



HOCHSCHULE TRIER

Trier University of Applied Sciences

Informatik - Computer Science

Informatik-Bericht Nr. 2013-2

Schriftenreihe Fachbereich Informatik, Fachhochschule Trier

Nutzung von Abflussprozessinformation in LARSIM

Oliver Gronz, Markus C. Casper, Peter Gemmar

Zusammenfassung

Die in einem Einzugsgebiet herrschende räumliche Heterogenität wird im Wasserhaushaltsmodell LARSIM in den einzelnen Modellkomponenten unterschiedlich stark berücksichtigt. Insbesondere die räumliche Verteilung der Abflussprozesse wurde bisher gar nicht berücksichtigt, weil keine flächenhaft verfügbare Information über eben diese Verteilung vorlag. Für das Einzugsgebiet der Nahe liegt nun seit mehreren Jahren eine Bodenhydrologische Karte vor, die flächenhaft den bei ausreichenden Niederschlägen zu erwartenden Abflussprozess ausweist. Im vorliegenden Artikel wird die Nutzung dieser Prozessinformation bei der Parametrisierung von LARSIM beschrieben: Für einzelne Prozessgruppen – SOF-, SSF- und DP-Prozesse – werden mittels zweier neuer Parameter „Bilanz“ und „Dämpfung“ inhomogene Parametersätze aus empirisch ermittelten Kennfeldern gewählt, um die Prozessinformation bei der Abflussbildung im Modell zu berücksichtigen. Für die Berücksichtigung der Intensität der Prozesse in den Gebietsspeichern werden drei unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die sich in ihrer Komplexität unterscheiden. Abschließend werden erste Ergebnisse für ein Testgebiet vorgestellt: Mittels „Bilanz“ und „Dämpfung“ kann in wenigen Kalibrierungsschritten die Güte des homogen parametrisierten Modells erreicht und – je nach Zielsetzung - überschritten werden. Weiterhin zeigen einzelne Modellkompartimente im Sinne der Abflussprozesskarte wesentlich plausiblere Reaktionsmuster als die homogen parametrisierte ursprüngliche Variante.

1. Einleitung und Problemstellung

Ein Einzugsgebiet zeigt typischerweise räumliche Heterogenität hinsichtlich unterschiedlichster Gesichtspunkte wie Topografie, Landnutzung, Bodeneigenschaften, dominante Abflussprozesse usw. Jeder dieser Gesichtspunkte hat einen eigenen, mehr oder weniger stark ausgeprägten Einfluss auf das Abflussgeschehen des gesamten Einzugsgebietes.

Die Berücksichtigung all dieser Einflussfaktoren im Wasserhaushaltsmodell LARSIM (LUDWIG & BREMICKER 2006) wurde bisher in unterschiedlichem Maße umgesetzt: Beispielsweise der Einfluss der Landnutzung findet sich ausgeprägt im Interzeptionsmodell, indem die Kapazität des Speichers sowohl zeitlich im Laufe des Jahres als auch räumlich in Abhängigkeit der Landnutzung bestimmt wird. Auch im Verdunstungsmodell findet die Landnutzung Verwendung.

Die räumliche Verteilung der Abflussprozesse wird hingegen nicht berücksichtigt. Das liegt zum einen daran, dass die Information bisher nicht flächenhaft verfügbar war, zum anderen ist die Berücksichtigung dieser Heterogenität im Modell noch nicht möglich. Zwar gibt es einige inhomogene Aspekte im Modell: Die Speichergrößen und Schwellwerte (Feld- und Luftkapazität) sind aus Bodenkarten abgeleitet und variieren durchaus im Einzugsgebiet und es gibt auch einen gewissen Einfluss der Landnutzung durch die Interaktion mit dem Evapotranspirationsmodul. Aber die Parameter, die im Wesentlichen die Aufteilung des Wassers in die einzelnen Abflusskomponenten beeinflussen, sind aber in allen Kompartimenten

gleich. Somit repräsentiert das Bodenmodul eher ein mittleres Verhalten eines Einzugsgebietes. Als Konsequenz ist das Spektrum möglichen Verhaltens eingeschränkt und die Verteilung des Wassers im Modell entspricht unter Umständen nicht der Realität.

Die Zielsetzung ist es folglich, die bisherige homogene Parametrisierung – bei der alle Kompartimente den gleichen Parametersatz erhalten – durch eine inhomogene Parametrisierung zu ersetzen, bei der Kompartimente individuelle Parametersätze erhalten. Dadurch soll das Modell die räumliche Verteilung der Prozesse besser abbilden, der Kalibrierungsprozess soll vereinfacht werden und letztendlich auch die Modellgüte verbessert werden.

2. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – ein kurzer Überblick

Im Folgenden werden der Aufbau und das Wirkungsgefüge der einzelnen Komponenten von LARSIM kurz beschrieben. Das Augenmerk liegt dabei auf dem Bodenmodul und seinen Interaktionen. Für weitere Details sei an dieser Stelle auf LUDWIG & BREMICKER (2006) verwiesen.

Im Wasserhaushaltsmodell LARSIM werden die wesentlichen an der Abflussbildung beteiligten Prozesse flächendetailliert simuliert. Dazu wird das Einzugsgebiet zunächst in einzelne Elemente aufgeteilt, die einen gewissen Abschnitt des Gewässers und die dazu beitragende Fläche repräsentieren. Jedes Element wird weiterhin in einzelne Kompartimente aufgeteilt. Ursprünglich gab es für jede Landnutzungsart ein Kompartiment; mit dem verfügbar werden zusätzlicher Informationen wurden Kompartimente aus einem Verschnitt der Landnutzungskarte mit der Bodenhydrologischen Karte (siehe Kapitel 3) und einer Bodenkarte erstellt (ELPERS et al. 2008). Aus der Bodenkarte werden dabei im Wesentlichen die Luft- und die Feldkapazität entnommen. Es gibt demnach Kompartimente mit beliebigen Kombinationen von Landnutzung, vorherrschendem Abflussprozess und Bodenparametern in einem Element. Aus hydrologischer Sicht stellt ein Kompartiment also ein Hydrotop dar. In Abbildung 1 wird zur Veranschaulichung die Aufteilung des Einzugsgebiets Kronweiler in Elemente visualisiert. Jeder Kreis repräsentiert ein Element und die Tortendiagramme geben in Teil a) die Anteile der Landnutzungen an, in Teil b) die Anteile der Abflussprozesse.

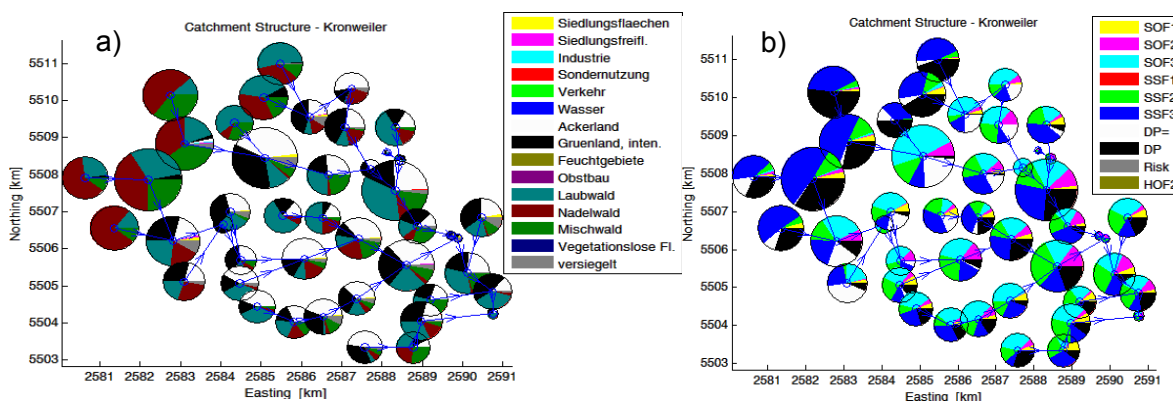


Abb. 1: Flächenanteile der a) Landnutzungen und b) Abflussprozesse in den einzelnen Elementen des Einzugsgebiets Kronweiler

Für jedes Kompartiment werden die in Abbildung 2 im oberen Bereich gezeigten Komponenten individuell simuliert. Wesentlich für den vorliegenden Artikel ist das Bodenmodul im mitt-

leren Bereich sowie die Gebietsspeicher. Das Bodenmodul besteht aus einem Speicher mit einer gewissen Kapazität und es werden aus diesem Speicher drei Abflusskomponenten erzeugt. Wichtig ist, dass der Niederschlag nicht direkt dem Bodenmodul zugeführt wird, sondern zunächst den Interzeptionsspeicher und den Schneespeicher passiert. Im Bodenmodul selbst kommt das Wasserdargebot an: der Niederschlag abzüglich der Interzeptionsverluste abzüglich der Neuschneebildung zuzüglich der Schneeschmelze. Es gibt eine ganz wesentliche Interaktion mit dem Evapotranspirationsmodul, das Wasser in Abhängigkeit der potenziellen Verdunstung und der Verfügbarkeit dem Bodenspeicher entnimmt.

