Universität Trier

Nutzung von Abflussprozessinformation in LARSIM

Usage of runoff process information in LARSIM

Oliver Gronz

dem Fachbereich VI Raum- und Umweltwissenschaften der Universität Trier zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) eingereichte Dissertation

Betreuer:
Prof. Dr. Markus C. Casper

Trier, 17. Oktober 2013

Related to the question of what hydrology is, is the question of what a model is. From the viewpoint of the scientist, a model is our perception of how a system works. It is a hypothesis of the real world's functioning, codified in quantitative terms: a model of thought reflecting our theory. This hypothesis needs to be tested against empirical evidence. From the perception of the engineer, however, a model is essentially a tool; a tool based on a theory, but still a tool. Both perceptions are needed to solve a problem.

H. H. G. Savenije *The art of hydrology*

Kurzfassung

Die in einem Einzugsgebiet herrschende räumliche Inhomogenität wird im Wasserhaushaltsmodell LARSIM (*Large Area Runoff Simulation Modell*) in den einzelnen Modellkomponenten unterschiedlich stark berücksichtigt. Insbesondere die räumliche Verteilung der Abflussprozesse wurde bisher nicht berücksichtigt, weil keine flächenhaft verfügbare Information über eben diese Verteilung vorlag. Für das Einzugsgebiet der Nahe liegt nun seit dem Jahr 2007 eine Bodenhydrologische Karte vor, die flächenhaft den bei ausreichenden Niederschlägen zu erwartenden Abflussprozess ausweist.

In der vorliegenden Dissertation wird die Nutzung dieser Prozessinformation bei der Parametrisierung des Bodenmoduls von LARSIM beschrieben: Für drei Prozessgruppen – gesättigter Oberflächenabfluss, Abfluss im Boden, Tiefenversickerung – werden mittels zweier neuer Parameter *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* inhomogene Parametersätze aus empirisch ermittelten Kennfeldern gewählt, um die Prozessinformation bei der Abflussbildung im Modell zu berücksichtigen.

Für die Abbildung der Prozessintensitäten in den Gebietsspeichern werden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die sich in ihrer Komplexität unterscheiden. In der ersten Variante werden fünf Oberflächenabflussspeicher für unterschiedlich schnell reagierende Prozessgruppen eingeführt, in der zweiten Variante wird der erste Ansatz mit dem ursprünglichen Schwellenwert zur Aufteilung in schnelle und langsame Oberflächenabflusskomponenten kombiniert.

Es wird gezeigt, dass die Parametrisierung mit den beiden neuen Parametern *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* einfacher, effektiver und effizienter ist, da beide Parameter minimale Interaktionen aufweisen und in ihrer Wirkungsweise leicht verständlich sind, was auf die ursprünglichen Bodenparameter nicht zutrifft. Es wird ein Arbeitsfluss vorgestellt, in dem die neuen Parameter in Kombination mit *Signature Measures* und unterschiedlichen Darstellungen der Abflussdauerlinie gemeinsam genutzt werden können, um in wenigen Arbeitsschritten eine Anpassung des Modells in neuen Einzugsgebieten vorzunehmen.

Die Methode wurde durch Anwendung in drei Gebieten validiert. In den drei Gebieten konnte in wenigen Kalibrierungsschritten die Simulationsgüte der ursprünglichen Version erreicht und – je nach Zielsetzung – übertroffen werden. Hinsichtlich der Gütemaße zeigte sich bei der Variante, in der die Gebietsspeicher nicht modifiziert wurden, aber kein eindeutiges Bild, ob die ursprüngliche

Parametrisierung oder die neue grundsätzlich überlegen ist. Neben der Auswertung der Validierungszeiträume wurden dabei auch die simulierten Ganglinien in geschachtelten Gebieten betrachtet. Die Version, in der die Gebietsspeicher modifiziert wurden, zeigt hingegen vor allem im Validierungszeitraum tendenziell bessere Simulationsergebnisse.

Hinsichtlich der Abbildung der Abflussprozesse ist das neue Verfahren dem alten deutlich überlegen: Es resultiert in plausiblen Anteilen von Abflusskomponenten, deren Verteilung und Abhängigkeit von Speicherkapazitäten, Landnutzungen und Eingangsdaten systematisch ausgewertet wurden. Es zeigte sich, dass vor allem die Speicherkapazität des Bodens einen signifikanten Einfluss hat, der aber im hydrologischen Sinn richtig und hinsichtlich der Modellannahmen plausibel ist.

Es wird deutlich gemacht, dass die Einschränkungen, die sich ergeben haben, aufgrund der Modellannahmen zustande kommen, und dass ohne die Änderung dieser Annahmen keine bessere Abbildung möglich ist. Für die Zukunft werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Annahmen modifiziert werden können, um eine bessere Abbildung zu erzielen, indem der bereits bestehende Infiltrationsansatz in die Methode integriert wird.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Problemstellung und Zielsetzung 4

3 Stand der Wissenschaft und Forschung 7
3.1 Literatur zu LARSIM 7
3.2 Prozesskartierung 8
3.3 Hydrologische Prozesse in Modellen 9
3.4 Modellbewertung 10
3.5 Bewertung der Unsicherheiten 12

4 Material und Methoden 15
4.1 LARSIM 15
4.1.1 Unterteilung des Einzugsgebietes zur Simulation 16
4.1.2 Zusammenspiel der Komponenten 21
4.1.3 Das Bodenmodul 24
4.1.4 Gebietsspeicher – Abflusskonzentration 29
4.2 Meteorologische Eingangsdaten und InterMet 31
4.3 Bodenhydrologische Karte 36
4.4 LARSIM in MATLAB 39
4.4.1 Warum eine Neuimplementierung? 39
4.4.2 Ausgewählte Aspekte der Implementierung 44
4.5 Gütemaße 55
4.6 Teststandards 61

5 Nahegebiet 63
5.1 Auswahl der Gebiete 64
5.2 Altenbamberg 66
5.3 Kellenbach 67
5.4 Kronweiler 68

6 Ergebnisse 71
6.1 Verhaltensanalyse 71
6.1.1 Extrapolation des Abflusses 73

6.1.2 Homogen . . . 74
6.1.3 Inhomogen . . . 77
6.1.4 Abflusskomponentenanteile und Parameterinteraktionen . . . 78
6.2 Skalierung inhomogener Parameter . . . 82
6.3 Berücksichtigung der Prozessintensität . . . 92
6.4 Kalibrierung mit *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* . . . 96
6.4.1 Kellenbach . . . 96
6.4.2 Kronweiler . . . 105
6.4.3 Altenbamberg . . . 107
6.4.4 Gesamtübersicht . . . 109
6.5 Validierung . . . 112
6.5.1 Der Zeitraum 2000-2003 . . . 112
6.5.2 Weitere Pegel innerhalb der Einzugsgebiete . . . 120
6.5.3 Prozessverhalten . . . 121

7 Diskussion . . . 124
7.1 Grenzen der Modellannahmen . . . 124
7.2 Korrekturfaktor Niederschlag: notwendig? sinnvoll? . . . 125
7.3 Übertragbarkeit in andere Naturräume und / oder Klimata . . . 131
7.3.1 Bodeneigenschaften . . . 132
7.3.2 Landnutzung . . . 137
7.3.3 Klimatische Randbedingungen . . . 139
7.4 Behandlung von DP-Flächen und DP=-Flächen . . . 140
7.5 Wiederversickerung . . . 141
7.6 Alternative Ansätze . . . 143
7.6.1 Neues Infiltrationsmodul und Anpassung der vertikalen Versickerung . . . 143
7.6.2 Unterschiedliche Prozesse? Unterschiedliche Modellannahmen! 145
7.7 Kritische Betrachtung der Gütemaße . . . 147

8 Schlussfolgerungen und Ausblick . . . 151

9 Zusammenfassung . . . 154

Literaturverzeichnis . . . 156

Sachverzeichnis . . . 165

Details zu den verwendeten Einzugsgebieten . . . 167
A.1 Altenbamberg . . . 168
A.2 Kellenbach . . . 169
A.3 Kronweiler . . . 170

Simulationsergebnisse . . . 171

Lebenslauf . . . 214

Schriftenverzeichnis 215

Abbildungsverzeichnis

3.1 Illustration der Bewertung der Distanz zwischen simulierter und gemessener Zeitreihe durch Vergleich zusammengehöriger Werte 11
3.2 Vergleich der Konsistenz zweier Modellstrukturen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum 12
3.3 Visualisierung der aus den Parametern resultierenden Unsicherheit . 13

4.1 Orthofoto des Einzugsgebietes Kronweiler 17
4.2 Aufteilung des Einzugsgebietes Kronweiler in 44 Elemente 18
4.3 Bodenhydrologische Karte des Einzugsgebietes Kronweiler mit Grenzen der Teileinzugsgebiete 19
4.4 Landnutzungskarte des Einzugsgebietes Kronweiler mit Grenzen der Teileinzugsgebiete 20
4.5 Schematische Darstellung der Komponenten des Wasserhaushaltsmodells LARSIM und deren Zusammenwirken 22
4.6 Häufigkeitsverteilungen der Bodenspeicherkapazitäten in Millimetern des Einzugsgebietes Kronweiler (a) und der gesamten Nahe (b) 26
4.7 Aus unterschiedlichen Werten von b resultierende Oberflächenabflüsse QS_D für $W_m = 180\,mm$ 26
4.8 Verteilung des mittleren Jahresniederschlages im Nahe-Einzugsgebiet für den Zeitraum 1993 bis 2003 32
4.9 Lage der verwendeten Niederschlagsmessstellen in Rheinland-Pfalz . 33
4.10 Verteilung der mittleren Jahrestemperatur im Nahe-Einzugsgebiet für den Zeitraum 1993 bis 2003 34
4.11 Kumulierter Niederschlag des letzten Jahres im Einzugsgebiet Kronweiler für den Zeitraum 1994 bis 2002 35
4.12 Temperaturverlauf im Einzugsgebiet Kronweiler für den Zeitraum 1994 bis 2002 35
4.13 Abflussprozesse an einem Hang 38
4.14 Bodenhydrologische Karte des Einzugsgebietes Kronweiler 39
4.15 Negativbeispiel aus dem Variablendeklarationsteil der Datei LARSIM.FOR 43
4.16 Repräsentation eines Einzugsgebietes als Binärbaum 49

4.17 Visualisierung der Modellstruktur durch `showCatchmentStructure`. 52
4.18 Visualisierung des Bodenmoduls 53
4.19 Beispiel, in dem sich für $\%BiasFLV$ ein negatives Vorzeichen ergibt, obwohl die simulierte Abflussdauerlinie oberhalb der gemessenen liegt 59
4.20 Beispielabflussdauerlinien mit markierten Merkmalen, die zur Berechnung der Signature Measures verwendet werden 60
4.21 Werte der Maße für die Abbildung 4.20 gezeigten Beispielabflussdauerlinien 60

5.1 Modellstruktur der gesamten Nahe 64
5.2 Modellstruktur Altenbamberg 67
5.3 Modellstruktur Kellenbach 68
5.4 Modellstruktur Kronweiler 69

6.1 Gruppen von Elementen mit ähnlichen Abflussprozessverteilungen im Einzugsgebiet Kronweiler mit durch Pfeile markierten Vertretern 74
6.2 Gruppen von Elementen mit ähnlichen Landnutzungsverteilungen im Einzugsgebiet Kronweiler mit durch Pfeile markierten Vertretern 74
6.3 Ausschnitt aus dem simulierten Zeitraum zur Illustration der geringen Abweichungen zwischen der Simulation des kompletten Gebiets und den extrapolierten Abflüssen 75
6.4 Streudiagramme der vier variierten Parameter und den dabei erzielten Nash-Sutcliffe-Effizienzen 76
6.5 Streudiagramme der 60.000 Parameterproben: Die Färbung stellt die mit der Parameterkombination erzielte Bilanz dar. 79
6.6 Streudiagramme der 60.000 Parameterproben: Die Färbung stellt die mit der Parameterkombination erzielte Bilanz dar. 81
6.7 Erste Annäherungen an *P_Bilanz* (links) und *P_Dämpfung* (rechts) . 84
6.8 Resultierende Parameterkennfelder der SOF-Kompartimente 86
6.9 Resultierende Parameterkennfelder der SSF-Kompartimente 88
6.10 Resultierende Parameterkennfelder der DP-Kompartimente 89
6.11 Auswirkung der Glättung auf das Kennfeld 90
6.12 Lage der Parameterkennfelder im Parameterraum im Vergleich 91
6.13 Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum für das Gebiet Kronweiler: Dargestellt werden die einzelnen Abflusskomponenten, die durch die vier Gebietsspeicher je Element generiert werden. 93
6.14 Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum für das Gebiet Kronweiler: Es wurden fünf Speicher für die Oberflächenabflüsse je Element verwendet – einen für jede Gruppe von Kompartimenten des gleichen Abflusstyps. 94

6.15 Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum für das Gebiet Kronweiler: Es wurden 10 Speicher für die Oberflächenabflüsse je Element verwendet – zwei für jede Gruppe von Kompartimenten des gleichen Abflusstyps, wobei die Aufteilung je Gruppe anhand A2 erfolgt. 95
6.16 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 der durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig durchgeführten Kalibrierung bei Verwendung des Fortran-Modells im Einzugsgebiet Kellenbach . . 97
6.17 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt eins der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach 98
6.18 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt zwei der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach 99
6.19 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt drei der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach 100
6.20 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt vier der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach 101
6.21 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im letzten Schritt der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach 102
6.22 Aus unterschiedlichen Werten von EQD2 und A2 resultierende Abflussdauerlinien in doppeltlogarithmischer Darstellung 104
6.23 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 der durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig durchgeführten Kalibrierung bei Verwendung des Fortran-Modells im Einzugsgebiet Kronweiler . . 105
6.24 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im letzten Schritt der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kronweiler 106
6.25 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 der durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig durchgeführten Kalibrierung bei Verwendung des Fortran-Modells im Einzugsgebiet Altenbamberg 108
6.26 Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im letzten Schritt der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Altenbamberg 109
6.27 Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in einfach- und doppeltlogarithmischer Darstellungsweise für das Einzugsgebiet Kronweiler 117
6.28 Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in einfach- und doppeltlogarithmischer Darstellungsweise für das Einzugsgebiet Kellenbach 118

6.29 Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2002 in einfach- und doppeltlogarithmischer Darstellungsweise für das Einzugsgebiet Altenbamberg 119
6.30 Vergleich der resultierenden Oberflächenabflüsse auf zwei unterschiedlichen Kompartimenten 122

7.1 Simulationsergebnisse und Signature Measures für den Zeitraum 1993-2002 bei Verwendung von InterMet-Daten und REGNIE-Daten 127
7.2 Vergleich unterschiedlicher Niederschlagsinterpolationen für den Zeitraum 1993-2002 129
7.3 Lage der Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet Kellenbach mit mittleren Jahresniederschlägen 130
7.4 Zeitlicher Verlauf a) der absoluten Bodenspeicherfüllungen W_0, b) der relativen Speicherfüllungen W_0/W_m, c) der daraus resultierenden lateralen Drainage QS_I und d) der resultierenden Perkolation QS_G für zwei Kompartimente des gleichen Elements mit unterschiedlichen Werten von W_m 133
7.5 Verteilung der Anteile der einzelnen Abflusskomponenten gruppiert nach Prozessen im Vergleich zur Verteilung von W_m gruppiert nach Prozessen 135
7.6 Verteilung der Anteile der einzelnen Abflusskomponenten gruppiert nach Landnutzung im Vergleich zur Verteilung von W_m gruppiert nach Landnutzung für den Zeitraum 2000-2003 138
7.7 Bodenhydrologische Karte mit Höhenlinien 142
7.8 Neuer Aufbau des Bodenmoduls mit den folgenden Gebietsspeichern 143
7.9 Aus unterschiedlichen Werten von b_{inf} resultierende Infiltrationskapazitäten 144
7.10 Modifizierte Form der Tiefenversickerung oberhalb von W_Z 145
7.11 Projektion des überhöht dargestellten Höhenmodells mit darübergelegter Bodenhydrologischer Karte 146
7.12 Gegenüberstellung der Simulationsresultate mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen: die linke Spalte ist die hinsichtlich der Nash-Sutcliffe-Effizienz und R^2 beste Variante unter allen Simulationen, die rechte Spalte wurde letztendlich ausgewählt. 148
7.13 Weitere *Signature Measures* zur differenzierteren Bewertung der Abweichungen in den Abflussspitzen 149

A.1 Verteilung der Landnutzungen im Einzugsgebiet Altenbamberg 168
A.2 Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Altenbamberg 168
A.3 Verteilung der Landnutzungen im Einzugsgebiet Kellenbach 169
A.4 Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Kellenbach 169
A.5 Verteilung der Landnutzungen im Einzugsgebiet Kronweiler 170
A.6 Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Kronweiler 170

B.1 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 1997 172
B.2 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 1997 173
B.3 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 1998 174
B.4 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 1998 175
B.5 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 1999 176
B.6 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 1999 177
B.7 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2000 178
B.8 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2000 179
B.9 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2001 180
B.10 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2001 181
B.11 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2002 182
B.12 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2002 183
B.13 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2003 184
B.14 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kronweiler für das Jahr 2003 185
B.15 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 1997 186
B.16 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 1997 187
B.17 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 1998 188
B.18 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 1998 189
B.19 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 1999 190
B.20 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 1999 191
B.21 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2000 192
B.22 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2000 193

B.23 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2001 194
B.24 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2001 195
B.25 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2002 196
B.26 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2002 197
B.27 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2003 198
B.28 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Kellenbach für das Jahr 2003 199
B.29 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 1997 200
B.30 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 1997 201
B.31 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 1998 202
B.32 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 1998 203
B.33 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 1999 204
B.34 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 1999 205
B.35 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 2000 206
B.36 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 2000 207
B.37 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 2001 208
B.38 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 2001 209
B.39 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 2002 210
B.40 Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet Altenbamberg für das Jahr 2002 211
B.41 Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in einfachlogarithmischer Darstellungsweise für die Einzugsgebiete Steinbach, Imsweiler sowie Obermoschel 212
B.42 Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in doppeltlogarithmischer Darstellungsweise für die Einzugsgebiete Steinbach, Imsweiler sowie Obermoschel 213

Tabellenverzeichnis

4.1 Kompartimente des Elementes 2475 mit relevanten Eigenschaften .. 19
4.2 In der Bodenhydrologischen Karte ausgewiesene Prozesse 37

5.1 Ausgewählte Eigenschaften der Einzugsgebiete im Überblick 66

6.1 Übersicht der Wertebereiche für die vier variierten Bodenparameter: im Nahegebiet bei homogener Parametrisierung verwendet, gemäß Kalibrieranleitung, für die homogene Monte Carlo-Simulation verwendet, für die inhomogene Monte Carlo-Simulation verwendet .. 72
6.2 Übersicht der berechneten Gütemaße für die Pegel Kronweiler, Kellenbach und Altenbamberg im Zeitraum 1997-1999 (Kalibrierungszeitraum). Homogene Zeitreihen wurden mit der Fortran-Version simuliert. 110
6.3 Übersicht der berechneten Gütemaße für die Pegel Kronweiler, Kellenbach und Altenbamberg im Zeitraum 2000-2003 (Validierungszeitraum). Homogene Zeitreihen wurden mit der Fortran-Version simuliert. 113
6.4 Übersicht der berechneten Gütemaße für die Pegel Steinbach, Imsweiler und Obermoschel im Zeitraum 2000-2003 (Validierungszeitraum). Homogene Zeitreihen wurden mit der Fortran-Version simuliert. 121

1

Einleitung

Es ist eine traurige Motivation: Während diese Einleitung geschrieben wird – heute ist der 5. Juni 2013 –, müssen zahlreiche Menschen im Osten Deutschlands und den Nachbarstaaten ihre Häuser verlassen. Viele Rettungs- und Hilfskräfte sind im Einsatz, um Häuser und Stadteile zu schützen. In den südlicheren Teilen Deutschlands geht die Flut zurück, teilweise die schlimmste seit mehreren Hundert Jahren, die Aufräumarbeiten beginnen. Es gab Todesfälle, es gibt noch Vermisste. Die Schäden sind eigentlich noch nicht absehbar, es geht aber um mehrere Milliarden Euro.

Wasserhaushaltsmodelle sind sicherlich nicht in der Lage, solche Naturkatastrophen zu vermeiden. Sie sind aber wertvolle Werkzeuge und Informationsquellen im Katastrophenmanagement: Wie hoch ist der zu erwartende Scheitelabfluss? Welche Schutzmaßnahmen sind aufgrund dieser Scheitelhöhe zu treffen? Und bis wann muss der Aufbau dieser Schutzmaßnahmen abgeschlossen sein? Neben dieser eher passiven Form der Informationslieferung können aber auch aktiv unterschiedliche Szenarien berechnet werden: Wie wirkt sich ein bestimmtes Steuerverhalten bei Talsperren oder Staustufen aus? Was passiert, wenn ein bestimmter Deich gesprengt wird? Wie würden sich unterschiedliche Niederschlagsszenarien auswirken, wie sie mittlerweile vom Deutschen Wetterdienst in Form von Ensemble-Vorhersagen (COSMO-LEPS) bereitgestellt werden?

Diese Form der Szenarienberechnung, des Durchspielens von Möglichkeiten, ist aber nicht nur auf den Hochwasserfall beschränkt. Auch bei der Planung und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen können Wasserhaushaltsmodelle hilfreich sein. Es kann konkret quantifiziert werden, wie groß der Einfluss ist, ob bei bestimmten Niederschlagshöhen die erwünschte Schutzwirkung ausreichend ist.

Abseits des Themas Hochwasser können die Modelle aber auch zu anderen relevanten Fragestellungen eingesetzt werden: Was passiert, wenn sich die Landnutzung in einzelnen Bereichen eines Einzugsgebietes ändert? Wie ändert sich das Abflussgeschehen, wenn Eigenschaften des Bodens und damit der dominante Prozess verändert werden? Wie ist die Grundwasserneubildung abzuschätzen? Oder eine weitere höchst aktuelle Fragestellung: Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf das Abflussgeschehen und den Wasserhaushalt?

Um diesen vielfältigen Aufgaben gerecht zu werden, muss ein Modell zunächst in der Lage sein, den tatsächlichen Wasserstand möglichst präzise zu simulie-

ren. Bei weitergehenden Fragestellungen, wie etwa den Fragen zu den Landnutzungsänderungen, den Änderungen der Bodeneigenschaften oder der Grundwasserneubildung, müssen Einzugsgebiete detailliert abgebildet werden. Die relevanten Eigenschaften des Gebietes – Landnutzung, Bodeneigenschaften, Abflussbildung – müssen repräsentiert sein.

In Rheinland-Pfalz wird dazu – wie in den Bundesländern Baden-Würtemberg, Bayern, Hessen, Vorarlberg (Österreich) und auf einer gröberen Skale für Mitteleuropa durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde – auch das Wasserhaushaltsmodell LARSIM eingesetzt. In diesem Modell werden einige der angesprochenen Aspekte bereits detailliert umgesetzt und bei der Simulation der Komponenten des Wasserhaushaltes berücksichtigt, etwa der Einfluss der Landnutzung; andere Aspekte hingegen, wie die räumliche Repräsentation der Abflussbildung, werden eher im Mittel simuliert. Die Integration einer seit mehreren Jahren vorliegenden Bodenhydrologischen Karte für das Einzugsgebiet der Nahe soll eben diesen Mangel beheben und ist das Hauptthema der vorliegenden Dissertation.

Im nächsten Kapitel werden dazu zunächst die Problemstellung und die Zielsetzung präzisiert: Bei welchen Komponenten des Wasserhaushaltes wird bereits die Heterogenität im Einzugsgebiet berücksichtigt? Und bei welchen nicht? Wie wirkt sich das aus? Was ist zu tun, um diese Abbildung zu verbessern?

Anschließend wird in Kapitel 3 der Stand der Wissenschaft dargelegt. Welche Ansätze existieren bereits, um Abflussprozessinformation in Modellen zu integrieren? Wie ist überhaupt der Forschungsstand bei der Kartierung von Abflussprozessen? Welche Verfahren existieren, um Modelle hinsichtlich ihrer Güte und ihrer Parametrisierung zu bewerten?

Das Material und die Methoden werden dann in Kapitel 4 vorgestellt: Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM in den für die Dissertation relevanten Teilen, die durch InterMet interpolierten meteorologischen Daten, die Bodenhydrologische Karte, die Implementierung von LARSIM in MATLAB sowie die verwendeten Gütemaße und Teststandards.

Im Kapitel 5 werden die Eigenschaften des Untersuchungsgebietes – das Einzugsgebiet der Nahe bzw. die davon verwendeten Teilgebiete – beschrieben, die hinsichtlich des Modells und der Hydrologie relevant sind.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt. Hier werden chronologisch die einzelnen Arbeitsschritte beschrieben: die Verhaltensanalyse durch Anwendung von Monte Carlo-Methoden, der Ansatz, der zur Skalierung der inhomogenen Parameter entwickelt wurde, die Kalibrierungsschritte in den Testgebieten und die Ergebnisse der Validierung.

In Kapitel 7 werden einige aus dem Ergebnisteil resultierende Aspekte im Detail diskutiert: Ein kritischer Punkt sind die Einschränkungen, die sich aus den Modellannahmen ergeben. Der Themenkomplex Niederschlag und dessen Korrektur ist relevant. Kann die entwickelte Methode auch in anderen Naturräumen oder Klimata eingesetzt werden? Ist das Thema Wiederversickerung ein Problem? Gibt es alternative Ansätze, die aussichtsreich erscheinen? Wie aussagekräftig waren die einzelnen eingesetzten Gütemaße?

Abschließend werden in Kapitel 8 die wesentlichen Schlussfolgerungen gezogen, ein Ausblick auf mögliche Folgeschritte gegeben und die Arbeit retrospektiv im Kapitel 9 zusammengefasst.

2

Problemstellung und Zielsetzung

Einzugsgebiete sind hinsichtlich einer Vielzahl von Eigenschaften inhomogen: Es gibt Teilflächen, die bewaldet sind, Grünland, Weinbau, Ackerflächen, Siedlungsflächen, industriell genutzte Flächen, Wasserflächen etc. Es gibt Flächen, die höher liegen, und solche, die niedriger liegen. Es gibt unterschiedlich steile Hänge, es gibt Hochflächen, es gibt Talauen. Es gibt unterschiedlich breite Abschnitte des Gerinnes, unterschiedlich steile, unterschiedlich raue.

Diese Einteilung in Klassen, in Flächen, die hinsichtlich einer Eigenschaft homogen sind, lässt sich nahezu beliebig verfeinern: Wälder können unterteilt werden in Laub- Nadel- und Mischwälder. Die Bestandshöhen und -dichten können variieren. Siedlungen können dicht oder locker sein, die „versiegelten“ Flächen mehr oder weniger durchlässig.

Bei der Betrachtung des Wasserhaushaltes eines Einzugsgebietes spielt diese Inhomogenität eine signifikante Rolle: Nahezu alle Komponenten des Wasserhaushaltes werden von diesen Eigenschaften beeinflusst. In Wäldern spielt die Interzeption eine andere Rolle als auf Verkehrsflächen. Auf hoch gelegenen Flächen fällt tendenziell häufiger Schnee als auf niedrig gelegenen. Er wird auf hoch gelegenen Flächen auch länger gespeichert. Dunkle Flächen nehmen mehr Energie auf als helle, die Verdunstung ist dort höher.

Auch bei den meteorologischen Eingangsdaten liegen innerhalb eines Gebietes sehr differenzierte Werte vor. Durch fortgeschrittene Interpolationstechniken, die eine Vielzahl von Einflüssen der Topographie auf die räumliche und zeitliche Verteilung der Größen berücksichtigen, ist eine sehr genaue Ableitung der Größen an einem bestimmten Punkt im Einzugsgebiet aus Stationsdaten möglich. Solche Topographieeffekte sind im einfachen Fall Höhenabhängigkeiten, etwa der Temperatur oder der relativen Luftfeuchtigkeit, aber auch komplexere Zusammenhänge wie Luv- und Lee-Effekte auf Niederschlagsverteilungen in Mittelgebirgen können berücksichtigt werden.

Im Wasserhaushaltsmodell LARSIM wird diese Inhomogenität bezüglich der Eigenschaften des Einzugsgebietes und der meteorologischen Eingangsdaten abgebildet, indem das Einzugsgebiet unterteilt wird. Einzelne Flächen werden individuell simuliert, erhalten individuelle Parameter, haben individuelle meteorologische Eingangsdaten. Der Grad der Inhomogenität dieser Teilflächen ist in den einzelnen Modellkomponenten aber sehr unterschiedlich. Sehr differenziert ist bei-

spielsweise der Verlauf der Kapazität des Interzeptionsspeichers: Hier liegt für jede Landnutzungsklasse und für jeden Monat des Jahres ein individueller Wert vor. In neueren Versionen wird dieser sogar dynamisch anhand des Temperaturverlaufs im Frühjahr bestimmt. Diese hohe räumliche und sogar zeitliche Variabilität setzt sich allerdings nicht in allen Teilmodulen fort.

Insbesondere im Bodenmodul ist dies nicht so. Die Speicherung des Wassers im Boden sowie seine Aufteilung in Komponenten wird in LARSIM durch einen eindimensionalen Speicheransatz repräsentiert: Es gibt eine Bodensäule mit einer gewissen Kapazität, in Abhängigkeit der Füllung und der Niederschlagsintensität werden drei Abflusskomponenten gebildet: Oberflächenabflüsse, laterale Drainage und Perkolation. Die Parameter, die diese drei Abflusskomponenten im Wesentlichen beeinflussen, sind auf allen Teilflächen gleich – mit kleinen Einschränkungen bei der Perkolation. Das Modul verhält sich also homogen.

Dafür gibt es gute Gründe, denn ob und wie nun die räumliche Inhomogenität in der Praxis abgebildet werden kann, hängt neben der Komplexität der Umsetzung aber vor allem davon ab, ob die zur Abbildung der Inhomogenität notwendige Information überhaupt flächenhaft vorliegt. Für manche Eigenschaften, vor allem die oberirdisch sichtbaren, existieren heute Methoden, diese Eigenschaften etwa aus fernerkundlichen Daten abzuleiten: die Topographie, die Landnutzung, der Anteil der Grünflächen in Siedlungen, selbst die Baumart, die Blattflächenindizes oder auch die Bodenfeuchte im Oberboden.

Eigenschaften des Bodens hingegen sind schwieriger flächenhaft darzustellen. Es gibt aber Karten, die den geologischen Untergrund zeigen, Bodentypen, nutzbare Feldkapazitäten, Luftkapazitäten etc. Die zuletzt genannten Eigenschaften werden auch tatsächlich im Bodenmodul genutzt, um die Kapazität des Speichers zu definieren und auch den Schwellwert, ab dem die laterale Drainage steigt.

Weitere im hydrologischen Sinne relevante Informationen, etwa zum Abflussprozessverhalten einer Teilflächen, liegen erst seit wenigen Jahren flächenhaft vor: Karten, die für Teilflächen dominante Abflussprozesse ausweisen. Im kleineren Maßstab für kleinere Einzugsgebiete kann dies durch klassische Kartierung im Felde geschehen, im größeren Maßstab ist dies z. B. durch künstliche neuronale Netzen möglich, mit denen der Prozess aus anderen Geoinformationen flächenhaft automatisch abgeleitet werden kann.

Eine solche Bodenhydrologische Karte liegt seit mehreren Jahren für das Einzugsgebiet der Nahe vor. Sie soll genutzt werden, um einzelne Teilflächen im Bodenmodul inhomogen zu parametrisieren: Die Teilflächen sollen Parametersätze erhalten, die in Reaktionsmustern des Bodenmoduls resultieren, die im Einklang mit der hydrologischen Interpretation der ausgewiesenen Prozesse stehen.

Erhalten einzelne Flächen individuelle Parametersätze, so wird die Komplexität der Parametrisierung zunächst erhöht. Doch die Aufgabe der Modellkalibrierung ist in LARSIM bereits bei der homogenen Parametrisierung nicht frei von Tücken: Der Einfluss einzelner Parameter ist nichtlinear und die Parameter beeinflussen sich gegenseitig, sie interagieren.

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Kalibrierung ist es, zunächst den Korrekturfaktor für den Niederschlag zu justieren, um die Bilanz möglichst gut ab-

zubilden. Anschließend werden die Parameter für den Basisabfluss eingestellt, es folgen die der lateralen Drainage und abschließend die Parameter der Oberflächenabflüsse. Nach den letzten Schritten kann aufgrund der Interaktionen erneut eine Anpassung der zuerst eingestellten Parameter notwendig sein. Dies beschreibt der folgende Auszug aus dem Bericht zur Aufstellung des Wasserhaushaltsmodells Rheinland-Pfalz sehr anschaulich:

„Nach Abschluss der „Grobkalibrierung“ mussten aufgrund der komplexen Interaktionen innerhalb des Wasserhaushaltsmodells einige der in den ersten Kalibrierungsschritten angepassten Parameterwerte erneut nachgeführt werden.

Bei dieser Feinkalibrierung konnten die Parameterwerte nicht einzeln variiert werden, vielmehr war eine gezielte gleichzeitige Anpassung mehrerer Parameter erforderlich. Vor allem Änderungen im Formfaktor der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion machten eine gleichzeitige Nachführung der Parameter β und D_{max} erforderlich.“ (Elpers u. a. (2008), Seite 23)

Auch in der Kalibrieranleitung wird auf diesen Umstand hingewiesen:

„Eine Veränderung von b erfordert unter Umständen ein Nachjustieren von rd_{max} (ggf. auch β), da sich die generelle Aufteilung des Abflusses auf die Speicher ändert.“

Werden nun diese Interaktionen berücksichtigt und wird darüber hinaus der Umstand bedacht, dass die Anzahl der zu findenden Parameter nun ein Produkt aus der Anzahl der Bodenparameter und der Anzahl der kartierten Prozesse ist, wird offensichtlich, dass eine manuelle Wahl der Parameter für einzelne Prozesse bei der Kalibrierung durch einen Menschen nicht mehr möglich ist.

Es muss also eine andere Möglichkeit gefunden werden, die in der Bodenhydrologischen Karte enthaltene Prozessinformation im Modell zu berücksichtigen. Für diese Möglichkeit können die folgenden Zielsetzungen formuliert werden:

- Die in der Bodenhydrologischen Karte enthaltenen Angaben sollen im Modell genutzt werden.
- Das im Modell resultierende Prozessverhalten soll den Angaben der Karte entsprechen.
- Der Vorgang der Kalibrierung soll trotz der steigenden Komplexität objektiviert und vereinfacht werden.
- Die Modellgüte soll durch Nutzung dieser Zusatzinformationen gesteigert werden.

Neben der bisherigen Nutzung von LARSIM im Rahmen der operationellen Hochwasservorhersage sind zukünftig weitere Einsatzmöglichkeiten angedacht. Die zuvor genannten Zielsetzungen sollen auch diese positiv beeinflussen. Zu diesen Einsatzmöglichkeiten gehören die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und den Wasserhaushalt, die resultierenden Effekte bei Landnutzungsänderungen und auch Abschätzungen der Grundwasserneubildung.

3

Stand der Wissenschaft und Forschung

In diesem Kapitel soll ein Überblick der zum Thema LARSIM und der Problemstellung existierenden Literatur geboten werden. Da diese Literatur wenige mit der Problemstellung verwandte Themen enthält, wird der Bogen ein wenig weiter gespannt: Es werden zunächst gleichartige oder alternative Konzepte bei der Prozesskartierung vorgestellt und aufbauend auf diesen existierende Techniken beschrieben, welche diese Information abbilden. Anschließend werden unterschiedliche Methoden zur Bewertung der Modellgüte mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Abschließend werden Verfahren zur Bewertung der Unsicherheiten vorgestellt.

3.1 Literatur zu LARSIM

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM wird im Detail in Ludwig u. Bremicker (2006) beschrieben. Von dieser Publikation existiert auch eine ältere Fassung in deutscher Sprache mit großen inhaltlichen Überschneidungen (siehe Bremicker (2000)).

In einer internen Übersicht der LARSIM betreffenden Publikationen werden 48 Einträge genannt, wobei ein Teil davon als unveröffentlicht gekennzeichnet ist. Das Gros der Artikel beschäftigt sich mit dem Modellaufbau in unterschiedlichen Flussgebieten (z. B. Ebel u. a. (2000)) oder beschreibt die Einbindung von LARSIM in den Hochwassermeldezentralen (z. B. Bremicker u. a. (2006)). Herauszuheben bezüglich der Aufgabenstellung ist allerdings die Diplomarbeit von Fackel (1997), deren Ergebnisse auch in Bremicker (2000) ab Seite 50 dargestellt werden.

Das Web of Knowledge liefert zum Suchwort „LARSIM“ lediglich 12 Treffer, darunter auch der Artikel Ludwig u. a. (2010), in dem der Einfluss unterschiedlicher Infiltrationsansätze auf die Abbildung von Extremereignissen beschrieben wird. Unter den restlichen Treffern finden sich ein Artikel, in dem der Einfluss der räumlichen Verteilung der Niederschläge auf die Simulationsergebnisse untersucht wird (Casper u. a. (2009)), ein Artikel, in dem LARSIM lediglich zu Vergleichszwecken herangezogen wurde (Costa u. a. (2012)), sowie ein Artikel, in dem die Erweiterung zur Simulation der Wassertemperatur beschrieben wird (Haag u. Luce (2008)). Die verbleibenden Artikel sind inhaltlich noch weiter vom Thema entfernt.

Neben dieser doch recht übersichtlichen Anzahl existieren aber weitere Informationsquellen. Eine Wichtige ist die LARSIM Online-Hilfe, in der Angaben zu allen Optionen LARSIMs enthalten sind und die unter der im Literaturverzeichnis angegebenen Adresse frei verfügbar ist. Auf diese Hilfe wird im weiteren Verlauf unter Angabe der relevanten Schlüsselwörter häufiger Bezug genommen.

Auch wenn diese Themen nicht in allen Fällen in Form eines Artikels publiziert werden, so bieten doch die jährlich stattfindenden Workshops der LARSIM-Anwendergemeinschaft einen Austausch der aktuellen Forschungsthemen, Weiterentwicklungen, neuen Optionen und Berichten aus der Anwendungspraxis. Auch diese Vorträge sind frei verfügbar und wo notwendig, wird auch auf diese Bezug genommen, wie etwa Stahl (2012).

Es verbleiben eine Reihe von unveröffentlichten Dokumenten, wie etwa der für praktische Fragen grundlegend wichtige Bericht zur Aufstellung des Wasserhaushaltsmodells Rheinland-Pfalz (siehe Elpers u. a. (2008)). Weitere Beispiele sind die Kalibrieranleitung und auch der Bericht zur Abbildung der Bodenhydrologischen Karte durch das Infiltrationsmodul (siehe Haag-Wanka u. Luce (2010)). Da diese nicht frei verfügbar sind, werden die relevanten Passagen oder Inhalte im weiteren Verlauf der Dissertation zitiert, wie bereits im Kapitel 2 zur Beschreibung der Interaktionen geschehen.

Die Modellannahmen von LARSIM wurden bei dessen Entwicklung nicht neu erfunden. Sie gehen auf einen älteren Ansatz zurück: das Xinanjiang-Modell, das in Zhao (1977) beschrieben wurde. Auch zu diesem existieren Publikationen, sogar recht aktuelle wie Song u. a. (2013), die auch im Sinne der Problemstellung hilfreich ist. In diesem Artikel wird die Problematik der Parameterfindung beschrieben sowie eine globale Sensitivitätsanalyse der einzelnen Parameter durchgeführt. Da sich ein Teil dieser Parameter in der gleichen Form in LARSIM findet, sind diese Informationen potentiell nützlich. Es zeigt sich aber, dass die dort betrachteten Intervalle der Parameter deutlich von denen im Nahe-Einzugsgebiet abweichen, insbesondere das Intervall der betrachteten Speicherkapazitäten ist im Vergleich zu niedrig angesetzt. Diese Kapazitäten haben aber, wie später dargelegt werden wird, einen signifikanten Einfluss. Weiterhin zeigte sich dieser Einfluss auch in Bremicker u. a. (2011).

3.2 Prozesskartierung

Bevor nun die Thematik der Abbildung von Prozessinformation in Modellen aufgegriffen wird, soll zunächst wie angekündigt ein kurzer Überblick über die existierenden Ansätze zur Prozesskartierung geboten werden. Ein Nachteil an diesem Themenkomplex ist, dass sich neben den kartierten Prozessen in ihrer Anzahl und Semantik auch die Aufnahmetechniken zur Bestimmung der Prozesse und die Maßstäbe unterscheiden.

Für die Problemstellung relevant sind die in Scherrer (2006) aufgeführten Prozesse, die auch später bei der Beschreibung der Bodenhydrologischen Karte in Unterkapitel 4.3 im Detail erläutert werden. Hier liegt allerdings eine manuelle

Kartierung durch einen Experten zugrunde, die anhand von Schemata erfolgt, aus denen dann der dominante Prozess folgt.

In einem größeren Maßstab wurde dies in Steinrücken u. Behrens (2010) durch Nutzung von künstlichen neuronalen Netzen durchgeführt. Die so resultierende Karte ist auch die Grundlage für das Nahe-Einzugsgebiet.

Neben dieser Umsetzung wurden weitere Möglichkeiten beschrieben, dominante Prozesse anhand verfügbarer Geodaten automatisiert abzuleiten, wie etwa in Schmocker-Fackel u. a. (2007), in Müller u. a. (2009) oder in Hümann u. Müller (2013) vorgestellt.

Eine vollkommen andere Gruppe von Prozessen im weitesten Sinne wird in den sogenannten HOST-Karten (*hydrology of soil types*) ausgewiesen. Diese Kartierung wurde zunächst für Großbritannien durchgeführt (siehe Boorman u. a. (1995)). Es wurde aber auch gezeigt, dass die Kartierung in größeren Gebieten durchführbar ist, wie etwa in Schneider u. a. (2007) für ganz Europa. Die Grundannahme bei der Kartierung sind hier unterschiedliche Modelle, die unterschiedliche Fälle der Wasserbewegungen im Boden beschreiben. Ein Teil dieser Modelle wird weiter untergliedert und es resultieren insgesamt 29 HOST-Klassen.

3.3 Hydrologische Prozesse in Modellen

Als erstes Beispiel für die Umsetzung der Prozessinformation in Modellen ist die Dissertation von Schmocker-Fackel (2004) zu nennen, da hier die gleichen Prozesse wie in Scherrer (2006) verwendet werden. Der Hauptfokus dieser Dissertation liegt eigentlich auf der Ableitung der Abflussprozesse, aber es wurden auch Modellierungen mit diesen Prozessen durchgeführt, um die während der Kartierung getroffenen Annahmen zu testen. Die Absicht ist dabei, allgemeingültige Parameter für einzelne Prozesse zu finden, um diese dann in unbekannte Gebiete zu übertragen. Auf diese Weise sollen Abschätzungen des Abflussgeschehens in diesen Gebieten möglich sein. Auch die Extrapolationsfähigkeiten des Modells sollen durch die Integration der Prozessinformation verbessert werden, da die Unsicherheit einzelner Parameter reduziert werden kann.

Das Konzept des für diesen Zweck entwickelten Modells beruht wie in LARSIM auf der Unterteilung des Einzugsgebietes in einzelne Teilflächen, die hinsichtlich des dominanten Abflussprozesses homogen sind. Einzelne Abflusskomponenten dieser Teilflächen werden teilweise ebenfalls durch Einzellinearspeicher verzögert. Ein kleiner Unterschied ergibt sich durch die vorgeschlagene Obergrenze der Gebietsgrößen: Auf Seite 81 wird eine maximale Größe von $10\,\mathrm{km}^2$ genannt, da die Koeffizienten der Einzellinearspeicher skalenabhängig sind. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass bei der Entwicklung des Modells bereits die Abbildung der Prozesse bedacht wurde. Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich aber durch die zur Verfügung stehenden Informationen: Ein Teil der Parameter wurde durch Ergebnisse aus dem Kartierungsprozess gefunden, es wurden beispielsweise gemessene Wasserstände in den Böden verwendet oder Ergebnisse von Beregnungsversuchen.

Als Beispiel für die Umsetzung der HOST-Klassen sind vor allem die Arbeiten von Dunn u. Lilly (2001) zu nennen. Hier wurden Monte Carlo-Methoden eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen Modellparametern und HOST-Klassen zu bestimmen. Für einen Teil der Parameter, die im verwendeten Modell (Dunn u. a. (1998)) zu finden sind, ist dies gelungen: Die relativen Werte der Parameter konnten gebietsübergreifend anhand der HOST-Klassen bestimmt werden. Für einen weiteren Parameter, den *fast response distance*-Parameter, ist dies nicht gelungen, wobei hier Limitierungen der Modellstruktur als Gründe genannt werden.

3.4 Modellbewertung

In der hydrologischen Modellierung ist die Verwendung bestimmter Gütemaße zur Bewertung eines Simulationsergebnisses fest etabliert. Eines der am häufigsten angewendeten Maße ist das Bestimmtheitsmaß (siehe z. B. Bahrenberg u. a. (2010), Seite 200). Ein weiteres weitverbreitetes Maß ist die Nash-Sutcliffe-Effizienz (siehe Nash u. Sutcliffe (1970)) bzw. die Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Werte (siehe Krause u. a. (2005), Abschnitt 2.4).

Da diese Maße auch für die im weiteren Verlauf der Dissertation als Referenz dienende homogen parametrisierte Version von LARSIM berechnet wurden, liegt es nahe, diese Maße – neben anderen – für den Vergleich zu verwenden. Aufgrund ihrer Bedeutung werden diese Maße später in Unterkapitel 4.5 detailliert vorgestellt.

An dieser Stelle werden auch einige weitere Publikationen näher beschrieben, in denen Vor- und Nachteile der Gütemaße herausgestellt werden. Einige davon nennen eher positive Aspekte der Maße: Etwa in Moriasi u. a. (2007) werden als Vorteile der Nash-Sutcliffe-Effizienz die weite Verbreitung und Vergleichbarkeit genannt. Auch in McCuen u. a. (2006) wird das Maß eher als positiv dargestellt, wenn auch mit einigen Einschränkungen, etwa dem großen Einfluss einzelner Ausreißer.

Neuere Ansätze versuchen, hydrologisch bedeutsame Maße zu definieren. Dazu gehören etwa die in Yilmaz u. a. (2008) beschriebenen *Signature Measures*, die ebenfalls in dieser Dissertation angewendet wurden und später in Unterkapitel 4.5 im Detail beschrieben werden.

Im Folgenden sollen noch einige der kritischen Aussagen zu den klassischen Gütemaßen beschrieben werden. Einige davon sind trivial: Etwa in Weglarczyk (1998) wird herausgestellt, dass das Bestimmtheitsmaß unempfindlich gegenüber einem Bias der Bilanz ist, was sich direkt aus der Definition des Maßes ergibt.

Die von Schaefli u. Gupta (2007) vorgebrachte Kritik an der Nash-Sutcliffe-Effizienz ist wesentlich substanzieller. Sie unterstellt, dass die Werte unterschiedlicher Studien bzw. Einzugsgebiete kaum miteinander vergleichbar sind. Als weiterer Nachteil ist angegeben, dass dieses Maß außerhalb der hydrologischen Modellierung kaum verbreitet ist.

In Krause u. a. (2005) wird ein systematischer Vergleich weit verbreiteter Gütemaße durchgeführt. Dort wird als Nachteil des Bestimmtheitsmaßes der Umstand genannt, das sehr schlechte Ergebnisse dennoch in hohen Werten resultieren

können („Additionally it was shown that r^2 alone should not be used for model quantification, because it can produce high values for very bad model results, because it is based on correlation only.“). Der Nash-Sutcliffe-Effizienz wird eine Sensivität für die Abbildung der Abflussspitzen bescheinigt.

In Legates u. McCabe Jr. (1999) wird nochmals die Insensititvät des Bestimmtheitsmaßes gegenüber additiven Unterschieden herausgestellt. Weiterhin wird dem Maß eine Überempfindlichkeit bei der Bewertung der Extremwerte zugeschrieben.

Auch von Ehret u. Zehe (2011) werden die Defizite von Standardgütemaßen erneut betont. Die Autoren stellen die Vorteile eines visuellen Vergleichs heraus, der allerdings den großen Nachteil der Subjektivität aufweist. Weiterhin liefert dieser Vergleich keinen Wert, der durch einen Algorithmus automatisiert optimiert werden kann. Aus diesen Überlegungen heraus beschreiben die Autoren einen Ansatz, der die Distanz bzw. Ähnlichkeit zwischen der gemessenen und der simulierten Zeitreihe bewertet. Die Auswertung erfolgt auf Basis von Ereignissen. Abbildung 3.1 visualisiert die zugrundeliegende Idee, indem Verbindungen zwischen in der Auswertung als zusammengehörig betrachteten Werten gezeigt werden.

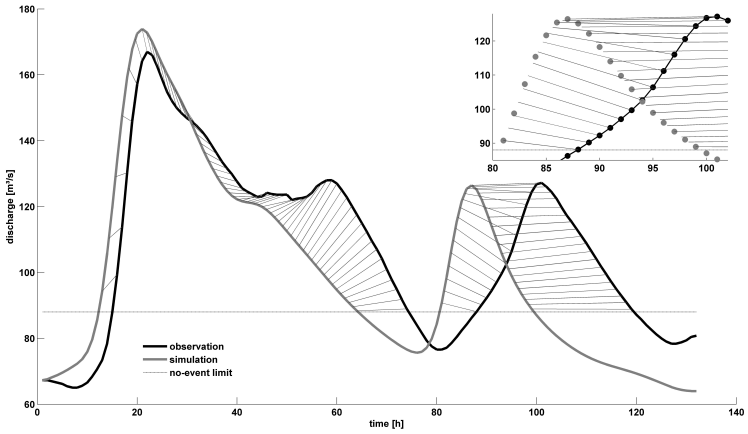

Fig. 6. Example of a matching observed (black) and simulated (grey) event (event 5 in Fig. 4). Connections (thin grey lines) between matching points of observation and simulation according to the Series Distance procedure are shown. The small inserted figure reveals that the observed points in a segment (rise or recession) do not necessarily match with a simulated point, but with a point on a polygon line representing the simulation at the same fraction of overall segment duration.

Abb. 3.1. Illustration der Bewertung der Distanz zwischen simulierter und gemessener Zeitreihe durch Vergleich zusammengehöriger Werte (Quelle: Ehret u. Zehe (2011))

Ein Ansatz, der neben der Güte auch die Konsistenz bewerten möchte, wurde kürzlich von Euser u. a. (2013) vorgestellt. Der Ansatz wurde entwickelt, um neben der reinen Simulationsgüte auch die gewählte Modellstruktur zu bewerten, die aus flexiblen Modellelementen aufgebaut wurde (siehe Fenicia u. a. (2011)). Die für das Bewertungsverfahren relevanten Schritte des gesamten Frameworks lauten: Auswahl der zu evaluierenden Maße, Ausführung des Modells für zufällig verteilte Werte der relevanten Parameter und eine Hauptkomponentenanalyse der mit den

Parameterproben simulierten Ganglinien bzw. den daraus abgeleiteten Maßen. Die Bewertung betrifft dann die relative Güte und Konsistenz für eine konkrete Kombination einer Modellstruktur mit einem Einzugsgebiet. Die Argumentation in dem Artikel besagt, dass die Konsistenz als hoch einzuschätzen ist, wenn alle Maße nach der Hauptachsentransformation in dem durch die ersten beiden Hauptkomponenten aufgespannten Raum eine geringe Streuung aufweisen, also in die gleiche Richtung weisen. Ein solches Resultat kommt zustande, wenn die Variation der Parameter die Gütemaße in gleicher Weise skaliert.

In Abbildung 3.2 wird das Resultat dieser Analyse für zwei unterschiedliche Modellstrukturen jeweils für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum dargestellt. Die Konsistenz des Modells M8 ist als höher zu bewerten, weil sich nach der Hauptachsentransformation lediglich zwei Gruppen von Maßen zeigen. Die Maße des Modells M7 hingegen zeigen ein weniger zusammenhängendes Verhalten und es gibt auch größere Unterschiede zwischen Kalibrierungs- und Validierungszeitraum.

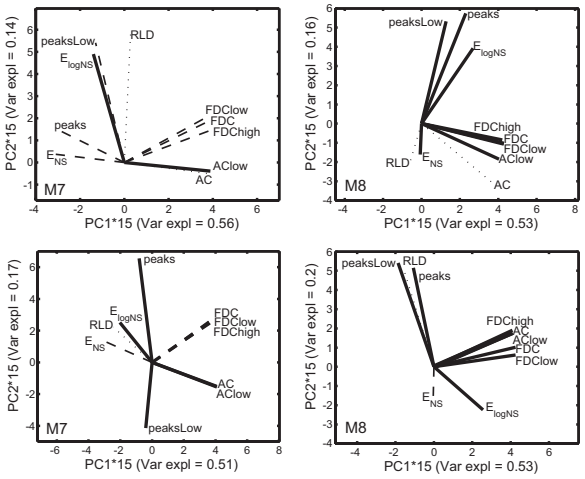

Fig. 12. PCA diagrams for M7 (left) and M8 (right) for both the calibration (top) and validation (bottom) period. The principal components are dimensionless. M8 shows a higher consistency for the calibration period and a more consistent behaviour between the calibration and validation period. Presented results are for the Maimai catchment.

Abb. 3.2. Vergleich der Konsistenz zweier Modellstrukturen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum (Quelle: Euser u. a. (2013))

3.5 Bewertung der Unsicherheiten

Innerhalb der hydrologischen Modellierungsgemeinschaft existieren einige Verfahren, die den Schritt der Modellidentifikation unter Berücksichtigung der Unsicherheiten unterstützen. Eines der etablierten Verfahren ist GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), das in Beven u. Binley (1992) vorgestellt

wurde. Das Verfahren basiert grundsätzlich auf der Anwendung von Monte Carlo-Methoden. Parameter, deren Unsicherheit quantifiziert werden soll, werden innerhalb zu definierender Wertebereiche variiert. Das Modell wird dann für jede Parameterprobe ausgeführt und das Modellergebnis mit einem zu wählenden Gütemaß bewertet. Aus den Ergebnissen wird eine Verteilung für jeden Zeitschritt anhand einer vorzugebenden Unsicherheit abgeleitet.

Eine konkrete Anwendung dieser Methode für eine der Problemstellung der vorliegenden Dissertation ähnelnden Aufgabe wird in Julich u. a. (2012) beschrieben. Auch dort wurden unterschiedliche heterogene Eigenschaften eines Einzugsgebietes in einem Modell (SWAT) integriert. Anschließend wurde die GLUE-Methode angewendet. In Abbildung 3.3 wird ein Ergebnis dargestellt, in dem der resultierende 95%-Unsicherheitsbereich hervorgehoben ist.

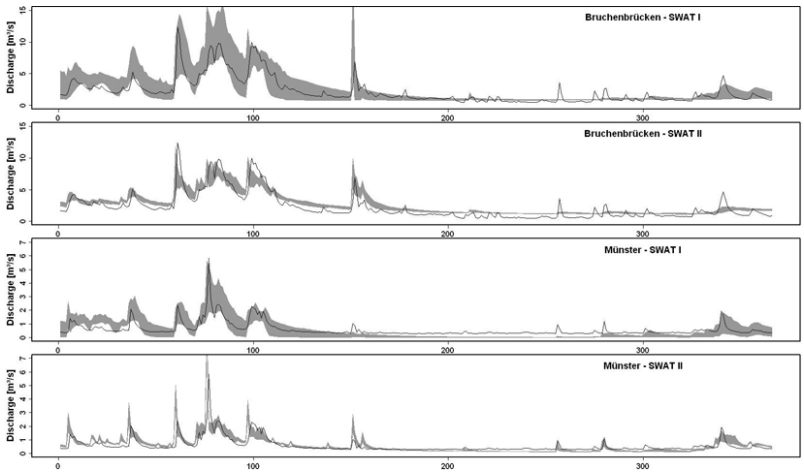

Fig. 5. Span of simulated (shaded grey) and observed (black line) discharge for the gauging stations Bruchenbrücken and Münster for the year 2008 and the parameter ensembles of SWAT I and SWAT II.

Abb. 3.3. Visualisierung der aus den Parametern resultierenden Unsicherheit (Quelle Julich u. a. (2012))

Die Methode hat allerdings im Hinblick auf die Anwendung in Verbindung mit LARSIM den deutlichen Nachteil, dass das Modell häufig ausgeführt werden muss. Dies ist insbesondere bei den größeren Teileinzugsgebieten der Nahe nicht praktikabel.

Einen Schritt weiter im Anspruch geht der in Wagener u. a. (2001) beschriebene Ansatz, der neben der Parameteridentifikation auch die Modellkomplexität mit Hinblick auf die verfügbaren Informationen bewerten möchte. Auch hier muss das Modell häufig ausgeführt werden.

Es existiert eine Reihe von Artikeln des gleichen Autorenkreises, die ähnliche Ziele beinhalten, etwa der in Wagener u. a. (2003) beschriebene Ansatz DYNIA (*dynamic identifiabilty analysis*). Ein wesentlicher Aspekt dieses Ansatzes ist es, dass Zeiträume gefunden werden, in denen die Identifizierbarkeit einzelner Para-

meter größer ist als in anderen Zeiträumen. Allerdings existiert auch hier der große Nachteil der häufigen Modellausführung.

Ebenfalls von dem gleichen Erstautor stammt der Artikel Wagener u. Wheater (2006), aus dem einige Elemente später in der Verhaltensanalyse in Kapitel 6.1 übernommen wurden. Dort wird deutlich werden, dass solche Analysen für ausgewählte Elemente eines Einzugsgebietes durchgeführt werden können; die Simulation der benötigten Anzahl von Modelldurchläufen für ein ganzes Einzugsgebiet ist hingegen nicht praktikabel.

Einen besonderen Augenmerk auf die Robustheit der Parameter legt der Artikel Bárdossy u. Singh (2008). Dort wird argumentiert, dass aus unterschiedlichen Verfahren resultierende optimale Parametersätze abhängig von den Eingangsdaten sind. Die Qualität dieser Eingangsdaten kann aber nicht abgesichert werden, da es Messfehler sowohl bei Eingangs- als auch bei (messbaren) Zustandsgrößen gibt. Zur Bestimmung des Einflusses der Messfehler wurden synthetische Fehler zu den Eingangsdaten hinzugefügt. Es zeigte sich, dass der Einfluss dieser Fehler sehr groß ist. Folglich wird ein Verfahren beschrieben, das robuste Parameter identifiziert. Auch hier ist ein großer Nachteil, dass das Modell dazu häufig ausgeführt werden muss.

Die allen vorherigen Methoden gemeinsame negative Eigenschaft ist, dass das Modell häufig ausgeführt werden muss. Dieses Problem existiert nicht nur bei der Anwendung von LARSIM, es ist ein generelles Problem. Das führte dazu, dass Möglichkeiten untersucht wurden, mit denen die Anzahl der Modellausführungen verringert werden kann. Ein möglicher Ansatz ist in Herman u. a. (2013) beschrieben. In diesem Artikel werden konkrete Zahlen für ein Beispiel genannt, die besagen, dass die Anzahl der Modellausführungen um den Faktor 300 gesenkt werden kann. Angesichts der Laufzeiten der größeren Einzugsgebiete von mehreren Stunden ist damit aber immer noch praktikables Verfahren für LARSIM in Sicht, das die manuelle Kalibrierung unnötig macht bzw. eine konkrete Quantifizierung der Unsicherheiten ermöglicht.

4

Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die wesentlichen eingesetzten Werkzeuge und Methoden vorgestellt:

- Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM wird in einer kompakten Übersicht im Ganzen sowie in den relevanten Bereichen im Detail beschrieben (Unterkapitel 4.1).
- Die verwendeten meteorologischen Eingangsdaten und das zu deren Interpolation eingesetzte Werkzeug werden in Unterkapitel 4.2 vorgestellt.
- Es folgt eine Erläuterung der in der Bodenhydrologischen Karte gezeigten Informationen sowie ein kurzer Abriss der Entstehung dieser Karte (Unterkapitel 4.3).
- Anschließend wird die Umsetzung von LARSIM in MATLAB in einigen ausgewählten Aspekten beschrieben (Unterkapitel 4.4).
- Abschließend werden die eingesetzten Gütemaße und deren Interpretation beschrieben (Unterkapitel 4.5).

4.1 LARSIM

Ludwig u. Bremicker (2006) haben das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (*Large Area Runoff Simulation Modell*) als Konzept sowie die einzelnen Komponenten und die zugrunde liegenden Modellannahmen im Detail beschrieben. Dennoch sollen in den folgenden Abschnitten einige Inhalte dieser Publikation zitiert und über die ursprüngliche Beschreibung hinaus beschrieben werden, da die aus den Modellannahmen – insbesondere derer des Bodenmoduls – und deren Zusammenspiel resultierenden Effekte ein zentraler Aspekt der vorliegenden Dissertation sind. Weiterhin weicht die Aufteilung des Einzugsgebietes der Nahe von den in der Publikation beschriebenen Aufteilungsmöglichkeiten ab. Die im Folgenden beschriebenen Inhalte betreffen daher die Aufteilung des Einzugsgebietes in Elemente und Kompartimente, das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten von LARSIM, das Bodenmodul selbst mit seinen Modellannahmen sowie die Gebietsspeicher.

4.1.1 Unterteilung des Einzugsgebietes zur Simulation

Zur Simulation wird ein Einzugsgebiet in einzelne Elemente aufgeteilt und diese werden wiederum in einzelne Kompartimente aufgeteilt. Für jedes dieser Kompartimente werden die von LARSIM berücksichtigten Komponenten des Wasserhaushalts individuell simuliert; das Flood Routing – also der Weitertransport des Wassers im Gerinne – wird für jedes Element simuliert. Im Folgenden wird die Strategie dieser Unterteilung am Beispiel des Einzugsgebietes Kronweiler beschrieben und die Abweichungen zur üblichen Unterteilung werden erwähnt.

In Abbildung 4.1 ist ein Orthofoto des Einzugsgebietes Kronweiler dargestellt. Das Einzugsgebiet Kronweiler ist mit einer Fläche von 64,6 km^2 eines der kleineren Einzugsgebiete der Nahe und zeichnet sich durch ein hohes Maß an Inhomogenität hinsichtlich Landnutzung, Topographie und dominanter Abflussprozesse aus. Der Nordwesten gehört zu den Landschaftsräumen Hoch- und Idarwald der Großlandschaft Hunsrück; der restliche Teil ist dem Oberen Nahebergland als Teil des Saar-Nahe-Berglandes zuzuordnen. In der Abbildung ist auch der große Höhenunterschied mit bis zu 722 m ü. NN im Norden und 295 m ü. NN am südöstlichen Ende zu sehen.

Wie im einleitenden Abschnitt erläutert, wird dieses Einzugsgebiet zur Simulation zunächst anhand der Teileinzugsgebietsgrenzen in einzelne Elemente aufgeteilt, wobei diese Teileinzugsgebietsgrenzen dem Gewässerkundlichen Flächenverzeichnis entstammen (siehe LUWG (2005), Blatt 06). Für das Einzugsgebiet Kronweiler ergeben sich insgesamt 44 Elemente, die in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt werden. Bei der Aufteilung in Elemente werden die Teileinzugsgebietsgrenzen jedoch nicht in jedem Fall vollständig übernommen. Bei zu großen Teileinzugsgebieten wird das Gebiet in einzelne Abschnitte aufgeteilt. Dies ist zum Beispiel der Fall bei den Elementen 2475 und 2476, die aus dem in Abbildung 4.1 im nordwestlichen Teil mit a) markiertem Teileinzugsgebiet resultieren. Ebenso kann der umgekehrte Fall eintreten, in dem ein einzelnes LARSIM-Element aus mehreren verhältnismäßig kleinen Teileinzugsgebieten resultiert. Ein Beispiel hierfür wäre das Element 2480, das aus mehreren kleinen Flächen resultiert, die in Abbildung 4.1 im Norden mit b) markiert sind. Ein anschauliches Beispiel für die Entstehung der Teileinzugsgebiete bieten die Elemente 2498 und 2502, die aus den in Abbildung 4.1 mit c) und d) markierten Teileinzugsgebieten resultieren. Zwischen den beiden Gebieten liegt eine Wasserscheide, die sich an den Isohypsen erkennen lässt. Das Element 2498 entwässert demnach in Richtung Südsüdwest; das Element 2502 nach Ostsüdost.

Neben dieser Form der Aufteilung in hydrologische Teilgebiete existiert auch noch die Form der Aufteilung in Rasterzellen, die aber im Modell für das Einzugsgebiet der Nahe nicht genutzt wird.

Weiterhin stellen die Quellgebiete eine besondere Form der Elemente dar. Dies sind Elemente ohne Vorgänger, etwa die Elemente 2475, 2477, 2480, 2481 etc. In diesen Elementen wird kein Flood Routing simuliert, da kein Gerinne existiert. Es werden lediglich die Komponenten des Wasserhaushalts simuliert; der im Ele-

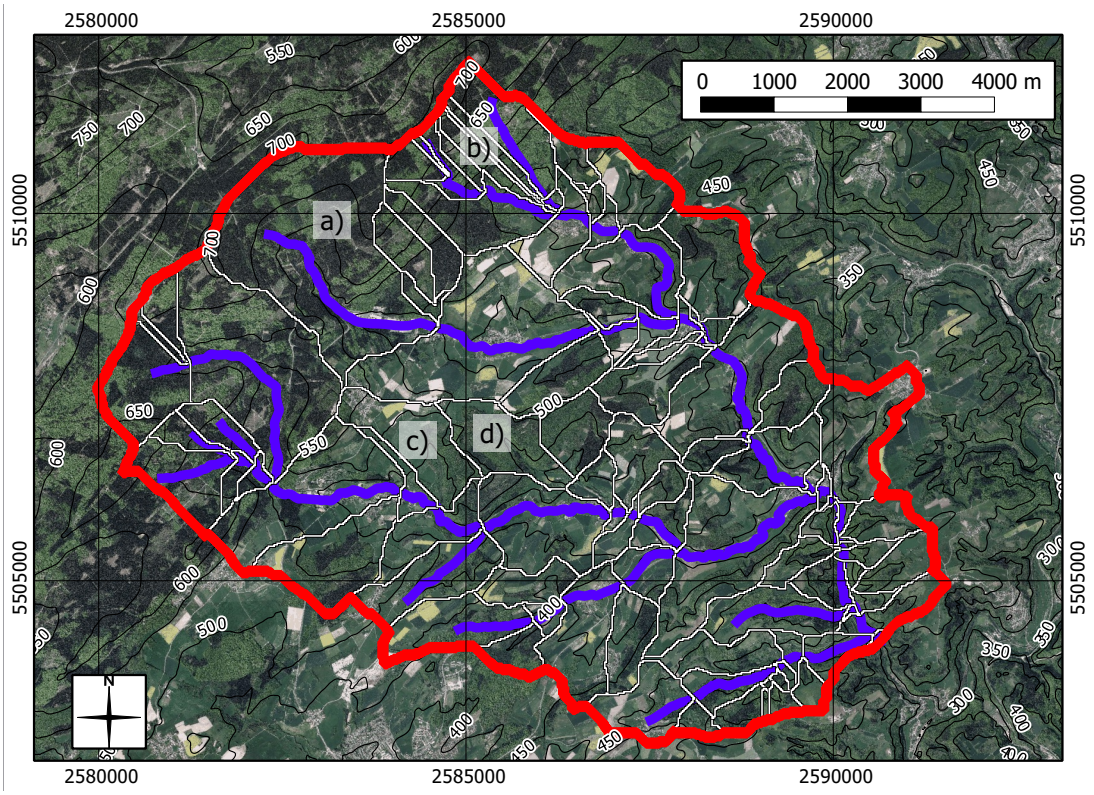

Abb. 4.1. Orthofoto des Einzugsgebietes Kronweiler im Maßstab 1:100.000, in Rot: Grenze des Einzugsgebietes, in Blau: Gewässernetz, in Schwarz-Weiß: Teileinzugsgebiete (Eigene Darstellung, Gauss-Krüger-Koordinatensystem Streifen 2, Quellen: Orthophoto: LVermGeo, Einzugs-, Teileinzugsgebietsgrenzen und Gewässer: LUWG, Höhenmodell: Universität Trier)

ment gebildete Abfluss ist dann für das flussabwärts gelegene nächste Element der Zufluss.

Eine weitere Besonderheit stellen sogenannte Nullelemente dar, die immer dann verwendet werden, wenn mehr als zwei Teilarme an einer Stelle zusammenfließen, da in LARSIM lediglich zwei Elemente als Vorgänger eines Elements möglich sind. Diese Nullelemente bilden dann virtuelle Elemente ohne Fläche und ohne Wasserhaushalt, die lediglich aus methodischen Gründen im Flood Routing verwendet werden.

Letztlich ist bezüglich der Elemente noch erwähnenswert, dass für die Simulation des Wellenablaufs für jedes Element ein einheitliches Profil des Gerinnes angenommen wird, worauf in Unterkapitel 4.1.2 näher eingegangen wird.

Ursprünglich erfolgte die Aufteilung der Elemente in Kompartimente lediglich anhand der Landnutzung. Daraus resultierend gab es höchstens ein Kompartiment jeder Langnutzungsklasse in jedem Element. Mit der Einführung der Option *ERW. BODENPARAMETER* „ist es möglich, für jedes Teilgebiet eine unterschiedliche und prinzipiell beliebige Anzahl von Unterteilgebieten zu vereinbaren und einzulesen“ (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „ERW. BODENPARAMETER“).

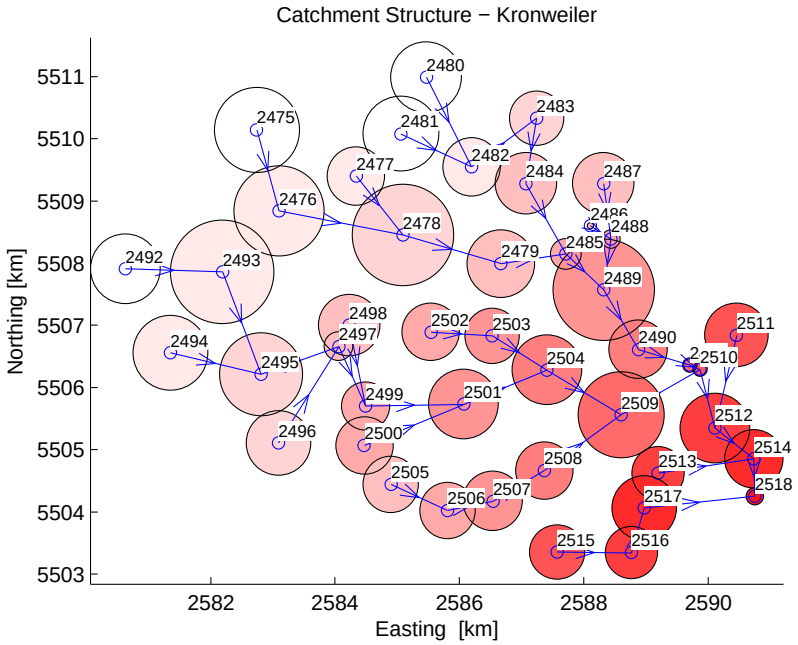

Abb. 4.2. Aufteilung des Einzugsgebietes Kronweiler in 44 Elemente. Jeder Kreis symbolisiert ein Element. Die Fläche der Kreise ist proportional zur Fläche der Elemente (Faktor 0,75). (Eigene Darstellung)

Bei der Aufstellung des Modells für die Landesfläche von Rheinland-Pfalz wurde diese Option genutzt (siehe Elpers u. a. (2008), Kapitel 4.4) und so ergeben sich die Kompartimente durch den Verschnitt der Landnutzungskarte mit der Bodenhydrologischen Karte und weiteren Bodendaten. Als Beispiel soll im Folgenden das Element 2475 dienen, das den nördlichen Bereich des in Abbildung 4.1 mit a) hervorgehobenen Teileinzugsgebietes repräsentiert. Abbildung 4.3 zeigt dazu die Bodenhydrologische Karte mit den Grenzen der Teileinzugsgebiete für das Einzugsgebiet Kronweiler; Abbildung 4.4 die Landnutzungskarte mit den Grenzen der Teileinzugsgebiete. Zu sehen ist, dass die Fläche, die durch das Element 2475 repräsentiert wird, unterschiedliche Kombinationen von Landnutzung und Abflussprozessen aufweist. Werden weiterhin noch die Bodeninformationen hinzugefügt, so ergeben sich die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Kompartimente.

Für das gesamte Einzugsgebiet Kronweiler schwankt die Anzahl der Kompartimente je Element zwischen 5 und 32; insgesamt sind es 855 Kompartimente.

Die hier angegebenen Spalten weisen lediglich die Informationen aus, die aus Sicht der Problemstellung relevant sind. In der Systemdatei tape12, in der die Elemente sowie die Kompartimente mit den jeweiligen Eigenschaften gelistet werden, sind zu den Kompartimenten noch weitere Spalten aufgeführt, die auch noch Angaben zu anderen Bodeneigenschaften enthalten, etwa zum kapillaren Aufstieg oder zur Kf-Einstufung etc.

In der Tabelle wird ersichtlich, dass die einzelnen Kompartimente vergleichsweise kleine Flächen aufweisen. Jedes dieser Kompartimente bzw. jede der repräsentierten Flächen hat eine einheitliche Landnutzung, einen dominanten Ab-

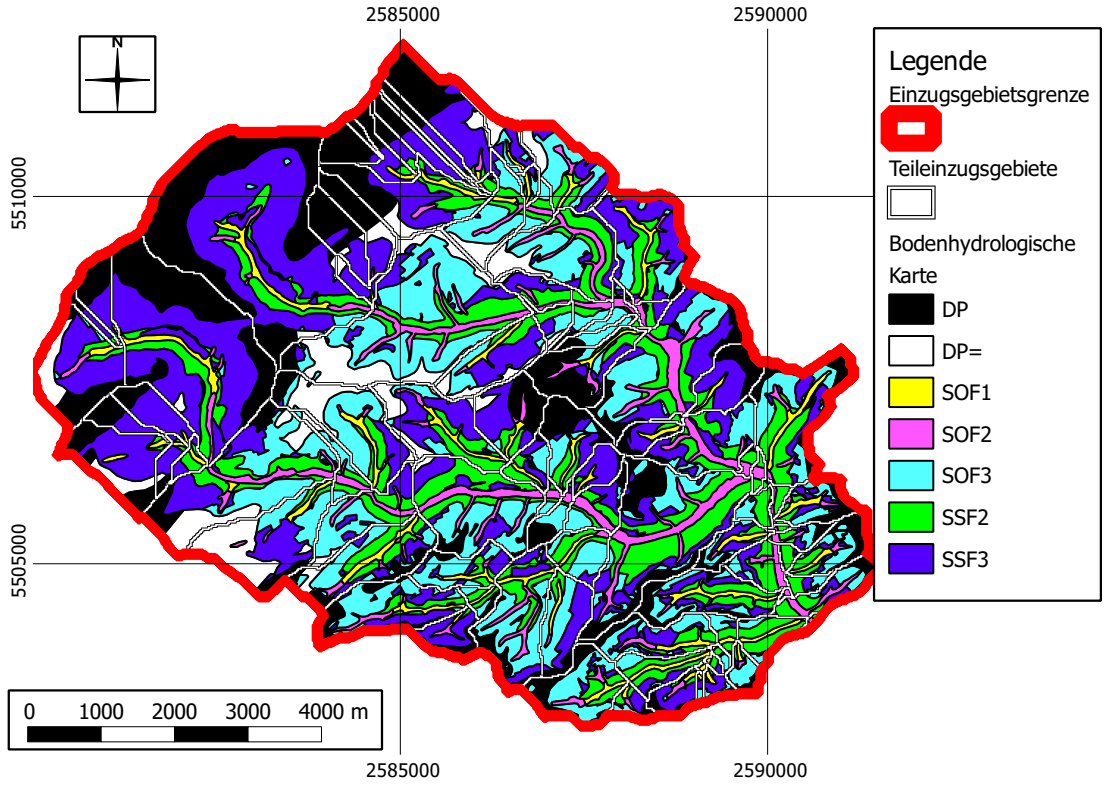

Abb. 4.3. Bodenhydrologische Karte des Einzugsgebietes Kronweiler mit Grenzen der Teileinzugsgebiete im Maßstab 1:100.000 (Eigene Darstellung, Quellen: Bodenhydrologische Karte: Soilution GbR, Teil- und Einzugsgebietsgrenzen: LUWG)

Kompartiment	Landnutzung	Abflussprozess	Fläche [km^2]	Nutzbare Feldkapazität	Luftkapazität
1	Laubwald	DP	0.125	122 mm	67 mm
2	Nadelwald	DP	0.914	122 mm	67 mm
3	Mischwald	DP	0.326	122 mm	67 mm
4	Nadelwald	SOF1	0.016	106 mm	56 mm
5	Mischwald	SOF1	0.028	111 mm	60 mm
6	Nadelwald	SOF2	0.026	105 mm	56 mm
7	Mischwald	SOF2	0.015	122 mm	67 mm
8	Gruenland, inten.	SOF3	0.015	102 mm	53 mm
9	Nadelwald	SSF2	0.071	122 mm	67 mm
10	Mischwald	SSF2	0.034	122 mm	67 mm
11	Laubwald	SSF3	0.166	122 mm	67 mm
12	Nadelwald	SSF3	0.350	119 mm	65 mm
13	Mischwald	SSF3	0.528	120 mm	66 mm

Tabelle 4.1. Kompartimente des Elementes 2475 mit relevanten Eigenschaften

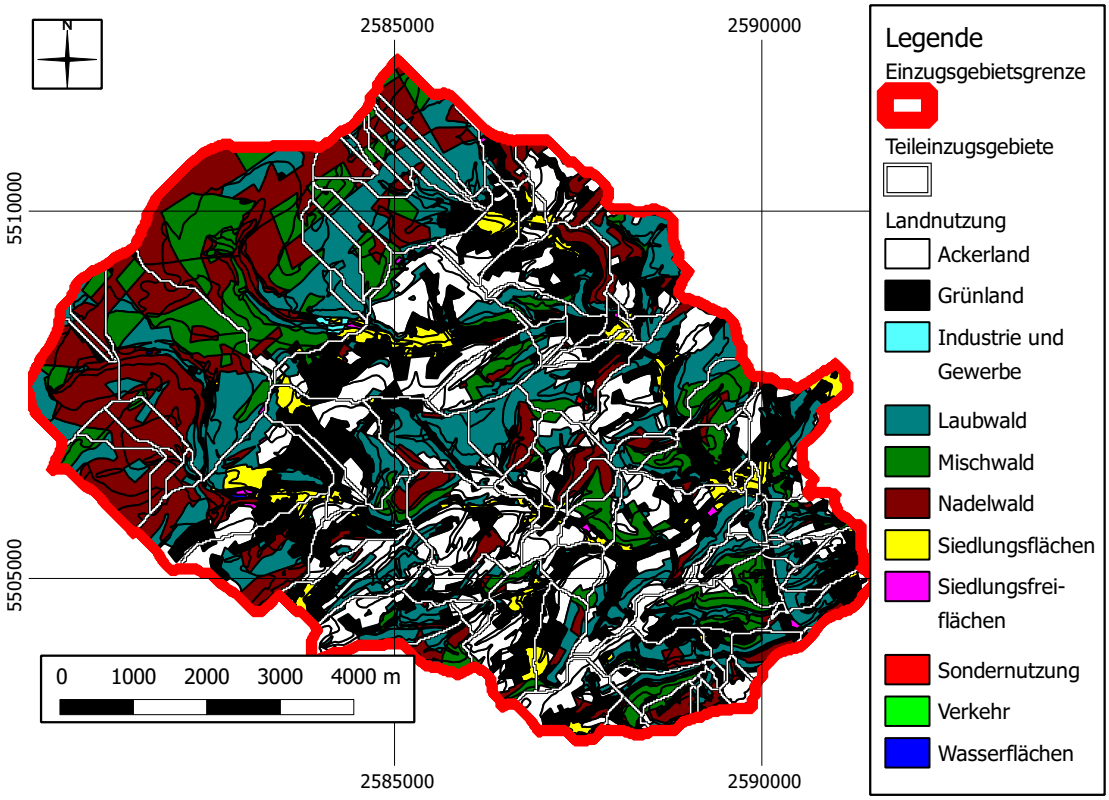

Abb. 4.4. Landnutzungskarte des Einzugsgebietes Kronweiler mit Grenzen der Teileinzugsgebiete im Maßstab 1:100.000 (Eigene Darstellung, Quellen: Landnutzung, Teil- und Einzugsgebietsgrenzen: LUWG)

flussprozess, eine nutzbare Feldkapazität und eine Luftkapazität. Aus Sicht der im Modell berücksichtigten Prozesse kann ein Kompartiment also auch als Hydrotop aufgefasst werden.

