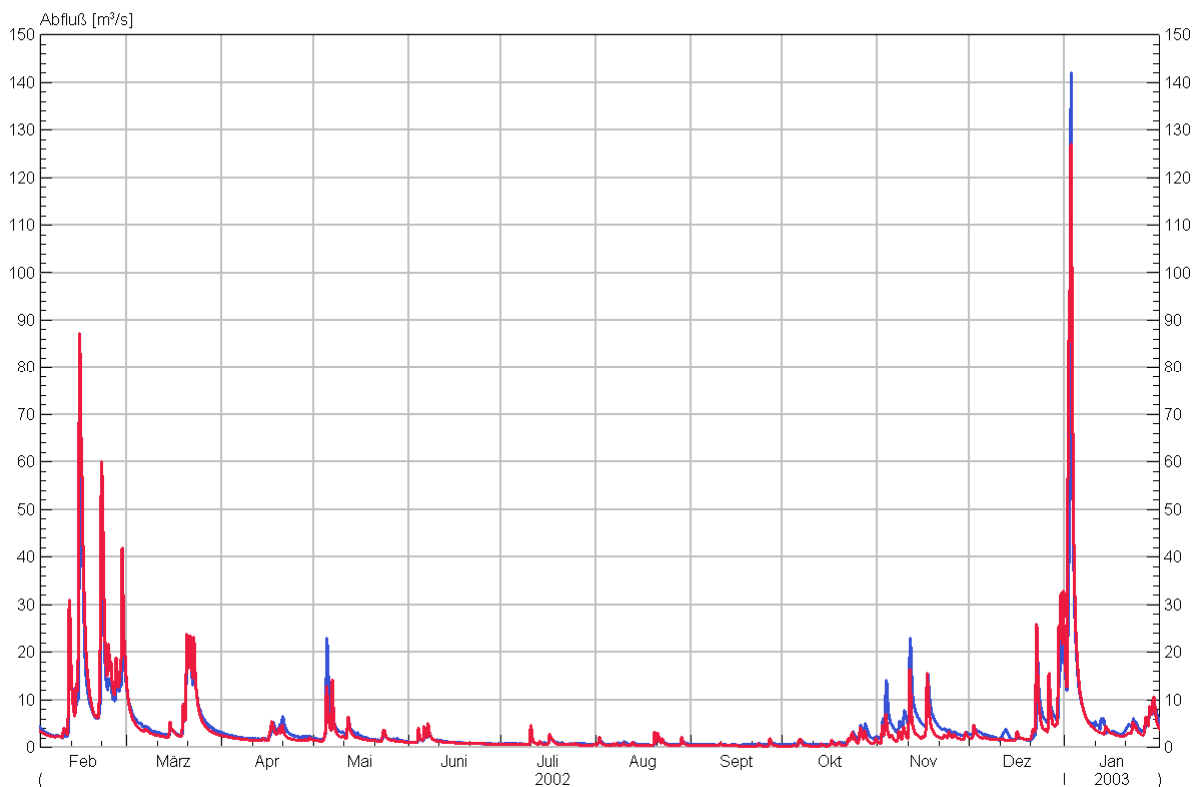


Bild 5.10: Vergleich zwischen simuliertem (rot) und gemessenem (blau) Abfluss am Pegel Kellenbach / Simmerbach für den Zeitraum Februar 2002 bis Januar 2003.

Diese Ausführungen verdeutlichen, dass in manchen Fällen die Optimierung hinsichtlich der bestmöglichen Nachbildung von Hochwassern zu einer deutlichen Verschlechterung der mittleren statistischen Gütemaße führen kann. Im Sinne einer bestmöglichen Hochwasservorhersage sollte in diesem Fall aber dem visuellen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Hochwasserabflüssen eindeutige Priorität eingeräumt werden.

Im Falle des Pegels Kellenbach / Simmerbach ergibt sich jedoch ein zweites eindeutiges Defizit, das auch durch die spezifische Anpassung der Hochwasserereignisse nicht beseitigt werden konnte: Die simulierte Ganglinie läuft in den allermeisten Fällen (inkl. des ansteigenden Asts von Hochwassern) merklich vor.

Dieses Vorlaufen konnte durch die Modifikation der relevanten Hochwasserparameter nicht ohne massivste Verschlechterungen in anderen Bereichen reduziert werden. Auch durch eine extreme Erhöhung der Gerinnerauhigkeit (Reduktion von EKM und EKL/R bis 0.3) konnte das Vorlaufen nicht maßgeblich verringert werden.

Dieses Vorlaufen der simulierten Ganglinie kann im operationellen Fall durch die dann aktiven Nachführungsroutinen zu einer merklichen Verschlechterung der Vorhersagequalität führen. Da zum jetzigen Zeitpunkt jedoch davon auszugehen ist, dass die Grundparametrisierung des Modells vor einer operationellen Inbetriebnahme hinsichtlich der DP=-Flächen nochmal überarbeitet wird, wurde der beobachtete Lag zum jetzigen Zeitpunkt hingenommen. Im Falle einer Überführung in den operationellen Betrieb, sollte die angesprochene Problematik für den Pegel Kellenbach / Simmerbach aber auf jeden Fall beachtet werden.

Tabelle 5.7 und Bild 5.11 geben die Ergebnisse der spezifischen Hochwasserbetrachtungen unter Verwendung der Option WD-NACH SIMZEITRAUM wieder. Hierbei ist zu beachten, dass mit den HW 12/1993, 01/2003 und 01/1995 die drei höchsten bislang gemessenen Hochwasserereignisse in die Betrachtung eingehen. Die Ereignisse HW 02/2002 und insbesondere 12/1998 sind im Vergleich hierzu eher unbedeutend.

Aus Tabelle 5.7 und Bild 5.11 wird deutlich, dass die Hochwasserereignisse zufriedenstellend nachgebildet werden können. Auffällig ist jedoch, dass trotz der Wasserdargebotsnachführung die gemessenen Scheitelabflüsse durch die Simulationen beständig unterschätzt werden. Gleichzeitig tritt das bereits oben beschriebene Vorlaufen der simulierten Ganglinie in allen Fällen auf.

Eine bessere Nachbildung der Scheitelabflüsse hätte nur bei weiterer deutlicher Verschlechterung der Simulationsergebnisse in anderen Bereichen erreicht werden können. Durch das Vorlaufen der Simulation und die Unterschätzung der Scheitelabflüsse kann das Ergebnis der Anpassung insbesondere mit Blick auf die operationelle Hochwasservorhersage nur bedingt als zufriedenstellend bewertet werden.

Das Vorlaufen der simulierten Ganglinie ist jedoch möglicherweise zumindest Teilweise auf die Probleme mit der Klassifizierung der im Simmerbachgebiet dominierenden DP=-Flächen zurückzuführen. Daher sollte die Modellanpassung (insbesondere mit Blick auf die Hochwasservorhersage) nach der angestrebten Modifikation der Kartierung bzw. Klassifikation der DP=-Flächen auf jeden Fall nochmal kritisch überprüft werden.

Tabelle 5.7: Gemessene Scheitelabflüsse (Stundenwerte) und Gütemaße der berechneten Abflüsse am Pegel Kellenbach / Simmerbach für ausgewählte Hochwasser (Simulationen mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM).