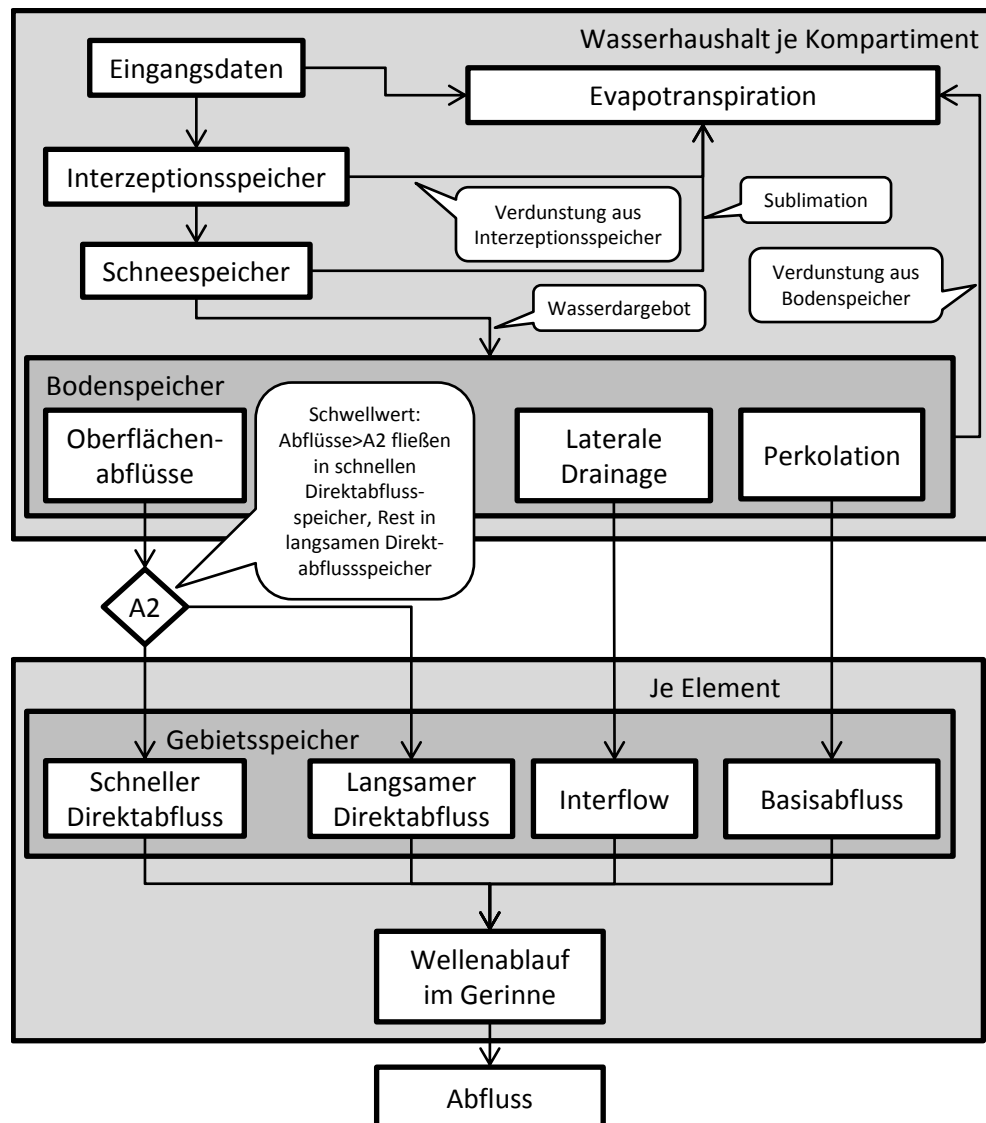


Abb. 2: Zusammenwirken der einzelnen Komponenten bei den im Nahe-Gebiet verwendeten Optionen (modifiziert nach LUDWIG & BREMICKER 2006, Seite 8)

Sind die Parameter des Bodenmoduls klein, so verbleibt ständig mehr Wasser im Bodenspeicher, die tatsächliche Verdunstung wird größer, die Bilanz, also der Anteil des Niederschlages, der zu Abfluss wird, sinkt. Im umgekehrten Fall, bei großen Parametern steigt entsprechend die Bilanz.

Die einzelnen Modellannahmen sind ebenfalls in LUDWIG & BREMICKER (2006) detailliert beschrieben, an dieser Stelle soll lediglich kurz der Oberflächenabfluss erwähnt werden. Die Gleichung für den Oberflächenabfluss lautet:

$$QS_D = P - (W_m - W_0) \text{ für } \left(\left(1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right) \leq 0 \text{ und } P + W_0 > W_m \quad (1)$$

beziehungsweise

$$QS_D = P - (W_m - W_0) + W_m \left(\left(1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right)^{b+1} \quad (2)$$

$$\text{für } \left(\left(1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right) > 0.$$

Dabei sind QS_D der Oberflächenabfluss, P das Wasserdargebot, W_0 der Wassergehalt zu Beginn des Berechnungszeitschrittes, W_m der maximale Wassergehalt und b ein Parameter. In Abbildung 3 ist der resultierende Oberflächenabfluss für das Beispiel $W_m=180$ und unterschiedliche Werte von b dargestellt. In Teil a) ist $b = 0$ und es wird lediglich im 1. Fall Abfluss generiert, also gemäß Gleichung (1): Der Teil des Wasserdargebotes, der nicht mehr in den Speicher hineinpasst, wird zu Oberflächenabfluss. Dies ist die schräge Ebene, die im hinteren Bereich sichtbar ist. Wird b größer, also z. B. 0,2, so wird auch der Fall in Gleichung (2) relevant, in dem ein gewisser Anteil des Wasserdargebotes zu Abfluss wird, auch bevor der Speicher überläuft, wie im Teil b) zu sehen. Wird b noch größer, konvergiert das System zu einem linearen Zusammenhang zwischen Wasserdargebot und Oberflächenabfluss, wie im Teil c) für $b = 2$ zu sehen ist.

Festzuhalten ist hier: Selbst wenn b null ist, entsteht Oberflächenabfluss, wenn das Wasserdargebot die verfügbare Kapazität im Boden übersteigt. Nimmt b beliebig große Werte an, so wird maximal ein linearer Zusammenhang erreicht. Die gemäß Abbildung 3.4 aus LUDWIG & BREMICKER 2006 (Seite 21) mögliche Interpretation, dass sich ein überproportionaler Zusammenhang zwischen Speicherfüllung und dem Anteil gesättigter Flächen für $b > 1$ in einer überproportionalen Weise bei der Berechnung des Oberflächenabflusses auswirkt, trifft nicht zu.

Zur Simulation der Abflusskonzentration gibt es in LARSIM für jedes Element vier Gebietspeicher: einen für schnellen Direktabfluss, einen für langsamen Direktabfluss, einen für Interflow und einen für den Grundwasserabfluss (unterer Teil von Abbildung 2). Die jeweiligen Abflusskomponenten aller Kompartimente münden aufsummiert in einen einzigen Gebietspeicher für jede Komponente. Da das Bodenmodul lediglich drei Abflusskomponenten erzeugt, gibt es einen Schwellwert – A_2 –, der die Aufteilung der im Bodenmodul erzeugten Oberflächenabflüsse in den schnellen Direktabflussspeicher und den langsamen Direktabflussspeicher steuert. Alle Abflüsse unterhalb A_2 fließen in den langsamen Direktabflussspeicher; der Anteil, der A_2 übersteigt, fließt in den schnellen Direktabflussspeicher.