Weiterhin gibt es noch einen sehr relevanten Punkt: Die räumliche Lage der Kompartimente innerhalb des Elements ist nicht bekannt! Daraus ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen, etwa die Entfernung des Kompartiments zum Gerinne betreffend oder auch das Problem der Wiederversickerung auf unterhalb gelegenen Kompartimenten. Diese Fragestellungen werden später in Kapitel 6.3 zu berücksichtigen und in Kapitel 7 zu diskutieren sein.

Nach dem Einlesen der Systemdateien werden in LARSIM zu den gelisteten Kompartimenten noch zwei weitere hinzugefügt (falls diese noch nicht vorhanden sind): eine mit der Landnutzung *Wasser* und eine mit der Landnutzung *versiegelt*. Überschreitet die Breite des Gerinnes in einem Element die Breite von 5 m, so wird die konkrete Fläche anhand der Breite und der Fließlänge ausgerechnet und die Flächenanteile im Element werden korrigiert. Zum neuen Kompartiment *versiegelt* werden Flächenanteile der Landnutzungsklassen *Siedlungsflächen* (75 % versiegelt), *Siedlungsfreiflächen* (25 %), *Industrie* (80 %) und *Verkehr* (75 %) hinzugefügt. Auf versiegelte Flächen treffender Niederschlag wird als Direktabfluss behandelt; der Rest des Kompartiments wird mit den angegebenen Bodenparame-

tern simuliert bzw. erhält zur Simulation der Interzeption und der Verdunstung ähnliche Parameter wie *Feuchtgebiete*.

4.1.2 Zusammenspiel der Komponenten

„LARSIM ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des mesoskaligen landgebundenen Wasserkreislaufes bei Verwendung von flächendeckend vorhandenen bzw. ableitbaren Systemdaten.“ Mit diesen Worten wird in der Zusammenfassung in Bremicker (2000) das Modell knapp und doch treffend beschrieben. Bei der Auswahl der letztlich verwendeten Modellannahmen, mit denen die wesentlichen Komponenten des Wasserhaushaltes – Interzeption, Verdunstung von Pflanzen, Schneefall, -speicherung und -schmelze, Transport und Speicherung von Wasser im Boden, Verdunstung aus dem Boden, Abfluss – simuliert werden, bediente man sich bei der Entwicklung von LARSIM im Rahmen des Forschungsvorhabens BALTEX eines recht pragmatischen Ansatzes: „Grundkonzept bei der Entwicklung von LARSIM war es, relativ einfache und auf der Basis flächendeckend verfügbarer Systemdaten anwendbare, physikalisch basierte Konzeptmodelle für die mesoskalige Beschreibung des landgebundenen Wassertransportes miteinander zu kombinieren.“ (siehe Bremicker (2000), Seite 4) Die einzelnen Teilmodelle für die jeweiligen Komponenten des Wasserhaushaltes, die Kombination derer und ihre Wechselwirkungen werden im Folgenden beschrieben.

In Abbildung 4.5 wird diese soeben genannte Kombination der Teilmodelle schematisch dargestellt. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich durchgehend auf diese Abbildung.

Als Eingangsdaten dienen dem Modell bei den gewählten Optionen die Größen Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, Luftdruck und Windgeschwindigkeit, wobei nicht alle Größen in allen Teilmodellen Verwendung finden. Die ersten vier Größen liegen in stündlicher Auflösung fertig interpoliert mit einer Rastergröße von $1 \times 1\,km^2$ vor; die beiden letzten Größen werden in LARSIM intern interpoliert (siehe Unterkapitel 4.2).

Die Simulation erfolgt im Nahe-Gebiet in stündlicher Auflösung. Für jede Stunde des Simulationszeitraums werden für alle Kompartimente zunächst die im oberen Teil von Abbildung 4.5 gezeigten Prozesse simuliert, dann für alle Elemente die Abflusskonzentration und der Wellenablauf im Gerinne wie im unteren Teil dargestellt.

In einem einzelnen Kompartiment beginnt die Simulation mit dem Ausführen des Teilmodells für die Interzeption. Für jede Landnutzungsklasse gibt es für jeden Monat des Jahres eine bestimmte Kapazität des Interzeptionsspeichers. Ist die Kapazität dieses Speichers noch nicht erreicht, so wird er durch den Niederschlag aufgefüllt. Der Niederschlag wird um die Menge, die dem Interzeptionsspeicher zugeführt wurde, verringert. Dieser reduzierte Wert stellt dann für die nachfolgenden Komponenten dieses Kompartiments das Wasserdargebot dar.

Im nächsten Schritt werden der Aufbau und das Abschmelzen einer Schneedecke simuliert. Dazu werden grundsätzlich die in Knauf (1980) beschriebenen Annahmen verwendet. Es wird zunächst anhand der Lufttemperatur entschieden, ob der

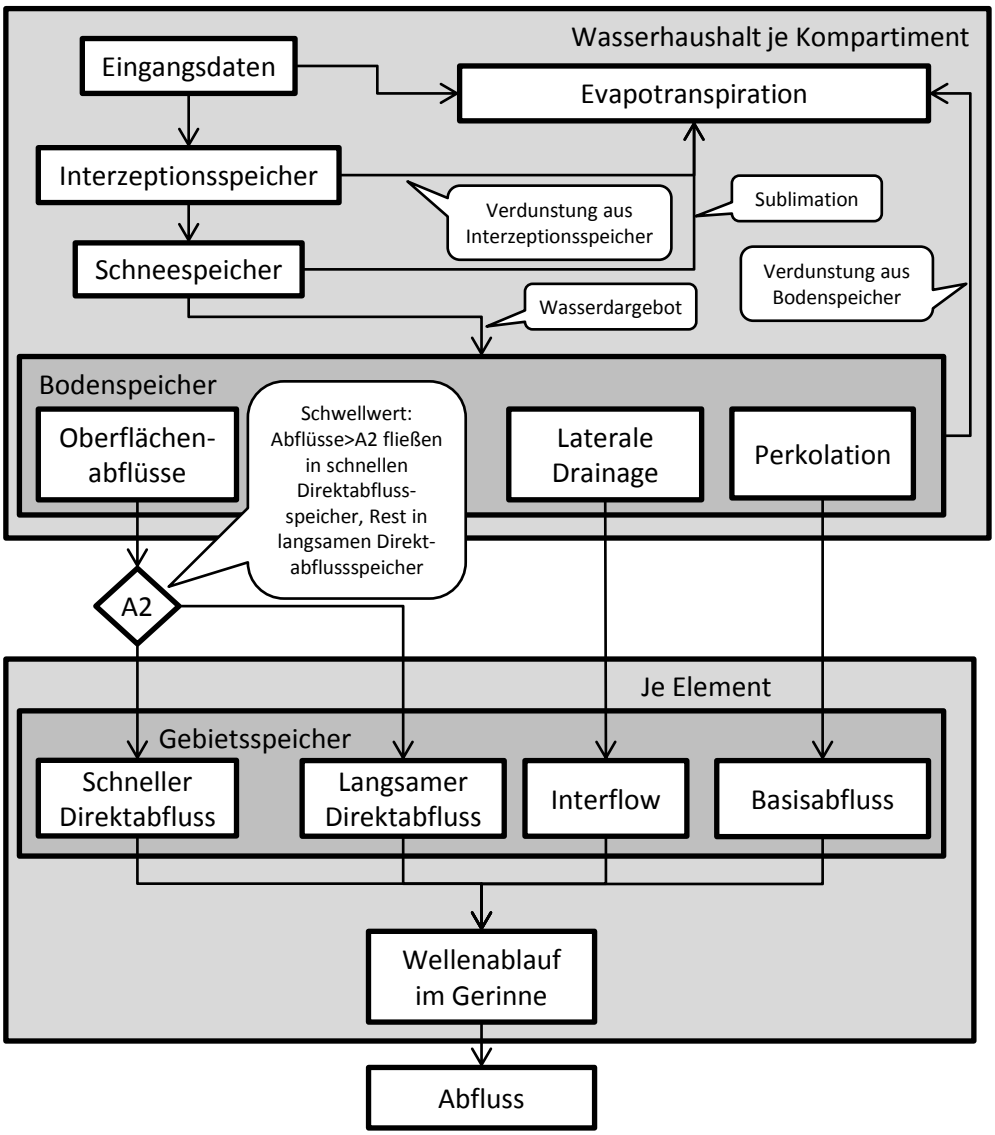

Abb. 4.5. Schematische Darstellung der Komponenten des Wasserhaushaltsmodells LARSIM und deren Zusammenwirken

Niederschlag bzw. das aus dem Interzeptionsmodul resultierende Wasserdargebot in flüssiger Form als Regen oder in fester Form als Schnee zu betrachten ist (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „Grenztemperatur Schnee“). Für alle Teileinzugsgebiete der Nahe bis auf das Gebiet Gensingen wurde hier der Grenzwert 1 °C kalibriert. Im weiteren Verlauf wird für eine neue Schneedecke oder eine bereits bestehende Schneedecke berechnet, wie groß das Energiedefizit dieser Schneedecke ist. Die verschiedenen Quellen für Energieeinträge werden berechnet und summiert. Aus der resultierenden Bilanz wird zunächst der Zustand der Schneedecke abgeleitet, dann die Umwandlung der Schneedecke simuliert, anschließend bestimmt, ob die kritische Lagerungsdichte erreicht wurde, und letztendlich das Abschmel-

zen der Schneedecke simuliert (siehe Bertle (1966)). Als Eingangsgrößen dienen dabei die Faktoren Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit. Bei der Simulation des Schnees werden einige landnutzungsspezifische Eigenschaften berücksichtigt, etwa Abschattungseffekte im Wald, die den Wind oder die Globalstrahlung betreffen. Andere Aspekte, die im Einzugsgebiet für eine heterogene Ausprägung der Schneedecke sorgen, etwa die Exposition des Kompartiments oder die konkrete Höhe der repräsentierten Fläche, werden bei den gewählten Optionen nicht berücksichtigt. Am Ende der Schneesimulation resultiert für das Kompartiment ein neues Wasserdargebot, das sich aus der Ausgabe des Interzeptionsmoduls abzüglich des Neuschnees zuzüglich der Schneeschmelze berechnet.

Dieses resultierende Wasserdargebot gelangt als Eingangsgröße in das nun folgende Bodenmodul, in dem das Wasser gespeichert und in Abflusskomponenten aufgeteilt wird. Die Modellannahmen beruhen dabei grundsätzlich auf dem Xinanjiang-Ansatz (siehe z. B. Zhao (1992)) in der modifizierten Form von Todini (1996). Aufgrund seiner zentralen Rolle hinsichtlich der Aufgabenstellung wird es im folgenden Unterkapitel 4.1.3 ausführlich beschrieben.

Als letzter Prozess, der je Kompartiment simuliert wird, erfolgt die Simulation der Evapotranspiration. Diese erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird eine mögliche Verdunstung berechnet, dann erfolgt die tatsächliche Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher und / oder aus dem Bodenspeicher. Bei den gewählten Optionen wird die Berechnung der möglichen Verdunstung aus Laufzeitgründen lediglich einmalig für einen ganzen Tag ausgeführt. Im ersten Simulationsschritt jedes Tages werden die arithmetischen Mittel aus den meteorologischen Eingangsgrößen Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Luftdruck des Tages berechnet. Aus diesen Werten wird für den Tag eine mögliche Verdunstung ermittelt, indem das Sättigungsdefizit ermittelt wird und verschiedene Energieeinträge berechnet werden (siehe DVWK-Merkblatt 238/1996 (1996)). Auch hier ist es so, dass landnutzungsspezifische Effekte betrachtet werden, wie Bestandshöhen, Albedo, aerodynamische Widerstände etc. Ein Vierundzwanzigstel dieser möglichen Verdunstung wird dann in jedem Zeitschritt verwendet, um die tatsächliche Verdunstung zu bestimmen. Dazu wird zunächst der Einfluss einer möglicherweise vorhandenen Schneedecke betrachtet und landnutzungsspezifisch eine Verringerung der möglichen Verdunstung ermittelt. Diese wird dann zunächst aus dem Interzeptionsspeicher verdunstet. Erreicht die Füllung des Interzeptionsspeichers nicht die mögliche Verdunstung, so wird auch Wasser aus dem Bodenspeicher in Abhängigkeit seiner Füllung zur Verdunstung entnommen.

Mit der Verdunstung wird die Simulation der Prozesse je Kompartiment abgeschlossen. Es folgt die Simulation der Abflusskonzentration je Element. Dazu gibt es in jedem Element vier Einzellinearspeicher, in denen die im Bodenmodul generierten Komponenten aller Kompartimente des Elements münden. Auch dieses Teilmodell spielt in LARSIM eine zentrale Rolle im Sinne der Aufgabenstellung und wird deshalb im Unterkapitel 4.1.4 ausführlich beschrieben.

Als letzte Komponente wird im Nahe-Gebiet der Wellenablauf im Gerinne gemäß dem Verfahren nach Williams (1969) simuliert. Dazu liegt im

tape12 für jedes Element die Beschreibung der Gerinnegeometrie als Tripel-Trapez-Profil vor. Der Ablauf wird in einer Kaskade von Einzellinearspeichern simuliert, deren Speicherkoeffizienten aus den Profilen berechnet werden. Für einzelne Gewässerabschnitte liegen auch Volumen-Abflussbeziehungen (dV/dQ-Beziehungen) vor, die mithilfe hydrodynamischer Modelle bestimmt wurden.

Auf die zahlreichen anderen Möglichkeiten, die LARSIM bietet, wurde sowohl bei der Beschreibung als auch bei der später in Unterkapitel 4.4 beschriebenen Implementierung verzichtet, da sie in den ausgewählten Teileinzugsgebieten der Nahe nicht verwendet werden.

4.1.3 Das Bodenmodul

Das Bodenmodul ist die zentrale Stelle im Modell, in dem Wasser gespeichert, zur Verdunstung entnommen und in Abflusskomponenten aufgeteilt wird. Als Eingangsgröße des Bodenmoduls dient das Wasserdargebot, also der Niederschlag im Zeitschritt abzüglich der Interzeptionsverluste abzüglich Niederschlag in Form von Schnee zuzüglich der Schneeschmelze. Dem Bodenmodul wird in Abhängigkeit der Speicherfüllung Wasser entnommen: vom Evapotranspirationsmodul, in Form von lateraler Drainage an den entsprechenden Gebietsspeicher und in Form von Perkolation an den entsprechenden Gebietsspeicher. In Abhängigkeit der Speicherfüllung *und* der Intensität des Wasserdargebotes wird Oberflächenabfluss gebildet. Insbesondere die drei zuletzt genannten Wege – Oberflächenabflüsse, laterale Drainage und Perkolation – sollen im Folgenden im Detail betrachtet werden. Die dazu aufgeführten Formeln entstammen Ludwig u. Bremicker (2006), Kapitel 3.3, Seiten 19-24 und werden hier teilweise verändert dargestellt, um die Optionen, die im Nahe-Gebiet verwendet werden, direkt in der Formel zu berücksichtigen.

Oberflächenabflüsse

Die Oberflächenabflüsse bilden die hinsichtlich der Modellannahme komplexeste Komponente des Bodenmoduls. Im Modell wird dabei nicht explizit zwischen Infiltrationsüberschuss und Sättigungsflächenabfluss unterschieden. Der Oberflächenabfluss Q_D berechnet sich durch (siehe Ludwig u. Bremicker (2006), Gleichung 3.17):

$$QS_D = P - (W_m - W_0), \tag{4.1}$$

falls $\left(\left(1 - \frac{W_0}{W_m}\right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(1+b)W_m}\right) \leq 0$ und $P + W_0 > W_m$, mit

QS_D	$[mm]$	Oberflächenabfluss[1],
P	$[mm]$	Wasserdargebot,[2]
W_0	$[mm]$	Wassergehalt des Bodenspeichers zu Beginn des Berechnungszeitschrittes,
W_m	$[mm]$	Kapazität des Bodenspeichers und
b	$[-]$	Parameter.

Einfach ausgedrückt beschreibt dieser Fall den überlaufenden Bodenspeicher: Alles, was nicht mehr in den Bodenspeicher hinein passt, wird zu Oberflächenabfluss.

Der zweite Fall ist ein wenig komplexer (siehe Ludwig u. Bremicker (2006), Gleichung 3.18):

$$QS_D = P - (W_m - W_0) + \left(\left(1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right)^{b+1}, \tag{4.2}$$

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

Eine einfache Interpretation der Gleichung wäre: In Abhängigkeit des Niederschlags, des verbleibenden Volumens, der Speicherkapazität und des Parameters b wird ein gewisser Anteil des Niederschlages als Oberflächenabfluss berechnet. Dieser Zusammenhang und der Einfluss des Parameters b sollte ein wenig näher erläutert werden. Dazu wird im gezeigten Beispiel von einer typischen Größe von W_m ausgegangen, im Nahe-Gebiet sind dies ca. 180 mm (abgesehen von einigen Ausreißern liegen die niedrigsten Werte um 50 mm, die höchsten knapp über 400 mm, siehe Abbildung 4.6). Abbildung 4.7 zeigt den resultierenden Oberflächenabfluss für unterschiedliche Werte von P, W_0 und b.

Der Teil a) zeigt die resultierenden Abflüsse für $b = 0$. Zu sehen ist, dass lediglich im ersten Fall gemäß Gleichung 4.1 Abfluss generiert wird (schiefe Ebene im hinteren Teil der Abbildung); der Teil, in dem Abfluss gemäß Gleichung 4.2 generiert wird, ist 0. In Teil b) ist $b = 0,2$ und damit wird auch Oberflächenabfluss generiert, wenn das Wasserdargebot die verbleibende Kapazität nicht überschreitet. Ist das Wasserdargebot 0, also entlang der vorne rechts gelegenen Kante, so ist auch der Oberflächenabfluss 0. Ist der Speicher leer, also entlang der vorne links gelegenen Kante, so wird ein gewisser Anteil des Wasserdargebotes zu Oberflächenabfluss. Je größer die Intensität, desto größer auch der Oberflächenabfluss. Im hinteren Teil ist wieder die schiefe Ebene zu sehen, die den ersten Fall darstellt. Wird wie in Teil c) der Wert von b weiter erhöht, so konvergiert der Modellansatz gegen den in

[1] Da diese Komponente noch keinen Flächenbezug hat, müsste die korrekte Bezeichnung Oberflächenabfluss*spende* lauten. Um Mißverständnissen vorzubeugen, wird hier und im Folgenden der in den unterschiedlichen LARSIM-Dokumentationen übliche Begriff *Abfluss* verwendet, auch wenn es sich nicht um ein Volumen handelt. Die Einheit unterscheidet in allen Fällen eindeutig, worum es sich konkret handelt.

[2] P wird im Original mit „Precipitation“ gekennzeichnet, wobei aber – wie im vorhergehenden Text auch beschrieben – das Wasserdargebot gemeint ist.

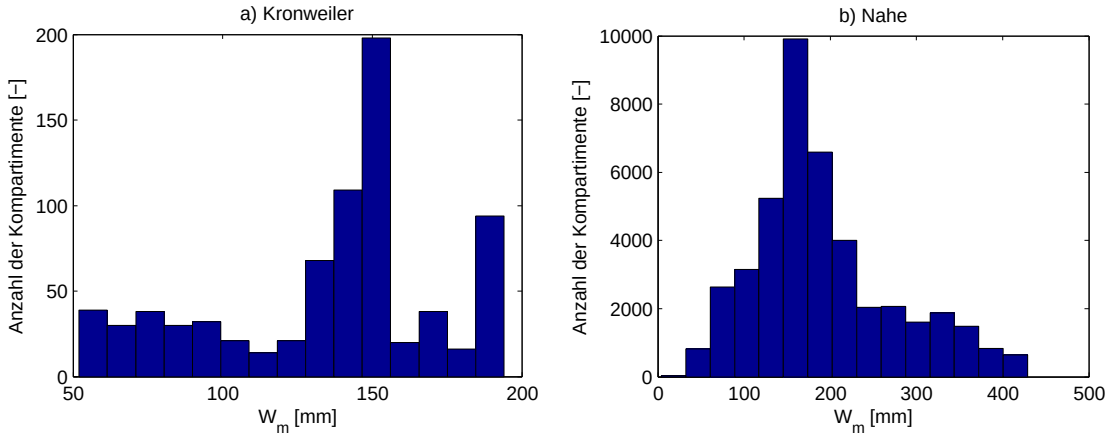

Abb. 4.6. Häufigkeitsverteilungen der Bodenspeicherkapazitäten in Millimetern des Einzugsgebietes Kronweiler (a) und der gesamten Nahe (b)

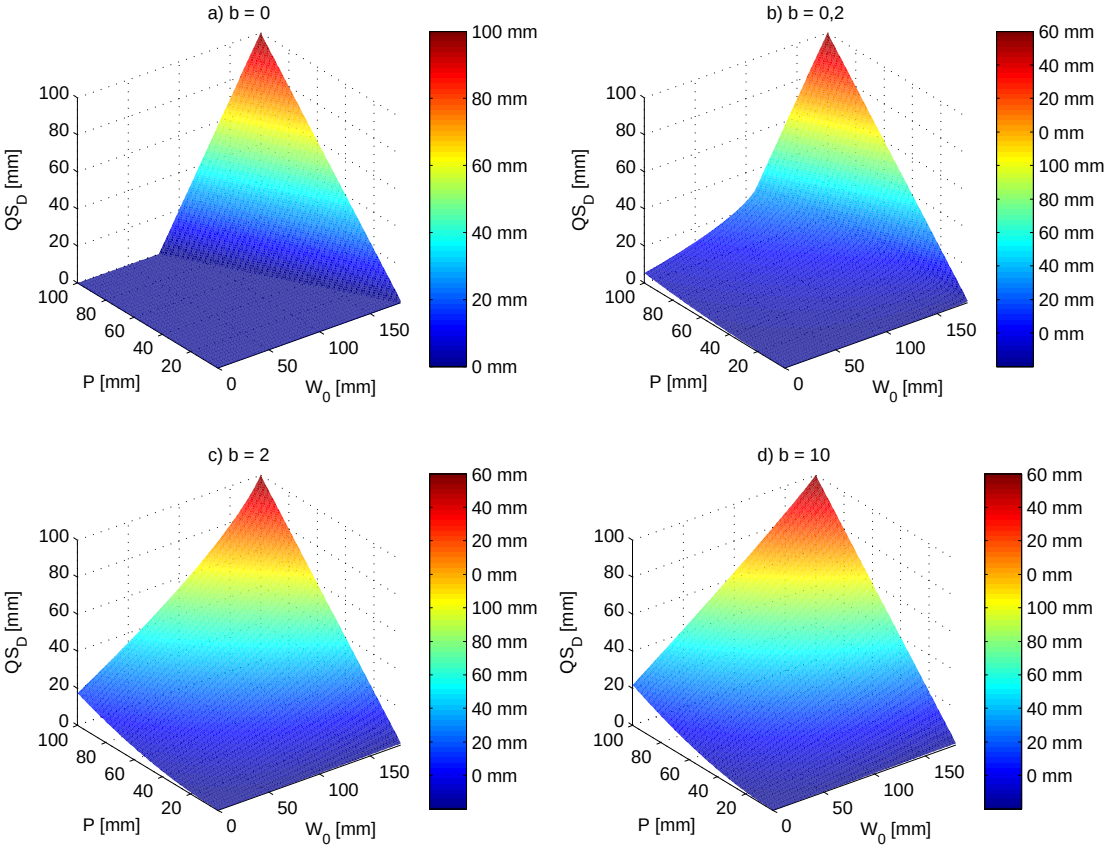

Abb. 4.7. Aus unterschiedlichen Werten von b resultierende Oberflächenabflüsse QS_D für $W_m = 180\,mm$

d) gezeigten Zusammenhang. Hier ist nun der Anteil des Wasserdargebotes, der zu Oberflächenabfluss wird, für niedrige Speicherfüllungen größer und wächst dann nahezu linear mit steigendem Wassergehalt.

Werden andere Speicherkapazitäten W_m verwendet, so verschiebt sich bei kleineren Kapazitäten der Bereich, in dem Gleichung 4.1 gilt, weiter auf den Standpunkt des Betrachters zu, der Speicher läuft schneller über. Werden die Speicherkapazitäten vergrößert, so tritt dieser Fall erst bei höheren Intensitäten ein.

Von Ludwig u. Bremicker (2006) wird auch der Komplex Bodenfeuchte-Sättigungsflächenfunktion im Zusammenhang mit dem Oberflächenabfluss beschrieben. Die Idee dabei ist, dass der Anteil der wassergesättigten Flächen im Einzugsgebiet eine Funktion der relativen Speicherfüllung ist, deren konkreter Verlauf durch b beeinflusst werden kann (progressiv falls $b < 1$, linear falls $b = 1$ und degressiv falls $b > 1$). Folgerichtig wird in der dort gezeigten Abbildung 3.4 auch ein überproportionaler Anteil von gesättigten Flächen bei geringen relativen Speicherfüllungen und Werten von $b > 1$ dargestellt. Allerdings findet diese Bodenfeuchte-Sättigungsflächenfunktion in der eigentlichen Modellannahme zum Oberflächenabfluss keine Verwendung und wird auch in der Fortran-Implementierung nirgendwo berechnet. Es ergibt sich lediglich der bereits beschriebene Übergang von keinem Oberflächenabfluss gemäß Gleichung 4.2 für $b = 0$, einem progressiven Zusammenhang zwischen Intensität und Oberflächenabfluss für größere Werte, der dann zu einem nahezu linearen Zusammenhang konvergiert. Ein degressiver Verlauf, also ein überproportionaler Anteil bei kleinen relativen Speicherfüllungen, ist nicht möglich.

Rein rechnerisch gibt es noch einen dritten Fall, wenn keine der beiden Bedingungen erfüllt ist. Dieser tritt ein, wenn $P = 0$ und $W_0 = W_m$ gilt. Auftreten kann dieser Fall aber nur, wenn im vorherigen Schritt keine Verdunstung stattgefunden hat und sowohl laterale Drainage als auch Perkolation abgestellt sind ($r_dmin = r_dmax = \beta = 0$).

Für den späteren Verlauf relevant sind zusammenfassend einige Feststellungen:

- Ist der Wert von $b = 0$, so wird dennoch Oberflächenabfluss generiert. Dies tritt genau dann ein, wenn der Bodenspeicher überläuft.
- Ist der Wert von b beliebig groß, so besteht dennoch der nahezu lineare Zusammenhang zwischen relativer Speicherfüllung, Niederschlagsintensität und resultierendem Oberflächenabfluss.
- Hoher Oberflächenabfluss für kleine Wasserdargebote bzw. relative Speicherfüllungen, der dann degressiv weiter wächst, ist nicht möglich.

Laterale Drainage

Die Modellannahmen für die laterale Drainage sind weniger komplex. Auch hier wird zwischen zwei Fällen unterschieden: Wird ein konkreter Schwellwert im Boden

unterschritten oder überschritten.[3] Im ersten Fall, der Unterschreitung, ergibt sich die laterale Drainage durch (vgl. Ludwig u. Bremicker (2006), Gleichung 3.19):

$$QS_I = D_{min} \frac{W_0}{W_m} \Delta t, \tag{4.3}$$

falls $W_0 < W_Z$, ansonsten durch

$$QS_I = \left(D_{min} \frac{W_0}{W_m} + (D_{max} - D_{min}) \left(\frac{W_0 - W_Z}{W_m - W_Z} \right)^c \right) \Delta t, \tag{4.4}$$

mit

QS_I	$[mm]$	Laterale Drainage,
W_0	$[mm]$	Wassergehalt des Bodenspeichers zu Beginn des Berechnungszeitschrittes,
W_Z	$[mm]$	Schwellenwert,
W_m	$[mm]$	Kapazität des Bodenspeichers,
Δt	$[d]$	Berechnungszeitschrittlänge,
D_{min}	$[mm/h]$	Drainage beim Füllstand W_Z; zu kalibrierender Parameter,
D_{max}	$[mm/h]$	Drainage beim Füllstand W_m; zu kalibrierender Parameter,
c	$[-]$	Parameter, in LARSIM gilt $c = 1,5$.

Im ersten Fall wird lediglich die relative Speicherfüllung mit D_{min} multipliziert, im zweiten Fall zusätzlich der Teil, der über W_Z hinausgeht, mit $D_{max} - D_{min}$. Relevant ist außerdem, dass die Werte von D_{max} und D_{min} nicht direkt gewählt werden, sondern durch zwei dimensionslose Faktoren r_dmin und r_dmax skaliert werden:

$$D_{min} = 0,001008 \cdot r_dmin \; bzw. \; D_{max} = 0,1008 \cdot r_dmax \tag{4.5}$$

Genutzte Werte für diese Faktoren liegen im Nahe-Gebiet zwischen 0,1 und 0,4, wobei sich r_dmin und r_dmax in keinem der Teilgebiete bei der ursprünglichen Kalibrierung um mehr als den Faktor 2 voneinander unterscheiden (siehe Elpers u. a. (2008), Tabelle 5.4, Seite 26); nach der internen Kalibrieranleitung liegen die Werte zwischen 0 und 5.

Festzuhalten bleibt hier der daraus resultierende Unterschied zwischen D_{min} und D_{max} um den Faktor 50-200. Damit wird ein extrem stark nichtlinearer Zusammenhang zwischen relativer Speicherfüllung und simulierter lateraler Drainage erreicht.

Perkolation

Die einfachste Modellannahme wurde für die Perkolation getroffen: Ein fester Anteil des Wassergehaltes versickert in jedem Zeitschritt (vgl. Ludwig u. Bremicker (2006), Gleichung 3.20):

[3] Gegenüber Ludwig u. Bremicker (2006) wurde die Darstellung hier vereinfacht und der dritte Fall fällt weg, da bei Benutzung der Option „ERW. BODENPARAMETER“ $W_B = 0$ gilt.

$$QS_G = VDB \cdot \beta \cdot W_0 \cdot \Delta t,^{4} \tag{4.6}$$

mit

QS_G	$[mm]$	Perkolation,
VDB	[-]	Vertikaler Bodendurchlässigkeits-Beiwert,
W_0	$[mm]$	Wassergehalt des Bodenspeichers zu Beginn des Berechnungszeitschrittes,
Δt	$[d]$	Berechnungszeitschrittlänge und
β	$[1/d]$	Drainageindex tiefer Bodenspeicher.

Sonstiges

Abschließend verbleiben zum Thema Bodenmodul noch zwei erwähnenswerte Aspekte:

- In Ludwig u. Bremicker (2006) wird im Abschnitt zum Bodenmodul noch der Prozess *kapillarer Aufstieg* beschrieben. Da die kapillare Aufstiegsrate im Nahe-Gebiet auf null gesetzt ist, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet. Der von Ludwig u. Bremicker (2006) in Kapitel 3.3.2 beschriebene erweitere Ansatz unter Verwendung des Infiltrationsmoduls wird später im Kapitel 7.6 als ein alternativer Ansatz in einer modifizierten Form diskutiert.
- Relevant für die späteren Ausführungen ist noch der Aspekt, dass bei der lateralen Drainage der resultierende Abfluss eine Funktion der relativen Speicherfüllung W_0/W_m ist, bei der Perkolation ist der resultierende Abfluss aber eine Funktion der absoluten Speicherfüllung W_0. Dies hat unterschiedliche Effekte, die später im Unterkapitel 7.3.1 diskutiert werden.

4.1.4 Gebietsspeicher – Abflusskonzentration

Nachdem nun die Abflussbildung im Bodenmodul erläutert wurde, wird die folgende Abflusskonzentration im Element durch die Gebietsspeicher beschrieben. Wie im Unterkapitel 4.1.2 dargestellt, gibt es einen Bodenspeicher pro *Kompartiment*. Die Gebietsspeicher gibt es einmal für jede Abflusskomponente pro *Element*, also vier. Jeder Gebietsspeicher ist ein Einzellinearspeicher, der lediglich durch eine Speicherkonstante RK_{EL} charakterisiert ist. Der Abfluss aus einem solchen Einzellinearspeicher berechnet sich durch (siehe Ludwig u. Bremicker (2006), Gleichung 3.50):

$$Q_{EL} = \frac{1}{RK_{EL}} V_{EL}, \tag{4.7}$$

[4] Gegenüber Ludwig u. Bremicker (2006) wurde die Darstellung hier vereinfacht und der erste Fall fällt weg, da bei Benutzung der Option „ERW. BODENPARAMETER“ $W_B = 0$ gilt. Weiterhin wurde in der Formel die Verwendung des vertikalen Durchlässigkeits-Beiwertes integriert. Diese Multiplikation wird durch die im Nahe-Gebiet verwendete Option „PERKOLATION MIT VDB-WERTE“ aktiviert (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „PERKOLATION MIT VDB-WERTEN “). Für jedes Element liegt ein solcher Beiwert in der Systemdatei tape12 vor.

mit

Q_{EL}	$[m^3/s]$	Abfluss aus dem Einzellinearspeicher,
EL	[-]	Index:
		• D2 für schnellen Direktabfluss,
		• D für langsamen Direktabfluss,
		• I für Interflow,
		• B für Basisabfluss,
$RK_{EL}]$	$[s]$	Speicherkonstante und
V_{EL}	$[m^3]$	aktuelles Volumen des Einzellinearspeichers.

Um den Zufluss QZ_{EL} in jedem Zeitschritt zu berechnen, werden die Abflusskomponenten der einzelnen Kompartimente – hier handelt es sich um Abflusshöhen – mit den Flächen der Kompartimente multipliziert, die Ergebnisse davon addiert. Also beispielsweise bei stündlicher Betrachtungsweise für den Basisabfluss:

$$QZ_B = \sum_{i=1}^{n} QS_{B,i} \cdot A_i, \tag{4.8}$$

mit

QZ_B	$[m^3/s]$	Zufluss zum Basisabflusseinzellinearspeicher,
n	[-]	Anzahl der Kompartimente im Element,
$QS_{B,i}$	[mm/h]	Perkolation aus dem Kompartiment i und
A_i	$[km^2]$	Fläche des Kompartiments i.

Eine Ausnahme hiervon bilden die Oberflächenabflüsse: Aus dem Bodenmodul resultiert lediglich eine oberflächliche Komponente. Es gibt aber zwei Gebietsspeicher dazu: einen für den schnellen Oberflächenabfluss, einen für den langsamen Direktabfluss. Die Aufteilung der einen Komponente aus dem Bodenspeicher in diese beiden Speicher erfolgt bei Verwendung der Option „4 Q-KOMP MIT A2“ unter Verwendung des Schwellwertes $A2$ (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „4 Q-KOMP MIT A2“). Es werden zunächst die Abflusshöhen mit den Flächen*anteilen* multipliziert, dann die Ergebnisse aufaddiert. Es ergibt sich eine flächengewichtete Gesamtabflusshöhe des Elements. Überschreitet diese Höhe den Wert von $A2$, dann wird der Anteil, der $A2$ übersteigt, mit der Fläche des Elementes multipliziert und das resultierende Volumen dem schnellen Direktabflussspeicher als Zufluss zugewiesen. Der verbleibende Teil, also in Höhe von $A2$, wird ebenfalls mit der Fläche des Elementes multipliziert und das resultierende Volumen dem langsamen Direktabflussspeicher als Zufluss zugewiesen. Überschreitet der Oberflächenabfluss aus dem Bodenmodul in einem Zeitschritt nicht den Wert von $A2$, dann gelangt der gesamte Oberflächenabfluss, multipliziert mit der Fläche, in den langsamen Oberflächenabflussspeicher:

$$QZ_{D2} = AE \cdot \sum_{i=1}^{n} (QS_{D,i} - A2) \frac{A_i}{AE} \tag{4.9}$$

und

$$QZ_D = AE \cdot A2, \tag{4.10}$$

falls $\left(\sum_{i=1}^{n} QS_{B,i}\frac{A_i}{AE}\right) > A2$, ansonsten

$$QZ_{D2} = 0 \tag{4.11}$$

und

$$QZ_D = AE \cdot \sum_{i=1}^{n} QS_{D,i}\frac{A_i}{AE}, \tag{4.12}$$

mit

$A2$	$[mm/h]$	Schwellwert und
AE	$[km^2]$	Fläche des Elements

4.2 Meteorologische Eingangsdaten und InterMet

In LARSIM werden bei den gewählten Optionen insgesamt sechs meteorologische Größen als Eingangsdaten verwendet:

1. Niederschlag (direkte Verwendung im Interzeptionsmodul, modifiziert als Wasserdargebot im Schneemodul und im Bodenmodul)
2. Lufttemperatur (Evapotranspirationsmodul und Schneemodul)
3. Relative Luftfeuchtigkeit (Evapotranspirationsmodul und Schneemodul)
4. Globalstrahlung (Evapotranspirationsmodul und Schneemodul)
5. Windgeschwindigkeit (Evapotranspirationsmodul und Schneemodul)
6. Luftdruck (Evapotranspirationsmodul)

Die Größen 1 bis 4 werden dabei extern durch die Software InterMet aus Stationsdaten interpoliert: „Mit InterMet werden zeitlich und / oder räumlich wechselnde Eigenschaften des Untersuchungsgebiets in einem Gesamtmodell durch weiche räumliche Überlagerung lokaler Interpolationsmodelle miteinander kombiniert. Auf diese Weise können kurzfristige und qualitativ hochwertige Schätzungen der räumlichen Verteilung wichtiger meteorologischer Parameter ermittelt werden. In InterMet werden dabei lokale lineare geostatistische Teilmodelle auf sogenannte Homogenitätsbereiche angewandt, die wiederum als unscharfe räumliche Fuzzy-Mengen modelliert werden. Auf diese Weise wird globale Instationarität durch die Modellierung lokal einheitlicher Stationaritäten ausgeglichen. Mit Ausnahme des *Inverse-Distance-Weighting* (IDW), das nur zur Verfeinerung komplexer Interpolationsergebnisse genutzt wird, bilden demnach geostatistische und Fuzzy-Methoden den Kern der Schätzalgorithmen. [...] Bei den in InterMet integrierten Interpolationsmodellen handelt es sich um komplexe Hybridverfahren aus Geostatistik und Fuzzy-Theorie. Als Eingangsdaten nutzt InterMet Punktinformationen an Messstationen über die jeweilige meteorologische Größe als Zielvariable sowie relevante

flächendeckende Zusatzinformationen und führt z. T. die in Abbildung 1 dargestellten drei Arbeitsschritte automatisiert durch.“ (siehe Dobler u. a. (2004)) Die im Bericht in Abbildung 1 genannten Arbeitsschritte lauten: „(A) Partitionierung des Untersuchungsgebietes in Bereiche unterschiedlicher Modellannahmen“, „(B) Aufstellung der Modelle und Interpolation der meteorologischen Größen getrennt in den einzelnen Teilbereichen“ und „(C) Weiche Verknüpfung der Einzelmodelle zu einem Modell und zu einer Gesamtwertoberfläche.“

Die Wahl des konkreten geostatistischen Verfahrens sowie die statische und dynamische Aufteilung in Teilgebiete wurden für jede meteorologische Größe individuell gewählt: Z. B. bei der relativen Luftfeuchte erfolgt die Aufteilung a priori anhand räumlicher Einheiten auf Basis der Geländestruktur, bei der Lufttemperatur wird eine Korrelation zur Geländehöhe berechnet und andere Größen werden in eben oder reliefiert unterteilt. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle auf die zugrunde liegende Dissertation Hinterding (2002) verwiesen.

Als Ergebnis liefert InterMet für jede meteorologische Größe für jede Stunde eine Binärdatei, in der die interpolierte Matrix gespeichert ist. Im vorliegenden Zeitraum (1993 bis 2011) wurde das Raster mehrfach umgestellt: Es umfasst in den Jahren 1993 bis 1995 sowie ab 2004 280 × 203 Zellen bei einer Zellgröße von einem Quadratkilometer, im restlichen Zeitraum sind es 233 × 255 Zellen gleicher Größe, wobei das Nahe-Gebiet in beiden Fällen vollständig abgedeckt wird.

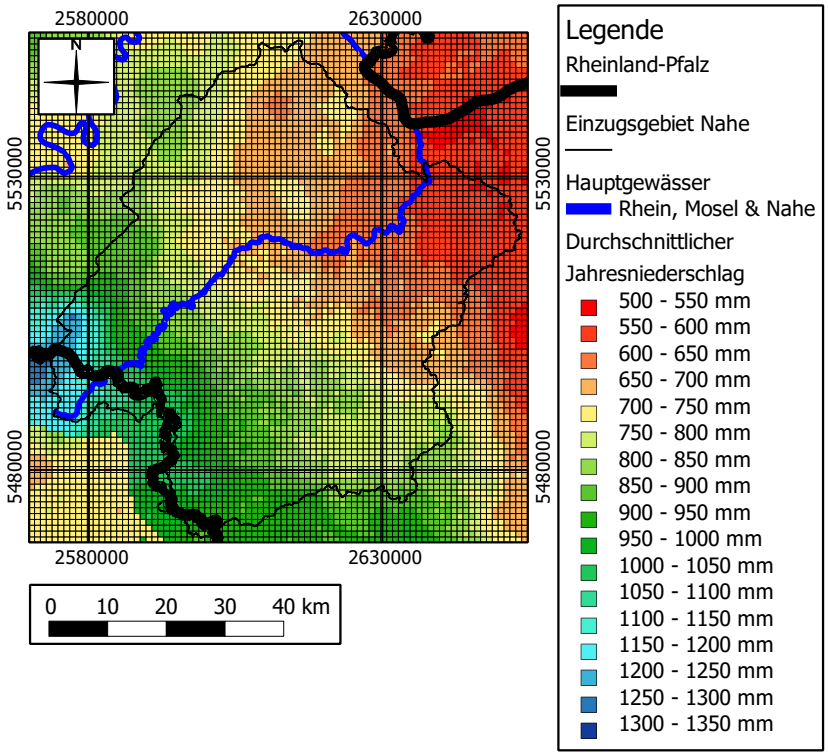

Abb. 4.8. Verteilung des mittleren Jahresniederschlages im Nahe-Einzugsgebiet für den Zeitraum 1993 bis 2003 (Eigene Darstellung, Quellen: Niederschlagsdaten: InterMet, Landes- & Einzugsgebietsgrenzen sowie Hauptgewässer: LUWG)

Abbildung 4.8 zeigt das aus der Interpolationstechnik resultierende Muster des Niederschlags. Dargestellt ist der mittlere Jahresniederschlag des Zeitraums 1993 bis 2003. Die Werte liegen in der Nähe der Quelle der Nahe jenseits von 1300 mm pro Jahr und nehmen zum Rhein hin kontinuierlich ab, dort werden Werte zwischen 500 und 550 mm pro Jahr erreicht. Das Modell zeigt eine gewisse Abhängigkeit der Niederschläge mit der Geländehöhe, wobei dies nicht der einzig relevante Faktor ist, da sich der Verlauf des Hunsrückhauptkamms nicht vollständig widerspiegelt.

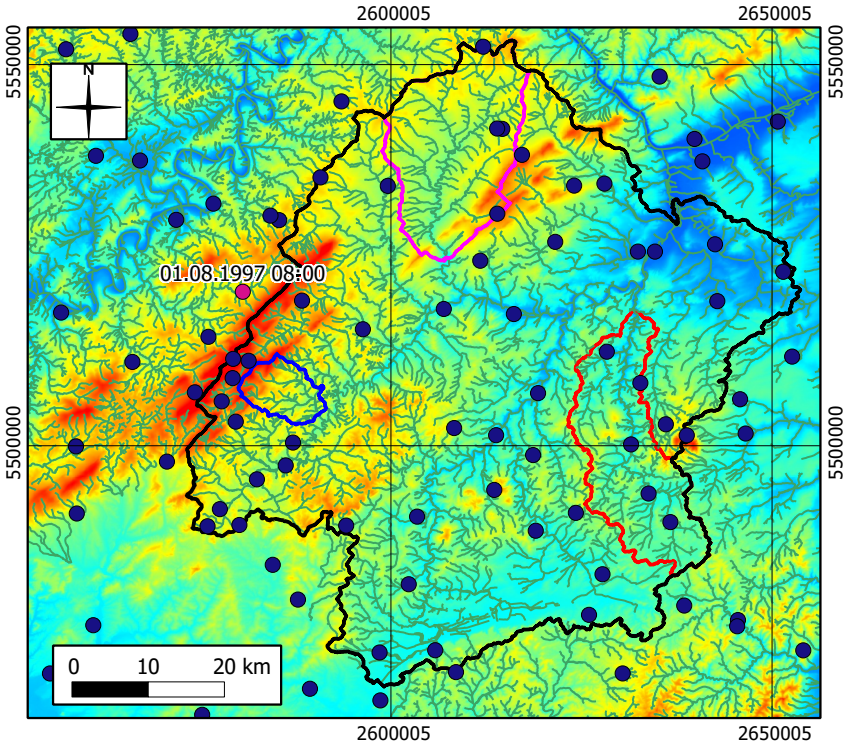

Abb. 4.9. Lage der verwendeten Niederschlagsmessstellen in Rheinland-Pfalz: in Schwarz: Umriss des Nahe-EZG, in Blau: Umriss Kronweiler, in Rot: Umriss Altenbamberg, in Magenta: Kellenbach, blaue Punkte: Niederschlagsmessstationen, Punkt in Magenta: Station, die während des betrachteten Zeitraums stillgelegt wurde (Morbach) (Eigene Darstellung, Quellen: LUWG, Höhenmodell: Universität Trier)

In Abbildung 4.9 sind die zugrunde liegenden Niederschlagsstationen dargestellt, wobei hier nicht alle Stationen über den gesamten Zeitraum gemessen haben und natürlich auch in einzelnen Zeitschritten Fehlwerte einzelner Stationen auftreten können. Es ist deutlich zu sehen, dass die Abdeckung sehr ungleichmäßig ist.

Bei der mittleren Jahreslufttemperatur, deren aus InterMet resultierendes Muster in Abbildung 4.10 dargestellt ist, ist die Korrelation der Höhe zur Lufttemperatur deutlicher zu sehen: Die Topographie kann nahezu vollständig an diesem Bild abgelesen werden, was auch im Vergleich zum in Abbildung 4.9 dargestellten Relief

sichtbar wird. Hier reichen die Werte von knapp 7,25 °C in der Nähe des Erbeskopf bis hin zu Werten oberhalb von 10,5 °C im Rheintal.

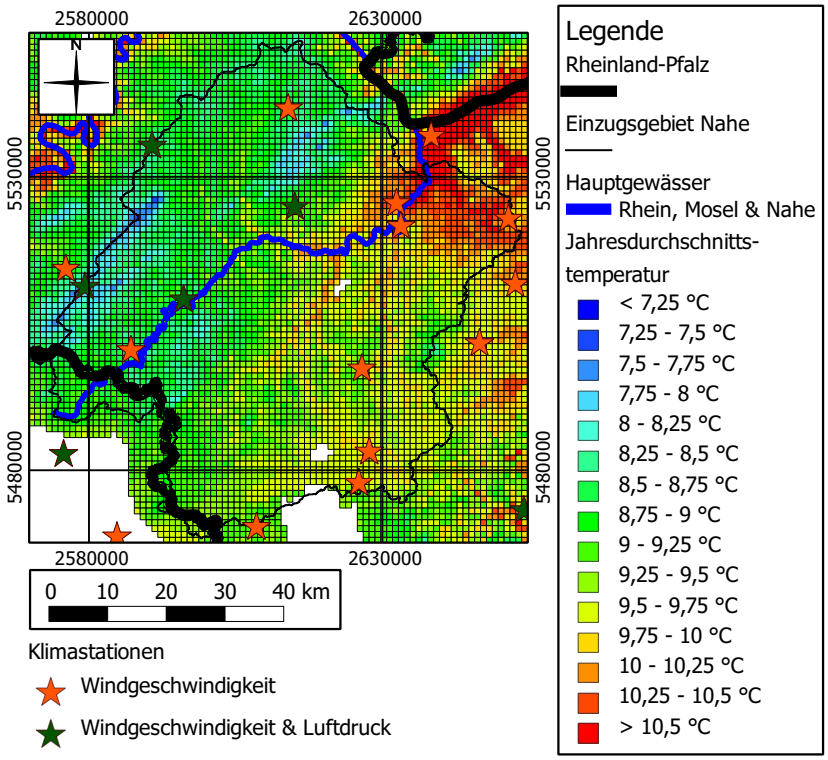

Abb. 4.10. Verteilung der mittleren Jahrestemperatur im Nahe-Einzugsgebiet für den Zeitraum 1993 bis 2003 (Eigene Darstellung, Quellen: Temperaturdaten: InterMet, Landes- & Einzugsgebietsgrenzen, Hauptgewässer sowie Klimastationen: LUWG)

Neben dieser räumlichen Verteilung der Werte soll auch noch kurz die zeitliche Variabilität dieser beiden Größen Niederschlag und Lufttemperatur am Beispiel der Mittelwerte für das Einzugsgebiet Kronweiler dargestellt werden. In LUWG (2005), Blatt 08, wird die Niederschlagsverteilung für das gesamte Land Rheinland-Pfalz dargestellt. Dort sind auch die jährlichen Niederschlagshöhen für den Zeitraum von 1952 bis 2004 dargestellt. Im Zeitraum zwischen 1993 und 2004 liegen diese zwischen ca. 580 mm und knapp 1000 mm.[5] Für Kronweiler liegen diese Werte zwischen 562 mm und 1113 mm. Wird diese zeitliche Akkumulation streng nach Kalenderjahren aufgegeben und kontinuierlich die Summe des letzten Jahres berechnet, so zeigt sich eine deutlich größere Variabilität: Der niedrigste Wert liegt bei ca. 442 mm und wird am Ende des Sommers 1996 erreicht; der höchste Wert liegt bei 1273 mm und wird Ende März 2001 erreicht (siehe Abbildung 4.11). Aus dem Faktor zwei bei kalenderjährlicher Betrachtung wird also nahezu Faktor drei!

[5] Hier wurde allerdings eine andere Datengrundlage verwendet.

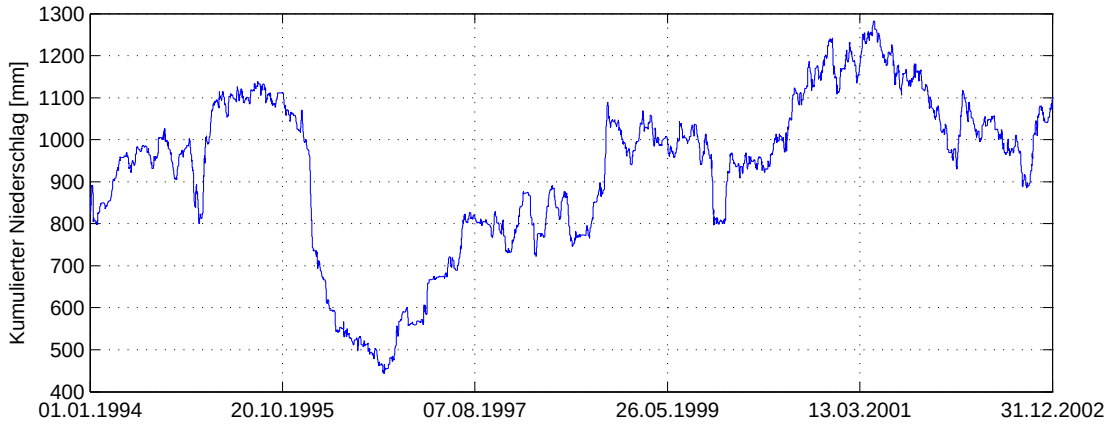

Abb. 4.11. Kumulierter Niederschlag des letzten Jahres im Einzugsgebiet Kronweiler für den Zeitraum 1994 bis 2002

Der Temperaturverlauf zeigt bei dieser Skale einen deutlich gleichmäßigeren Jahresverlauf (siehe Abbildung 4.12). In nahezu jedem Sommer werden Werte von ca. 30 °C erreicht, einzelne Spitzen liegen bei 32 bis 35 °C. In den Wintern zeigt sich ein ähnlich gleichmäßiger Verlauf: Die Temperaturen erreichen in allen Jahren Werte von ca. -10 °C, einzelne Spitzen liegen bei bis zu -15 °C. Es sind aber auch regelmäßig längere Kaltperioden sichtbar, etwa im Winter 1995/1996 oder 2001/2002. Ebenso gibt es einzelne Sommer, in denen die Temperaturen gleichmäßig ein wenig niedriger sind als in anderen Jahren, etwa der Sommer 1996.

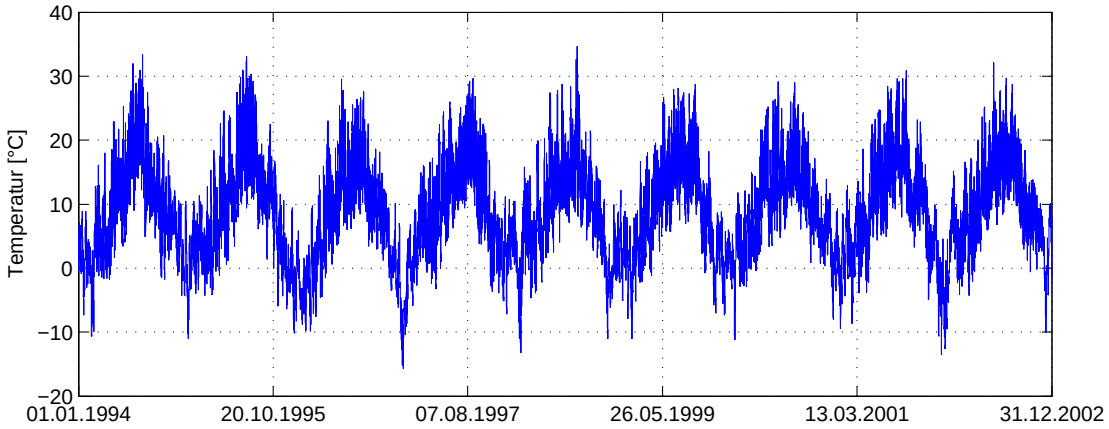

Abb. 4.12. Temperaturverlauf im Einzugsgebiet Kronweiler für den Zeitraum 1994 bis 2002

Die verbleibenden beiden Größen, Windgeschwindigkeit und Luftdruck, werden in LARSIM intern aus Stationsdaten interpoliert. Dazu wird aus jedem der vier Quadranten die nächstgelegene Station gewählt, die die relevante Größe misst. Diese vier Werte werden dann mittels *Inverse-Distance-Weighting* (IDW) für jedes

Element interpoliert. Im Prinzip ist das IDW lediglich ein gewichteter Mittelwert (siehe Ly u. a. (2011), Gleichung 1):

$$Zg = \sum_{i=1}^{ns} \lambda_i Zs_i, \tag{4.13}$$

mit

Zg	Interpolierter Wert am Punkt g,
Zs_i	Beobachtung am Punkt i,
ns	Anzahl der relevanten Beobachtungen, hier 4, und
λ_i	Gewichtung der Beobachtung i.

Die Gewichte, mit denen die vier Werte multipliziert werden, ergeben sich aus der räumlichen Distanz (siehe Ly u. a. (2011), Gleichung 2):

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{|D_i|^d}}{\sum_{i=1}^{ns} \frac{1}{|D_i|^d}}, d > 0, \tag{4.14}$$

mit

D_i	Distanz zwischen Beobachtung i und Punkt g und
d	Parameter zur Gewichtung, in LARSIM 1

Beim Luftdruck ist zusätzlich eine Korrektur der Höhe notwendig. Diese wird nach Formel 3.51 in Bremicker (2000) vor der Interpolation vorgenommen (die vier Werte werden auf die Höhe des Elementes über dem Meeresspiegel korrigiert). „Für die in der Nähe der Erdoberfläche vorherrschenden Werte für Lufttemperatur und Luftdruck ergibt sich damit eine Änderung des Luftdruckes um etwa 12,5 hPa pro 100 Höhenmeter“ (siehe Bremicker (2000), Seite 48).

Es ist noch anzumerken, dass die Anzahl der Stationen für diese beiden Größen wesentlich geringer ist als die Anzahl der Stationen, die Niederschlag messen. Die konkrete Lage der Stationen für Windgeschwindigkeit und Luftdruck ist in Abbildung 4.10 durch Sterne markiert. Während dies beim Luftdruck eher zu vernachlässigen ist, kann beim Wind schon aufgrund der großen räumlichen Distanz nicht immer davon ausgegangen werden, dass der interpolierte Wert mit den tatsächlichen Werten übereinstimmt. Hinzu kommt, dass die Lage der Kompartimente innerhalb des Elements nicht bekannt ist. Es wird also der gleiche Wert für ein Kompartiment, das sich im Tal befindet, verwendet, wie für ein Kompartiment des gleichen Elementes, das sich auf einem Höhenzug befindet.

4.3 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 5797 km^2 erstellt (vgl. Steinrücken u. Behrens (2010), Seite 58). Dieser 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 u. Behrens (2010), Seite 58)

Auf der Karte werden die in Tabelle 4.2 aufgelisteten Prozesse ausgewiesen. Auch hier richtet sich die Klassifikation der Prozesse und des Abflusstyps nach den Vorgaben in Scherrer (2006).

Prozess	Erläuterung	Abflusstyp
SOF1	Saturated overland flow Stufe 1	1
SOF2	Saturated overland flow Stufe 2	2
SOF3	Saturated overland flow Stufe 3	4
SSF1	Subsurface flow Stufe 1	2
SSF2	Subsurface flow Stufe 2	3
SSF3	Subsurface flow Stufe 3	4
DP	Deep percolation	5
DP=	Not Contributing	5

Tabelle 4.2. In der Bodenhydrologischen Karte ausgewiesene Prozesse (Quelle: Steinrücken u. Behrens (2010), Seite 45)

Die Semantik der einzelnen Prozesse wird in Abbildung 4.13 illustriert. Zusätzlich werden im Folgenden die Passagen aus Scherrer (2006) zitiert, die hier von Relevanz sind. Für darüber hinausgehende Informationen, etwa zu den in der Abbildung gezeigten unterschiedlichen Formen der Fließprozesse im Boden, sei an dieser Stelle eben auf Scherrer (2006) verwiesen.

Der erste aufgelistete Prozess ist der Gesättigte Oberflächenabfluss bzw. im Englischen Saturated Overland Flow (SOF). Er wird wie folgt beschrieben: „Diese Form des Abflusses entsteht, wenn nach Sättigung des Bodenprofils dessen Speicherkapazität erschöpft ist. Böden, die rasch gesättigt sind, lösen SOF1 aus, Böden mit größerem Sättigungsdefizit SOF2 oder SOF3. Jede weitere Wasserzugabe fließt unabhängig von der Niederschlagsintensität oberflächlich ab (Kirkby und Chorley, 1967).“ (Scherrer (2006), Seite 7)

Die Fließprozesse im Boden, Subsurface flow (SSF), werden so erläutert: „Durchdringt das Niederschlagswasser die Oberflächenschicht und dringt es in den Boden ein, so kann das Wasser in der Bodenmatrix gespeichert werden, oder es sickert bis zu einem allfällig vorhandenen Grundwasserkörper. Das Wasser bewegt sich entweder kapillar in den Poren der Bodenmatrix (Mikro- oder Feinporen ($d < 0.2\mu m$)

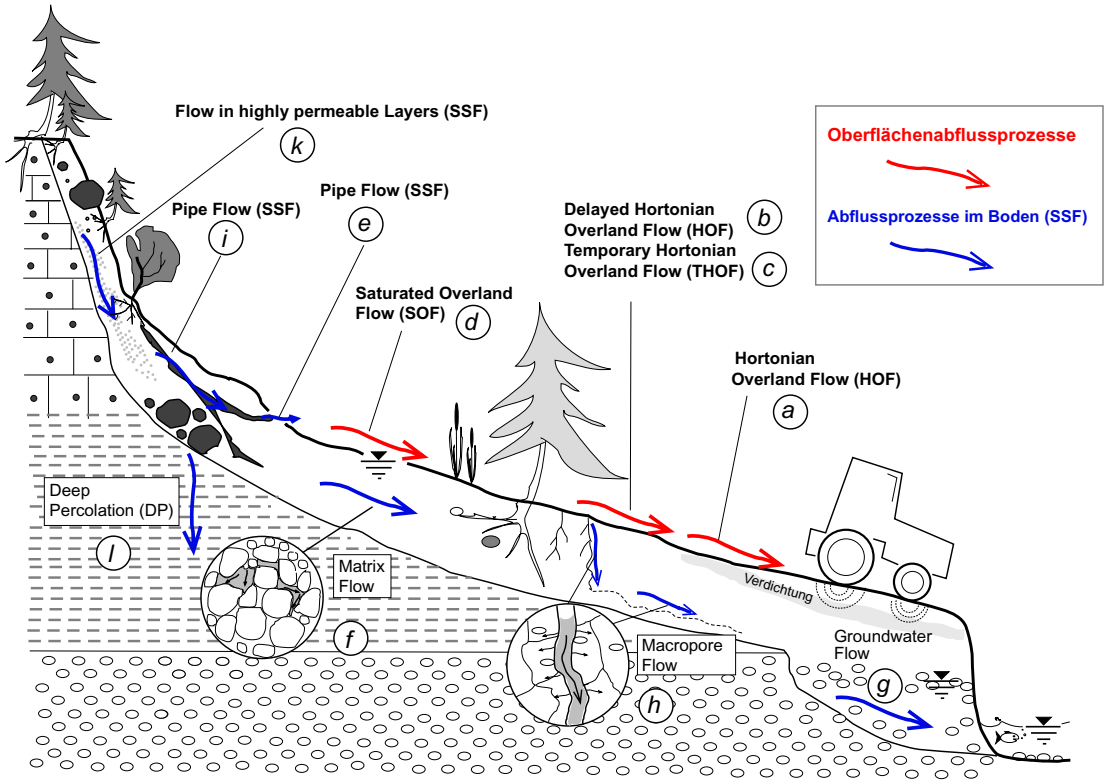

Abb. 4.13. Abflussprozesse an einem Hang (Quelle: Scherrer (2006), Seite 6)

und Meso- oder Mittelporen ($d = 0.2 - 10\mu m$) oder nichtkapillar in größeren Makroporen (Grobporen). Böden bestehen aus verschiedenen Horizonten von unterschiedlicher Durchlässigkeit. So kann in einem gut durchlässigen Bodenhorizont, der über einer weniger durchlässigen oder gar undurchlässigen Schicht liegt, lateraler Abfluss entstehen.“ (Scherrer (2006), Seite 7)

Die letzte Prozessgruppe betrifft die Tiefenversickerung, im Englischen Deep Percolation (DP): „In den Boden infiltriertes Wasser kann, sofern die geologische Unterlage durchlässig ist, in diese weitersickern, entweder als Matrixflow oder auch als Flow along Preferential Pathways.“ (Scherrer (2006), Seite 8)

„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.“ (Steinrücken u. Behrens (2010), Seite 45). Diese Kategorie wird im Wesentlichen auf bachfernen, nahezu ebenen Lagen ausgewiesen, wenn die Leitbodenform darauf hinweist, dass eine Tiefenversickerung an diesem Standort nicht stattfinden kann (vgl. Steinrücken u. Behrens (2010), Seite 45). Dieser Prozess wird später in der Diskussion in Unterkapitel 7.4 eine Rolle spielen.

In Abbildung 4.14 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, SSF2 bis 3, DP und DP= auf. Weiterhin ist zu sehen, dass die Kartierung stark von der Topographie und der Entfernung zum Gerinne abhängt, was besonders

im direkten Vergleich zu den in Unterkapitel 4.1.1 gezeigten Abbildungen mit den eingezeichneten Höhenlinien auffällt.

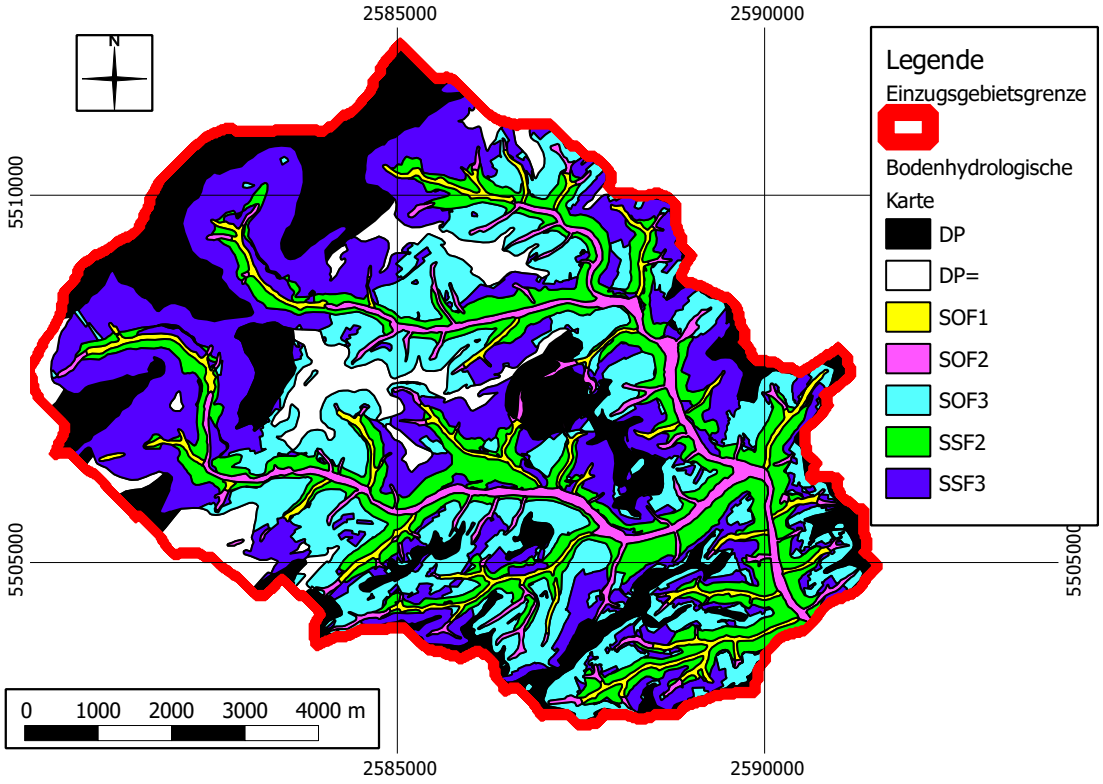

Abb. 4.14. Bodenhydrologische Karte des Einzugsgebietes Kronweiler(Quellen: Bodenhydrologische Karte: Soilution GbR, Einzugsgebietsgrenze: LUWG)

4.4 LARSIM in MATLAB

4.4.1 Warum eine Neuimplementierung?

Im Rahmen der Untersuchungen ergaben sich mehrere Anforderungen an die LARSIM-Implementierung:

1. Es muss möglich sein, einzelnen Kompartimenten unterschiedliche Bodenparametersätze zuzuweisen.
2. Das Modell sollte mit einer möglichst kurzen Laufzeit sehr häufig ausgeführt werden können.
3. Es sollten auch größere Zeiträume – etwa der vollständige Kalibrierungszeitraum – in einem Aufruf des Modells simuliert werden können.
4. Das Modell sollte auf dem gleichen Rechner zur Ausnutzung aktueller Mehrkernumgebungen ohne größere Einbußen mit unterschiedlichen Parametrisierungen mehrfach gestartet werden können.

5. Die Anzahl der Dateizugriffe sollte aufgrund der typischen Topologie von Computer-Clustern (viele Rechenkerne, viel Arbeitsspeicher, wenig (lokaler) Festplattenspeicher, viel Festplattenspeicher via Netzwerkverbindung) und den großen Unterschieden in den Zugriffszeiten und Übertragungsgeschwindigkeiten zwischen Arbeitsspeicher und Festplatten möglichst minimiert werden.
6. Das Modellverhalten sollte auf einfachem Wege untersuchbar sein. Dazu sollte es z. B. ohne größeren Aufwand möglich sein, den zeitlichen Verlauf oder die räumliche Verteilung von Eingangs- und Zustandsvariablen anschaulich zu plotten.
7. Eine Einarbeitung in den recht komplexen Quellcode von LARSIM sollte vermieden werden.
8. Es sollten Kollisionen zwischen von Dritten zwischenzeitlich implementierten Änderungen von LARSIM und den eigenen Änderungen vermieden werden.

In der während der Projektlaufzeit vorliegenden Implementierung von LARSIM (Releases 495 und 607) in der prozeduralen Programmiersprache Fortran ergaben sich einige Kollisionen zu diesen Anforderungen:

- In der relevanten Version werden in der Systemdatei tape35 für jedes Gebiet die Parameter BSF (entspricht dem Parameter b in Ludwig u. Bremicker (2006), Seiten 21-22, Gleichungen 3.17 und 3.18 bzw. Gleichungen 4.1 und 4.2), beta (entspricht β in Ludwig u. Bremicker (2006), Seite 23, Gleichung 3.20 bzw. Gleichung 4.6), Dmin und Dmax (gemeint sind gemäß Ludwig u. Bremicker (2006), Seite 23, nicht nummerierte Gleichung bzw. Gleichung 4.5 r_dmin und r_dmax) angegeben (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „TAPE35“). Diese vier Werte werden in allen Kompartimenten aller Elemente verwendet und dies widerspricht der ersten Anforderung. Die Angabe eines inhomogenen Parametersatzes hätte die Definition einer weiteren Option in LARSIM erfordert sowie die Änderung der Routine, die das tape35 einliest, die Weitergabe der Parameter an die entsprechende Funktion sowie die Änderung der Variablenstruktur, in der die Werte abgelegt werden. Eine Einarbeitung in den Quellcode wäre also erforderlich gewesen. Somit sind die Anforderungen sieben und acht verletzt.
- Ein kritischer Themenkomplex ergibt sich aus den Datenformaten der Eingangsdaten von LARSIM. Bei Verwendung der InterMet-Daten müssen für jedes zu simulierende Jahr 35.040 Dateien eingelesen werden (für jede der Größen Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Luftfeuchtigkeit für jede Stunde jeweils eine Datei). Hinzu kommen noch die Tapes, die aus zu parsenden Textdateien bestehen, sowie die Stationsdateien für Windgeschwindigkeit und Luftdruck, die in LARSIM intern interpoliert werden (siehe Unterkapitel 4.2). All diese Daten müssen für jeden Modelllauf neu eingelesen werden, auch wenn sich die Eingangsdaten selbst etwa im Rahmen einer Parameteroptimierung nicht ändern. Zustande gekommen sind diese Datenformate aus den Anforderungen im operationellen Betrieb, in dem es gute Gründe für diese Wahl der Datenhaltung gibt. Bei den Anforderungen im Rahmen des Projektes kollidiert es mit mehreren Anforderungen, konkret der zweiten und fünften. Hinzu kommt, dass

die Eingangsdaten von LARSIM für den ausschließlichen Zugriff geöffnet werden. Das bedeutet, dass für jede Instanz von LARSIM, die auf die gleichen Eingangsdaten zugreifen möchte, ein eigener Datensatz vorgehalten werden muss, wobei selbst unterschiedliche Gebiete der Nahe auf die gleichen Eingangsdaten zugreifen. Dies widerspricht der vierten Anforderung. Noch schwieriger ist diese vielfache Datenhaltung im Computer-Cluster zu realisieren und verletzt so die fünfte Anforderung. Eigentlich ist es auch unnötig, da LARSIM lediglich lesend auf diese Daten zugreift. Durch eine Änderung im Quellecode wäre es also möglich, dieses Problem zu umgehen, was aber wiederum eine Einarbeitung im Quellcode nötig macht.

- Zum Zeitpunkt des Projektbeginns wurde in der Fortran-Implementierung lediglich eine 32 Bit-Rechnerarchitektur unterstützt. Dadurch ist der adressierbare Arbeitsspeicher auf 4 Gigabyte begrenzt. Je nach Einsatzraum und je nach den gewählten Optionen wurden deshalb fest definierte Feldgrenzen für einzelne Variablen – etwa die maximale Anzahl von Elementen, die maximale Anzahl der Kompartimente, aber auch für die maximale Anzahl von Zeitschritten – definiert. Letztere liegt bei der vorliegenden kompilierten LARSIM-Datei bei 9000 Zeitschritten (Revision 522). Für den gewählten Kalibrierungszeitraum muss das Modell somit viermal aufgerufen werden, was einen gewissen organisatorischen und administrativen Mehraufwand bedeutet. Dies widerspricht der Anforderung drei.
- Nach der Simulation werden von LARSIM eine Reihe von Ausgabedateien angelegt: Eine Datei, die den Modellzustand zum Ende des Simulationszeitraums enthält, eine Datei, die den simulierten Abfluss enthält, Dateien, welche die einzelnen Abflusskomponenten am Gebietsauslass enthalten, eine Standard-Ausgabe-Datei (tape 11, siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „tape11“) etc. Neben diesen Dateien ist es möglich, über Optionen weitere Ausgaben anzufordern. Für das Vorhaben relevant wäre z. B. die Ausgabe von Wasserhaushaltsgrößen, wie etwa dem Verlauf der Bodenspeicherfüllung in einzelnen Kompartimenten. Dies ist durch Angabe von Optionen leicht möglich (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „Ausgabe hydrometeorologischer Zeitreihen“, Option „GMD: DETAILLIERT“), andere Angaben, wie etwa einzelne Abflusskomponenten der einzelnen Kompartimente, müssten zusätzlich implementiert werden, da diese Ausgabe nur elementweise erfolgt (siehe LARSIM Online-Hilfe, Schlüsselwort „Ausgabe hydrometeorologischer Zeitreihen“, Option „GMD: BODENSPEICHER“). Eine Sicht in den Verlauf einzelner Variablen zur Laufzeit ist lediglich innerhalb der Entwicklungsumgebung im Debug-Modus möglich. Hierbei gibt es aber weitergehende Einschränkungen bei den Feldgrößen und auch bei der Ansicht einzelner Variablen. Zusammenfassend ist es nicht ohne Weiteres möglich, etwa den Anteil einer Abflusskomponente in einem konkreten Kompartiment zu berechnen. Dies verletzt die Anforderung sechs. Solche Ausgaben ließen sich durch Änderungen im Quellcode erstellen, was wieder die siebte Anforderung verletzt.

In allen vorherigen Punkten wurde deutlich, dass die Anforderungen zum Teil umgesetzt werden könnten, wenn Einarbeitung in den und Änderungen am Quellcode in Kauf genommen werden. Diese Einarbeitung in den Quellcode ist allerdings aus mehreren Gründen nicht ganz trivial:

- Der Quellcode ist mittlerweile recht umfangreich: Die Revision 607 umfasst 526 Fortran-Dateien. Die Datei LARSIM.FOR hat alleine 4928 Zeilen, weitere wesentliche Prozeduren haben jeweils mehrere Tausend Zeilen.
- LARSIM hat eine Vielzahl von Optionen, in der vorliegenden Revision 607 gibt es mehr als 400. Einige davon schließen andere automatisch mit ein, sodass die Angabe in der Steuerdatei tape10 nicht unbedingt erschöpfend ist. Im Code bedeutet dies, dass ganze Abschnitte nur unter bestimmten Optionen ausgeführt werden. Bei den älteren Optionen sind diese zudem in einem logischen Feld abgelegt, sodass erst nachgeschlagen werden muss, dass z. B. die Zeile

  ```
  if (option(172)) then
  ```

  bedeutet, dass bei der Schneesimulation die Option „SNOW-COMPACTION 2“ gemeint ist.
- LARSIM wurde über einen ziemlich langen Zeitraum stetig weiter entwickelt. Die Grundlage bildet das Flussgebietsmodell FGMOD (siehe Ludwig (1982)), das Anfang der Achtziger Jahre implementiert wurde. Seitdem haben sich in der Programmierung einige Fortschritte ergeben, was etwa die Lesbarkeit von Code betrifft. Anschauliche Beispiele hierfür wären Variablennamen, Dateinamen, Verwendung von Kommentaren oder auch die Vermeidung von Sprungbefehlen. Die älteren Teile von LARSIM enthalten Variablennamen, die den damaligen Konventionen entsprachen – aus heutiger Sicht aber ohne weitere Kommentare durch Dritte kaum interpretierbar sind. Allein die Datei LARSIM.for enthält bis zur Zeile 1027 Variablendeklarationen. Teilweise werden mehr als 10 Variablen in einer Zeile deklariert; die sich hinter den Abkürzungen verbergenden Namen sind ohne Weiteres kaum zu erraten. Ein Beispiel aus der Datei zeigt Abbildung 4.15. Erschwerend kommt hinzu, dass die Variablen von Prozedur zu Prozedur weitergereicht werden, aber nicht in allen der gleiche Name verwendet wird. Als Beispiel für die Dateinamen mögen die Routinen von FGMOD und dessen Hilfsroutinen dienen, die sich in den Dateien FGM01.FOR bis FGM100.FOR verstecken.

Aus all diesen Gründen ergab sich schon vor Beginn des Projekts die Absicht, die benötigten Teile von LARSIM in MATLAB[6] neu zu implementieren. MATLAB bietet von Haus aus bereits einige Möglichkeiten, die eine effiziente Entwicklung erleichtern, etwa Werkzeuge zum Rapid Prototyping, bereits bestehende Implementierungen von Algorithmen, die zur Optimierung und zur Bestimmung der Güte genutzt werden können, ausgereifte Debug-Möglichkeiten, einen Profiler und vor allem auch mächtige Visualisierungsmöglichkeiten. Auch die abschließende Portierung der entwickelten Code-Fragmente und eine Integration derer in den LARSIM-Code werden unterstützt.

[6] http://www.mathworks.de/products/matlab/

```
103       integer I,IAD,IAD1,IADD,IADD1,IADEV,IAELE
104       integer IAM,IANF,IANZTG,IAV,IAX,IAZ,IAZP,IAZP1,IAZPI,IDAHAA
105       integer IDAML,IDAT,IDATA,IDUM1,IDUM2,IDUM3,IEDEV,IEL,IEX_NUM
106       integer IFGVAN,IGFAK,IGLIAA,IGLOB,IGRAAD,IGRAAE                    !AL 03.05.06
107       integer IGT,II,IIVZ,IK1,IKORR,ILUDR,IMARAA,IMIN,IN,IN1,IN2,IN21
108       integer IN22,IN3,IN4,IN5,INAZ,INDEX_EX,INTAN1,INTANT,INTE,INVZ
109       integer IO23,IO24,IO25,IOR,IOR1,IOUT,IOUT1,IOUT2,IPAGE,IPEG,IPF
110       integer IPLOT,IPP,IPRIN,IPRO,IQAMAX,IQTMAX,IQZMAX,IRFLU,IRU,IRUTYP
111       integer ISEC,ISOSD,ISTEND,IT2,ITALDAT,ITEML,ITX,IUESG_ZU
112       integer IVASAA,IVNN,IVON,IVZ,IVZA,IVZE,IVZI,IVZP,IVZP1,IVZPI,ITTAU  !AL 05.10.05
113       integer IWIND,IWOLK,IZX,I_GTS_S,I_IT,I_LAG_S,I_RHB_AUS,I_RHB_FUELL
114       integer I_RHB_S,I_ST_RUN,I_ST_ZS,J,K,K1,KA,KA1,KAA,KAAA,KAN,KDATUM
115       integer KEN,KMUO,KN,KREST,LDATUM,LINES,LMIN,LUMIN,M,M1,MMAX,MN,MN1
116       integer MODD,MODP,MODQ,NEI,NEII,NFOLG,NI,NII,NJA,NNIE,NNIE_V,NRFLV
117       integer NRFLVZ,NT,NTT,NTV,isimbeg,iede,ikaus                       !Ho 30.12.04
118       integer ITER,ISEQ,II1,ITERE,KVAR,KKVA,IO,II2,CTRL,IT              !Ho 04.09.07 AL 03.05.06
119
120       real OPTF,PHI,PK,PKBMAX,PKBMITT,PN,PSI,PSIB,PSIMAX,PSIMIN,QA
121       real QAMAX,QAO,QAX,QAZ,QB,QBG,QBSO,QBSP,QBVZ,QFOPT,QNN,QT,QTMAX
122       real QTX,QV,QVZ,QY,QZMAX,QZMAX1,QZX,Q_STEU,Q_TOL,RAST,RB,RBA
123       real RBF,RD,RDD,RESTDAUER,RET_MX_S,RFGVAN                          !AL 03.05.06
124       real RGLIAA,RGRAAE,RI,RIV,RIVK,RMARAA,RMIN,RSTA,RSU,RSUG,RSUO
125       real RSUT,RSUVZ,RVASAA,R_NKO,SENS,SEVMAX,SKL,SKM,SKR,SP,STNI
126       real STNJ,SUMFL,SUMQ,SUMQB,SUMQI,TA,TAL,TALABS,TALQMAX,TALQMIN
127       real TALSOLL,TALUKHW,TLA,TRAFAK,TWD,UESG_Q1,UESG_Q2,UESG_V
128       real VEK,VNN,VY,WNN,X,XAU,XLAGE,XM,XNEFF,XNFKT,Y,YLAGE,YM
129       real ZALT,ZNIE,ZNIE_V,PMA,PMI,PAMAX,PAMIN                          !AL 03.05.06
130       real PMAX,PMIN,XNY,XLAM,GU,GO,XLAMG,DPMIN,DPFAK,XLAMX,TAU,EPS,PHIM
131       real PARAM,PALT,AS,AVM,bilanz                                      !Ho 28.08.07 !Al 03.05.06
132       real PKBMITTSIM,PKBMITTVHS                                         !Ho 10.12.07
133       logical   CA(LOPT+LCA)                                             !AL 03.05.06
```

Abb. 4.15. Negativbeispiel aus dem Variablendeklarationsteil der Datei LARSIM.FOR

Ein Teil dieser Merkmale ist auch für Fortran verfügbar, aber nach Kenntnisstand des Autors nicht innerhalb einer Umgebung. Die während der Entwicklungsarbeiten für Vergleichszwecke eingesetzte Entwicklungsumgebung „Compaq Visual Fortran“ bietet jedenfalls wesentlich weniger Möglichkeiten, vor allem die Debug-Funktionen in MATLAB gehen weit über die in „Compaq Visual Fortran“ gebotenen hinaus. Ein weiteres Argument für die Nutzung von MATLAB ist die in der Arbeitsgruppe bereits vorhandene Kompetenz im Umgang mit diesem Werkzeug, die über die Kenntnisse hinsichtlich Fortran weit hinausgehen.