Hochwasser	Q_{Scheitel} [m ³ /s]	Lag	r ²	NSC	NSC lnQ	Bilanz
HW 12/1993	147	-2	0.91	0.88	0.96	0.99
HW 01/1995	131	-1	0.96	0.95	0.93	1.00
HW 12/1998	38	-5	0.99	0.97	0.96	0.99
HW 02/2002	68	-3	0.98	0.96	0.96	1.00
HW 01/2003	143	-1	0.95	0.92	0.96	1.00
Mittelwert		-2.4	0.96	0.94	0.95	1.00

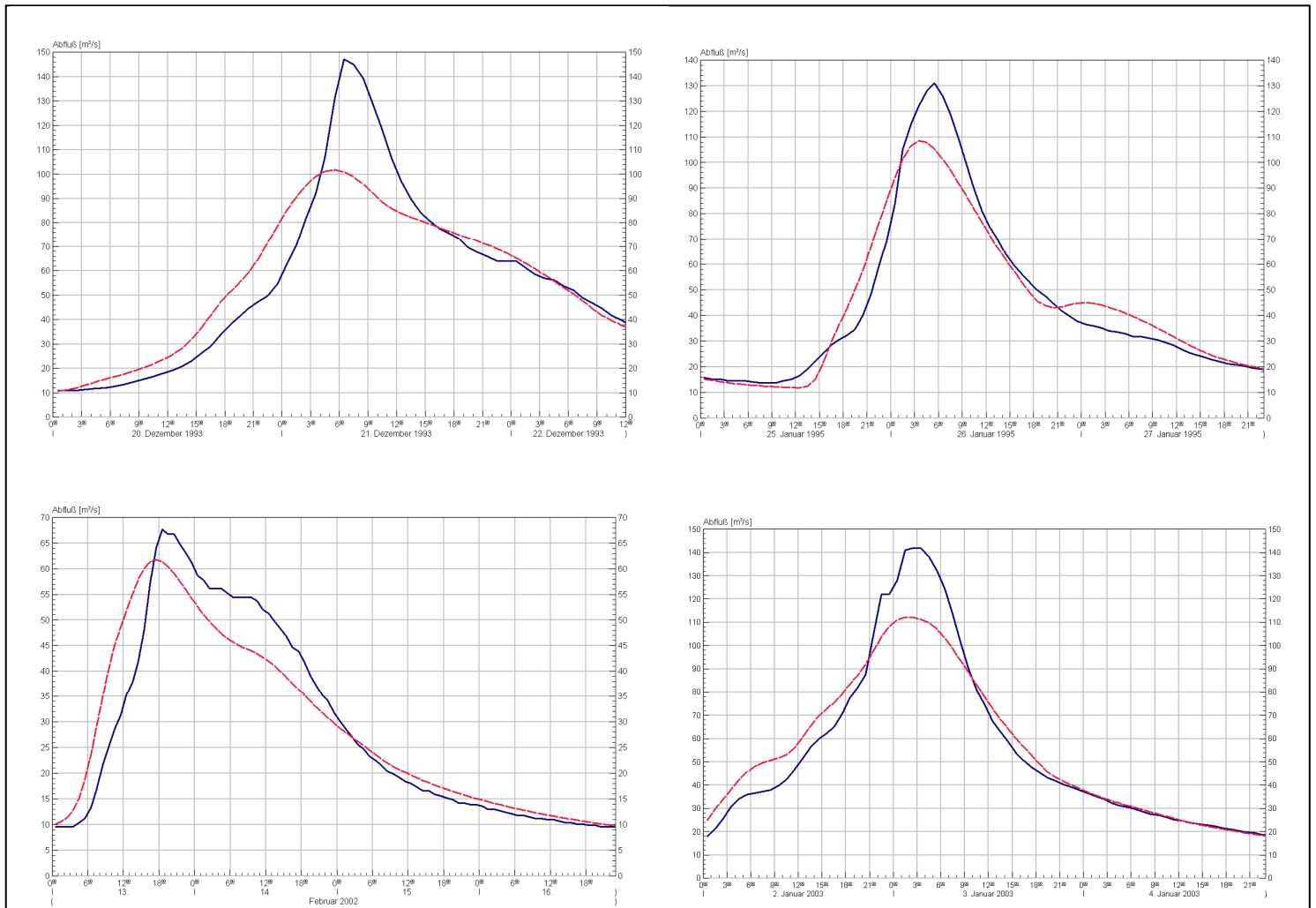


Bild 5.11: Vergleich zwischen simulierten (rot) und gemessenen (blau) Abflüssen am Pegel Kellenbach / Simmerbach für ausgewählte Hochwasser (Simulation mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM).

5.5 Vergleich mit dem bisherigen Modell

Nachfolgend werden erste Vergleiche zwischen dem bisherigen Modellansatz und dem hier neu entwickelten Modellansatz für die beiden Untersuchungsgebiete dargestellt und ausgewertet. Hierbei geht es vor allem um Vergleiche in folgenden Bereichen:

- Parameterwerte
- allgemeine Gütemaße
- zeitliche Dynamik des Abflusses
- Unterschiede in den Abflussbereichen (insbesondere Hochwasser)

Die Ergebnisse dieser Auswertungen werden nachfolgend getrennt für die beiden Pegel dargestellt.

Über die hier untersuchten Punkte hinaus, ist es zweifellos wünschenswert auch Unterschiede in der räumlichen Dynamik (unter Hinzunahme des Pegels Steinbach) und hinsichtlich der Vorhersagegüte durchzuführen. Da allerdings voraussichtlich noch eine Neuklassifikation der DP=–Flächen vorgenommen wird und dies wiederum Rückwirkungen auf die Simulation mit dem neuen Modellansatz hat, sollen diese ausführlicheren Analysen erst zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden.

Kronweiler / Schwollbach:

Tabelle 5.8 verdeutlicht, welche Parameterwerte im Zuge der Eichung des neuen Modellansatzes für den Pegel Kronweiler / Schwollbach im Vergleich zum bisherigen Modell angepasst wurden. Tabelle 5.9 zeigt den Vergleich der jahresweisen Gütewerte der beiden Modelle. Die Bilder 5.12 und 5.13 verdeutlichen, welche Änderungen sich durch das neue Modell hinsichtlich der zeitlichen Dynamik im Niedrig- und Mittelwasserbereich ergeben. In Bild 5.14 werden die Hochwassersimulationen der beiden Modelle mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM miteinander verglichen.

Die auffälligsten Änderungen ergeben sich für die Parameter β (Tiefenversickerung) sowie für D_{\min} und D_{\max} (laterale Drainage zum Interflowspeicher), was unmittelbar auf die geänderte Modellstruktur zurückzuführen ist (detaillierte Diskussion siehe Abschnitt 5.4). Zudem wurde die Rückhaltekonstante für den Basisabfluss deutlich reduziert. Dies ist notwendig, um die stärkere (und vermutlich realistischere) zeitliche Dynamik des Basisabflusses nachzubilden. Die Modifikationen an den anderen Parameterwerten sind vermutlich nur in geringerem Maße durch die veränderte Modellstruktur bedingt. Vielmehr sind diese in erster Linie auf individuelle Unterschiede bei der Eichstrategie zurückzuführen.