Verwendet wurde im Rahmen des Projekts das durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig aufgestellte Modell für das Einzugsgebiet der Nahe (ELPERS et al. 2008) mit meteorologischen Eingangsdaten, die durch Internet interpoliert wurden (WAGNER & GERLINGER 2009).

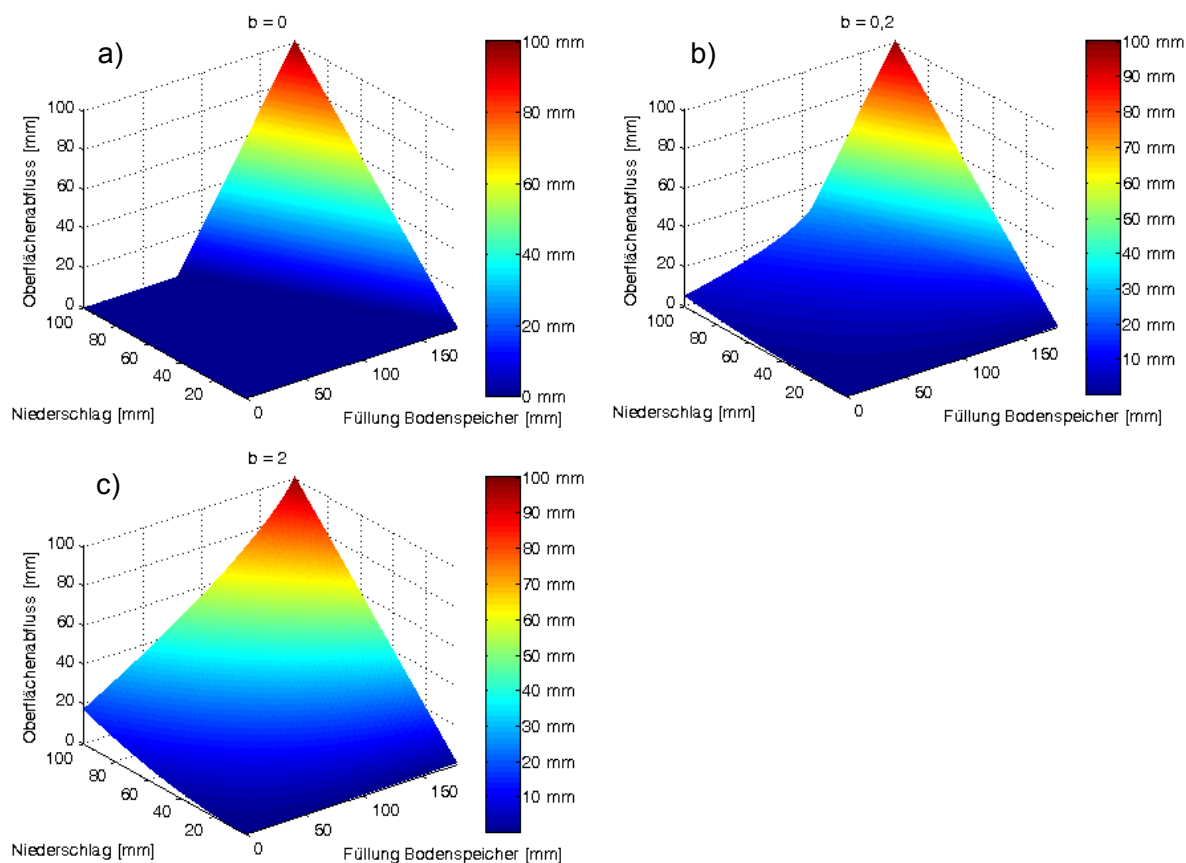


Abb. 3: Resultierender Oberflächenabfluss für einen Bodenspeicher mit 180 mm Kapazität bei unterschiedlichen Werten von b .

3. Die Bodenhydrologische Karte

Die Bodenhydrologische Karte liegt für das Gebiet „Nahe / Rheinland-Pfalz Südwest“ vor. Zur Erstellung dieser Karte wurden vier Referenzgebiete nach dem Kartierschema von SCHERRER (2006) aufgenommen. Mittels Methoden des Data Mining und expertenbasierter Prognosen wurde daraus eine Karte für die Gesamtfläche von 5.797 km² erstellt (vgl. STEINRÜCKEN & BEHRENS 2010, Seite 58). Der Bericht zur Bodenhydrologischen Karte beschreibt das Produkt in der Zusammenfassung kompakt und treffend: „Die Bodenhydrologische Karte berücksichtigt primär die Faktoren Boden und Relief. Sie ist eine bodenkundlich expertenbasierte sowie eine relief- und Data Mining-basierte Ableitung und beschreibt, ob aufgrund von pedologischen Merkmalen und von Reliefeigenschaften potenziell bei ausreichenden Niederschlägen mit dem Auftreten von bestimmten Abflussprozessen zu rechnen ist.“ (STEINRÜCKEN & BEHRENS 2010, Seite 58)

In Abbildung 4 ist ein Ausschnitt der Karte für das Einzugsgebiet Kronweiler dargestellt. Wie in der Karte zu sehen ist, treten dort nur die Prozesse SOF1 bis 3 (Saturated overland flow), SSF2 bis 3 (Subsurface flow), DP (Deep percolation) & DP= auf. Letzterer wird im zuvor genannten Bericht wie folgt beschrieben: „Ergänzt wird die Liste der Prozesse um die Einstufung „nicht beitragend (DP=)“, wenn der Untergrund keine Tiefenversickerung erwarten lässt, ein Abfluss auf Grund der Lage im Relief aber nicht zu erwarten ist.“

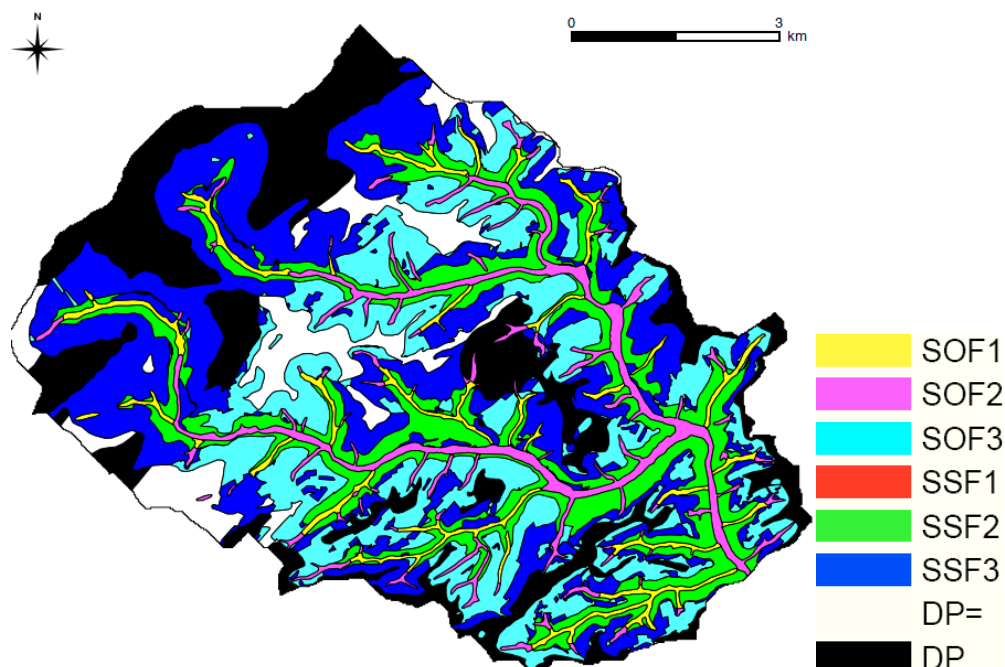


Abb. 4: Bodenhydrologische Karte für das Einzugsgebiet Kronweiler

4. LARSIM in MATLAB

Im Rahmen des Projekts wurde LARSIM mit den im Einzugsgebiet der Nahe verwendeten Optionen in der Programmiersprache und Umgebung MATLAB umgesetzt. Dies hatte mehrere Gründe:

- LARSIM ist in seiner Fortran-Realisierung nicht auf die wiederholte Ausführung mit unterschiedlichen Parametern optimiert. Für jede Ausführung müssen alle Eingangsdaten erneut eingelesen werden, was bei Nutzung der Internet-Daten bedeutet, dass für jedes Simulationsjahr mehr als 35.000 Dateien eingelesen werden müssen.
- LARSIM öffnet in seiner Fortran-Realisierung die Dateien für den exklusiven Zugriff; für eine zweite LARSIM-Instanz auf dem gleichen Rechner müssten die Eingangsdateien dupliziert werden.
- LARSIM ermöglicht in seiner Fortran-Realisierung nicht die Zuweisung inhomogener Bodenparameter. Hierzu wären Änderungen am Quellcode notwendig.
- LARSIM bietet nur auf Umwegen Möglichkeiten, beliebige Zustandsgrößen auszuwerten.