Letztendlich hat sich ein wesentlicher Vorteil – die nicht notwendige Einarbeitung in den Quellcode – aber als unrealistisch erwiesen, denn die Implementierung von LARSIM in MATLAB nur aufgrund der theoretischen Vorlage (Ludwig u. Bremicker (2006)) führte zu nicht erklärbar unterschiedlichen Ergebnissen, wobei die Abweichungen recht gering waren. Dies ist in einer Vielzahl von Details begründet, die, jedes für sich betrachtet, nur einen geringen Einfluss haben, in der Summe aber zu den Abweichungen führten. Zunächst gibt es eine Vielzahl von kleinen Hinweisen, die recht gut in der genannten Quelle verteilt sind, einige sind in der Online-Hilfe enthalten, andere in weiteren Dokumenten. Ein Beispiel hierfür wäre etwa der Umstand, dass W_B bei Verwendung der Option „ERW. BODENPARAMTER“ auf 0 gesetzt wird, nach Ludwig u. Bremicker (2006) ist der Wert aber $0,05 \cdot W_m$. Die Suche nach korrekten Werten gleicht hier also ein wenig einem Detektivspiel, sodass der Blick in den Fortran-Code fast der einfachere und vor allem zielführendere Weg ist. Dann gibt es eine Reihe von Berechnungsschritten im Fortran-Code, die der Autor in den Dokumenten nicht finden konnte. Beispie-

le hierfür wären etwa die landnutzungsabhängigen Korrekturen: Im Schneemodul werden die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit bei Waldstandorten reduziert (Datei Snow04.FOR, Revision 418, Zeilen 144-152). Auch andere Aspekte der Dokumentation lassen keine eindeutige Interpretation zu, wie etwa der Themenkomplex Bodenfeuchte-Sättigungsflächenfunktion, der schon im Unterkapitel 4.1.3 präzisiert wurde.

Abschließend hatten aber die Einarbeitung im Fortran-Code und die detaillierte Übertragung der Berechnungsschritte Vorteile, die nicht nur die Nutzung von MATLAB selbst betreffen. Auch für das Modellverständnis und die Durchdringung der Konzepte waren diese Schritte hilfreich.

4.4.2 Ausgewählte Aspekte der Implementierung

LARSIM wurde im Rahmen des Projektes mit allem im Nahe-Gebiet eingesetzten Optionen in MATLAB neu implementiert. Es sind keinerlei Berechnungsschritte aus dem Fortran-Code notwendig, das Modell läuft unter Nutzung der gleichen Eingangsdaten vollständig selbstständig. Bei der Implementierung wurde ein besonderes Augenmerk auf die im vorherigen Unterkapitel formulierten Anforderungen gelegt. In den nächsten Abschnitten werden ausgewählte Aspekte dieser Implementierung beschrieben.

Vorab sollen jedoch die im Projekt relevanten Anwendungsfälle und die daraus resultierenden Anforderungen beschrieben werden, die sich doch erheblich von den Anforderungen im operationellen Betrieb unterscheiden:

1. Das Modell soll einmalig für einen bestimmten Zeitraum mit einem bestimmten Parametersatz ausgeführt werden. Dies ist z. B. bei der Validierung der Fall.
2. Das Modell soll mehrfach hintereinander für einen bestimmten Zeitraum mit unterschiedlichen Parametersätzen ausgeführt werden. Dies ist z. B. bei der manuellen Kalibrierung der Fall. Die Resultate eines Laufs beeinflussen die Wahl der Parameter für den nächsten Lauf. Typischerweise liegt die Anzahl der Ausführungen im niedrigen zweistelligen Bereich.
3. Das Modell soll sehr häufig für einen bestimmten Zeitraum mit unterschiedlichen Parametern ausgeführt werden. Dies ist z. B. bei den durchgeführten Monte Carlo-Simulationen der Fall. Hier beeinflussen sich die Läufe mit unterschiedlichen Parameterproben nicht. In der konkret durchgeführten Untersuchung wurde das Modell 72.000-mal ausgeführt. Dies ist aber auch bei der automatischen Parameteroptimierung der Fall. Hier hängen die Abhängigkeiten einzelner Modellläufe sehr stark vom konkret verwendeten Algorithmus ab, worauf später noch näher eingegangen wird. Typischerweise wird das Modell dabei in Abhängigkeit von der Anzahl zu optimierender Parameter und weiteren Kriterien wenige hundert- bis mehrere tausendmal ausgeführt.

Der erste Fall wird tendenziell manuell lokal auf einem Arbeitsplatzrechner oder per Remotedesktopverbindung auf einem Server durchgeführt. Die anderen Fälle sollten vorzugsweise auf Servern mit vielen Kernen oder sogar im Computer Cluster durchgeführt werden.

Im Hinblick auf die Gesamtlaufzeit aller Teilarbeiten und die oben genannten Anzahlen der Ausführungen ergibt sich, dass leichte Einbußen bei dem ersten oder zweiten Fall gegenüber dem dritten Fall zu vernachlässigen sind.

Diese Überlegungen fanden bei den in den nächsten Abschnitten beschriebenen Aspekten Berücksichtigung.

Datenhaltung

Im Abschnitt 4.4.1 wurde bereits erwähnt, dass eine Vielzahl von Dateien für jeden LARSIM-Lauf einzulesen sind, alleine über 35.000 meteorologische Dateien für jedes zu simulierende Jahr. Bei der Monte Carlo-Simulation wurden drei Jahre 72.000-mal simuliert. Es ist offensichtlich, dass die sich so ergebende Anzahl von über 7 Milliarden Dateizugriffen im Computer Cluster unbedingt zu vermeiden ist. Vor diesem Hintergedanken wurde entschieden, die Implementierung auf zwei Fälle auszulegen:

1. Ein Gebiet und ein Zeitraum werden zum ersten Mal simuliert. Dazu werden die ursprünglichen Eingangsdaten eingelesen. (Dieser Schritt ist in MATLAB wesentlich langsamer als in Fortran.) Die eingelesenen Daten können dann im MATLAB-eigenen Format gespeichert werden.
2. Ein Gebiet und ein Zeitraum wurden bereits eingelesen und liegen nun als MATLAB-Dateien vor.

Zur weiteren Optimierung werden alle benötigten Daten in lediglich zwei MATLAB-Strukturen gespeichert: `variables` und `meteorologicInput`. Letztere enthält alle notwendigen meteorologischen Eingangsdaten:

- vier dreidimensionale Matrizen für Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung und Lufttemperatur (wobei diese auf den für das Gebiet benötigten Ausschnitt beschnitten wurden),
- zwei zweidimensionale Matrizen mit zuvor interpolierten Daten mit Windgeschwindigkeiten und Luftdrücken (Größe der Matrizen: Anzahl der Elemente × Anzahl der Zeitschritte) sowie
- mehreren Variablen mit Tagesmittelwerten, die an jedem neuen Simulationstag neu für die Verdunstungsroutine berechnet werden.

Diese Struktur bzw. die darin enthaltenen Daten bleiben bei allen beschriebenen Anwendungsfällen unverändert und müssen auch bei wiederholter Ausführung lediglich einmalig vor der ersten Ausführung eingelesen werden. Führt also z. B. eine MATLAB-Instanz mehrere tausend Varianten bei der Monte Carlo-Simulation durch, so bleiben diese Daten permanent im MATLAB-Speicher und müssen lediglich einmal eingelesen werden. Auch das im Computer-Cluster über das Netzwerk zu übertragende Volumen ist kleiner, da die Matrizen auf das benötigte Gebiet beschnitten sind (bei dem Einzugsgebiet Kronweiler sind das beispielsweise 9×12 Werte während die ursprünglichen InterMet-Dateien 233×255 Werte enthalten).

Die zweite Struktur, `variables`, enthält den ganzen Rest: Auf oberster Ebene allgemeine Daten zur Simulation wie den Anfangszeitpunkt, den Endzeitpunkt,

die Anzahl der Zeitschritte, diverse logische Variablen, die beispielsweise angeben, ob die Zustandsgrößen gespeichert werden sollen, etc. Dann gibt es eine Komponente `variables.elements`, in der alles gespeichert wird, was die Elemente betrifft: Vektoren, die die Flächen der Elemente enthalten, die Gerinnegeometrien der Elemente, Koordinaten, Gebietsspeicher etc. Auch die aus den Gerinnedaten abgeleiteten Größen wie benetzter Umfang bei einem bestimmten Wasserstand sind dort vorgehalten, werden aber nur einmalig ausgerechnet. Darin gibt es eine weitere Komponente `variables.elements.subElements`, die einen Vektor von Strukturen für jedes Element enthält. In jeder Struktur sind alle Daten zu den Kompartimenten der Elemente enthalten: Vektoren mit Landnutzungen, Abflussprozesstypen, Flächen und die ganzen benötigten Zustandsgrößen wie etwa die Bodenspeicherfüllung, Wasseräquivalente der Schneedecke etc. Die Struktur `variables` wird durch diesen Aufbau zwar recht komplex, ist aber logisch strukturiert und nahezu selbsterklärend: Als Beispiel enthält der Vektor `variables.elements.subElement(17).contentSoilWaterStorage` die Speicherfüllungen aller Kompartimente des 17. Elementes.

Diese zuletzt beschriebene Struktur muss vor jedem neuen Modelllauf neu eingelesen werden. Dabei ist die Dateigröße vergleichsweise klein: Für die gesamte Nahe sind es knapp zwei Megabyte, für das Gebiet Kronweiler ca. 150 Kilobyte. Ein typischer Ablauf bei der Monte Carlo-Simulation sieht also so aus:

1. `meteorologicInput` wird eingelesen.
2. `variables` wird eingelesen.
3. Die Bodenparameter werden durch eine Funktion in allen Kompartimenten gesetzt.
4. Die Simulation wird ausgeführt.
5. Das Ergebnis wird gespeichert.
6. Es beginnt erneut beim zweiten Schritt.

Möglichkeiten der Laufzeitoptimierung durch Parallelisierung oder Nutzung von Vektoroperationen

Auf die Frage, welche Trends in den letzten Jahren die Leistungsfähigkeit von Computern deutlich gesteigert haben, sind die immer stärkere Verbreitung von Rechnern mit mehreren Prozessoren oder Prozessorkernen sowie die breitere Verfügbarkeit von Computer-Clustern gute Antwortkandidaten. Neben diesen Entwicklungen gibt es auch den Trend, bestimmte Formen von Berechnungen auf Grafikprozessoren durchzuführen. Möchten diese Vorteile nun bei der Wasserhaushaltssimulation genutzt werden, so sind einige grundsätzliche Überlegungen notwendig: Welche Teile der Simulation sind voneinander unabhängig und damit grundsätzlich geeignet, um parallel berechnet zu werden? Für welche Teile trifft das nicht zu? Wie können die verschiedenen Größen des Modells in Datenstrukturen abgelegt werden, die überhaupt erst eine Parallelisierung erlauben? Welche Anforderungen ergeben sich aus konkreten Softwareprodukten?

Betrachten wir dazu zunächst in Form eines Pseudocodes die Verschachtelung der einzelnen Schleifen während den Monte Carlo-Simulationen, wobei durch das

Schlüsselwort `for` eine Schleife bis zum dazugehörigen Schlüsselwort `end` gekennzeichnet wird, die mehrfach ausgeführt wird.

```
1  for all parameter samples
2     for all time steps
3        for all elements
4           for all subElements
5              simulate water balance
6           end
7           simulate runoff concentration
8           simulate channel routing
9        end
10    end
11 end
```

In der äußersten Schleife ab Zeile eins wird das Modell für alle Proben aufgerufen, also im konkreten Fall 72.000-mal. Hierbei haben aber die Berechnungsschritte einer Simulation mit einem individuellen Parametersatz keine Auswirkungen auf andere Simulationen mit anderen Parametersätzen. Dies könnte also parallel ausgeführt werden. In der nächsten Schleife ab Zeile zwei werden dann für einen Parametersatz alle Zeitschritte berechnet. Diese Abfolge kann nicht parallelisiert werden, da der Wert der Zustandsvariablen in einem Zeitschritt für den folgenden Zeitschritt benötigt wird. Die folgende Zeile enthält die Schleife für alle Elemente. Hier gibt es unabhängige Schritte, etwa die Simulation der Prozesse, die in jedem Element individuell stattfinden, und abhängige Schritte, etwa bei der Simulation des Wellenablaufs. Hier ist für eine Parallelisierung eine gewisse Umstrukturierung notwendig. In der innersten Schleife ab Zeile vier hingegen kann wieder eine Parallelisierung durchgeführt werden, da es keine Wechselwirkungen zwischen den Kompartimenten gibt.

Diese Überlegungen resultieren in der folgenden modifizierten Variante, wobei mit dem Schlüsselwort `parfor` Schleifen gekennzeichnet werden, die parallel ausgeführt werden könnten.

```
1  parfor all parameter samples
2     for all time steps
3        parfor all elements
4           parfor all subElements
5              simulate water balance
6           end
7           simulate runoff concentration
8        end
9        for all elements
10          simulate channel routing
11       end
12    end
13 end
```

Für die konkrete Ausführung dieser Überlegungen müssen aber noch die Einschränkungen bedacht werden, die sich aus den eingesetzten Werkzeugen ergeben. Der Hersteller von MATLAB, The Mathworks, Inc., hat im Verlauf der letzten Jahre seine Politik hinsichtlich der Parallelisierung mehrfach geändert. Während des Projekts relevant waren die Produkte *Parallel Computing Toolbox*[7] und *Distributed Computing Server*[8]. Das zuerst genannte Produkt ermöglichte zu Anfang

[7] `http://www.mathworks.de/products/parallel-computing/`
[8] `http://www.mathworks.de/products/distriben/`

der Laufzeit des Projekts die parallele Ausführung von Schleifen durch bis zu vier *Worker*, aktuell können dies 12 sein. Das zweite Produkt kann *Jobs* sogar in Computer-Clustern oder Clouds verteilen.

Bei der Nutzung dieser Toolboxes ergeben sich aber Einschränkungen bei den innerhalb der Schleifen verwendbaren Variablen. Diese müssen laut Handbuch der Parallel Computing Toolbox (2013) aufteilbar sein: „A *sliced variable* is one whose value can be broken up into segments, or *slices*, which are then operated on separately by workers and by the MATLAB client. Each iteration of the loop works on a different slice of the array. Using sliced variables is important because this type of variable can reduce communication between the client and workers. Only those slices needed by a worker are sent to it, and only when it starts working on a particular range of indices!“

Das Produkt ist also primär auf die Berechnung von Fällen ausgelegt, in denen große, aufteilbare Matrizen verwendet werden. Dies trifft in LARSIM unter Verwendung der oben beschriebenen Datenstruktur nicht direkt zu. Um diese Anforderungen unter Berücksichtigung des im Zitat angesprochenen Kommunikationsaufwandes – für jeden neuen *Job* ist ein Overhead durch die Kommunikation und die Erstellung des *Jobs* selbst zu berücksichtigen – umzusetzen, müssten beispielsweise die Werte aller Kompartimente in einer Matrix abgelegt werden, was aber die logische Strukturierung der Variablen zerstören würde. Weiterhin haben die Elemente unterschiedliche Anzahlen von Kompartimenten, der Code wird umfangreicher, wenn dieser Umstand berücksichtigt wird.

Versuche unter Verwendung des Profilers ergaben, dass der Faktor, um den sich die Berechnungzeit unter Verwendung der *Parallel Computing Toolbox* verkürzt, nicht den Wert einer anderen Variante erreichten. In dieser wurden mehrere MATLAB-Instanzen geöffnet, jeder Variante ein Kern zugewiesen, und auf jedem Kern eine Parameterprobe der äußersten Schleife berechnet. Dies skaliert nahezu linear mit der Anzahl der verfügbaren Kerne. Als letztes Argument gegen die Toolbox kann noch der Preis aufgeführt werden: Für jede Instanz der Toolbox ist eine Lizenz notwendig.

Es gibt aber für den inneren Teil der Schleifen eine weitere Möglichkeit der Geschwindigkeitssteigerung: die Verwendung von Vektoroperationen. Alle relevanten Daten der Kompartimente liegen in Vektoren. Die Modellannahmen können nahezu alle direkt unter Verwendung von Vektoroperationen für alle Kompartimente des Elements in einem MATLAB-Rechenschritt berechnet werde. Dies ist nicht außergewöhnlich und für MATLAB auch die übliche Empfehlung, wie etwa in Hausser u. Luchko (2011), Seite 316. Diese Berechnungsform ist besonders effizient, da während der Berechnung von Vektoroperationen optimierte Implementierungen eingesetzt werden[9]. Treten bei den Modellannahmen Fallunterscheidungen auf, so kann zunächst ein logischer Vektor bestimmt werden, in dem enthalten ist, für welche Kompartimente ein Fall zutrifft oder nicht.

Insgesamt resultiert die folgende Variante:

```
1  parfor all parameter samples % eine MATLAB-Instanz je Kern
```

[9] http://www.mathworks.de/company/newsletters/articles/matlab-incorporates-lapack.html

```
2     for all time steps
3        for all elements
4           simulate water balance % Vektoroperationen
5        end
6        simulate runoff concentration % Vektoroperationen
7        for all elements
8           simulate channel routing
9        end
10    end
11 end
```

In der Schleife ab Zeile sieben wird der Wellenablauf simuliert. Hier ist es so, dass der Abfluss eines Elements an das nächste Element weitergereicht wird. Eine Parallelisierung erscheint also zunächst nicht möglich. Da diese Schritte aber durch die eingesetzten Rechenoperationen und eine weitere Unterteilung der Elemente nicht unaufwendig sind, lohnt sich die Frage, ob hier nicht weiter optimiert werden kann. Es gibt bereits Ansätze, die Berechnung von Wellenabläufen zu parallelisieren, wie etwa von Hluchy u. a. (2001) beschrieben. Hier geht es aber eher darum, größere Systeme von partiellen Differentialgleichungen zu lösen.

Die vom Autor gewählte Lösung ist ein wenig trivialer: Es werden alle Elemente in voneinander unabhängigen Zweigen des Einzugsgebiets durch Vektoroperationen in einer Operation berechnet. Dazu ist in Abbildung 4.16 das Beispiel eines fiktiven Einzugsgebietes dargestellt. Durch rote Linien werden Ebenen markiert. Alle Elemente einer Ebene sind in unterschiedlichen Zweigen des Gebiets und beeinflussen sich nicht gegenseitig – und können folglich parallel simuliert werden bzw. durch Vektoroperationen berechnet werden.

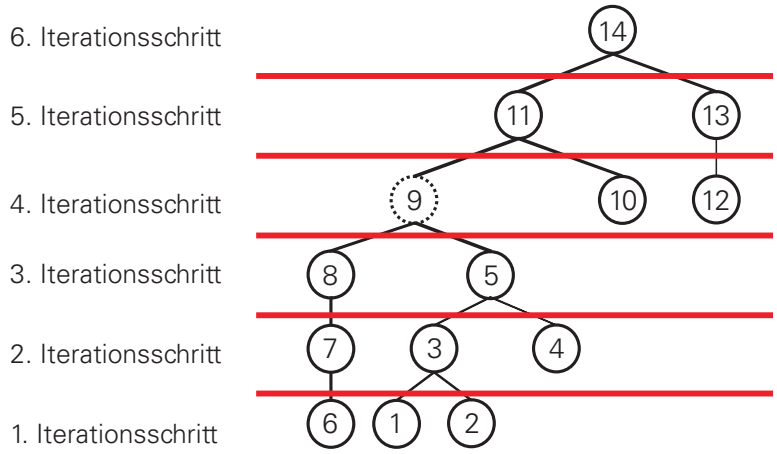

Abb. 4.16. Repräsentation eines Einzugsgebietes als Binärbaum: Alle Elemente einer Ebene können unabhängig voneinander simuliert werden.

Zur Berechnung der Ebenen, im Folgenden *Level* genannt, der einzelnen Elemente kann ein einfacher rekursiver Algorithmus aus dem Bereich der Binärbäume verwendet werden, der für das letzte Element und den Level 0 aufgerufen wird: `calculateLevels(variables.numberOfElements,0)`.

```
1 function calculateLevels(currentIndex, currentLevel)
```

```
2  % CALCULATELEVELS - function to calculate the number of subsequent levels
3  % of each element. This function is working recursively. First call starts
4  % with level 0 and the last element in the list (outlet of the catchment).
5  % For each of its predecessors, the function is called recursively with
6  % level increased by 1. As a result, we know that all elements with the
7  % same level can be simulated simultaneously  as they do not depend on the
8  % results of each other. The number of iteration steps can thus be reduced
9  % from the number of elements to the maximum level.
10
11 % set level of current Element
12  variables.elements.remainingElementsTillEnd(currentIndex) = currentLevel;
13 % check if this element has a predecessor, if not, there is nothing to do:
14 % recursion is finished (for this branch of the catchment structure).
15  if(~isnan(variables.elements.predecessorElement(currentIndex)))
16      % recursive call with increased level for previous element.
17      calculateLevels(variables.elements.predecessorElement...
18              (currentIndex), currentLevel + 1);
19      % check if there is a second predecessor... if not, there is nothing to
20      % do
21      if(~isnan(variables.elements.secondPredecessorElement(currentIndex)))
22          % recursive call with increased level for second previous element
23          calculateLevels(variables.elements.secondPredecessorElement...
24                  (currentIndex), currentLevel+1);
25      end
26  end
27  % store the maxumum level
28  if(variables.maximumLevel < currentLevel)
29      variables.maximumLevel = currentLevel;
30  end
31  end
```

Wie groß der Vorteil dieser Berechnungsweise ist, hängt im hohen Maße von der Form des Einzugsgebietes ab. Ist das Einzugsgebiet lang und schmal, sind die Elemente also wie an einer Perlenkette aufgereiht – bei der obigen Betrachtungsweise entspräche dies einem zur Liste entarteten Baum – dann ergibt sich keinerlei Vorteil. Ist das Einzugsgebiet aber verzweigt und haben alle Zweige die gleiche Länge, dann entspricht dies im Modell einen vollständigen Baum minimaler Höhe. Die Höhe h eines solchen Binärbaums mit n Elementen / Blättern entspricht $h = \lfloor log\ n \rfloor$ (siehe z. B. Güting u. Dieker (2004), Seiten 92 ff.).

Die Endfassung lautet nun:

```
1  parfor all parameter samples % eine MATLAB-Instanz je Kern
2     for all time steps
3        for all elements
4           simulate water balance % Vektoroperationen
5        end
6        simulate runoff concentration % Vektoroperationen
7        for all levels
8           simulate channel routing % Vektoroperationen
9        end
10    end
11 end
```

Diese Lösung bietet den größten Vorteil bei der Ausführung der Monte Carlo-Simulationen. In anderen Situationen sind effizientere Varianten denkbar. Etwa bei der automatisierten Parameteroptimierung durch einen Algorithmus hängt die Form der günstigsten Lösung von dem konkreten Ablauf des Algorithmus' ab. Dies soll abschließend zum Thema Laufzeitoptimierung anhand des *Shuffled Complex Evolution*-Algorithmus' (Duan u. a. (1993)) beschrieben werden. Es handelt sich dabei um einen genetischen Algorithmus. Für solche Algorithmen bestehen bereits

Lösungsansätze, die generell eine Parallelisierung ermöglichen, wie etwa in Kim (2002) beschrieben. Das dort beschriebene Konzept mehrerer *Populations* kann in der Begriffswelt des *Shuffled Complex Evolution*-Algorithmus' auf die *Complexes* übertragen werden. Jeder *Complex* kann unabhängig von den anderen weiterentwickelt werden und nach jedem Schleifendurchlauf werden die Ergebnisse dieser *Complexes* wieder zusammengeführt, die Gesamtpopulation neu aufgeteilt etc.

Visualisierungen

Zur Darstellung der Modellstruktur sowie zur Unterstützung der Analyse des Bodenmoduls wurden eine Reihe von Visualisierungen implementiert, die im Folgenden in Ausschnitten vorgestellt werden. Die erste Funktion heißt `showCatchmentStructure` und dient der Darstellung der Gebietsstruktur. In Abbildung 4.17 sind eine Reihe von möglichen Ausgaben dieser Funktion dargestellt.

In Teil a) ist das Resultat gezeigt, das beim Aufruf ohne zusätzliche Argumente erscheint. Jedes Element wird durch einen Kreis repräsentiert. Die Fläche der Kreise entspricht 75 % der tatsächlichen Fläche. Durch die Rottöne wird die Anzahl der nachfolgenden Elemente gekennzeichnet: Alle Elemente mit der gleichen Färbung haben den gleichen *Level* (siehe vorheriges Unterkapitel) und somit kann das Flood Routing dieser Elemente parallel berechnet werden. Prinzipiell ist diese Funktion beliebig skalierbar, in Kapitel 5 ist sogar das ganze Nahe-Gebiet dargestellt.

Beim Aufruf in Teil b) wurden eine Reihe zusätzlicher optionaler Argumente angegeben. Durch die gelben Punkte wird die Lage der nächsten Klima-Stationen gekennzeichnet, die Luftdruck und / oder Windgeschwindigkeiten liefern (siehe Abschnitt 4.2). Das blaue Gitter zeigt die Lage der InterMet-Stationen. Alle gezeigten Elemente sind interaktiv: Durch Drücken der Maustaste auf einem gelben Kreis werden Informationen zur Klimastation angezeigt; beim Drücken auf einem Element werden die in der Abbildung gezeigten Informationen zu diesem Element dargestellt: die Elementnummer, die Fläche des Elementes, Länge des Vorfluters etc.

Es gibt weitere Interaktionselemente in der Visualisierung, die auf dem gezeigten Ausschnitt aus Platzgründen nicht enthalten sind. Beim Druck auf die entsprechende Schaltfläche kann die Verteilung der Landnutzungsklassen eingeblendet werden, wie in Teil c) dargestellt. Durch die Kuchendiagramme werden die Flächenanteile je Element dargestellt. Durch den Druck auf einen anderen Knopf erscheint analog dazu die Verteilung der Abflussprozesse aller Elemente, wie in Teil d) dargestellt.

Weitere mögliche Argumente der Funktion erlauben auch die Darstellung der minimalen, mittleren und maximalen Feldkapazität je Element. Teil e) zeigt beispielsweise die mittlere Feldkapazität.

Neben dieser statischen Auswertung der Modellstruktur bzw. der Modellparameter gibt es auch noch die Möglichkeit, den Verlauf von Zustandsgrößen flächenhaft darzustellen. Dazu wird während der Simulation der Modellzustand aufgezeichnet und gespeichert. Anschließend kann beispielsweise die Verteilung der Verdunstung an einem bestimmten Tag dargestellt werden, wie in Teil f) zu sehen. Diese Darstellung ist hilfreich bei der Analyse, ob sich die Verdunstungsmuster

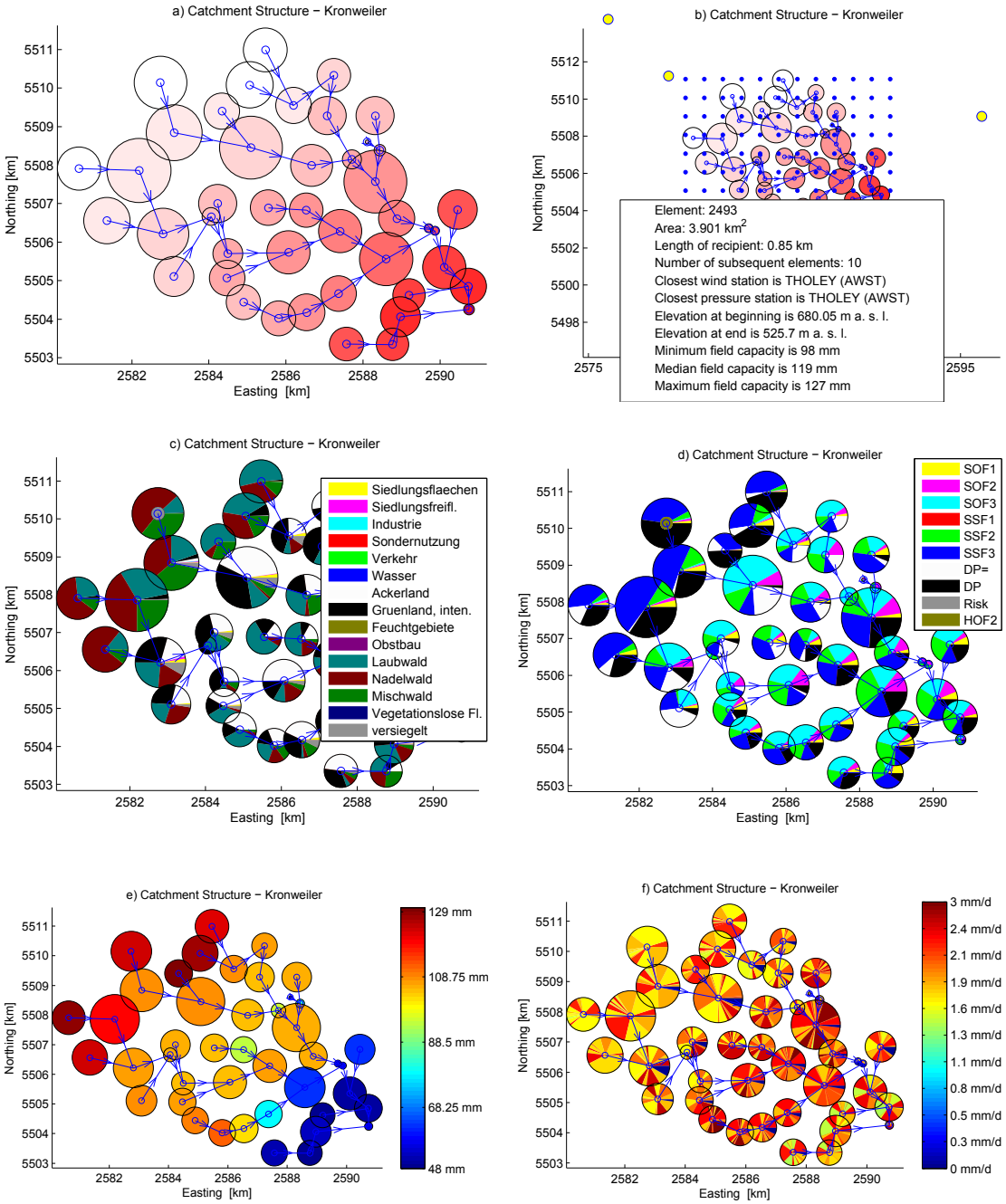

Abb. 4.17. Visualisierung der Modellstruktur durch `showCatchmentStructure`: a) Lage, Größe und Vernetzung der Elemente b) zusätzliche Optionen c) Verteilungen der Landnutzungen d) Verteilungen der Abflussprozesse e) Mittlere Feldkapazität je Element f) Auswertung von Ausgabegrößen: Verdunstung an einem konkreten Tag

bei der inhomogenen Parametrisierung von denen der homogenen Parametrisierung unterscheiden (siehe Casper u. Vohland (2008)).

Eine wesentlich tiefer gehende Darstellung des Modellzustandes erlaubt die Funktion `showModelState`, die durch die folgende Vorgehensweise aufgerufen wird: Wird in der Darstellung der Gebietsstruktur zusätzlich zur Maustaste die Umschalttaste gedrückt, so erscheint eine Liste der Kompartimente des gewählten Elementes. Nach Auswahl eines Kompartiments erscheint das Fenster von `showModelState`, das in Abbildung 4.18 dargestellt ist. Diese Visualisierung dient im Wesentlichen der Analyse des Bodenmoduls, es können aber auch die Wechselwirkungen mit anderen Modellkomponenten nachvollzogen werden.

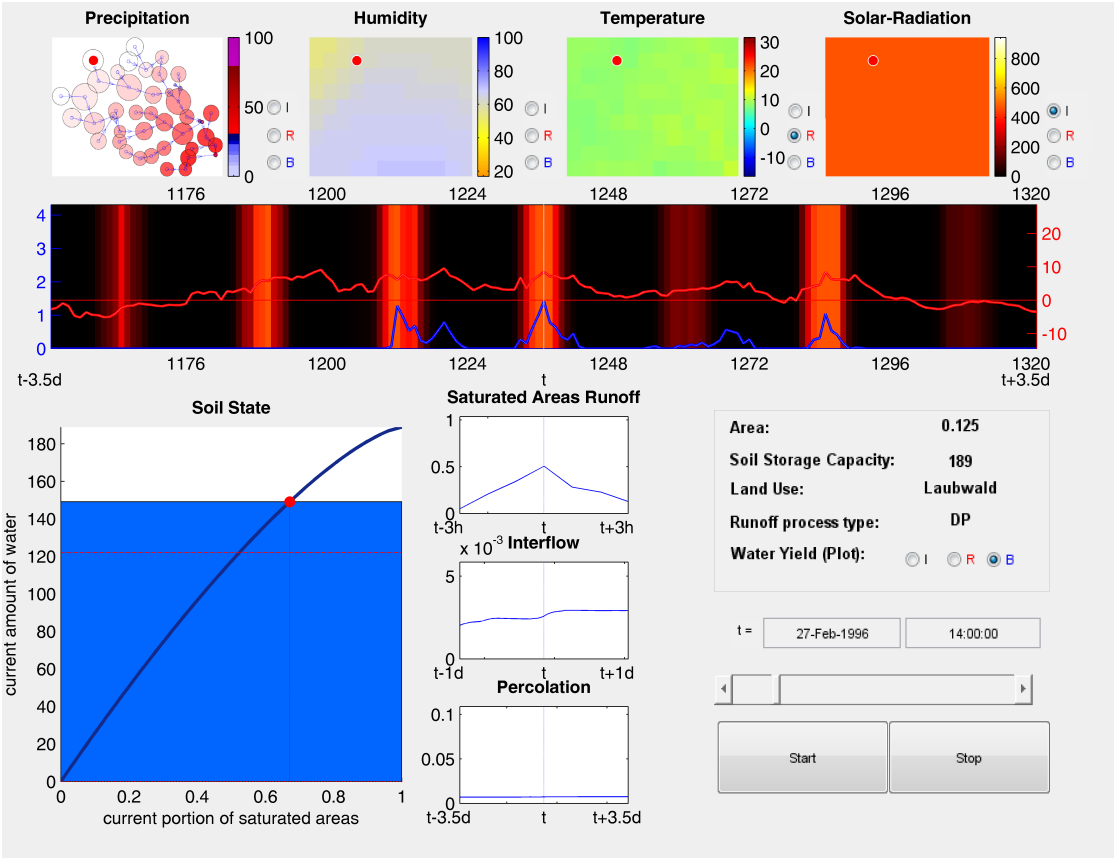

Abb. 4.18. Visualisierung des Bodenmoduls

Im oberen Teil der Abbildung befinden sich nebeneinander die flächenhaften Darstellungen der meteorologischen Eingangsgrößen Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Globalstrahlung zum aktuellen Zeitschritt. Der Bereich, in dem der Niederschlag dargestellt wird, ist der üblichen Darstellungsweise von Niederschlagsradardaten nachempfunden: Im Hintergrund ist das Gebiet selbst zu sehen, darüber der Niederschlag, falls es im ausgewählten Zeitschritt regnet, was im aktuell dargestellten Zeitschritt nicht der Fall ist. In den anderen drei Feldern wird die räumliche Verteilung durch entsprechende Farben dargestellt, wo-

bei jede Farbskala zur Größe so ausgewählt wurde, dass hohe oder niedrige Werte der entsprechenden Größe mit den verwendeten Farben assoziiert werden: Blau ist feucht bzw. kalt, Rot warm bzw. trocken, Schwarz dunkel, Weiß hell. Die Lage des ausgewählten Elementes in dieser flächenhaften Darstellung ist jeweils durch einen roten Punkt markiert (die Lage des Kompartiments im Element ist nicht bekannt).

Neben den vier Diagrammen befinden sich je drei Knöpfe mit den Beschriftungen „I“, „R“ und „B“. Mit diesen Knöpfen können drei beliebige Größen ausgewählt werden, deren zeitlicher Verlauf im breiten Diagramm darunter für eine Woche dargestellt wird. In dessen Mitte befindet sich der aktuelle Zeitschritt, links die Vergangenheit, rechts die Zukunft. Bevor dieses Diagramm näher erläutert wird, sollte noch das Infofeld rechts erwähnt werden, in dem Informationen zum ausgewählten Kompartiment angezeigt werden: die Fläche, die Kapazität des Bodenspeichers (W_m), die Landnutzung und der Abflussprozesstyp. Es gibt ein weiteres Element in diesem Feld: die Auswahl des Wasserdargebots (Niederschlag abzüglich Interzeptionsverluste abzüglich Neuschnee zuzüglich Schneeschmelze) für das mittlere Feld. Bei der aktuellen Darstellung ist dieses Wasserdargebot in Blau ausgewählt („B“); der Verlauf ist im breiten Diagramm in der Mitte sichtbar. Zusätzlich ist in Rot die Lufttemperatur ausgewählt („R“) sowie die Globalstrahlung als Hintergrundbild („I“ für „Image“).

An diesem breiten Diagramm lässt sich recht gut die aktuelle Situation ablesen: Der ausgewählte Zeitschritt ist der 27. Februar 1996 um 14:00 Uhr. Zu sehen ist, dass es vor ein paar Tagen recht kalt war, die Temperatur unter der Grenztemperatur für den Schnee lag (dünne rote Linie). Es muss Schnee liegen, denn im aktuellen Zeitschritt ist das Wasserdargebot deutlich größer als null, obwohl kein Niederschlag fällt (links oben im entsprechenden Diagramm ersichtlich). Ein kurzes Hinzuschalten des Niederschlags in das breite Diagramm würde zeigen, dass es in der ganzen Woche keinen Niederschlag gab. Weiterhin ist am zeitlichen Verlauf zu sehen, dass das Zusammenspiel von höheren Lufttemperaturen und höheren Globalstrahlungswerten an mehreren Tagen für das Schmelzen der Schneedecke um die späten Mittagsstunden sorgt. Am Folgetag ist es ein wenig kühler, ein wenig bedeckter, die Schneeschmelze geringer. Erst zwei Tage später werden wieder höhere Temperaturen einhergehend mit höherer Globalstrahlung erreicht. Am vorletzten Tag war die Lufttemperatur zwar auch moderat über der Grenztemperatur, aber offensichtlich war das Energiedefizit der Schneedecke zu hoch.

Die Auswirkung dieser Schneeschmelze und des daraus resultierenden Wasserdargebotes auf das Bodenmodul ist im linken unteren Teil dargestellt, der eigentliche Zweck dieser Visualisierung. Im großen Diagramm ist der Boden als Speicher repräsentiert. Aktuell beträgt die Füllung ca. 150 mm, die maximale Füllung beträgt 189 mm (W_m). Ebenfalls dargestellt ist die für die laterale Drainage relevante Schwelle W_Z (dünne rote Linie bei ca. 123 mm). Der dicke rote Punkt auf der Kurve zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte-Sättigungsflächenfunktion, auch wenn sie für das Modell selbst nicht direkt relevant ist.

Neben diesem Speicher befinden sich drei kleinere Diagramme, die die drei Abflusskomponenten des Bodenmoduls zeigen. Die zeitliche Auflösung dieser Dia-

gramme ist der Dynamik der einzelnen Komponenten angepasst: Für die Oberflächenabflüsse werden sechs Stunden gezeigt, für die laterale Drainage zwei Tage, für die Perkolation eine Woche. Im oberen Diagramm ist zu sehen, dass die Schneeschmelze um die Mittagszeit einen Spitze bei den Oberflächenabflüssen erzeugt: etwa 0,5 mm Oberflächenabfluss werden generiert. Die laterale Drainage darunter reagiert lediglich auf das steigende Niveau im Bodenspeicher, mit dem dazukommenden Wasser (lediglich ein Teil des Wasserdargebotes wird zu Oberflächenabfluss) steigt die Drainage in mehreren Stufen.

Durch die beiden breiten Knöpfe unten rechts wird die Animation gestartet. Es werden je nach Rechenleistung des genutzten Rechners mehrere Zeitschritte pro Sekunde angezeigt. Im oberen Teil laufen dabei die flächenhaften Darstellungen wie ein Film ab, das breite Diagramm in der Mitte bewegt sich von rechts nach links, unten links werden die Auswirkungen auf das Bodenmodul gezeigt, der Bodenspeicher füllt und leert sich.

Die ganze Visualisierung kann auf mehreren Wegen gesteuert werden: Über dem Start- und Stoppknopf befindet sich ein Schieberegler, der auf den gesamten aufgezeichneten Zeitraum skaliert ist: So kann relativ grob aber sehr schnell direkt zu einem bestimmten Zeitraum gesprungen werden. Etwas feinere Möglichkeiten bietet die Datumsanzeige darüber: Beim Druck auf das Datum öffnet sich ein Kalender und der gewünschte Tag kann genau ausgewählt werden. Zusätzlich kann das breite Diagramm mit gedrückter Maustaste verschoben werden, sowohl in die Vergangenheit als auch in die Zukunft.

Dieses beliebige Springen in der Zeit ist nur durch die retrospektive Auswertung möglich. Der Modellzustand wird während der Simulation aufgezeichnet, kann anschließend beliebig ausgewertet werden. Eine Animation zur Laufzeit würde das Springen in die Vergangenheit zwar nicht ganz verhindern, aber der Aufwand dafür wäre relativ groß.

4.5 Gütemaße

Ein perfektes Simulationsergebnis – also die vollkommene Übereinstimmung aller simulierten Werte mit den gemessenen Werten – ist aus einer Reihe von Gründen äußerst unwahrscheinlich: Neben der Struktur und der Parametrisierung des Modells selbst sind auch die Messung und räumliche Interpolation der Eingangsdaten, aber auch die Messung des Wasserstandes und die Ableitung des Abflusses aus diesem unterschiedlich großen Unsicherheiten bzw. systematischen und zufälligen Fehlern unterworfen. Deshalb kann ein Simulationsergebnis nur zu einem bestimmten Grad mit den Messungen übereinstimmen.

Wie „gut“ ein Modell bei der Simulation ist, kann auf unterschiedlichsten Wegen quantifiziert werden: Es gibt eine Reihe von etablierten Maßzahlen, von denen im Folgenden einige vorgestellt werden. Die Auswahl beschränkt sich auf die Maße, die auch für das homogen parametrisierte Modell durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig berechnet wurden (siehe Elpers u. a. (2008), Anhang C), um einen objektiven Vergleich zu erlauben.

Eines der am häufigsten angewendeten Maße ist das Bestimmtheitsmaß (siehe Bahrenberg u. a. (2010), Seite 200):

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{t=1}^{n}\left(Q_t^{obs} - \overline{Q^{obs}}\right)\left(Q_t^{sim} - \overline{Q^{sim}}\right)\right)^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(Q_t^{obs} - \overline{Q^{obs}}\right)^2 \cdot \sum_{t=1}^{n}\left(Q_t^{sim} - \overline{Q^{sim}}\right)^2}, \tag{4.15}$$

mit

Q_t^{obs}	$[m^3/s]$	gemessener Abfluss im Zeitschritt t,
Q_t^{sim}	$[m^3/s]$	simulierter Abfluss im Zeitschritt t,
$\overline{Q^{obs}}$	$[m^3/s]$	mittlerer gemessener Abfluss,
$\overline{Q^{sim}}$	$[m^3/s]$	mittlerer simulierter Abfluss und
n	$[-]$	Anzahl der Zeitschritte

Der Wertebereich liegt dabei im Intervall $[0, 1]$, größere Werte sind besser. Das Maß beziffert den Anteil der Varianz in den gemessenen Daten, der durch das Modell erklärt werden kann (vgl. Moriasi u. a. (2007)).

Neben diesem Maß ist die am häufigsten verwendete Maßzahl die Nash-Sutcliffe-Effizienz (siehe Nash u. Sutcliffe (1970)):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}\left(Q_t^{obs} - Q_t^{sim}\right)^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(Q_t^{obs} - \overline{Q^{obs}}\right)^2}. \tag{4.16}$$

Hier liegt der Wertebereich im Intervall $]-\infty, 1]$, wobei 1 der optimale Wert ist. Relevant ist noch der Wert 0: Diesen erreicht ein Modell, das immer den mittleren Abfluss vorhersagt. Aus einer Reihe von Gründen ist die Nash-Sutcliffe-Effizienz der Standard, einer der wichtigsten ist die große Verbreitung und damit die Vergleichbarkeit (siehe Moriasi u. a. (2007)). Weiterhin wurde die Nash-Sutcliffe-Effizienz vielfach positiv evaluiert, etwa McCuen u. a. (2006) kommen zu dem Schluss: „The Nash-Sutcliffe index can be a reliable goodness-of-fit statistic *if it is properly interpreted.*“ Insbesondere die hervorgehobene Einschränkung ist aber nicht zu vernachlässigen. Es wird unter anderem in diesem Artikel auch ein Schwachpunkt ausgewiesen: „The analyses show that outliers can significantly influence sample values of E_f. Time-offset bias and bias in magnitude can have an adverse effect on E_f.“, wobei mit E_f die Nash-Sutcliffe-Effizienz bezeichnet wird. Eine Möglichkeit, den großen Einfluss einzelner großer Werte oder seltener Hochwasser auf die Nash-Sutcliffe-Effizienz zu reduzieren, ist die Logarithmierung der Werte (siehe Krause u. a. (2005), Abschnitt 2.4).

Es verbleibt aber insbesondere im Hinblick auf die vorliegende Arbeit der genannte Schwachpunkt bezüglich des zeitlichen Versatzes: Bei der Abbildung der Abflussprozesse ist primär das Bodenmodul betroffen. Stimmt also grundsätzlich die Aufteilung des Wassers in Komponenten, so resultiert daraus nicht notwendigerweise eine Ganglinie, die hinsichtlich R^2 oder der Nash-Sutcliffe-Effizienz gut

ist, da die nachfolgenden Komponenten noch zeitliche Aspekte beeinflussen. Diese strenge zeitliche Bewertung, das Vergleichen des simulierten Abflusses der Stunde i mit dem gemessenen Abfluss der Stunde i, ist aber eine Eigenschaft, die allen üblichen statistischen Maßen zugrunde liegt (siehe Moriasi u. a. (2007) oder Krause u. a. (2005)).

Neben dieser objektiven Bewertung durch R^2 oder die Nash-Sutcliffe-Effizienz mit ihren Schwachpunkten gibt es aber insbesondere in den Hochwasservorhersagezentralen (HVZ) der Bundesländer Maßstäbe für den operationellen Betrieb, die von üblichen Maßen abweichen und auch einen Teil der zuletzt genannten Problematik beinhalten. Die Anleitung zur Kalibrierung von LARSIM beschreibt diese Anforderungen folgendermaßen:

„Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Anforderungen an ein WHM im operationellen Einsatz bei der HVZ Baden-Württemberg. Für andere Einsatzzwecke, z. B. die Berechnung von Klimaszenarien, sind teilweise davon abweichende Anforderungen denkbar. Für die HVZ sind gute Simulationsergebnisse vor allem wichtig

- bei Hochwasser im ansteigenden Ast und im Scheitel
- im extremen Niedrigwasserbereich (z. B. 2003)
- Weniger wichtig sind dagegen die abfallenden Äste von Mittel- oder Hochwasser.“

Und:

„Prinzipiell wird in der unten aufgeführten Reihenfolge versucht, die Kalibrierparameter pegelkontrollbereichsweise sinnvoll einzustellen. Dabei ist die visuelle Übereinstimmung von simulierter mit gemessener Ganglinie das wichtigste Kriterium. An zweiter Stelle stehen dann die verschiedenen Gütemaße.“

Zu diesem Zwecke, dem visuellen Vergleich, sind im Anhang auch die Simulationsergebnisse im Vergleich dargestellt. Der visuelle Vergleich und die Beurteilung durch einen Menschen hat aber auch Nachteile: Etwa eine automatisiert durchgeführte Parameteroptimierung ist auf diesem Wege schwierig, weil die dazu eingesetzten Algorithmen in der Regel eine zu minimierende Zielfunktion benötigen: Wie gut das Modell ist, muss immer noch in einer (oder mehreren) Zahl(en) ausgedrückt werden.

In den vergangenen Jahren gab es dazu auch Ansätze, die von rein statistischen Kennwerten wegführen, hin zu eher diagnostischen Maßen, die auch im hydrologischen Sinne interpretiert werden können und somit auch – unter anderem – die im Zitat genannten Kriterien quantifizieren. Einer dieser Ansätze sind die sogenannten *Signature Measures*, die von Yilmaz u. a. (2008) publiziert wurden. Diese Maße vergleichen und bewerten unterschiedliche Abschnitte und Eigenschaften der *Flow Duration Curve* (FDC) – zu Deutsch Abflussdauerlinie – und werden im Folgenden vorgestellt.

Das erste Maß quantifiziert die prozentuale Abweichung in der Bilanz (vgl. Yilmaz u. a. (2008), Gleichung A1):

$$\%BiasRR = \frac{\overline{Q^{sim}} - \overline{Q^{obs}}}{\overline{Q^{obs}}} \cdot 100\%. \tag{4.17}$$

Diese Maß wurde auch unter dem Namen „Bilanz“ in Elpers u. a. (2008) für das homogen parametrisierte Modell berechnet.

Das zweite Maß, $\%BiasFDCmidslope$ („percent bias in FDC midsegment slope“), bezieht sich nun direkt auf die FDC und quantifiziert die prozentuale Abweichung der Steigung im mittleren Segment (vgl. Yilmaz u. a. (2008), Gleichung A2):

$$\%BiasFDCmidslope = \frac{\left(log\left(QS_{0,2}^{sim}\right) - log\left(QS_{0,7}^{sim}\right)\right) - \left(log\left(QS_{0,2}^{obs}\right) - log\left(QS_{0,7}^{obs}\right)\right)}{\left(log\left(QS_{0,2}^{obs}\right) - log\left(QS_{0,7}^{obs}\right)\right)} \cdot 100\%, \tag{4.18}$$

mit

QS_p^{sim}	$[m^3/s]$	simulierter Abfluss, der mit der Wahrscheinlichkeit p überschritten wird und
QS_p^{obs}	$[m^3/s]$	gemessener Abfluss, der mit der Wahrscheinlichkeit p überschritten wird

Das dritte Maß, $\%BiasFHV$ („percent bias in FDC high volume“), gibt die Abweichung im Volumen der oberen 2 % der FDC an (vgl. Yilmaz u. a. (2008), Gleichung A3):

$$\%BiasFHV = \frac{\int_0^{0,02} QS_p^{sim} dp - \int_0^{0,02} QS_p^{obs} dp}{\int_0^{0,02} QS_p^{obs} dp} \cdot 100\%. \tag{4.19}$$

Beim vierten Maß, $\%BiasFLV$ („percent bias in FDC low-segment volume“), lautet die ursprüngliche Definition (vgl. Yilmaz u. a. (2008), Gleichung A4):

$$\%BiasFLV = \frac{\int_{0,7}^1 \left(log\left(QS_p^{sim}\right) - log\left(QS_1^{sim}\right)\right) dp - \int_{0,7}^1 \left(log\left(QS_p^{obs}\right) - log\left(QS_1^{obs}\right)\right) dp}{\int_{0,7}^1 \left(log\left(QS_p^{obs}\right) - log\left(QS_1^{obs}\right)\right) dp} \cdot 100\%. \tag{4.20}$$

Diese Definition hat in Gebieten, in denen der Niedrigwasserabfluss sehr dynamisch ist, einen Nachteil: Es ergibt sich rechnerisch in bestimmten Konstellationen ein Vorzeichen, das falsch interpretiert werden könnte. Ist der simulierte Niedrigwasserabfluss weniger dynamisch als der gemessene, also

$$\left(log\left(QS_{0,7}^{sim}\right) - log\left(QS_1^{sim}\right)\right) \ll \left(log\left(QS_{0,7}^{obs}\right) - log\left(QS_1^{obs}\right)\right),$$

so kann die simulierte Kurve zwar oberhalb der gemessenen liegen, das Integral aber dennoch kleiner sein als das des gemessenen, und damit ein negativer Wert für

$\%BiasFLV$ resultieren (siehe Abbildung 4.19). Ein sinnvolleres Ergebnis wäre ein positives Vorzeichen, falls die simulierte FDC oberhalb der gemessenen liegt (das Modell *über*schätzt den Niedrigwasserabfluss), bzw. ein negatives im umgekehrten Fall (das Modell *unter*schätzt den Niedrigwasserabfluss). Aus diesem Grund wird $\%BiasFLV$ abweichend von Yilmaz u. a. (2008) wie folgt definiert:

$$\%BiasFLVmodified = \frac{\int_{0,7}^{1}\left(log\left(QS_p^{sim}\right) - log\left(QS^{min}\right)\right)dp - \int_{0,7}^{1}\left(log\left(QS_p^{obs}\right) - log\left(QS^{min}\right)\right)dp}{\int_{0,7}^{1}\left(log\left(QS_p^{obs}\right) - log\left(QS^{min}\right)\right)dp} \cdot 100\%, \tag{4.21}$$

wobei QS^{min} das Minimum von QS_1^{sim} und QS_1^{obs} ist.

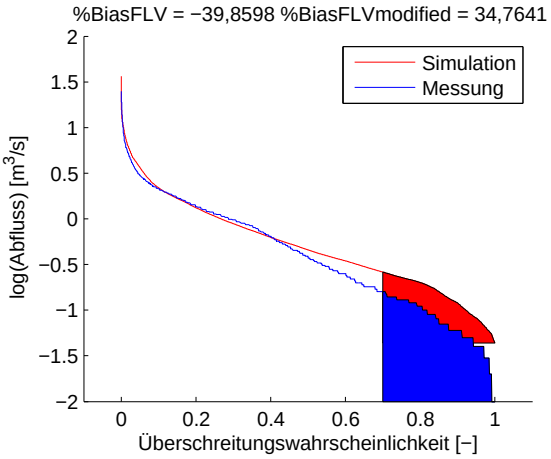

Abb. 4.19. Beispiel, in dem sich für $\%BiasFLV$ ein negatives Vorzeichen ergibt, obwohl die simulierte Abflussdauerlinie oberhalb der gemessenen liegt

Der fünfte und letzte Index, $\%BiasFMM$, ist der prozentuale Unterschied der logarithmierten Mediane (vgl. Yilmaz u. a. (2008), Gleichung A6):

$$\%BiasFMM = \frac{\log\left(QS_{0,5}^{sim}\right) - log\left(QS_{0,5}^{obs}\right)}{log\left(QS_{0,5}^{obs}\right)} \cdot 100\%. \tag{4.22}$$

Zur Verdeutlichung aller *Signature Measures* zeigt Abbildung 4.20 zwei stark voneinander abweichende Abflussdauerlinien. Die rote Linie repräsentiert ein Simulationsergebnis, die blaue Linie eine gemessene Zeitreihe. In der Abbildung sind die verschiedenen Merkmale hervorgehoben, die zur Berechnung der einzelnen Maße verwendet werden.

Das erste Maß, $\%BiasRR$, berechnet die prozentuale Abweichung der Mittelwerte und damit auch die Abweichung der Gesamtvolumina. In der Abbildung ist der Mittelwert der nicht logarithmierten Werte mit einem Kreis markiert: ca. $4\,m^3/s$ bei der simulierten, ca. $3{,}2\,m^3/s$ bei der gemessenen Ganglinie. Wird dieses

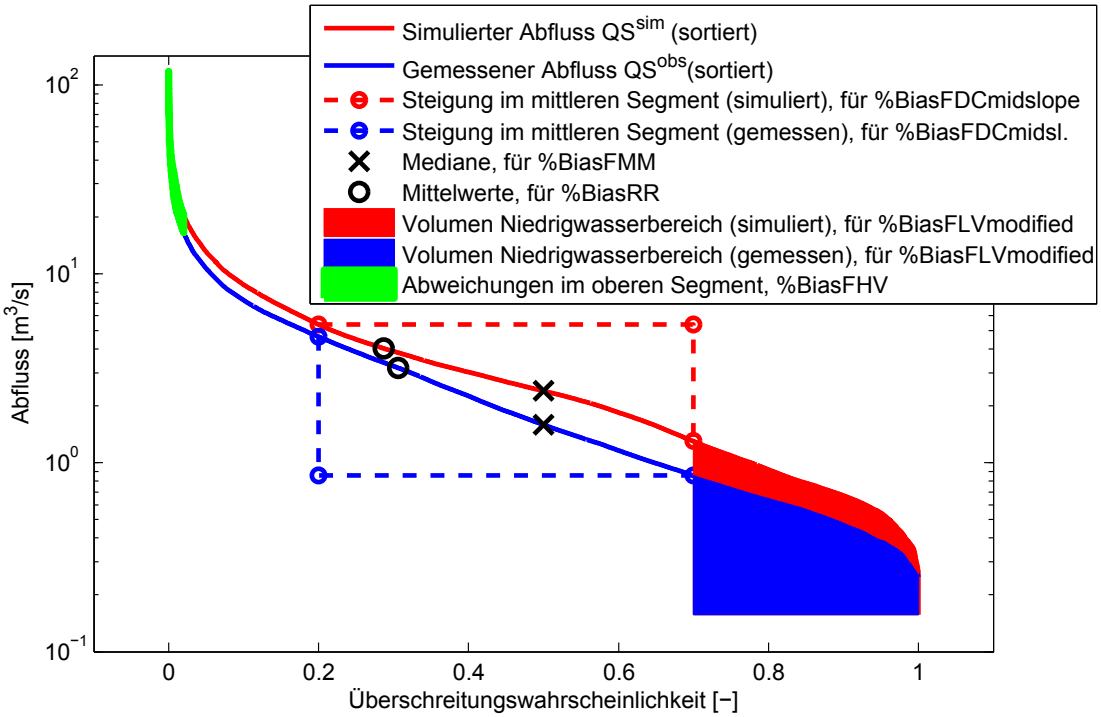

Abb. 4.20. Beispielabflussdauerlinien mit markierten Merkmalen, die zur Berechnung der Signature Measures verwendet werden

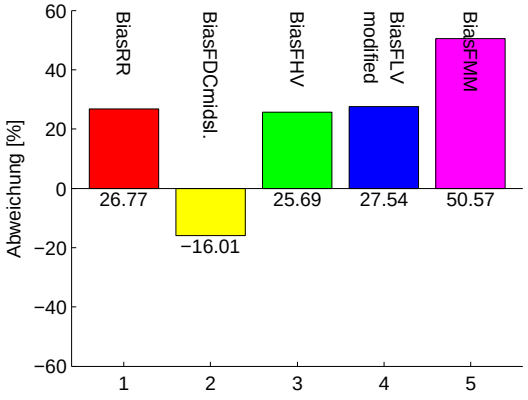

Abb. 4.21. Werte der Maße für die Abbildung 4.20 gezeigten Beispielabflussdauerlinien

Maß minimiert, so bildet das Modell die Bilanz möglichst gut ab. Weitergehende Untersuchungen, die dieses Qualitätsmerkmal benötigen, wie etwa die Auswertung der Verdunstung, sind so erst möglich.

Das zweite Maß, $\%BiasFDCmidslope$, verwendet die mit gestrichelten Linien hervorgehobenen Steigungsdreiecke von p=0,2 bis p=0,7 und gibt das Verhältnis der Höhen beider Dreiecke zueinander an. Diese Steigung im mittleren Segment beurteilt die Übereinstimmung der Reaktivität des Modells mit der Messung.

Das dritte Maß, $\%BiasFHV$, quantifiziert die Abweichungen im oberen Segment, die in der Abbildung zwar in Grün hervorgehoben sind, streng genommen wird aber die Fläche zwischen nicht logarithmierten Kurven bewertet. Dieses Maß gibt an, wie gut das Modell die Volumina in den Spitzen abbildet. Wichtig ist: Damit ist nicht notwendigerweise gemeint, dass die Spitzen hinsichtlich der Höhe getroffen werden!

Das vierte Maß, $\%BiasFLVmodified$, gibt an, wie stark das Modell die Niedrigwasserabflüsse über- oder unterschätzt. In der Abbildung ist dies das Verhältnis der roten Fläche zur blauen (beide enden unten beim gleichen Wert: Q^{min}). In den oben zitierten Kriterien der HVZs wurde erwähnt, dass diese Abbildung des Niedrigwasserbereichs extrem wichtig ist. Dies betrifft insbesondere die größeren Flüsse, bei denen die Frage, ob sie im Vorhersagezeitraum beschiffbar bleiben werden, relevant ist. In manchen HVZs wird dazu in den Sommermonaten auch ein sogenanntes No-Rain-Szenario berechnet (siehe z. B. Bremicker u. a. (2006)).

Das fünfte Maß, $\%BiasFMM$, gibt die Abweichungen der Mediane der logarithmierten Werte an (durch Kreuze hervorgehoben). Dies ist der Abfluss, der in 50 % der Zeit über- bzw. unterschritten wird.

Die konkreten Werte der Maße für die beiden Beispielabflussdauerlinien werden in Abbildung 4.21 gezeigt. Diese Darstellung wird im späteren Verlauf auch zum Vergleich der Ergebnisse verwendet und ist immer einheitlich aufgebaut.

4.6 Teststandards

Gemäß der heute noch gültigen Standards aus Klemeš (1986) wurden die Techniken *split-sample test* und *proxy-basin test* angewendet. Der zur Verfügung stehende Zeitraum wurde in einen Kalibrierungszeitraum und einen Validierungszeitraum aufgeteilt: Analog zur Aufteilung durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig wurde das Jahr 1996 als Einschwingjahr verwendet, die Jahre 1997-1999 zur Kalibrierung und die Jahre 2000-2003 zur Validierung.

Das Konzept des Einschwingjahres ergibt sich aus dem Umstand, dass der Modellzustand zum Anfangszeitpunkt nicht vorliegt. Dies betrifft alle Modellkomponenten: Höhe der Schneedecke, Füllung des Interzeptionsspeichers, Füllung der Bodenspeicher, Füllung der Gebietsspeicher, Volumina im Gerinne. Während ein Teil dieser Werte nach kurzen Zeiträumen dem Verlauf der Eingangsdaten folgende Zustände einnimmt, die keinen Bezug mehr zum Anfangszustand haben, gilt dies für andere Komponenten nicht. Etwa die Füllungen des Basisabflussspeichers benötigen bei extremen Parameteränderungen teilweise sehr lange, bis sie ein in gu-

ten Simulationsergebnissen resultierendes Niveau angenommen haben. Aus diesem Grund wird das erste Jahr des Simulationszeitraums bei der Auswertung verworfen.

Der *proxy-basin test* wurde im eigentlichen Sinne – der Übertragung der Parameter in unbekannte Gebiete – nicht angewendet. Vielmehr wurden die anhand der Ergebnisse von Kronweiler entwickelten Parameterkennfelder in den beiden anderen ausgewählten Untersuchungsgebieten auf ihre Gültigkeit überprüft.

5

Nahegebiet

Als Untersuchungsgebiet dient das Einzugsgebiet der Nahe, da zunächst nur für dieses Gebiet die in Unterkapitel 4.3 beschriebene Bodenhydrologische Karte vorliegt und da für dieses Einzugsgebiet bereits eine Umsetzung von LARSIM existiert, in dessen Systemdateien die erweiterten Bodenparameter schon enthalten sind und bei dessen Aufteilung in Kompartimente die Prozessflächen bereits berücksichtigt wurden (siehe Elpers u. a. (2008)). Im Folgenden soll nun zunächst das Einzugsgebiet im Ganzen beschrieben werden, wobei der Fokus auf den Aspekten liegt, die hinsichtlich LARSIM relevant sind, und ansonsten auf geeignete Quellen verwiesen wird. Anschließend werden die innerhalb des Nahe-Gebietes existierenden Teilgebiete – aus Sicht von LARSIM eigene Einzugsgebiete – beschrieben und die Auswahl der letztendlich verwendeten Gebiete innerhalb der Nahe begründet. Diese ausgewählten Gebiete werden dann im Detail hinsichtlich der relevanten Eigenschaften beschrieben.

Das Einzugsgebiet der Nahe befindet sich im mittleren Teil von Rheinland-Pfalz in Deutschland. Der größte Teil ist dem Hunsrück sowie dem Saar-Nahe-Bergland zuzuordnen. Ganz im Süden gibt es kleine Anteile des Zweibrücker Westrich als Teil des Pfälzisch-Saarländischen Muschelkalkgebiets sowie des Pfälzer Waldes als Teil des Haardtgebirges. Im Osten, hin zur Mündung in den Rhein, sind weitere Teile dem Rheinhessischen Tafel- und Hügelland, dem Unteren Nahehügelland und der Unteren Naheebene als Teile des Nördlichen Oberrheintieflandes zuzuordnen (siehe LUWG (2005), Blatt 01). Weiterhin ist relevant, dass ein Teil der Fläche im Westen zum Saarland gehört, der Rest liegt vollständig in Rheinland-Pfalz.

Die Höhenlagen reichen von knapp über 816 m ü. NN am Erbeskopf als höchster Erhebung des Hunsrücks bis hin zu 80 m ü. NN an der Mündung. Dieser hohe Unterschied wirkt sich auch stark auf die Verteilung der Temperatur aus, die bereits in Unterkapitel 4.2 gezeigt wurde: Die mittleren Jahrestemperaturen liegen zwischen ca. 7,25 °C in den höchsten Lagen und Werten von ca. 10,5 °C an der Mündung. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Niederschlagsverteilung: Die Spannweite der mittleren Jahresniederschläge reicht von ca. 500 mm im Osten bis hin zu Werten von 1300-1350 mm im Westen. Diese Werte variieren allerdings je nach Interpolationsmethode, was später in Kapitel 7.2 diskutiert werden wird.

In Abbildung 5.1 wird nun die Unterteilung der gesamten Nahe in kleinere Gebiete dargestellt. Diese Unterteilung begründet sich einerseits dadurch, dass

auch Ausgaben an Pegeln innerhalb des Nahegebiets gewünscht sind, andererseits dadurch, dass die Simulation der ganzen Nahe hohe Anforderungen an den Arbeitsspeicher des Rechners stellt, auf dem das Modell ausgeführt wird.

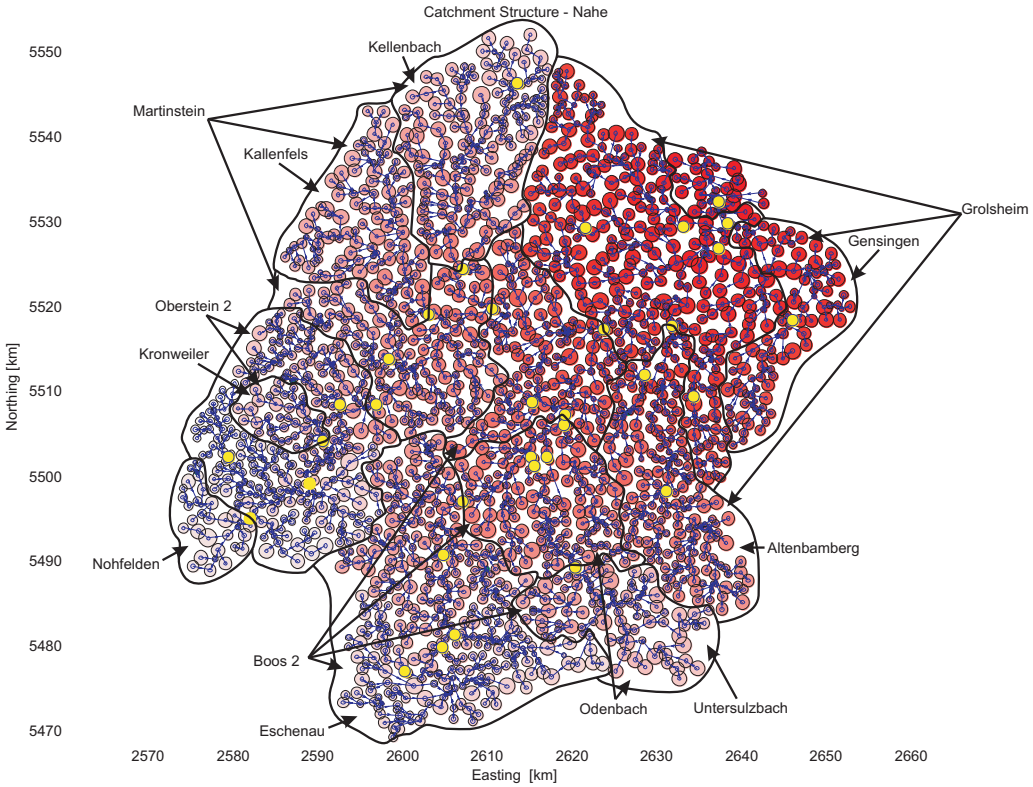

Abb. 5.1. Modellstruktur der gesamten Nahe. Schwarz umrahmte Gebiete stellen die Einzugsgebiete dar, die zu einem Teilmodell zusammengefasst sind. An gelben Punkten liegt ein Pegel.

Die umrahmten Gebiete können generell in zwei Gruppen eingeteilt werden: Kopfeinzugsgebiete und Zwischengebiete. Kopfeinzugsgebiete sind solche, die keinen Zufluss aus anderen Gebieten haben, wie etwa das Einzugsgebiet Kronweiler. Zwischeneinzugsgebiete sind solche, die auch Zuflüsse aus anderen Gebieten haben. Etwa das Gebiet Grolsheim erhält auch Zuflüsse aus dem Gebiet Boos2. Hier gibt es auch unterschiedliche Möglichkeiten: Ein Gebiet kann Teil eines anderen sein (Kronweiler von Oberstein2) oder, wie das zuvor genannte Beispiel, flussabwärts liegen.

5.1 Auswahl der Gebiete

Bei der Auswahl der verwendeten Gebiete ergibt sich durch diese Gruppierung eine erste Einschränkung: Zwischeneinzugsgebiete benötigen Zulaufganglinien. Diese können entweder in Form von gemessenen Daten vorliegen – welche fehlerbehaftet sein können – oder das oberhalb gelegene Gebiet kann ebenfalls simuliert werden

– was ebenfalls fehlerbehaftet ist. Es ist dann nicht eindeutig entscheidbar, ob die Abweichungen, die sich in dem betrachteten Gebiet ergeben, aus falscher Parameterwahl innerhalb dieses Gebiets ergeben oder aus den Fehlern der Zulaufganglinie. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Ansatz lediglich Kopfeinzugsgebiete betrachtet.

Zur Auswahl stehen also im Norden beginnend im Uhrzeigersinn: Kellenbach, Gensingen, Altenbamberg, Untersulzbach, Eschenau, Nohfelden, Kronweiler und Kallenfels. Ein Teil dieser Gebiete scheidet allerdings aus unterschiedlichen Gründen aus.

In einer E-Mail vom 28. Oktober 2011 teilte Frau Yvonne Henrichs (LUWG Mainz, Referat 71 Hydrologischer Dienst der oberirdischen Gewässer, Hochwasserschutz) bezüglich des Pegels Gensingen mit: „Was die W-Q-Beziehung des Pegels angeht, so ist diese einwandfrei belegt, zumindest im Niedrig- und Mittelwasserbereich. Und sie wurde auch durch hydraulische Nachrechnungen bestätigt. Von daher gehen wir mit großer Wahrscheinlichkeit davon aus, dass am Pegel tatsächlich das gemessen wird, was am Pegel ankommt.“ Das Problem ist eher in einem anderen Bereich zu suchen: „Wir vermuten die Ursache in den hydrogeologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes, haben dafür jedoch keine Bestätigung durch Fachkollegen. Für uns stellt es sich so dar, als wenn es Stellen gibt, an denen das Wasser in den Untergrund versickert und nicht mehr im Einzugsgebiet des Wiesbaches [Hauptgewässer des Einzugsgebietes Gensingen] austritt.“ Niederschlag, der innerhalb der Einzugsgebietsgrenzen fällt, kommt also teilweise auf unterirdischen Wegen im Rheintal zum Abfluss. Diese Einschätzung durch Frau Henrichs konnten auch durch Studien der eigenen Arbeitsgruppe zum Thema Klimawandel bestätigt werden (siehe Casper u. a. (2012)).

Der Pegel Untersulzbach ist aus anderen Gründen fragwürdig: „Die gemessene Ganglinie am Pegel Untersulzbach erwies sich als nicht vertrauenswürdig. Während der Sommer- und Herbstmonate weist die gemessene Ganglinie oftmals einen im Vergleich zum restlichen Jahr unrealistisch hohen Basisabfluss auf (z.B. 1997, 2000). Zudem bleibt der Basisabfluss während den Niedrigwasserperioden relativ konstant. Es wird kein allmähliches Leerlaufen der natürlichen Speicher beobachtet. Hier wäre gegebenenfalls zu überprüfen, inwieweit die Messwerte durch z.B. Verkrautung oder Versandung verfälscht sind.“ (siehe Elpers u. a. (2008), Seite 28) Diese Einschätzung wird durch Mitarbeiter des LUWG bestätigt. Ein möglicher Grund für die Schwierigkeiten sind die hohen Anteile von Stadtabfluss im Gebiet, die Stadt Kaiserslautern liegt dort.

Eschenau ist ein vergleichsweise großes Gebiet. Da das Modell im Rahmen der Untersuchungen sehr häufig ausgeführt werden soll, sind im ersten Schritt kleinere Gebiete vorzuziehen. Für spätere Zeitpunkte erscheint das Gebiet aber grundsätzlich geeignet.

Das Einzugsgebiet Nohfelden liegt mit Teilen im Saarland. Die daraus resultierenden unterschiedlichen Datenquellen werden seitens der Mitarbeiter des LUWG als nicht konsistent eingeschätzt.

Es verbleiben also die Gebiete Kellenbach, Altenbamberg, Kronweiler und Kallenfels. Da Kellenbach und Kallenfels direkt benachbart sind und sich die beiden

Gebiete hinsichtlich der relevanten Eigenschaften nur unwesentlich unterscheiden, wird lediglich eines der beiden Gebiete verwendet und die endgültige Auswahl lautet: Kellenbach, Altenbamberg und Kronweiler.

Bevor nun diese drei Gebiete im Detail beschrieben werden, erfolgt noch eine Übersicht der wichtigen Kenngrößen und Eigenschaften in Tabelle 5.1.

Eigenschaft	Altenbamberg	Kellenbach	Kronweiler
Fläche	$318\,km^2$	$362\,km^2$	$64,6\,km^2$
Elemente	223	179	44
Kompartimente	4180	3411	855
Fließlänge	$50,7\,km$	$48,5\,km$	$16,7\,km$
maximale Höhe	564 m ü. NN	654 m ü. NN	722 m ü. NN
minimale Höhe	127 m ü. NN	220 m ü. NN	295 m ü. NN
NQ	$0,105\,m^3/s$	$0,027\,m^3/s$	$0,008\,m^3/s$
MNQ	$0,351\,m^3/s$	$0,296\,m^3/s$	$0,049\,m^3/s$
MQ	$1,73\,m^3/s$	$2,66\,m^3/s$	$0,917\,m^3/s$
MHQ	$26\,m^3/s$	$49,7\,m^3/s$	$22,8\,m^3/s$
HQ	$55,2\,m^3/s$	$149\,m^3/s$	$60,6\,m^3/s$
Mq	$5,44\,l\,s^{-1}\,km^{-2}$	$7,35\,l\,s^{-1}\,km^{-2}$	$14,2\,l\,s^{-1}\,km^{-2}$
MHq	$81,7\,l\,s^{-1}\,km^{-2}$	$137\,l\,s^{-1}\,km^{-2}$	$353\,l\,s^{-1}\,km^{-2}$

Tabelle 5.1. Ausgewählte Eigenschaften der Einzugsgebiete im Überblick (Quelle: MULEWF (2013))

Für alle Einzugsgebiete liegen in Form der Pegelsteckbriefe zahlreiche weitere Informationen vor, die unter MULEWF (2013) verfügbar sind.

5.2 Altenbamberg

In Abbildung 5.2 wird die Modellstruktur von Altenbamberg in LARSIM gezeigt. Innerhalb des Einzugsgebietes gibt es weitere Pegel: Ungefähr in der Mitte liegt der Pegel Imsweiler, im nordwestlichen Teil liegt Obermoschel.

Im Einzugsgebiet Altenbamberg dominiert die Landnutzung Ackerland mit einem Flächenanteil von 37,5 %. Die nächstkleineren Anteile sind Laubwald mit 22,3 % und Grünland mit 20 %. Kleinere Anteile sind Nadelwald (8,2 %) und Mischwald (4,9 %). Die restlichen Landnutzungsklassen von LARSIM nehmen noch kleinere Anteile ein. Der Blick in die Detailabbildungen zu Altenbamberg im Anhang A.1 ab Seite 168 zeigt eine weitestgehend gleichmäßige räumliche Verteilung dieser Landnutzungen, lediglich die Nadelwälder beschränken sich tendenziell auf den südlichen Teil.

Bezüglich der Abflussprozesse dominiert SOF3 mit einem Flächenanteil von 31,4 % gefolgt von DP mit 27,8 %. Es folgen SSF3 mit 16,4 %, SSF2 mit 13,3 %, SOF2 mit 6,5 % und SOF1 mit 4,1 %. Der Anteil der DP=-Flächen beträgt lediglich 0,6 %. Die räumliche Verteilung ähnelt der Verteilung der Landnutzungen:

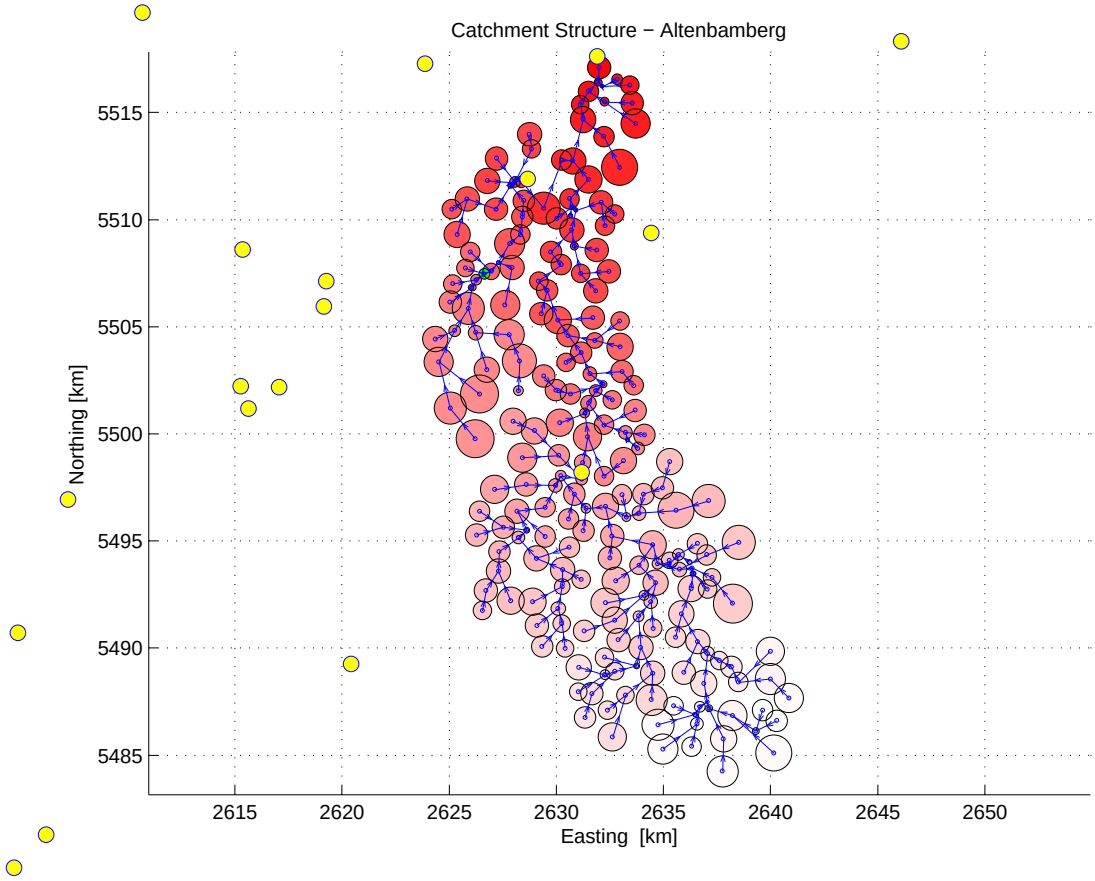

Abb. 5.2. Modellstruktur Altenbamberg. An den gelb markierten Stellen befinden sich Pegel. Das grüne Element ist ein Nullelement.

weitestgehend gleichmäßig bis auf den Anteil der DP-Flächen, der im Süden wohl aufgrund der Nadelwälder ein wenig höher ist.