Tabelle 5.9 zeigt, dass durch die neue Modellstruktur im Mittel etwas höhere Gütewerte erzielt werden als mit dem bisherigen Modell. Insbesondere die Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Abflüsse nimmt mit der neuen Modellstruktur deutlich zu, was auf merkliche Verbesserungen im Niedrigwasserbereich hinweist.

Die ausgeprägten Veränderungen bei der Simulation des Niedrig- und Mittelwasserbereichs werden durch die Bilder 5.12 und 5.13 veranschaulicht: Mit dem neuen Modellansatz ergibt sich eine wesentlich stärkere jahreszeitliche Dynamik des Basisabflusses. Diese Dynamik ist durch den überproportionalen Anstieg der Tiefenversickerung bei Bodenwassergehalten größer nFK bedingt. Wie oben bereits erläutert, erscheint diese stärkere Dynamik des (grundwasserbürtigen) Basisabflusses realistischer als der relativ gleichförmige Verlauf des Basisabflusses mit dem bisherigen Modellansatz.

Tabelle 5.8: Parameterwerte des LARSIM-Modells für Kellenbach / Simmerbach, die im Vergleich zwischen dem bisherigen Modell und dem neuen Modellansatz geändert wurden.

Parameter	Bisheriges Modell	Neuer Modellansatz	Anmerkungen
EQB	16 000	8 000	
EQI	800	1 500	
EQD	480	260	
EQD2	150	60	
beta	0.002600	0.000050	siehe Text
rDmin	0.2	6.0	siehe Text
rDmax	0.100	0.025	siehe Text
lmax_fak	--	1.25	siehe Text
lmin_fak	--	1.00	
binf_fak	--	1.00	
bPFF_fak	--	0.50	siehe Text
fint_fak	--	1.20	siehe Text
fbas_fak	--	1.20	siehe Text

Tabelle 5.9: Vergleich der Gütemaße der berechneten Abflüsse am Pegel Kronweiler / Schwollbach für das bisherige Modell und den neuen Modellansatz (Mittelwerte ohne 1993, 1996 und 1997)

Jahr	Lag		r ²		NSC		NSC lnQ		Bilanz	
	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu
1993	4	2	0.88	0.92	0.83	0.88	0.72	0.58	0.79	0.79
1994	1	0	0.85	0.89	0.82	0.85	0.68	0.66	0.76	0.73
1995	2	1	0.92	0.94	0.92	0.94	0.75	0.77	0.88	0.86
1996	-1	-3	0.63	0.67	0.50	0.53	0.47	0.23	0.56	0.55
1997	0	0	0.84	0.84	0.72	0.72	0.34	-0.21	1.10	1.03
1998	0	-1	0.90	0.92	0.86	0.86	0.78	0.90	1.00	1.01
1999	-1	-2	0.90	0.90	0.84	0.80	0.85	0.89	0.97	0.95
2000	1	0	0.59	0.64	0.55	0.61	0.71	0.81	0.93	0.91
2001	1	0	0.88	0.91	0.86	0.90	0.80	0.91	1.05	1.05
2002	1	0	0.91	0.91	0.85	0.83	0.88	0.94	1.15	1.13
2003	0	0	0.92	0.95	0.83	0.86	0.77	0.88	1.24	1.17
1994 - 2003	0.63	-0.25	0.86	0.88	0.82	0.83	0.78	0.84	1.00	0.98

Die als realistisch eingeschätzte stärkere Dynamik des Basisabflusses bewirkt jedoch auch, dass offenkundige Fehleinschätzungen des Niederschlags wie im Jahr 1996 beim Basisabfluss deutlicher zum Tragen kommen (Bild 5.12).

Ähnlich wie beim Basisabfluss ergibt sich mit dem neuen Modellansatz auch für den Interflow eine wesentlich stärkere zeitliche Dynamik als bislang. Auch diese ausgeprägtere Dynamik des Interflows erscheint vor dem Hintergrund der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse realitätsnäher als die geringe Dynamik beim bisherigen Ansatz (Bild 5.13).

Insgesamt kann die erhöhte Dynamik des Interflows und des Basisabflusses im Falle von Kronweiler / Schwoilbach bei gleichzeitiger Verbesserung der Nash-Sutcliffe-Effizienz für logarithmierte Abflüsse also als Modellverbesserung angesehen werden.