Insbesondere die ersten beiden Punkte machen die Nutzung im verwendeten Computer-Cluster ineffizient: Jeder Computer des Clusters hat mehrere Prozessoren und reichlich Arbeitsspeicher, aber wenig lokalen Festplattenspeicher.

Bei der Implementierung in MATLAB wurde eine Optimierung auf die wiederholte Ausführung im Computer-Cluster vorgenommen: Die Internet-Dateien werden nur einmalig eingelesen, anschließend werden sämtliche meteorologischen Eingangsgrößen in einer einzigen Datei und die Modellstruktur mit dem Anfangszustand in einer zweiten Datei abgelegt. Für die wiederholte Ausführung wird die meteorologische Datei einmalig eingelesen und dann bei jedem Modelllauf nur der Anfangszustand erneut eingelesen. So ergibt sich eine maximale Auslastung der Prozessoren bei minimalen Dateizugriffen.

Weiterhin ermöglicht MATLAB eine sehr effiziente Ausführung von Vektoroperationen. Diese werden benutzt, um die einzelnen Berechnungsschritte der verschiedenen Prozesse für alle Kompartimente eines ganzen Elementes in einer einzigen Operation auszuführen.

Darüber hinaus wurden mehrere visualisierende Analyse-Werkzeuge implementiert, die eine genaue Untersuchung der modellinternen Zustandsgrößen – etwa der Verlauf der Bodenspeicherfüllung – in einer äußerst anschaulichen und effizient zu handhabenden Weise ermöglichen.

5. Nutzung der Abflussprozessinformation in LARSIM

Wie in Kapitel 1 beschrieben, wird momentan in LARSIM der gleiche Bodenparametersatz allen Elementen und Kompartimenten zugewiesen. Bei der inhomogenen Variante gibt es Gruppen von Kompartimenten: Alle Kompartimente eines Abflussprozessstyps erhalten einen für diesen Abflussprozess gültigen Parametersatz.

Die Aufteilung in die drei Abflusskomponenten im Bodenmodul wird aktuell im Wesentlichen durch 4 Parameter beeinflusst: b (Oberflächenabfluss), r_{dmin} (Interflow bei Füllungen unterhalb der Feldkapazität), r_{dmax} (Interflow für Anteil oberhalb Feldkapazität) und β (Perkolation). Bei einer homogenen Parametrisierung sind es also vier zu findende Werte; bei einer inhomogenen Parametrisierung resultieren für jeden von der bodenhydrologischen Karte ausgewiesenen Prozess 4 Parameter, also insgesamt 32 Parameter bei 8 Prozessen.

Da jeder kartierte Prozess Information über (a) den Fließweg und (b) die Abflussintensität beinhaltet, erscheint es sinnvoll, diese Aspekte zu trennen, da in LARSIM ebenfalls eine Trennung von (a) Abflussbildung im Bodenmodul und (b) Abflusskonzentration in den Gebietsspeichern erfolgt. Für die inhomogene Parametrisierung des Bodenmoduls werden also alle Kompartimente mit den Prozessen SOF1 bis 3 zu den SOF-Kompartimenten gruppiert, alle Kompartimente mit den Prozessen SSF1 bis 3 zu den SSF-Kompartimenten und alle Kompartimente mit den Prozessen DP und DP= zu den DP-Kompartimenten. Für die Aufteilung und Parametrisierung in den Gebietsspeichern gilt folgende Gruppierung: Der Prozess SOF1 reagiert sofort, die Prozesse SOF2 und SSF1 rasch, der Prozess SSF2 verzögert, die Prozesse SOF3 und SSF3 stark verzögert, die DP-Prozesse spät.

Die inhomogene Parametrisierung der Abflussbildung wird im Abschnitt 5.2 beschrieben, die unterschiedlichen Ansätze der inhomogenen Abflusskonzentration in Abschnitt 5.3.

5.1 Spektrum des möglichen Verhaltens und Parameterinteraktionen

Zur Ermittlung des möglichen Spektrums des Verhaltens und zur Analyse der Parameterinteraktionen wurden Monte Carlo-Methoden angewendet. Der Datensatz umfasst 60.000 inhomogene Modellrealisationen. In diesen 60.000 Modellläufen wurde der Parameter b im Intervall $[0, 3]$ variiert, die Parameter r_{dmax} und r_{dmin} jeweils im Intervall $[0, 2]$ und der Parameter β im Intervall $[0, 0,1]$. Als Sampling-Strategie wurde das Latin-Hypercube-Sampling verwendet, um eine möglichst vollständige Abdeckung des Parameterraums sicherzustellen. Simuliert wurde der Zeitraum 1996-1999.

Für jede dieser 60.000 Modellrealisation wurden die Anteile der einzelnen Abflusskomponenten am Gesamtabfluss sowie die Bilanz berechnet. Das Modell zeigt dabei ein breites Ver-

haltungsspektrum und eine starke Interaktion zwischen den Parametern, was im Folgenden anhand der Abbildungen 5 und 6 exemplarisch verdeutlicht werden soll.

In Abbildung 5 wird für jedes der 60.000 Samples ein Punkt gezeichnet. Die Farbe des Punktes entspricht der Bilanz, also dem Anteil des Niederschlages, der im simulierten Zeitraum insgesamt zu Abfluss wurde. Die Koordinaten des Punktes entsprechen den verwendeten Parametern. (Die vierte Dimension, r_dmin , kann nicht gleichzeitig dargestellt werden, der Einfluss ist aber denkbar gering.) Es zeigt sich, dass im beprobten Teil des Parameterraums bei diesem Kompartiment in dem gewählten Zeitraum die Bilanz zwischen ca. 51,5 % und ca. 69,5 % variiert. Die geringste Bilanz wird erreicht, wenn alle Parameter nahezu den Wert 0 haben, die höchste Bilanz, wenn alle Parameter den höchsten beprobten Wert annehmen. Weiterhin ist ersichtlich, dass der Parameter β im Wesentlichen die Bilanz skaliert; der Einfluss der anderen Parameter ist kleiner. Auch wenn alle Parameter den Wert 0 haben, wird Abfluss generiert, allerdings ausschließlich Oberflächenabfluss.

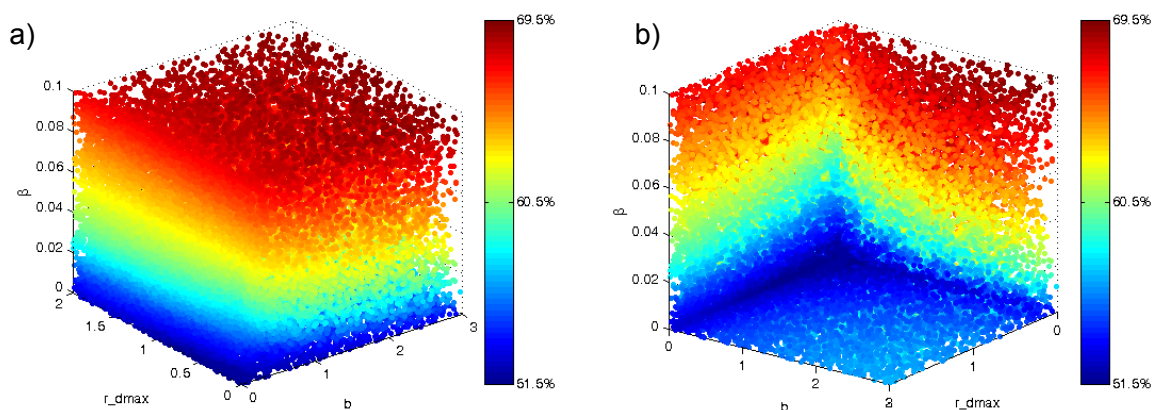


Abb. 5: Anteil des Niederschlages, der bei einer bestimmten Parameterkombination zu Abfluss wird, a) Ansicht von „oben“, b) Ansicht von „unten“

Dies zeigt sich in Abbildung 6 an der Koordinate (0,0,0). Die Abbildung stimmt mit der Darstellungsweise von Abbildung 5 überein, hier repräsentiert die Farbe der Punkte allerdings den Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss. In der Abbildung zeigen sich auch die starken Interaktionen und die Grenzen, die aus den Modellannahmen resultieren: Sind β und r_dmax klein, dann ist es egal, welcher Wert für b verwendet wird, der Anteil des Oberflächenabflusses ist nahezu 100%. Bei großem β kann der Anteil des Oberflächenabflusses nur noch in einem relativ kleinen Fenster variiert werden. Der Einfluss von r_dmax ist insgesamt eher klein.