Die räumlichen Verteilungen der mittleren nutzbaren Feldkapazitäten und der mittleren Luftkapazitäten je Element sind innerhalb des Einzugsgebietes weitestgehend homogen. Das gleich gilt für die minimalen Kapazitäten je Element. Lediglich bei den maximalen Kapazitäten zeigt sich, dass im südlichen Teil höhere Werte erzielt werden, auch dies vermutlich aufgrund der Wälder.

5.3 Kellenbach

Kellenbachs Struktur in LARSIM wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Auch hier liegt ein weiterer Pegel innerhalb des Gebiets: Steinbach im Norden.

Gegenüber Altenbamberg zeigt sich eine leicht abweichende Verteilung der Flächenanteile einzelner Landnutzungen. Mit 33,5 % der Flächen liegt Ackerland auf einem ähnlich hohen Niveau, der Anteil der Wälder ist aber größer: 20 % Nadelwald, 13 % Laubwald und 9,7 % Mischwald. Der drittgrößte Anteil ist Grünland mit 19 %. Die restlichen Landnutzungen nehmen kleinere Anteile ein. Auch die

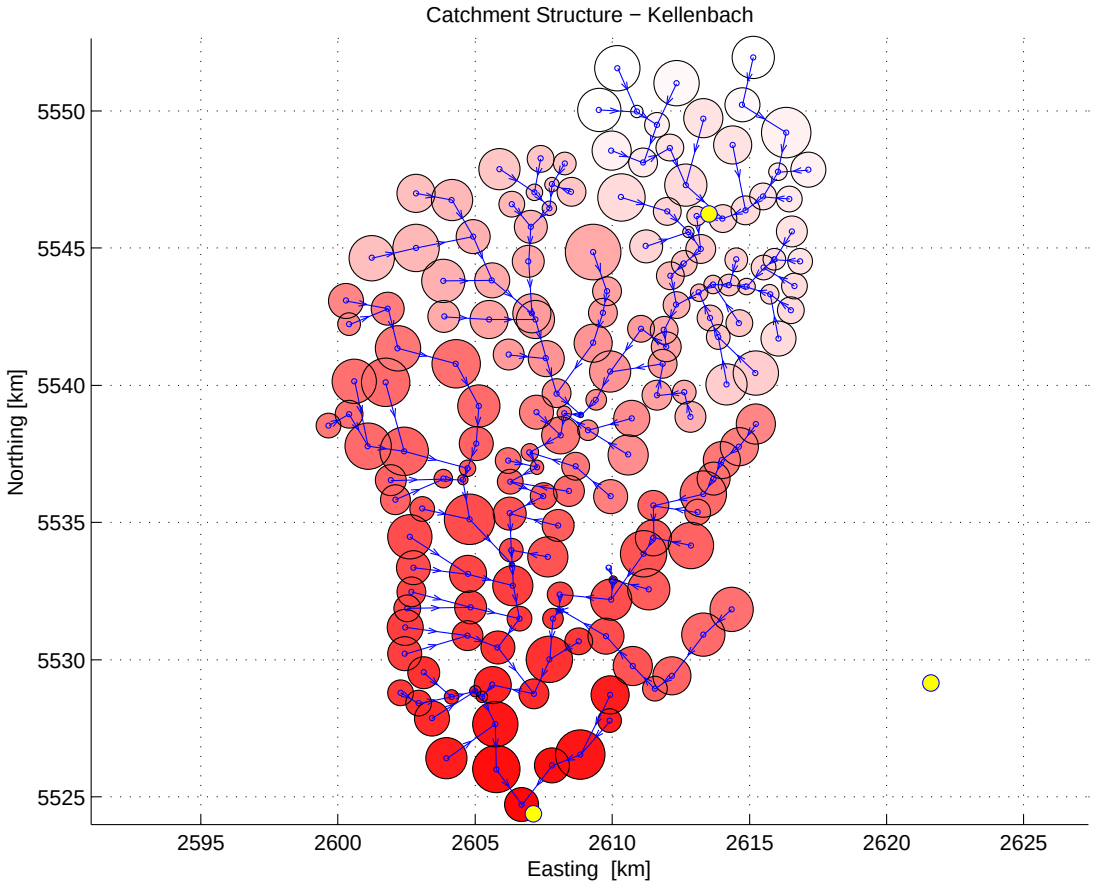

Abb. 5.3. Modellstruktur Kellenbach. An den gelb markierten Stellen befinden sich Pegel.

räumliche Verteilung, dargestellt auf Seite 169, zeigt inhomogenere Muster: Im südöstlichen Teil in den Tälern des Bruehlbachs und des Lametbachs ist der Anteil der Wälder deutlich höher als im Rest des Einzuggebietes.

Bei der Verteilung der Abflussprozesse gibt es deutliche Unterschiede: Für 36,3 % der Flächen wurde DP= ausgewiesen. Es folgt SOF3 mit 29,9 %, SSF3 mit 16,8 %, SSF2 mit 5,9 %, SOF2 und DP mit je 4,3 % und SOF1 mit 2,5 %. Die räumliche Verteilung zeigt ähnliche Muster wie die Verteilung der Landnutzungen: Die DP- und SSF3-Flächen treten in den stärker bewaldeten Tälern im Südosten häufiger auf.

Bezüglich der Verteilungen der nutzbaren Feldkapazitäten und Luftkapazitäten ergibt sich kein einheitliches Bild. Sowohl die minimalen als auch die mittleren als auch die maximalen sind weitestgehend gleichmäßig verteilt.

5.4 Kronweiler

Das kleinste Einzugsgebiet der drei ausgewählten ist Kronweiler. Es wird aufgrund seiner Größe und der damit verbundenen geringen Anzahl von Elementen für die

eigentliche Entwicklung verwendet, da die aus diesem Umstand resultierenden Simulationszeiten erfreulich kurz sind. Die Struktur in LARSIM wird in Abbildung 5.4 gezeigt, wobei hier zusätzlich die Elementnummern angegeben werden, da im späteren Verlauf hin und wieder auf diese Nummern Bezug genommen wird.

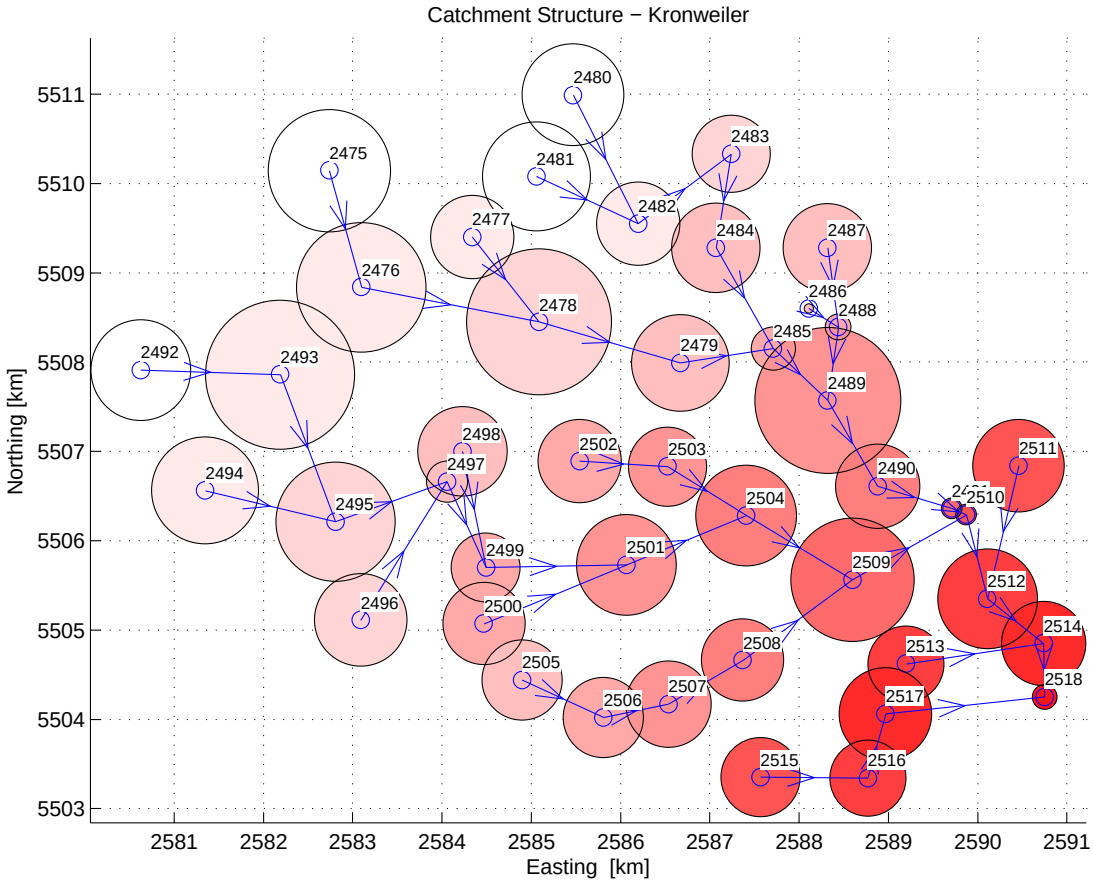

Abb. 5.4. Modellstruktur Kronweiler mit Angabe der Elementnummern

Kronweiler unterscheidet sich hinsichtlich der Landnutzung deutlich von den anderen Gebieten: Mehr als die Hälfte der Fläche ist bewaldet. 24,4 % sind Laubwald, 19,3 % sind Nadelwald, 12,8 % sind Mischwald. Es wird auf 20,2 % der Fläche Ackerbau betrieben, weitere 19,9 % sind Grünland. Auch hier sind die Anteile der restlichen Nutzungen deutlich geringer.

Hinsichtlich der Verteilung der Landnutzungen ergeben sich ebenfalls deutliche Unterschiede, die schon im Unterkapitel 4.1.1 bei der Beschreibung der Aufteilung des Gebiets in Elemente sichtbar waren und später im Unterkapitel 6.1.1 auch genutzt werden. Es gibt zwei Gruppen, die auch der Gliederung des Einzugsgebietes hinsichtlich der Naturräume entsprechen: Der nordwestliche Teil ist fast ausschließlich bewaldet, im restlichen Teil dominieren Ackerland und Grünland, wobei auch dort die Anteile der Wälder immer noch im Bereich von ca. 25 % der Fläche liegen (siehe Detailabbildungen auf Seite 170).

Bei den Abflussprozessen dominiert SSF3 mit einem Flächenanteil von 27,8 %, es folgen SOF3 mit 20,4 %, DP mit 19,6 %, SSF2 mit 15,3 %, DP= mit 7,2 %, SOF2 mit 5,8 % und SOF1 mit 3,9 %. Auch bei der Verteilung der Prozesse in der Fläche zeigt sich das gleiche Muster wie bei der Verteilung der Landnutzungen: Es gibt zwei Gruppen, im Nordosten dominieren SSF3 und DP, im Rest dominiert SOF3.

6

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden nacheinander die durchgeführten Schritte zur Abbildung der Bodenhydrologischen Karte beschrieben:

- Das Modell wurde einer ausführlichen Verhaltensanalyse durch Anwendung von Monte Carlo-Methoden unterzogen (Unterkapitel 6.1).
- Es wurden Parameter entwickelt, um inhomogene Bodenparameter zu skalieren, und so das Modell an weitere Einzugsgebiete anzupassen (Unterkapitel 6.2).
- Die unterschiedlichen Abflusstypen wurden abgebildet, indem die Gebietsspeicher modifiziert wurden (Unterkapitel 6.3).
- Der Arbeitsfluss der Kalibrierung mit den beiden neuen Parametern wird anhand eines Beispiels im Detail beschrieben, die Kalibrierungsergebnisse der weiteren Einzugsgebiete werden zusammengefasst (Unterkapitel 6.4).
- Die Ergebnisse wurden validiert, indem ungenutzte Zeiträume ausgewertet wurden, kleinere Einzugsgebiete innerhalb der kalibrierten Gebiete betrachtet wurden und indem das Abflussverhalten der einzelnen Kompartimente beurteilt wurde (Unterkapitel 6.5).

6.1 Verhaltensanalyse

Nach der erfolgreichen Implementierung von LARSIM in MATLAB folgte eine ausgiebige Verhaltensanalyse. Ziel dieser Analyse war es, den konkreten Einfluss der einzelnen Parameter zu untersuchen, sensitive Bereiche für jeden Parameter zu detektieren, herauszufinden, ob sich das Verhalten bei homogener Parametrisierung von dem Verhalten bei inhomogener Parametrisierung unterscheidet, und – im Idealfall – gute Parameterkombination für die einzelnen Abflussprozesse zu finden.

Dazu wurden zunächst die einzelnen Parameter näher betrachtet, die im Bodenmodul verwendet werden:

1. b (Parameter in der Modellannahme der Oberflächenabflüsse)
2. r_dmin (Parameter für die laterale Drainage)
3. r_dmax (Parameter für die laterale Drainage oberhalb W_Z)
4. β (Anteil der Speicherfüllung, der perkoliert)
5. W_m (Kapazität des Bodenspeichers)

6. W_Z (Schwellwert für laterale Drainage)
7. VDB (Skalierung der Perkolation)

Die Werte von 5. bis 7. werden bei den im Nahe-Gebiet verwendeten Optionen aus verfügbaren Geodaten abgeleitet: Für W_Z wird die nutzbare Feldkapazität in Millimetern verwendet, für W_m die Summe der nutzbaren Feldkapazität und der Luftkapazität und der Wert von VDB wird anhand der Geologie abgeleitet. Es verbleiben somit die vier zuerst genannten Parameter, deren Werte zu finden sind.

Für die im Folgenden angewendeten Monte Carlo-Methoden galt es zunächst, den zu beprobenden Wertebereich festzulegen. Diese Wertebereiche wurden festgelegt, indem die Angaben aus der Kalibrieranleitung herangezogen und mit den Werten abgeglichen wurden, die bei der homogenen Parametrisierung im Nahe-Gebiet tatsächlich verwendet wurden. Es ergaben sich die in Tabelle 6.1 gezeigten Werte, wobei die in den letzten Spalten gezeigten Intervalle verwendet wurden.

Parameter	Wertebereich Nahe	Kalibrier-anleitung	verwendet homogen	verwendet inhomogen
b	$[0,18;\ 0,4]$	$[0,1;\ 0,5]$	$[0,1;\ 0,5]$	$[0;\ 2]$
r_dmin	$[0,1;\ 0,4]$	–	$[0,1;\ 0,4]$	$[0;\ 2]$
r_dmax	$[0,1;\ 0,2]$	$[0;\ 5]$	$[0,1;\ 0,2]$	$[0;\ 2]$
β	$[0,0024;\ 0,007]$	[0,0005; 0,05]	$[0,0005;\ 0,05]$	$[0;\ 0,1]$

Tabelle 6.1. Übersicht der Wertebereiche für die vier variierten Bodenparameter: im Nahegebiet bei homogener Parametrisierung verwendet, gemäß Kalibrieranleitung, für die homogene Monte Carlo-Simulation verwendet, für die inhomogene Monte Carlo-Simulation verwendet

Die Festlegung der Grenzen ist eine Gratwanderung: Wird der Wertebereich eines Parameters verdoppelt, so erhöht sich die Anzahl der zu ziehenden Proben ebenfalls um den Faktor zwei. Werden also alle vier Parameter in größeren Intervallen beprobt, so steigt die Anzahl der nötigen Proben mit der vierten Potenz. Ist der Wertebereich zu klein, so kann es sein, dass die gesuchte Lösung außerhalb des beprobten Raums liegt. Die Ergebnisse haben aber gezeigt, dass die Wahl der Grenzen sinnvoll war.

Bei der inhomogenen Variante wurden die Wertebereiche deutlich vergrößert, da der als sinnvoll bekannte Wertebereich nur für eine homogene Parametrisierung gültig ist. Hier zeigen alle Kompartimente lediglich ein mittleres Verhalten. Sollen einzelne Kompartimente ein Verhalten zeigen, dass deutlich von diesem mittleren Verhalten abweicht, so müssen unter Umständen Parameter gewählt werden, die deutlich außerhalb des bisher genutzten Wertebereichs liegen. Auch hier zeigte sich später, dass die Grenzen zweckdienlich gewählt wurden, bis auf geringe Einschränkungen bei der lateralen Drainage, worauf später bei der Ergebnisbeschreibung aber näher eingegangen wird.

Als Beprobungsstrategie wurde das *Latin Hypercube Sampling* gewählt, bei dem der Parameterraum in gleichmäßige Intervalle aufgeteilt wird, die dann zufällig be-

probt werden (siehe McKay u. a. (1979)). Gegenüber einfacheren Beprobungsstrategien wie etwa dem *Random Sampling* wird so eine ungleichmäßige Abdeckung des Parameterraums verhindert. Zum Ziehen der Proben wurde die MATLAB-Funktion `lhsdesign`[1] verwendet, die Zahlen aus dem Intervall [0; 1] liefert. Vor der Transformation auf das gewünschte Intervall wurden bei der inhomogenen Variante b und β zusätzlich potenziert (Exponent $1,6$), um den Wertebereich, der dem ursprünglich als sinnvoll bekannten entspricht, dichter zu beproben. Dies ist später in der Ergebnisdarstellung sichtbar und es hat sich ebenfalls als sinnvoll erwiesen, da die Proben in dem Bereich, der tatsächlich relevant ist, dichter liegen.

6.1.1 Extrapolation des Abflusses

Bevor die Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation beschrieben werden, wird zunächst noch ein Konzept beschrieben, mit dem die Laufzeit für diese spezielle Anwendung weiter gesenkt werden konnte. Wie im Unterkapitel 4.5 beschrieben, wird zur Entwicklung ausschließlich das Gebiet Kronweiler verwendet. In diesem gibt es 44 Elemente (siehe Abbildung 6.1)[2]. Da während der Verhaltensanalyse primär das Verhalten des Bodenmoduls von Interesse ist, und dieses in seinem Verhalten neben den Parametern nur von den Eingangsdaten, den Bodenparametern, der Landnutzung und dem Abflussprozesstyp abhängig ist, erscheint es wenig sinnvoll, Kompartimente mit gleichen Eigenschaften vielfach mit dem gleichen Parametersatz zu simulieren. Hinsichtlich der Eingangsdaten ist bei der Größe des Einzugsgebietes mit keiner ausgeprägten Heterogenität zu rechnen, bis auf die Höhenabhängigkeit der Temperatur. Folglich wurden in dem Gebiet zwei Gruppen von Elementen gebildet, die jeweils hinsichtlich der Verteilung der Abflussprozsse und der Landnutzung homogen sind und diese Höhenabhängigkeit berücksichtigen.

In den Abbildungen 6.1 und 6.2 sind diese Gruppen in Rot und Grün umrandet. Für jede Gruppe wurde ein Vertreter gewählt, der die gesamte Bandbreite an Eigenschaften bietet, die in der Gruppe auftritt. Diese beiden Elemente sind durch farbige Pfeile markiert: Das Element 2476 für die grüne Gruppe, das Element 2489 für die rote Gruppe. Die Annahme ist nun, dass der Abfluss des gesamten Gebietes aus dem Abfluss dieser beiden Elemente extrapoliert werden kann, indem die Abflüsse der beiden Elemente mit den Flächenanteilen der Gruppen am Gesamtgebiet multipliziert und anschließend um mittlere Fließzeiten der Elemente bis zum Gebietsauslass verzögert werden.

Zu Versuchszwecken wurde zunächst die extrapolierte Ganglinie mit den Parametern berechnet, mit denen auch die homogen parametrisierte Fortran-Implementierung versehen wurde. Es zeigte sich, dass die extrapolierte Zeitreihe der regulär simulierten ähnlicher ist als diese der gemessenen Ganglinie. Ebenso ist die regulär simulierte Zeitreihe der extrapolierten ähnlicher als diese der gemessenen Zeitreihe (hinsichtlich Nash-Sutcliffe-Effizienz und R^2). Später bei den Resultaten wird sich

[1] `http://www.mathworks.de/de/help/stats/lhsdesign.html`

[2] Wie in der Legende der Abbildung zu sehen ist, wurde für die Monte Carlo-Simulation noch die alte Version der Bodenhydrologischen Karte verwendet. In dieser gab es noch die Gruppe *Risk*, die nach der Überarbeitung weggefallen ist.

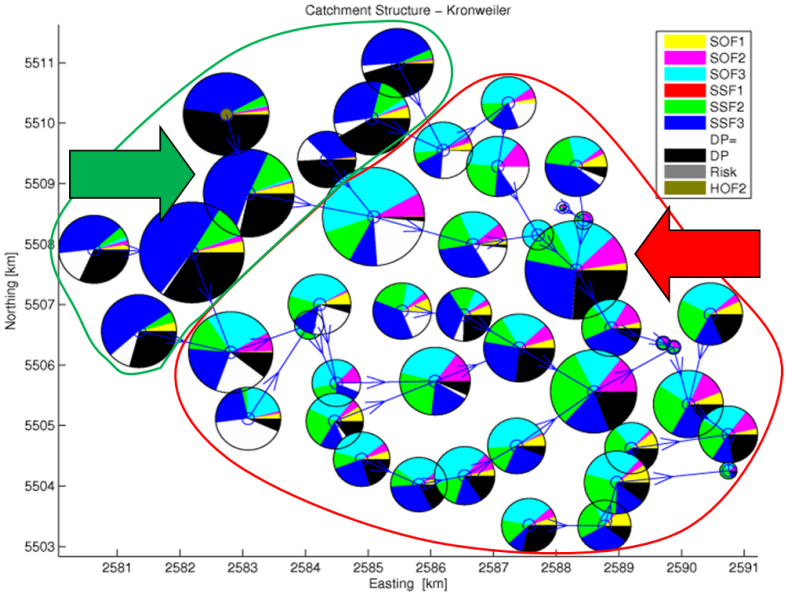

Abb. 6.1. Gruppen von Elementen mit ähnlichen Abflussprozessverteilungen im Einzugsgebiet Kronweiler mit durch Pfeile markierten Vertretern

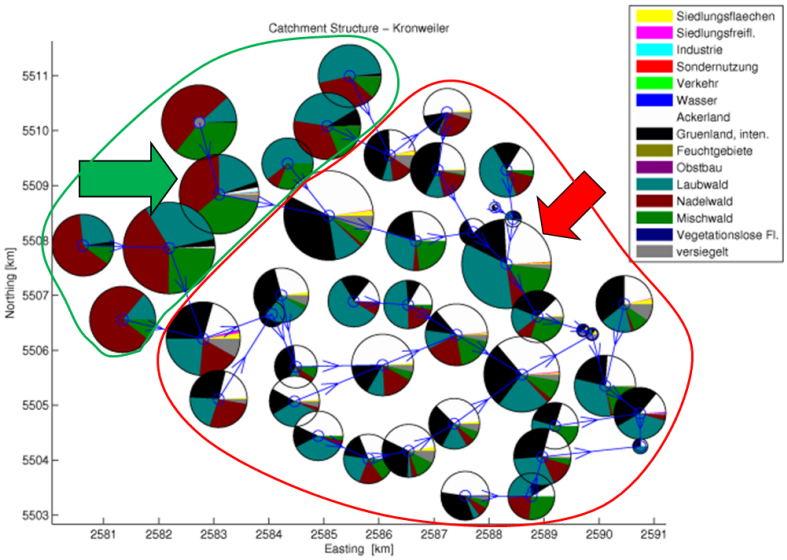

Abb. 6.2. Gruppen von Elementen mit ähnlichen Landnutzungsverteilungen im Einzugsgebiet Kronweiler mit durch Pfeile markierten Vertretern

zeigen, dass die auf diese Weise extrapolierten Ergebnisse die simulierten Ganglinien der homogen parametrisierten Fortran-Implementierung hinsichtlich der Effizienz sogar übersteigen können.

6.1.2 Homogen

Insgesamt wurden 12.000 Proben für die homogene Parametrisierung gezogen und die beiden Elemente wurden mit diesen Parametern für den Zeitraum 1996-1998

simuliert, wobei 1996 als Einschwingjahr diente und nicht weiter verwendet wurde. Die Analyse der Ergebnisse der beiden anderen Jahre zeigte, dass die ursprüngliche homogene Parametrisierung nah an der Effizienz liegt, die bei Variation dieser vier Parameter in den gegebenen Grenzen erzielt werden kann: Bei der ursprünglichen Parametrisierung liegt die Nash-Sutcliffe-Effizienz bei 0,86, die beste Parameterprobe erreichte einen Wert von 0,87 – wohlgemerkt bei extrapolierten Abflüssen.

Neben diesem Kriterium wurden auch die simulierten Zeitreihen analysiert, die hinsichtlich der Summe der *Signature Measures* minimale Ergebnisse erzielten. In Abbildung 6.3 ist zur Verdeutlichung ein Ausschnitt aus dem Zeitraum gezeigt, in dem die höchsten Abflüsse des Zeitraums gemessen wurden. In Schwarz ist der gemessene Abfluss dargestellt, in Grün das Resultat des homogen parametrisierten Fortran-LARSIM, in Blau die Zeitreihe aus den 12.000 Proben, die hinsichtlich der Nash-Sutcliffe-Effizienz am besten ist und in Rot die Zeitreihe, die hinsichtlich der Summe der *Signature Measures* minimal ist.

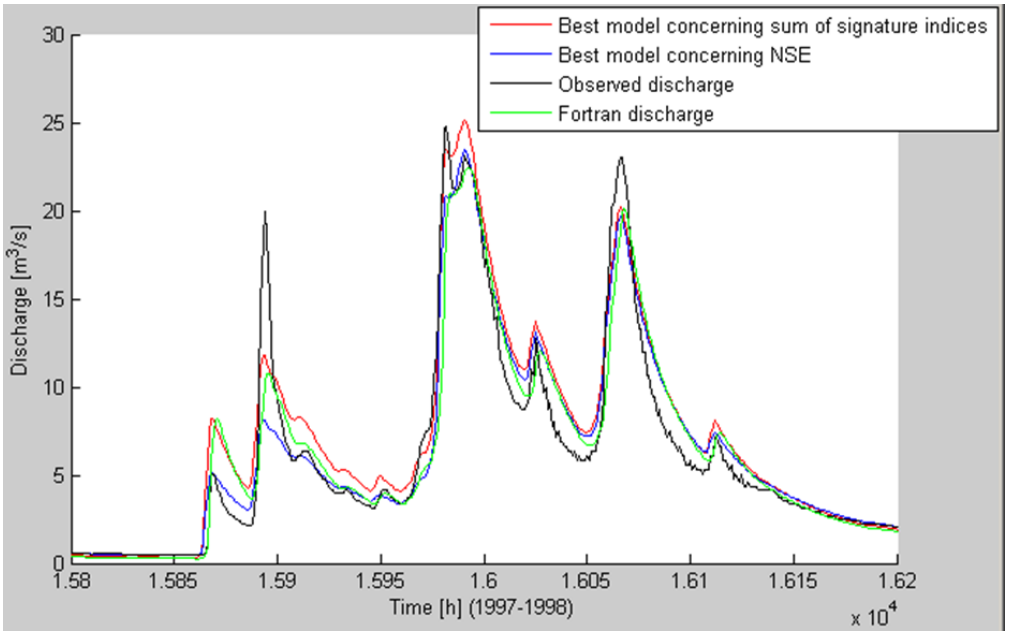

Abb. 6.3. Ausschnitt aus dem simulierten Zeitraum zur Illustration der geringen Abweichungen zwischen der Simulation des kompletten Gebiets und den extrapolierten Abflüssen

Am Verlauf lässt sich ablesen, dass die in Unterkapitel 4.5 zitierten Anforderungen aus dem operationellen Betrieb mit dem Kriterium der maximalen Nash-Sutcliffe-Effizienz kollidieren können: Die blaue Zeitreihe bildet zwar die erste Abflussspitze gut ab, bildet auch das Leerlaufen nach der zweiten Spitze besser ab, unterschätzt die zweite Spitze aber deutlicher als die anderen beiden Varianten, die aber wiederum das Leerlaufen schlechter abbilden. Auch bei der Abbildung der höchsten Spitze ergeben sich leichte Vorteile für die rote Zeitreihe. Dieser Um-

stand, dass eine möglichst hohe Nash-Sutcliffe-Effizienz mitunter mit den zitierten Anforderungen kollidiert, wird sich im späteren Verlauf noch öfter zeigen.

Neben diesen Analysen wurden auch Streudiagramme der vier Parameter und den erzielten Nash-Sutcliffe-Effizienzen erstellt, um die Identifizierbarkeit bzw. Unsicherheit einzelner Parameter zu beurteilen (siehe Wagener u. Wheater (2006)). Diese sind in Abbildung 6.4 dargestellt: Links oben ist die Nash-Sutcliffe-Effizienz gegen b aufgetragen, daneben gegen r_dmax, unten links gegen r_dmin, unten rechts gegen β.

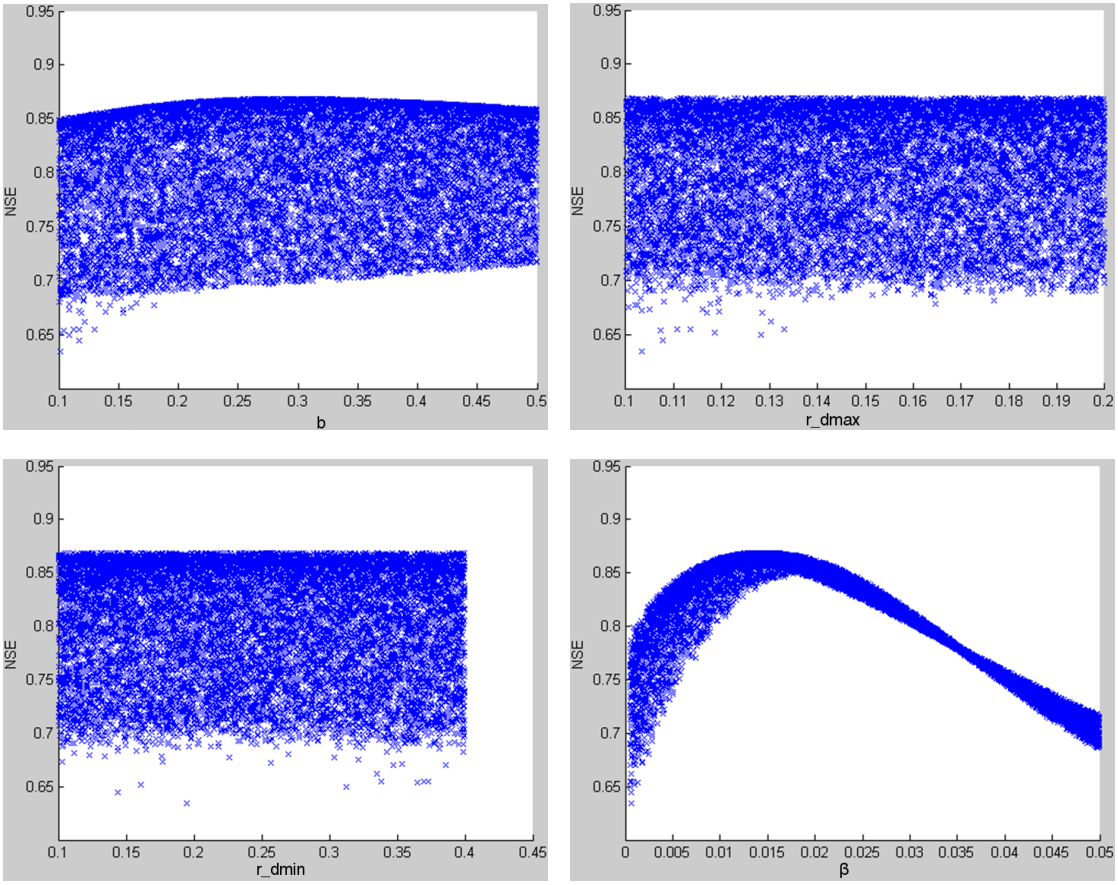

Abb. 6.4. Streudiagramme der vier variierten Parameter und den dabei erzielten Nash-Sutcliffe-Effizienzen

Es zeigt sich, dass der Wert für β am eindeutigsten feststeht. Die Realisationen mit den höchsten Effizienzen ergeben sich für Werte von ca. 0,014 (ursprüngliche Parametrisierung 0,026). Es lässt sich auch ablesen, dass eine hohe Effizienz nicht erreicht werden kann, wenn der Wert von β falsch gewählt wurde.

Etwas weniger eindeutig ist das Bild bei b. Hier liegt das Optimum hinsichtlich der Nash-Sutcliffe-Effizienz bei ca. 0,27 (ursprünglich 0,4). Es zeigt sich aber auch, dass ähnlich hohe Effizienzen für abweichende Werte erreicht werden können, wie es in der ursprünglichen Parametrisierung, bei der die Spitzen im gezeigten Aus-

schnitt hinsichtlich einer subjektiven Beurteilung schließlich auch besser abgebildet wurden, der Fall ist.

Kritischer sind die beiden Parameter, welche die laterale Drainage skalieren. Hier bleibt nur die Feststellung: Egal, wie diese Werte eingestellt werden, eine hohe Effizienz lässt sich dennoch erzielen. Auch dieser Umstand wird sich im weiteren Verlauf wiederholt zeigen.

6.1.3 Inhomogen

Für eine inhomogene Parametrisierung sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Formen der Abbildung der Prozesse denkbar:

1. Für jeden der neun kartierten Prozesse wird ein individueller Parametersatz im Bodenmodul zugewiesen.
2. Die Abbildung der Prozesse wird aufgeteilt in die Abbildung des dominanten Fließwegs und die der Intensität. Der Weg wird im Bodenmodul abgebildet, das die Abflussbildung simuliert; die Intensität wird in den Gebietsspeichern abgebildet, welche die Abflusskonzentration simulieren.

Beide Varianten haben Vor- und Nachteile. Der Vorteil der ersten Methode ist eine sehr differenzierte Abbildung der Reaktionsmuster aller Prozesse im Bodenmodul. Der Nachteil ist, dass selbst bei einer differenzierten Oberflächenabflussbildung die Komponenten aller Kompartimente dennoch in den gleichen Gebietsspeicher münden und dieser den Effekt der Inhomogenität dämpfen könnte. Ein weiterer Nachteil ist die hohe Komplexität dieser Lösungsvariante.

Der Vorteil der zweiten Variante ist, dass die Komplexität des Problems in zwei Teile gespalten wird: Der erste Teil, die Abbildung des Fließweges, erfolgt durch Gruppierung aller Prozesse des gleichen dominanten Fließwegs. Der zweite Teil erfolgt durch die Umstrukturierung der Gebietsspeicher, die später in Unterkapitel 6.3 detaillierter beschrieben wird. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die Differenzierung der Abflussprozesse im Bodenmodul geringer ist.

Natürlich ist auch eine Kombination beider Varianten denkbar: die Abbildung von neun Prozessen im Bodenmodul *und* eine Abbildung der Intensität über die Gebietsspeicher. Nach dem Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Durchführung der Simulationen übersteigt diese Variante aber hinsichtlich der Komplexität die Grenzen des Machbaren. Auf diese Lösungsvariante wird dennoch im Ausblick in Kapitel 8 kurz eingegangen.

Die zweite Variante wurde für den weiteren Verlauf ausgewählt: Im Bodenmodul werden die Prozesse SOF1, SOF2 und SOF3 zu den SOF-Prozessen zusammengefasst, SSF1, SSF2 und SSF3 zu den SSF-Prozessen sowie DP und DP= zu den DP-Prozessen.

Es ergeben sich also für die Monte Carlo-Simulation 12 zu variierende Parameter: b_{SOF}, b_{SSF}, b_{DP}, r_dmax_{SOF}, r_dmax_{SSF}, r_dmax_{DP}, r_dmin_{SOF}, r_dmin_{SSF}, r_dmin_{DP}, β_{SOF}, β_{SSF} und β_{DP}.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Intervalle für die 12 Parameter vorab eingeschränkt werden können. Es ist leicht, sicherlich zutreffende qualitative Aussagen zu treffen: b_{SOF} muss größer als b_{DP} sein. β_{SOF} muss kleiner als β_{DP} sein.

r_dmax_{SSF} muss größer als r_dmax_{DP} und r_dmax_{SOF} sein etc. Soll aber eine konkrete Untergrenze gefunden werden, etwa für b_{SOF}, dann sind sinnvolle Aussagen schwierig.

Neben diesem Grund wurde auch aus einem weiteren Grund auf die Begrenzung verzichtet: Auf diese Weise ist eine indirekte Evaluierung der Karte möglich. Erweisen sich Parametersätze als effizient, die Abflussmuster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte erzeugen, so ist dies ein Indiz dafür, dass die kartierten Prozesse einen gewissen Zusammenhang zur Realität haben.

Die zuletzt genannte Hoffnung erwies sich aber als nicht zutreffend. Zwar sind unter den Parametersätzen mit den höchsten Effizienzen auch solche, die passende Verhaltensmuster generieren, aber eben auch solche, die dies nicht tun. Ein Grund dafür ist die ungünstige Verteilung von Abflussprozessen in den gewählten Elementen. Im Element 2489 beträgt der Anteil der SOF-Flächen ungefähr drei Achtel. Der Anteil der SSF-Flächen beträgt ebenfalls drei Achtel. Erhalten beide Gruppen vollkommen entgegengesetzte Parametersätze, so resultiert hinsichtlich des Abflusses trotzdem das gleiche Verhalten – bei entgegengesetzten Verhaltensmustern der Kompartimente.

Zum Abschluss fehlt noch die Güte der extrapolierten Ganglinien. Unter den inhomogen parametrisierten Zeitreihen war keine, die die ursprüngliche Parametrisierung signifikant übertrifft, auch hier wurde bei der Nash-Sutcliffe-Effizienz der Wert 0,87 nicht überschritten. Für die beste Parametrisierung wurde aber zur Validierung der Zeitraum 1990-2000 simuliert. In diesem lag die Nash-Sutcliffe-Effizienz bei 0,81, während das Fortran-Modell lediglich 0,75 erreicht, obwohl das Jahr 1999 dort noch zur Kalibrierung diente.

6.1.4 Abflusskomponentenanteile und Parameterinteraktionen

Für jede der 60.000 Parameterproben wurden die Anteile der einzelnen Abflusskomponenten am Gesamtabfluss sowie die Bilanz berechnet, wobei die Bilanz den Anteil des Niederschlages angibt, der zu Abfluss des Bodenmoduls wurde. Die resultierenden Anteile wurden auf die erzielbaren Wertebereiche einzelner Komponenten hin untersucht. Weiterhin wurden in Visualisierungen der Anteile die unterschiedlichen Parameterinteraktionen nachvollzogen.

In Abbildung 6.5 wird die erzielte Bilanz der Parameterproben gezeigt. Jeder Punkt ist an der Stelle im Raum gezeichnet, die der Parameterkombination entspricht. Die X-Achse – in der Darstellung in Teil a) nach rechts weisend – zeigt den Wert von b (Oberflächenabflüsse). Die Y-Achse – nach oben links weisend – zeigt den Wert von r_dmax (laterale Drainage oberhalb W_Z). Und die Z-Achse – nach oben weisend – zeigt den Wert von β (Perkolation). In Teil b) wurde der Raum gegenüber a) gekippt, sodass von unten auf den Würfel geblickt wird.

Die erste Erkenntnis ist, dass die Spannweite der erzielbaren Bilanzen erstaunlich groß ist: Nur durch Variation der Bodenparameter ist es möglich, den Anteil des Niederschlages, der zu Abfluss wird, zwischen 51,5 % und 69,5 % zu skalieren. Dies ist im Sinne der Modellannahmen nachvollziehbar und plausibel: Sind alle Parameter klein, so verbleibt ständig mehr Wasser im Boden und die Verdunstung

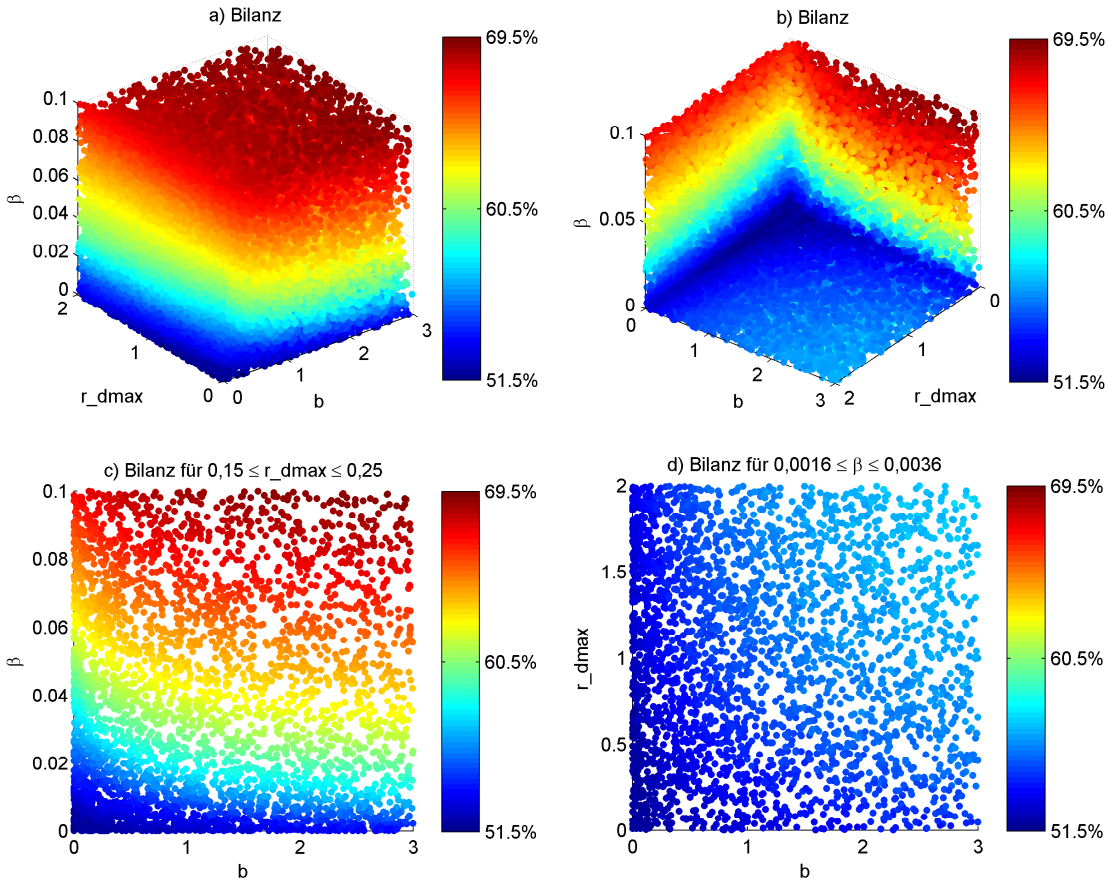

Abb. 6.5. Streudiagramme der 60.000 Parameterproben: Die Einfärbung stellt die mit der Parameterkombination erzielte Bilanz dar. a) Ansicht von oben, b)Ansicht von unten, c) Schnitt durch den Parameterraum für festen Wert von r_dmax und d) Schnitt durch den Parameterraum für festen Wert von β

nimmt zu. Sind umgekehrt alle Parameter groß, so leert sich der Bodenspeicher zügig und es verbleibt weniger Wasser zur Verdunstung. Die Bilanz kann aber nicht null werden, da in der Nähe des Ursprungs zwar nahezu keine laterale Drainage oder Perkolation stattfindet, es wird aber immer noch Oberflächenabfluss erzeugt, da der Boden oft überläuft: Der in Gleichung 4.1.3 auf Seite 24 beschriebene Fall tritt ein.

Die zweite Erkenntnis ist, dass die Bilanz im Wesentlichen über die Perkolation skaliert wird: Schichten einheitlicher Farben sind mehr oder weniger parallel zur X-Y-Ebene.

Die dritte Erkenntnis ist, dass r_dmin nahezu keine Rolle spielt, worauf bei dieser Darstellung aber nur indirekt geschlossen werden kann. Bei der Monte Carlo-Simulation wurden die vier im vorherigen Unterkapitel 6.1.3 genannten Parameter skaliert: b, r_dmax, r_dmin und β. Die Darstellung aller vier Parameter im dreidimensionalen Raum stellt sich schwierig dar. Aber der Einfluss kann dennoch aus der Abbildung abgeleitet werden: Wäre der Einfluss von r_dmin größer, so wäre die

Darstellung gesprenkelt. Die Begründung lautet: Proben, die hier in dieser Darstellung räumlich dicht aneinander liegen, haben höchst unterschiedliche Werte von *r_dmin*. Wäre dessen Einfluss größer, so müssten die nahe aneinanderliegenden Werte auch unterschiedliche Farben haben, wie ein Rauschen. Dies ist aber nicht der Fall. Auch dies ist plausibel, da *r_dmin* mit einem gegenüber *r_dmax* um den Faktor 100 niedrigeren Wert multipliziert im Bodenmodul verwendet wird.

Die vierte Erkenntnis ist, dass der Einfluss einzelner Parameter zwar nicht linear ist, es aber keine Unstetigkeiten bei bestimmten Werten gibt. Auch dies ist anhand der Modellannahmen plausibel und nachvollziehbar.

Neben diesen Erkenntnissen sind aber auch die Parameterinteraktionen zu sehen. Zur Verdeutlichung wurden in Teil c) und d) Schnitte durch diesen Parameterraum geplottet. In Teil d) wurden alle Proben geplottet, deren Wert von β dem Wert ähnelt, der bei der homogenen Kalibrierung für β auch verwendet wurde. Es ist also dargestellt, was passiert, wenn *r_dmax* oder b verändert werden. In Teil c) hingegen werden alle Proben geplottet, deren Wert von *r_dmax* dem Wert ähnelt, der bei der homogenen Parametrisierung verwendet wurde. Wird das Modell nun durch einen Menschen kalibriert, so verändert dieser – wenn er die Parameter und deren Wirkung nicht sehr genau kennt – einzelne Werte nacheinander. Dies entspricht in den gezeigten Darstellungen einer Bewegung parallel zu einer der Achsen. Möchte dieser Mensch nun grundsätzlich die Bilanz ändern, so kann er dies tun, indem er b oder β erhöht – oder beides gleichzeitig. Erhöht oder verringert er nun b, um die Oberflächenabflüsse zu skalieren, so verändert er auch die Bilanz. Möchte er *nur* die Bilanz ändern, etwa um Volumenfehler auszugleichen, so muss er eine komplexe Bewegung entlang aller drei (vier) Achsen gleichzeitig ausführen, die aber auch noch von der Position im Parameterraum abhängt.

Dies wird deutlicher, wenn Abbildung 6.6 hinzugezogen wird. Hier entspricht die Darstellung in allen Punkten der Darstellung in Abbildung 6.5, nur stellt hier die Farbe nicht die Bilanz dar, sondern den Anteil der Oberflächenabflüsse am Gesamtabfluss. Der Oberflächenabfluss wird eigentlich durch den Wert von b verändert. In allen Teilen der Abbildung wird aber deutlich, dass sich der Anteil des Oberflächenabflusses auch ändert, wenn einer der anderen Parameter verändert wird. Dies wird umso deutlicher, wenn statt des Anteils der absolute Wert dargestellt wird.

Neben diesen Parameterinteraktionen ist in dieser Abbildung auch zu sehen, in welchem Umfang die Oberflächenabflüsse skaliert werden können: Von 2 % bis hin zu 99,4 % sind alle Anteile möglich. Auch hier sind die resultierenden Werte im Hinblick auf die Modellannahmen nachvollziehbar und plausibel. Beispielsweise ist entlang der unteren rechten Kante in Teil a) der Oberflächenabflussanteil vollkommen unabhängig vom Wert von b nahezu 100 %. Findet kaum laterale Drainage oder Perkolation statt, so tritt wieder der Fall ein, der ein paar Abschnitte zuvor bereits beschrieben wurde: Der Bodenspeicher ist fast immer gefüllt; entsprechend oft läuft er über.

Wird hingegen β auf den verwendeten Wert erhöht, so verringert sich die Spanne auf den in Teil d) gezeigten Teil: von 20 % bis zu 94,1 %. Wird hingegen wie in Teil

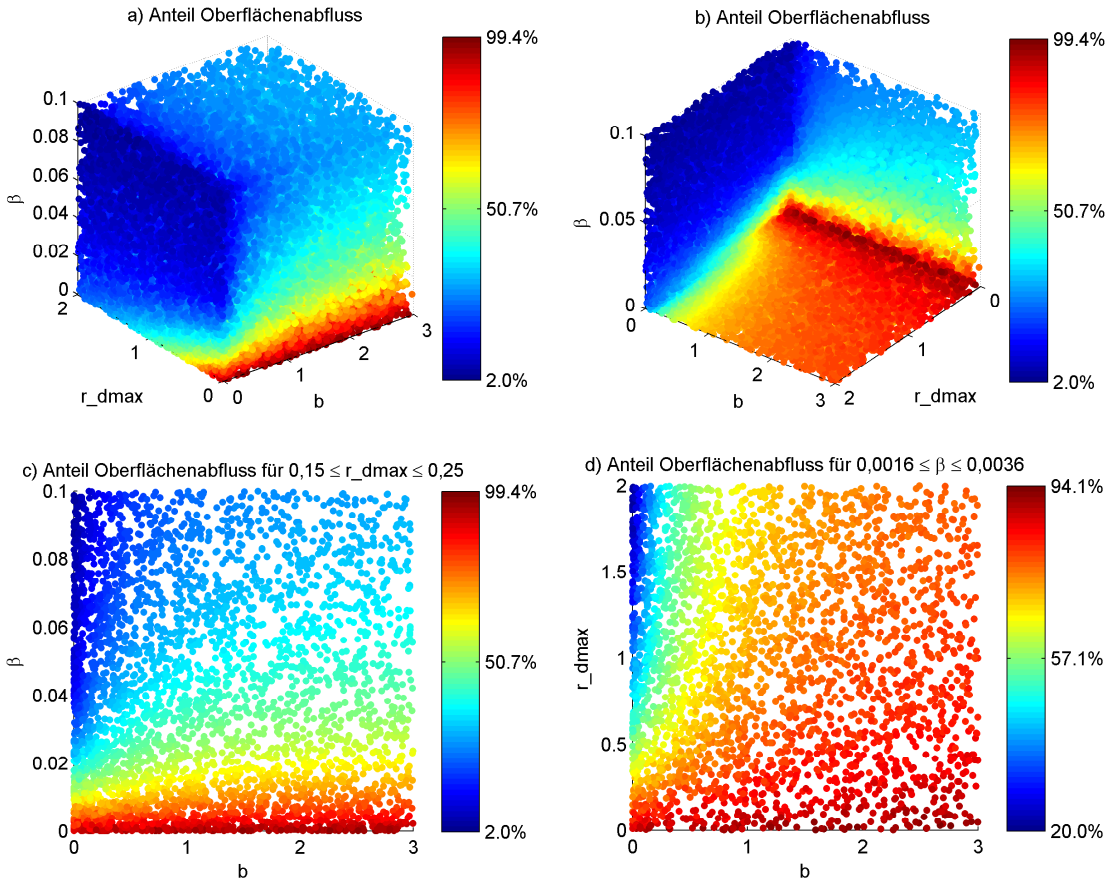

Abb. 6.6. Streudiagramme der 60.000 Parameterproben: Die Einfärbung stellt die mit der Parameterkombination erzielte Bilanz dar. a) Ansicht von oben, b)Ansicht von unten, c) Schnitt durch den Parameterraum für festen Wert von r_dmax und d) Schnitt durch den Parameterraum für festen Wert von β

c) r_dmax fixiert, so wird die Spanne nicht eingeschränkt, was wieder den geringen Einfluss der lateralen Drainage verdeutlicht.

Abbildungen dieses Typs lassen sich auch für die Anteile der verbleibenden Komponenten erstellen. Bei der lateralen Drainage ergeben sich ebenfalls plausible Werte: Der Anteil kann von 0 % bis zu 77,1 % skaliert werden. Höhe Werte ergeben sich nur, wenn r_dmax am Rand des beprobten Raums liegt und die anderen Parameter nahezu null sind. Der Anteil kann nicht größer werden, da entlang dieser Kante immer noch Oberflächenabflüsse gebildet werden.

Für die Perkolation reicht die Spanne von 0 % bis zu 96,3 %. Auch hier sind die erzielten Werte plausibel.

Zusammenfassend lauten die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Auswertungen:

- Die Bilanz kann in hohem Maße allein durch die Bodenparameter skaliert werden.

- Der Einfluss der Parameter ist nichtlinear, es treten aber keine Unstetigkeiten auf.
- Es gibt zwischen allen Parametern starke Interaktionen.
- Der Einfluss von *r_dmin* ist äußerst gering.

6.2 Skalierung inhomogener Parameter

Nun liegen Parametersätze vor, die einerseits eine hohe Güte hinsichtlich unterschiedlicher Gütemaße erreichen, andererseits auch Muster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte aufweisen. Diese Parameter sorgen im Gebiet Kronweiler für gute Ergebnisse. Werden diese Parameter in andere Einzugsgebiete übertragen, so sind die dort erzielten Simulationsergebnisse schlecht. Es besteht also die Notwendigkeit, die Parametersätze zu skalieren.

Versucht nun ein Mensch, diese 12 Parameter anzupassen, so ist diese Aufgabe erstens wesentlich komplexer als bei einer homogenen Parametrisierung und zweitens ist es nicht sichergestellt, dass die Muster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte erhalten werden können.

Es müssen also Möglichkeiten geschaffen werden, diese Parameter anderweitig zu skalieren. Dies kann in Form neuer Parameter geschehen, wobei folgende Anforderungen an diese formuliert werden können:

1. Es sollte eine möglichst geringe Anzahl sein.
2. Die Parameter sollten die Anpassung des Modells an andere Einzugsgebiete erlauben.
3. Die Abflussmuster im Sinne der Bodenhydrologischen Karte dürfen nicht verändert werden.
4. Die Wirkungsweise sollte möglichst einfach verständlich sein.
5. Die Parameter sollten Einfluss auf eine hydrologisch interpretierbare Größe haben, nicht auf einen abstrakten Modellzusammenhang.
6. Die Parameter sollten möglichst wenig interagieren.

Wird weiterhin untersucht, wie die Abweichungen in anderen Einzugsgebieten bei Betrachtung der Abflussdauerlinie sind, so fällt auf, dass diese in einer ersten Annäherung im Wesentlichen im Niveau und in der Steigung verschoben werden muss. Abweichungen im Niveau bedeuten, dass die Bilanz nicht stimmt: Das Modell produziert im Ganzen mehr (oder weniger) Abfluss, als gemessen wurde. Abweichungen in der Steigung bedeuten, dass das Einzugsgebiet das Niederschlagssignal stärker (oder schwächer) dämpft als das Modell.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen werden somit die beiden folgenden neuen Parameter definiert:

1. *P_Bilanz* ändert die Bilanz, also global den Anteil des Wassers, der zu Abfluss wird, ohne die Aufteilung in Komponenten zu beeinflussen.
2. *P_Dämpfung* ändert die Dämpfung, verschiebt also das Verhalten hin von einem reaktiven Verhalten mit hohen Abflussspitzen hin zu einem gedämpfteren Verhalten. Dies, ohne die Bilanz zu ändern.

Mit den Erkenntnissen aus den Monte Carlo-Simlationen ist klar, dass zur Umsetzung dieser Anforderungen eine einfache, lineare Skalierung der Parameter nicht zielführend ist: Eine zehnprozentige Erhöhung eines Parameters bedeutet bei keiner Komponente auch eine zehnprozentige Erhöhung des Abflusses dieser Komponente. Eine Erhöhung aller Parameter gleichzeitig um 10 % resultiert ebenso wenig in einer Erhöhung der Bilanz um 10 %.

Weiterhin ist eine konkrete Formulierung des gewünschten Prozessverhaltens der einzelnen kartierten Prozesse schwierig. Die Modellvorstellungen, wie diese Prozesse ablaufen, sind zwar sehr konkret. Wie diese Prozesse aber über das Jahr verteilt unter unterschiedlichen Wasserdargeboten auf unterschiedlichen Böden ablaufen, kann nur sehr schlecht in konkreten Zahlen ausgedrückt werden. Bei einem Treffen an der Universität Freiburg im April 2010 zum Thema Bodenhydrologische Karte, an dem mit Herrn Dr. Steinrücken und Herrn Dr. Behrens von der Soilution GbR, Herrn Prof. Markus Weiler vom Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, Herrn Dr. Simon Scherrer von der Scherrer AG, Herrn Norbert Demuth vom LUWG Mainz einige Experten zum Thema Abflussprozesse beteiligt waren, wurde der Konsens geäußert, dass ein Prozess dann dominant ist, wenn der Großteil des Wassers diesen Fließweg nimmt. Wird SOF kartiert, so heißt das nicht, dass dort keine Versickerung stattfindet. Die Fläche tendiert eben zu mehr Oberflächenabfluss als eine andere Fläche, auf der DP kartiert wurde. Dafür überwiegt dort die Perkolation.

Es liegt also nahe, das gewünschte Verhalten einzelner Prozesse vorzugeben, indem Anteile von Abflusskomponenten definiert werden. Weiterhin liegt nahe, die Resultate der Monte Carlo-Simulationen zu verwenden, in denen genau diese Anteile berechnet wurden.

In einer ersten Annäherung wurden Anteile definiert, die mit unterschiedlichen Literaturwerten übereinstimmten. Soll nun eine erste Annäherung für den Parameter *P_Bilanz* gefunden werden, dann reicht es, aus der Menge der Monte Carlo-Ergebnisse diejenigen herauszufiltern, deren Abflusskomponentenanteile möglichst wenig von den Anforderungen abweichen und eine aufsteigende Bilanz aufweisen. Das Ergebnis eines solchen Versuchs ist in Abbildung 6.7 auf der linken Seite dargestellt: Bewegen sich die Parameter entlang der eingezeichneten Spur, so kann die Bilanz im Bereich von 53,1 % bis zu 69,9 % skaliert werden, ohne dass sich die Anteile der Prozesse über einen weiten Teil der Strecke verschieben. Am Anfang und am Ende der Spur können diese Anforderungen nicht mehr gänzlich erfüllt werden, da die Modellannahmen keine beliebige Skalierung aller Komponenten zulassen, wie auch schon im vorherigen Unterkapitel deutlich wurde.

Nun ist es also möglich, die Bilanz zu ändern. Soll die Dämpfung geändert werden, so entspricht dies der in der Abbildung 6.7 auf der rechten Seite gezeigten Ansatz: In der komplex gekrümmten Fläche der schwarzen Punkte liegen alle Proben, die die gleiche Bilanz aufweisen – aber unterschiedliche Anteile von Abflusskomponenten. Aus diesen müssen lediglich diejenigen gesucht werden, die eben reaktiveres (mehr Oberflächenabflüsse) oder gedämpfteres (weniger Oberflächenabflüsse) Verhalten aufweisen.

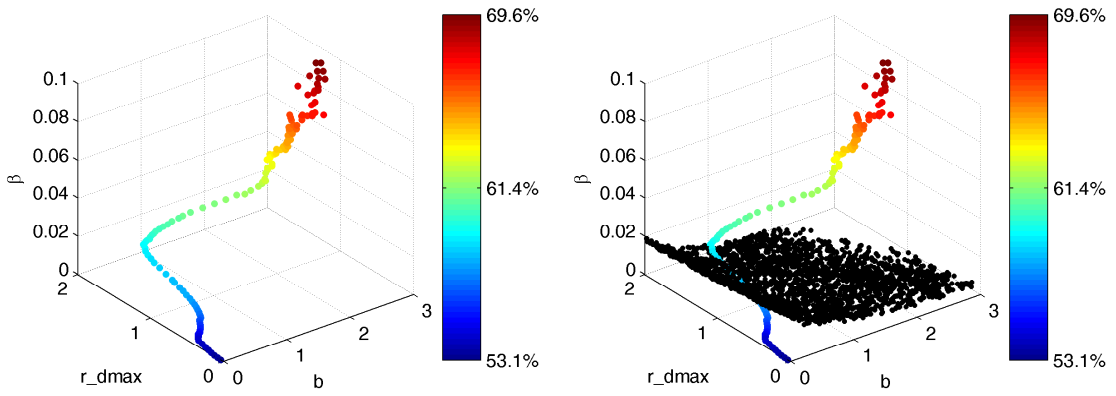

Abb. 6.7. Erste Annäherungen an *P_Bilanz* (links) und *P_Dämpfung* (rechts)

Als Ausbau dieses Ansatzes müssen also mehrere dieser Spuren gesucht werden, bei denen sich die Anteile verschieben. Diese können dann zu einer Oberfläche, einem Parameterkennfeld zusammengefügt werden.

Die Lösung kann am eindeutigsten an dem folgenden MATLAB-Code-Ausschnitt beschrieben werden, mit dem das letztendliche Kennfeld auch berechnet wurde:

```
1  surface = [];
2  for desiredDamping=1.3:-.01:.7
3    trace = [];
4    for desiredBalance=.52:0.00125:.60
5      desiredSurfaceRunoff = desiredDamping * .75;
6      desiredInterflow = (1-desiredSurfaceRunoff)/2;
7      desiredPercolation = (1-desiredSurfaceRunoff)/2;
8      distances = (balance(subElement,:) - desiredBalance).^2 * 50+ ...
9        (fractionSurfaceRunOff(subElement,:) - desiredSurfaceRunoff).^2 + ...
10       (fractionInterflow(subElement,:) - desiredInterflow).^2 + ...
11       (fractionPercolation(subElement,:) - desiredPercolation).^2;
12     [~,closestIdx] = min(distances);
13     trace = [trace,closestIdx];
14   end
15   surface = [surface; trace];
16 end
```

In Zeile 1 wird eine leere Matrix angelegt, die später das Kennfeld aufnehmen wird. Zeilen 2 bis 16 umfassen die Schleife, in der der Oberflächenabfluss in Prozentschritten von 130 % auf 70 % des gewünschten mittleren Anteils skaliert wird, in diesem Fall 75 % auf den SOF-Kompartimenten. Für jeden dieser Schritte gibt es eine neue Spur, die in Zeile 3 angelegt wird. In den Zeilen 4 bis 14 werden für aufsteigende Bilanzen Spuren in Achtelprozentschritten von 52 % bis 60 % bestimmt. In Zeile fünf wird nun für die aktuelle Position im Kennfeld (also eine gewünschte Dämpfung – `desiredDamping`) der Soll-Anteil des Oberflächenabflusses ausgerechnet. Bei einem mittleren Wert der Dämpfung wäre der Anteil des Oberflächenabflusses also 75 %. In den Zeilen 6 und 7 wird der verbleibende Anteil gleichmäßig auf die laterale Drainage und die Perkolation verteilt. In den Zeilen 8 bis 11 steht ein einziger Befehl, mit dem die Summe der quadrierten Abweichungen der gewünschten Anteile von den aus den Monte Carlo-Proben resultierenden Anteilen *aller* Proben berechnet wird. Die Abweichung bei der Bi-

lanz wird mit dem Faktor 50 multipliziert, da der Wertebereich, in dem die Bilanz skaliert werden kann, kleiner ist als die erzielbaren Abweichungen bei den anderen Bereichen. Nun liegt ein Vektor `distances` vor, in dem Abweichungen zu allen Proben enthalten sind. In Zeile 12 wird der Index der Probe mit der geringsten Abweichung bestimmt und in Zeile 13 zur Spur hinzugefügt. Die berechnete Spur wird in Zeile 15 an das Kennfeld angefügt.

Die Soll-Anteile bei einer mittleren Dämpfung von 100 % liegen bei DP-Kompartimenten bei 40 %, bei SSF-Kompartimenten bei 65 %. Bei den DP-Elementen wird der verbleibende Anteil zu zwei Drittel der gewünschten Perkolation zugewiesen, zu einem Drittel der lateralen Drainage, bei den SSF-Elementen genau umgekehrt.

Für die Bestimmung der Kennfelder wurde ein Kompartiment gewählt, das einen für das Nahe-Gebiet mittleren Wert von W_m aufweist: 186 mm (siehe Abbildung 4.6 auf Seite 26). Weiterhin wurde die Anzahl der Proben auf dem folgenden Weg verdoppelt: Es gibt in den simulierten Elementen zwei Kompartimente der gleichen Landnutzung, nahezu identischen Werten von W_m (186 und 187 mm) und unterschiedlichen Prozessgruppen (SOF und SSF). Diese Kompartimente haben also unterschiedliche Parameter zugewiesen bekommen bei sonst identischen Eigenschaften und Eingangsdaten. So konnte die Anzahl der Proben zunächst auf 120.000 erhöht werden. Beim weiteren Hinzufügen von Kompartimenten mit geringfügig stärker abweichenden Speichergrößen (172 und 175 mm) war aber bereits ein Rauschen in den Streudiagrammen sichtbar und es blieb bei den 120.000 Proben.

Auf den folgenden Seiten werden nun die Parameterkennfelder mit den resultierenden Abflusskomponentenanteilen für die drei Prozessgruppen beschrieben. In Abbildung 6.8 ist die Lage des Kennfeldes im Parameterraum für die SOF-Kompartimente dargestellt. In jedem Abbildungsteil stellt die Färbung einen unterschiedlichen Wert dar. Links oben in Teil a) repräsentieren die Farben die resultierende Bilanz: Am linken Rand des Kennfeldes beginnt die Bilanz bei knapp 53 % und endet oben rechts bei etwas mehr als 58 %. Eine Bewegung entlang der Gitterzeilen des Kennfeldes von links unten nach rechts oben entspricht also der Justierung von *P_Bilanz*. Im Kennfeld senkrecht dazu entspricht eine Bewegung von links oben nach rechts unten entlang der Gitterspalten einer Justierung von *P_Dämpfung*. Es ist deutlich zu sehen, dass sich entlang einer Spalte die resultierende Bilanz nicht ändert, die Farben sind einheitlich, entlang der Zeile nehmen die Werte von links nach rechts zu.

Es ist auch zu sehen, dass benachbarte Zellen manchmal keinen kontinuierlichen Farbübergang aufweisen. Der Grund dafür ist, dass dieses Kennfeld geglättet wurde, worauf später eingegangen wird, und an der konkreten Stelle der Zelle die tatsächlich resultierende Bilanz nicht vorliegt, sondern lediglich die Bilanz der Probe, die hinsichtlich der Summe der quadrierten Abweichungen am wenigsten abweicht. Bei unendlich vielen Proben wäre eine Glättung nicht notwendig und hier wäre ein homogener Farbverlauf sichtbar.

In den anderen drei Teilen der Abbildung sind durch die Färbung die Anteile der Abflusskomponenten dargestellt. In Teil b) ist dies der Anteil des Ober-

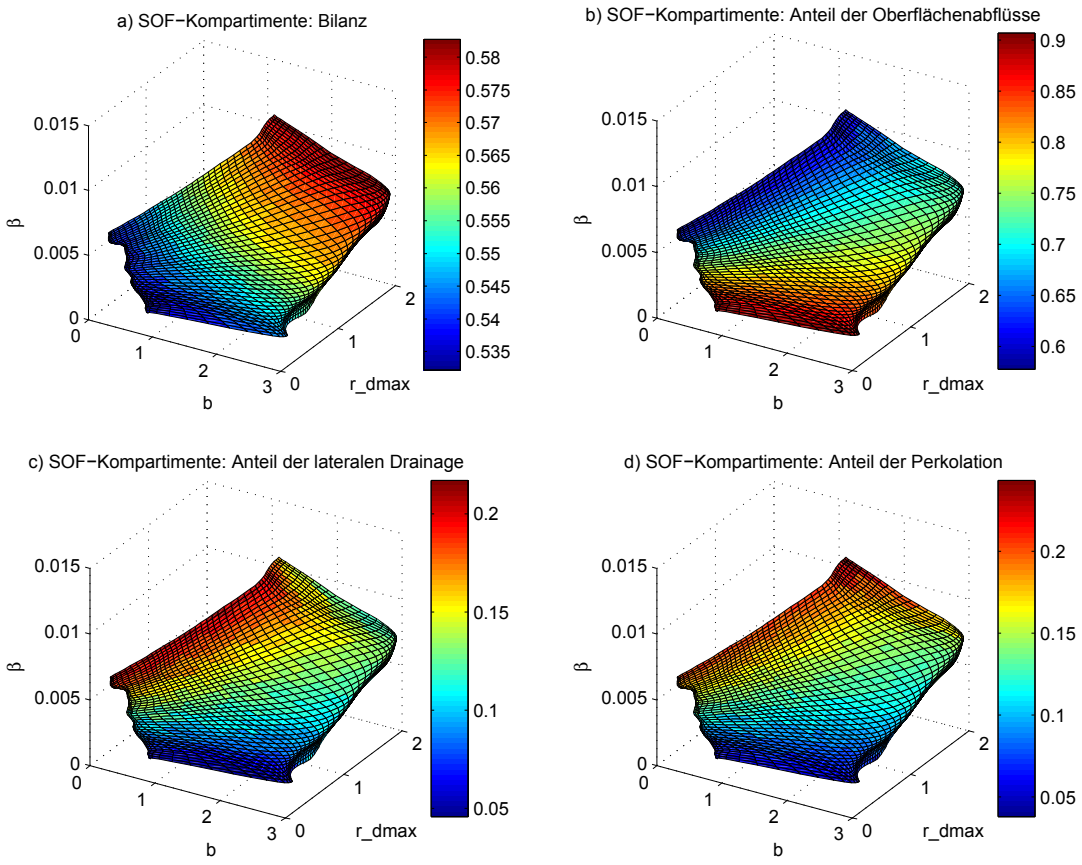

Abb. 6.8. Resultierende Parameterkennfelder der SOF-Kompartimente – der Farbton gibt a) die Bilanz, b) den Anteil der Oberflächenabflüsse, c) den Anteil der lateralen Drainage und d) den Anteil der Perkolation des zur Bestimmung verwendeten Referenzkompartiments im Zeitraum 1997-1999 an

flächenabflusses. Hier ist zu sehen, dass eine Änderung von *P_Bilanz* innerhalb einer Zeile in weitestgehend gleichen Anteilen von Oberflächenabfluss resultiert. Eine Änderung von *P_Dämpfung* skaliert hingegen den Oberflächenabfluss: Oben, bei höherer Dämpfung, ist der Anteil geringer, unten ist er höher. Es ist zu sehen, dass der Wertebereich genau den gewünschten Bereich von $[75\,\% \cdot 0,7;\ 75\,\% \cdot 1,3]$ abdeckt.

Analoge Aussagen lassen sich nun für die Teile c) und d) treffen: Dort sind die Anteile der lateralen Drainage sowie der Perkolation zu sehen. Die Färbung ist dabei genau umgekehrt wie in Teil b). Bei höherer Dämpfung steigt der Anteil der lateralen Drainage und der Perkolation, während der Anteil des Oberflächenabflusses sinkt, bei niedrigerer Dämpfung ist es genau umgekehrt.

Als vorletzter relevanter Aspekt ist noch ein Hinweis auf die leicht welligen Ränder des Kennfeldes notwendig. Hier gibt es keine Proben, welche die für die jeweilige Stelle im Kennfeld gewünschten Anteile erzeugen. Die Modellannahmen lassen nicht beliebige Anteile zu, was auch im vorherigen Unterkapitel als Resultat der inhomogenen Monte Carlo-Simulationen beschrieben wurde. Dies tritt insbe-

sondere am Rand des beprobten Raums auf. Es werden dann Proben mit relativ großen Abweichungen gezogen, die ziemlich unterschiedlich verteilt liegen können, je nachdem, wo eben zufällig eine Probe gezogen wurde. Am oberen rechten Rand des Kennfeldes ist dieser Effekt besonders schön zu sehen: Hier ist das Feld regelrecht nach oben geklappt, da keine größeren Werte für *r_dmax* beprobt wurden. Als Folgerung wäre der Einwand zulässig, dass der beprobte Raum größer sein müsste. Leider treffen aber diese Einschränkungen auch auf den anderen Rand des Kennfeldes zu, hin zu kleinen Werten. Und für keinen der Parameter ist ein negativer Wert zulässig. Im weiteren Verlauf zeigte sich aber, dass der Bereich der Kennfelder, der im Nahe-Gebiet benötigt wird, eher an dem unteren Rand des beprobten Raums liegt.

Es verbleibt die Frage: Wie sieht das Kennfeld für *r_dmin* aus? Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, hat dieser Parameter einen denkbar geringen Einfluss auf die laterale Drainage, um den Faktor 50-200 niedriger als *r_dmax*. Wird nun mit der gleichen Methode versucht, ein Kennfeld zu erzeugen, das Werte für *r_dmin* enthält, so springen die Werte für diesen Parameter willkürlich im Parameterraum umher. Das ist auch plausibel, weil die Abweichung im Anteil der lateralen Drainage nahezu ausschließlich über *r_dmax* beeinflusst wird, der Wert von *r_dmin* spielt nahezu keine Rolle. Es wird also die Probe ausgewählt, bei der der Wert von *r_dmax* für geringe Abweichungen sorgt – vollkommen unabhängig vom Wert von *r_dmin*. Für den Wert von *r_dmin* muss also eine andere Lösung gefunden werden.

Innerhalb der LARSIM-Community gibt es unterschiedliche Ansichten, wie dieser Parameter zu justieren ist. Die Kalibrieranleitung trifft dazu die folgende Aussage: „Bei der Nachkalibrierung von WHM-Vorhersagemodellen für die HVZ BW wird der Parameter rdmin grundsätzlich auf 0.0 gesetzt, um die modelltechnische Wirkung von Basisabfluss und Interflow eindeutig voneinander abzugrenzen. Sofern sich nach Festlegung von Dmax und EQI zeigt, dass die Verwendung von $Dmin > 0$ weitere Verbesserungen erzielbar sind, kann dieser „vorsichtig“ eingesetzt werden.“

Auf diese Weise wird auch bei der Verwendung von *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* verfahren. Das Modell wird so gut, wie es möglich ist, angepasst, dann kann der Wert auf Teile von den inhomogenen Werten von *r_dmax* angepasst werden – in den drei kalibrierten Gebieten war allerdings kein relevanter Einfluss feststellbar.

In Abbildung 6.9 sind in der gleichen soeben beschriebenen Darstellungsweise der Abbildung 6.8 die Kennfelder für SSF-Kompartimente dargestellt. Der Bereich, in dem die Bilanz skaliert werden kann, ist identisch (siehe Teil a). In Teil b) hingegen wird deutlich, dass nun der Anteil der Oberflächenabflüsse geringer ist, er stammt wie gewünscht aus dem Intervall $[65\,\% \cdot 0,7;\ 65\,\% \cdot 1,3]$, wobei hier der äußerste Rand aufgrund der bereits oben beschriebenen Problematik nicht dargestellt wird. Die Anteile der lateralen Drainage betragen zwei Drittel des Restes für die gleiche Zelle des Kennfeldes und reichen von 14 % bis 32 %, die Perkolation reicht von 6 % bis zu 22 %.

Ein Aspekt ist aber besonders auffällig: Obwohl der Anteil des Oberflächenabflusses immer noch größer ist als der Anteil der lateralen Drainage, so liegt das

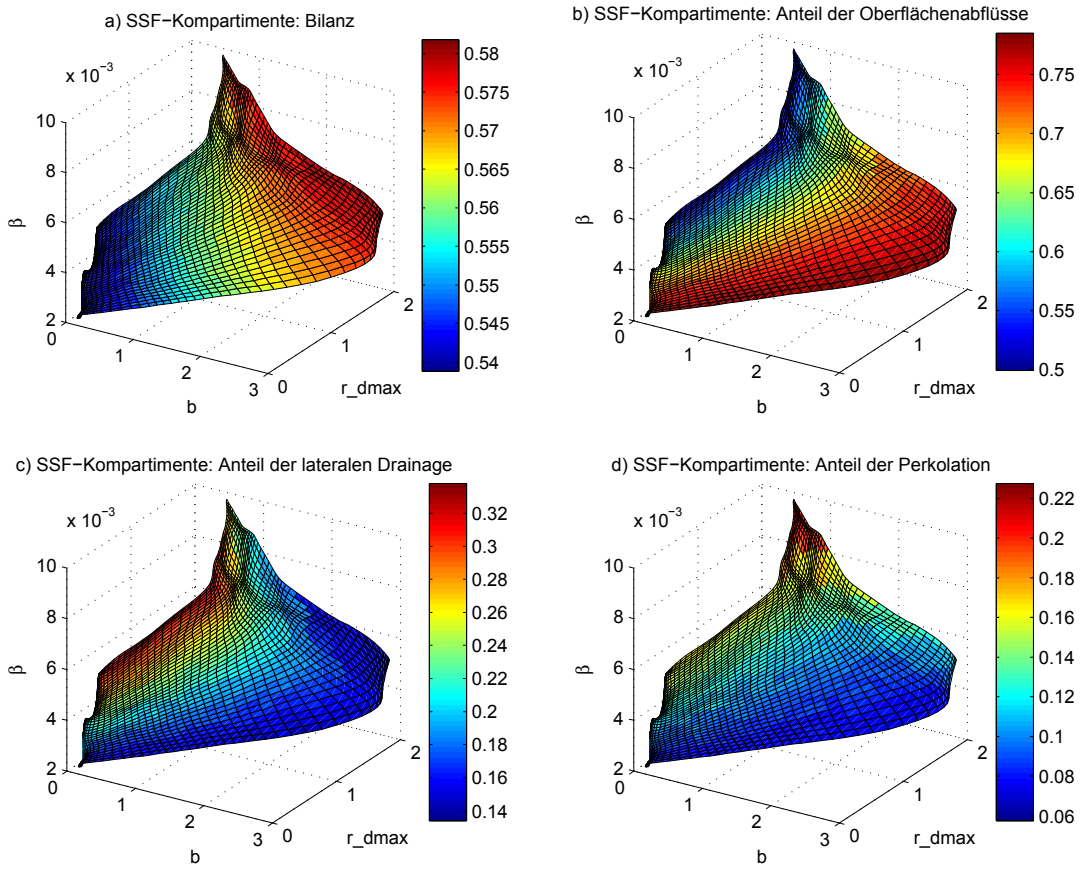

Abb. 6.9. Resultierende Parameterkennfelder der SSF-Kompartimente – der Farbton gibt a) die Bilanz, b) den Anteil der Oberflächenabflüsse, c) den Anteil der lateralen Drainage und d) den Anteil der Perkolation des zur Bestimmung verwendeten Referenzkompartiments im Zeitraum 1997-1999 an

Kennfeld dennoch in den unteren zwei Dritteln von *P_Bilanz* bereits am Rande des beprobten Raums. Aber nicht am Rande des Raums hinsichtlich *r_dmax*, sondern hinsichtlich *b*. Es müsste also *b* verringert werden, um einen höheren Anteil von lateraler Drainage zu erlauben, was nicht möglich ist. Erst für höhere Werte von *P_Bilanz*, die in der späteren Kalibrierpraxis ohnehin ungenutzt bleiben, wird der Rand des beprobten Raums hinsichtlich *r_dmax* erreicht.