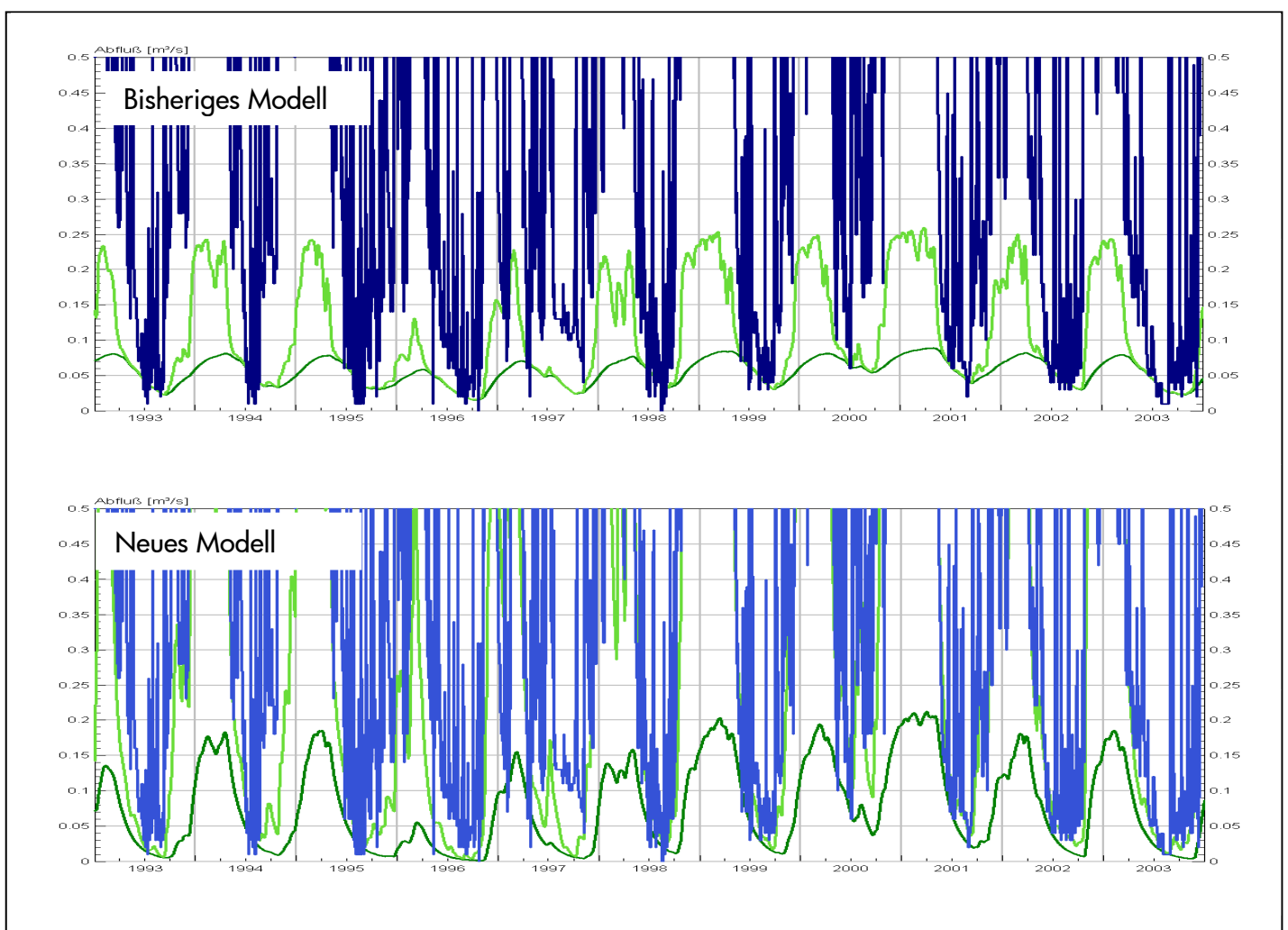


Bild 5.12: Vergleich zwischen gemessenem Abfluss (blau) im Niedrigwasserbereich sowie simuliertem Basisabfluss (dunkelgrün) und Interflow (hellgrün) für den bisherigen und den neuen Modellansatz am Pegel Kronweiler / Schwoilbach.

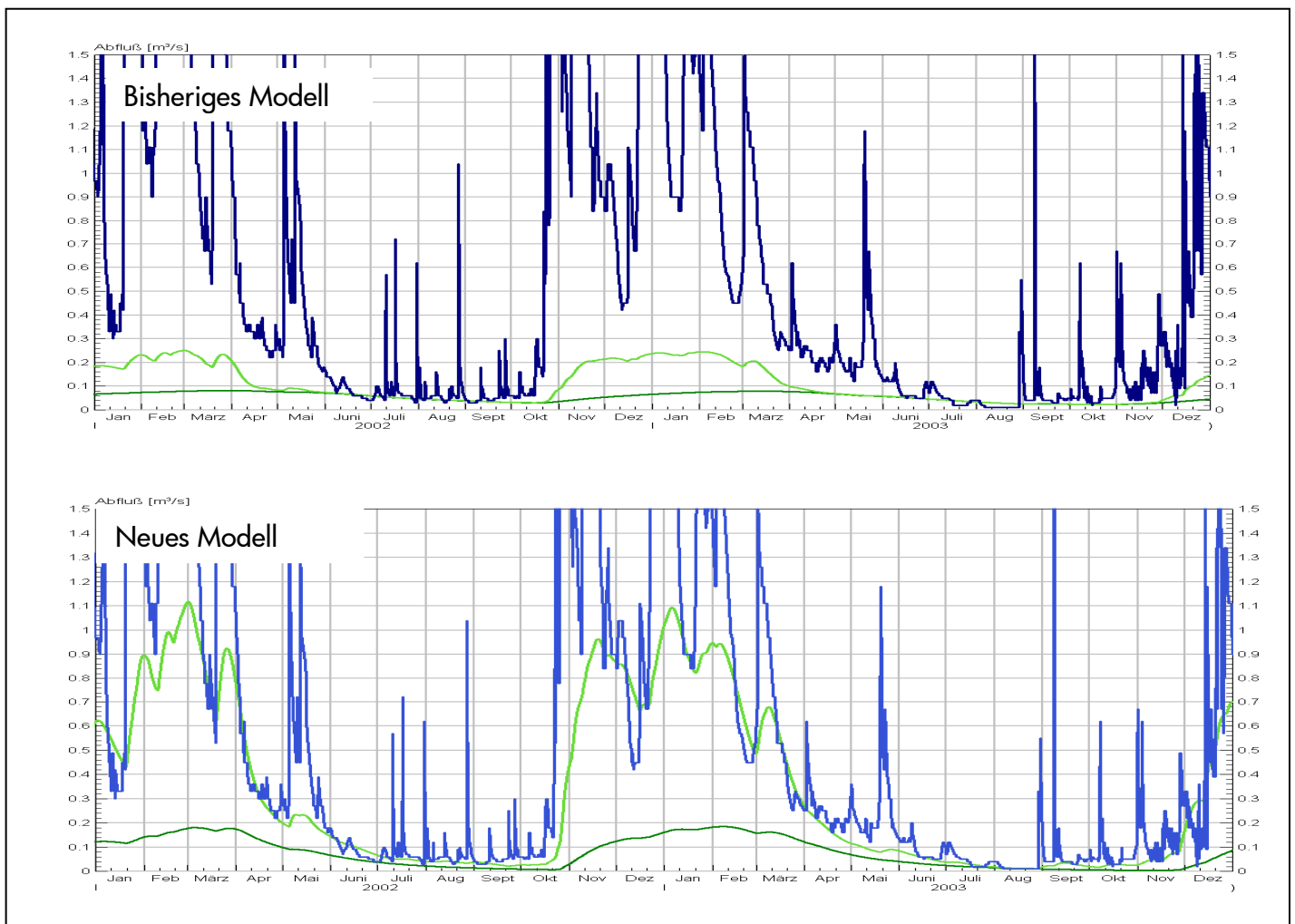


Bild 5.13: Vergleich zwischen gemessenem Abfluss (blau) im Mittel- und Niedrigwasserbereich sowie simuliertem Basisabfluss (dunkelgrün) und Interflow (hellgrün) für den bisherigen und den neuen Modellansatz am Pegel Kronweiler / Schwoilbach.

Hinsichtlich der simulierten Hochwasserabflüsse ergeben sich hingegen nur geringere Unterschiede zwischen dem bisherigen und dem neuen Modellansatz (Tab. 5.9, Bild 5.14). Die Nash-Sutcliffe-Effizienz nimmt im Mittel der Jahre zwar etwas zu, für die einzelnen Jahre ergibt sich jedoch ein uneinheitliches Bild.

Für drei der vier in Bild 5.14 dargestellten Hochwasser wird die grundsätzliche Unterschätzung des Scheitels mit dem neuen Modell etwas reduziert. Im Falle des extremsten Ereignisses HW 01/1995 bleibt die Unterschätzung des Abflussscheitels jedoch in vollem Maße erhalten.

Insgesamt wird durch den neuen Modellansatz keine grundlegende Verbesserung hinsichtlich der Simulation von Hochwasserabflüssen erzielt. Für diesen Abflussbereich ergeben sich allenfalls leichte tendenzielle Verbesserungen.