Diese Anteile lassen sich auch für die anderen Abflusskomponenten analysieren und interpretieren. Zusammenfassend ergibt sich, dass die Modellannahmen des Oberflächenabflusses am wenigsten flexibel sind: Der Oberflächenabfluss kann nur bis zu einem bestimmten Grad verkleinert werden. Weiterhin zeigen sich in allen Analysen die starken Parameterinteraktionen.

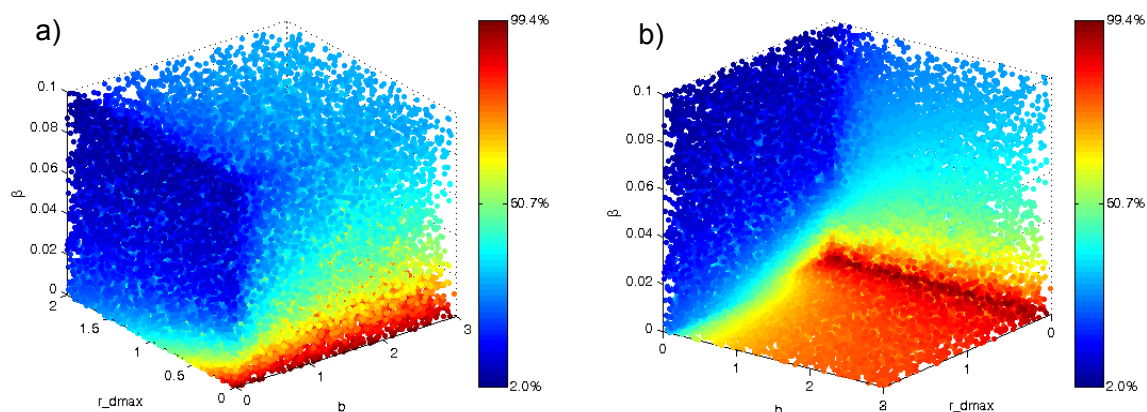


Abb. 6: Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss, der bei einer bestimmten Parameterkombination resultiert, a) Ansicht von „oben“, b) Ansicht von „unten“

5.2 Effiziente Kalibrierung mittels Bilanz und Dämpfung

In der Einleitung von Kapitel 5 wurde deutlich, dass sich durch die Nutzung der Abflussprozessinformation zunächst die Komplexität erhöht: Es gibt jeweils einen Parametersatz für die SOF-Flächen, einen für die SSF-Flächen und einen für die DP-Flächen.

Für den Kalibrierer ist die Aufgabe, diese insgesamt 12 Parameter zu bestimmen, ungleich schwerer als eine homogene Parametrisierung. Die wesentliche Schwierigkeit hierbei ist es, Reaktionsmuster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte nicht zu stören, die Kompartimente der einzelnen Prozessgruppen sollten relativ zueinander Muster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte zeigen. Weiterhin ist es nahezu unmöglich, den konkreten Einfluss eines einzelnen Parameters mit all seinen Interaktionen zu überblicken.

Aus diesem Grund wäre es wünschenswert, wenn der Parametersatz mit möglichst wenigen Einflussgrößen skaliert und so das Modell an ein konkretes Einzugsgebiet angepasst werden könnte.

Diese Aufgabe erfüllen zwei neu eingeführte Parameter: die „Bilanz“ und die „Dämpfung“. Die Anforderung an die „Bilanz“ ist, dass sie im Modell global den Anteil des Niederschlags, der zu Abfluss wird, skaliert, ohne die Reaktionsmuster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte zu stören. Konkret sollen also die Anteile der einzelnen Abflusskomponenten nicht beeinflusst werden. Die „Dämpfung“ hingegen soll das Verhalten von einem reaktiven Verhalten hin zu gedämpfterem Verhalten verschieben, ohne die Bilanz zu verändern. Auch hierbei sollen die Reaktionsmuster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte nicht verändert werden, die Abflusskomponentenanteile der einzelnen Prozessgruppen sollen relativ zueinander gleich bleiben.

Zu einer bestimmten Kombination von „Bilanz“ und „Dämpfung“ wird also ein konkreter Parametersatz von 12 Parametern benötigt, die dann den einzelnen Kompartimenten zugewiesen werden. Dies wird erreicht, indem für jede Prozessgruppe – 1. alle SOF-Prozesse, 2. alle SSF-Prozesse und 3. alle DP-Prozesse – ein individuelles Parameterkennfeld berechnet wird. Dazu werden Abflusskomponentenanteile für die drei Gruppen der SOF-, SSF- und DP-Kompartimente bestimmt. Bei Vergrößerung der Dämpfung wird der Anteil des Oberflächenabflusses verringert (bei gleichbleibender Bilanz); bei Verkleinerung der Dämpfung wird der

Oberflächenabflussanteil vergrößert (wieder bei gleichbleibender Bilanz). So ergeben sich für jede Position in den drei Kennfeldern eine Kombination von Soll-Abflusskomponenten und eine gewünschte Soll-Bilanz. Es wird nun der in Kapitel 5.1 beschriebene aus den Monte Carlo-Simulationen resultierende Datensatz benutzt, um für jeden Punkt des Kennfeldes den am besten passenden Parametersatz aus den 60.000 zu wählen. Das Kriterium für den besten Parametersatz ist, dass die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen (a) den aus diesen Parametern resultierenden Abflusskomponentenanteilen sowie der Bilanz und (b) den Soll-Abflusskomponentenanteilen sowie der Soll-Bilanz für die Kombination von „Bilanz“ und „Dämpfung“ der entsprechenden Stelle des Kennfeldes möglichst gering ist.

Als Resultate werden in den Abbildungen 7 und 8 das Kennfeld der SSF-Flächen mit der resultierenden Bilanz und den resultierenden Abflusskomponentenanteilen gezeigt. Abbildung 7 zeigt das Kennfeld im Parameterraum. Jede Zelle der Fläche entspricht einer Kombination von „Bilanz“ und „Dämpfung“. Die gezeigte Farbe der Fläche entspricht in dieser Abbildung der tatsächlich resultierenden Bilanz. Wird nun die „Bilanz“ geändert, so bewegen wir uns entlang des roten Pfeils im Kennfeld. Eine Bewegung nach rechts erhöht die „Bilanz“ (hin zu roten Farben), eine Bewegung nach links verringert die „Bilanz“ (hin zu blauen Farben). Wird die „Dämpfung“ verändert, so bewegen wir uns entlang des grünen Pfeils. Eine Bewegung nach oben erhöht die „Dämpfung“, eine Bewegung nach unten verringert die „Dämpfung“. Zu beachten ist, dass innerhalb einer Spalte, also bei gleicher „Bilanz“, die Farben nahezu konstant bleiben, die tatsächliche Bilanz also erhalten bleibt.