Ein ähnlicher Effekt ist auch in Abbildung 6.10 zu erkennen. Hier wurde leider keine Perspektive gefunden, in der die Lage wirklich gut in einer zweidimensionalen Projektion erkennbar ist. Im unteren Drittel von *P_Bilanz* liegt auch hier das Kennfeld am Rand des beprobten Raums. Auch hier müsste der Anteil der Oberflächenabflüsse weiter verringert werden.

Ansonsten zeigt sich aber auch hier, dass die Anforderungen an die Komponentenanteile eingehalten werden konnten. Die Bilanz ist im gleichen Maße beeinflussbar, sie bleibt bei gleichen Werten von *P_Dämpfung* nahezu konstant. Die Anteile

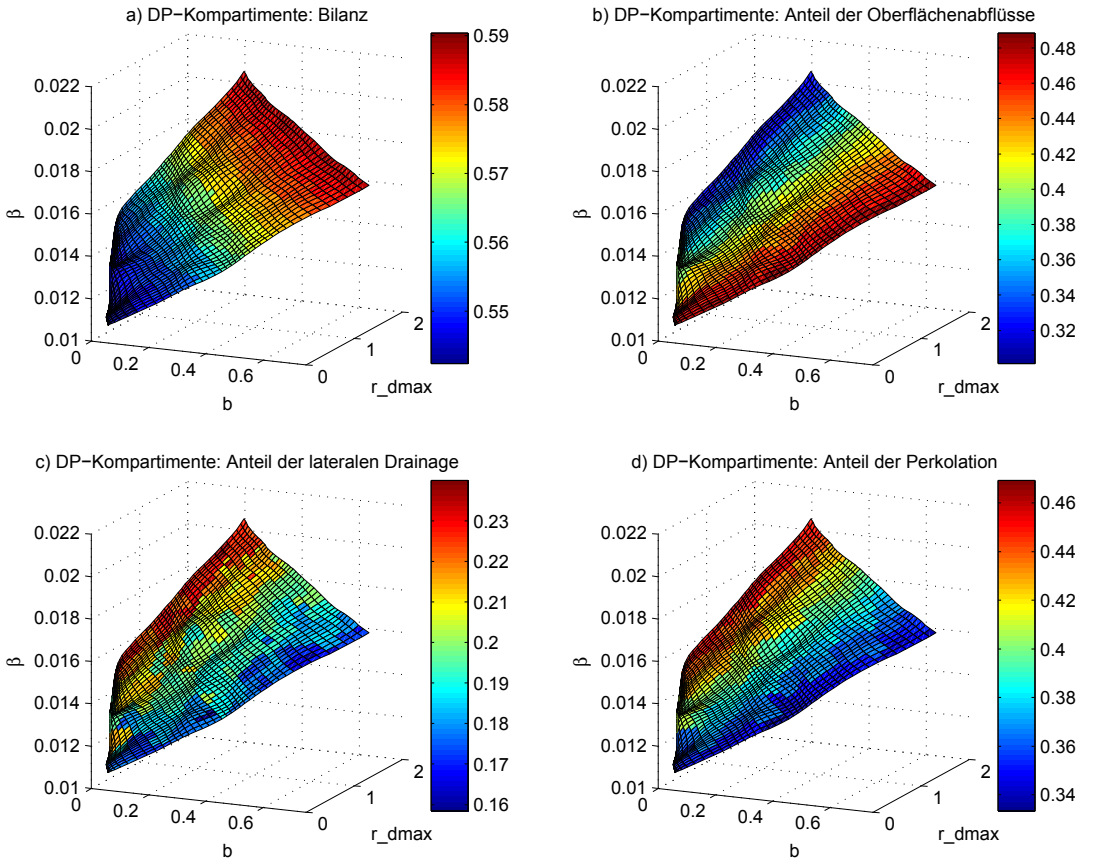

Abb. 6.10. Resultierende Parameterkennfelder der DP-Kompartimente – der Farbton gibt a) die Bilanz, b) den Anteil der Oberflächenabflüsse, c) den Anteil der lateralen Drainage und d) den Anteil der Perkolation des zur Bestimmung verwendeten Referenzkompartiments im Zeitraum 1997-1999 an

der Komponenten bleiben bei gleichen Werten von *P_Bilanz* nahezu konstant und werden mit Änderungen von *P_Dämpfung* skaliert.

Bevor das Thema Glättung angesprochen wird, sollten noch die Wertebereiche von *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* beschrieben werden. Die Kennfelder wurden empirisch ermittelt, indem die Ergebnisse der Monte Carlo-Simulationen zweier bestimmter Kompartimente für einen bestimmten Zeitraum genutzt wurden. Für diese beiden Kompartimente und den genannten Zeitraum resultieren also aus konkreten Werten von *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* exakt die gewünschten Anteile und die gewünschte Bilanz. Aber auch nur in diesen Kompartimenten und auch nur für diesen Zeitraum. Ändert sich nur eine Randbedingung, so stimmen die Anteile nicht mehr überein. Ändert sich etwa der Wert von W_m nach oben, so wird der Anteil der Oberflächenabflüsse kleiner. Er stimmt nicht mehr mit dem gewünschten Wert überein. Ändert sich das Klima, wird es beispielsweise nur ein Grad wärmer, so verringert sich die Bilanz bei sonst identischen Bedingungen. Wird der Parametersatz in einem ganz anderen Kompartiment eingesetzt, so resultieren andere Werte.

Später im Unterkapitel 7.3 wird aufgezeigt, dass diese Einflüsse plausibel und nachvollziehbar sind. An dieser Stelle führt es aber zunächst dazu, dass beispielsweise ein Wert 58,3 % für *P_Bilanz* vollkommen irreführend wäre, weil er eben nicht notwendigerweise in einer Bilanz von 58,3 % resultiert! Aus diesem Grund werden rein fiktive Wertebereiche verwendet, die nicht dazu verleiten, einen konkreten Wert damit zu verbinden. Dazu werden ganz pragmatisch die Zellen innerhalb des Kennfeldes verwendet: *P_Dämpfung* stammt aus dem Intervall [1; 61], *P_Bilanz* aus dem Intervall [1; 65]. Werden Werte zwischen zwei Zellen benötigt – was bei der Kalibrierung nicht vorkam – so wird zwischen den Parameterwerten der benachbarten Zellen linear interpoliert.

Wie bereits angesprochen, resultieren aus dem oben beschriebenen Algorithmus nicht direkt die gezeigten Kennfelder, sondern deutlich ungleichmäßigere. Das ist naheliegend, da nicht unendlich viele Proben vorliegen, und eben nur die Probe verwendet werden kann, die am nächsten an den Vorgaben liegt. Da keinerlei Unstetigkeiten in den Anteilen in Unterkapitel 6.1.3 zu erkennen sind, müsste in unendlich vielen Proben eine enthalten sein, die – falls die Modellannahmen die Anteile zulassen – exakt den Vorgaben entspricht. Es liegen aber nicht unendlich viele Proben vor.

Aus diesem Grund wird das Kennfeld durch mehrfache Faltung mit entsprechenden Matrizen geglättet. Das Resultat und das ursprünglich resultierende Kennfeld werden in Abbildung 6.11 gegenübergestellt. Hier ist auch zu sehen, dass ein Teil der Welligkeit aus der Anzahl der Proben resultiert.

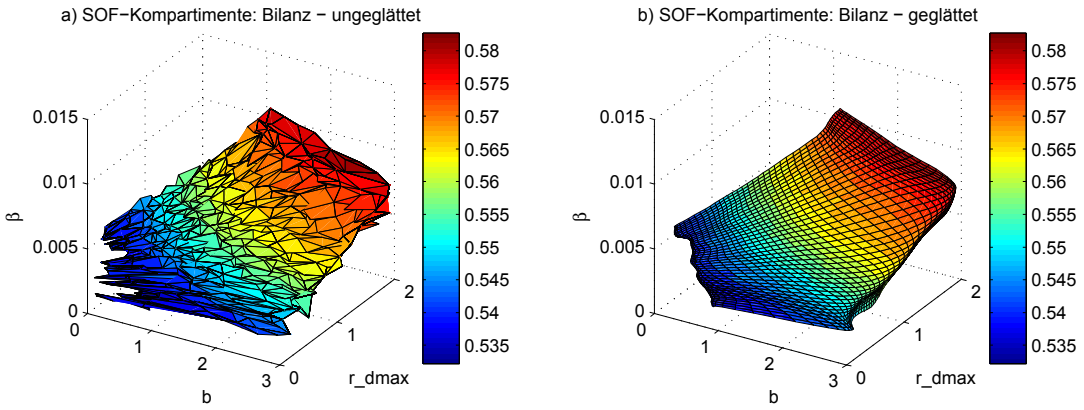

Abb. 6.11. Auswirkung der Glättung auf das Kennfeld: a) zeigt das tatsächlich resultierende Kennfeld, b) das gleiche Kennfeld nach der Glättung

Es könnte der Schluss gezogen werden, dass die Anzahl der Proben erhöht werden sollte. Die Tatsache, dass aber durch die Glättung ein plausibles und, wie sich später zeigen wird, ein funktionierendes Kennfeld resultiert, spricht dagegen. Im Ausblick in Kapitel 8 wird auf diesen Aspekt erneut kurz eingegangen.

In den bisher gezeigten Abbildungen der Kennfelder wurde der Ausschnitt jeweils so gewählt, dass das Kennfeld den dargestellten Raum gut füllt. Bei dieser

Darstellung ist die Beurteilung der Lage der Kennfelder zueinander schwierig. In Abbildung 6.12 werden deshalb die drei Kennfelder bei gleicher Skalierung gegenübergestellt.

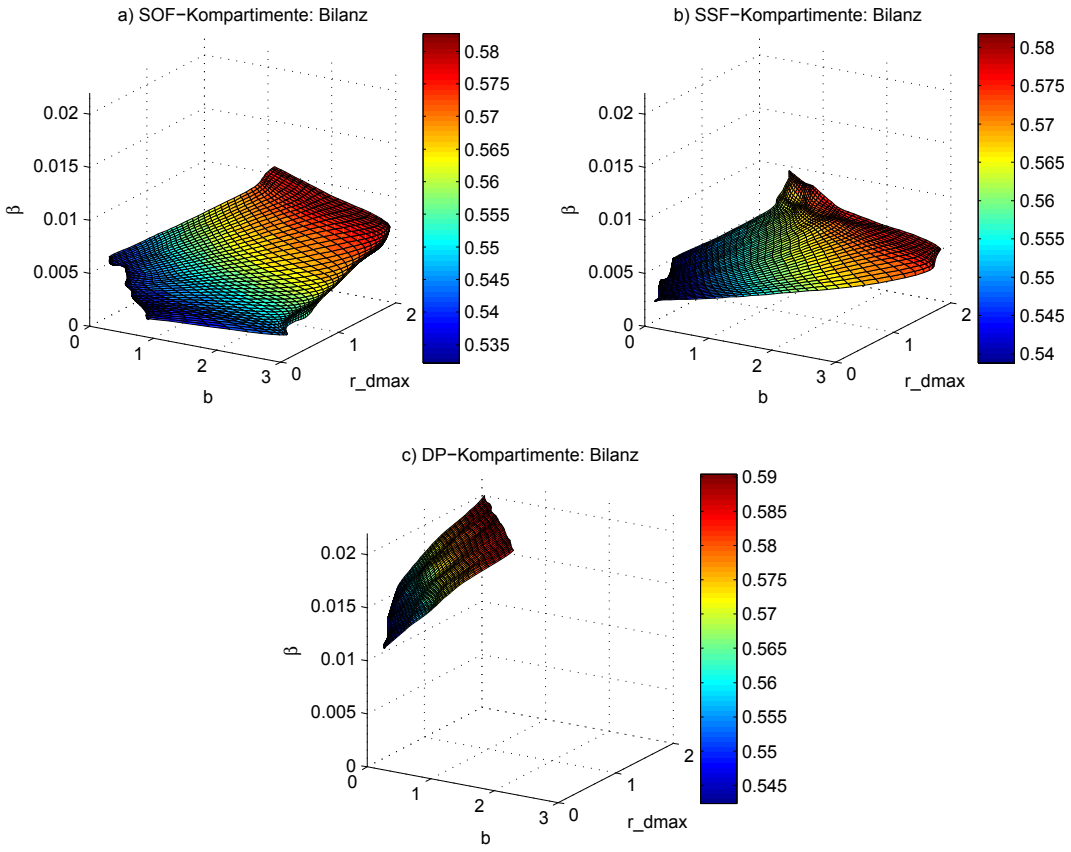

Abb. 6.12. Lage der Parameterkennfelder im Parameterraum im Vergleich: a) Lage des Kennfeldes der SOF-Kompartimente, b) Lage des Kennfeldes der SSF-Kompartimente und c) Lage des Kennfeldes der DP-Kompartimente

Es zeigt sich, dass die Lage der einzelnen Kennfelder zueinander absolut plausibel und im Hinblick auf die Modellannahmen korrekt ist. Das Kennfeld der SOF-Kompartimente in Teil a) liegt am weitesten unten – es weist die kleinsten Werte für β (weniger Perkolation) auf –, ferner liegt es weit rechts vorne, hin zu großen Werten von b (mehr Oberflächenabflüsse). Im Vergleich dazu liegt das Kennfeld der SSF-Kompartimente ein wenig höher, β ist größer (mehr Perkolation), weiter links (weniger Oberflächenabflüsse) und weiter hinten hin zu größeren Werten von r_dmax (mehr laterale Drainage). Das Kennfeld der DP-Elemente liegt deutlich höher (β ist größer, mehr Perkolation) und ganz am Rand hinsichtlich der Oberflächenabflüsse.

6.3 Berücksichtigung der Prozessintensität

Mit den beiden Parametern *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* sowie den zugrunde liegenden Kennfeldern existiert nun eine Basis, die eine effiziente Anpassung von LARSIM an spezifische Einzugsgebiete erlaubt, wie später dargelegt werden wird. Es wird sich aber auch zeigen, dass das Modell immer wieder an die gleichen Grenzen stößt: Eine Anpassung in der einen Situation resultiert in einer Verschlechterung in einer anderen Situation. Das Resultat bleibt ein Kompromiss zwischen unterschiedlichen Zielsetzungen. Aus diesem Grund wird im Folgenden versucht, die Abbildung der Intensität der Abflussprozesse über die Gebietsspeicher abzubilden, wie in der Einleitung von Unterkapitel 6.1.3 angekündigt.

Zuvor eine kurze Zusammenfassung der Abbildung der Simulation der Abflusskonzentration über die Gebietsspeicher: Es gibt je Element vier Gebietsspeicher, die durch Einzellinearspeicher simuliert werden. Die flächengewichtete Summe der Perkolation *aller* Kompartimente eines Elements mündet in *einem* Gebietsspeicher für den Basisabfluss. Die flächengewichtete Summe der lateralen Drainage *aller* Kompartimente eines Elements mündet in *einem* Gebietsspeicher für den Interflow. Die flächengewichtete Summe der Oberflächenabflüsse *aller* Kompartimente hingegen wird in *zwei* Speicher geführt, wobei anhand des Schwellwertes A2 aufgeteilt wird: Abflüsse bis zu diesem Schwellwert gelangen in den Speicher für den langsamen Direktabfluss; alles, was über A2 hinaus geht, gelangt in den Speicher für den schnellen Direktabfluss (für weitere Details sei auf Unterkapitel 4.1.4 verwiesen).

In Abbildung 6.13 ist zur Illustration des Verhaltens und der Probleme ein Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum im Einzugsgebiet Kronweiler gezeigt, bei dem die Kompartimente bereits inhomogene Parameter aus den Kennfeldern erhalten haben. Über die farbigen Flächen sind die Anteile aus den vier Speichergruppen gekennzeichnet. Das nichtlineare Verhalten durch den Schwellwert A2 ist deutlich zu sehen. Während die ersten kleineren Spitzen nahezu vollständig aus dem langsamen Direktabfluss QS_D bestehen, kommt bei den höheren Spitzen danach der nichtlineare Einfluss zur Geltung. Es ist auch zu sehen, dass der Speicher für den schnellen Direktabfluss einen wesentlich kleineren Koeffizienten bekommen hat, der Speicher leert sich deutlich schneller.

Das Ereignis selbst wird hinsichtlich der Abflussspitze vergleichsweise gut abgebildet. Beim Leerlaufen allerdings zeigen sich Defizite, die höhere Werte bei den Gütemaßen verhindern. Werden die Speicherkoeffizienten nun verkleinert und wird A2 vergrößert, so wird das Leerlaufen nach der ersten größeren Doppelspitze kurz vor dem 17. Dezember besser abgebildet. So verschlechtert sich aber die Simulationsgüte bei der zweiten Doppelspitze Ende Dezember. Wird hingegen das zweite Ereignis optimiert, so verschlechtert sich die Güte im ersten.

Diese Situation, dass die Optimierung eines Ereignisses Verschlechterungen bei einem anderen Ereignis nach sich zieht, ist in allen Einzugsgebieten zu verzeichnen. Dies ist auch plausibel, da es neben den Unsicherheiten des Modells auch noch Unsicherheiten bei den meteorologischen Eingangsdaten gibt. Dennoch stellt

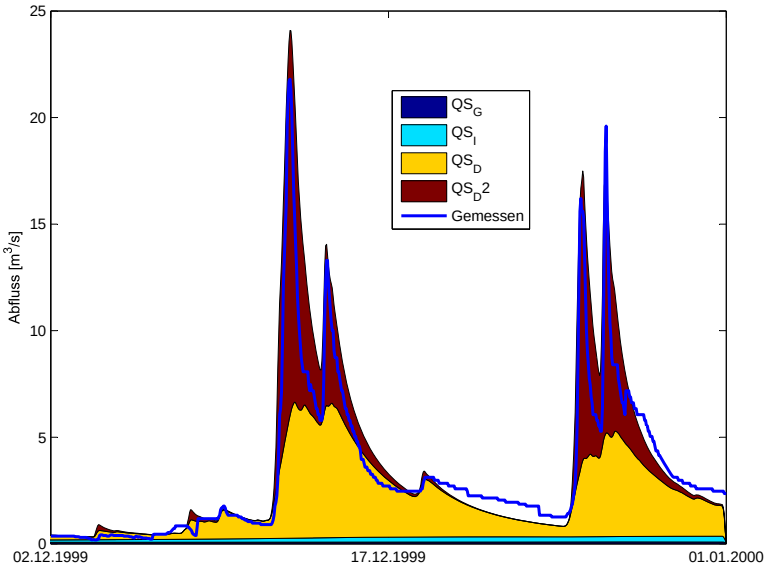

Abb. 6.13. Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum für das Gebiet Kronweiler: Dargestellt werden die einzelnen Abflusskomponenten, die durch die vier Gebietsspeicher je Element generiert werden.

sich die Frage, ob die Simulationsgüte nicht verbessert werden kann, indem die Prozessintensität in den Gebietsspeichern berücksichtigt wird.

Zwar findet eine gewisse Differenzierung statt, indem die Kalibrierparameter der einzelnen Speicher anhand der Höhenunterschiede und der Länge des Vorfluters in jedem Element skaliert werden, aber diese Inhomogenität bezieht sich nur auf die Elemente untereinander. Kurze, stark reliefierte Elemente erhalten kleinere Speicherkoeffizienten; lange, flache Elemente erhalten größere. Innerhalb des Elementes gibt es keine aber Inhomogenität.

Verstärkt wird die Problematik dadurch, dass die Lage der Kompartimente innerhalb des Elements nicht bekannt ist. Oberflächenabflüsse von tendenziell vorfluterfernen DP-Kompartimenten gelangen in den gleichen Gebietsspeicher wie Oberflächenabflüsse von tendenziell vorfluternahen SOF-Kompartimenten. Wird auf Letzteren schneller Oberflächenabfluss erzeugt, so wird dieser in einem möglicherweise gering gefüllten Direktabflussspeicher des Elements verzögert – der Speicherkoeffizient ist nur ein Mittelwert für das Element.

Es liegt also nahe, die Oberflächengebietsspeicher nach der Prozessintensität zu differenzieren. Insbesondere dadurch, dass die Entfernung zum Vorfluter bei der Kartierung offensichtlich eine große Rolle gespielt hat, wie an der Abflussprozesskarte von Kronweiler zu sehen ist (siehe Abbildung 4.14 auf Seite 39) und wie später in Unterkapitel 7.5 bei der Diskussion der Thematik Wiederversickerung deutlich wird.

In einem ersten Ansatz wurden fünf Oberflächenabflussgebietsspeicher definiert: einer für die Oberflächenabflüsse aller direkt reagierenden Kompartimente (SOF1), einer für die Oberflächenabflüsse aller schnell reagierenden Kompartimente (SOF2 und SSF1), einer für die Oberflächenabflüsse aller mittel reagierenden Kompar-

timente (SSF2), einer für alle langsam reagierenden Kompartimente (SOF3 und SSF3) und einer für alle verzögert reagierenden Kompartimente (DP und DP=).

Die Koeffizienten dieser Speicher wurden dabei anhand der bereits vorhandenen Werte von EQD und EQD2 bestimmt, da so in einer bereits gewohnten Weise kalibriert werden kann. Der direkte Speicher bekommt den halben Wert von EQD2 zugewiesen, der schnelle den Wert von EQD2, der mittlere den Mittelwert von EQD2 und EQD, der langsame den Wert von EQD, der verzögerte den doppelten Wert von EQD.

Das Ergebnis dieses Ansatzes ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Es ist deutlich sichtbar, dass die fünf Oberflächenkomponenten unterschiedlich langsam leerlaufen. Es ist aber auch das Problem zu sehen: Der nichtlineare Einfluss von A2 fehlt. Es werden immer Oberflächenabflüsse in den fünf Speichern bereitgestellt. Das Schwellwertverhalten fehlt eindeutig. Dieses Problem war auch nicht durch individuelle Kalibrierung der fünf Koeffizienten zu beheben.

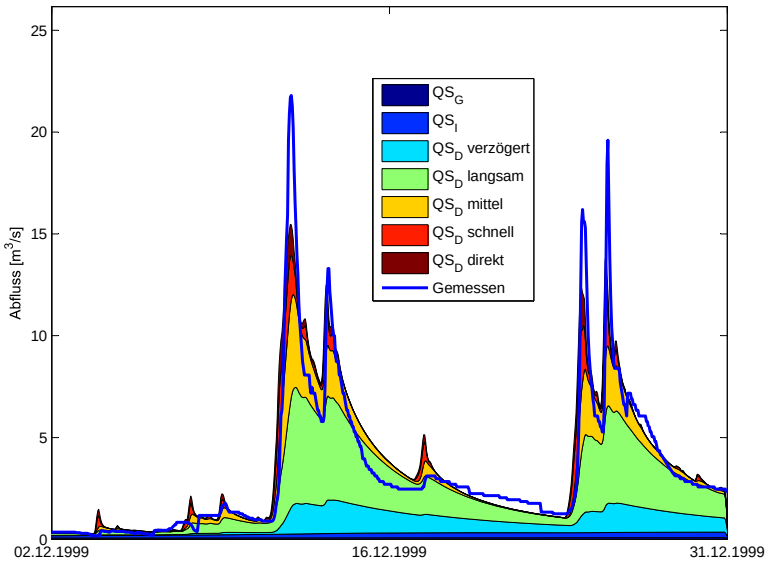

Abb. 6.14. Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum für das Gebiet Kronweiler: Es wurden fünf Speicher für die Oberflächenabflüsse je Element verwendet – einen für jede Gruppe von Kompartimenten des gleichen Abflusstyps.

Es liegt also nahe, die beiden Ansätze miteinander zu kombinieren: Fünf Gruppen von je zwei Oberflächengebietsspeichern, wobei in jeder Gruppe anhand von A2 aufgeteilt wird. Auch hier werden wieder die Koeffizienten als Vielfache von EQD und EQD2 berechnet, sodass der Kalibrierungsaufwand nicht größer sein sollte. Insgesamt ergeben sich also 12 Abflusskomponenten, während die ursprüngliche Variante mit vier Komponenten auskommt. Die neue Variante wird deshalb im Folgenden mit 12Q bezeichnet, die ursprüngliche mit 4Q.

Das Ergebnis der Umsetzung ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Das stufenweise Ansteigen der Verzögerungszeiten ist deutlich ablesbar. Die Spitzen werden besser abgebildet, das Leerlaufen ein wenig besser.

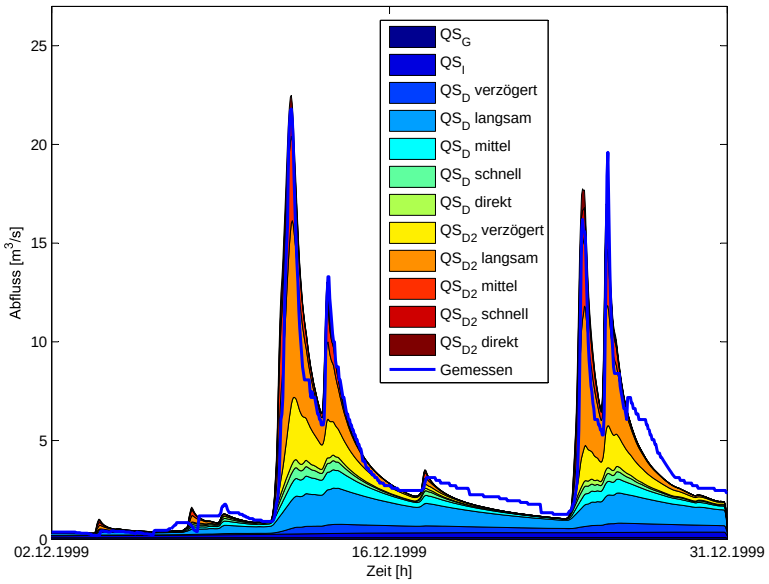

Abb. 6.15. Ausschnitt aus dem Kalibrierungszeitraum für das Gebiet Kronweiler: Es wurden 10 Speicher für die Oberflächenabflüsse je Element verwendet – zwei für jede Gruppe von Kompartimenten des gleichen Abflusstyps, wobei die Aufteilung je Gruppe anhand A2 erfolgt.

Weiterhin zeigte die 12Q-Variante hinsichtlich nahezu aller berechneten Gütemaße sowohl im Kalibrierungs- als auch insbesondere im Validierungszeitraum in allen drei Gebieten bessere Ergebnisse als die inhomogene 4Q-Variante. Die wenigen Ausnahmen zeigen sich meist bei den *Signature Measures*: Gelegentlich erzielt die 12Q-Variante geringfügig schlechtere Ergebnisse bei ohnehin guten Werten. Eine auffällige Ausnahme ist die Abweichung des Medians in Kellenbach im Kalibrierungszeitraum. Weitere Ausnahmen sind die Abweichungen der Steigungen der Abflussdauerlinien in Kellenbach und in Altenbamberg im Validierungszeitraum sowie der Wert von NSE_{log} in Altenbamberg im Validierungszeitraum und damit einhergehend der schlechtere Wert von $\%BiasFLV$ (siehe auch Tabellen 6.2 auf Seite 110 und 6.3 auf Seite 113 sowie die Darstellung der simulierten Ganglinien im Anhang B).

Bei der Anwendung der 12Q-Variante konnte jedoch nicht in allen Einzugsgebieten mit konstanten Faktoren gearbeitet werden: Im stärker reliefierten Einzugsgebiet Kronweiler ist die Spreizung der Faktoren, mit denen EQD und EQD2 multipliziert werden, größer als in Kellenbach und in Altenbamberg. Dies bedeutet zunächst bei der Kalibrierung einen gewissen Mehraufwand und steht damit in Konkurrenz zu dem Anspruch, die Kalibrierung durch die Verwendung der Abflussprozessinformation zu vereinfachen. Andererseits erscheint es dem Autor grundsätzlich möglich, die Stärke dieser Spreizung langfristig aus Gebietseigenschaften ableiten zu können.

6.4 Kalibrierung mit *P_Bilanz* und *P_Dämpfung*

Auf den folgenden Seiten wird nun der Arbeitsfluss der Kalibrierung mit den beiden Parametern *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* unter Verwendung der in Unterkapitel 4.5 beschriebenen Gütemaße und der Darstellung der Abflussdauerlinien beschrieben.

6.4.1 Kellenbach

Als erstes wird die Kalibrierung in Kellenbach beschrieben, obwohl die Parameter in Kronweiler abgeleitet wurden, da die Wirkung von *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* auf die *Signature Measures* in Kellenbach eindeutiger ist als in Kronweiler. Dies kann durch die mehrfachen Krümmungen der Abflussdauerlinie in Kronweiler begründet werden, die das Modell schlecht nachvollziehen kann.

Zunächst werden die Ergebnisse der homogen parametrisierten Fortran-Variante für den Zeitraum 1997-1999 als Referenz dargestellt. In Abbildung 6.16 ist dazu die Vierergruppe der verwendeten Abbildungen zu sehen. Diese Darstellung bleibt in allen folgenden Kalibrierungsschritten einheitlich und ermöglicht auf einen Blick, die Abweichungen zu beurteilen, bevor nach angepasster Grobkalibrierung die Feinarbeit im höher aufgelösten Zeitbereich vorgenommen wird.

In Teil a) oben links sind die beiden Ganglinien – in Blau die Messung, in Rot die Simulation – in der üblichen Darstellungsweise zu sehen. Kommt es zu größeren Abweichungen im Jahresgang, so ist dies hier sofort sichtbar. Ebenfalls kann ein Abweichen beim Leerlaufen nach den Ereignissen sofort erkannt werden und es kann grob beurteilt werden, ob die Spitzen gut abgebildet werden.

In Teil c) unten links werden die beiden Abflussdauerlinien bei gleicher Farbwahl dargestellt. Hier ist sofort sichtbar, wo die Abweichungen größer sind. Durch die einfachlogarithmische Darstellung werden Abweichungen im Niedrigwasserbereich deutlich besser sichtbar und in diesem Fall ist zu sehen, dass das Modell den Niedrigwasserbereich überschätzt.

Die in Teil b) sichtbaren *Signature Measures* quantifizieren diese Abweichungen: Die Bilanz im Modell ist zu hoch, die Steigung im mittleren Segment zu niedrig, das Volumen in den oberen 2 % wird gut abgebildet, der Niedrigwasserbereich ebenso wie der Median werden deutlich überschätzt.

In Teil d) wird die Abflussdauerlinie doppeltlogarithmisch dargestellt, um die Abweichungen bei den Spitzen zu beurteilen. Es muss hier bedacht werden, dass links der Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-4} bei einem Zeitraum von 3 Jahren lediglich 2 Werte liegen, links von 10^{-2} liegen bereits 263 Werte, also ein Zeitraum von insgesamt 11 Tagen. Hier wird also äußerst stark in den oberen Bereich hineingezoomt. Dies hat den Vorteil, dass die Abweichungen bei den Spitzen einerseits sofort am falschen Niveau erkannt werden können. Andererseits ist auch sofort zu sehen, dass das Verhalten im oberen Bereich nicht stimmig ist, wenn die Spitze getroffen wird, die Linien aber nicht gleichförmig verlaufen.

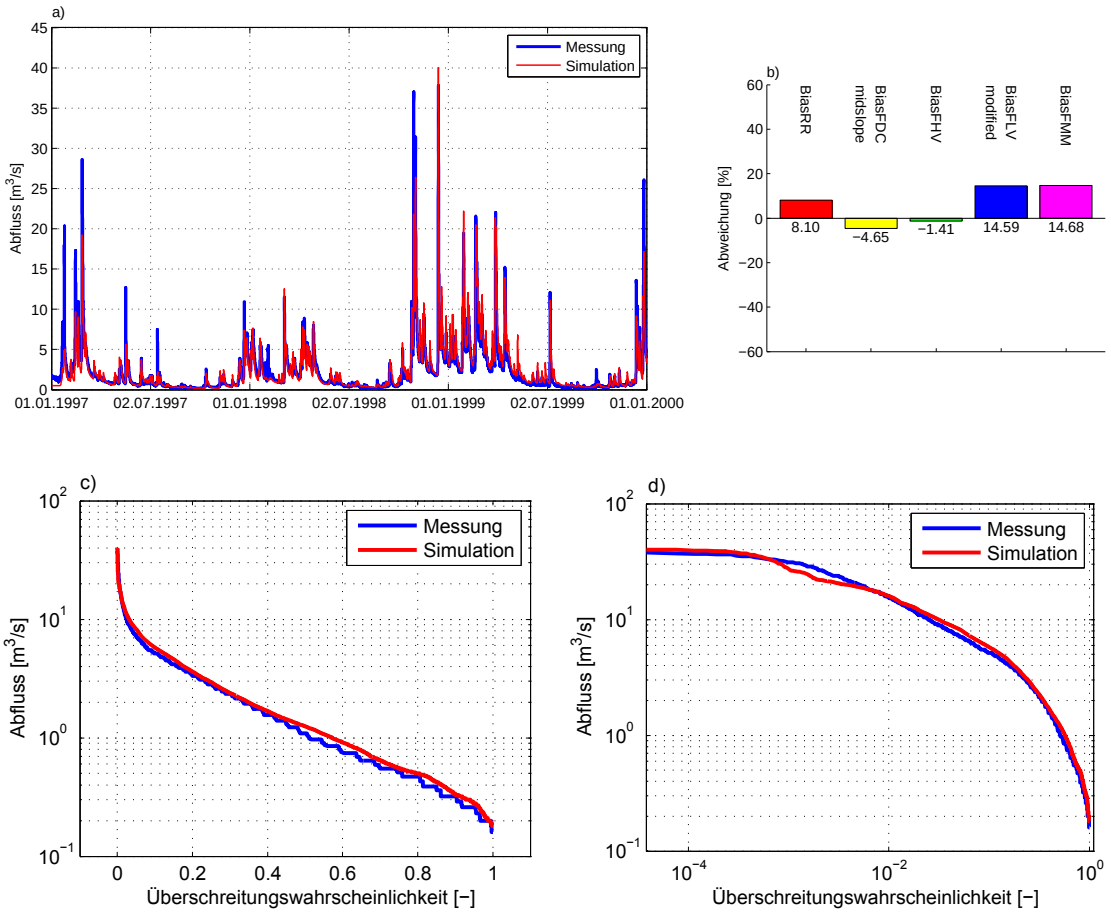

Abb. 6.16. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 der durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig durchgeführten Kalibrierung bei Verwendung des Fortran-Modells im Einzugsgebiet Kellenbach: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Nun erfolgt die Kalibrierung mit *P_Bilanz* und *P_Dämpfung*, wobei davon ausgegangen wird, dass keinerlei Kenntnisse vorliegen. Der erste Versuch ist ein Schuss ins Blaue, es wird der Mittelpunkt der Kennfelder verwendet. Das Resultat ist in Abbildung 6.17 zu sehen: Obwohl die höchste Spitze Ende 1998 recht gut getroffen wird, sind ansonsten im Zeitbereich in Teil a) größere Abweichungen im unteren Bereich sichtbar, die auch in Teil c) verdeutlicht werden: Die Abflussdauerlinie liegt im ganzen zu hoch, die Bilanz ist 18 % zu hoch (siehe Teil b), entsprechend stark wird auch der Niedrigwasserbereich überschätzt. Das Volumen in den Spitzen wird recht gut abgebildet, die Neigung ist auch nur geringfügig zu gering.

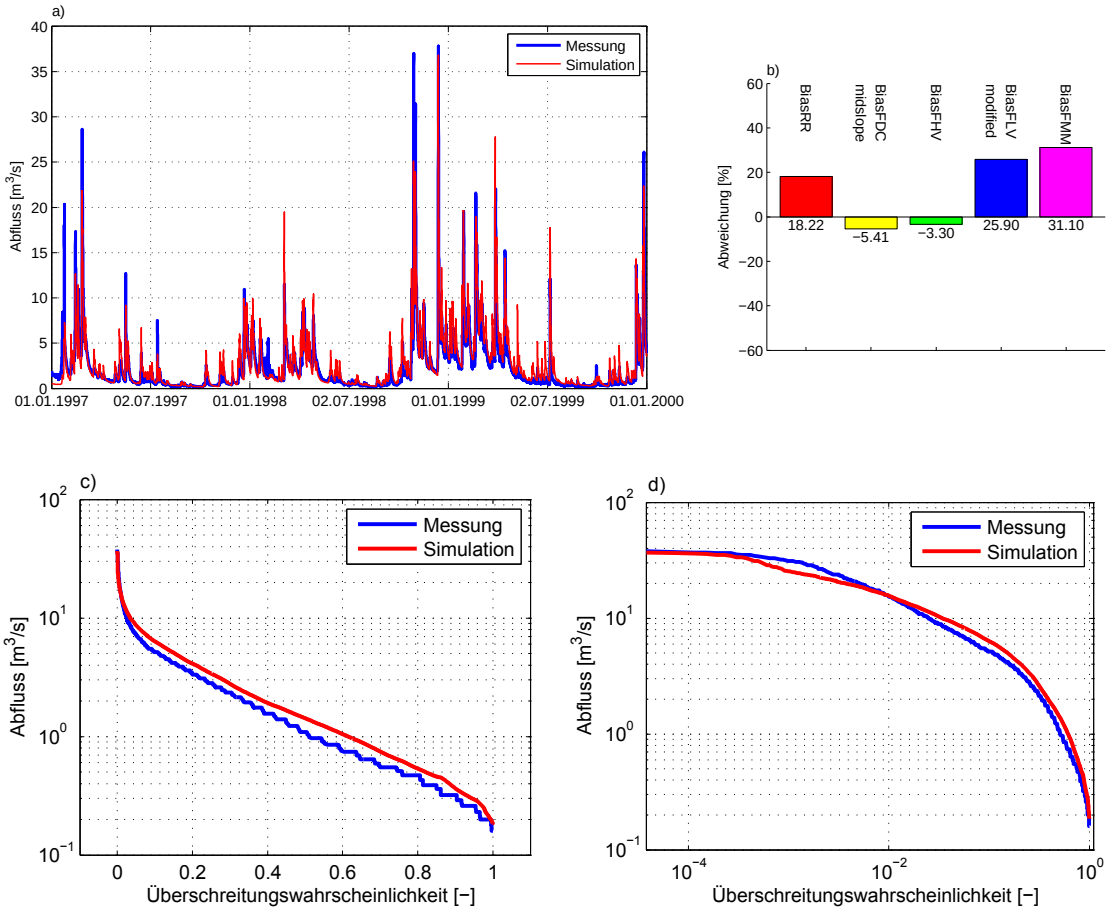

Abb. 6.17. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt eins der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Die Nash-Sutcliffe-Effizienz liegt aber bereits bei 0,78, die der logarithmierten Werte bei 0,80, R^2 bei 0,9. Diese Eigenheit, dass Simulationsergebnisse, die unter vielerlei Gesichtspunkten verbesserungswürdig sind, bereits vergleichsweise hohe Werte erreichen, wird sich mit Ausnahme von R^2 in den folgenden Schritten und auch in den anderen Gebieten wie ein roter Faden fortsetzen.

Um die Abflussdauerlinie besser anzupassen, muss sie nach unten verschoben werden, was mittels Reduktion von *P_Bilanz* erfolgt. Das Resultat ist nun in Abbildung 6.18 zu sehen: Das Niveau hat sich im Zeitbereich deutlich nach unten verschoben. Die Bilanz wird nun recht gut abgebildet. Sowohl der Extremwertbereich als auch der Niedrigwaserbereich als auch der Median sind nach unten gesunken (der obere Bereich wird noch stärker unterschätzt, der untere Bereich wird weniger stark überschätzt, der Median sinkt tatsächlich). Die Neigung hat sich lediglich leicht verändert.

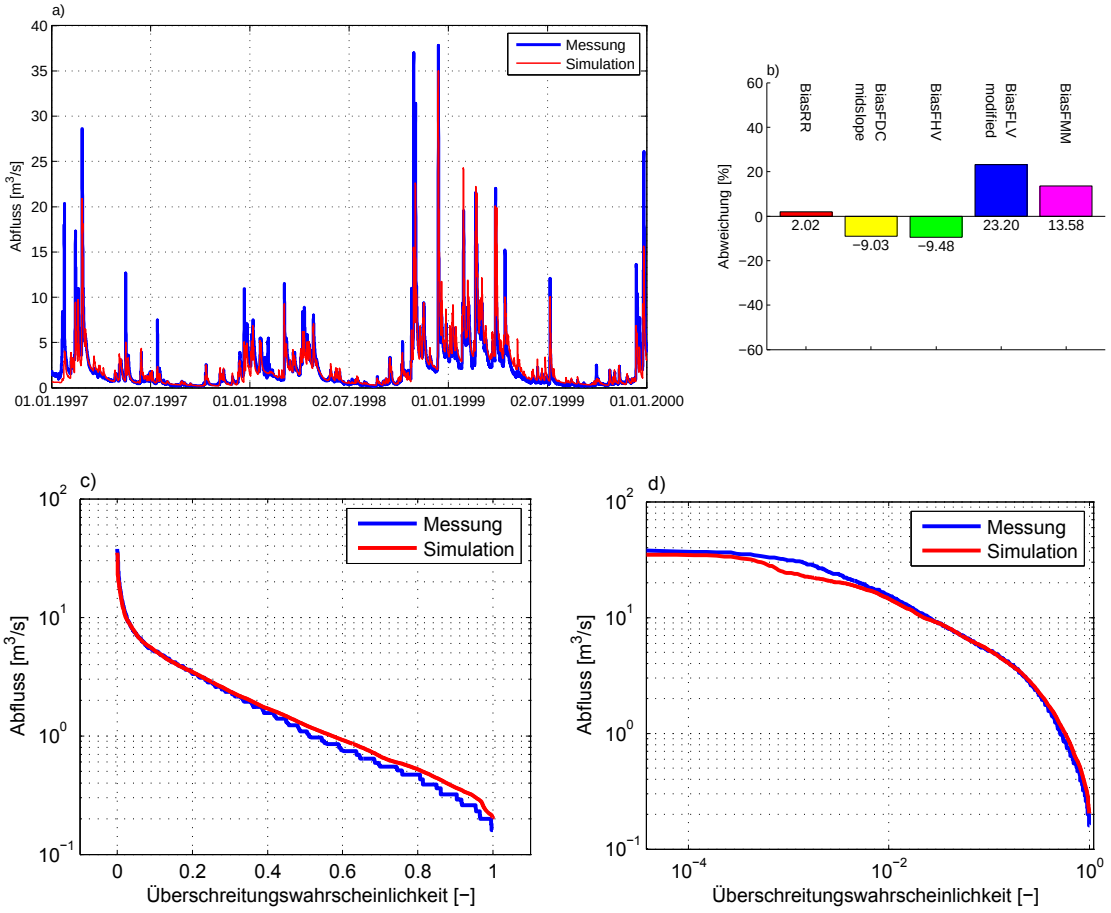

Abb. 6.18. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt zwei der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Erst jetzt wird sichtbar, wie deutlich die vorherige Variante die kleinen Spitzen im Winter und Frühjahr 1997/1998 überschätzt hat. An der Abbildung der höchsten Spitze hat sich aber wenig verändert, was auch in Teil d) ablesbar ist.

Die sonstigen Werte haben sich geringfügig verbessert: Die Nash-Sutcliffe-Effizienz liegt bei 0,8, die der logarithmierten Werte bei 0,87, R^2 bleibt bei 0,9.

Zu reinen Illustrationszwecken wird nun im dritten Schritt der Wert von *P_Dämpfung* zunächst *erhöht*, obwohl bereits jetzt offensichtlich ist, dass der Niedrigwasserbereich überschätzt wird. Die Ergebnisse dieses Schritts sind in Abbildung 6.19 gezeigt: Die Neigung hat sich geändert, die Dämpfung des Modells ist stärker, das obere Volumen wird noch stärker unterschätzt, der Niedrigwasserbereich wird deutlich stärker überschätzt – und das bei nur geringfügiger Änderung der Bilanz!

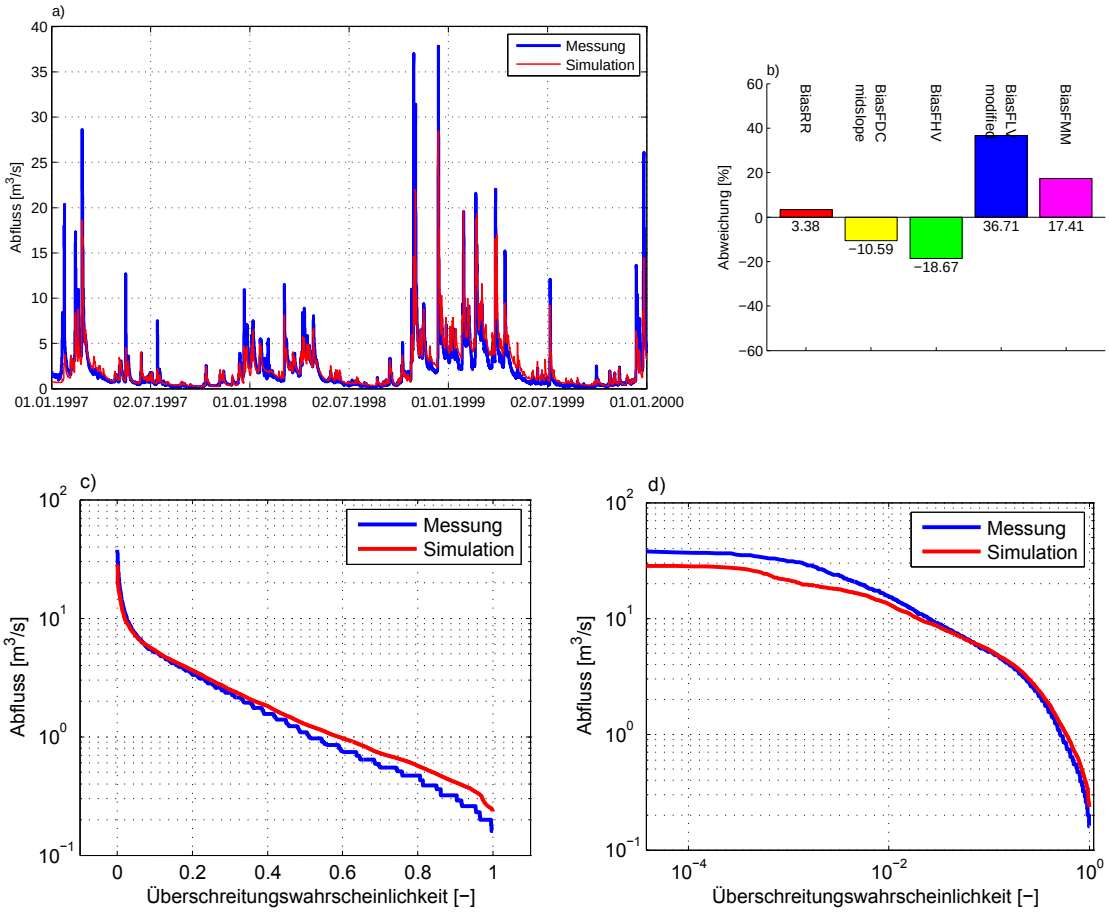

Abb. 6.19. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt drei der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Obwohl dieser Schritt im Sinne einer Kalibrierung natürlich in die falsche Richtung führt, sollen trotzdem die Gütemaße angegeben werden: Die Nash-Sutcliffe-Effizienz liegt bei 0,79, die der logarithmierten Werte bei 0,85, R^2 bleibt bei 0,89.

Eine sinnvollere Richtung führt ausgehend vom vorherigen Schritt zu einer Reduktion von *P_Dämpfung* und resultiert in den in Abbildung 6.20 gezeigten Ergebnissen.

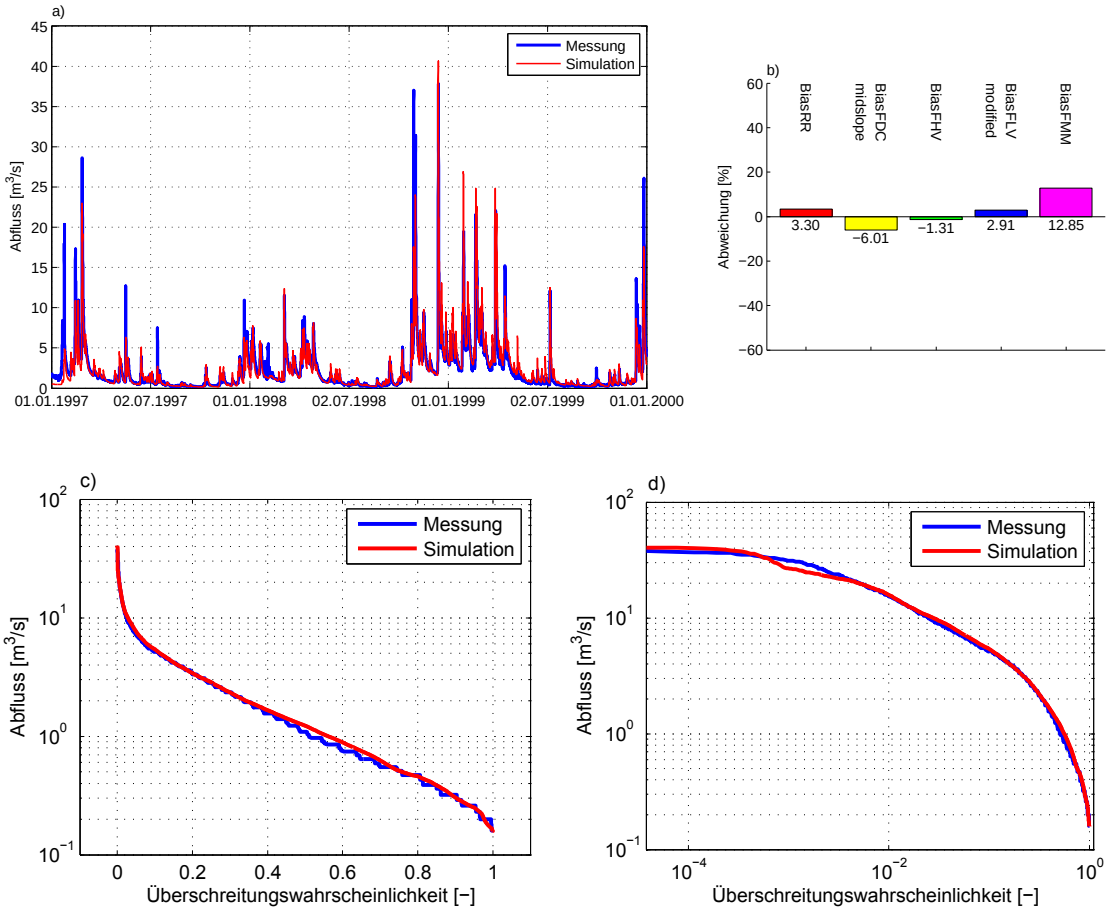

Abb. 6.20. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im Schritt vier der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Im Vergleich zum zweiten Schritt hat sich die Bilanz kaum verändert, aber die Neigung passt nun besser. Die Dämpfung scheint auch stimmiger, denn die Abweichungen im oberen und unteren Bereich sind gering. Der Median hat sich nahezu nicht verändert, die Änderung von *P_Dämpfung* hat die Abflussdauerlinie also nahezu perfekt um den Median rotiert, ohne das Volumen stark zu verändern.

Die üblichen Gütemaße betragen nun 0,8 (NSE), 0,87 (NSE_{log}) und 0,89 (R^2). Gegenüber dem ersten Schritt hat sich also im Wesentlichen die Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Werte verändert.

Mit den vergangenen Schritten sollte verdeutlicht werden, dass sich *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* in diesem Einzugsgebiet – das zur Entwicklung der Kennfelder nicht verwendet wurde! – nahezu perfekt in der gewünschten Art und Weise

verhalten. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde kein Einzelereignis in einem kleineren Ausschnitt des Zeitbereichs betrachtet.

Es folgen nun mehrere zusammengefasste Schritte, in denen *P_Bilanz* minimal weiter gesenkt wird, der Wert von *P_Dämpfung* beibehalten wird, und in denen kleinere Anpassungen an den Parametern der Gebietsspeicher vorgenommen werden: EQD wird verringert, EQD2 erhöht, A2 ebenfalls erhöht.

Diese Änderungen waren in allen Einzugsgebieten notwendig, da natürlich der inhomogene Parametersatz in anderen Anteilen resultieren kann.

Als Endergebnis der Kalibrierung ist in Abbildung 6.21 das Resultat nach dem letzten Schritt dargestellt.

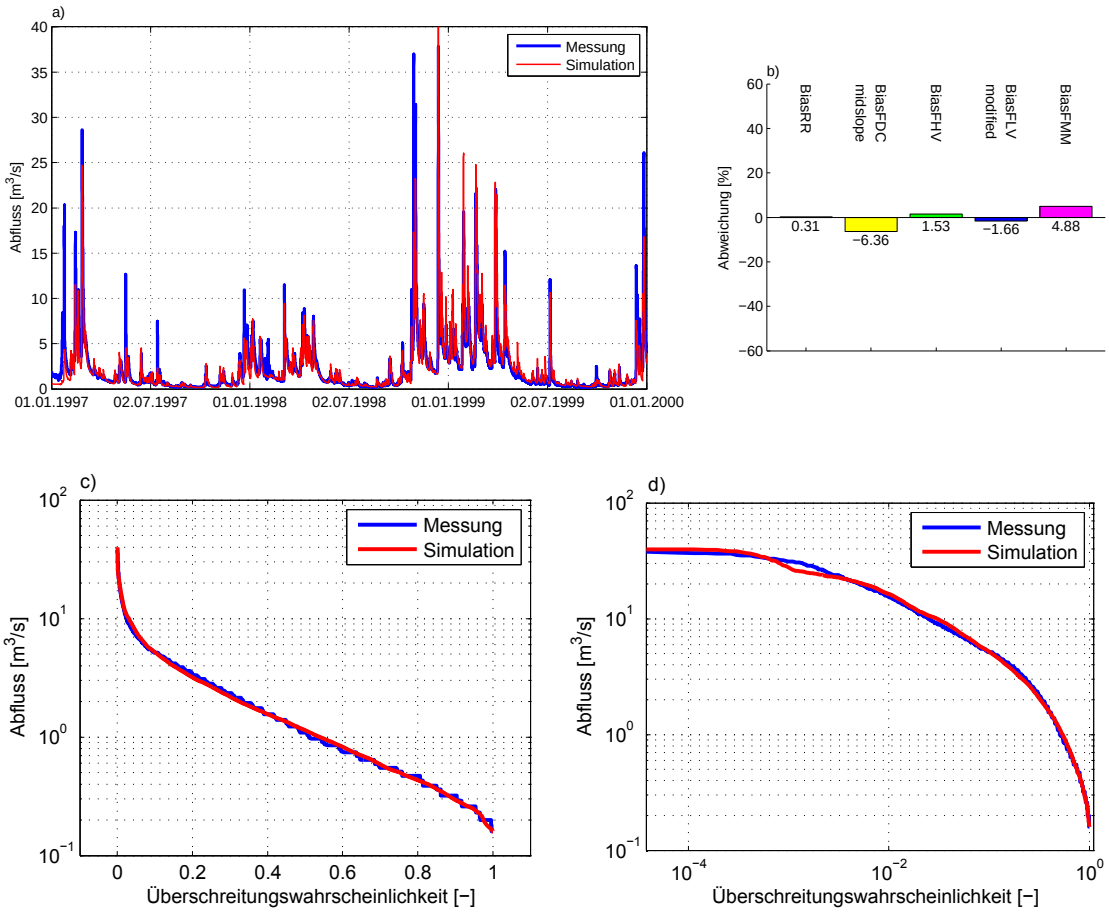

Abb. 6.21. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im letzten Schritt der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kellenbach: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Es ist zu sehen, dass die Gütemaße nahezu alle optimiert werden konnten. Lediglich die Steigung passt nicht ganz, da für die Abweichung der Steigung die Werte bei den Überschreitungswahrscheinlichkeiten 0,2 und 0,7 verwendet werden. In diesem Teil ist in der gemessenen Abflussdauerlinie aber eine leichte S-Form

erkennbar, die vom Modell nicht nachvollzogen wird. Möglicherweise können hier durch weitere feine Justierungen der lateralen Drainage weitere Fortschritte erzielt werden.

Die üblichen Gütemaße geben diese Übereinstimmung nur teilweise wieder: 0,79 (NSE), 0,88 (NSE_{log}), 0,90 (R^2). Keiner dieser Werte überschreitet die Werte der homogenen Fortran-Variante.

Die Gründe dafür liegen auch darin, dass hier auf eine gezielte Optimierung dieser Werte verzichtet wurde. Die Werte werden geringfügig besser, wenn A2 und EQD2 verringert werden: Die Spitzen sind akzentuierter. Es werden aber bei dieser Parametrisierung einige kleinere Ereignisse deutlich überschätzt. Dies erscheint wenig sinnvoll, aber grundsätzlich möglich. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch Haag-Wanka u. Luce (2010) bei der Abbildung der Bodenhydrologischen Karte durch das Infiltrationsmodul in LARSIM.

Weiterhin ist es so, dass die größeren Abweichungen im ansteigenden Ast der Ereignisse auftreten: Das Modell überschätzt hier häufig, obwohl die anschließende Spitze vergleichsweise gut abgebildet wird. Solche Abweichungen wirken sich auf Güßtemaße, in denen die Wertepaare immer zeitschrittweise verglichen werden, deutlich negativer aus als auf die *Signature Measures*. Noch besser wäre die Beurteilung durch ein Verfahren wie in Ehret u. Zehe (2011) beschrieben.

Abschließend zur Kalibrierung von LARSIM in Kellenbach soll noch auf den Anhang B verwiesen werden. Dort finden sich für alle Einzugsgebiete großformatige Abbildungen der Simulationsergebnisse einzelner Jahre im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum mit der Darstellung der Abweichungen der homogenen Variante gegenüber der inhomogenen Variante. Die Ergebnisse für Kellenbach beginnen ab Seite 186. Bei diesen Abbildungen lohnt sich ein Blick in die digitale Fassung der Dissertation, in der Details der vektorisierten Abbildungen wesentlich besser beurteilt werden können, als dies in der Druckfassung möglich ist. Zusätzlich werden am Abschluß dieses Unterkapitels die einzelnen Gütemaße für alle Gebiete in Tabelle 6.2 übersichtlich dargestellt.

Es folgt nun eine kurze Beschreibung der Nutzungsmöglichkeiten der doppeltlogarithmisch dargestellten Abflussdauerlinie zur Bestimmung günstiger Werte von EQD2 und A2. Dies erfolgt zwar anhand der Abbildungen aus Altenbamberg, aber dort traten die für die Erläuterungen notwendigen Einzelschritte tatsächlich auf und die Beschreibung passt hier besser zum gesamten Arbeitsfluss der Kalibrierung.

In Abbildung 6.22 werden dazu drei simulierte Abflussdauerlinien mit den Messungen verglichen. Der Unterschied zwischen Teil a) und b) liegt im Wert von A2: In a) ist er 0,9, in b) ist er 1,2. Es ist zu sehen, dass der obere Bereich mehr oder weniger parallel nach unten verschoben wird. Ein größerer Wert von A2 bedeutet, dass mehr Oberflächenabflüsse im Bodenmodul generiert werden müssen, um den Speicher der Direktabflüsse zu füllen.

Der Unterschied zwischen Teil a) und c) liegt im Wert von EQD2: In a) ist er 100, in b) ist er 80. Hier ist zu sehen, dass sich das Niveau kaum verschoben hat, wenn der Schnittpunkt zwischen der roten und der blauen Linie als Bezugspunkt

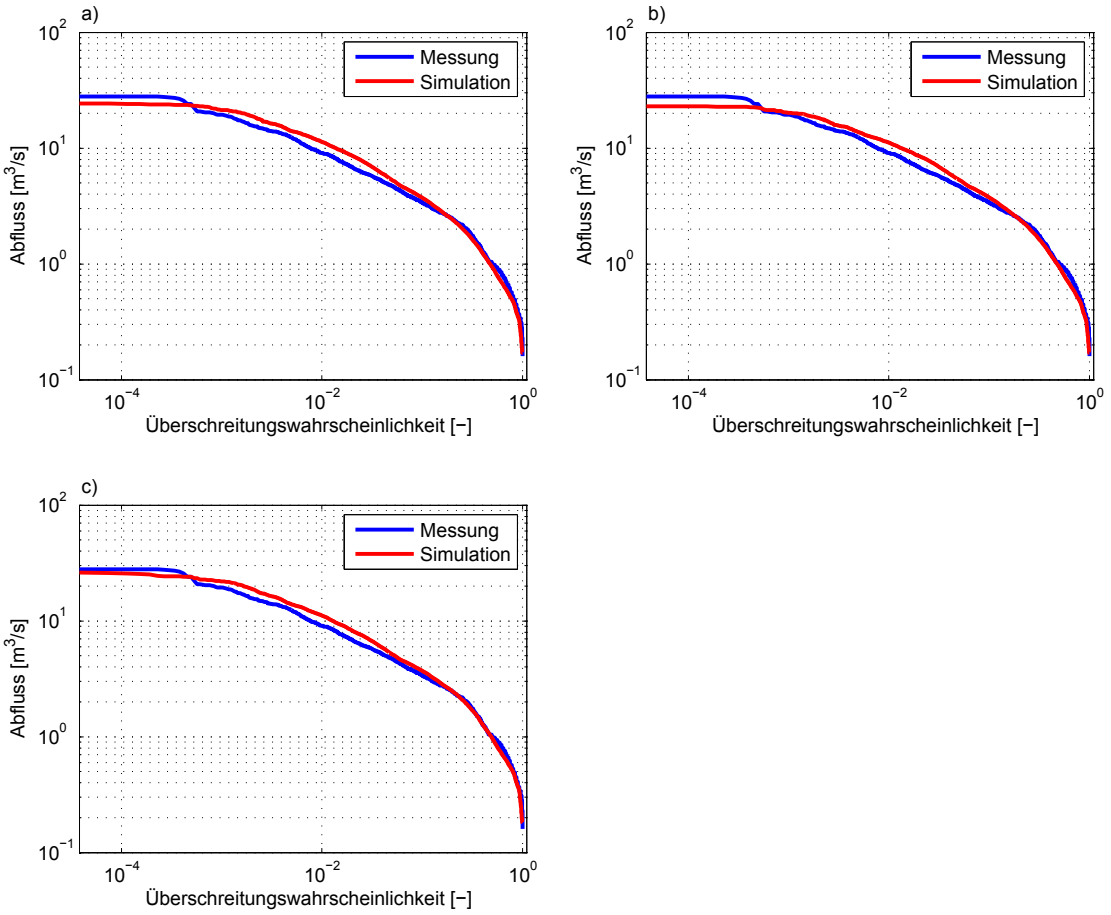

Abb. 6.22. Aus unterschiedlichen Werten von EQD2 und A2 resultierende Abflussdauerlinien in doppeltlogarithmischer Darstellung: Von a) nach b) wurde A2 vergrößert und von a) nach c) wurde EQD2 verkleinert.

verwendet wird. Die Neigung der simulierten Linie hat sich aber verschoben, das Modell reagiert hier akzentuierter.

An diesem konkreten Beispiel wird deutlich, dass eine perfekte Anpassung in Altenbamberg kaum möglich ist, da die Werte einen Sprung ab einem gewissen Niveau aufweisen. In der Darstellung ist dies bei einem Drittel der Strecke zwischen 10^{-4} und 10^{-2}. Dieser Sprung tritt im Validierungszeitraum nicht auf. Das Modell ist im Kalibrierungszeitraum nicht in der Lage, diesen Sprung nachzuvollziehen, weshalb die Abbildung der Spitzen generell mit Vorsicht zu genießen ist. Was diesen Sprung verursacht, kann nur vermutet werden, etwa eine Eigenheit der W-Q-Beziehung, entzieht sich aber letztlich der Kenntnis des Autors. Aus Sicht des Autors ist ein paralleler Verlauf, der den oberen Bereich im Ganzen nachvollzieht, der Abbildung der höchsten Spitze vorzuziehen. Auf diesen Aspekt wird aber bei der Ergebnisdarstellung des Gebietes Altenbamberg näher eingegangen.

6.4.2 Kronweiler

Auch für das Einzugsgebiet Kronweiler sollen zunächst die Ergebnisse der homogen parametrisierten Fortran-Version vorgestellt werden, die in Abbildung 6.23 in der bereits aus dem letzten Unterkapitel bekannten Darstellungsweise präsentiert werden.

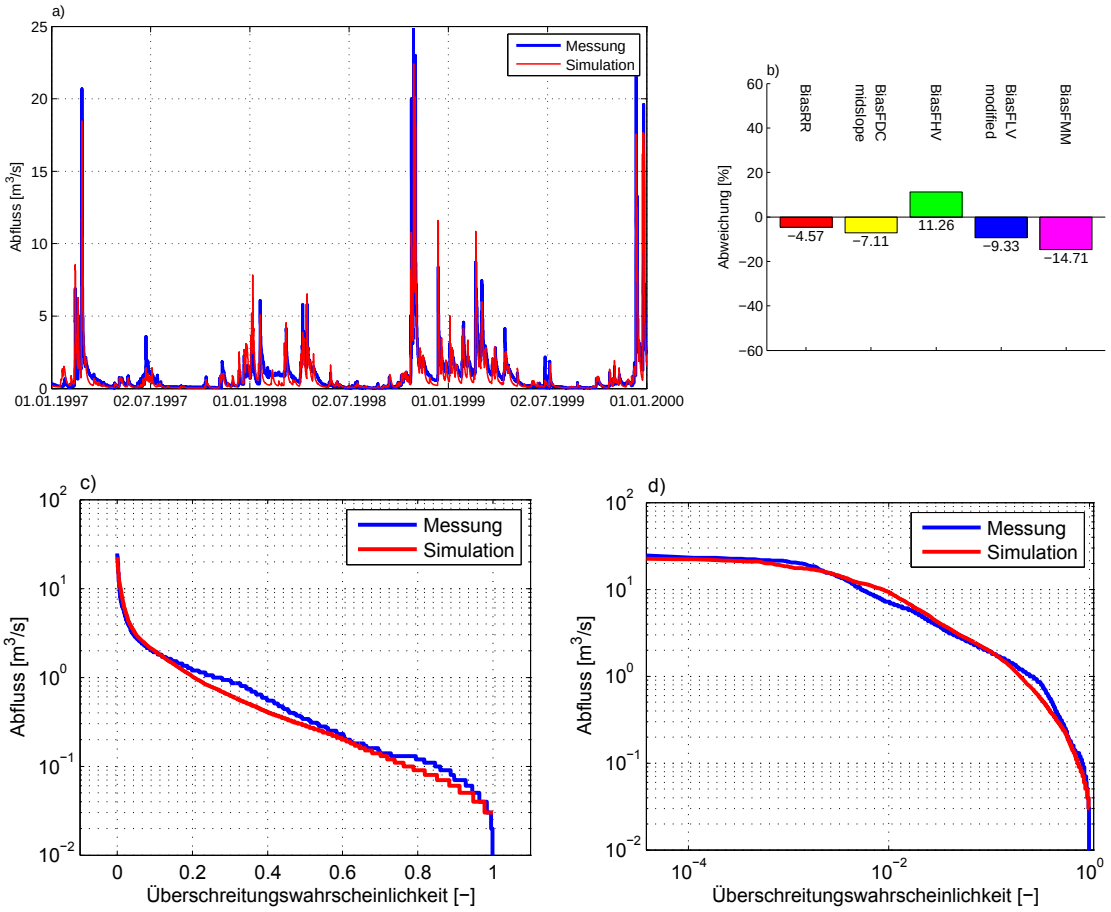

Abb. 6.23. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 der durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig durchgeführten Kalibrierung bei Verwendung des Fortran-Modells im Einzugsgebiet Kronweiler: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Im Zeitbereich in Abbildungsteil a) sind zwei wesentliche Defizite zu sehen: Zum einen werden die höheren Abflussspitzen systematisch um wenige Kubikmeter pro Sekunde unterschätzt, zum anderen wird das Leerlaufen nach den Ereignissen ebenfalls systematisch unpräzise abgebildet, was insbesondere im Winter 1998/1999 auffällt. Weiterhin scheint es um den Jahreswechsel 1997/1998 Probleme mit der Abbildung des Schnees zu geben: Die erste überschätzte Spitze direkt nach dem Jahreswechsel mit den darauf folgenden unterschätzten Bereichen deutet

darauf hin, dass im Model keine Schneedecke aufgebaut wurde, die an die Realität heranreichte, sodass im Folgenden das Wasserdargebot beim Abschmelzen fehlt.

In Teil b) und c) ist zu sehen, dass die Bilanz insgesamt unterschätzt wird, ebenso der Niedrigwasserbereich. Im Gegenzug ist das Volumen in den oberen 2 % über 11 % zu hoch. In Teil c) ist auch die bereits erwähnte mehrfache Krümmung der Abflussdauerlinie zu sehen, die das Modell nicht nachbilden kann.

Die bereits erwähnte leichte Unterschätzung der Spitzen ist in Teil d) sichtbar: Der obere Teil verläuft nicht parallel, der höchste Punkt ist in der Messung höher gelegen.

Die Werte der restlichen Gütemaße betragen bei der Nash-Sutcliffe Effizienz 0,87, die der logarithmierten Werte beträgt 0,75, R^2 beträgt 0,94.

Im Gegenzug wird nun in Abbildung 6.24 das Resultat nach dem letzten Kalibrierungsschritt mit *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* sowie der Anpassung von EQD, EQD2, A2 und des KG-Faktors dargestellt. Die Anpassung des KG-Faktors war notwendig, weil der Rand der Kennfelder hinsichtlich *P_Bilanz* erreicht wurde.

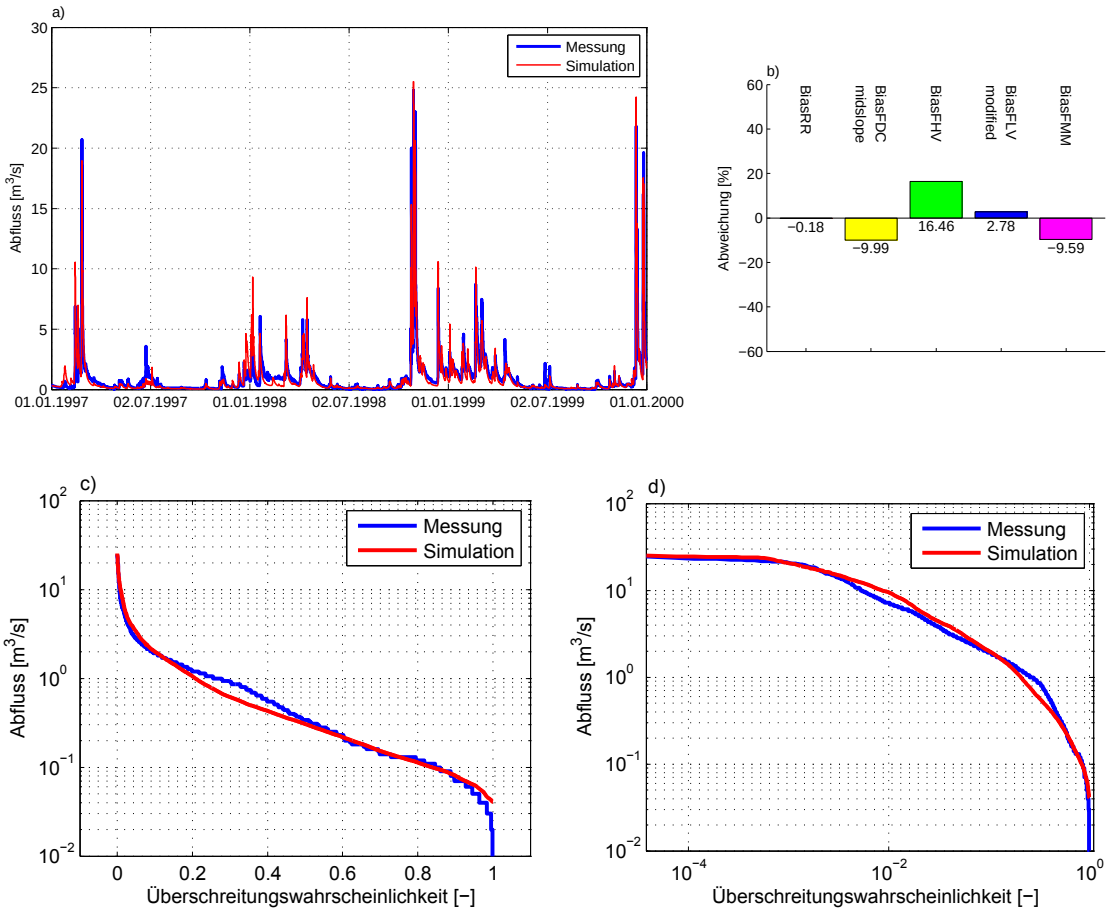

Abb. 6.24. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im letzten Schritt der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Kronweiler: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Abbildungsteil a) zeigt, dass die Abbildung der Spitzen nicht die eben gesehene Systematik der konstanten Unterschätzung zeigt. Die erste Spitze Anfang 1997 wird leicht unterschätzt, die Ende 1998 minimal überschätzt, die letzte am Jahresende 1999 leicht überschätzt. Hier zeigt sich wieder die Notwendigkeit der Kompromissbildung: Eine Verbesserung der Abbildung des einen Ereignisses bringt Verschlechterungen bei anderen mit sich.

Das bei der homogenen Variante kritisierte schlechtere Leerlaufen wird hier zumindest im Winter 1998/1999 ein wenig besser abgebildet. Die schlechte Abbildung des Schnees im Winter 1997/1998 wird natürlich durch die inhomogene Parametrisierung des Bodenmoduls nicht beeinflusst.

Teile b) und c) zeigen wieder die Problematik der Kompromisse: Das Volumen wird zwar nahezu perfekt abgebildet, ebenso sind die Abweichungen im Niedrigwasserbereich gering, aber die besagte Form der Kurve sorgt dafür, dass die Gütemaße $\%BiasFDCmidslope$ und $\%BiasFMM$ sehr schlechte Werte zeigen.

Das Volumen in den oberen 2 % wird deutlicher überschätzt als bei der homogenen Variante, obwohl die Spitzen ein wenig besser abgebildet werden.

Die üblichen Gütemaße betragen hier 0,86, 0,82 und 0,95.

6.4.3 Altenbamberg

Als drittes Gebiet wurde Altenbamberg kalibriert. Wieder werden zunächst in Abbildung 6.25 Resultate der homogen parametrisierten Variante vorgestellt.

Im Zeitbereich in Teil a) ist zu sehen, dass die Anpassung der Spitzen unterschiedlich gut gelungen ist. Die Spitze Anfang 1997 wird ziemlich genau abgebildet, die absolut höchte Ende 1998 deutlich unterschätzt, die darauf folgende minimal unterschätzt, die letzte im Zeitraum Ende 1999 wird leicht unterschätzt. Die Abbildung der jahreszeitlichen Dynamik ist gelungen, allerdings werden sehr viele kleinere Sommerereignisse vom Modell kaum nachvollzogen.

Die Abflussdauerlinie wird in diesem Einzugsgebiet besonders stark verfehlt: Das Volumen ist mit 9,47 % Überschätzung deutlich zu hoch, die Steigung stimmt nicht, das Volumen in den oberen 2 % ist deutlich zu hoch. Dafür wird der Niedrigwasserbereich unterschätzt.

In Teil d) ist der bereits bei der Anpassung von EQD2 und A2 in Kellenbach beschriebene Sprung in der Abflussdauerlinie zu sehen. Das Modell kann diesen Sprung nicht nachvollziehen. Möglicherweise resultiert er aus dem Wellenablauf oder auch aus Eigenheiten der Eingangsdaten.

In Altenbamberg konnten die im Bericht angegeben Gütemaße nicht selbst nachvollzogen werden. Während in allen anderen Gebieten die Werte im Bericht eher zu niedrig angegeben sind, wurden hier selbst niedrigere Werte ausgerechnet: 0,81, 0,86 und 0,93.

Zuletzt fehlen nun noch die Ergebnisse der Kalibrierung nach dem letzten Schritt im Einzugsgebiet Altenbamberg. Abbildung 6.26 zeigt diese Ergebnisse.

Es erscheint sinnvoll, mit Teil d) anzufangen, da dieser die wesentliche Problematik zeigt. Das Modell ist im Kalibrierungszeitraum, wie bereits erwähnt, nicht in der Lage, diesen Sprung nachzuvollziehen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie

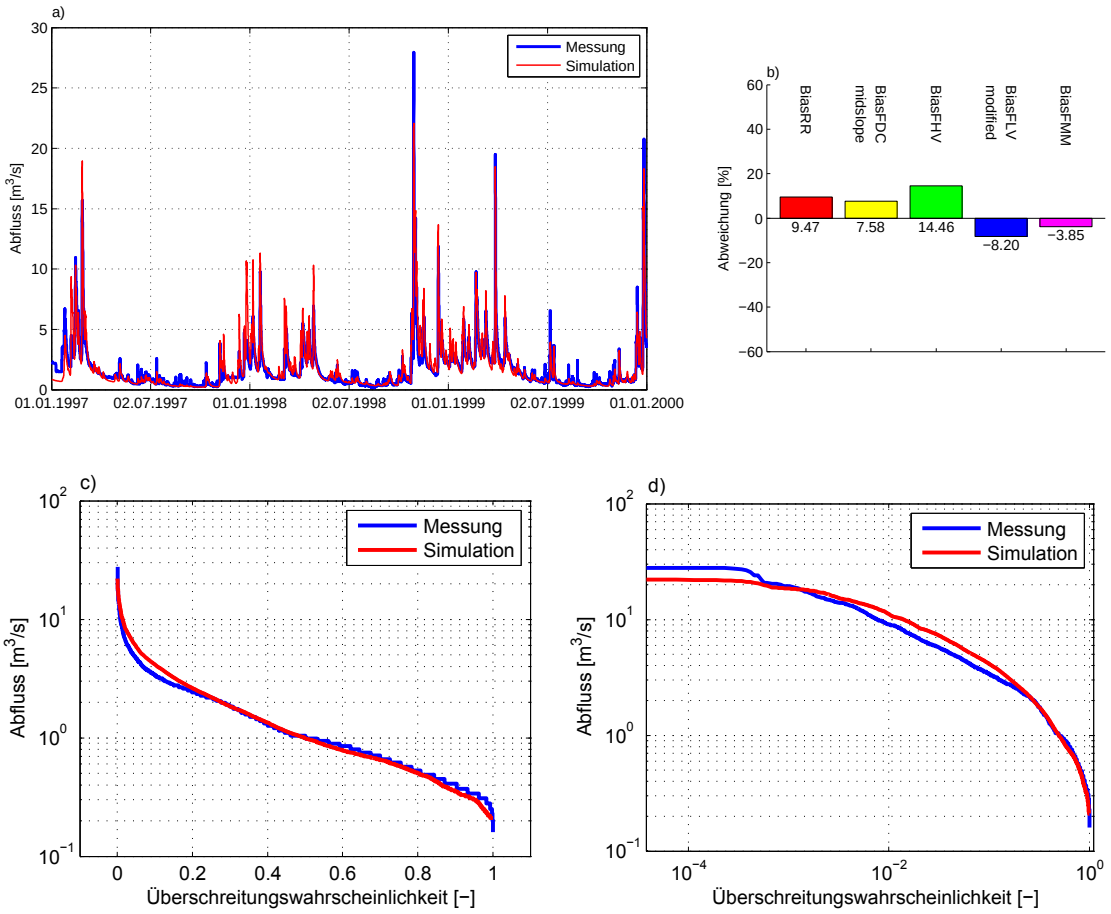

Abb. 6.25. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 der durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig durchgeführten Kalibrierung bei Verwendung des Fortran-Modells im Einzugsgebiet Altenbamberg: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

damit umgegangen werden kann. Die erste Variante, die auch bei der homogenen Parametrisierung gewählt wurde, ist ein Mittelweg: Eine leichte Unterschätzung im Bereich der höchsten Werte, eine leichte Überschätzung der Werte darunter. Das führt, wie oben in der Ergebnisdarstellung der homogenen Variante zu sehen ist, zu einer systematischen Überschätzung all der kleinen Ereignisse in der Größenordnung 10 m^3/s, was im Vergleich der doppeltlogarithmischen Darstellungen beider Varianten besonders deutlich sichtbar ist. Die zweite Variante erschien dem Autor sinnvoller: die Extrapolation des Verlaufs vor dem Sprung. Die Vermutung war, dass dieser Sprung durch fehlerhafte Eingangsdaten oder eine Eigenheit der W-Q-Beziehung verursacht wurde.

Abseits dieser absoluten Spitzen, die lediglich die Ereignisse Ende 1998 und im Frühjahr 1999 betreffen, zeigen sich vor allem bei den Ereignissen, die ungefähr 10 m^3/s erreichen, geringere Überschätzungen. Auch die kleineren Spitzen in den Sommermonaten werden ein wenig besser abgebildet – aber nicht wirklich gut.