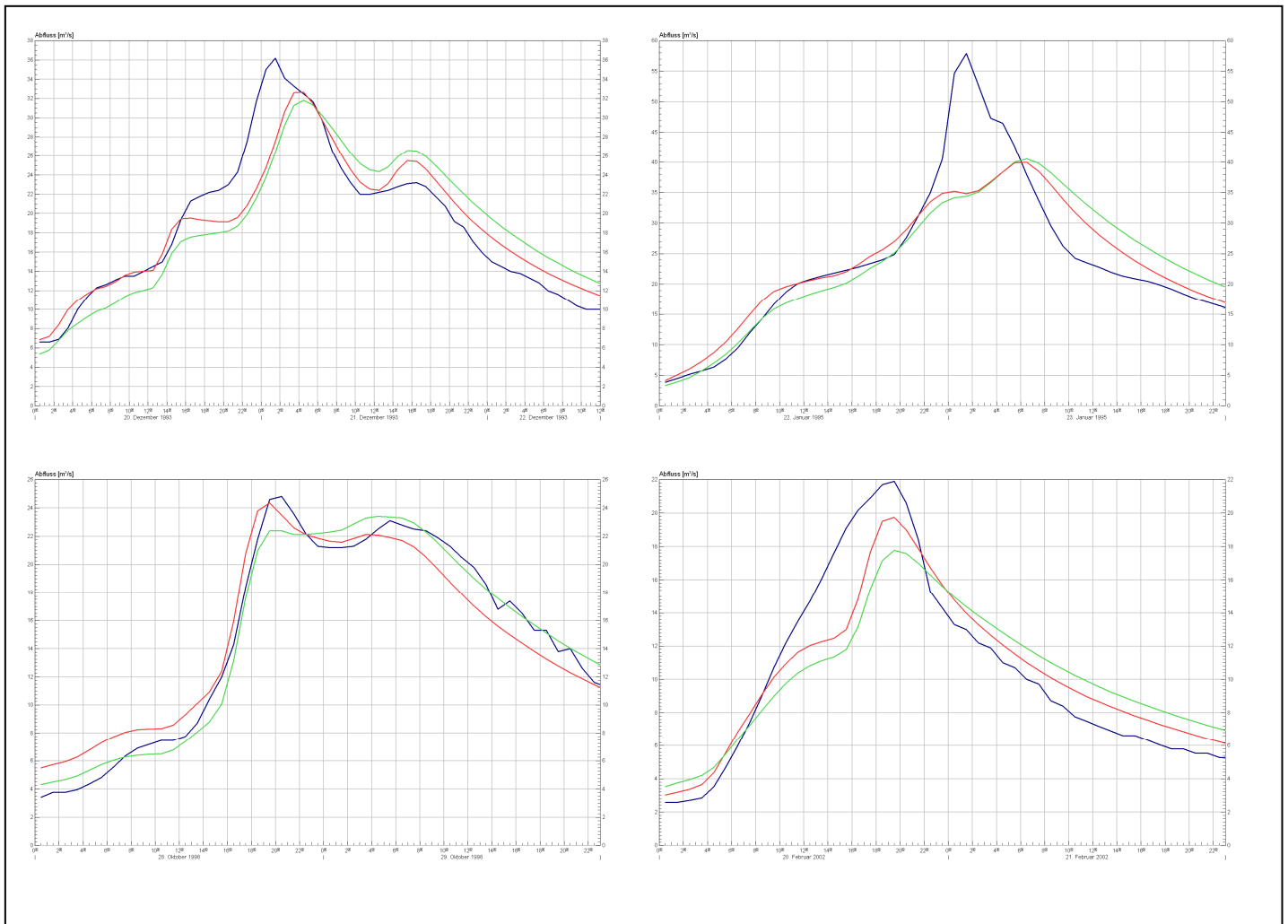


Bild 5.14: Vergleich zwischen gemessenen (blau) sowie mit dem bisherigen Modell (grün) und dem neuen Modell (rot) simulierten Abflüssen am Pegel Kronweiler / Schwoilbach für ausgewählte Hochwasser (Simulation mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM).

Kellenbach / Simmerbach:

In Tabelle 5.10 sind die Parameterwerte aufgeführt, die für den Pegel Kellenbach / Simmerbach im Vergleich zum bisherigen Modell angepasst wurden. Tabelle 5.11 zeigt den Vergleich der jahresweisen Gütewerte der beiden Modelle. Die Bilder 5.15 und 5.16 zeigen, welche Änderungen sich durch das neue Modell hinsichtlich der zeitlichen Dynamik im Niedrig- und Mittelwasserbereich ergeben. In Bild 5.17 werden die Hochwassersimulationen der beiden Modelle mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM miteinander verglichen.

Wie bei Kronweiler ergeben sich auch für Kellenbach / Simmerbach die auffälligsten Änderungen für die Parameter β (Tiefenversickerung) sowie für D_{\min} und D_{\max} (laterale Drainage zum Interflowspeicher). Wie oben erläutert, ist dies unmittelbar auf die geänderte Modellstruktur zurückzuführen (detaillierte Diskussion siehe Abschnitt 5.4). Für die anderen Parameter ergeben sich zu meist nur kleinere Änderungen, die zumindest teilweise auch durch die individuelle Eichstrategie bedingt sind.

Tabelle 5.10: Parameterwerte des LARSIM-Modells für Kellenbach / Simmerbach, die im Vergleich zwischen dem bisherigen Modell und dem neuen Modellansatz geändert wurden.

Parameter	Bisheriges Modell	Neuer Modellansatz	Anmerkungen
EQB	10 000	20 000	
EQI	800	700	
EQD	250	190	
EQD2	90	30	
beta	0.004200	0.000082	siehe Text
rDmin	0.1	8.0	siehe Text
rDmax	0.200	0.010	siehe Text
EKM	0.4	0.5	
EKL / EKR	0.4	1.5	
lmax_fak	--	1.20	siehe Text
lmin_fak	--	0.80	siehe Text
binf_fak	--	1.00	
bPFF_fak	--	0.80	siehe Text
fint_fak	--	0.60	siehe Text
fbas_fak	--	0.80	siehe Text

Tabelle 5.11: Vergleich der Gütemaße der berechneten Abflüsse am Pegel Kellenbach / Simmerbach für das bisherige Modell und den neuen Modellansatz (Mittelwerte ohne 1993, 1996 und 1997).

Jahr	Lag		r ²		NSC		NSC lnQ		Bilanz	
	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu
1993	3	-3	0.88	0.93	0.86	0.93	0.84	0.87	0.98	0.94
1994	0	-3	0.90	0.85	0.86	0.80	0.92	0.89	1.06	0.93
1995	1	-1	0.80	0.86	0.80	0.85	0.87	0.85	1.07	0.99
1996	0	-6	0.69	0.61	0.62	0.36	0.67	0.54	0.77	0.58
1997	0	-4	0.81	0.75	0.80	0.72	0.82	0.76	0.93	0.75
1998	-1	-4	0.91	0.87	0.86	0.65	0.88	0.93	1.15	1.03
1999	-1	-4	0.90	0.83	0.80	0.69	0.85	0.89	1.13	1.16
2000	-1	-4	0.82	0.78	0.79	0.60	0.79	0.78	1.12	1.06
2001	-2	-6	0.91	0.85	0.82	0.69	0.94	0.94	1.19	1.10
2002	0	-4	0.90	0.91	0.88	0.79	0.86	0.83	1.02	0.95
2003	2	-2	0.92	0.94	0.92	0.91	0.90	0.90	1.07	1.00
1994 - 2003	-0.25	-3.5	0.88	0.86	0.84	0.75	0.88	0.88	1.10	1.03

Hinsichtlich der Mittel- und Niedrigwasserabflüsse ergeben sich für den Pegel Kellenbach / Simmerbach durch den neuen Modellansatz nur relativ geringe Veränderungen (Bilder 5.15 und 5.16). Eine grundlegend erhöhte Dynamik des Basisabflusses (wie am Pegel Kronweiler) ergibt sich im Falle des Pegels Kellenbach / Simmerbach nicht.