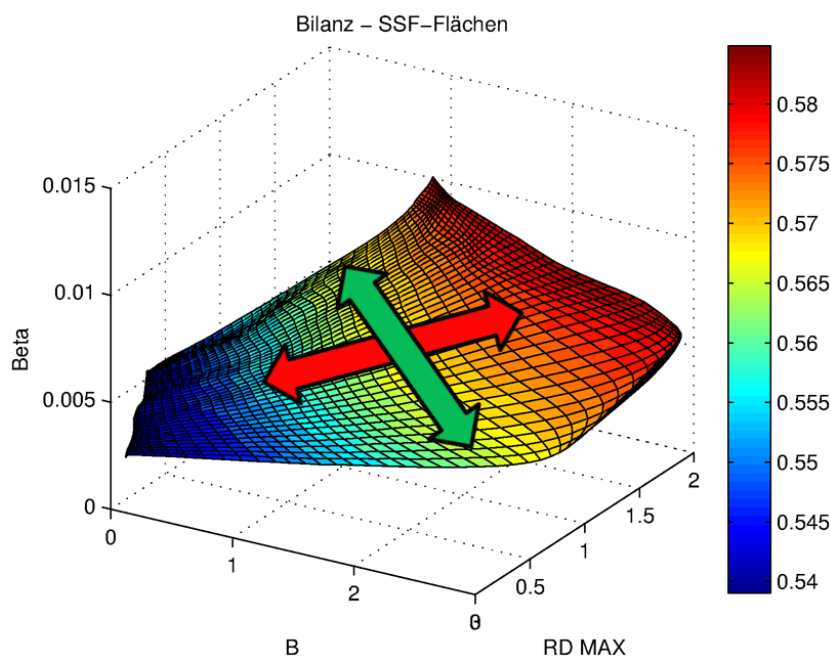


Abb. 7: Parameterkennfeld für SSF-Flächen mit resultierender Bilanz. Eine Bewegung entlang des roten Pfeils entspricht einer Veränderung der „Bilanz“; eine Bewegung entlang des grünen Pfeils entspricht einer Veränderung der „Dämpfung“

Dem gleichen Darstellungskonzept entspricht Abbildung 8. Hier repräsentiert die Farbe allerdings den Anteil des Oberflächenabflusses. Auch hier zeigt sich das gewünschte Verhalten: Eine Bewegung entlang der „Bilanz“, also in Richtung des roten Pfeils, verändert den Anteil

des Oberflächenabflusses nicht. Es wird, wie oben in Abbildung 7 zu sehen ist, lediglich die Bilanz geändert. Eine Bewegung entlang des grünen Pfeils, der „Dämpfung“, skaliert den Anteil des Oberflächenabflusses. Wie oben in Abbildung 7 zu sehen ist, bleibt dabei die Bilanz gleich.

Der gleiche Abbildungstyp lässt sich auch für die anderen Abflusskomponenten erstellen und es zeigt sich auch dort, dass „Bilanz“ und „Dämpfung“ das gewünschte Verhalten zeigen.

In Abbildung 9 werden die Kennfelder der einzelnen Prozessgruppen gegenübergestellt. Das Kennfeld der SOF-Flächen in Teil a) liegt bei der Darstellungsweise am weitesten unten (β ist klein) und rechts (b ist groß). Das Kennfeld der SSF-Flächen liegt ungefähr in der Mitte hinsichtlich β , aber weiter hinten (r_{dmax} größer). Das Kennfeld der DP-Flächen liegt am weitesten oben (β ist groß), links (kleines b) und vorne (kleines rd_{max}). Insgesamt sind also Kennfelder ermittelt worden, die auch unserem Verständnis der Parameter entsprechen.

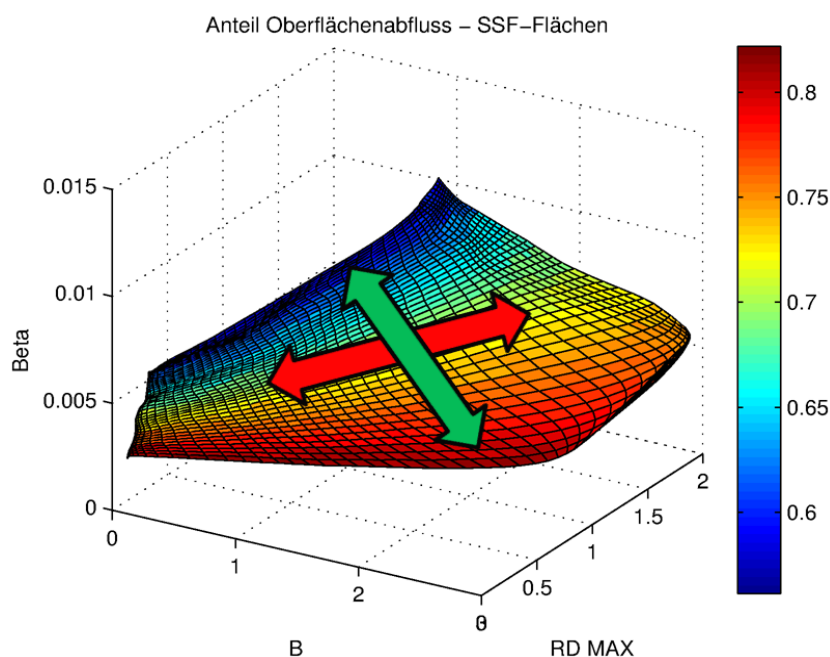


Abb. 8: Parameterkennfeld für SSF-Flächen mit resultierendem Oberflächenabflussanteil. Eine Bewegung entlang des roten Pfeils entspricht einer Veränderung der „Bilanz“; eine Bewegung entlang des grünen Pfeils entspricht einer Veränderung der „Dämpfung“

Abschließend sei noch auf zwei Aspekte hingewiesen: Zum einen sind die Kennfelder am Rand relativ wellig. Das liegt daran, dass hier der Rand des beprobten Parameterraums erreicht wurde und die zufällig am nächsten liegenden Samples gewählt wurden. Diese liegen aber nicht zwangsweise auf der Grenze des beprobten Raums, sondern in mehr oder weniger großem Abstand (bei einer unendlich großen Anzahl von Samples wären die Wellen also nicht vorhanden). In der Praxis hat dies jedoch keine Auswirkung, da der in der Mitte der Kennfelder liegende Bereich für eine Anpassung an ein neues Gebiet vollkommen ausreicht. Zum Anderen wurden diese Kennfelder empirisch ermittelt: Es wurden konkrete Eingangsdaten in einem konkreten Einzugsgebiet verwendet, um die Abflusskomponentenanteile zu berechnen. Ändert sich beispielsweise nur die Temperatur, so resultieren andere Bilanzen.

Ändern sich die Bodeneigenschaften – Luft- und Feldkapazität –, so ändert sich bei gleichen Eingangsdaten ebenfalls die Bilanz. Relativ zueinander resultieren die Kennfelder aber immer in Mustern, die auf SOF-Flächen mehr Oberflächenabfluss, auf SSF-Flächen mehr Interflow und auf DP-Flächen mehr Perkolatation produzieren. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, absolute Werte für die Skalen von „Bilanz“ und „Dämpfung“ zu verwenden, da diese Werte eben nur mit den gleichen Eingangsdaten und gleichen Bodenparametern erreicht werden. Für die Skala der „Bilanz“ und der „Dämpfung“ wurden folglich fiktive Wertebereiche festgelegt, die nicht eine tatsächliche Bilanz suggerieren, welche bei der Simulation dann nicht erreicht wird.