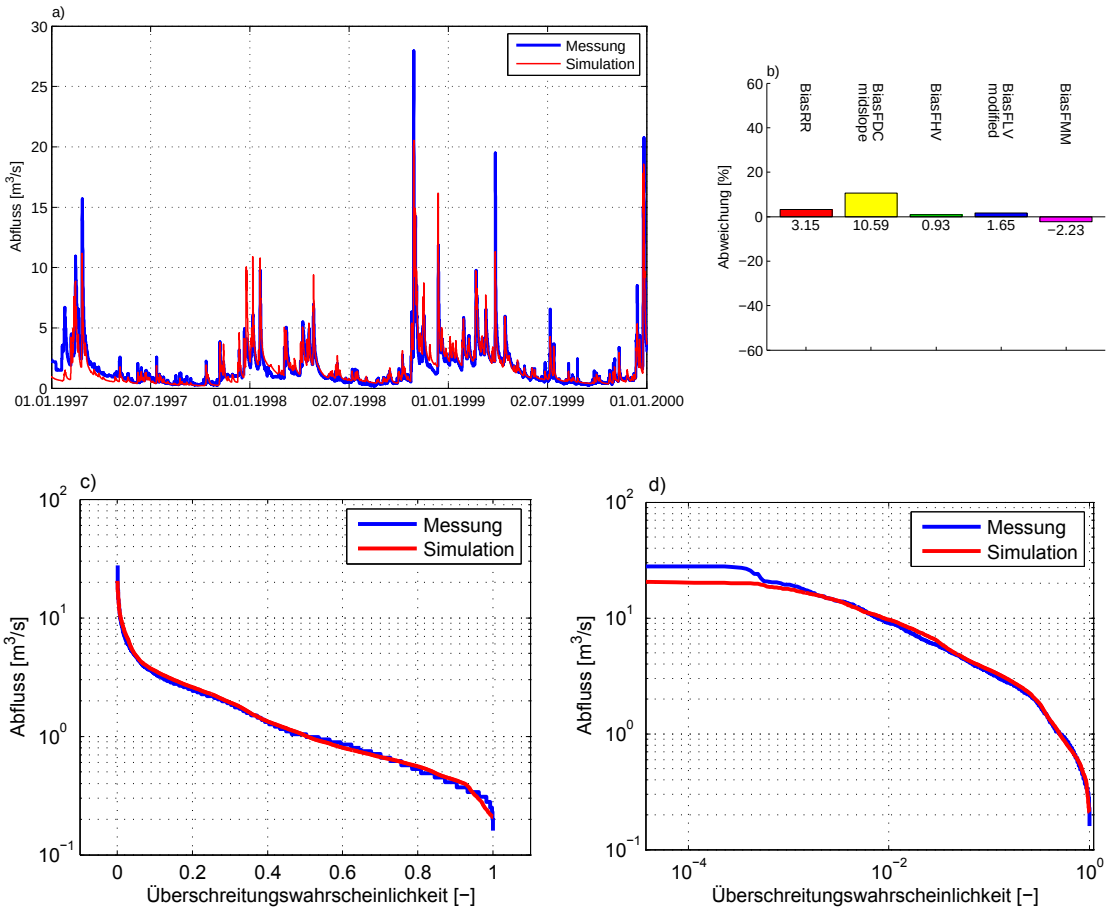

Abb. 6.26. Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum 1997-1999 im letzten Schritt der inhomogenen Kalibrierung im Einzugsgebiet Altenbamberg: a) Ganglinien im Vergleich, b) *Signature Measures*, c) Abflussdauerlinien in einfachlogarithmischer und d) doppeltlogarithmischer Darstellung

Teile b) und c) zeigen, dass die Anpassung der Abflussdauerlinie recht gut gelungen ist, nahezu alle *Signature Measures* zeigen sehr geringe Werte. Die Abweichung der Bilanz ist dabei am relevantesten. In Altenbamberg war es ebenfalls nötig, den KG-Faktor einzusetzen, da auch hier der Rand des Parameterkennfeldes erreicht wurde. Eine weitere Reduktion des KG-Wertes (er beträgt 0,95) führte aber zu einer generellen Verschlechterung.

Auch hier sollen noch die üblichen Gütemaße angegeben werden: 0,79 (NSE), 0,82 (NSE_{log}) und 0,9 (R^2).

6.4.4 Gesamtübersicht

Abschließend zum Thema Kalibrierung soll noch eine Gesamtübersicht der Ergebnisse aller Gebiete in Tabelle 6.2 geboten werden. Die Farbgebung der einzelnen Zellen hebt bessere Werte in Grün hervor und schlechtere in Rot. Als Referenz dient in jedem Einzugsgebiet die homogene Variante. In den ersten drei Spalten

wird die inhomogene Variante grün bzw. rot eingefärbt, falls das inhomogene Modell um mindestens 0,02 besser bzw. schlechter ist als das homogene. In den Spalten der *Signature Measures* wird ein Wert grün bzw. rot hervorgehoben, falls der Betrag des Wertes um mindestens 30% besser bzw. schlechter ist als der Betrag des homogenen Referenzwertes.

Variante	NSE	NSE_{log}	R^2	$\%BiasRR$	$\%BiasFDC$	$\%BiasFHV$	$\%BiasFLV$	$\%BiasFMM$
Kronweiler $65\,km^2$								
homogen	0,87[3]	0,75[4]	0,94[5]	-4,57	-7,11	11,27	-9,33	-14,71
inhomogen 4Q	0,86	0,82	0,95	-0,18	-9,99	16,46	2,78	-9,59
inhomogen 12Q	0,89	0,84	0,95	-0,67	-11,29	8,65	4,17	0,43
Kellenbach $362\,km^2$								
homogen	0,85[6]	0,88	0,93[7]	8,10	-4,65	-1,41	14,59	14,68
inhomogen 4Q	0,79	0,88	0,9	0,31	-6,36	1,53	-1,66	4,88
inhomogen 12Q	0,82	0,88	0,91	2,45	-5,02	-3,08	-2,62	11,76
Altenbamberg $318\,km^2$								
homogen	0,81[8]	0,86	0,93[9]	9,47	7,58	14,46	-8,20	-3,85
inhomogen 4Q	0,79	0,82	0,9	3,04	10,59	0,93	1,65	-2,23
inhomogen 12Q	0,82	0,81	0,91	0,38	4,45	-3,57	-2,25	-3,71

Tabelle 6.2. Übersicht der berechneten Gütemaße für die Pegel Kronweiler, Kellenbach und Altenbamberg im Zeitraum 1997-1999 (Kalibrierungszeitraum). Homogene Zeitreihen wurden mit der Fortran-Version simuliert.

Drei Effekte erscheinen dem Autor besonders erwähnenswert:

- In der Gesamtbetrachtung ergeben sich keine prinzipiellen Vorteile für eine der drei Varianten, die an diesen Zahlen ablesbar wären.
- Hinsichtlich der üblichen Gütemaße ist die homogene Variante tendenziell besser. Aber diese Maße wurden bei der inhomogenen Parametrisierung auch lediglich am Rande betrachtet und nicht gezielt optimiert, eher ignoriert.

[3] Angabe im Bericht 0,85
[4] Angabe im Bericht 0,68
[5] Angabe im Bericht 0,88
[6] Angabe im Bericht 0,83
[7] Angabe im Bericht 0,87
[8] Angabe im Bericht 0,85
[9] Angabe im Bericht 0,89

- Hinsichtlich der *Signature Measures* sind die inhomogenen Varianten tendenziell besser. In den wenigen Ausnahmen gibt es dafür plausible Erklärungen: Die Neigung in Kronweiler stimmt aufgrund der eigentümlichen Form der Abflussdauerlinie nicht. Die Abbildung der Spitzen ist bei allen Varianten nicht wirklich gut. In Kellenbach hingegen sind die Werte, bei denen die inhomogenen Varianten schlechter sind, generell gut. Die Abweichung in der Neigung ist auch hier in der leichten S-Form der Abflussdauerlinie zu suchen. Der Unterschied in der Abbildung in den Spitzen bei der 4Q-Variante ist bezüglich des Betrages marginal, wenn auch mit unterschiedlichem Vorzeichen. Die Abweichung der 12Q-Variante ist mit etwas mehr als 3% ebenfalls noch gut. Auch in Altenbamberg ist der Grund für die Abweichung in der Neigung bei der 4Q-Variante die S-Form. Diese wird von der 12Q-Variante offensichtlich besser nachgebildet. Bei den anderen Maßen hingegen, in denen die homogene Variante schlechter ist, sind die Unterschiede oft deutlicher.

Andererseits sollte der Umstand, dass die *Signature Measures* bei den inhomogenen Varianten besser sind, auch nicht überbewertet werden. Schließlich wurden sie bei der Kalibrierung der inhomogenen Varianten verwendet und bei der Kalibrierung der homogenen Variante nicht.

6.5 Validierung

6.5.1 Der Zeitraum 2000-2003

Zur Validierung wurde der gleiche Zeitraum bewertet, der auch im Bericht zur homogenen Variante verwendet wurde: die Jahre 2000-2003. Die Ergebnisse werden hier im Gegensatz zum Unterkapitel der Kalibrierung ein wenig direkter gegenübergestellt, um bessere Vergleiche anstellen zu können, da der Fokus nicht mehr auf den Feinheiten des Kalibrierungsablaufs liegt. Zunächst werden alle berechneten Gütemaße in Tabelle 6.3 in der gleichen Systematik wie im Kalibrierungszeitraum dargestellt. Dann finden sich in Abbildung 6.27 auf Seite 117 bis 6.29 auf Seite 119 die Gegenüberstellungen der einfach- und doppeltlogarithmisch dargestellten Abflussdauerlinien für die drei Einzugsgebiete. Die großformatige Darstellung einzelner Jahre findet sich wieder im Anhang B. Die Ergebnisse des Validierungszeitraums beginnen dort für Kronweiler auf Seite 178, für Kellenbach auf Seite 192 und für Altenbamberg auf Seite 206.

Beginnend mit der Tabelle zeigt sich wieder ein uneinheitliches Bild, wenn lediglich diese Werte zum Vergleich herangezogen werden. Die klassischen Gütemaße sind in Kronweiler bei den inhomogenen Varianten durchgehend besser, in Kellenbach sind die Werte der 4Q-Variante schlechter, die der 12Q-Variante ungefähr gleich gut, in Altenbamberg ist es gemischt. Die gleiche Durchmischung zeigt sich bei den *Signature Measures*. Es müssen also in jedem Einzugsgebiet detailliertere Betrachtungen angestellt werden.

Kronweiler

Der Blick auf die einfachlogarithmischen Abbildungen in Verbindung mit den Tabellenwerten zeigt, dass in Kronweiler für die homogene Variante die Unter- und Überschätzungen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum gegensätzlich sind. Im Kalibrierungszeitraum wurde die Bilanz unterschätzt, hier nun überschätzt. Gleiches gilt für den Niedrigwasserbereich. Geblieben ist die Überschätzung des Volumens in der Spitze.

Bei den inhomogenen Modellen ist dies nicht so: Dort war die Abbildung der Bilanz und des Niedrigwasserbereichs im Kalibrierungszeitraum gut, hier im Validierungszeitraum wird entsprechend deutlicher überschätzt. Die Abweichung bei den Spitzen beschränkt sich auf die 4Q-Version; die 12Q-Version zeigt nur sehr geringe Abweichungen. Der Blick in die doppeltlogarithmische Darstellung bestätigt dies: Die 12Q-Variante erzielt eine sichtlich bessere Übereinstimmung.

Im Jahre 2000 werden von der inhomogenen 4Q-Variante die ersten kleineren Ereignisse in den Monaten Januar bis März ein wenig stärker überschätzt. Die 12Q-Variante zeigt geringere Abweichungen. Das Ereignis im Juli 2000 wird von beiden inhomogenen Varianten überschätzt. Die darauf folgenden größeren Abflüsse des Jahres im September und Oktober werden von beiden Varianten so schlecht abgebildet, dass die Pegeldaten angezweifelt werden müssen. Insbesondere das erste Ereignis läuft nicht gleichmäßig aus, sondern die Ganglinie fällt abrupt ab. Das

zweite Ereignis wird zwar auch von den inhomogenen Varianten nicht wirklich gut abgebildet, aber deutlich besser als von der homogenen Variante.

Variante	NSE	NSE_{log}	R^2	$\%BiasRR$	$\%BiasFDC$	$\%BiasFHV$	$\%BiasFLV$	$\%BiasFMM$
Kronweiler 65 km²								
homogen	0,82[10]	0,85[11]	0,92[12]	3,10	-8,35	9,40	20	-7,14
inhomogen 4Q	0,83	0,86	0,93	7,22	-8,41	6,76	32,02	-5,30
inhomogen 12Q	0,86	0,87	0,93	7,43	-9,24	-0,70	32,47	7,48
Kellenbach 362 km²								
homogen	0,88[13]	0,91[14]	0,94[15]	4,87	4,42	1,68	-10,48	-0,54
inhomogen 4Q	0,84	0,89	0,92	2,29	0,23	6,86	-12,83	-1,92
inhomogen 12Q	0,88	0,90	0,94	3,96	5,30	1,36	-18,22	-0,67
Altenbamberg[16] 318 km²								
homogen	0,84[17]	0,88[18]	0,92[19]	2,79	16,76	-0,56	-13,78	-0,59
inhomogen 4Q	0,81	0,9	0,91	1,81	2,96	3,59	1,92	4,67
inhomogen 12Q	0,85	0,85	0,93	-0,64	12,70	-0,78	-6,06	0,36

Tabelle 6.3. Übersicht der berechneten Gütemaße für die Pegel Kronweiler, Kellenbach und Altenbamberg im Zeitraum 2000-2003 (Validierungszeitraum). Homogene Zeitreihen wurden mit der Fortran-Version simuliert.

Im Jahre 2001 wird das erste Ereignis von der homogenen Variante minimal besser abgebildet, aber alle Varianten unterschätzen den Scheitelabfluss um mehr als $5\,m^3/s$. Beim Ereignis Anfang Februar unterschätzen ebenfalls alle den Scheitel knapp, mit leichten Vorteilen bei der homogenen Variante. Das einzige weitere hohe Ereignis des Jahres wird von allen überschätzt, von den inhomogenen Varianten stärker.

Das Jahr 2002 beginnt mit einer Abfolge von Ereignissen, die mal von der einen, mal von der anderen Variante besser abgebildet werden. Das höchste Ereignis die-

[10] Angabe im Bericht: 0,8
[11] Angabe im Bericht: 0,8
[12] Angabe im Bericht: 0,83
[13] Angabe im Bericht 0,87
[14] Angabe im Bericht 0,88
[15] Angabe im Bericht 0,88
[16] lediglich 2000-2002
[17] Angabe im Bericht 0,81
[18] Angabe im Bericht 0,83
[19] Angabe im Bericht 0,75

ser Serie (Scheitel bei $22\,m^3/s$) wird von der homogenen Variante mit $16,94\,m^3/s$ simuliert, von der inhomogenen 4Q-Variante mit $16,69\,m^3/s$ und von der inhomogenen 12Q-Variante mit $16,34\,m^3/s$. Die Abweichungen, die in den Jahresplots im Anhang im oberen Teil gezeigt werden, sind hier eher im ansteigenden Ast zu suchen. Das Ereignis im November 2002 wird von den inhomogenen Varianten deutlich besser abgebildet, es wird lediglich um $0,5\,m^3/s$ bzw. $1\,m^3/s$ unterschätzt, von der homogenen Variante um $4\,m^3/s$. Auch hier sind die Abweichungen im oberen Teil des Jahresplots eher irritierend, da sie bei den inhomogenen Varianten nicht den Scheitel selbst betreffen.

Am Anfang des Jahres 2003 fand das höchste Ereignis des Validierungszeitraums mit einem Scheitelabfluss von knapp $24\,m^3/s$ statt. Es wird von der homogenen Variante und der inhomogenen 4Q-Variante gleichermaßen gut abgebildet, die homogene Variante trifft die erste Spitze besser, die inhomogene 4Q-Variante die zweite Spitze. Die größten Abweichungen treten kurz vor dem Ereignis auf und wieder ist deshalb die Darstellung der Differenzen im oberen Teil des Jahresplots nur bei genauer Betrachtung hilfreich. Die 12Q-Variante gibt beide Spitzen des Ereignisses deutlich besser wieder.

Auch hier fällt ein Urteil schwer: Das höchste Ereignis wird von der 12Q-Variante am besten abgebildet, das nächst kleinere von der homogenen Variante minimal besser, das nächst kleinere ebenfalls von der homogenen minimal besser, die letzten beiden allerdings von den inhomogenen Varianten deutlich besser. Aufgrund der geringen Anzahl von Ereignissen wäre es aber gewagt, hieraus einen Trend abzuleiten.

Kellenbach

In Kellenbach ist der Fehler in der Bilanz bei der inhomogenen 4Q-Variante lediglich halb so groß, die Steigung wird deutlich besser abgebildet. Die Abweichung bei der Bilanz war bei der homogenen Variante bereits im Kalibrierungszeitraum schlecht. Dort wurde auch der Niedrigwasserbereich überschätzt, während die inhomogenen Modelle gut waren, nun ist die Abweichung bei allen groß, bei den inhomogenen stärker. Der obere Teil wurde bei der homogenen Variante im Kalibrierungszeitraum leicht unterschätzt, nun leicht überschätzt. Bei der inhomogenen 4Q-Variante lag bei der Kalibrierung eine Überschätzung vor, die bezüglich des Betrages der Abweichung der homogenen Variante gleicht, nun ist die Überschätzung deutlicher. Die Abweichungen der 12Q-Variante sind hingegen sehr gering. Dies lässt sich auch gut an den Abflussdauerlinien in Abbildung 6.28 ablesen. Obwohl alle Modelle das Volumen der oberen 2 % insgesamt überschätzen, wird der absolut höchste Teil von allen drei Varianten deutlich unterschätzt, wie in den Teilen b), d) und f) zu sehen ist.

Im Zeitbereich zeigt sich im Jahr 2000, dass das höchste Ereignis mit einem Scheitelabfluss von $35,3\,m^3/s$ vom inhomogenen 4Q-Modell besser abgebildet wird, der Scheitel wird nur um etwas mehr als $4\,m^3/s$ unterschritten, das homogene Modell verfehlt um $14\,m^3/s$, das inhomogene 12Q-Modell um $7,6\,m^3/s$. Auch hier läuft das 4Q-Modell etwas vor, die Abweichungen betreffen in den Jahresplots also

eher den ansteigenden Ast. Das zweithöchste Ereignis ($32\,m^3/s$) wird vom homogenen Modell mit $25,5\,m^3/s$ um knapp $0,4\,m^3/s$ weniger unterschätzt als vom inhomogenen 12Q-Modell, die 4Q-Variante unterschätzt um $2\,m^3/s$ mehr. Das nächst kleinere Ereignis mit einem Scheitelabfluss von $27\,m^3/s$ wird vom inhomogenen 4Q-Modell inklusive der davor liegenden Ereignisse fast genau getroffen, vom 12Q-Modell leicht unterschätzt, das homogene Modell unterschätzt den Scheitel um $10\,m^3/s$. Die darauf folgenden kleineren Ereignisse werden vom inhomogenen 4Q-Modell stärker überschätzt, das 12Q-Modell zeigt geringere Abweichungen.

Im Jahr 2001 gibt es dann höhere Ereignisse, das höchste mit einem Scheitelabfluss von $40\,m^3/s$ wird allen Modellen gleichermaßen gut abgebildet, wieder läuft das 4Q-Modell vor. Das zweitgrößte Ereignis mit einer Höhe von $37,8\,m^3/s$ wird vom inhomogenen 12Q-Modell gut abgebildet ($37,88\,m^3/s$), vom inhomogenen 4Q-Modell um etwas mehr als $2\,m^3/s$ überschätzt, vom homogenen etwas mehr als $4\,m^3/s$. Wieder läuft das 4Q-Modell vor. Die kleineren Ereignisse im Bereich bis zu $20\,m^3/s$ werden vom inhomogenen 4Q-Modell tendenziell stärker überschätzt, die ganz kleinen aber besser abgebildet.

2002 findet nun das zweithöchste Ereignis des Validierungszeitraumes statt: $67,7\,m^3/s$ Scheitelabfluss. Das homogene Modell unterschätzt stärker ($46\,m^3/s$) als das inhomogene 12Q-Modell ($50,6\,m^3/s$) und dieses stärker als das inhomogene 4Q-Modell ($51,6\,m^3/s$). Wieder treten die größten Fehler beim 4Q-Modell im ansteigenden Ast auf. Die kleineren Ereignisse werden entweder gleich schlecht oder in einem Fall von den inhomogenen Modellen leicht besser abgebildet.

Das Ereignis am Anfang des Jahres 2003 ist mit $142\,m^3/s$ Scheitelabfluss das höchste im Zeitraum 1967-2005. Es wird von allen Modellen deutlich unterschätzt. Die inhomogenen Modelle sind zwar mit $91\,m^3/s$ bzw. $91,8\,m^3/s$ ca. $1,5\,m^3/s$ weniger weit vom Scheitel entfernt, es ist aber fraglich, ob das bei dieser Dimension eine Rolle spielt.

Hier ist nun das Gesamtbild ein wenig eindeutiger: Gibt es bei der Abbildung der größeren Ereignisse Unterschiede, so ist das inhomogene Modell bis auf eine Ausnahme im Jahr 2001 in allen Fällen besser. Es ist zu vermuten, dass die schlechteren Werte des 4Q-Modells bei der Nash-Sutcliffe-Effizienz und bei R^2 aus dem Problem des Vorlaufens resultieren, da dies bei dem inhomogenen 4Q-Modell ein wenig stärker ausgeprägt ist.

Altenbamberg

In Altenbamberg können nur die Jahre 2000-2002 verglichen werden, da die Fortran-Variante aus bisher nicht erklärbaren Gründen im Jahr 2003 nicht funktioniert hat. Aber auch in diesem kürzeren Zeitraum ist das Bild recht eindeutig. Im Kalibrierungszeitraum ergab sich das Problem des Sprungs bei den oberen Werten der Abflussdauerlinie. Dieser tritt in der besonderen Form im Validierungszeitraum nicht auf.

Beim Vergleich der Abflussdauerlinien und der *Signature Measures* fällt auf, dass die Bilanz durch die inhomogenen Modelle besser abgebildet wird. Hier war auch die Überschätzung durch das homogene Modell im Kalibrierungszeitraum

höher. Interessant ist, dass das homogene Modell im Kalibrierungszeitraum das obere Volumen deutlich überschätzt hat, nun im Validierungszeitraum leicht unterschätzt, während sich die Werte bei den inhomogenen Modellen kaum geändert haben. Der Niedrigwasserbereich wird vom inhomogenen 4Q-Modell deutlich besser abgebildet, was auch der Grund für den geringfügig besseren Wert der Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Werte sein dürfte. Das inhomogene 12Q-Modell ist in dieser Hinsicht schlechter als das 4Q-Modell aber immer noch besser als das homogene Modell. In der doppeltlogarithmischen Darstellung fällt auf, wie stark die Spitzen vom 4Q-Modell überschätzt werden, das 12Q-Modell ist deutlich besser.

Im Zeitbereich fällt im Jahr 2000 das höchste Ereignis mit einem Scheitabfluss von $46\,m^3/s$ dadurch auf, dass es von keiner Variante abgebildet wird. Es wird um über $35\,m^3/s$ unterschätzt. Eine so deutliche Unterschätzung kann schwer durch das Modell erklärt werden, es liegt eher nahe, dass ein Fehler in den Eingangsdaten oder der gemessenen Abflusszeitreihe vorliegt.

Im Jahr 2001 hat das höchste Ereignis einen Scheitelabfluss von $40,6\,m^3/s$. Alle Modelle überschätzen dieses, das homogene gipfelt in $49,31\,m^3/s$, das inhomogene 4Q-Modell in $56\,m^3/s$, das inhomogene 12Q-Modell als bestes in $44,1\,m^3/s$. Dieses Ereignis ist der Teil, der in der doppeltlogarithmischen Darstellung als deutlicher Unterschied zwischen den Modellen zu erkennen ist.

Im Jahr 2002 werden die beiden höchsten Ereignisse durch die inhomogene 4Q-Variante deutlich besser abgebildet, das erste wird leicht unter- das zweite leicht überschätzt. Die inhomogene 12Q-Variante ist ein wenig schlechter, aber besser als die homogene Variante, die deutlich unterschätzt. Im Rest des Jahres werden einige Ereignisse von der homogenen Variante besser abgebildet, einige von den inhomogenen.

Zusammenfassend fällt hier die extreme Fehleinschätzung beim höchsten Ereignis des Jahres 2001 durch das inhomogene 4Q-Modell auf, die gute Einschätzung der 12Q-Variante, die gute Simulationsleistung der inhomogenen Varianten im Jahr 2002 sowie die schlechte aller Varianten im Jahr 2000.

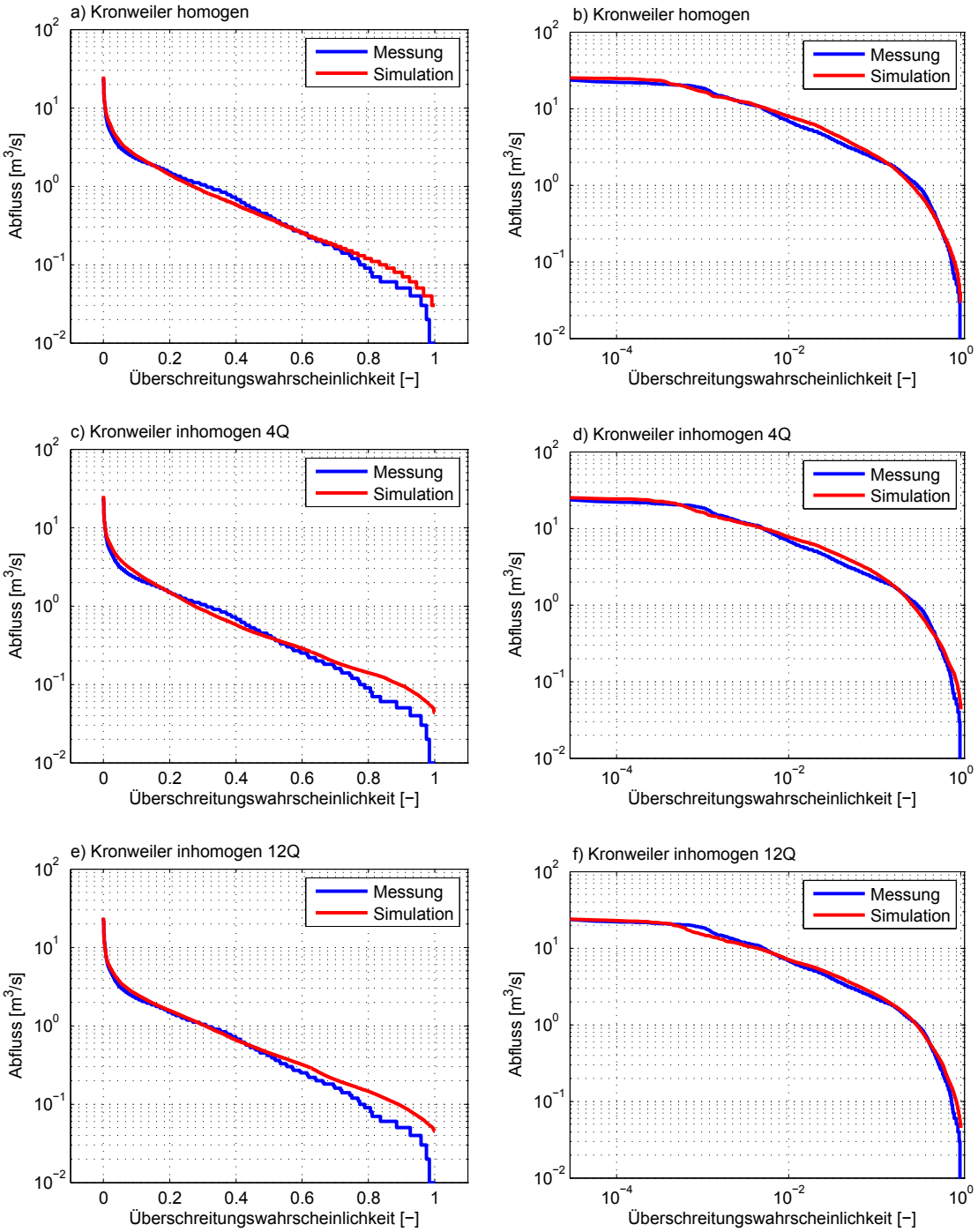

Abb. 6.27. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in einfach- (a, c & e) und doppeltlogarithmischer (b, d & f) Darstellungsweise für das Einzugsgebiet Kronweiler. In Teil a) und b) sind die Ergebnisse der homogen parametrisierten Fortran-Version dargestellt, in Teil c) und d) die der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version mit 4 Komponenten und in Teil e) und f) die der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version mit 12 Komponenten.

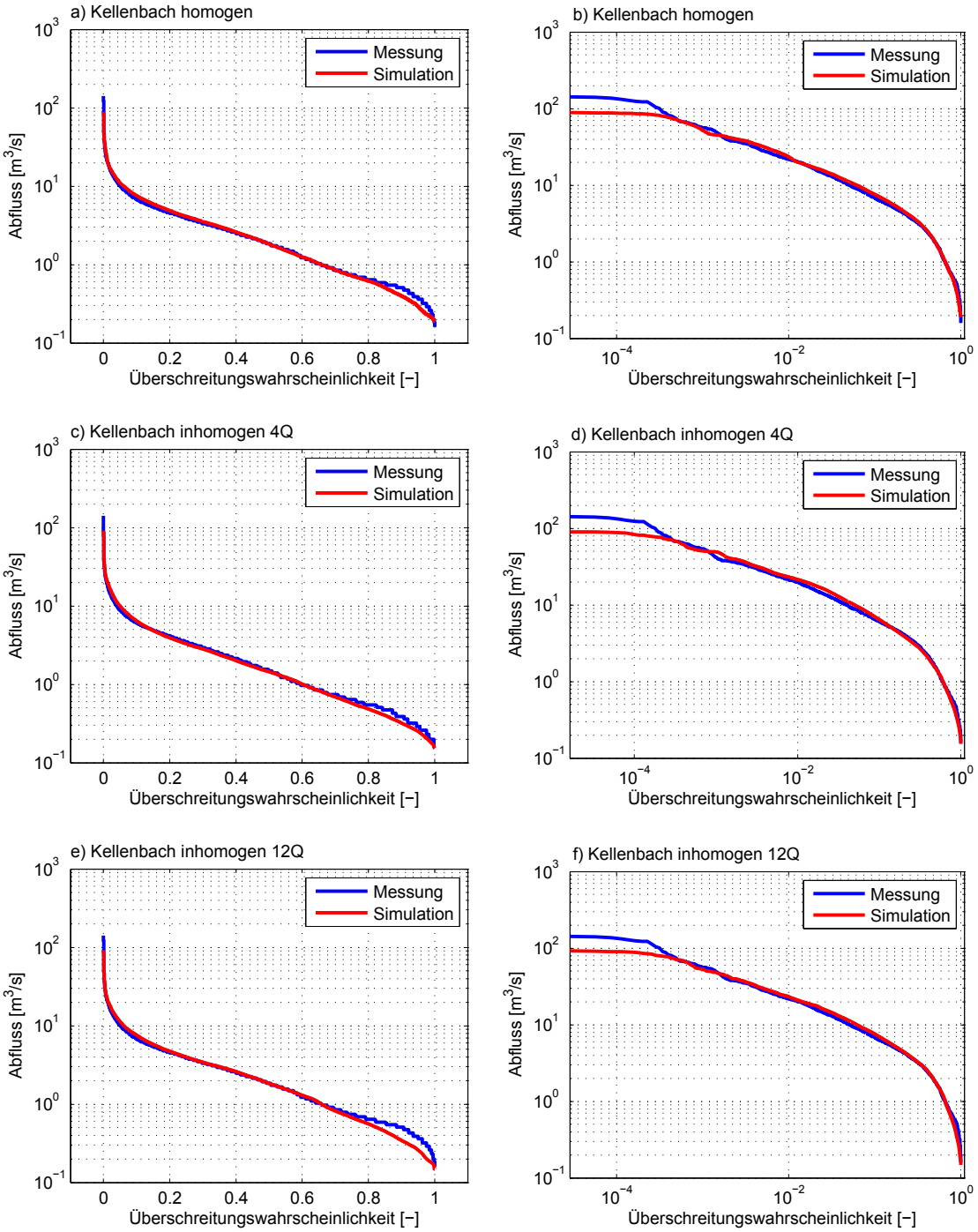

Abb. 6.28. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in einfach- (a, c & e) und doppeltlogarithmischer (b, d & f) Darstellungsweise für das Einzugsgebiet Kellenbach. In Teil a) und b) sind die Ergebnisse der homogen parametrisierten Fortran-Version dargestellt, in Teil c) und d) die der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version mit 4 Komponenten und in Teil e) und f) die der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version mit 12 Komponenten.

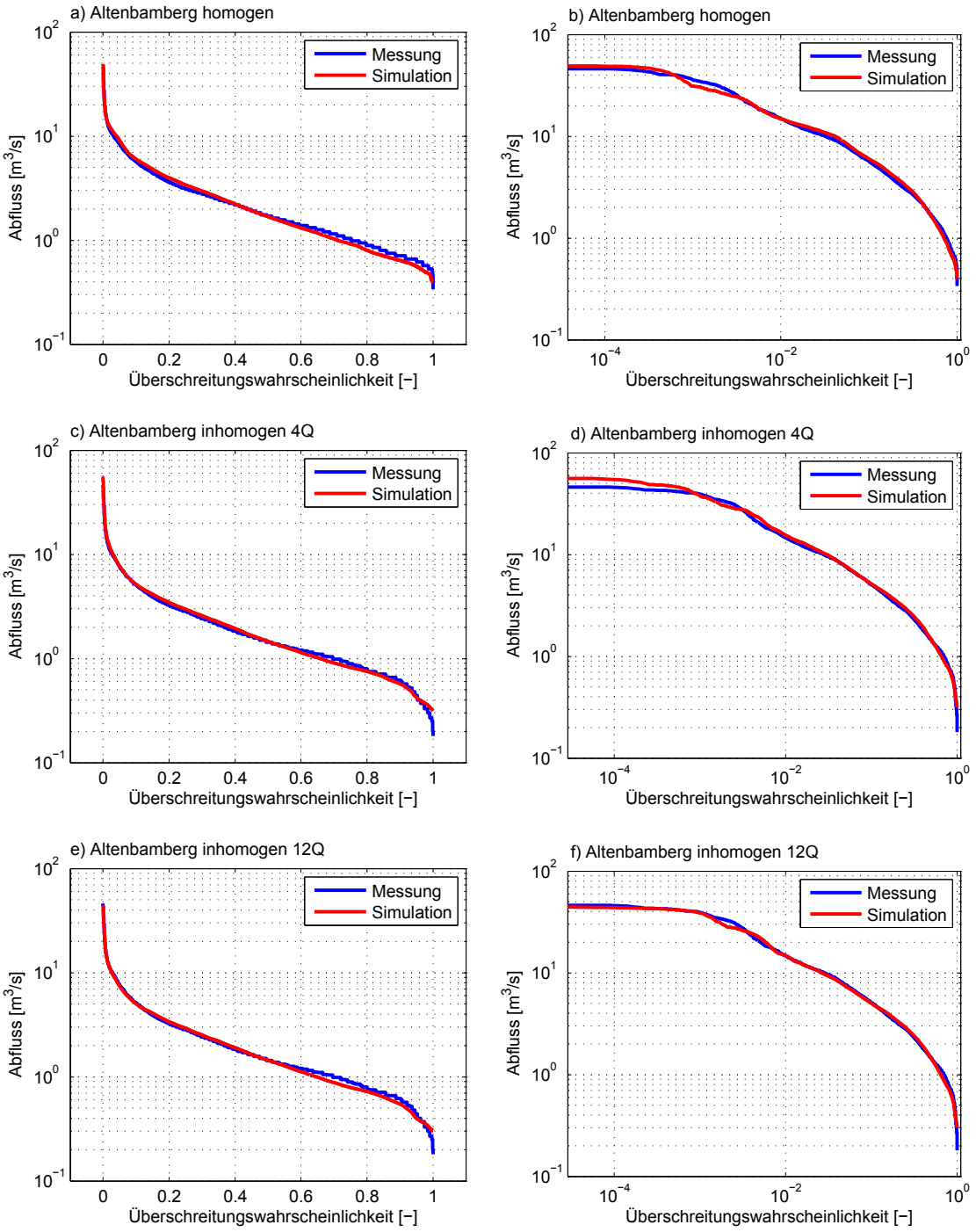

Abb. 6.29. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2002 in einfach- (a, c & e) und doppeltlogarithmischer (b, d & f) Darstellungsweise für das Einzugsgebiet Altenbamberg. In Teil a) und b) sind die Ergebnisse der homogen parametrisierten Fortran-Version dargestellt, in Teil c) und d) die der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version mit 4 Komponenten und in Teil e) und f) die der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version mit 12 Komponenten.

6.5.2 Weitere Pegel innerhalb der Einzugsgebiete

Neben diesen Möglichkeiten der Validierung durch ungenutzte Zeiträume der gesamten Gebiete erscheint es auch vielversprechend, die Pegel innerhalb der Gebiete zu nutzen, um zu beurteilen, ob nun die Abbildung der räumlichen Verteilung der Prozesse mehr der Reatlität entspricht. Etwa in Tetzlaff u. Uhlenbrook (2005) wurde ein ähnlicher Ansatz gewählt, um die räumliche Verteilung des Niederschlages zu validieren.

Wie im Kapitel 5 beschrieben, gibt es in Kellenbach einen weiteren Pegel im Norden: Steinbach mit einer Fläche von 46 km^2. In Altenbamberg gibt es zwei weitere Pegel: Imsweiler mit einer Fläche von 171 km^2 und Obermoschel mit einer Fläche von 14 km^2.

Für die Bewertung der Ergebnisse müssen die Angaben von Frau Yvonne Henrichs (LUWG Mainz, Referat 71 Hydrologischer Dienst der oberirdischen Gewässer, Hochwasserschutz) zu diesen Pegeln berücksichtigt werden. Sie teilte in einer E-Mail vom 13. Februar 2012 an Herrn Prof. Dr. Casper mit: „[An] der Alsenz ist der Pegel Altenbamberg als gut einzuschätzen, der Pegel Imsweiler ist bei extremen Hochwasserereignissen wie im Dezember 1993 umläufig. Für den Pegel Obermoschel am Moschelbach ist die W-Q-Beziehung im Hochwasserbereich nicht durch Abflussmessungen belegt und dementsprechend unsicher.“ Die Ergebnisse des Maßes $\%BiasFHV$ in diesen beiden Gebieten sind also vorsichtig zu bewerten.

Die drei genannten Gebiete wurden für die Fortran-Implementierung abgespalten und neue Steuerdateien sowie Stammdatendateien erzeugt. In der MATLAB-Variante ist die Abspaltung ebenfalls leicht möglich, da der Abfluss jedes Elements ohnehin gespeichert wird. Für diese beiden Varianten wurde jeweils der Zeitraum ausgewertet, der auch im vorherigen Unterkapitel zur Validierung genutzt wird, die Jahre 2000-2003. Die Ergebnisse der Berechnung der Gütemaße sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Auf den ersten Blick ergibt sich ein ähnliches Bild wie im vorherigen Unterkapitel: Keine Variante ist deutlich besser als die andere. Teilweise sind die Farbmuster nahezu invertiert. In Steinbach ist die homogene Variante besser hinsichtlich der klassischen Gütemaße und der Bilanz, schlechter hinsichtlich der anderen. In Imsweiler wechseln sich die Gütemaße darin ab, welches besser ist, in Obermoschel ist die Situation fast umgekehrt wie in Steinbach.

Neben dieser Tabelle finden sich im Anhang B ab der Seite 212 auch noch die Gegenüberstellungen der Abflussdauerlinien. Ebenfalls im Anhang, in Teil A, finden sich auf der Seite 168 für Altenbamberg und auf der Seite 169 für Kellenbach Abbildungen der Einzugsgebiete mit der Verteilung der Abflussprozesse.

In der Verteilung der Prozesse in Altenbamberg fällt auf, dass diese innerhalb des Einzugsgebietes überall ungefähr gleich ist. Dies wäre eine mögliche Erklärung dafür, dass die Unterschiede in Imsweiler und Obermoschel so gering ausfallen.

In Kellenbach fälllt lediglich auf, dass im südwestlichen Teil DP-Flächen auftreten, während im Rest des Gebiets eher DP=-Flächen vorzufinden sind. Diese werden aber aktuell gleich parametrisiert, was eine Erklärung dafür sein dürfte, dass im Gebiet Steinbach kein eindeutiges Bild sichtbar ist.

Variante	NSE	NSE_{log}	R^2	$\%BiasRR$	$\%BiasFDC$	$\%BiasFHV$	$\%BiasFLV$	$\%BiasFMM$
Steinbach 46 km^2								
homogen	0,83	0,9	0,93	-20,46	-28,36	-13,92	25,44	12,11
inhomogen 4Q	0,8	0,9	0,92	-26,55	-26,95	-11,54	-0,05	-2,68
inhomogen 12Q	0,8	0,91	0,92	-26,07	-26,65	-14,38	1,54	4,70
Imsweiler 171 km^2								
homogen	0,72	0,8	0,87	11,98	33,62	0,29	-2,38	0,95
inhomogen 4Q	0,73	0,82	0,87	12,08	14	0,05	21,88	9,95
inhomogen 12Q	0,7	0,83	0,85	11,21	18,92	-0,42	20,88	11,09
Obermoschel 14 km^2								
homogen	0,83	0,75	0,92	8,1	-10,69	-4,31	54,68	3,20
inhomogen 4Q	0,87	0,78	0,93	1,82	-16,3	1,87	54,85	-2,42
inhomogen 12Q	0,79	0,69	0,89	2,10	-19,88	-4,54	27,65	20

Tabelle 6.4. Übersicht der berechneten Gütemaße für die Pegel Steinbach, Imsweiler und Obermoschel im Zeitraum 2000-2003 (Validierungszeitraum). Homogene Zeitreihen wurden mit der Fortran-Version simuliert.

Was jedoch auffällt, sind die hohen Abweichungen in der Bilanz in Steinbach, die in beiden Varianten auftreten. Auf diese wird später in der Diskussion beim Thema Niederschlagsverteilung erneut eingegangen.

Es gibt eine weitere deutliche Abweichung: In Imsweiler wird die Steigung im mittleren Segment von der homogenen Variante um 33,62 % überschätzt. Das ist ein ziemlich starker Hinweis darauf, dass hier die räumliche Abbildung schlechter gelungen ist.

6.5.3 Prozessverhalten

Als Abschluss des Ergebniskapitels werden nun die Oberflächenabflüsse auf zwei Kompartimenten miteinander verglichen. Das eine Kompartiment gehört zur Landnutzung Grünland, es wurde SOF3-kartiert; das andere Element ist ein Laubwald, für den DP kartiert wurde.

In Abbildung 6.30 wird nun das Verhalten der beiden Kompartimente bei homogener (oben) und bei inhomogener Parametrisierung dargestellt (unten). Im ersten Teil ist offensichtlich, dass beide Kompartimente bei Verwendung der gleichen Bodenparameter auch ein nahezu identisches Verhalten zeigen. Auf dem Grünland-Kompartiment wird ein wenig mehr Oberflächenabfluss erzeugt, weil dessen Speicherkapazität geringfügig kleiner ist.

Es ist aber offensichtlich, dass ein so häufiger Oberflächenabfluss auch bei kleineren Niederschlagsmengen für einen Wald, in dem DP kartiert wurde, nicht sinn-

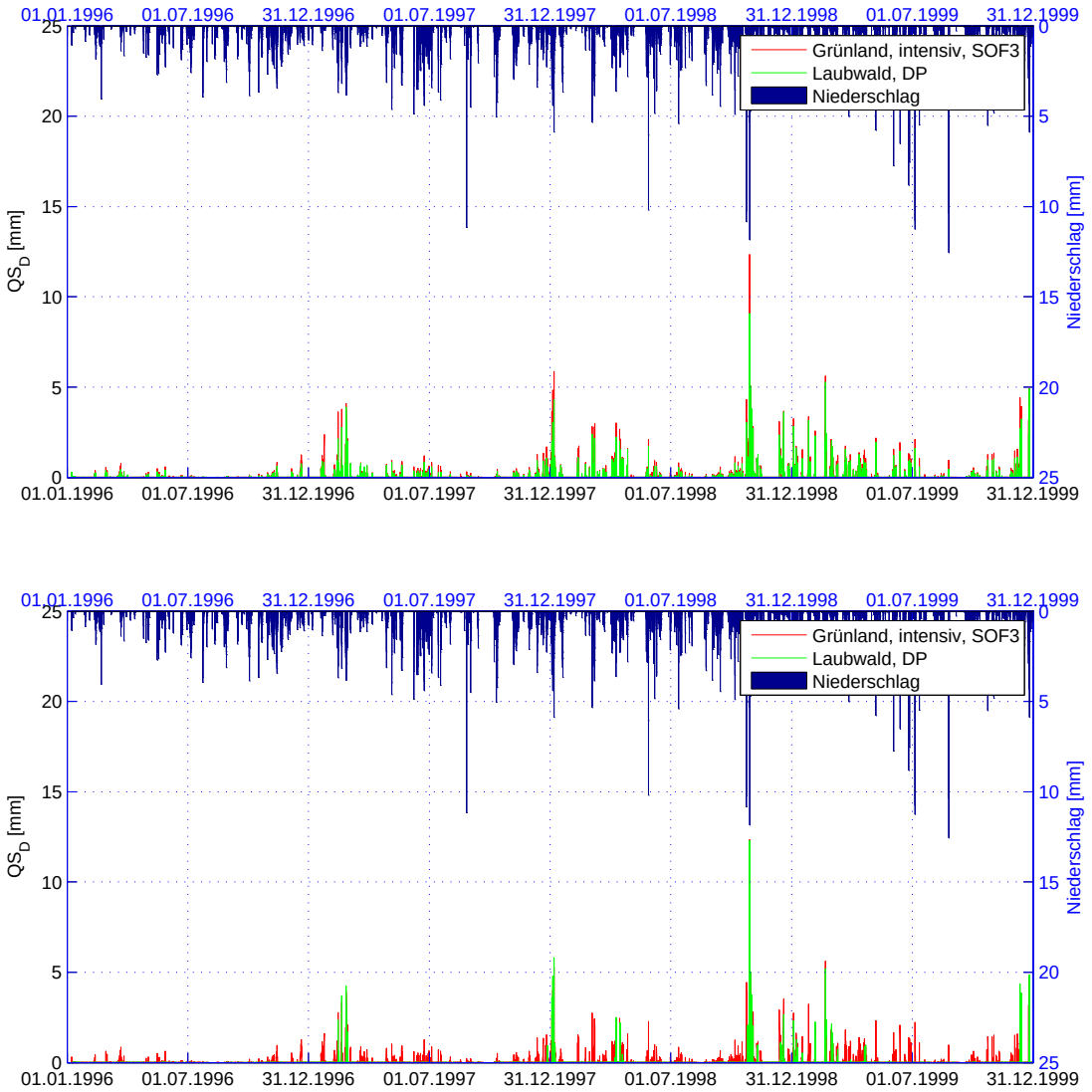

Abb. 6.30. Vergleich der resultierenden Oberflächenabflüsse auf zwei unterschiedlichen Kompartimenten: In Rot werden die Oberflächenabflüsse eines SOF-Grünland-Kompartiments dargestellt, in Grün werden die Oberflächenabflüsse eines DP-Laubwald-Kompartiments dargestellt und in Blau werden die Niederschläge des Elements dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung sind beide Kompartimente homogen parametrisiert. Im unteren Teil der Abbildung sind beide Kompartimente inhomogen parametrisiert: Grünland erhält SOF-Parameter, Laubwald erhält DP-Parameter.

voll ist. In dieser Abbildung zeigt sich der wesentliche Nachteil der homogenen Parametrisierung des Bodenmoduls.

Bei der inhomogenen Parametrisierung hingegen zeigen die beiden Kompartimente ein vollkommen unterschiedliches Verhalten. Im Grünland-Kompartiment hat sich wenig geändert. Aber im Wald-Kompartiment wird nun deutlich weniger und deutlich seltener Oberflächenabfluss erzeugt. Lediglich im Winter 1996/1997 kommt es – wahrscheinlich durch einen hohen Füllstand des Bodenspeichers – zu Oberflächenabflüssen, dann ein Jahr später, ebenfalls im Winter, und im Herbst 1999 nach großen Mengen Niederschlag. Die Abflüsse in den Wintermonaten zeigen sich auch in den letzten beiden Wintern.

Unabhängig davon, ob nicht noch seltener Oberflächenabfluss im Wald stattfinden sollte, spricht dieses Resultat deutlich für die bessere Abbildung der Prozesse bei inhomogener Parametrisierung. Aber es ist nur ein einziges Beispiel. In Kapitel 7.3.1 wird die Verteilung der Abflusskomponenten aller Kompartimente systematisch untersucht und die Abhängigkeiten werden diskutiert.

7

Diskussion

7.1 Grenzen der Modellannahmen

In zwei Einzugsgebieten musste der Korrektur-Faktor für den Niederschlag eingesetzt werden: in Kellenbach und in Altenbamberg. In beiden Fällen musste dieser nach unten korrigiert werden. Eigentlich sollte es nur aufgrund der Skalierung der Bodenparameter möglich sein, auf diesen Faktor zu verzichten. Die Spannweite der zu erzielenden Bilanzen, die in Kapitel 6.1.3 gezeigt wurde, ist dazu ausreichend groß.

In diesen Ergebnissen wurde aber auch beschrieben, dass die Bilanz im Wesentlichen durch β skaliert wird, und dass es Interaktionen zwischen den Parametern gibt. Außerdem ist es nicht möglich, den Oberflächenabfluss beliebig weit zu skalieren, insbesondere nicht nach unten hin.

Nun muss bedacht werden, dass die Kennfelder bestimmt wurden, indem die Proben gesucht wurden, die am ehesten den Vorgaben entsprechen. Die Vorgabe für den mittleren Anteil der Oberflächenabflüsse auf DP-Kompartimenten war 40 % – immer noch vergleichsweise viel.

Bei der Betrachtung der Lage der Kennfelder zueinander in Abbildung 6.12 auf Seite 91 fällt auf, dass das Kennfeld für die DP-Flächen recht hoch liegt: β ist groß. Es fällt aber auch auf, dass b im relevanten Teil bereits nahezu null ist!

Hier liegt also der Kern des Problems: Eine Möglichkeit, den Bereich, in dem die Bilanz mit P_Bilanz skaliert werden kann, zu vergrößern, ist, das Kennfeld nach unten zu verschieben. So wird β kleiner und die Bilanz sinkt. Aber es steigt auch gleichzeitig der Anteil der Oberflächenabflüsse, da b nicht weiter verringert werden kann. Bei dieser Lösungsvariante müsste also akzeptiert werden, dass der Anteil der Oberflächenabflüsse auf DP-Kompartimenten noch größer wird.

Die andere Möglichkeit wäre, das Kennfeld so zu verschieben, dass b kleiner wird, um den Anteil der Oberflächenabflüsse zu verringern. Hier befindet sich das Kennfeld aber an der Grenze des Parameterraums. Und zwar nicht an der Grenze, die sich durch Änderung der zu beprobenden Intervalle ändern ließe, sondern an der Grenze null. Die Modellannahme lässt es nicht zu, dass weniger Oberflächenabfluss generiert wird.

Beim Schritt vom Modell in das Einzugsgebiet bedeutet dies Folgendes: Aktuell ist β auf diesen Flächen relativ groß, damit sich der Boden vergleichsweise

zügig durch Perkolation entleert. So ist die Bodenfeuchte vergleichsweise gering, bei Niederschlägen kann entsprechend viel Wasser infiltrieren, wodurch es seltener zu Oberflächenabflüssen kommt. Dadurch, dass die Bodenfeuchte gering ist, verdunstet aber auch recht wenig, der Anteil des Niederschlages, der zu Abfluss wird, ist groß.

Wird β nun verringert, so verbleibt ständig mehr Wasser im Boden. Entsprechend geringer ist der Anteil des Niederschlages, der zu Abfluss wird. Aber es reichen nun auch niedrigere Niederschlagsintensitäten aus, um Oberflächenabfluss zu erzeugen, da der Boden stärker gesättigt ist.

Was müsste geschehen? Es müsste eine Möglichkeit geben, mehr Wasser im Boden zu halten, ohne dass es versickert, oder dass es unrealistisch schnell zu Oberflächenabflüssen kommt.

Dies lassen die Modellannahmen aber nicht zu. Es gäbe eine Möglichkeit: im Modell den Wert von W_m auf DP-Flächen pauschal zu erhöhen. Dies führt zuverlässig zu geringeren Anteilen von Oberflächenabfluss. Und da β mit der absoluten Speicherfüllung multipliziert wird, wird auch die Perkolation kaum erhöht. Dies wird sich später in Unterkapitel 7.3.1 zeigen, in dem die Abhängigkeit der Abflusskomponentenanteile von den Bodeneigenschaften diskutiert wird. Dieser Ansatz hat aber den Nachteil, dass auf diese Weise eine Information verfälscht wird, die eigentlich flächenhaft vorliegt: die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität. Der Anspruch, das Modell näher an die tatsächliche Verteilung des Wassers in der Realität zu bringen, würde so konterkariert.

Es bleiben also tatsächlich nur drei Möglichkeiten: 1. die jetzige Lösung, den Einsatz des KG-Faktors, 2. akzeptieren, dass der Oberflächenabflussanteil auf DP-Kompartimenten unrealistisch hoch liegt, oder 3. eine Änderung der Modellannahmen. Für diese Änderung gibt es geeignete alternative Ansätze, die später in Unterkapitel 7.6 hinsichtlich ihrer Tauglichkeit diskutiert werden.

7.2 Korrekturfaktor Niederschlag: notwendig? sinnvoll?

Mit dem KG-Faktor werden die Niederschläge, die dem Modell als Eingangsdaten dienen, linear skaliert. Bei der Kalibrierung des Modells in einem neuen Einzugsgebiet wird er teilweise als erster Parameter überhaupt justiert.

Etwa im Bericht zur Aufstellung des WHMs Rheinland-Pfalz findet sich in der Beschreibung der Vorgehensweise bei der Kalibrierung als erster Schritt: „Zunächst wurde KG anhand des Vergleichs simulierter und gemessener Abflussvolumina (Bilanzen) grob angepasst. Hierbei war es z.T auch notwendig, trotz der fein gerasterten, meteorologischen Antriebsdaten aus dem TIMIS-Raster KG-Werte deutlich unter 1,0 bzw. über 1,0 anzusetzen, um eine in etwa ausgeglichene Bilanz zu erzielen.“ (siehe Elpers u. a. (2008))

Die Kalibrieranleitung empfiehlt im ersten Schritt, Modellparameter aus bereits kalibrierten Gebieten in der Nähe des zu kalibrierenden neuen Einzugsgebiets zu übernehmen. Auch dann erfolgt, vor der Justierung der Bodenparameter, der Schritt: „2. Anpassung der Bilanz mit dem Faktor KG: Als Startwert sollte

für KG ein Wert von 1,0 verwendet werden. Sofern sich bei der Kalibrierung im langjährigen Mittel an einzelnen Pegeln Bilanzprobleme zwischen berechneten / gemessenen Abfluss ergeben, sollte der Wert für KG für die entsprechenden Pegelkontrollbereiche angepasst werden. Dabei sollten Werte zwischen 0,9 und 1,1 eingehalten werden."

Es wird also empfohlen, diesen Faktor einzusetzen, obwohl eine Skalierung der Bilanz auch mit den Bodenparametern innerhalb gewisser Grenzen möglich ist. Ist dies notwendig? Ist dies sinnvoll? Diese Fragen sollen in diesem Unterkapitel diskutiert werden.

Die lineare Skalierung der Niederschläge zu allen Zeitpunkten kann dazu dienen, größere systematische Abweichungen in der Interpolation der Niederschläge auszugleichen. Es stellt sich die Frage, wie groß diese Abweichungen ungefähr sein können. Und ob dies im Modell überhaupt eine Rolle spielt.

In Casper u. a. (2009) kommen die Autoren zu dem Schluss, dass LARSIM auf eine räumliche Variation der Niederschläge im Vergleich zu anderen Modellen relativ gering reagiert. In Bremicker u. a. (2011) wurde diese Aussage wieder relativiert, da in der ersten Studie mit ungünstigen Bodenspeichervolumina gearbeitet wurde. Die Methode, die zur Variation der Niederschlagsmuster eingesetzt wurde, weist zudem die folgende Besonderheit auf: „Die an die Beobachtungen angepassten Niederschlagsfelder haben die Eigenschaft, dass ihr Mittelwert dem interpolierten Niederschlag des Kriging entspricht." (siehe Bliefernicht u. a. (2008), Seite 169) Dafür gibt es gute Gründe, da ansonsten relativ beliebige Felder denkbar wären.

In der Natur gibt es diese Einschränkung aber nicht. Es gibt durchaus Fälle, in denen eine lokale Gewitterzelle Hochwasser erzeugt, ohne dass die Zelle selbst von einer Niederschlagsstation erfasst wird. In Pfister u. Treis (2010) wird ein solches Ereignis beschrieben, dessen Niederschlagsintensitäten nur durch den Einsatz von Radar und Stationen aus der Hand Dritter nachvollzogen werden konnten. „Der Schwerpunkt des Ereignisses wurde von den Bodenmessern nicht erfasst." (Pfister u. Treis (2010), Seite 1) Verzeichnet keine zur Interpolation eingesetzte Station starke Niederschläge, kann das Kriging auch keine hohen Volumina erzeugen.

Solche Einzelfälle sollten sich aber bei einem Zeitraum von mehreren Jahren, über den die Bilanz berechnet wird, nicht auswirken. Wie groß ist also der Fehler, der ausschließlich aus dem Interpolationsverfahren resultiert, wenn davon ausgegangen werden kann, dass im Mittel die Ereignisse von den Stationen aufgezeichnet werden?

Einen Hinweis auf diese Größenordnung hat sich in der Arbeitsgruppe bei den Arbeiten zum Klimawandel ergeben. Dort wird LARSIM eingesetzt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. In einer ersten Studie zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen den Bias-korrigierten Daten des Referenzzeitraums und den Simulationsergebnissen mit den InterMet-Daten größer waren als die Unterschiede zwischen den Referenzläufen und den Zukunftsläufen (siehe Casper u. a. (2012)). Zur Korrektur des Bias der Klimamodelldaten wurde ein empirisches Verfahren eingesetzt, das die modellierten Daten anhand von in-

terpolierten Messdaten verändert (Gutjahr u. Heinemann (2013)). Als Grundlage wurde dabei der REGNIE-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes eingesetzt (Rauthe u. a. (2013)). Es wurde deutlich, dass die Unterschiede zwischen REGNIE und InterMet erheblich sind. In einem zweiten Ansatz wurden die Klimamodelldaten anhand der Intermet-Daten korrigiert und es zeigte sich, dass die Abweichungen im Referenzzeitraum so wesentlich geringer ausfallen (Wittig (2013)). Es lag also nahe, die Unterschiede zwischen REGNIE und InterMet systematisch auszuwerten (Casper u. a. (2013)). Auszüge aus diesen Arbeiten sind in der Abbildung 7.1 dargestellt.

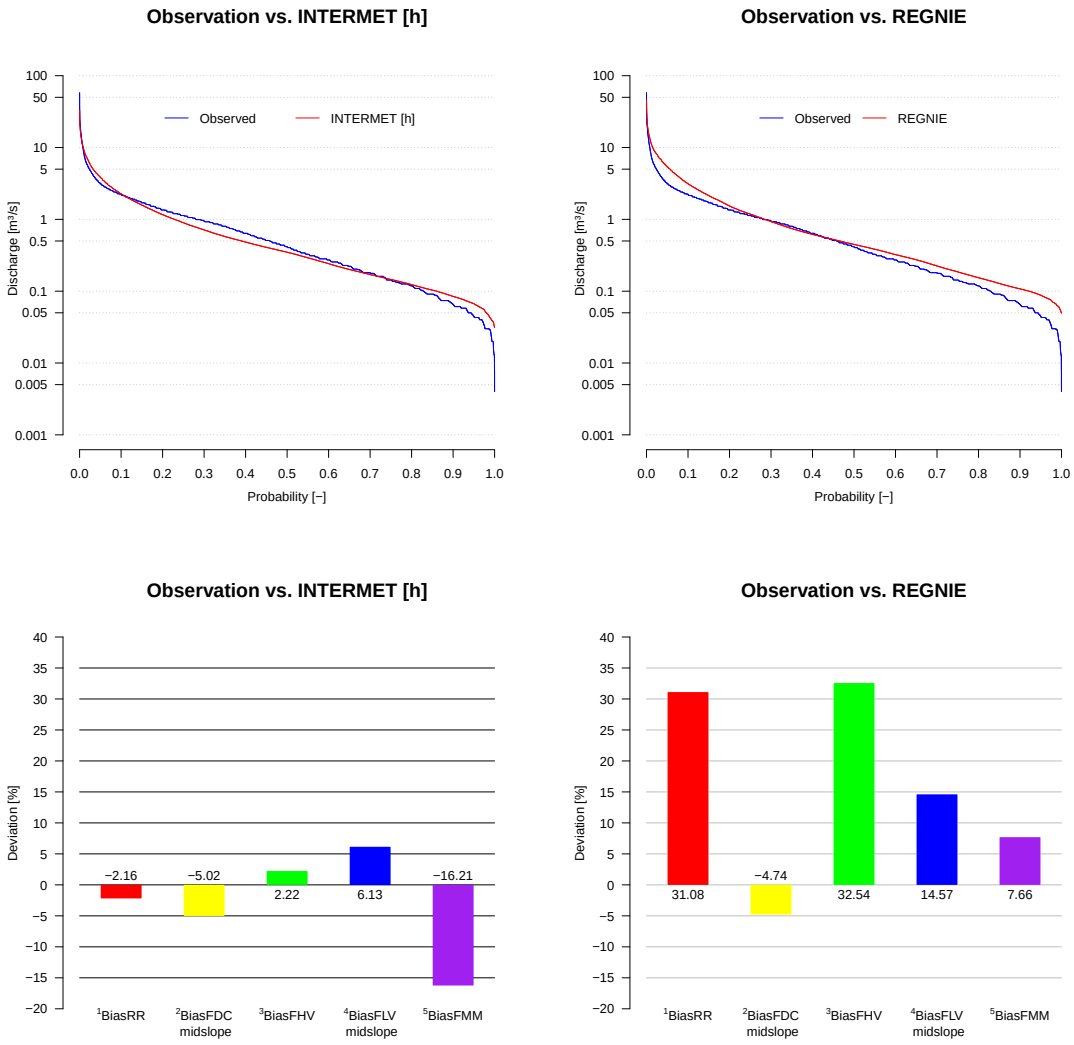

Abb. 7.1. Simulationsergebnisse und Signature Measures für den Zeitraum 1993-2002 bei Verwendung von InterMet-Daten (links) und REGNIE-Daten (rechts)(Quelle: Philipp Reiter, Universität Trier)

In der linken Spalte werden die Ergebnisse der Simulation unter Verwendung von InterMet-Daten gezeigt, rechts die aus den REGNIE-Daten resultierenden. Während die Abweichung in InterMet bezüglich der Bilanz im gesamten Zeitraum von 1993-2002 sehr gering ist, sie beträgt lediglich -2,16 %, sind die Abweichungen unter Verwendung der REGNIE-Daten enorm, hier ist das Volumen des Abflusses um über 30 % zu hoch.

Eine Abweichung in dieser Größenordnung könnte auch nicht mehr durch Anpassung der Bodenparameter ausgeglichen werden, hier müsste in jedem Fall mit dem KG-Faktor gearbeitet werden, um eine ausgeglichene Bilanz zu erzielen.

Auf der Suche nach den Ursachen für diese Abweichungen zeigen die statistischen Kennwerte der Datensätze deutlich, wie die Unterschiede zustande kommen. In Abbildung 7.2 werden die räumlichen Verteilungen der mittleren Jahresniederschläge im oberen Teil gegenübergestellt. In der Mitte befindet sich das Differenzbild. In der oberen rechten Darstellung der REGNIE-Werte fällt besonders die stark Topographie-geprägte Interpolation auf. Die Niederschlagssummen weisen deutliche Zusammenhänge zur Höhe auf. Dieser Unterschied zeigt sich auch im Differenzbild. Dieses Bild suggeriert aber, dass sich in der Nahe die Unterschiede im Mittel ausgleichen. Für einzelne Einzugsgebiete gilt dies jedoch nicht! Etwa im Gebiet Kronweiler betragen die Unterschiede in einzelnen Jahren bis zu 400 mm (1996).

Im unteren Teil der Abbildung zeigt sich mit dem Vergleich der mittleren Anzahl von Regentagen je Jahr, dass sich neben den Volumina auch die zeitliche Verteilung unterscheidet.

An dieser Stelle ist die Entscheidung, welche der beiden so deutlich voneinander abweichenden Interpolationen besser ist, nicht zu treffen. Es ist sicherlich so, dass systematische Fehler in der Interpolation, die in den InterMet-Daten enthalten sind, zum Teil durch die Kalibrierung ausgeglichen werden. Dies bedeutet aber nur, dass die Fehler für das Einzugsgebiet im Ganzen ausgeglichen werden. Innerhalb des Gebietes können die Abweichungen sehr inhomogen sein.

Indizien für diesen Schluss sind die Evaluierungsergebnisse aus dem Gebiet Steinbach innerhalb des Gebietes Kellenbach, die in Unterkapitel 6.5.2 vorgestellt wurden. In Steinbach lagen die Abweichungen in der Bilanz im Validierungszeitraum bei -26,95 % (inhomogen) bzw. bei -28,36 % (homogen). Angesichts der Tatsache, dass die Bilanzen in Kellenbach im Ganzen im Validierungszeitraum eher leicht überschätzt wurden (2,29 % bzw. 4,87 %), verwundert dies sehr. Unter der Annahme, dass die Pegeldaten korrekt sind, bleibt nur der Schluss, dass die Verteilung des Niederschlags in Kellenbach nur sehr unzureichend abgebildet wird.

Wird nun aufgrund dieser Erkenntnis die Stationslage geprüft, so ist das Bild noch verwunderlicher. In Abbildung 7.3 sind diese Stationen neben den mittleren Jahressummen der einzelnen Zellen eingezeichnet. Die Datenlage dort ist im Gegensatz zu anderen Einzugsgebieten sehr gut: Es gibt zwei Stationen innerhalb des Gebietes und mehrere in unmittelbarer Umgebung. Auch ganz im Norden, dort, wo Steinbach liegt, ist ebenfalls eine Station am Rand des Gebietes. Bei den beiden Stationen innerhalb des Gebietes fällt allerdings auf, dass die Region westlich der beiden Stationen niedrigere Werte als die Umgebung aufweist. Bei der

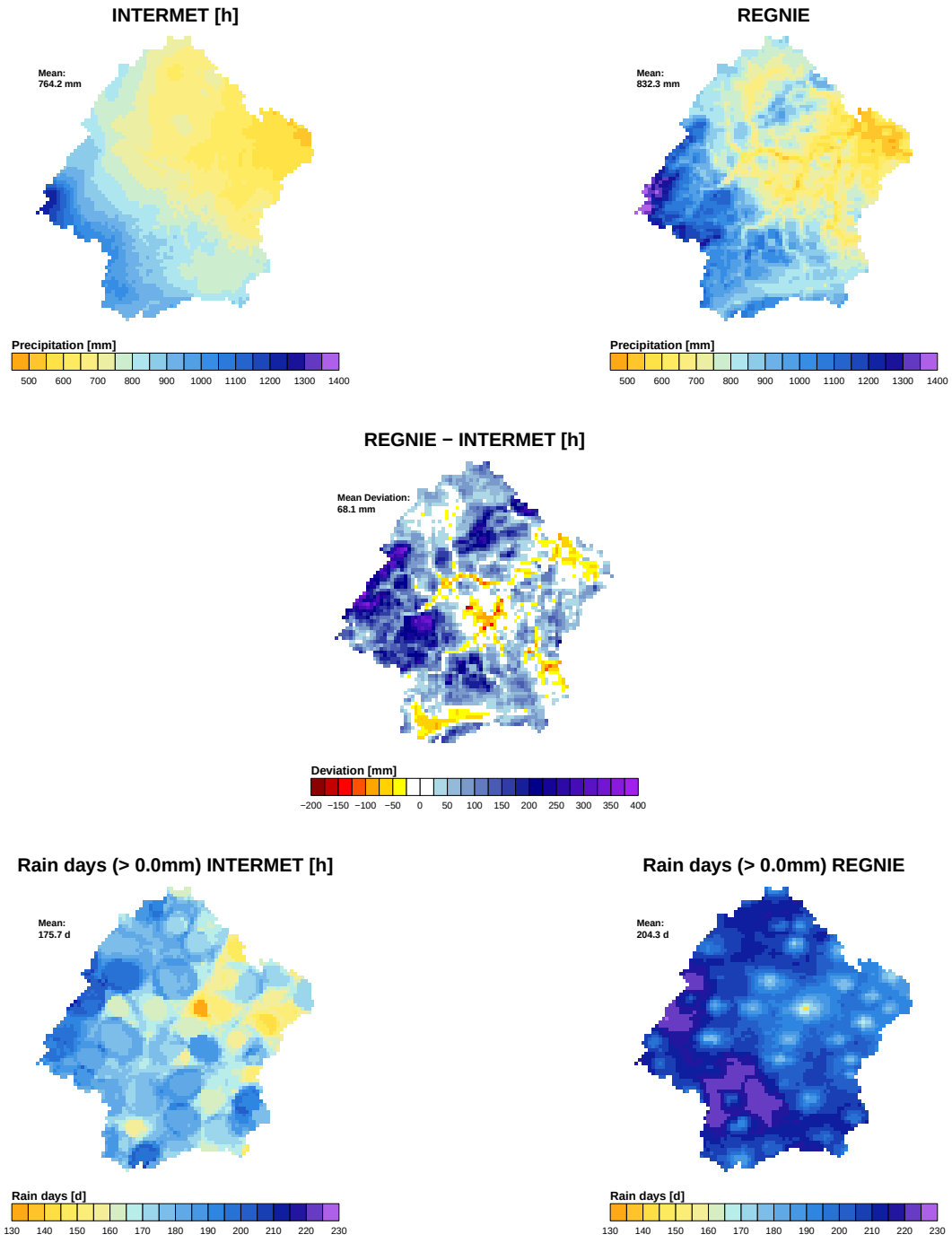

Abb. 7.2. Vergleich unterschiedlicher Niederschlagsinterpolationen für den Zeitraum 1993-2002: links oben: mittlerer Jahresniederschlag resultierend aus InterMet, rechts oben: mittlerer Jahresniederschlag resultierend aus REGNIE, Mitte: Differenz der mittleren Jahresniederschläge, unten links: mittlere Anzahl der Regentage resultierend aus InterMet, unten rechts: mittlere Anzahl der Regentage resultierend aus REGNIE (Quelle: Philipp Reiter, Universität Trier)

angewendeten Interpolationsmethode ist dies nur durch einen hohen Gradienten zwischen diesen beiden Stationen zu erklären, dessen Verlauf nach Westen extrapoliert wird. Es ist zu vermuten, dass die Niederschläge dort eher unterschätzt werden. Dies passt zu den Ergebnissen aus Steinbach. Dort waren die Abflüsse zu niedrig. Diese niedrigen Abflüsse passen auch zum Wert des KG-Faktors, der unter 1 liegt. Die ohnehin niedrigen Werte in diesem Bereich werden weiter verringert.

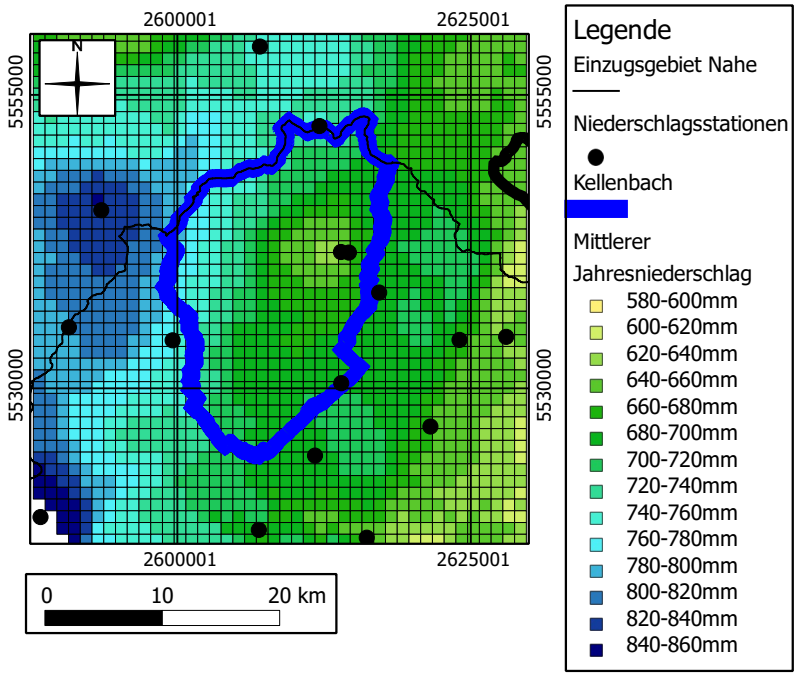

Abb. 7.3. Lage der Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet Kellenbach mit mittleren Jahresniederschlägen

Muss also zur Skalierung der Eingangsdaten eine räumlich inhomogene Korrektur vorgenommen werden, um die räumliche Verteilung der Prozesse überhaupt korrekt abbilden zu können? Es gibt Situationen, in denen eine solche Korrektur möglich ist, wie etwa von Gemmar u. a. (2006) beschrieben. Dort wurden in der Interpolation nicht berücksichtigte Luv- und Lee-Effekte korrigiert. Dies wird aber nicht immer in dieser Form möglich sein.

Kann das Modell unter Skalierung der Bodenparameter also die Bilanz nicht zufriedenstellend abbilden, so ist dies ein Hinweis darauf, die Niederschlagsdaten dieses Gebiets kritisch zu hinterfragen. Neben den Volumina betrifft dies auch den zeitlichen Verlauf. Etwa im Gebiet Kronweiler konnte ein deutlicher Sprung in der Bilanz im Jahr 1996 nachgewiesen werden, die Jahre vorher werden systematisch unterschätzt, die Jahre danach werden systematisch überschätzt. Um diesen Zeitpunkt herum wurde aber auch die Messtechnik geändert, es erfolgte die Umstellung auf ein neues Verfahren. Das Modell liefert also in diesen Einzelfällen Indizien dafür, dass der Niederschlag in dieser Form überprüft werden muss.

Folglich gibt es für den pauschalen Einsatz des KG-Faktors keine schlüssige Begründung an dieser Stelle, sondern nur Problemfelder:

- Der gleiche Effekt ist in den untersuchten Nahe-Gebieten auch durch Skalierung der Bodenparameter erzielbar.
- Wo liegt der Fehler? Ist es ein systematischer Fehler in den Eingangsdaten oder sind die Bodenparameter für dieses Einzugsgebiet falsch?
- Für weitergehende Untersuchungen mit LARSIM, z. B. die Auswertung von Zustandsgrößen, verfälscht die Skalierung unter Umständen das Ergebnis.

Dass solche Auswertungen im Einzelfall möglich sind, wurde bereits untersucht (siehe Krumm (2011) bzw. in Krumm u. Haag (2012)). In einer solchen Studie würde aber eine Skalierung der Niederschläge auch in einer Skalierung der untersuchten Zustandsgrößen resultieren.

7.3 Übertragbarkeit in andere Naturräume und / oder Klimata

Die vorliegende Dissertation behandelt ausschließlich Einzugsgebiete der Nahe. Dies ist ein relativ schmaler Fokus im Hinblick auf die Bandbreite an Naturräumen, in denen LARSIM in Europa eingesetzt wird. Es stellt sich die Frage, ob die entwickelten Methoden auch außerhalb der Nahe funktionieren könnten.

Dazu muss ein wenig spezifischer betrachtet werden, welche Bandbreite an Naturräumen momentan überhaupt abdeckt wird, und wo es Probleme gab. Eine historische Betrachtung zeigt, dass die zugrunde liegenden Modellannahmen zunächst für humide Regionen entwickelt wurden (Zhao (1977)). Dort kommt diese Einschränkung sogar im Titel vor: „Flood forecasting method for humid regions of China“. Etwas später wurde LARSIM maßgeblich im Rahmen des BALTEX-Projektes entwickelt, für das Einzugsgebiet der Ostsee einschließlich der Elbe (Ludwig u. Bremicker (2006), Seite 4 und BALTEX (1995)). Bayern und das Bundesland Vorarlberg in Österreich setzen es in Gebieten ein, in denen alpine Bedingungen herrschen. In jüngerer Vergangenheit wurde es für die Bundesanstalt für Gewässerkunde für Zentraleuropa aufgestellt (Wolf-Schumann u. a. (2013)). Es kann also durchaus gesagt werden, dass LARSIM seine Einsatzfähigkeit in einem recht breiten Spektrum gezeigt hat.

Weisen die unterschiedlichen Naturräume Besonderheiten auf, so sind hierfür auch spezielle Anpassungen notwendig. Ein Beispiel hierfür wären etwa starke Höhengradienten, die im Schnee-Modul berücksichtigt werden müssen, was ursprünglich nicht der Fall war (Stahl (2012)). Auch in anderen Gebieten mit besonderen Eigenschaften sind spezielle Lösungen gefragt, etwa wenn das Einzugsgebiet ein extremes Schwellenwertverhalten zeigt (Johst u. Demuth (2013)).

Abseits dieser extremen Beispiele ergeben sich aber grundsätzliche Fragestellungen bei der Übertragung in andere Naturräume, die daraus resultieren, dass die in Kapitel 6 dargestellten Parameterkennfelder für *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* empirisch ermittelt wurden: Es wurden die Abflusskomponentenanteile verwendet,

die sich bei der Simulation eines Kompartiments in einem bestimmten Zeitraum ergeben haben. Werden nun die Randbedingungen geändert, dann resultieren je nach konkreter Änderung unterschiedlich stark abweichende Komponenten im Bodenmodul. Diese Abweichungen und ihre Ursachen sollen im Folgenden näher beleuchtet werden: Welchen Einfluss hat welche Randbedingung auf die Aufteilung in Abflusskomponenten? Und wie stark ist dieser Einfluss? Wie ist er zu erklären? Funktioniert die Parametrisierung mittels *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* dennoch?

Zunächst sollte präzisiert werden, welche Aspekte einer Änderung des Naturraums und / oder des Klimas überhaupt einen Effekt auf die Simulation haben. Dies sind im Wesentlichen die Punkte:

- Bodeneigenschaften (soweit durch das Modell berücksichtigt)
- Landnutzung
- Eigenschaften der meteorologischen Eingangsdaten

In den folgenden Abschnitten werden diese Aspekte einzeln behandelt.

7.3.1 Bodeneigenschaften

Hinsichtlich der Bodeneigenschaften finden in LARSIM lediglich die nutzbare Feldkapazität sowie die Luftkapazität eine direkte Verwendung: Erstere wird für W_Z verwendet, die Summe der beiden für W_m. Weiterhin gibt es noch den vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert, mit dem die Perkolation je Element in Abhängigkeit des Untergrundes skaliert werden kann. Auf den zuletzt genannten Parameter wird später in Unterkapitel 7.4 gesondert eingegangen.

Alle drei Komponenten des Bodenmoduls hängen von dem Parameter W_m ab, die laterale Drainage zusätzlich von W_z. Weiterhin ist es so, dass in einigen Modellannahmen die *relative* Speicherfüllung verwendet wird, in anderen die *absolute*. Dies hat bei der Übertragung in andere Naturräume – und damit möglicherweise unterschiedliche Kapazitäten – deutliche Auswirkungen.

In Abbildung 7.4 ist zur Verdeutlichung ein repräsentatives Beispiel dargestellt. Es wurde ein Beispiel gesucht, bei dem sich die Speicherkapazitäten W_m innerhalb eines Elementes – und damit unter den gleichen meteorologischen Eingangsdaten – möglichst stark unterscheiden. Dieser große Unterschied trifft auf die Kompartimente 5 und 9 des Elementes 2478 zu (siehe auch Abbildung 4.2 auf Seite 18). Das Kompartiment 5 repräsentiert eine Siedlungsfläche mit einer Kapazität des Bodenspeichers von 133 mm, das Kompartiment 9 einen Mischwald mit einer Kapazität von 191 mm.[1] Die Schwellwerte für die laterale Drainage (W_Z) sind 98 mm und 136 mm. Gezeigt wird der Zeitraum vom 1. Januar 1993 bis zum 31. Dezember 1996. In allen Abbildungsteilen wird in Rot der Verlauf des Kompartiments 5 gezeigt, in Grün der Verlauf des Kompartiments 9.