Im Mittelwasserbereich kann (visuell) eine etwas bessere Anpassung des Interflows an den gemessenen Abfluss erzielt werden (Bild 5.16). Insgesamt verändert sich auch die über die Jahre gemittelte Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Abflüsse kaum, allerdings ergeben sich Veränderungen für die Einzeljahre.

Ähnlich wie für den Pegel Kronweiler bereits ausgeführt, wirkt sich bei der neuen Modellstruktur eine offenkundige Fehleinschätzung des Niederschlagsinputs jedoch wesentlich stärker auf den simulierten Basisabfluss aus als beim alten Modellansatz (Bild 5.15, Jahr 1996).

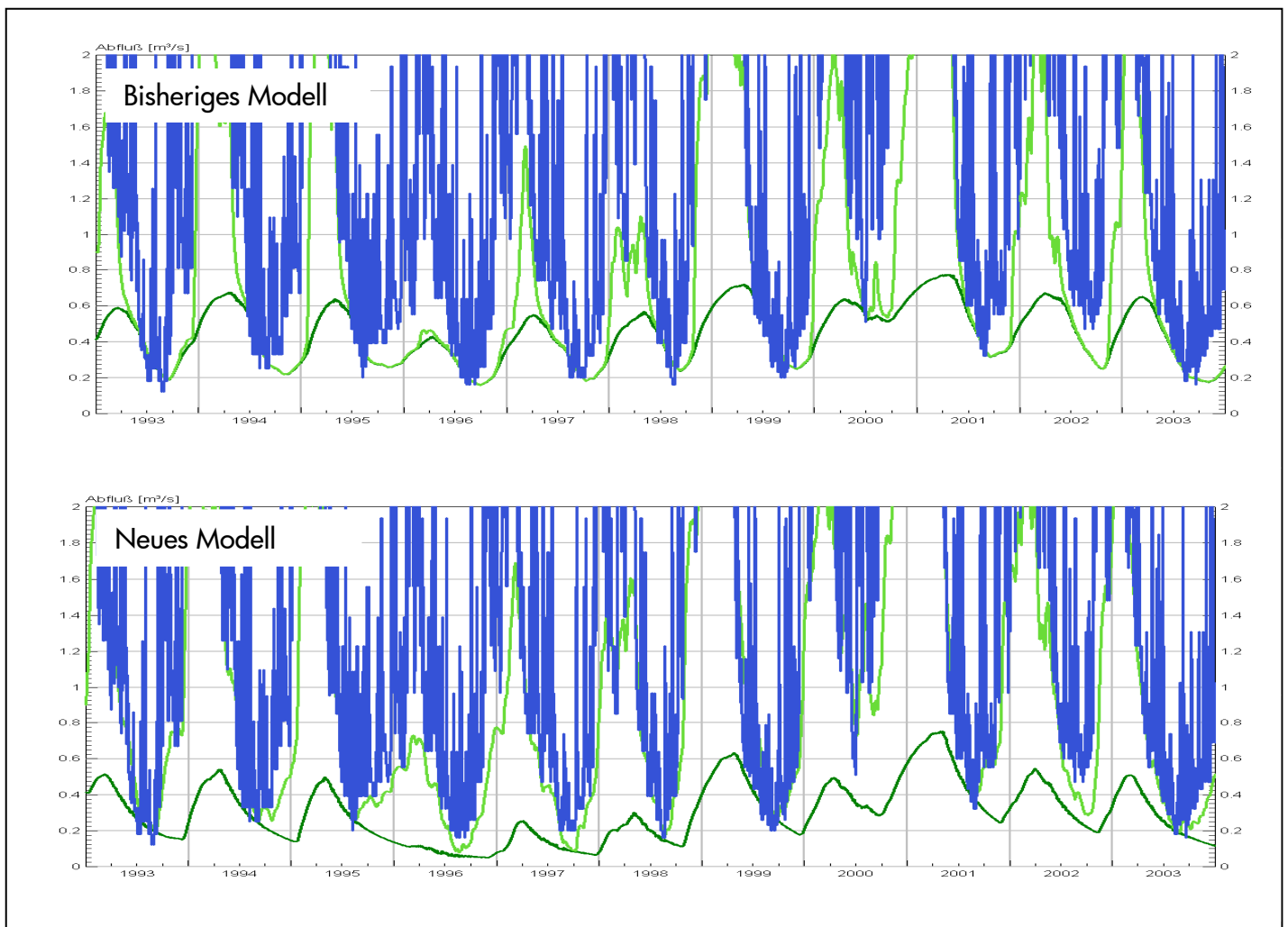


Bild 5.15: Vergleich zwischen gemessenem Abfluss (blau) im Niedrigwasserbereich sowie simuliertem Basisabfluss (dunkelgrün) und Interflow (hellgrün) für den bisherigen und den neuen Modellansatz am Pegel Kellenbach / Simmerbach.

Bei der Interpretation von Tabelle 5.11 ist zu beachten, dass mit einer Eichung, die sich ausschließlich auf den jahresweisen Vergleich zwischen Simulation und Messung bezog mit dem neuen Modellansatz wesentlich höhere Gütemaße erzielt werden konnten ($NSC = 0,81$; $r^2 = 0,88$; $NSC \ln Q = 0,90$; vgl. Abschnitt 5.4).

Im Sinne einer bestmöglichen Anpassung an extreme Hochwasser wurden die Parameterwerte jedoch im Zuge der hochwasserspezifischen Betrachtung nochmals deutlich modifiziert. Dies hat zur Folge, dass kleinere Hochwasser nun tendenziell überschätzt werden. Folglich ist die Nash-Suttcliffe-Effizienz in den Jahren 1998 bis 2001, in denen mehrere kleine Hochwasser auftraten, relativ schlecht. In den Jahren mit den höchsten Hochwassern (1993, 1995, 2003) werden hingegen zumeist höhere Nash-Suttcliffe-Effizienzen erreicht als mit dem bisherigen Ansatz. Im Mittel ergibt sich hierdurch eine deutlich verringerte Nash-Suttcliffe-Effizienz.