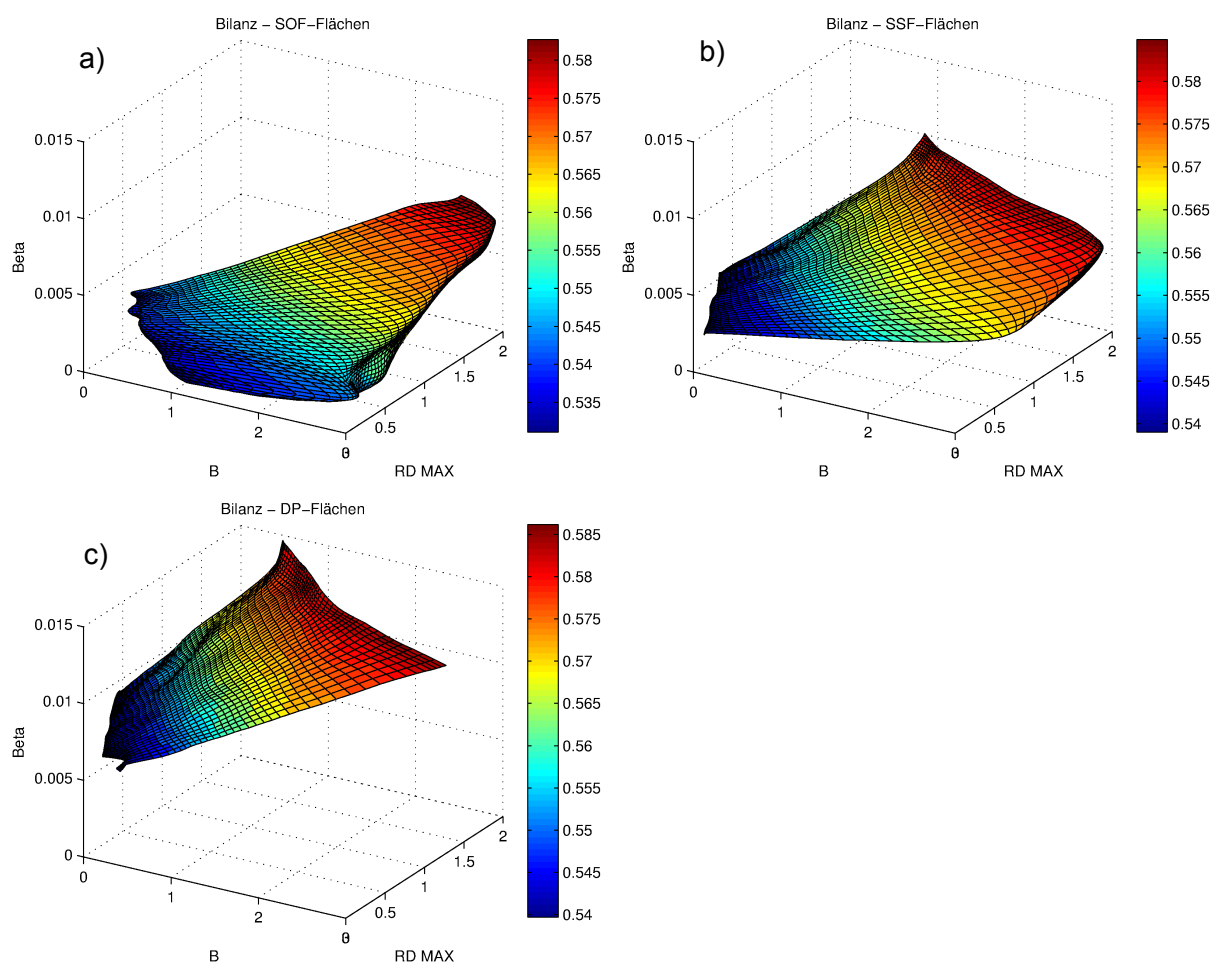


Abb. 9: Kennfelder im Vergleich: a) SOF-Flächen, b) SSF-Flächen, c) DP-Flächen

5.3 Abflusskonzentration

Wie in Kapitel 2 beschrieben, münden die Oberflächenabflüsse aller Kompartimente in zwei gemeinsamen Gebiets Speichern für den schnellen und den langsamen Direktabfluss. Dies hat bei der inhomogenen Parametrisierung den Nachteil, dass bei relativ leeren Direktabflussspeichern die Oberflächenabflüsse von den sofort oder rasch reagierenden Prozessflächen im Gebietspeicher stark gedämpft werden, also nicht sofort oder rasch zu Abfluss werden. Ein Teil des Effekts der inhomogenen Parametrisierung wird hier also zunichtege-

macht. Aus diesem Grund wurden zwei unterschiedliche Ansätze implementiert, die im Folgenden beschrieben werden.

Im ersten Ansatz gibt es fünf Gebietsspeicher für den Oberflächenabfluss: in den ersten münden alle Oberflächenabflüsse der SOF1-Kompartimente, in den zweiten alle Oberflächenabflüsse der SOF2- und SSF1-Kompartimente, in den dritten alle Oberflächenabflüsse der SSF2-Kompartimente, in den vierten alle Oberflächenabflüsse der SOF3- und SSF3-Kompartimente, in den letzten alle Oberflächenabflüsse der DP- und DP=-Kompartimente. Um zu evaluieren, ob der stark nicht lineare Einfluss des Schwellwertes A2 im ersten Ansatz fehlt, wurde ein zweiter Ansatz implementiert. Dieser folgt vollständig dem ersten Ansatz, allerdings gibt es hier für jede der fünf Prozessgruppen zwei Oberflächenabflussspeicher und für jede der fünf Gruppen erfolgt die Aufteilung anhand des Schwellwertes A2. Es gibt also im Ganzen 10 Oberflächenabflussspeicher.

6. Ergebnisse

Bisher wurde lediglich für das Einzugsgebiet Kronweiler eine ausgiebige Kalibrierung vorgenommen. Dabei wurden als Hilfsmittel für den Einsatz der „Bilanz“ und „Dämpfung“ die simulierten und die gemessene Abflussdauerlinie miteinander verglichen und zur objektiven Bewertung Signature Indices berechnet, die einzelne Aspekte der Abflussdauerlinien miteinander vergleichen (YILMAZ et al. 2008). Die „Bilanz“ bewirkt im Wesentlichen eine Verschiebung der simulierten Abflussdauerlinie nach oben oder unten, die „Dämpfung“ bewirkt im Wesentlichen eine „Rotation“ um den Mittelwert, also eine Veränderung der Steigung (YILMAZ et al. 2008, Seite 18, Abbildung 5). Mithilfe der Signature Indices und der beiden neuen Parameter „Bilanz“ und „Dämpfung“ konnte so in wenigen Kalibrierungsschritten eine Güte erreicht werden, die der homogenen Kalibrierung entspricht. Es konnte jedoch allein mit diesen beiden Parametern keine Kombination gefunden werden, die alle Signature Indices minimiert: Das Resultat bleibt ein Kompromiss zwischen unterschiedlichen Zielsetzungen, etwa Abbildung der Spitzen oder möglichst genaue Bilanz.

Eine deutliche Verbesserung konnte bei der Prozessabbildung erreicht werden, wie in den Abbildungen 8 und 9 ersichtlich ist. Hier wird der Oberflächenabfluss des Bodenmoduls zweier Kompartimente gegenübergestellt: in Rot ein Kompartiment, das eine Industriefläche repräsentiert und für das der Prozess SOF1 ausgewiesen wurde; in Grün ein Kompartiment, das einen Laubwald repräsentiert und für das der Prozess DP ausgewiesen wurde. In Abbildung 8 ist das Resultat bei einer homogenen Parametrisierung zu sehen, in Abbildung 9 das Resultat bei einer inhomogenen Parametrisierung.

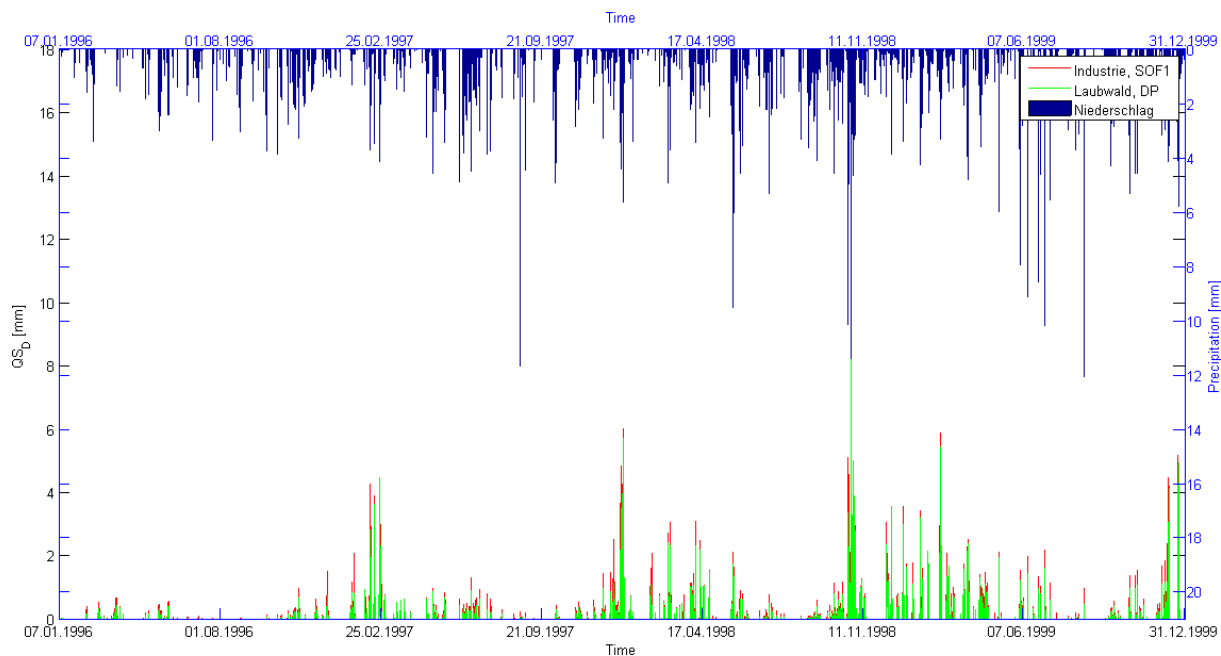


Abb. 8: Direktabfluss aus dem Bodenmodul auf zwei Kompartimenten bei homogener Parametrisierung

In Abbildung 8 fällt auf, dass beide Kompartimente unabhängig vom Niederschlag ähnliche Muster produzieren. Die Höhen der Oberflächenabflüsse unterscheiden sich nur minimal, was durch die leicht unterschiedlichen Luft- und Feldkapazitäten der beiden Kompartimente zu erklären ist. Offensichtlich ist, dass ein so häufiger Oberflächenabfluss für einen Laubwald eher als unrealistisch einzustufen ist.