In Teil a) ist zu sehen, dass die Verläufe der Bodenspeicherfüllungen über den Zeitraum von 4 Jahren immer dem gleichen Muster folgen: In den Wintermonaten

[1] Aus den unterschiedlichen Landnutzungen ergeben sich auch leicht unterschiedliche Wasserdargebote und Verdunstungen, diese sind hier aber zu vernachlässigen. Wichtig ist auch, dass die versiegelten Flächen des 5. Kompartiments getrennt behandelt werden (siehe Unterkapitel 4.1.1).

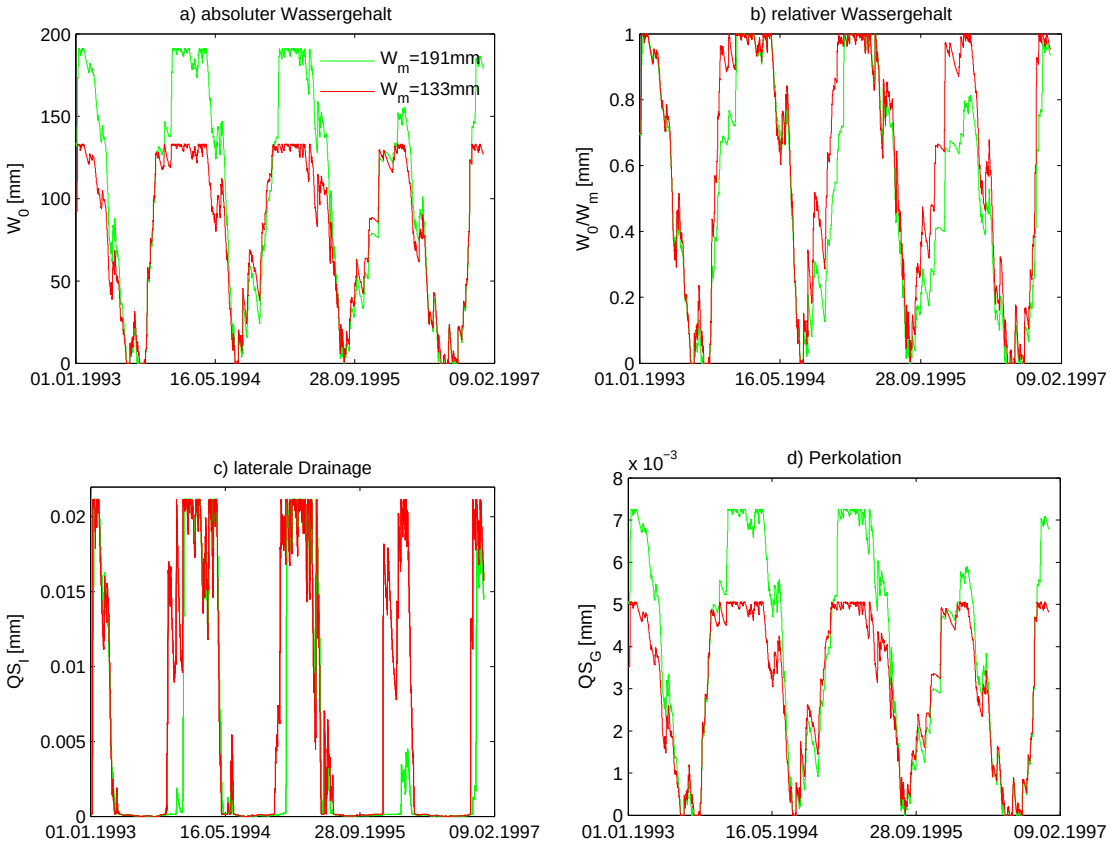

Abb. 7.4. Zeitlicher Verlauf a) der absoluten Bodenspeicherfüllungen W_0, b) der relativen Speicherfüllungen W_0/W_m, c) der daraus resultierenden lateralen Drainage QS_I und d) der resultierenden Perkolation QS_G für zwei Kompartimente des gleichen Elements mit unterschiedlichen Werten von W_m

ist der Boden nahezu gesättigt (bis auf den extrem trockenen Winter 1995/1996, in dem die Summe der Niederschläge des letzten Jahres bis auf ca. 400 mm sinkt); in den Sommermonaten trocknet er nahezu vollständig aus. Die zur Verfügung stehende Dynamik wird in beiden Kompartimenten also vollständig genutzt. Der Verlauf des Aufsättigens über den Herbst bzw. der Verlauf des Austrocknens über den Frühling ist in beiden Kompartimenten bei diesem Betrachtungsmaßstab nahezu identisch. Dies ist bei der relativen Betrachtungsweise in Teil b) anders: Hier unterscheiden sich der Frühling und der Herbst, die Siedlungsfläche sättigt sich schneller auf. Aber auch hier ist offensichtlich, dass die komplette Bandbreite von vollständig gefüllt bis zu vollständig ausgetrocknet auftritt. Lediglich im bereits erwähnten Winter 1995/1996 gibt es Unterschiede: Hier reichten die Niederschlagsmengen aus, um das Kompartiment 5 nahezu zu sättigen, im Kompartiment 9 gibt es noch verbleibende Kapazitäten.

Werden nun die aus diesen Speicherfüllungen resultierenden Abflusskomponenten betrachtet, sind die Unterschiede offensichtlich: Die in Teil c) gezeigte laterale Drainage resultiert aus der relativen Speicherfüllung in Teil b). Die Abflüsse

unterscheiden sich kaum, lediglich im besagten Winter gibt es signifikante Unterschiede: Hier ist die Drainage des Kompartiments 9 deutlich geringer, da die Füllung nur wenig über W_Z hinaus ansteigt, und nur dieser Anteil mit D_{max} multipliziert wird, dessen Wert mehrere Größenordnungen über D_{min} liegt. Insgesamt ergeben sich über die vier Jahre im Kompartiment 5 242 mm laterale Drainage (entspricht 15,9 % des Gesamtabflusses); im Kompartiment 9 sind es 164 mm (entspricht 13,7 % des Gesamtabflusses). Deutliche Unterschiede zeigen sich aber bei der Perkolation in Teil d). Diese wird als Anteil aus der absoluten Füllung in Teil a) berechnet und demnach sind die Verläufe in a) und d) bis auf den Wertebereich identisch. Daraus erklären sich auch die deutlichen Unterschiede: In Kompartiment 5 versickern 109 mm (entspricht 7,2 % des Gesamtabflusses); in Kompartiment 9 sind es 135 mm (entspricht 11,3 % des Gesamtabflusses). In Kompartiment 5 wird also deutlich mehr laterale Drainage als Perkolation produziert – in Kompartiment 9 ist es genau umgekehrt, obwohl in beiden die gleichen Parameter verwendet wurden!

Aus diesem Beispiel – bei dem die Kapazitäten noch nicht am Rande des vorkommenden Wertebereichs angesiedelt sind – wird deutlich, dass die Bodeneigenschaften einen enormen Einfluss auf die Anteile der einzelnen Abflussprozesse haben. Diese Effekte resultieren zwingend aus den Modellannahmen und somit könnte ihr Einfluss auf die Anteile der Abflusskomponentenanteile nur kompensiert werden, wenn die Kennfelder Funktionen der Bodenparameter wären.

Aus diesem Einzelfall resultierend erscheint es sinnvoll, den Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Abflusskomponenten systematisch zu untersuchen. Führen die Kennfelder in allen betrachteten Gebieten zu sinnvollen Abflusskomponentenanteilen oder nur in dem Gebiet, mit dessen Hilfe die Kennfelder auch berechnet wurden? Falls es Abweichungen gibt: Sind diese plausibel?

Das Resultat dieser systematischen Auswertung ist in Abbildung 7.5 für alle Gebiete dargestellt. In der linken Spalte finden sich die Verteilungen der Anteile der drei Komponenten im Validierungszeitraum auf allen Kompartimenten des Einzugsgebietes gruppiert nach den drei Prozessgruppen. In der rechten Spalte findet sich für die Gebiete die Verteilung von W_m, ebenfalls gruppiert nach den drei Prozessgruppen.

In der ersten Zeile in Teil a) und b) sind die Verteilungen für Kronweiler dargestellt. Hier liegen 767 Kompartimente zugrunde. Teil a) zeigt, dass die Anteile der Oberflächenabflüsse relativ hoch liegen, in Kronweiler ist *P_Dämpfung* auch deutlich verringert worden – das Gewässer hat seinen Namen Schwollbach offensichtlich verdient. Ebenso wurde *P_Bilanz* deutlich nach unten justiert, an den Rand des Parameterkennfeldes. Trotz dieser Parameterwahl außerhalb des mittleren Bereichs resultieren sinnvolle Anteile, wenn diese untereinander verglichen werden: Auf SOF-Kompartimenten ist der Anteil der Oberflächenabflüsse höher als auf SSF-Kompartimenten, auf diesen höher als auf DP-Kompartimenten. In umgekehrter Reihenfolge nimmt der Anteil der Perkolation zu. Die Streuung innerhalb der Gruppen ist im Hinblick auf die darunter gezeigten anderen Gebiete sehr gering, es gibt keine Ausreißer. Interessant ist auch, dass die laterale Drainage auf den SSF-Kompartimenten geringer ist als auf den DP-Kompartimenten,

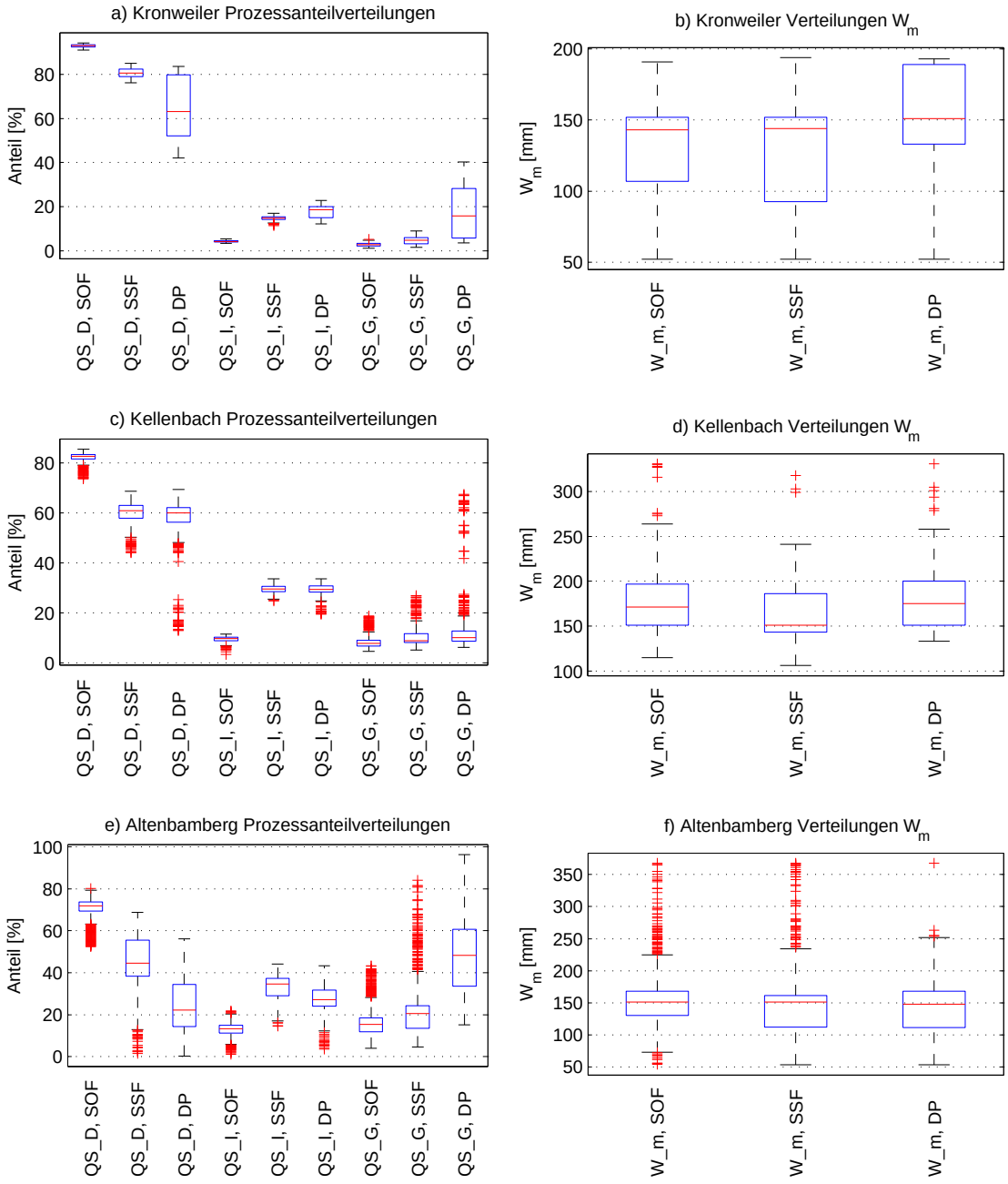

Abb. 7.5. Verteilung der Anteile der einzelnen Abflusskomponenten gruppiert nach Prozessen (links) im Vergleich zur Verteilung von W_m gruppiert nach Prozessen (rechts) für den Zeitraum 2000-2003 im Einzugsgebiet Kronweiler (a und b), Kellenbach (c und d) und Altenbamberg (e und f)

was aber an der Verteilung von W_Z liegt. Dies ist wieder ein Beleg dafür, dass die laterale Drainage am schwierigsten zu skalieren ist. Insgesamt ergeben sich somit zufriedenstellende Anteile.

Beim ersten Blick auf die Ergebnisse für das Gebiet Kellenbach in den Teilen c) und d) drängt sich ein anderer Eindruck auf: Hier gibt es größere Abweichungen. Obwohl wir uns hier in einem anderen Gebiet befinden und einem anderen Zeitraum als den zur Bestimmung der Kennfelder verwendeten betrachten, gibt es dafür aber eine aus den Modellannahmen resultierende Erklärung, die auch im hydrologischen Sinne plausibel erscheint. Die in allen Gruppen deutlich sichtbaren Ausreißer bei den Anteilen der Komponenten resultieren aus der deutlich stärker gespreizten Verteilung von W_m. Hier treten Werte auf, die in Kronweiler nicht vorkommen. In Kronweiler lagen alle Kompartimente zwischen 50 und 200 mm, 75 % sogar oberhalb von 100 mm, hier in Kellenbach reichen die Werte von 100 bis jenseits von 300 mm. Folglich ist es im Sinne der Modellannahmen absolut korrekt, dass der Anteil der Oberflächenabflüsse auf den DP-Kompartimenten deutlich mehr nach unten streut, da die Werte von W_m in dieser Gruppe deutlich mehr nach oben streuen. Dies ist in abgeschwächter Form auch bei den beiden anderen Gruppen sichtbar.

Abseits dieser Überlegungen ergibt die Auswertung der 3053 Kompartimente aber wieder sinnvolle Muster. Auch hier gilt: Auf SOF-Kompartimenten ist der Anteil der Oberflächenabflüsse höher als auf SSF-Kompartimenten, auf diesen höher als auf DP-Kompartimenten. In umgekehrter Reihenfolge nimmt der Anteil der Perkolation zu. Diesmal ist der Anteil der lateralen Drainage auf den SSF- und DP-Kompartimenten aber ungefähr gleich. Insgesamt liegt der Anteil der Oberflächenabflüsse ein wenig niedriger, der Parameter *P_Dämpfung* ist in Kellenbach auch größer als in Kronweiler.

Bei der Auswertung der 3473 Kompartimente von Altenbamberg gelten die in Kellenbach zutreffenden Aussagen in nochmals gesteigerter Form: Hier ist die Variationsbreite von W_m noch größer, die Verteilung aber gleichzeitig schmalgipfeliger. Der Parameter *P_Dämpfung* ist darüber hinaus in Altenbamberg größer als in Kellenbach und es resultieren entsprechend geringere Anteile von Oberflächenabflüssen. Die Streuung innerhalb der Gruppen ist wieder anhand von W_m zu erklären, die Aussagen auf die Anteile im Vergleich der Gruppen zueinander gelten ebenfalls in gleicher Weise. Es gibt zwar einzelne Fälle, in denen der Anteil der Oberflächenabflüsse auf SOF-Kompartimenten denen auf manchen DP-Kompartimenten unterschreitet, dafür liegen in diesen Fällen aber auch extreme Kombinationen von W_m vor.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den drei Gebieten bei einer hohen Spannweite von Speicherkapazitäten in allen Fällen Anteile erzielt wurden, die relativ zueinander absolut korrekt sind. Abhängigkeiten der Anteile zueinander lassen sich anhand der Speicherkapazitäten sowie den Modellannahmen erklären und sind auch im hydrologischen Sinne korrekt: Ist die nutzbare Feldkapazität sowie die Luftkapazität niedriger, so sättigt sich der Boden bei geringeren Niederschlägen auf, entsprechend häufiger gibt es Oberflächenabflüsse.

Die Schlussfolgerung lautet, dass eine Übertragung in andere Naturräume mit Hinblick auf die Bodeneigenschaften möglich sein sollte. Liegen die Kapazitäten in dem neuen Raum allerdings deutlich außerhalb der hier untersuchten Spannweite, so ist ein kritischer Blick auf die Anteile sinnvoll.

7.3.2 Landnutzung

Auch wenn die Landnutzung nicht explizit im Bodenmodul verwendet wird, so gibt es dennoch interagierende Komponenten: das Interzeptionsmodul, das Evapotranspirationsmodul und den Schneespeicher:

- Im Interzeptionsmodul wird der Niederschlag des Kompartiments verringert, falls der Interzeptionsspeicher nicht gefüllt ist. Das Wasser in diesem Speicher kann nur durch Verdunstung entnommen werden, es steht dem Boden also auch nicht später zur Verfügung. Daraus folgt, dass in Kompartimenten mit Landnutzungen, deren Verlauf des Blattflächenindizes über das Jahr größer ist (und damit die Speicherkapazität), insgesamt weniger Wasser im Bodenmodul ankommt.
- Im Schneemodul geht die Landnutzung ebenfalls ein, aber hier ist es so, dass das Wasser bis auf den geringen Anteil, der sublimiert, lediglich zu einem späteren Zeitpunkt in das Bodenmodul gelangt. Durch Regen bei gleichzeitiger Schneeschmelze können dabei die Intensitäten durchaus höher werden. Aber: Hier findet keine wirklich relevante Größe, die von der Landnutzung abhängt, Eingang.
- Beim Evapotranspirationsmodul hingegen ist der Einfluss der Landnutzung über das Jahr größer, da dort viele landnutzungsspezifische Größen eingehen. Die Bilanz müsste sich auf Kompartimenten unterschiedlicher Landnutzungen voneinander unterscheiden.

Ausgehend von diesen theoretischen Vorüberlegungen wurden ähnliche Analysen wie im vorherigen Unterkapitel 7.3.1 durchgeführt. Nun wurde aber nicht nach den drei Prozessgruppen gruppiert, sondern nach der Landnutzung. Analog zur Darstellung im vorherigen Kapitel sind die Ergebnisse in Abbildung 7.6 dargestellt. Es wurden allerdings nicht alle Landnutzungsklassen betrachtet – das Ergebnis wäre sehr unübersichtlich –, sondern es fand eine Beschränkung auf die drei bezüglich der Flächenanteile größten Gruppen statt: Wälder (Landnutzung Laub-, Nadel- und Mischwald), Ackerland und Grünland. Die restlichen Klassen haben hinsichtlich der relevanten Eigenschaften (Aerodynamischer Widerstand, Albedo, Blattflächenindizes, Bestandshöhe) keine signifikant davon abweichenden Werte.

In allen Gebieten fällt auf, dass ein leichter Trend in den Anteilen zu erkennen ist: Der mittlere Anteil der Oberflächenabflüsse ist in Wäldern niedriger als auf Ackerland und dort niedriger als auf Grünland. Ebenso fällt in allen Gebieten eine große Spannweite mit vielen Ausreißern auf, die im vorherigen Unterkapitel in dieser Form zumindest in Kronweiler nicht vorkam. Die Verteilungen der Anteile in Altenbamberg zeigen nicht das schmalgipfelige Verhalten, wie es bei der Gruppierung nach den Prozessgruppen der Fall ist.

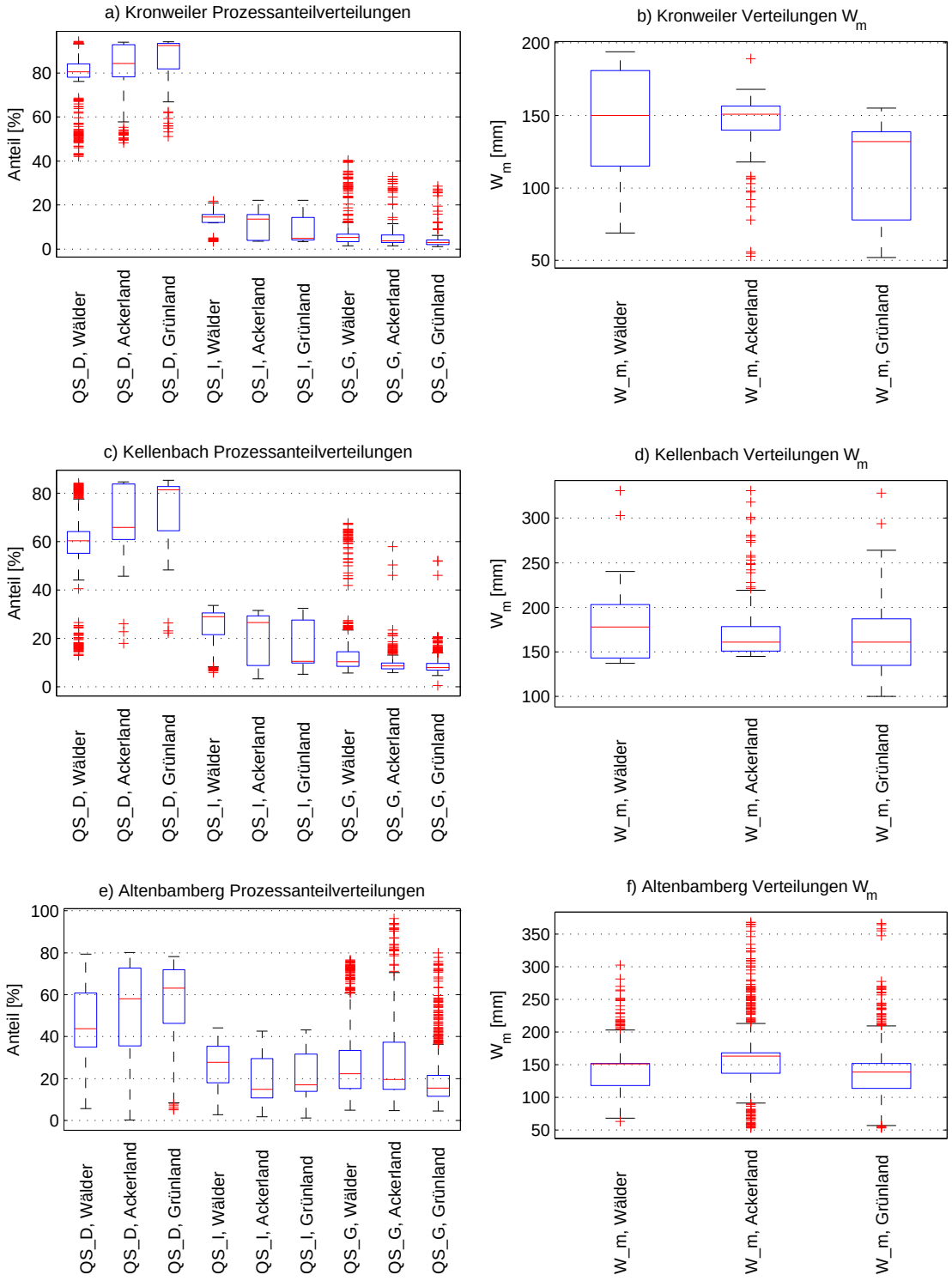

Abb. 7.6. Verteilung der Anteile der einzelnen Abflusskomponenten gruppiert nach Landnutzung (links) im Vergleich zur Verteilung von W_m gruppiert nach Landnutzung (rechts) für den Zeitraum 2000-2003 im Einzugsgebiet Kronweiler (a und b), Kellenbach (c und d) und Altenbamberg (e und f)

Es erscheint sinnvoll anzunehmen, dass die Resultate eher aus den Verteilungen der Speicherkapazitäten resultieren, die schließlich auch einen Zusammenhang zur Landnutzung aufweisen. Weiterhin gehen die Landnutzungen auch in die Erstellung der Bodenhydrologischen Karte ein, sodass ein Zusammenhang zur Landnutzung indirekt über den zugewiesenen Prozess besteht. Natürlich gibt es auch Wälder, in denen SOF kartiert wurde (siehe Tabelle 4.1 auf Seite 19), ebenso gibt es Grünland, auf dem DP stattfinden soll. Ohne auf das Gewicht der Landnutzung in der Wahl der dominanten Prozesse eingehen zu wollen, erscheint es auch hier sinnvoll, dass ein umgekehrtes Verhalten resultiert: Der Anteil des Oberflächenabflusses in einem Waldkompartiment, in dem SOF kartiert wurde, kann durchaus höher sein als der Anteil auf einem Grünlandkompartiment, auf dem DP kartiert wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einfluss der Landnutzung im Vergleich zum Einfluss der Bodenspeicherkapazitäten eher zu vernachlässigen ist. Einer Übertragung in andere Naturräume steht nichts im Wege, wenn die Parameter der dort vorkommenden Landnutzungen im Interzeptions- und Evapotranspirationsmodul nicht signifikant von denen im Nahe-Gebiet abweichen. Ist dies der Fall, so ist erneut eine kritische Prüfung der Anteile notwendig.

7.3.3 Klimatische Randbedingungen

Die klimatischen Randbedingungen sind unter den bisher betrachteten Einflussfaktoren am schwierigsten zu beurteilen, da der Einfluss einzelner meteorologischer Größen vielschichtiger ist. Bevor diese Einflüsse jedoch diskutiert werden, soll die Bandbreite der Beobachtungen beschrieben werden.

Innerhalb der verwendeten Einzugsgebiete gibt es bereits eine deutliche Spanne bei den mittleren Werten: Die mittleren Jahrestemperaturen in den höchstgelegenen Elementen von Kronweiler erreicht lediglich 7,7 °C, in den am niedrigsten gelegenen Elementen von Altenbamberg sind es 10,2 °C. Bezüglich der gleichen Elemente reichen die mittleren Jahresniederschläge von 1077 mm bis zu 594 mm.

Dies schlägt sich auch in den Anteilen der Abflusskomponenten wieder, die in Abbildung 7.5 in Unterkapitel 7.3.1 gezeigt wurden. In Altenbamberg sind die Anteile der Oberflächenabflüsse geringer, da es – neben der bereits erwähnten höheren Dämpfung – weniger regnet, der Bodenspeicher durch die höheren Temperaturen stärkerer Verdunstung ausgesetzt ist, und es folglich zu weniger Oberflächenabflüssen kommt. Diese Zusammenhänge sind plausibel, auch wenn sie nicht systematisch untersucht wurden.

Neben diesen Höhen der Mittelwerte, die letztendlich nur die Niederschlagssummen widerspiegeln, spielt aber auch die zeitliche Verteilung eine besondere Rolle. Wie im Einzugsgebiet Kronweiler bereits in Unterkapitel 4.2 angeprochen, ist die Spannweite der Jahresniederschläge in Kronweiler im Untersuchungszeitraum ebenfalls enorm groß: zwischen ca. 450 mm bis zu ca. 1300 mm. Diese zeitliche Verteilung hat einen deutlichen Einfluss auf die Anteile der Abflusskomponenten. Regnet es selten und intensiv, so ist der Anteil der Oberflächenabflüsse größer als

bei häufigen extensiven Niederschlägen. Der Oberflächenabfluss ist schließlich eine Funktion der relativen Speicherfüllung *und* der Niederschlagsintensität.

Innerhalb dieser vorkommenden Variabilität wurden also keine Zusammenhänge beobachtet, die nicht plausibel wären. Was aber ist mit extremeren Klimaänderungen?

Auch dies wurde nicht systematisch untersucht, doch die Resultate der bereits erwähnten Untersuchungen bezüglich des Klimawandels haben gezeigt, dass die Einflüsse bei größeren Änderungen deutlich nicht linear, aber in den betrachteten Fällen immer plausibel sind. In Wittig (2013) wurden die Auswirkungen der Bias-Korrektur des Niederschlags und der Temperatur getrennt voneinander ausgewertet. Es wurde also im gleichen Einzugsgebiet der gleiche Zeitraum betrachtet, der Unterschied liegt nur in einer einzigen Eingangsgröße. Eine Verringerung des Niederschlags um ca. 25 % resultierte in einer Verringerung der Bilanz von ca. 37 %. Bei den intervallskalierten Temperaturen in Grad Celcius ist solch eine Aussage schwieriger zu treffen, aber eine Erhöhung der Temperatur um ca. 1,2 °C resultierte in einer Verringerung der Bilanz von ca. 6,4 %. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass das eingesetzte empirsche Quantile-Matching-Verfahren neben den Mittelwerten auch die Verteilung selbst ändert.

Als letztes Beispiel sei der Vergleich der InterMet-Daten mit den REGNIE-Daten aus Unterkapitel 7.2 angeführt. Hier liegen deutliche Unterschiede in einer einzigen Größe, dem Niederschlag, bei ansonsten gleichen Bedingungen zugrunde. Auch hier zeigte sich ein nichtlinearer aber plausibler Einfluss.

Zusammenfassend lässt sich wie bei den anderen Einflussfaktoren sagen: Bei Abweichungen, die über die Variabilität des Nahe-Gebiets hinausgehen, ist eine vorsichtige Analyse angebracht.

7.4 Behandlung von DP-Flächen und DP=-Flächen

In Unterkapitel 4.3 wurde bei der Beschreibung der Bodenhydrologischen Karte bereits der Prozess DP= genannt. Er wurde dort 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.“ (Steinrücken u. Behrens (2010), Seite 45).

Im bisherigen Verlauf wurde nicht zwischen DP- und DP=-Flächen unterschieden, weil nicht abschließend geklärt wurde, wie mit diesen Prozessflächen umzugehen ist, bzw. wie diese Kartierung zu interpretieren ist. In den durch die HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe parallel durchgeführten Untersuchungen zur Abbildung der Bodenhydrologischen Karte mit Hilfe des Infiltrationsmoduls wurden jedoch zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, deren Resultate zunächst abgewartet wurden. Sie sollen hier kurz zusammengefasst werden (Haag-Wanka u. Luce (2010)).

Im ersten Ansatz wurden diese Flächen wie „Moore“ behandelt. Auf den Flächen entstehender Oberflächenabfluss wurde in einen extra Speicher abgeführt,

dieser entwässert wieder in den eigentlichen Bodenspeicher. Sobald dort Kapazität verfügbar ist, wird der neue Speicher geleert. Die Verdunstung wird so nicht durch Wassermangel limitiert. In Kellenbach, wo die DP=-Flächen 36 % der Fläche ausmachen, führte dieser Ansatz dazu, dass der Gesamtabfluss deutlich unterschätzt wird, die Verdunstung entsprechend überschätzt.

In einem zweiten Ansatz wurden lediglich die Faktoren, mit denen die Werte von β auf unterschiedlichen Prozessflächen skaliert werden, für DP- und DP=-Flächen deutlich unterschiedlich gewählt, ohne dass weitere Änderungen am Modellkonzept erfolgten. Dieser Ansatz führte in Kellenbach zu besseren Ergebnissen. In Kronweiler führte die Übertragung dieses Ansatzes dazu, dass die Ergebnisse gegenüber der Variante, in der nicht zwischen DP- und DP=-Flächen unterschieden wurde, weiter verbessert werden konnten.

Resultierend aus den Ergebnissen der zweiten Variante sollte dieser Ansatz in zukünftige Entwicklungen übernommen werden. Es wäre auch denkbar, für diese Flächen einen getrennten Basisabflussspeicher zu schaffen, dessen Koeffizient größer ist als der der restlichen Flächen.

7.5 Wiederversickerung

In LARSIM ist die Lage einzelner Kompartimente innerhalb des Elementes unbekannt. Wird nun auf SOF-Kompartimenten Oberflächenabfluss erzeugt, so gelangt dieser in den Gebietsspeicher für den schnellen bzw. langsamen Direktabfluss. Liegt die Fläche, die durch dieses Kompartiment repräsentiert wird, im Einzugsgebiet nun oberhalb einer Fläche, auf der SSF oder DP kartiert wurde, so könnte dieser Oberflächenabfluss wieder infiltrieren und gelangt eben nicht oberflächlich und damit recht schnell ins Gerinne. Im Modell ist dies nicht möglich.

Zunächst stellt sich die Frage: Ist das überhaupt relevant? Tritt der Fall überhaupt ein? Ein Blick in Abbildung 7.7 zeigt: Dieser Fall tritt in Kronweiler sogar regelmäßig ein. Es gibt vielfach die Abfolge, in der SOF3-Flächen (Cyan) oberhalb von SSF2-Flächen liegen (Grün). Auch in Scherrer (2006) wird dieser Fall gezeichnet: Dort werden auf den Seiten 65-67 typische Abfolgen von Prozessen im Schnitt durch den Hang in unterschiedlichen Einzugsgebieten gezeigt. Die Abfolge SOF3 oberhalb von SSF2 gibt es auch dort (Abbildung 6/15 auf Seite 66).

Ohne die Information der Lage der Kompartimente zueinander im Modell hinzufügen, scheint aber keine Möglichkeit zu existieren, dieses Problem zu beheben. Für die Beschreibung der Lage würde eine Nachbarschaftsbeziehung im Sinne von „liegt oberhalb von“ bereits ausreichen. Oberflächenabfluss, der auf diesen oberhalb gelegenen Flächen entsteht, könnte auf den darunter gelegenen Flächen zum Wasserdargebot addiert werden, was natürlich eine bestimmte Berechnungsreihenfolge erfordert. Hier wird dann in Abhängigkeit der Speicherfüllung und der Intensität des Wasserdargebots ein möglicher Oberflächenabfluss aufgrund der Parameter dieser Fläche bestimmt.

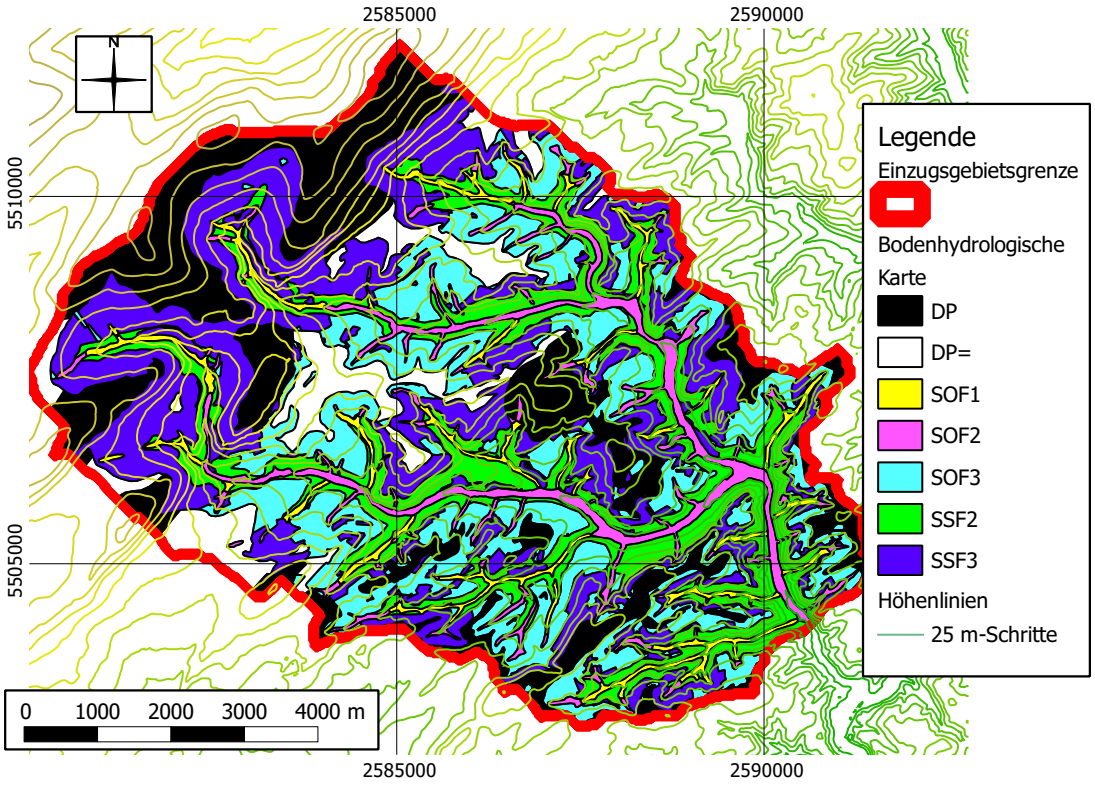

Abb. 7.7. Bodenhydrologische Karte mit Höhenlinien (Eigene Darstellung, Quellen: Höhenmodell: Universität Trier, Bodenhydrologische Karte: Soilution GbR)

7.6 Alternative Ansätze

Unter den Möglichkeiten, die bereits zur Abbildung von Prozessen existieren, sollen zwei dem Autor besonders geeignet erscheinende beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert werden.

7.6.1 Neues Infiltrationsmodul und Anpassung der vertikalen Versickerung

Der erste Ansatz resultiert aus den bereits mehrfach erwähnten Untersuchungen der HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe (Haag-Wanka u. Luce (2010)). Die zentralen Punkte dieses Ansatzes sind der Einsatz eines gegenüber Ludwig u. Bremicker (2006) modifizierten Infiltrationsmoduls vor dem Bodenspeicher, die Anpassung der vertikalen Versickerung und die Entwicklung von Parametersätzen, die auf unterschiedlichen Prozessflächen die Bodenparameter skalieren.

Der aus dem ersten Punkt resultierende neue Aufbau des Modells wird in Abbildung 7.8 gezeigt. Bevor das Wasserdargebot in den Bodenspeicher gelangt, passiert es zwei Filter: das modifizierte Infiltrationsmodul, das Oberflächenabfluss infolge zu hoher Infiltrationsraten abzweigt, und den sich anschließenden, bereits bekannten Ansatz für schnellen unterirdischen Abfluss, der allerdings hier den zutreffenderen Namen *Preferential Flow Function* erhalten hat. So werden vom Bodenmodul selbst vier Komponenten erzeugt, die Aufteilung anhand des Parameters A2 in schnellen und langsamen Oberflächenabfluss entfällt.

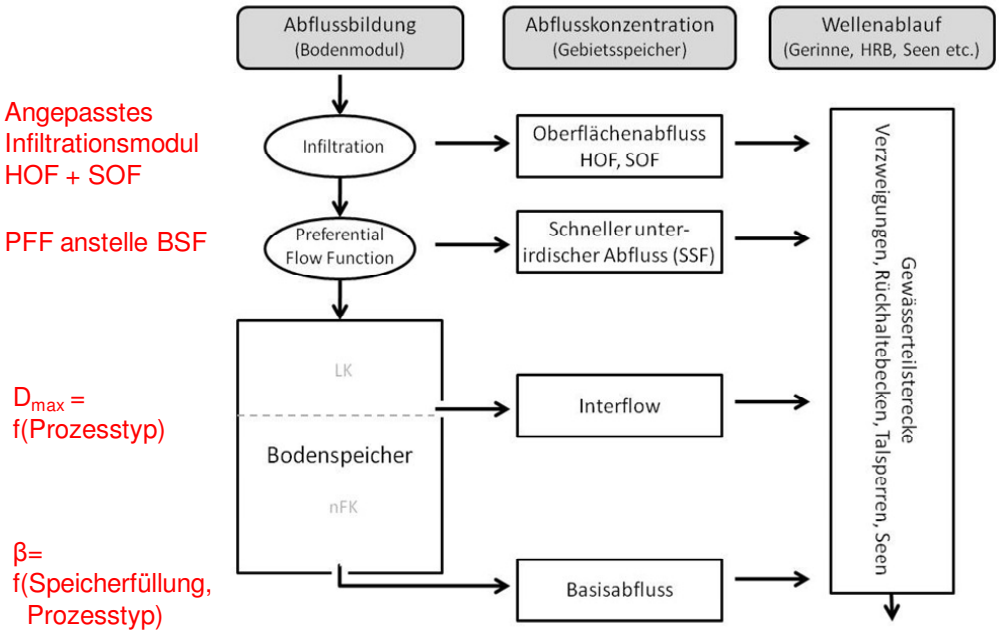

Abb. 7.8. Neuer Aufbau des Bodenmoduls mit den folgenden Gebietsspeichern (Quelle: Haag-Wanka u. Luce (2010), Seite 9)

Die modifizierte Modellannahme des Infiltrationsmoduls lautet:

$$I_{kap} = I_{min} + (I_{max} - I_{min}) \cdot \left(1 - \frac{W_0 - W_b}{W_m - W_b}\right)^{b_{inf}}, \tag{7.1}$$

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 (Beginn des Berechnungszeitschritts),
W_m	$[mm]$	maximaler Wasserinhalt des Bodenspeichers und
W_b	$[mm]$	Schwellenwert für nicht entwässerbaren Inhalt im Speicher.

Dieser Ansatz ist wesentlich flexibler als die ursprüngliche Annahme für die Oberflächenabflüsse, da hier nun tatsächlich ein progressiver wie auch degressiver Zusammenhang zwischen relativer Speicherfüllung und resultierenden maximalen Infiltrationsraten möglich ist, wie in Abbildung 7.9 dargestellt. Durch Skalierung des Parameter I_{min} kann der Verlauf der Kurve zusätzlich im Niveau verschoben werden.

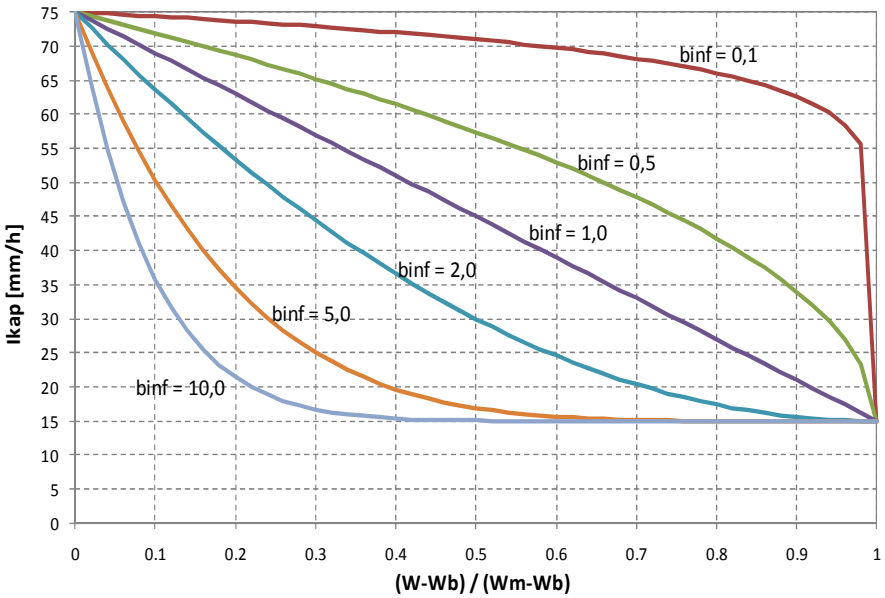

Abb. 7.9. Aus unterschiedlichen Werten von b_{inf} resultierende Infiltrationskapazitäten (Quelle: Haag-Wanka u. Luce (2010), Seite 11)

Bevor die Effekte dieser Änderung diskutiert werden, soll noch eine weitere wichtige Änderung anhand der Abbildung 7.10 beschrieben werden. Nun wird auch die Perkolation mit unterschiedlichen Faktoren bei Unter- und Überschreitung der nutzbaren Feldkapazität skaliert, sodass sich ein realistischeres Verhalten ergeben sollte.

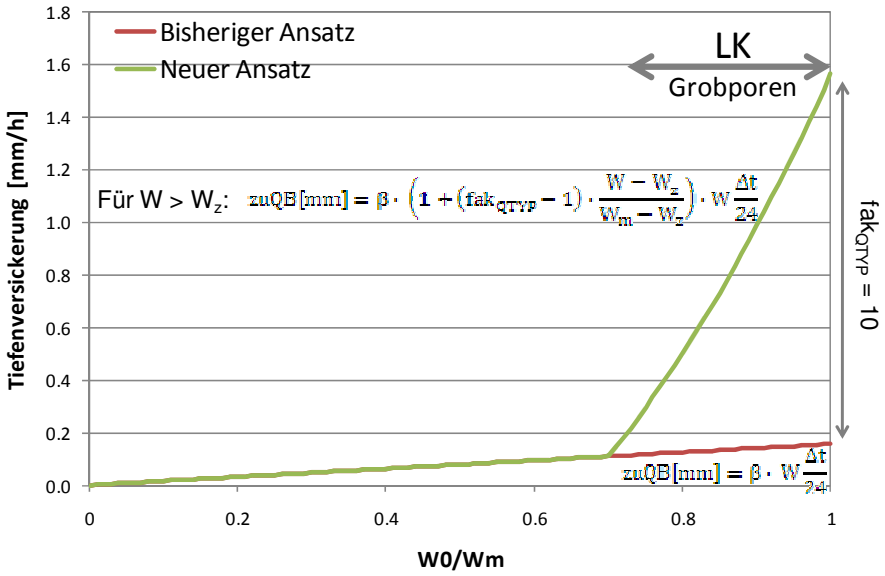

Abb. 7.10. Modifizierte Form der Tiefenversickerung oberhalb von W_Z (Quelle: Haag-Wanka u. Luce (2010), Seite 16)

Aus der Gesamtheit der Änderungen ergeben sich verschiedene Effekte. Der wichtigste Punkt ist, dass das Bodenmodul selbst nun vier Abflusskomponenten generiert und die Aufteilung der Oberflächenabflüsse anhand A2 wegfällt. In Verbindung mit dem dynamischen Basisabfluss ergibt sich so eine vollkommen neue Verteilung der Abflusskomponentenanteile am Gesamtabfluss. Ein größerer Teil der Dynamik wird nun durch den Basisabfluss bereitgestellt, die schnelleren Komponenten werden neu verteilt. Infiltrationsüberschüsse entstehen nur, wenn die Infiltrationskapazität überschritten wird, das nichtlineare Verhalten von A2 wird also durch diesen Ansatz übernommen, allerdings nun in einer dynamischen Form.

Ein großer Nachteil der Methode ist allerdings, dass viel von dem bisherigen Wissen über sensitive Parameterbereiche über Bord geworfen wird. Und es ist schwierig, die nun entstandene Anzahl von Parametern bei der Kalibrierung von neuen Einzugsgebieten zu justieren. In der jetzigen Realisierung werden die Parameter je nach Prozess mit Faktoren skaliert. Dies funktioniert zur Kalibrierung in einer zufriedenstellenden Güte, hat jedoch den Nachteil, dass sich die Abflusskomponentenanteile in unterschiedlichen Gebieten aufgrund dieser Parameter in einer nichtlinearen Weise verändern.

Es liegt also nahe, diesen Ansatz mit dem Konzept von *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* zu kombinieren.

7.6.2 Unterschiedliche Prozesse? Unterschiedliche Modellannahmen!

Ein weiterer Ansatz, der im Rahmen des PUB Symposiums 2012 in Delft von Shervan Gharari (Universität Delft) in Form eines Posters präsentiert wurde, enthält ebenfalls attraktiv erscheinende Ideen, die auf Savenije (2010) zurückgehen. Er basiert auf einer einfachen Einteilung eines Einzugsgebietes in drei Klassen: *wet-*

lands, *hillslopes* und *plateaus*. Die Einteilung erfolgt ebenfalls durch Nutzung von Geodaten, die Klassen werden aus dem Höhenmodell im Wesentlichen anhand der Höhe oberhalb der nächsten Drainage und der Neigung abgeleitet (siehe Gharari u. a. (2011)). Für jede dieser Klassen wird mittels der generischen Modellkomponenten, die in Fenicia u. a. (2011) beschrieben werden, ein Modellansatz kreiert, der den auf diesen Flächen zu erwartenden Prozess abbildet.

Es wird also für jede der Abflussprozessgruppen ein konzeptioneller Modellansatz gewählt, der bereits hinsichtlich seiner Strukturierung geeignet ist, den entsprechenden Prozess abzubilden! Dies hat signifikante Vorteile gegenüber einem Ansatz, der alle Prozessgruppen abdecken soll, dabei aber Limitierungen aufweist, die aus dem allgemeinen Ansatz resultieren.

Es erscheint sinnvoll, die zu erwartenden Publikationen zu diesem Poster abzuwarten, um möglicherweise das Konzept auf LARSIM zu übertragen. Auch hier erfolgt durch die Gruppierung der SOF-, SSF- und DP-Flächen im Wesentlichen die gleiche Einteilung des Einzugsgebietes. SOF-Flächen finden sich, bis auf die SOF3-Flächen, überwiegend in den Auen, den *wetlands*, was in Abbildung 7.11 illustriert wird. SSF-Flächen finden sich überwiegend an den *hillslopes*, den Hängen. Und DP-Flächen finden sich überwiegend auf den *plateaus*, den Hochflächen.

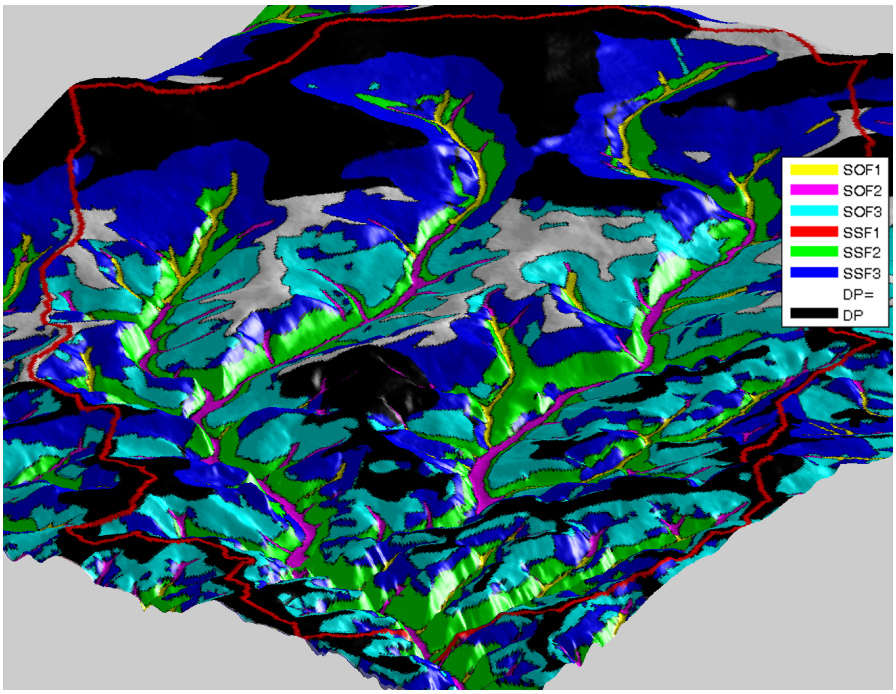

Abb. 7.11. Projektion des überhöht dargestellten Höhenmodells mit darübergelegter Bodenhydrologischer Karte

7.7 Kritische Betrachtung der Gütemaße

Während der Kalibrierung wurden mehrfach Ergebnisse erzielt, die hinsichtlich eines Gütemaßes besonders hohe Bewertungen erhielten. Hinsichtlich der anderen Gütemaße waren diese Realisationen allerdings eher schlecht.

Aus diesen besonders Auffälligen wurde ein Beispiel aus dem Einzugsgebiet Kronweiler ausgewählt und näher untersucht. In Abbildung 7.12 wird dieses Beispiel der letztendlich verwendeten Variante gegenübergestellt. Die in der linken Spalte dargestellten Diagramme zeigen die Ergebnisse eines Parametersatzes, der in einer simulierten Ganglinie mit der Nash-Sutcliffe-Effizienz von 0,89 und einem R^2 von 0,9499 resultiert. Die Effizienz ist sogar höher als bei der homogen parametrisierten Fortran-Variante (0,87) und höher als bei der in der rechten Spalte dargestellten inhomogenen Variante. Hier wurde lediglich eine Nash-Sutcliffe-Effizienz von 0,86 erreicht, R^2 liegt bei 0,9451. Beide Werte sind also schlechter.

Abgesehen davon, dass insbesondere die Aussagekraft der Nash-Sutcliffe-Effizienz immer wieder kontrovers diskutiert wird, wie etwa in Schaefli u. Gupta (2007), würde ein Mensch diese Ganglinie mit der höchsten Effizienz nicht unter allen Umständen auswählen. Werden die zitierten Kriterien angelegt, die im operationellen Betrieb von Bedeutung sind, dann ist diese Variante nicht wirklich gut, da der Niedrigwasserbereich deutlich überschätzt wird, wie in Teil c) zu sehen ist.

Ein Optimierungsalgorithmus, wie etwa der bei hydrologischen Modellen etablierte *Shuffled Complex Evolution*-Algorithmus (siehe Duan u. a. (1993)), würde dies sehr wohl tun. Es erscheint also, zumindest bei diesem Beispiel, kritisch zu sein, lediglich ein Gütemaß zu verwenden. Aus diesen Gründen wurden auch etwas fortgeschrittenere Techniken entwickelt, um diesen Umstand zu verbessern, wie etwa von Herbst u. a. (2009b) publiziert. Dort werden ebenfalls die *Signature Measures* berechnet und dann Selbstorganisierende Merkmalskarten eingesetzt, um diese zu bewerten.

Aber auch ohne diese fortgeschrittenen Techniken wäre es in diesem konkreten Beispiel möglich, eine ganzheitlichere Bewertung durchzuführen: die Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Werte gibt schon ein Indiz auf die Problematik des besten Parametersatzes, sie beträgt nur 0,779, die des ausgewählten Modells ist 0,819 (Fortran homogen 0,75). Ein Blick in die Teile c) und d) der Abbildung 7.12 zeigt es ebenfalls: Das beste Modell überschätzt den Niedrigwasserbereich deutlich, was im entsprechenden Maß $\%BiasFLV$ deutlich sichtbar wird. Werden auch noch die anderen *Signature Measures* in Teil e) und f) miteinbezogen, dann wird auch noch der große Volumenfehler sichtbar.

In Teil a) und b) wird ersichtlich, wie die höheren Werte bei der Nash-Sutcliffe-Effizienz und bei R^2 zustande kommen: Die Abbildung der höchsten Spitzen ist besser. Diese geringeren Differenzen bei hohen Werten wirken sich bei diesen beiden Gütemaßen besonders stark aus: Beim ersten Maß führt es zu kleinen Differenzen im Zähler, die im umgekehrten Fall, wenn die Abweichungen in den Spitzen groß sind, durch die Quadrierung besonders betont werden. Bei R^2 sind die einzelnen Produkte der Stichprobenkovarianz im Zähler groß, wenn beide Werte zum glei-

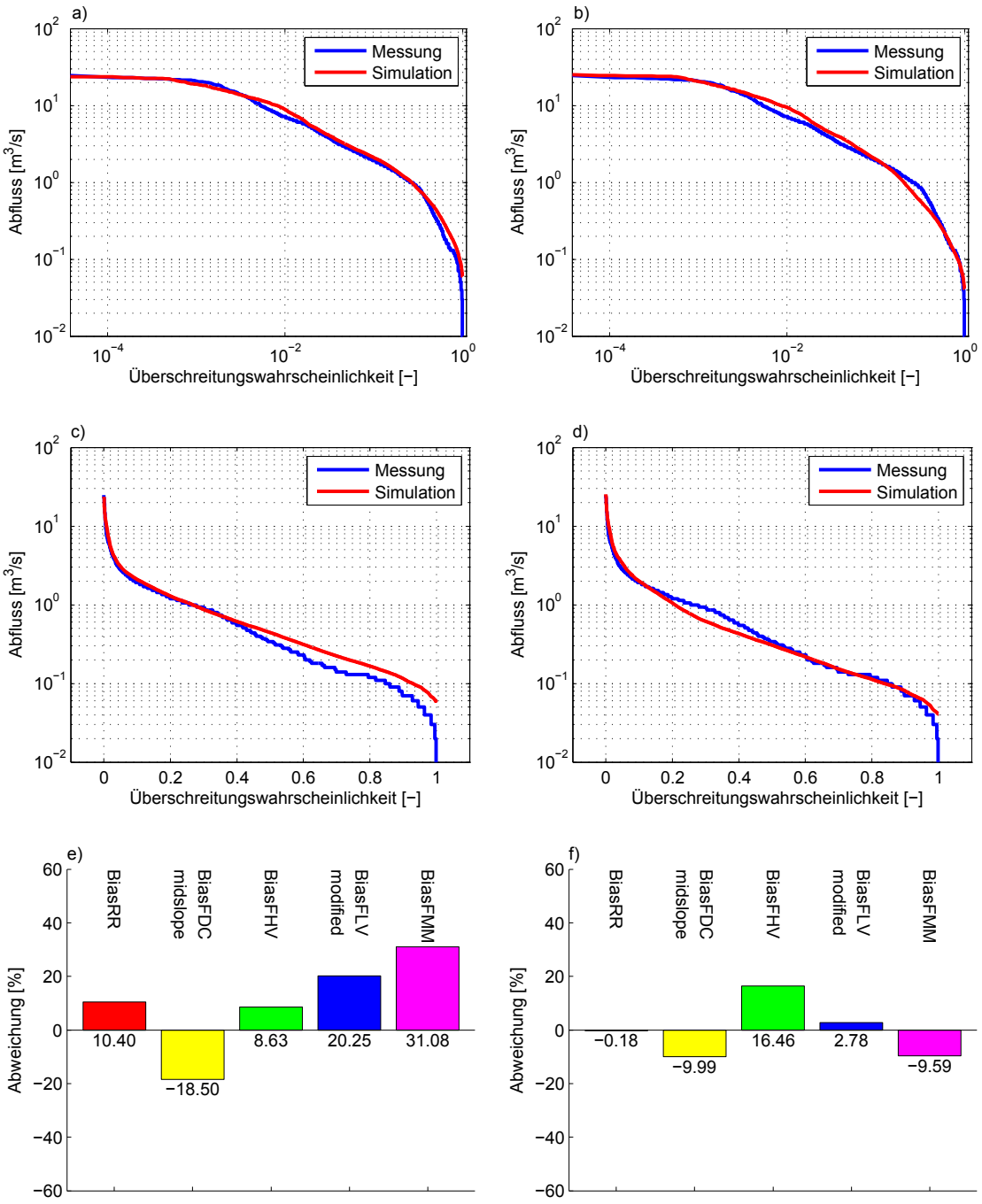

Abb. 7.12. Gegenüberstellung der Simulationsresultate mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen: die linke Spalte ist die hinsichtlich der Nash-Sutcliffe-Effizienz und R^2 beste Variante unter allen Simulationen, die rechte Spalte wurde letztendlich ausgewählt.

chen Zeitpunkt möglichst gleich sind, da die empirischen Mittelwerte natürlich entsprechend niedrig sind.

Folglich erscheint es sinnvoll, eine Gesamtheit von mehreren Gütemaßen zu verwenden, und mit einem Algorithmus zu kombinieren, der die bei der multikriteriellen Optimierung auftretende Pareto-Problematik berücksichtigt, wie etwa der *Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis*-Algorithmus (siehe Vrugt u. a. (2003)).

Werden neben den klassischen Gütemaßen auch noch die *Signature Measures* berücksichtigt, vervollständigt sich das Bild weiter. Aber bei diesen hat sich gezeigt, dass einzelne Maße in bestimmten Situationen unterschiedlich bewertet werden sollten. Das betrifft vor allem die Werte von $\%BiasFHV$ und $\%BiasFDCmidslope$. Bevor diese Probleme und ihre möglichen Ursachen diskutiert werden, sollen aber neben diesen Maßen weitere vorgeschlagen werden. Diese wurden in Herbst u. a. (2009a) definiert und legen den Fokus auf die Abflussspitzen. Sie bewerten das Verhalten dort in einem ähnlichen Ansatz, wie er bereits bei der Kalibrierung von Altenbamberg vorgeschlagen wurde: Der Verlauf sollte bewertet werden. In dem Artikel werden die in Abbildung 7.7 gezeigten Maße definiert, um die Abweichungen in den Abflussspitzen besser zu differenzieren.

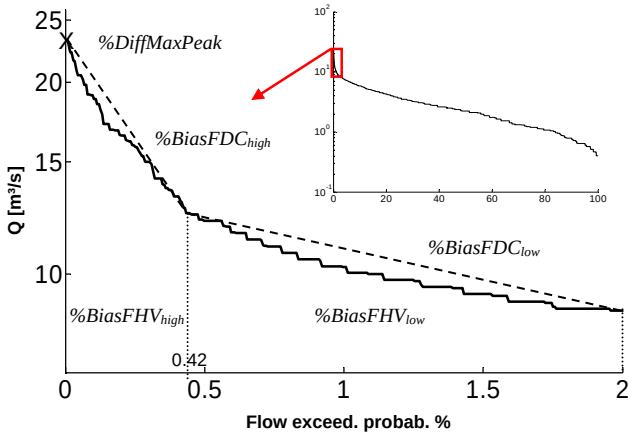

Abb. 7.13. Weitere *Signature Measures* zur differenzierteren Bewertung der Abweichungen in den Abflussspitzen (Quelle: Herbst u. a. (2009a))

All diesen Ansätzen liegt ein grundsätzliches Problem zugrunde: Sie stützen sich auf fest vorgegebene Punkte. Beim Maß $\%BiasFHV$ wird der Abfluss oberhalb der Überschreitungswahrscheinlichkeit 0,02 bewertet. Die Steigung wird anhand der Werte bei den Wahrscheinlichkeiten 0,2 und 0,7 berechnet. Hier in der Abbildung 7.7 sind es ebenfalls konkrete Werte.

Dies kann in vielen Fällen funktionieren. Weist die Abflussdauerlinie aber Eigenheiten auf, wie etwa der mehrfach erwähnte Sprung in Altenbamberg, so kann dies zu Problemen führen. Angenommen, der Sprung liegt knapp neben der Stelle, die in der Abbildung 7.7 als Stützpunkt des Maßes verwendet wird. Ändert sich nun der Stichprobenumfang, also die Länge des betrachteten Zeitfensters, und

gibt es in dem neu hinzugekommenen oder weggefallenen Teil keine ähnlich hohen Ereignisse, dann ändert sich die Position des Sprungs: Es verschiebt sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit, weil diese nur ein empirischer Wert aufgrund der Stichprobe ist. Dies kann im Einzelfall zu größeren Änderungen des Maßes im Vergleich Kalibrierungs- und Validierungzeitraum führen, die nur aufgrund des Umfangs der Stichprobe resultieren.

Ein ähnlicher Effekt ist im geringen Maße in Kellenbach zu beobachten, in einem hohen Maße in Kronweiler. Dort weisen die Abflussdauerlinien Krümmungen auf, die das Modell nicht nachvollziehen kann. Liegen nun die Stützstellen des Maßes zur Bewertung der Steigung ungünstig, wie etwa in Kronweiler, so resultiert dies in unnötig hohen Abweichungen der Steigung, obwohl diese im optischen Vergleich im Mittel eher als stimmig bewertet werden würde. Läge in Kronweiler die Stützstelle allerdings bei 0,3, wäre die berechnete Abweichung sogar noch größer.

Es bietet sich also eine einfache Lösung an: Die Abflussdauerlinie sollte für jedes Gebiet vor Einsatz der *Signature Measures* betrachet werden und die Stützstellen sollten – möglicherweise sogar abhängig vom Zeitfenster – mit Bedacht gewählt werden.

Grundsätzlich erscheint aber eine parametrische Lösung attraktiver. Zur Bewertung der Steigung könnte beispielsweise eine Regressionsgerade durch den mittleren Teil der logarithmierten Werte gelegt werden, deren Steigung ein wenig unempfindlicher gegen diese Krümmungen sein sollte. Aber auch hier muss der Teil, der als mittlerer Teil empfunden wird, manuell für jedes Gebiet festgelegt werden.

8

Schlussfolgerungen und Ausblick

Bevor die Schlussfolgerungen aus den im vorherigen Kapitel diskutierten Themen und den Ergebnissen in Kapitel 6 gezogen werden, sollen im Folgenden zunächst die wesentlichen Ansprüche der Dissertation beschrieben werden:

1. Der Stand der Forschung zum Modell LARSIM, zur Abbildung von Prozessinformation in Modellen und zur Bewertung von Modellen soll dargelegt werden (Kapitel 3).
2. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM soll unter Berücksichtigung der gewählten Optionen in den für die Aufgabenstellung relevanten Teilen vollständig und anschaulich beschrieben werden. Eine solche Beschreibung, in der die Aufteilung des Gebietes in Modellelemente und Kompartimente, die Modellannahmen der relevanten Modellkomponenten und deren Zusammenwirken beschrieben werden, liegt nach dem Kenntnisstand des Autors bisher nicht vor.
3. Die Analyse des Bodenmoduls und seines möglichen Verhaltensraumes durch Anwendung von Monte Carlo-Methoden soll vollständig beschrieben werden.
4. Zur Anpassung der inhomogenen Parameter in neuen Einzugsgebieten sollen die gewünschte Wirkungsweise, die Entwicklung, die Herleitung sowie die Anwendung der dazu neu eingeführten Parameter beschrieben werden.
5. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Modellvarianten sollen detailliert verglichen werden.
6. Es soll verdeutlicht werden, dass das entwickelte Verfahren in Reaktionsmustern des Modells resultiert, die in Einklang mit dem hydrologischen Verständnis der kartierten Prozesse stehen.
7. Es soll vertieft diskutiert werden, welche Einflussfaktoren neben den Modellparametern die Aufteilung in Abflusskomponenten verändern und ob dieser Einfluss dennoch in plausiblen Reaktionsmustern resultiert.

In der Diskussion hat sich hinsichtlich des zuletzt genannten Anspruches gezeigt, dass die resultierenden Anteile von Abflusskomponenten auf unterschiedlichen Kompartimenten und in unterschiedlichen Einzugsgebieten zwar variieren, dass die Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften und den resultierenden Anteilen aber plausibel und sinnvoll sind. Unter dem Gesichtspunkt, dass durch Nutzung der Bodenhydrologischen Karte ein räumliches Muster von Abflusspro-

zessen im Modell erzeugt werden soll, das dem Prozessverständnis entspricht, kann also von einem vollen Erfolg gesprochen werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Kalibrierung mit den beiden neuen Parametern *P_Bilanz* und *P_Dämpfung* im dargestellten Arbeitsfluss unter Nutzung der beschriebenen Hilfsmittel sehr einfach, effizient und effektiv ist. Obwohl der Grad an Inhomogenität im Modell gesteigert wurde, ist die Kalibrierung dennoch einfacher als mit der direkten Justierung der vier Bodenparameter, die stark interagieren.

Es wurde aber auch deutlich, dass ein großer Teil der Einschränkungen aus den Modellannahmen resultiert und über eine Modifikation dieser nachgedacht werden sollte, um die Abflussprozesse besser abbilden zu können. Naheliegende Ansätze hierfür sind das Infiltrationsmodul und der nichtlineare Ansatz bei der Perkolation.

Es konnte lediglich durch die Verwendung der modifizierten Gebietsspeicher eine im Validierungszeitraum deutlich bessere Simulationsgüte erzielt werden. Die Einführung der differenzierten Gebietsspeicher resultiert aber in zusätzlichen Parametern, was im Widerspruch zu der Zielsetzung steht, die Parametrisierung durch die Nutzung der Abflussprozesskarte zu vereinfachen. Auch erscheint es sinnvoll, für wirklich valide Aussaggen weitere Gebiete und längere Zeiträume zu untersuchen.

Die Hoffnung, dass die Methode durch geschachtelte Einzugsgebiete evaluiert werden könnte, hat sich leider nicht bewahrheitet. Hier wäre es sinnvoll, Einzugsgebiete zu suchen, in denen die Prozessverteilung räumlich uneinheitlich ist, wie etwa in Kronweiler, *und* in denen es weitere Pegel gibt.

Für die Zukunft bieten sich aufgrund dieser Schlussfolgerungen die folgenden Arbeitspunkte an:

- Die Methode sollte in weiteren Einzugsgebieten und auch für längere Zeiträume angewendet werden. Es wäre gut, wenn einige dieser Gebiete die Möglichkeit zur Validierung durch weitere Pegel innerhalb des Gebietes böten.
- Während den inhomogenen Monte Carlo-Simulationen wurden die 9 kartierten Prozesse zu 3 Gruppen zusammengefasst. Zu diesem Zeitpunkt war diese Reduktion notwendig, um die Anzahl der zu beprobenden Dimensionen handhabbar zu gestalten. Für die späteren Schritte gibt es aus jetziger Sicht keine Notwendigkeit mehr, diese Einschränkung beizubehalten. Der Soll-Anteil der Oberflächenabflüsse kann kontinuierlicher vorgegeben werden, etwa 85 % für die SOF1-Flächen, 75 % auf SOF2-Flächen und 65 % auf SOF3-Flächen statt im Mittel 75 % auf allen SOF-Flächen.
- Die durchgeführten Arbeitsschritte sollten für ein modifiziertes Modell angewendet werde: der Infiltrationsansatz und die dynamische Perkolation. Dafür kann die bereits bestehende Abfolge an Arbeitsschritten weitestgehend verwendet werden.
- Es bietet sich eine weitere Möglichkeit, die Abbildung der Prozesse in der Fläche zu validieren, indem fernerkundliche Daten genutzt werden, wie es bereits für das obere Rheintal durchgeführt wurde (siehe Casper u. Vohland (2008)).
- Für die objektivere Bewertung der momentan nur subjektiv einschätzbaren Verbesserungen sollten die Methoden, die in Ehret u. Zehe (2011) und Euser

u. a. (2013) beschrieben werden, angewendet werden, um die Ähnlichkeit der Ganglinien besser quantifizieren zu können, bzw. um zu beurteilen, ob die Konsistenz bei der inhomogenen Parametrisierung besser ist als bei der homogenen Parametrisierung.

9

Zusammenfassung

Für das Wasserhaushaltsmodell LARSIM wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die in der Bodenhydrologischen Karte enthaltene Information im Bodenmodul abgebildet werden kann. Vormals war die Parametrisierung dieses Moduls homogen – alle Kompartimente haben den gleichen Parametersatz erhalten –, nun ist sie inhomogen – alle Kompartimente der gleichen Prozessgruppe erhalten unterschiedliche Parametersätze.

Zur Entwicklung dieses Verfahrens wurde das Wasserhaushaltsmodell LARSIM zunächst in der Entwicklungsumgebung MATLAB mit allen im Nahe-Einzugsgebiet verwendeten Optionen implementiert und um Funktionen erweitert, die der Analyse der Modellstruktur und der Visualisierung der Modellzustände dienen.

Mithilfe dieser MATLAB-Implementierung konnte eine umfangreiche Verhaltensanalyse durchgeführt werden, bei der in einer homogenen Variante 12.000 Modellläufe mit unterschiedlichen Parameterproben durchgeführt wurden sowie in einer inhomogenen Variante 60.000 Modellläufe. Anhand der beiden simulierten Elemente wurde eine extrapolierte Ganglinie für das ganze Gebiet Kronweiler berechnet. Sowohl bei der homogenen wie auch bei der inhomogenen Menge von Realisationen war kein Parametersatz dabei, der die Nash-Sutcliffe-Effizienz deutlich steigern konnte. Das Modell zeigte allerdings bei der inhomogenen Parametrisierung im Validierungszeitraum bessere Ergebnisse.

In weiteren Analysen wurden die simulierten Kompartimente auf ihre Abflussprozessbildung und auf die aus den unterschiedlichen Parametersätzen resultierenden Bilanzen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass nur durch Veränderung der Bodenparameter die Bilanz in einem recht großen Intervall skaliert werden kann. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die einzelnen Abflusskomponenten zwar in großen Intervallen skaliert werden können, es aber nicht möglich ist, beliebige Kombinationen gemeinsam mit einer beliebigen Bilanz zu erhalten. Auch wurden bei den Analysen starke Interaktionen der Parameter untereinander festgestellt.

Aus diesen Erkenntnissen resultierend wurden zwei neue Parameter geschaffen: *P_Bilanz* und *P_Dämpfung*. Der erstgenannte Parameter skaliert global den Anteil des Wasserdargebots, der zu Abfluss wird, ohne die Aufteilung in Komponenten zu verändern. Der zweite Parameter verändert die Dämpfung des Modells von einem reaktiven Verhalten hin zu einem stark gedämpften, ohne dabei aber die Bilanz zu ändern. Hinter diesen beiden Parametern verbergen sich Kennfelder, die aus den

Monte Carlo-Simulationen abgeleitet wurden, indem für jede Position im Kennfeld Soll-Anteile berechnet wurden und aus der Menge von Monte Carlo-Realisationen diejenige herausgesucht wurde, die diesen Vorgaben am ehesten entspricht.

Mithilfe der beiden neuen Parameter wurden drei Einzugsgebiete kalibriert: Kronweiler, Kellenbach und Altenbamberg. Es zeigte sich, dass die Parameter in der gewünschten Art und Weise funktionieren, und dass die Kalibrierung mit diesen beiden Parametern sehr einfach und effizient ist.

Zur Abbildung der Prozessintensitäten wurden die Gebietsspeicher in zwei unterschiedlichen Varianten modifiziert. In der ersten Variante wurden fünf Speicher für die Oberflächenabflüsse eingeführt. Diese Variante fehlte aber das nichtlineare Schwellwertverhalten der ursprünglichen Gebietsspeicher durch den Parameter A2. In der zweiten Variante wurden beide Konzepte kombiniert, sodass nun 12 Gebietsspeicher im Modell enthalten sind.

Hinsichtlich der Simulationsgüte ergibt sich eine deutliche Tendenz: Während die inhomogene Variante ohne modifizierte Gebietsspeicher noch keinen Vorteil gegenüber der homogenen Variante aufweist, konnte die inhomogene Variante mit 12 Gebietsspeichern vor allem im Validierungszeitraum deutlich bessere Werte erzielen.

Neben der Simulationsgüte wurden auch die resultierenden Abflusskomponenten mit der homogenen Variante verglichen. Die inhomogene Variante zeigt ein deutlich plausibleres Verhalten der einzelnen Prozessflächen.

Es wurde gezeigt, dass die Anteile der Abflusskomponenten wesentlich von anderen Bodeneigenschaften beeinflußt werden, vornehmlich der nutzbaren Feldkapazität und der Luftkapazität, dass diese Einflüsse aber stets plausibel sind und dennoch in Abflusskomponentenanteilen resultieren, die im Einklang mit dem Prozessverständnis unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften stehen.

Für die weitere Entwicklung wurden Möglichkeiten aufgezeigt, welche die bestehenden Einschränkungen nicht aufweisen: die Nutzung des Infiltrationsmoduls und der dynamischen Perkolation.