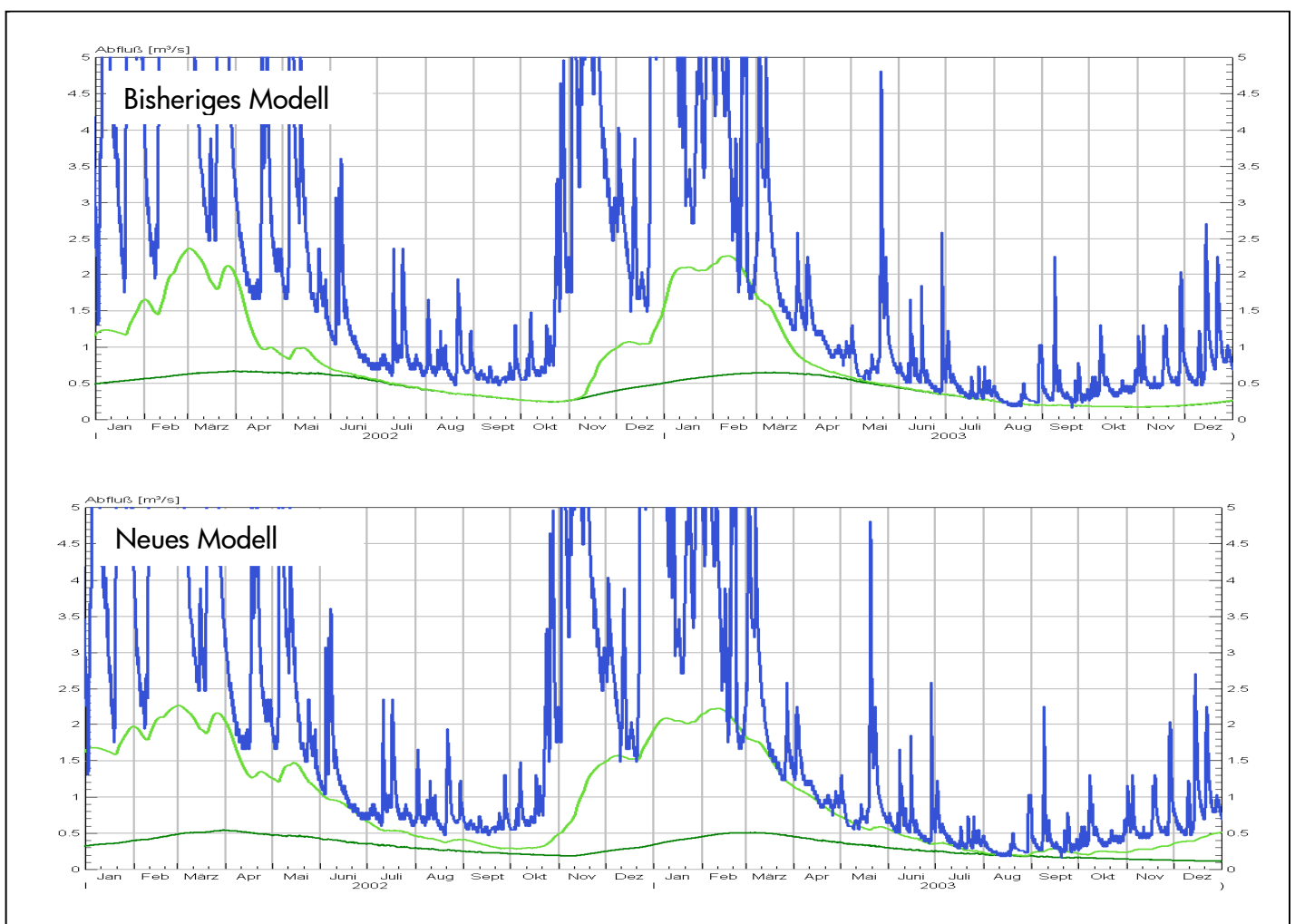


Bild 5.16: Vergleich zwischen gemessenem Abfluss (blau) im Mittel- und Niedrigwasserbereich sowie simuliertem Basisabfluss (dunkelgrün) und Interflow (hellgrün) für den bisherigen und den neuen Modellansatz am Pegel Kellenbach / Simmerbach.

Bild 5.17 verdeutlicht jedoch, dass die hochwasserspezifische Anpassung der Parameterwerte des neuen Modellansatzes durchaus positive Auswirkungen auf die Simulationsgüte für die höchsten Hochwasser hat: Mit dem neuen Modellansatz (und den gewählten Parameterwerten) werden die Scheitel der Hochwasser nicht mehr so stark unterschätzt wie mit dem bisherigen Modellansatz. Insofern stellt der neue Modellansatz eine spürbare Verbesserung dar.

Andererseits ergibt sich beim neuen Modellansatz ein systematisches Voraneilen der simulierten Ganglinie. Wie bereits in Abschnitt 5.4 diskutiert, ist dies im Zusammenhang mit der operationellen Hochwasservorhersage als kritisch anzusehen.

Zudem ist anzumerken, dass die festgestellten Unterschiede hinsichtlich der Hochwassersimulation vermutlich in erster Linie auf Unterschiede bei der individuellen Eichstrategie zurückzuführen sind. Die geänderte Modellstruktur spielt hierbei wohl nur eine untergeordnete Rolle.

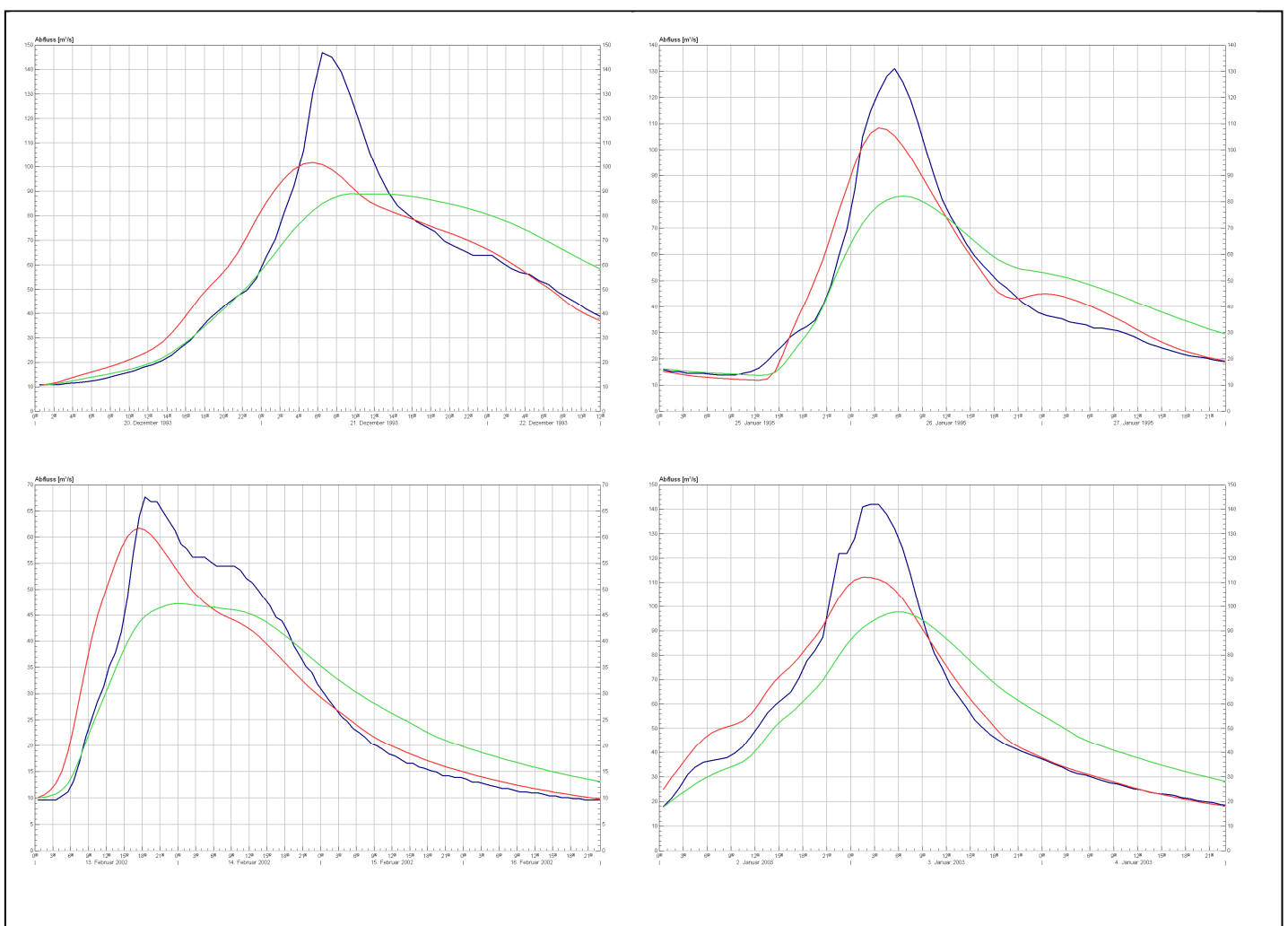


Bild 5.17: Vergleich zwischen gemessenen (blau) sowie mit dem bisherigen Modell (grün) und dem neuen Modell (rot) simulierten Abflüssen am Pegel Kellenbach / Simmerbach für ausgewählte Hochwasser (Simulation mit der Option WD-NACH SIMZEITRAUM).