In Abbildung 9 hingegen unterscheidet sich das Verhalten der beiden Kompartimente hingegen signifikant. Im Laubwaldkompartiment gibt es wesentlich seltener und nur bei größeren Mengen Niederschlag Oberflächenabfluss. Also ein Verhalten, das eher zu dem Prozessverständnis passt.

Weiterhin konnte durch den Einsatz der „Bilanz“ in den bisher betrachteten Gebieten auf den Einsatz des KG-Faktors verzichtet werden, der den Niederschlag pauschal skaliert, um systematische Abweichungen zwischen dem interpolierten Niederschlag und dem vermuteten tatsächlichen Niederschlag zu kompensieren. Aus unserer Sicht ist nicht für jedes Gebiet, in dem der KG-Faktor zuvor eingesetzt wurde, entscheidbar, ob die Abweichung tatsächlich durch systematische Fehler in der Niederschlagsinterpolation entsteht oder durch eine falsche Wahl der Parameter im Bodenmodul, die ebenfalls eine deutliche Skalierung der Bilanz erlauben.

Weniger zufriedenstellend erscheint die Abbildung der Abflusskonzentration. In der ursprünglichen Modellvariante mit vier Gebietsspeichern sind einige Ereignisse identifizierbar, bei denen der Oberflächenabfluss der sofort und rasch reagierenden Prozessflächen im Gebietsspeicher verzögert wird. Bei der ersten in Kapitel 5.3 beschriebenen Variante fehlt das Schwellwertverhalten, das sich durch den Parameter A2 ergibt. Mit der zweiten beschriebenen Variante konnte insgesamt das beste Ergebnis erzielt werden, allerdings zum Preis des deutlich gestiegenen Parametrisierungsaufwandes für die insgesamt 12 Gebietsspeicher. Es wurde versucht, universelle Faktoren zu finden, um die Speicherkoeffizienten für die Oberflä-

chenspeicher aus den zwei ursprünglichen Parametern EQD und EQD2 abzuleiten, dies ist aber bisher nicht gelungen.

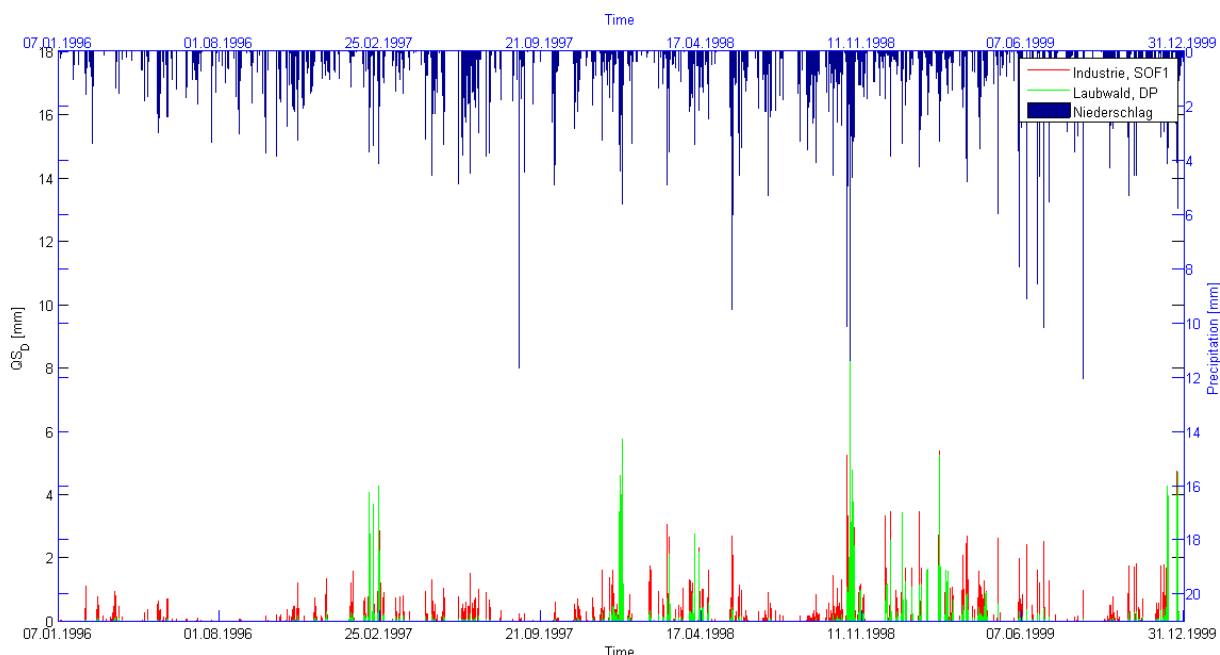


Abb. 9: Direktabfluss aus dem Bodenmodul auf zwei Kompartimenten bei inhomogener Parametrisierung

Zusammenfassend wurde bezüglich des Bodenmoduls das Ziel erreicht, die Kalibrierung des Modells durch Nutzung der Bodenhydrologischen Karte zu vereinfachen und zu objektivieren. Durch Nutzung der „Bilanz“ und „Dämpfung“ ist in wenigen Schritten eine Kalibrierung möglich und das resultierende Modell zeigt Reaktionsmuster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte, repräsentiert die Prozessheterogenität im Einzugsgebiet also genauer. Bezüglich der Gebietsspeicher konnte kein Ergebnis erzielt werden, das die Kalibrierung vereinfacht.

7. Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse legen für die weitere Vorgehensweise verschiedene Schritte nahe:

- Die Methode muss in weiteren Gebieten angewendet und dabei auf ihre Stärken und Schwächen geprüft werden.
- Die Methode hat zudem klare Grenzen, die auch aus den Modellannahmen resultieren. Es erscheint sinnvoll, die Methode auf den bereits in LARSIM existierenden Infiltrationsansatz auszuweiten, der ein breiteres Verhaltensspektrum beim Oberflächenabfluss zeigt und eine bessere Abbildung der Prozesse im hydrologischen Sinn erlaubt.
- Es besteht die Möglichkeit, den Ansatz mittels fernerkundlicher Daten, aus denen die Bodenfeuchte / die Verdunstung geschätzt werden kann, zu evaluieren, da sich die

Bodenfeuchteverläufe und damit auch die Verdunstungsverläufe bei homogener und inhomogener Parametrisierung unterscheiden.

Literatur

- ELPERS, C., J. HOHENRAINER, B. GROSSKINSKY, S. VOLLMER & K.-G. RICHTER (2008): Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen für die Landesfläche von Rheinland-Pfalz und für das Moselgebiet. – Bericht von Dr.-Ing. Karl Ludwig, Beratender Ingenieur, Karlsruhe, im Auftrag des LUWG Mainz (unveröffentlicht)
- LUDWIG, K. & M. BREMICKER (2006): The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. – LUWG-Bericht 18/2006, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- STEINRÜCKEN, U. & T. BEHRENS (2010): Bodenhydrologische Karte. – LUWG-Bericht 6/2010, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- WAGNER, A. & K. GERLINGER (2009): Anwendung des Programms InterMet zur Interpolation von WETTREG-Daten in Monats- und Tageszeitschritten im Rahmen des KlimLandRP-Projekts. – Bericht der Hydron Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Haid-und-Neu-Straße 7, D-76131 Karlsruhe, im Auftrag der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (unveröffentlicht)
- YILMAZ, K. K., H. V. GUPTA & T. WAGENER (2008): A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. – Water Resources Research, Vol. 44