6. Folgerungen und Empfehlungen

Mithilfe einer hier entwickelten Anpassung des LARSIM-Modellkonzepts können Informationen über dominante Abflussprozesstypen und deren räumliche Verteilung im Wasserhaushaltsmodell LARSIM berücksichtigt werden. Diese Weiterentwicklung erfordert eine Grundparametrisierung der unterschiedlichen Abflussprozesstypen, die hier auf Grundlage von numerischen Experimenten und den Erfahrungen aus zwei beispielhaften Einzugsgebieten festgelegt wurde.

Die beispielhafte Anwendung des erweiterten Modellansatzes auf die Einzugsgebiete Kronweiler / Schwollbach und Kellenbach / Simmerbach im Nahegebiet und der anschließende Vergleich mit dem bisherigen Modellansatz erbrachte vor allem folgendes:

- Die Abflussprozesstypen nach Scherrer und deren räumliche Verteilung können mithilfe des weiterentwickelten Modellansatzes und einer prozesstypspezifischen Grundparametrisierung in LARSIM berücksichtigt werden.
- Änderungen in den relativen Anteilen der dominanten Abflussprozesstypen bewirken die erwarteten Änderungen in der simulierten Abflussreaktion.
- Lediglich beim Prozesstyp „nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung“ (DP=-Flächen) bestehen größere Unsicherheiten hinsichtlich der hydrologisch korrekten Interpretation und der resultierenden Grundparametrisierung.
- Mithilfe des neuen Modellkonzepts und den zugrunde liegenden Informationen über die dominierenden Abflussprozesstypen können nach Eichung des Modells kontinuierliche Wasserhaushaltssimulationen durchgeführt werden, die eine ähnliche Qualität aufweisen wie die Simulationen mit dem bisherigen Modell.
- Die zeitliche Dynamik des (grundwasserbürtigen) Basisabflusses kann mithilfe des neuen Modellansatzes offenbar realitätsnäher nachgebildet werden als mit dem bisherigen Ansatz.
- Es ist davon auszugehen, dass die räumliche Verteilung der Abflussdynamik innerhalb der Pegelkontrollbereiche mit dem erweiterten Ansatz ebenfalls besser abgebildet wird (dies wurde bislang jedoch nicht im Detail untersucht).
- Aus den bislang vorliegenden Ergebnissen ergeben sich jedoch keine eindeutigen Hinweise darauf, dass Hochwasserabflüsse mithilfe des neuen Modellkonzepts besser nachgebildet (und vorhergesagt) werden können.

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse wird für das weitere Vorgehen das Folgende empfohlen:

- Die Umsetzung der kartierten Abflussprozesstypen in LARSIM und die bislang vorliegenden Ergebnisse sollten mit dem Entwickler des Konzepts der Abflussprozesstypen (S. Scherrer) und den Kartierern im Nahegebiet (Soilution) besprochen werden.
- Insbesondere die hydrologische Interpretation der „nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung“ (DP=-Flächen) sollte geklärt werden. Auf dieser Grundlage muss die Grundparametrisierung dieser Flächen nochmals überarbeitet werden.
- Im Zusammenhang mit der korrekten Interpretation der DP=-Flächen muss insbesondere das Gebiet Kellenbach / Simmerbach nochmals überarbeitet werden.
- Nach der endgültigen Festlegung der Grundparametrisierung (auch für die DP=-Flächen), sollten weitere Analysen z.B. hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Abflussdynamik und der Güte von Vorhersagetests durchgeführt werden.

Literatur

- Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11.
- Beven K. J. (2001): Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley, New York.
- Carsel R. F. und Parrish R. S. (1988): Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. Water Resources Research, 24: 755-769.
- Demuth N., Hiltbold A. (1993): „Preferential flow“: Eine Übersicht über den heutigen Kenntnisstand. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 156: 479-484.
- Faeh A. O., Scherrer S., Naef F. (1997): A combined field and numerical approach to investigate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation. Hydrology & Earth System Sciences, 4: 787-800.
- Haag I., Luce A., Gerlinger K. (2006): Effects of conservation tillage on storm flow: a model-based assessment for a mesoscale watershed in Germany. IAHS Publ., 303: 342-350.
- Henn N. (2010): Entwicklung von Parametrisierungsstrategien für das WHM LARSIM auf Basis der bodenhydrologischen Karte von Rheinland-Pfalz. Universität Trier (unveröffentlicht).
- Jury W. A., Gardner W. R., Gardner W. H. (1991): Soil Physics. John Wiley, New York.
- Kienzler P. M. (2007): Experimental study of subsurface stormflow formation. Freiburg.
- LfU (2004): Analyse der Auswirkungen dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen mit hochauflösenden Wasserhaushaltsmodellen. Ingenieurbüro Ludwig, im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- LUBW, Ingenieurbüro Dr. Ludwig, HYDRON GmbH (2010): Vorgehensweise bei der Eichung eines LARSIM-Wasserhaushaltsmodells für den Einsatz bei der HVZ Baden-Württemberg. Stand: April 2010 (unveröffentlicht).
- LUWG (2006a): Bodenhydrologische Karte Nahe / Rheinland-Pfalz Südwest. Dokumentation zur Erstellung der bodenhydrologischen Karte Rheinland-Pfalz, Stand 12/2006. Soilution GbR im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- LUWG (2006b): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Scherrer AG im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Bericht 18/2006 des LUWG.
- LUWG (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- Maidment D. R. (1992): Handbook of Hydrology. McCraw-Hill, New York.

- Naef F., Margreth M., Schmocker-Fackel P., Scherrer S. (2007): Entwicklung und Anwendung eines Regelwerkes zur automatischen Erstellung von Abflussprozesskarten in einem GIS. Mitteilungen FAWV, Nr. 64/07, 183-191.
- Naef F., Scherrer S., Weiler M. (2002): A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, 267: 74-79.
- Ravi V., Williams J. R. (1998): Estimation of Infiltration Rate in the vadose Zone: Compilation of simple mathematical Models, Volume 1, Ada.
- Scherrer S., Naef F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17: 391-401.
- Scherrer S., Naef F., Faeh A. O., Cordery I. (2007): Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 907-922.
- Smith R. E. (2002): Infiltration Theory for Hydrologic Applications. Water Resources Monograph 15. American Geophysical Union, Washington.
- Weiler M., McDonnell J. (2004): Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology. *Journal of Hydrology*, 285: 3-18.