Literaturverzeichnis

Bahrenberg u. a. 2010
Bahrenberg, G. ; Giese, E. ; Mevenkamp, N. ; Nipper, J.: *Statistische Methoden in der Geographie Band 1: Univariate und bivariate Statistik*. 5. Auflage. Stuttgart : Borntraeger, 2010

BALTEX 1995
BALTEX: *Baltic Sea Experiment BALTEX*. 1995. – Initial Implementation Plan. International BALTEX Secretariat at the GKSS Research Center, Publication No. 2, Geesthacht

Bárdossy u. Singh 2008
Bárdossy, A. ; Singh, S. K.: Robust estimation of hydrological model parameters. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 12 (2008)

Bertle 1966
Bertle, Frederick A.: Effect of Snow Compaction on Runoff From Rain on Snow. In: *Engineering Monograph* 35 (1966)

Beven u. Binley 1992
Beven, Keith ; Binley, Andrew: The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. In: *Hydrological Processes* 6 (1992)

Bliefernicht u. a. 2008
Bliefernicht, Jan ; Bárdossy, András ; Ebert, Christian: Stochastische Simulation stündlicher Niederschlagsfelder für Extremereignisse an der Freiberger Mulde, dem Oberen Main und der Fränkischen Saale. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52 (2008), Nr. 4, S. 168–172

Boorman u. a. 1995
Boorman, D. B. ; Hollis, J. M. ; Lilly, A.: Hydrology of soil types: a hydrologically based classification of the soils of the United Kingdom / Institute of Hydrology. 1995 (126). – Forschungsbericht

Bremicker u. a. 2011
Bremicker, M. ; Casper, M. C. ; Haag, Ingo: Extrapolationsfähigkeit des Wasserhaushaltsmodell LARSIM auf extreme Abflüsse am Beispiel der Schwarzen Pockau. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 8 (2011), S. 445–451

Bremicker 2000
Bremicker, Manfred: *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrund-*

lagen und Anwendungsbeispiele –. Freiburg i. Br. : Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, 2000 (Freiburger Schriften zur Hydrologie 11)

Bremicker u. a. 2006
Bremicker, Manfred ; Homagk, Peter ; Ludwig, Karl: Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. In: *Wasser-Wirtschaft* 7-8 (2006), S. 46–50

Casper u. a. 2012
Casper, M. C. ; Grigoryan, G. ; Gronz, O. ; Gutjahr, O. ; Heinemann, G. ; Ley, R. ; Rock, A.: Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (2012), 409-421. `http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/409/2012/hess-16-409-2012.html`

Casper u. a. 2009
Casper, M. C. ; Herbst, M. ; Grundmann, J. ; Buchholz, O. ; Bliefernicht, Jan: Einfluss der Niederschlagsvariabilität auf die Simulation extremer Abflüsse in kleinen Einzugsgebieten. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53 (2009), S. 134–139

Casper u. a. 2013
Casper, M. C. ; Reiter, P. ; Gronz, O. ; Gutjahr, O. ; Heinemann, G. ; Wittig, Marlen: Effects of differently interpolated observational precipitation data on hydrological modeling. In: *Geophysical Research Abstracts* 15 (2013)

Casper u. Vohland 2008
Casper, Markus C. ; Vohland, Michael: Validation of a large scale hydrological model with data fields retrieved from reflective and thermal optical remote sensing data – A case study for the Upper Rhine Valley. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 33 (2008), S. 1061–1067

Costa u. a. 2012
Costa, Alexandre C. ; Bronstert, Axel ; Kneis, David: Probabilistic flood forecasting for a mountainous headwater catchment using a nonparametric stochastic dynamic approach. In: *Hydrological Sciences Journal* 57 (2012), Nr. 1

DVWK-Merkblatt 238/1996 1996
Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.): *DVWK-Merkblatt 238/1996 Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen*. Bonn: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., 1996

Dobler u. a. 2004
Dobler, L. ; Hinterding, A. ; Gerlach, N.: *INTERMET Interpolation stündlicher und tagesbasierter meteorologischer Parameter*. 2004. – Bericht des Instituts für Geoinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, unveröffentlicht

Duan u. a. 1993
Duan, Q. Y. ; Gupta, V. K. ; Sorooshian, S.: Shuffled Complex Evoluti-

on Approach for Effective and Efficient Global Minimization. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 76 (1993), Nr. 3

Dunn u. Lilly 2001
Dunn, S. M. ; Lilly, A.: Investigating the relationship between a soils classification and the spatial parameters of a conceptual catchment-scale hydrological model. In: *Journal of Hydrology* 252 (2001)

Dunn u. a. 1998
Dunn, S. M. ; McAlister, E. ; Ferrier, R. C.: Development and application of a distributed catchment-scale hydrological model for the River Ythan, NE Scotland. In: *Hydrological Processes* 12 (1998), Nr. 3

Ebel u. a. 2000
Ebel, M. ; Ludwig, K. ; Richter, K.G.: Mesoskalige Modellierung des Wasserhaushaltes im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 6 (2000), S. 308–312

Ehret u. Zehe 2011
Ehret, U. ; Zehe, E.: Series distance – an intuitive metric to quantify hydrograph similarity in terms of occurrence, amplitude and timing of hydrological events. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci* 15 (2011)

Elpers u. a. 2008
Elpers, Dr. C. ; Hohenrainer, Jochen ; Grosskinsky, Bettina ; Vollmer, Sabine ; Richter, Dr. Karl-Gerd: *Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen für die Landesfläche von Rheinland-Pfalz.* 2008. – Bericht des Ingenieurbüros Dr.-Ing. Karl Ludwig, Karlsruhe im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, unveröffentlicht

Euser u. a. 2013
Euser, T. ; Winsemius, H. C. ; Hrachowitz, M. ; Fenicia, F. ; Uhlenbrook, S. ; Savenije, H. H. G.: A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci* 17 (2013)

Fackel 1997
Fackel, P: *Regionalisierung von Parametern des Wasserhaushaltsmodells LARSIM*, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, Diplomarbeit, 1997

Fenicia u. a. 2011
Fenicia, Fabrizio ; Kavetski, Dmitri ; Savenije, Hubert H. G.: Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. In: *Water Resources Research* 47 (2011)

Gemmar u. a. 2006
Gemmar, P. ; Greving, M. ; Stüber, M.: Verbesserte Hochwasservorhersage durch Korrektur von Niederschlagsvorhersagen. In: *Wasserwirtschaft* 7-8 (2006), S. 42–45

Gharari u. a. 2011
Gharari, S. ; Hrachowitz, M. ; Fenicia, F. ; Savenije, H. H. G.: Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (2011), 3275-3291. `http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3275/2011/hess-15-3275-2011.html`

Güting u. Dieker 2004
Güting, Ralf H. ; Dieker, Stefan: *Datenstrukturen und Algorithmen*. 3. Auflage. Wiesbaden : B. G. Teubner Verlag, 2004

Gutjahr u. Heinemann 2013
Gutjahr, O. ; Heinemann, G.: Comparing precipitation bias correction methods for high-resolution regional climate simulations using COSMO-CLM. In: *Theoretical and Applied Climatology* (2013)

Haag u. Luce 2008
Haag, I. ; Luce, A.: The integrated water balance and water temperature model LARSIM-WT. In: *Hydrological Processes* 22 (2008), Nr. 7

Haag-Wanka u. Luce 2010
Haag-Wanka, Ingo ; Luce, Annette: *Integration des Abflusspotenzials in das LARSIM-Bodenmodul mit erweiterten Parametern*. 2010. – Bericht der HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, unveröffentlicht

Haußer u. Luchko 2011
Hausser, Frank ; Luchko, Yury: *Mathematische Modellierung mit MATLAB*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2011

Herbst u. a. 2009a
Herbst, M. ; Casper, M. C. ; Grundmann, J. ; Buchholz, O.: Comparative analysis of model behaviour for flood prediction purposes. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009), S. 373–392

Herbst u. a. 2009b
Herbst, M. ; V., Gupta H. ; Casper, M. C.: Mapping model behaviour using Self-Organizing Maps. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (2009), 395-409. `http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/395/2009/hess-13-395-2009.html`

Herman u. a. 2013
Herman, J. D. ; Kollat, J. B. ; Reed, P. M. ; Wagener, T.: Technical Note: Method of Morris effectively reduces the computational demands of global sensitivity analysis for distributed watershed models. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (2013), Nr. 7, 2893–2903. `http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2893-2013`. – DOI 10.5194/hess–17–2893–2013

Hinterding 2002
Hinterding, Angela: *Entwicklung hybrider Interpolationsverfahren für den automatisierten Betrieb am Beispiel meteorologischer Grössen*, Institut für Geoinformatik, Universität Münster, Diss., 2002

Hluchy u. a. 2001
Hluchy, L. ; Froehlich, D. ; Tran, V. D. ; Astalos, J. ; Dobrucky, M. ; Nguyen, G. T.: Parallel Numerical Solution for Flood Modeling Systems. In: *Parallel Processing and Applied Mathematics*, 2001, S. 485–492

Hümann u. Müller 2013
Hümann, Marco ; Müller, Christoph: Improving the GIS-DRP Approach

by Means of Delineating Runoff Characteristics with New Discharge Relevant Parameters. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2 (2013)

Johst u. Demuth 2013
Johst, Margret ; Demuth, Norbert: Simulation von Siedlungsflächenabfluss und Schwellenwertsystemen im LARSIM-Wasserhaushaltsmodell für Rheinland-Pfalz. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 33.13 (2013), S. 121–129

Julich u. a. 2012
Julich, S. ; Breuer, L. ; Frede, H.-G.: Integrating heterogeneous landscape characteristics into watershed scale modelling. In: *Advances in Geosciences* 31 (2012)

Kim 2002
Kim, Jung-Sook: Distributed Genetic Algorithm with Multiple Populations Using Multi-agent. In: *High Performance Computing*, 2002, S. 329–334

Klemeš 1986
Klemeš, V.: Operational testing of hydrological simulation models. In: *Hydrological Sciences Journal* 31 (1986), Nr. 1

Knauf 1980
Knauf, D.: Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke. In: *Schriftenreihe des DVWK* 46 (1980). `http://wiki.bluemodel.org/index.php/File:Knauf_1980_Schnee.pdf`

Krause u. a. 2005
Krause, P. ; Boyle, D. P. ; Bäse, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: *Advances in Geosciences* 5 (2005)

Krumm 2011
Krumm, Julia: *Model-based Analysis and Prediction of Groundwater Recharge Using LARSIM and HYDRUS-1D*, Technische Universität Dresden und HYDRON GmbH Karlsruhe, Diplomarbeit, 2011

Krumm u. Haag 2012
Krumm, Julia ; Haag, Ingo: *Modellgestützte Analyse und Prognose von Grundwasserneubildung und Bodenwasserhaushalt mit LARSIM und HYDRUS-1D*. 2012. – Vortrag LARSIM-Anwenderworkshop, verfügbar unter `http://larsim.sourceforge.net/`

LARSIM Online-Hilfe
LARSIM Online-Hilfe. `http://larsim.sourceforge.net/`. – Auftraggeber: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Amt der Vorarlberger Landesregierung, Release 10 (Revision 64), Stand 05.05.2011

Legates u. McCabe Jr. 1999
Legates, David R. ; McCabe Jr., Gregory J.: Evaluating the use of "goodness-of-fit"Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. In: *Water Resources Research* 35 (1999)

Ludwig 1982
Ludwig, Karl: The Program System FGMOD for Calculation of Runoff Processes in River Basins. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* (1982), S. 25–37

Ludwig u. Bremicker 2006
Ludwig, Karl ; Bremicker, Manfred: *The water balance model LARSIM - Design, Content and Applications*. Freiburg i. Br. : Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, 2006 (Freiburger Schriften zur Hydrologie 22)

Ludwig u. a. 2010
Ludwig, Karl ; Moretti, Greta ; Verzano, Kerstin: Effects of different infiltration models on the simulation of extreme events in headwater catchments. In: *HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG* 54 (2010), Oktober, Nr. 5, S. 279–292. – ISSN 1439–1783

LUWG 2005
Hydrologischer Atlas Rheinland-Pfalz. Mainz : Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, 2005 `http://www.luwg.rlp.de/Service/Downloads/Wasserwirtschaft/Hydrologischer-Atlas/`

Ly u. a. 2011
Ly, S. ; Charles, C. ; Degré, A.: Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (2011), 2259-2274. `http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/2259/2011/hess-15-2259-2011.html`

Handbuch der Parallel Computing Toolbox 2013
The MathWorks, Inc (Hrsg.): *Parallel Computing Toolbox*. `http://www.mathworks.de/de/help/distcomp/index.html`: The MathWorks, Inc, 2013. – Release 2013a (8.1)

McCuen u. a. 2006
McCuen, R. H. ; Knight, Z. ; B., Cutter A.: Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. In: *Journal of Hydrologic Engineering* 11 (2006), Nr. 6

McKay u. a. 1979
McKay, M. D. ; Beckman, R. J. ; Conover, W. J.: A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. In: *Technometrics* 21 (1979), S. 239–245

Moriasi u. a. 2007
Moriasi, D. N. ; Arnold, J. G. ; Van Liew, M. W. ; Bingner, R. L. ; Harmel, R. D. ; Veith, T. L.: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. In: *Transactions of the ASABE* 50 (2007), Nr. 3

MULEWF 2013
Pegelsteckbriefe. Mainz : Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten, Rheinland-Pfalz, 2013 `http://213.139.159.99/servlet/is/490/`. – abgerufen am 2. Juli 2013

Müller u. a. 2009
Müller, C. ; Hellebrand, H. ; Seeger, M. ; Schobel, S.: Identification

and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (2009)

Nash u. Sutcliffe 1970

Nash, J.E. ; Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. In: *Journal of Hydrology* 10 (1970), Nr. 3

Pfister u. Treis 2010

Pfister, Angela ; Treis, Adrian: Starkniederschlag im Emscher- und Lippegebiet – Extremereignis im Juli 2008. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 28.10 (2010), S. 27–38

Rauthe u. a. 2013

Rauthe, M. ; Steiner, H. ; Riediger, U. ; Mazurkiewicz, A. ; A., Gratzki: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). In: *Meteorologische Zeitschrift* (2013). – submitted

Savenije 2010

Savenije, H. H. G.: HESS Opinions "Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)". In: *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (2010), 2681-2692. `http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/2681/2010/hess-14-2681-2010.html`

Schaefli u. Gupta 2007

Schaefli, Bettina ; Gupta, Hoshin V.: Do Nash values have value? In: *Hydrological Processes* 21 (2007)

Scherrer 2006

Scherrer, Simon: Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. In: *Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Bericht* 18/2006 (2006). `http://www.scherrer-hydrol.ch/pdf/scherrer/luwg_bericht_18-2006_ansicht.pdf`

Schmocker-Fackel u. a. 2007

Schmocker-Fackel, P. ; Naef, F. ; Scherrer, S.: Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (2007), S. 891–906

Schmocker-Fackel 2004

Schmocker-Fackel, Petra: *A Method to Delineate Runoff Processes in a Catchment and its Implications for Runoff Simulations*, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Diss., 2004

Schneider u. a. 2007

Schneider, M. K. ; Brunner, F. ; Hollis, J. M. ; Stamm, C.: Towards a hydrological classification of European soils: preliminary test of its predictive power for the base flow index using river discharge data. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (2007), S. 1501–1513

Song u. a. 2013

Song, Xiao-meng ; Kong, Fan-zhe ; Zhan, Che-sheng ; Han, Ji-wei ; Zhang, Xin-hua: Parameter identification and global sensitivity analysis of Xin'anjiang

model using meta-modeling approach. In: *Water Science and Engineering* 6 (2013)

Stahl 2012
Stahl, Natalie: *Höhendifferenzierung der Teilgebiete im LARSIM WHM für die Schneemodellierung.* 2012. – Vortrag LARSIM-Anwenderworkshop, verfügbar unter `http://larsim.sourceforge.net/`

Steinrücken u. Behrens 2010
Steinrücken, U. ; Behrens, T.: Bodenhydrologische Karte. In: *Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Bericht* 6/2010 (2010)

Tetzlaff u. Uhlenbrook 2005
Tetzlaff, D. ; Uhlenbrook, D.: Significance of spatial variability in precipitation for process-oriented modelling: results from two nested catchments using radar and ground station data. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci* 9 (2005)

Todini 1996
Todini, Ezio: The ARNO rainfall-runoff model. In: *Journal of Hydrology* 12 (1996), S. 100–103

Vrugt u. a. 2003
Vrugt, Jasper A. ; Gupta, Hoshin V. ; Bastidas, Luis A. ; Bouten, Willem ; Sorooshian, Soroosh: Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. In: *Water Resources Research* 39 (2003), Nr. 8

Wagener u. a. 2003
Wagener, T. ; McIntyre, N. ; Lees, M. J. ; Wheater, H. S. ; Gupta, H. V.: Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: Dynamic identifiability analysis. In: *Hydrological Processes* 17 (2003)

Wagener u. a. 2001
Wagener, Thorsten ; Boyle, Douglas P. ; Lees, Matthew J. ; Wheater, Howard S. ; Gupta, Hoshin V. ; Sorooshian, Soroosh: A framework for development and application of hydrological models. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 5 (2001)

Wagener u. Wheater 2006
Wagener, Thorsten ; Wheater, Howard S.: Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. In: *Journal of Hydrology* 320 (2006)

Weglarczyk 1998
Weglarczyk, Stanislaw: The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. In: *Journal of Hydrology* 206 (1998)

Williams 1969
Williams, J. R.: Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. In: *Transactions of the ASAE* 175 (1969), S. 339–382

Wittig 2013
Wittig, Marlen C.: *Skalen- und BIAS-Korrektureffekte auf das Kli-*

maänderungssignal in einem Wasserhaushaltsmodell, Universität Trier, Diplomarbeit, 2013

Wolf-Schumann u. a. 2013
Wolf-Schumann, Ulrich ; Lingemann, Imke ; Hunger, Martin ; Buchholz, Oliver ; Dorp, Manfred ; Elpers, Christian ; Hellbach, Christian ; Klein, Bastian ; Krahe, Peter ; Krauter, Gerhard ; Richter, Karl-Gerd ; Vollmer, Sabine: LARSIM-ME: Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells Mitteleuropa. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 33.13 (2013), S. 67–75

Yilmaz u. a. 2008
Yilmaz, Koray K. ; Gupta, Hoshin V. ; Wagener, Thorsten: A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. In: *Water Resources Research* 44 (2008), Nr. 9

Zhao 1977
Zhao, Ren-Jun: Flood forecasting method for humid regions of China. In: *East China Institute of Hydraulic Engineering, Nanjing, China* (1977)

Zhao 1992
Zhao, Ren-Jun: The Xinanjiang model applied in China. In: *Journal of Hydrology* 135 (1992), S. 371–381

Sachverzeichnis

D_{max}, 28
D_{min}, 28
Q_B, 30
Q_{D2}, 30
Q_D, 30
Q_I, 30
β, 29
b, 25
r_dmax, 28
r_dmin, 28
%BiasFDCmidslope, 58
%BiasFHV, 58
%BiasFLV, 58
%BiasFLVmodified, 59
%BiasFMM, 59
%BiasRR, 58

A2, 30
Abflussdauerlinie, 57
Abflusskomponente
  Q_B, 30
  Q_{D2}, 30
  Q_D, 30
  Q_I, 30
Altenbamberg, 66
Auflösung, 21

Bestimmtheitsmaß, 56
Beta, 29
BiasFDCmidslope, 58
BiasFHV, 58
BiasFLV, 58
BiasFLVmodified, 59
BiasFMM, 59
BiasRR, 58
Bilanz, 58
Bodenhydrologische Karte, 36

Deep Percolation, 38
DP, 38
DP=, 38
dv/dQ-Beziehung, 24

Eingangsdaten, 21, **31**
Einzellinearspeicher, 29
Element, 16
Evapotranspiration, 23

Flood Routing, 23
Flow Duration Curve, 57

Gütemaße, 55
Gebietsspeicher, 29
Gebietsstruktur, 51
Gesättigter Oberflächenabfluss, 37

Hydrotop, 20

InterMet, **31**, 127
Interzeption, 21

Kalibrierung
  Altenbamberg, 107
  Kellenbach, 96
  Kronweiler, 105
Kellenbach, 67
KG-Faktor, 125
Kompartiment, 17
Kopfeinzugsgebiet, 64

Kronweiler, 68

Mögliche Verdunstung, 23
Maßzahl, 55

Nash-Sutcliffe-Effizienz, 56
NSE, 56
Nullelement, 17

Parameter
  D_{max}, 28
  D_{min}, 28
  β, 29
  b, 25
  r_dmax, 28
  r_dmin, 28
  A2, 30
Potentielle Verdunstung, 23

Quellgebiet, 16

R^2, 56
REGNIE, 127

Saturated Overland Flow, 37
Schneemodul, 21
Schrittweite, 21
Signature Measures, 57
SOF, 37
SSF, 37
Subsurface flow, 37

Teileinzugsgebiet, 16
Tiefenversickerung, 38

Validierung
  Altenbamberg, 115
  Kellenbach, 114
  Kronweiler, 112
Visualisierung, 53

Wasserdargebot, 23
Wellenablauf, 23
Wiederversickerung, 20

Xinanjiang-Ansatz, 23

Zeitliche Auflösung, 21
Zwischeneinzugsgebiet, 64

A

Details zu den verwendeten Einzugsgebieten

Auf den folgenden Seiten werden Abbildungen zu den Einzugsgebieten Altenbamberg, Kellenbach und Kronweiler gezeigt, welche die Verteilungen der

- Landnutzungen und
- Abflussprozesse

aller Elemente beinhalten.

A.1 Altenbamberg

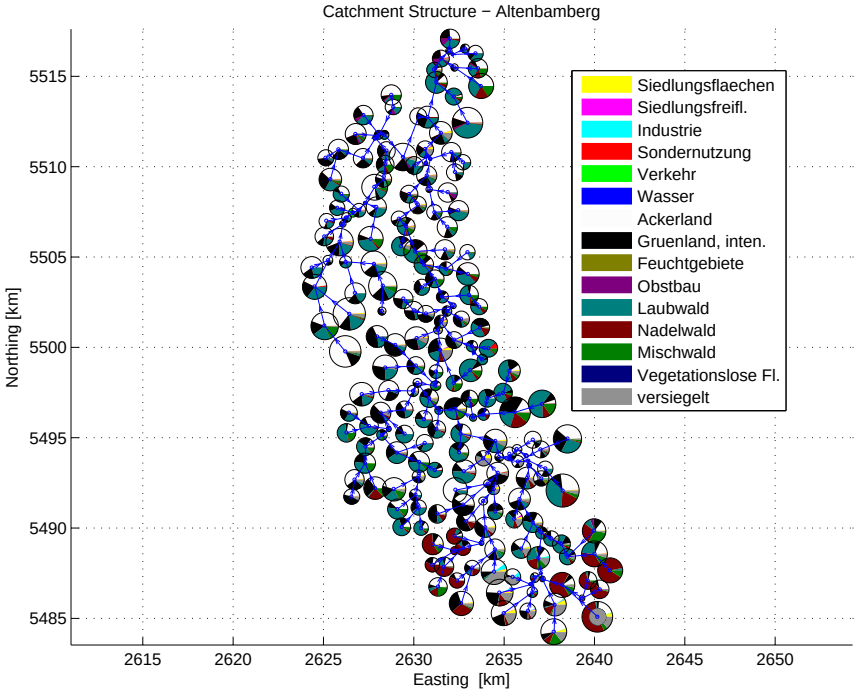

Abb. A.1. Verteilung der Landnutzungen im Einzugsgebiet Altenbamberg

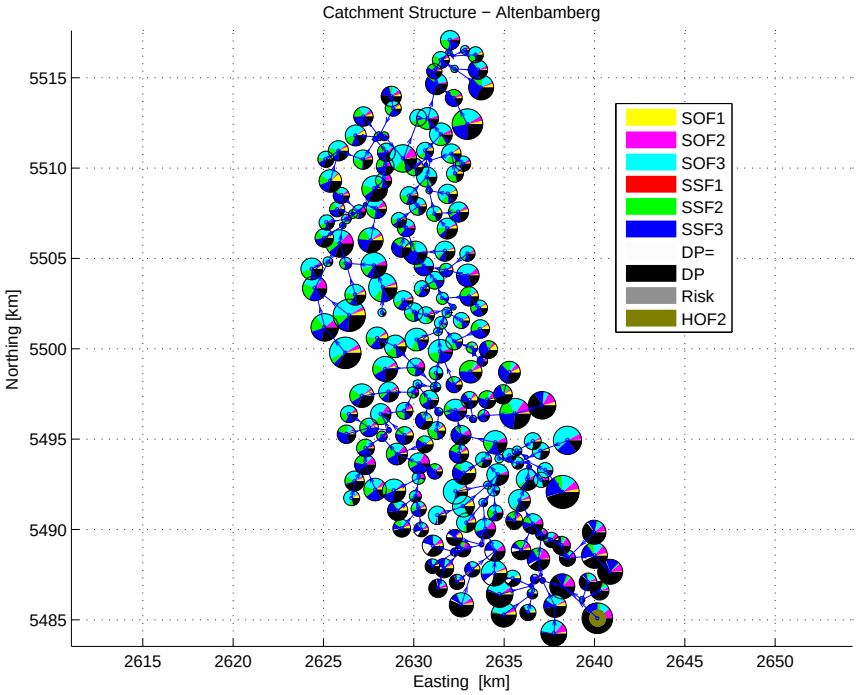

Abb. A.2. Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Altenbamberg

A.2 Kellenbach

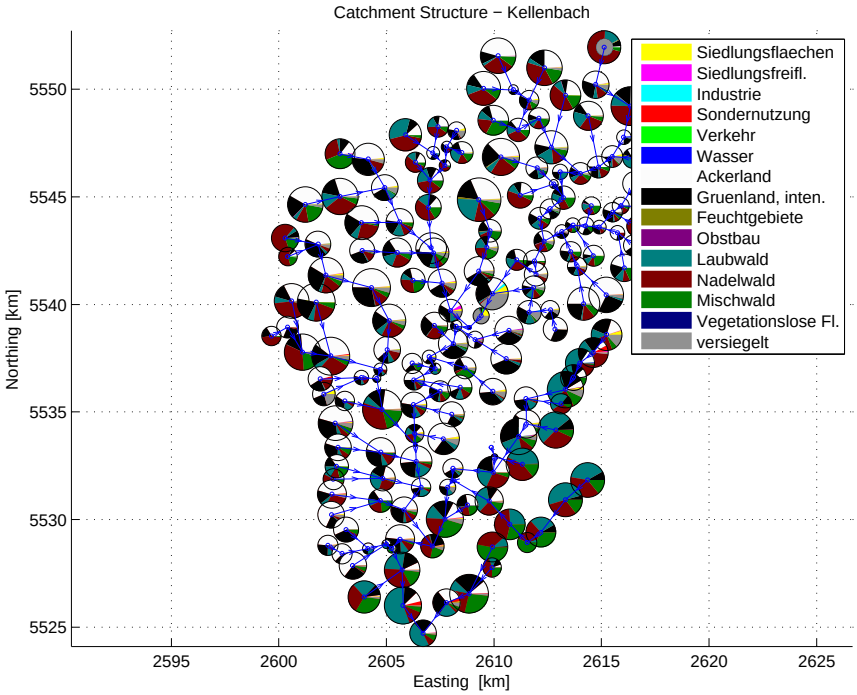

Abb. A.3. Verteilung der Landnutzungen im Einzugsgebiet Kellenbach

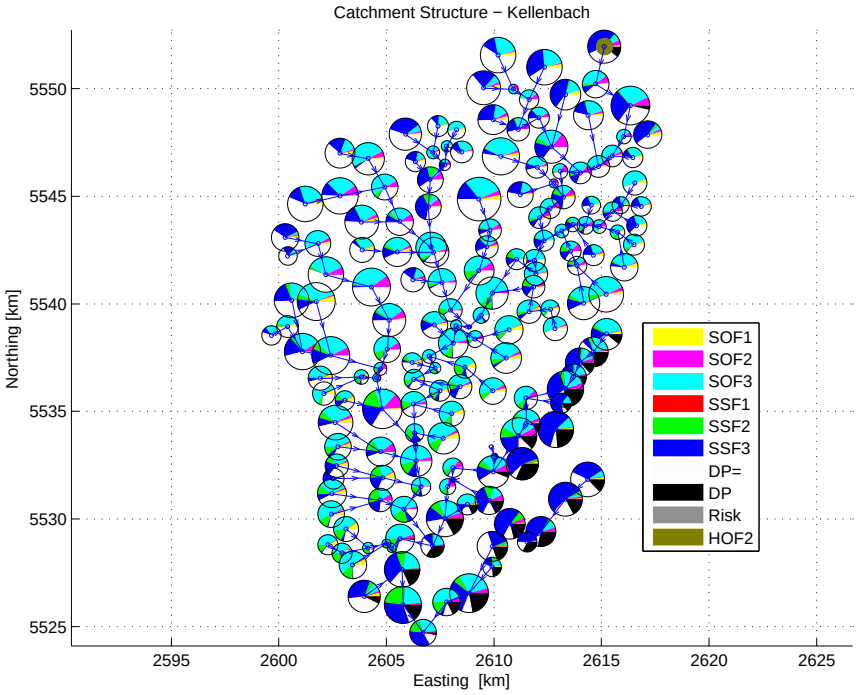

Abb. A.4. Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Kellenbach

A.3 Kronweiler

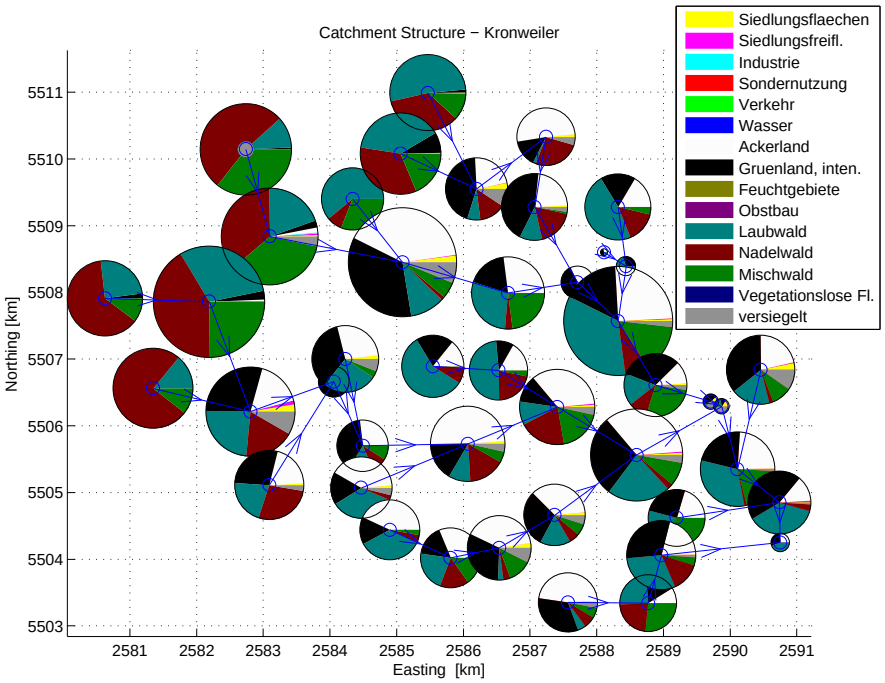

Abb. A.5. Verteilung der Landnutzungen im Einzugsgebiet Kronweiler

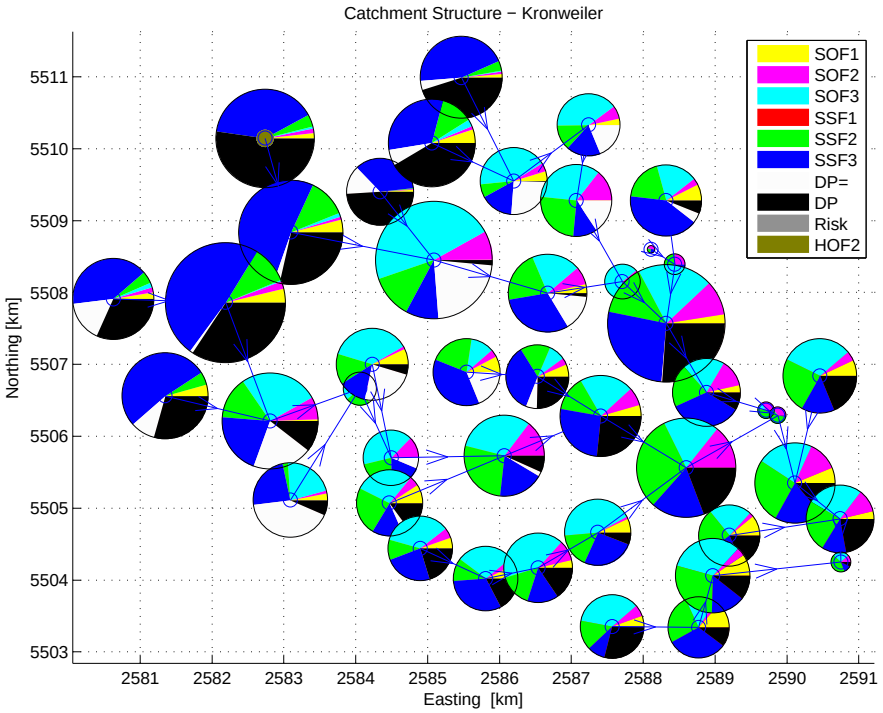

Abb. A.6. Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Kronweiler

B

Simulationsergebnisse

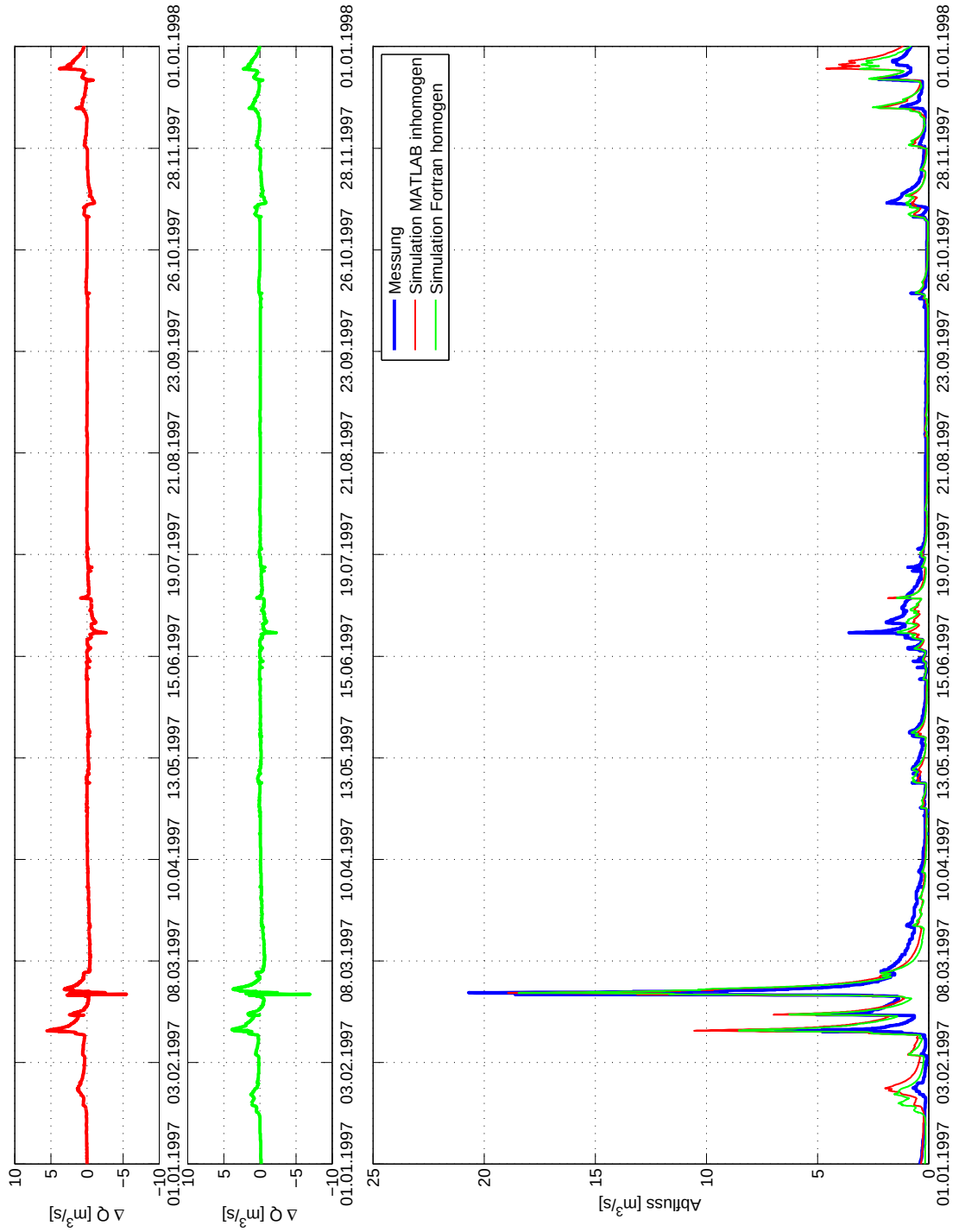

Abb. B.1. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **1997 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

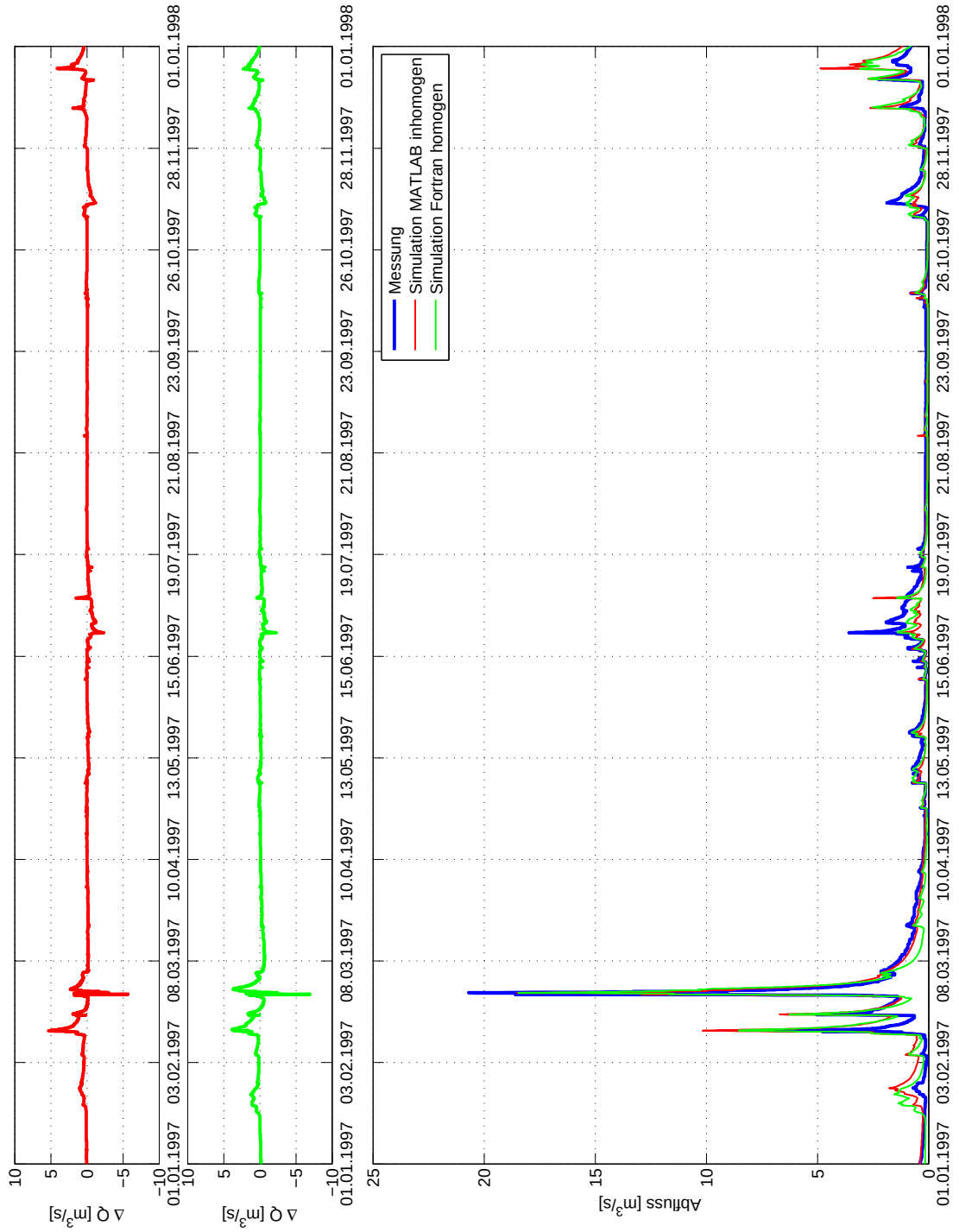

Abb. B.2. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **1997 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

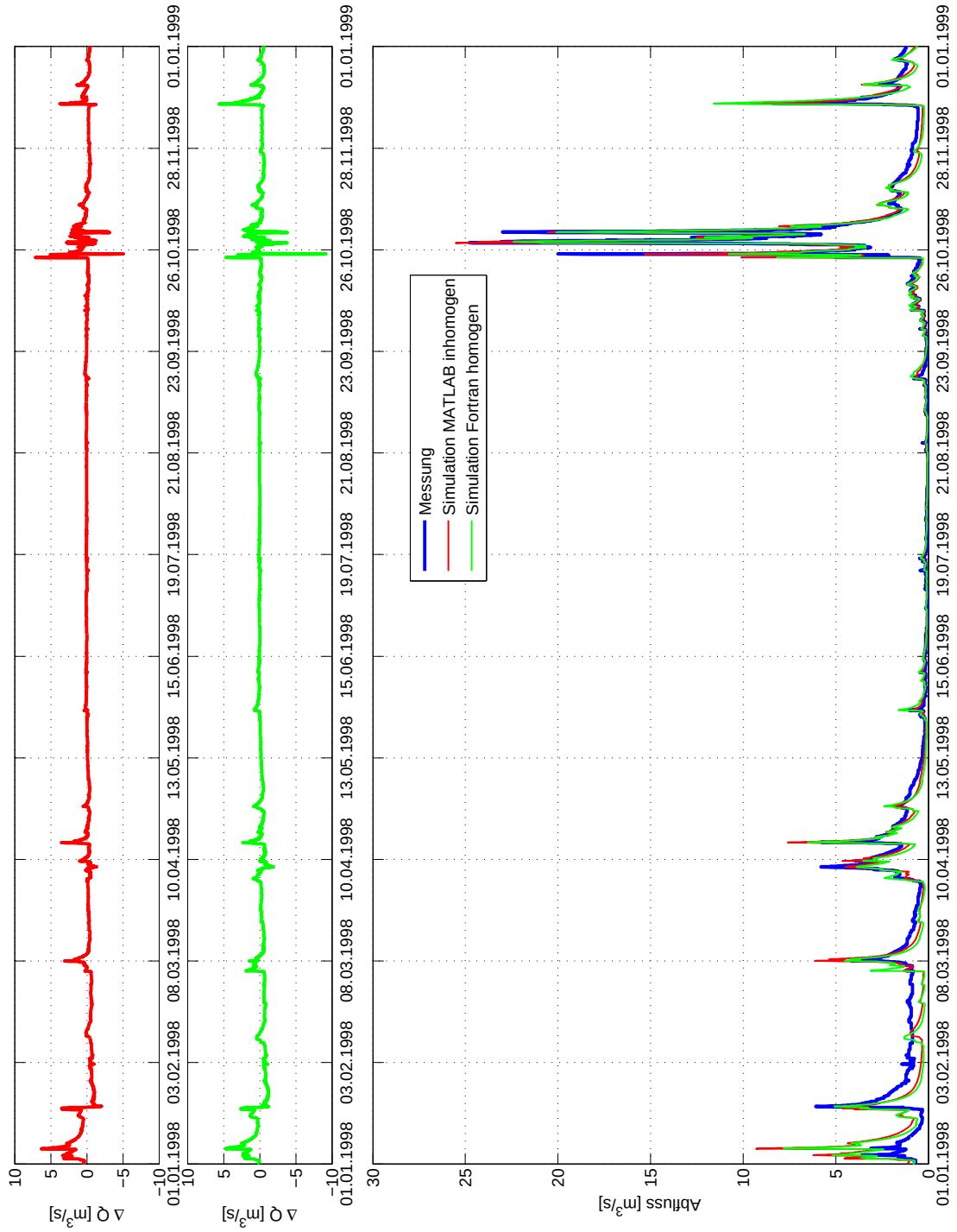

Abb. B.3. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **1998 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

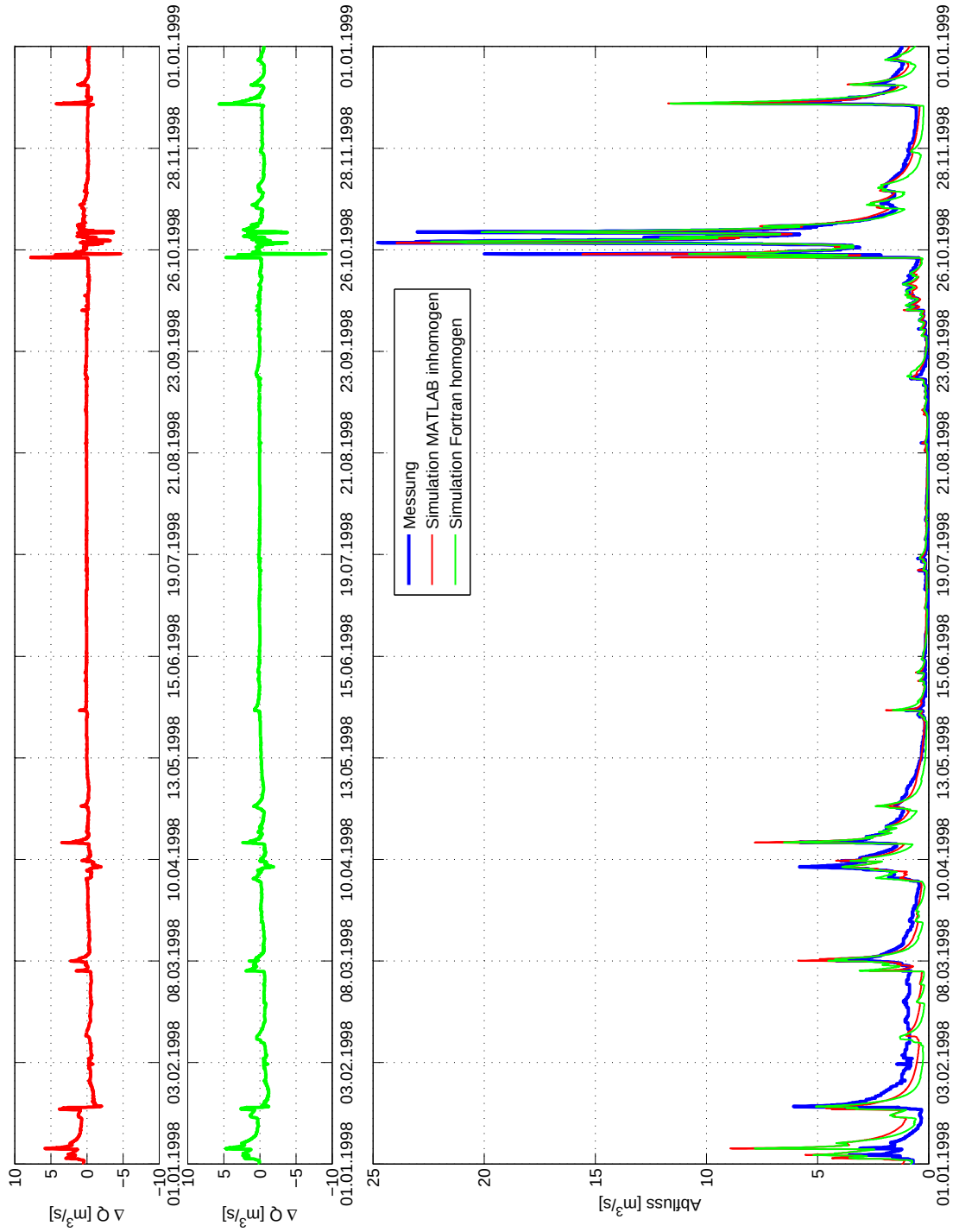

Abb. B.4. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **1998 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

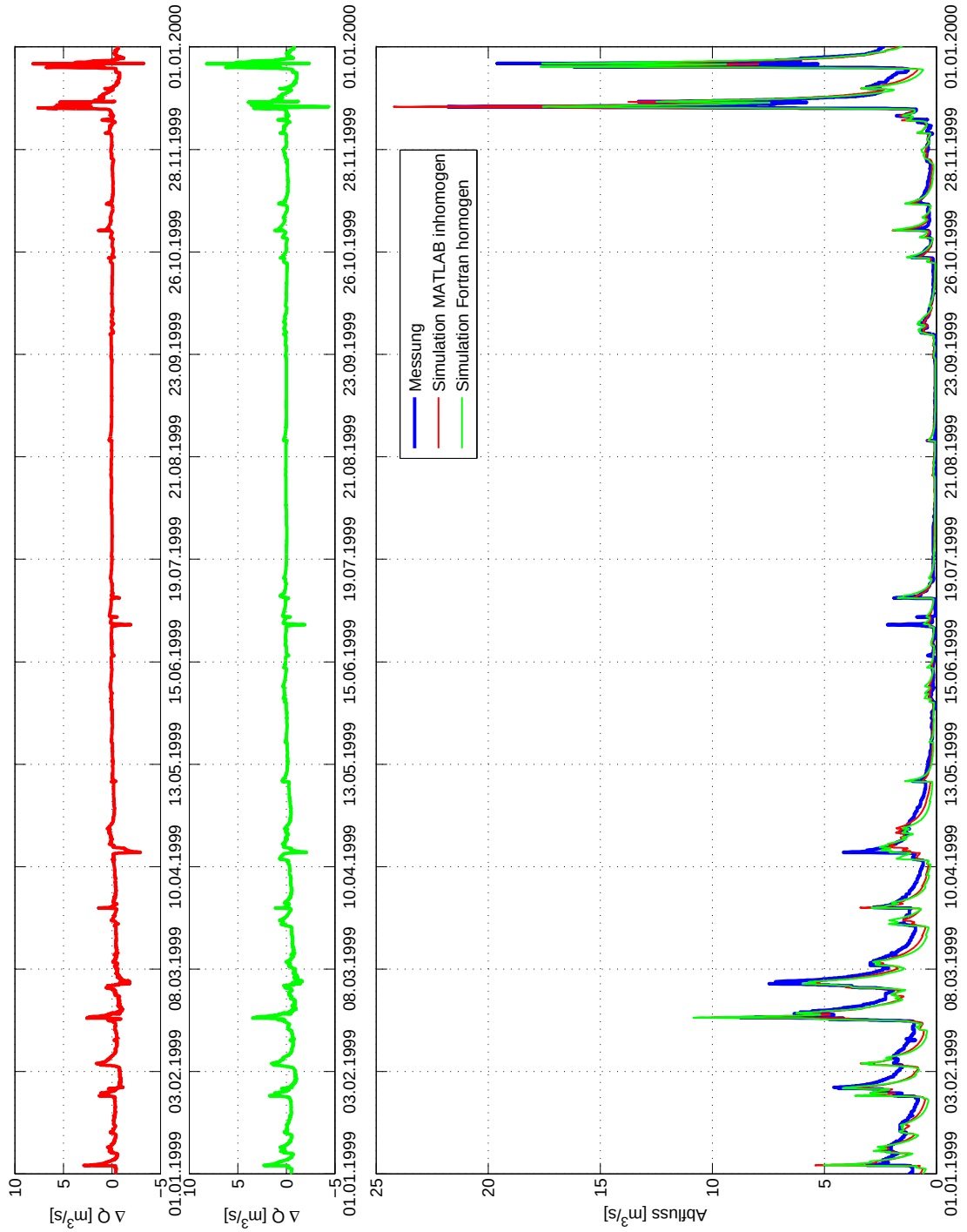

Abb. B.5. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **1999 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

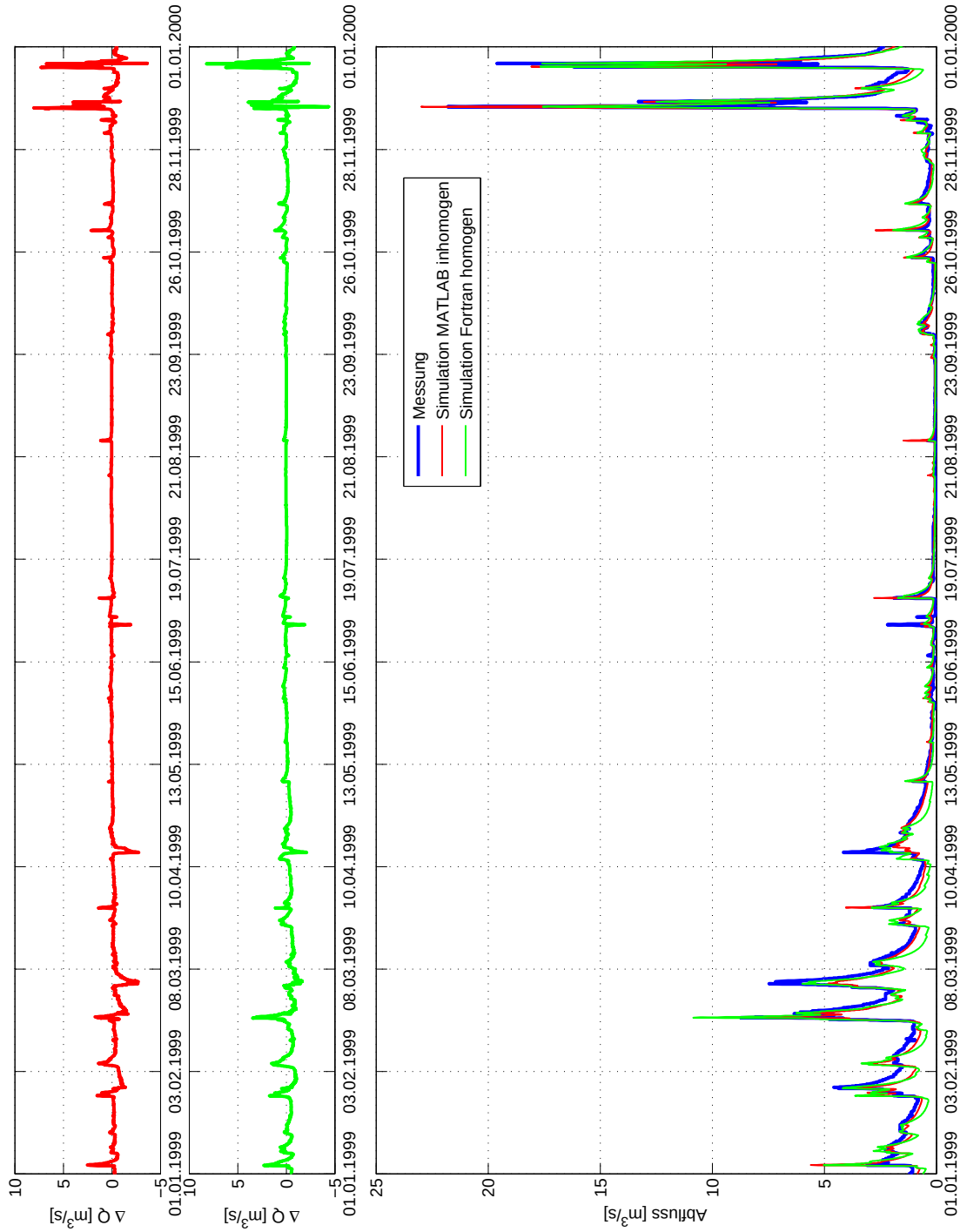

Abb. B.6. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **1999 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

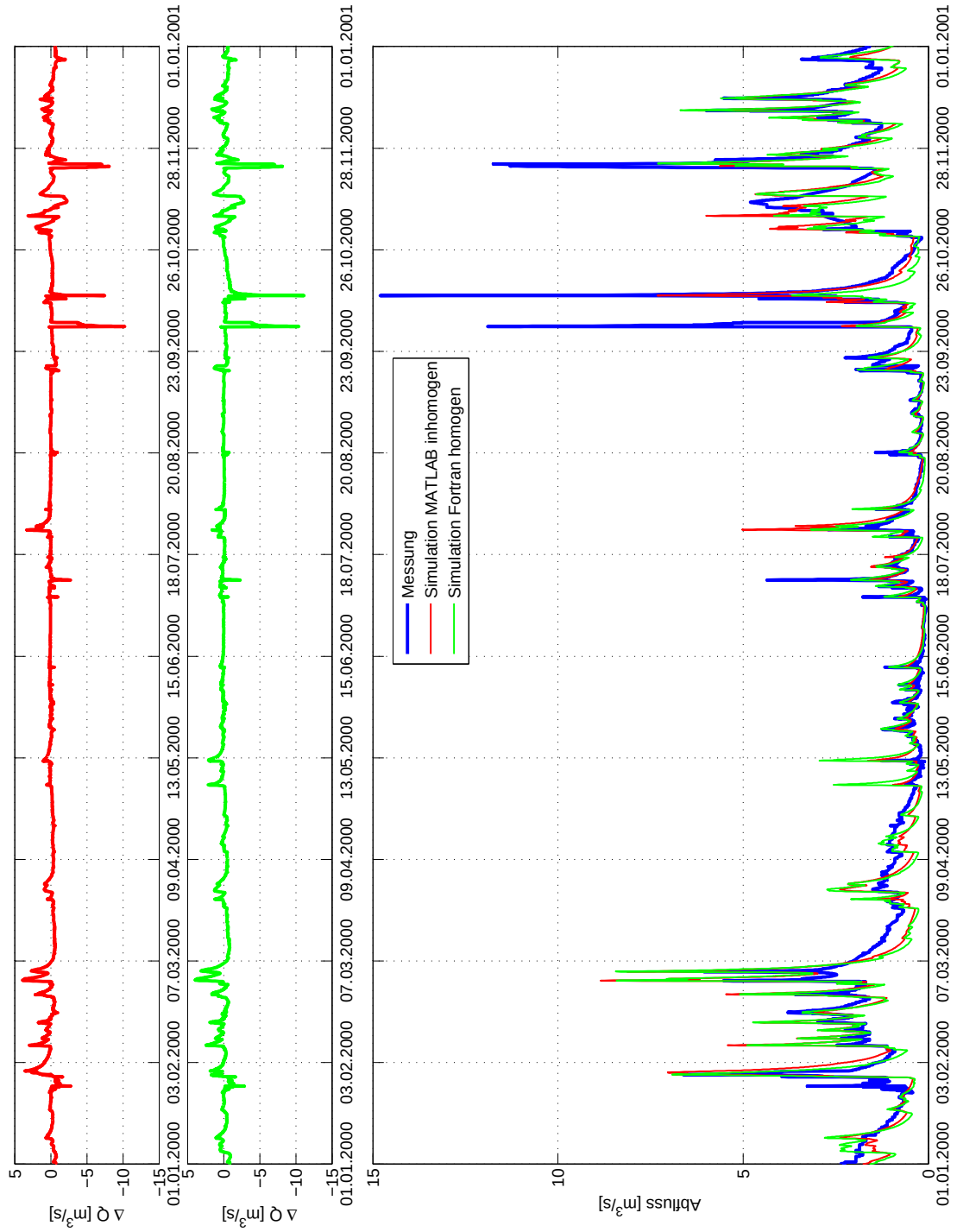

Abb. B.7. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2000 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

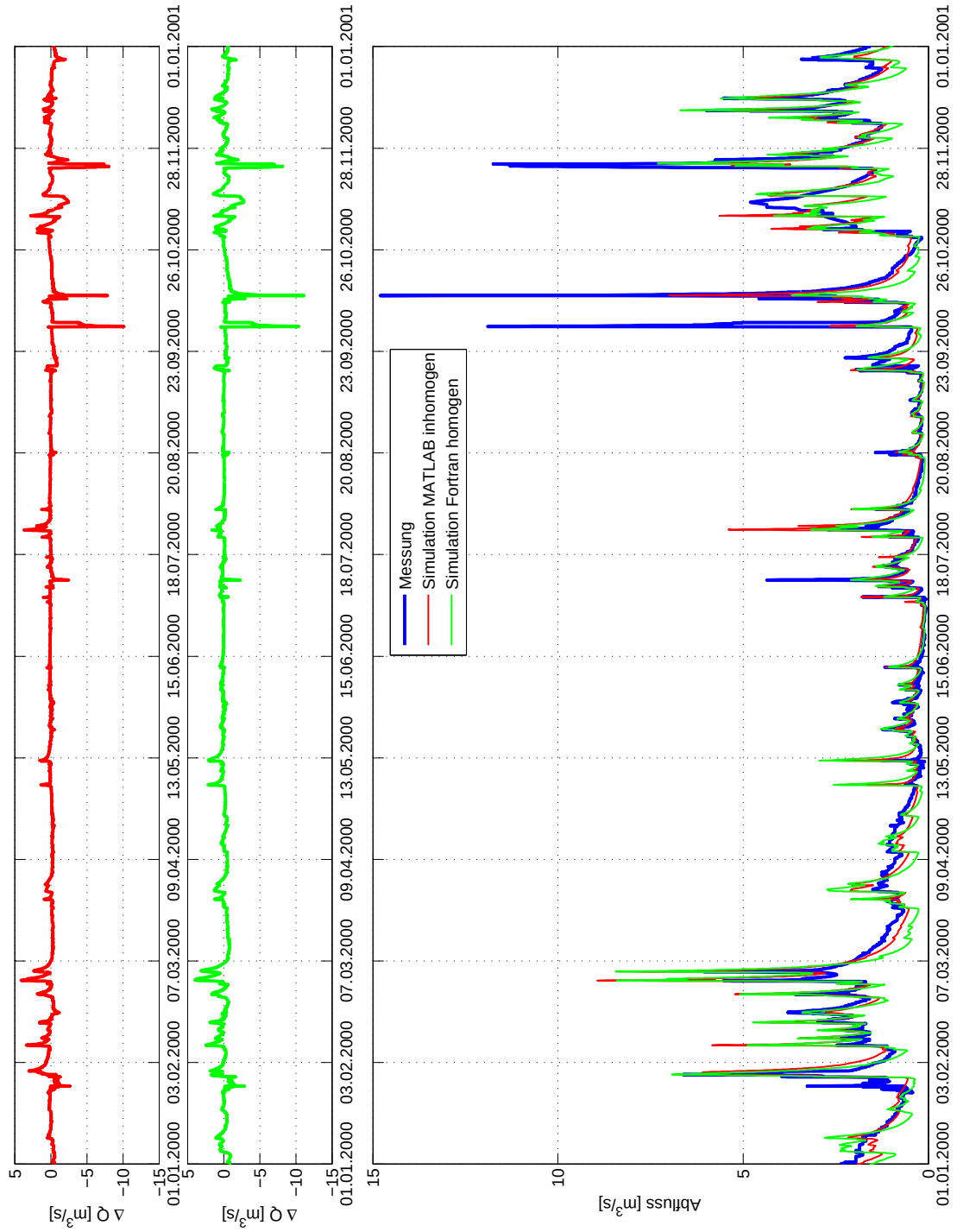

Abb. B.8. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2000 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

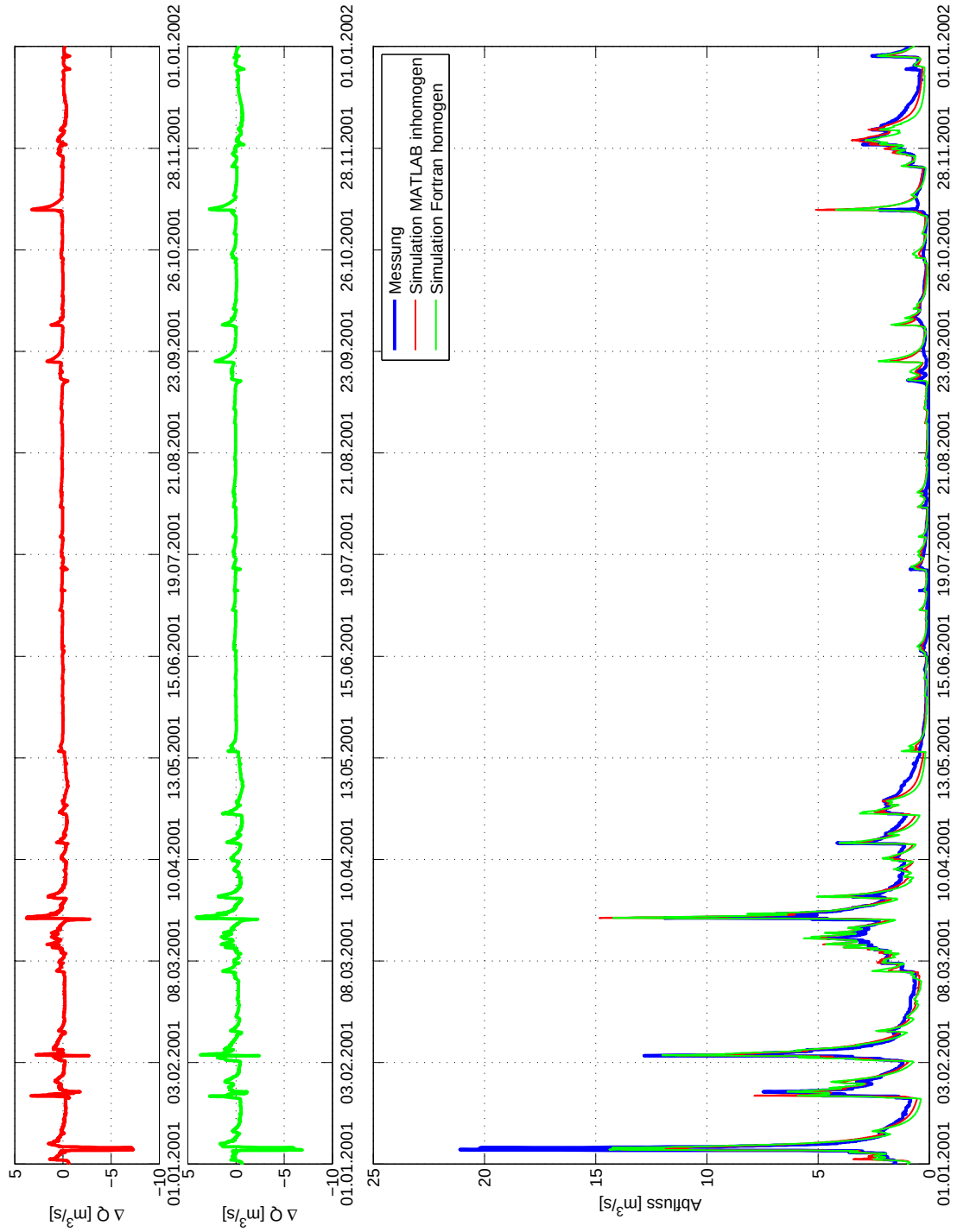

Abb. B.9. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2001 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

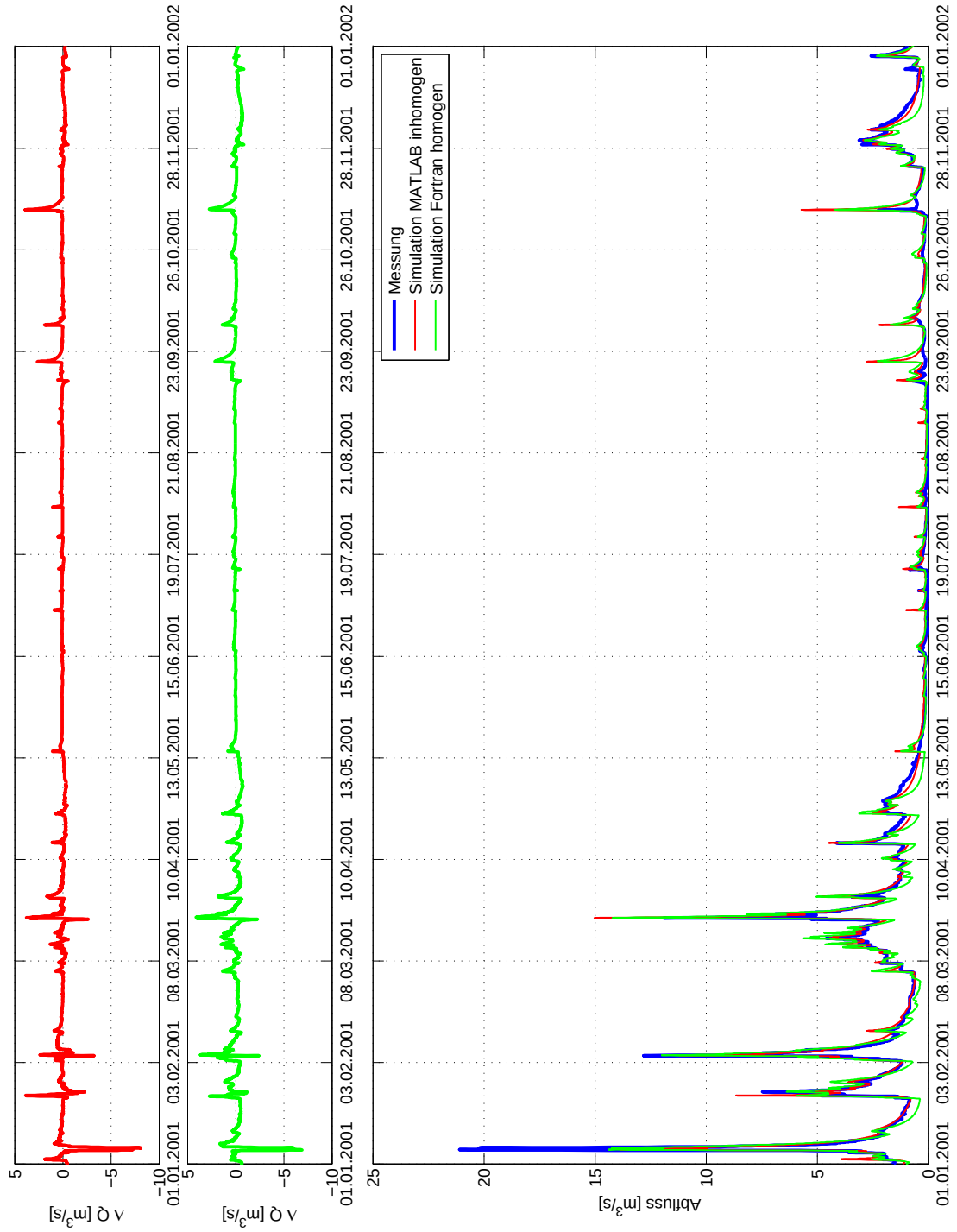

Abb. B.10. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2001 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

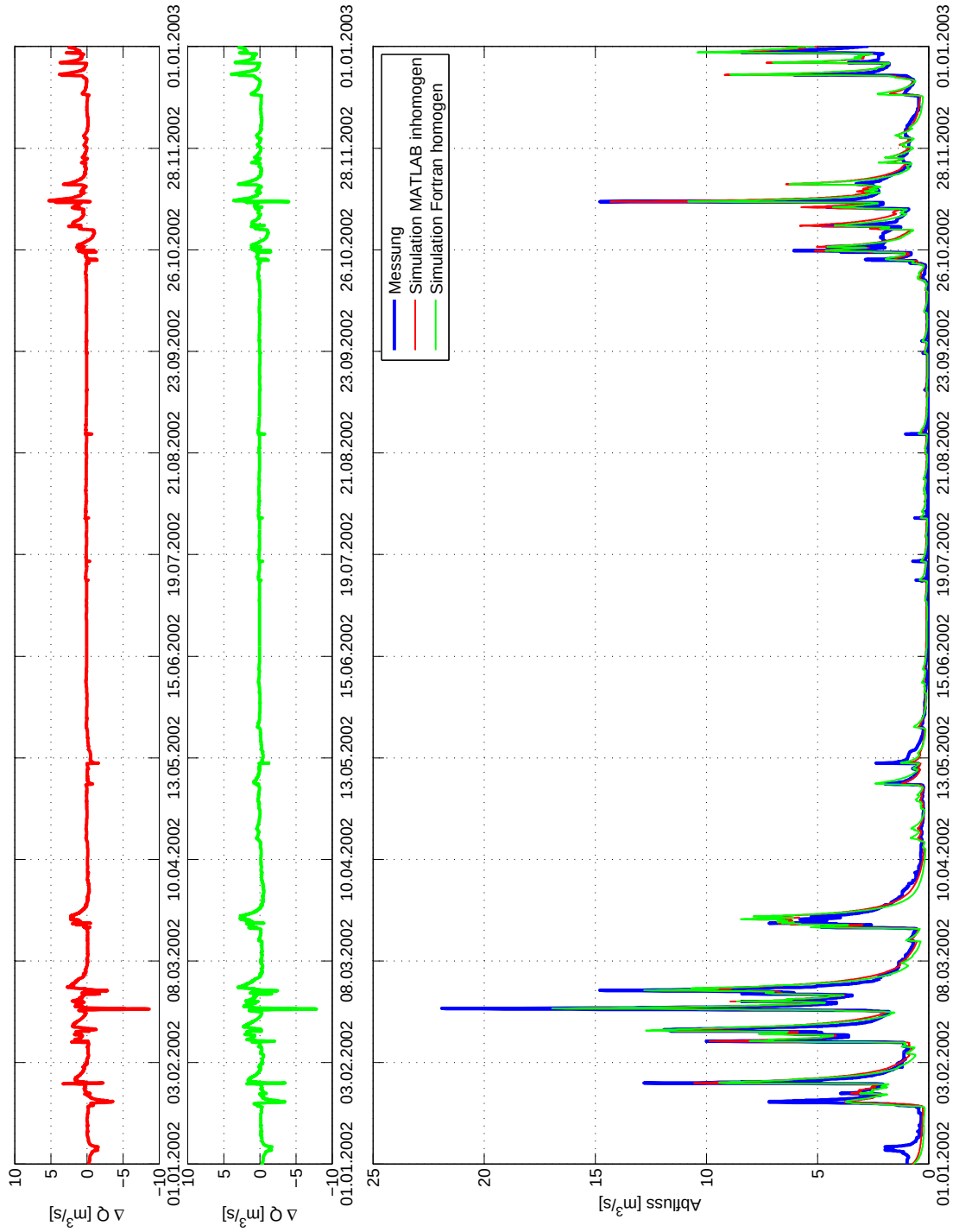

Abb. B.11. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2002 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

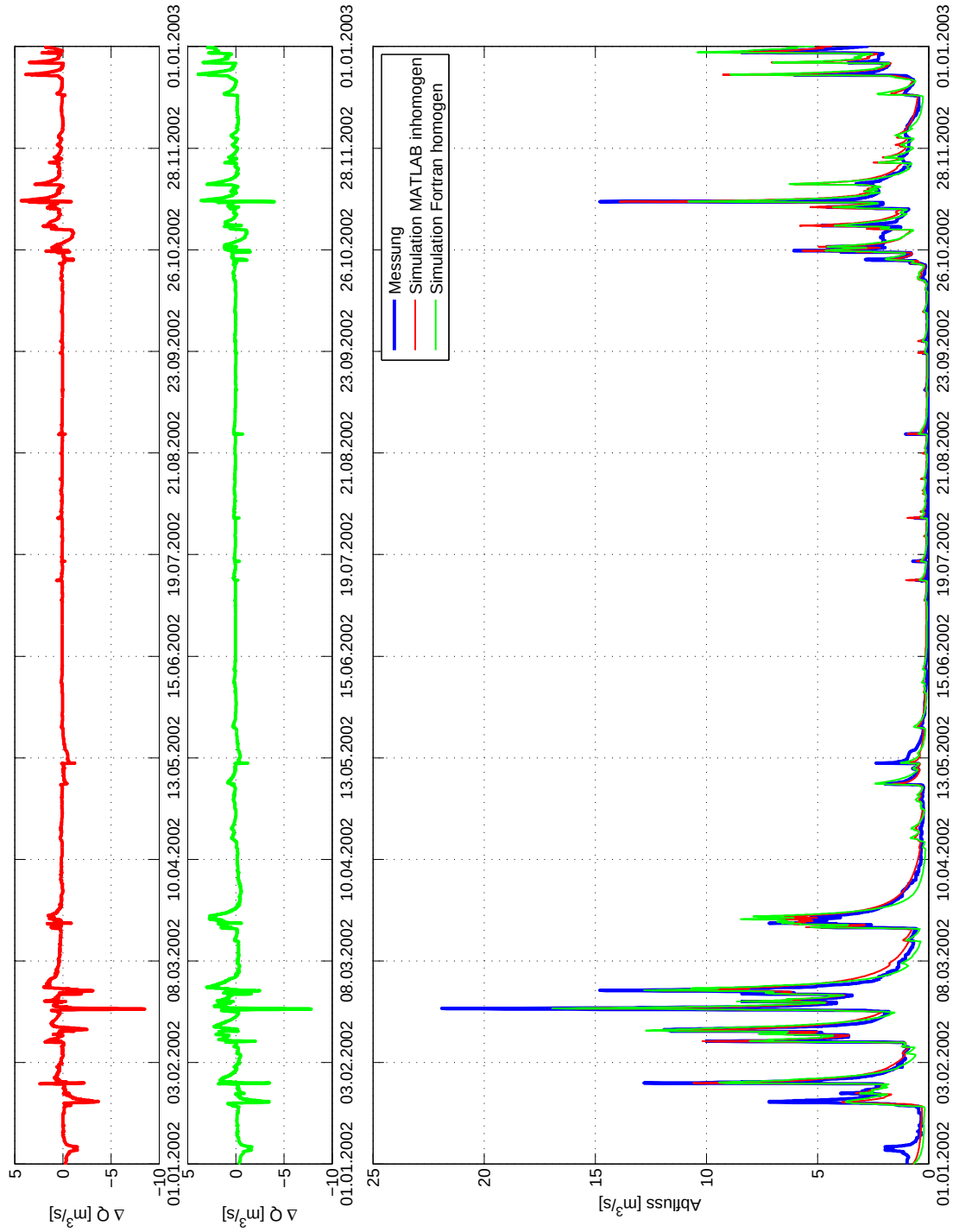

Abb. B.12. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2002 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

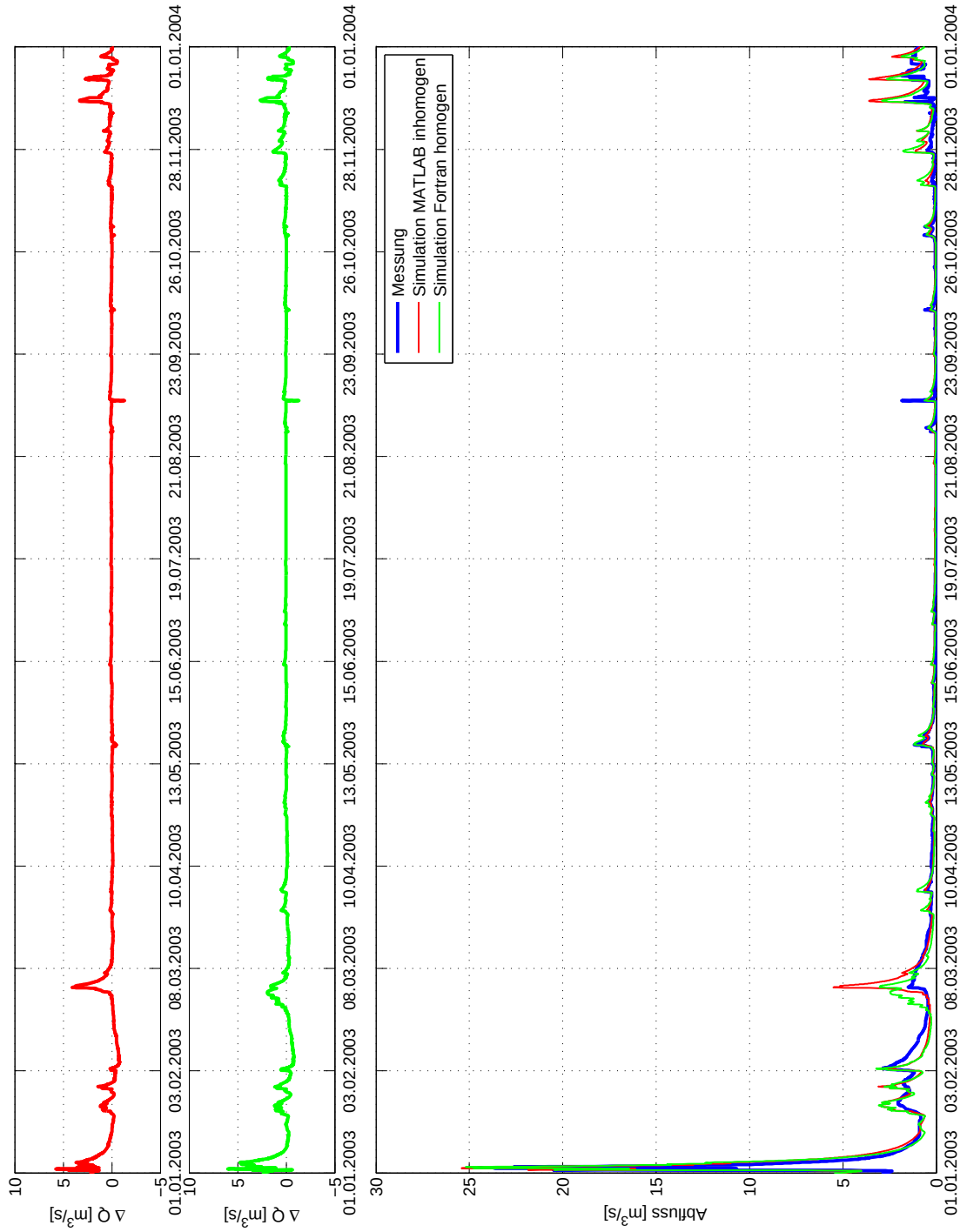

Abb. B.13. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2003 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

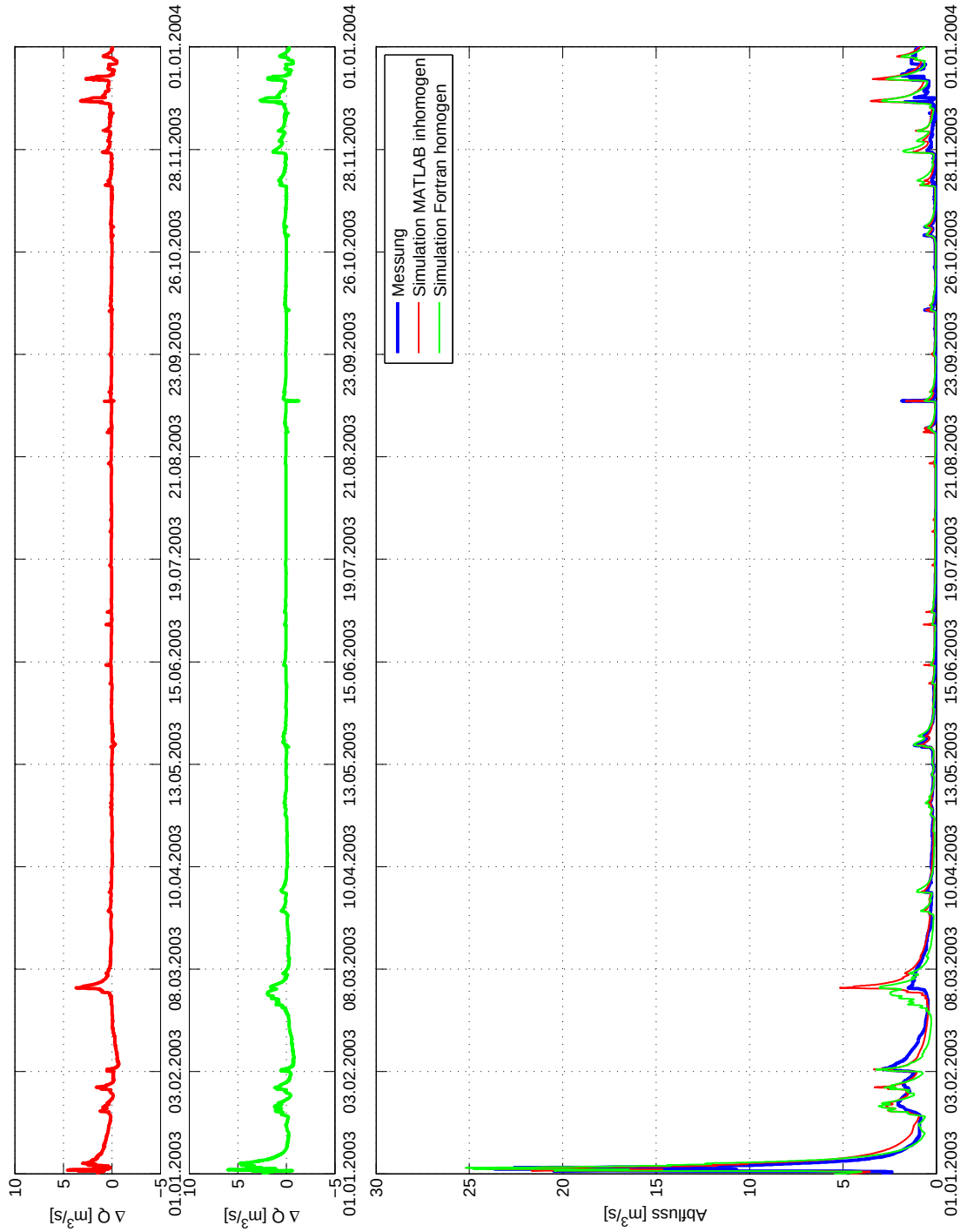

Abb. B.14. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kronweiler** für das Jahr **2003 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

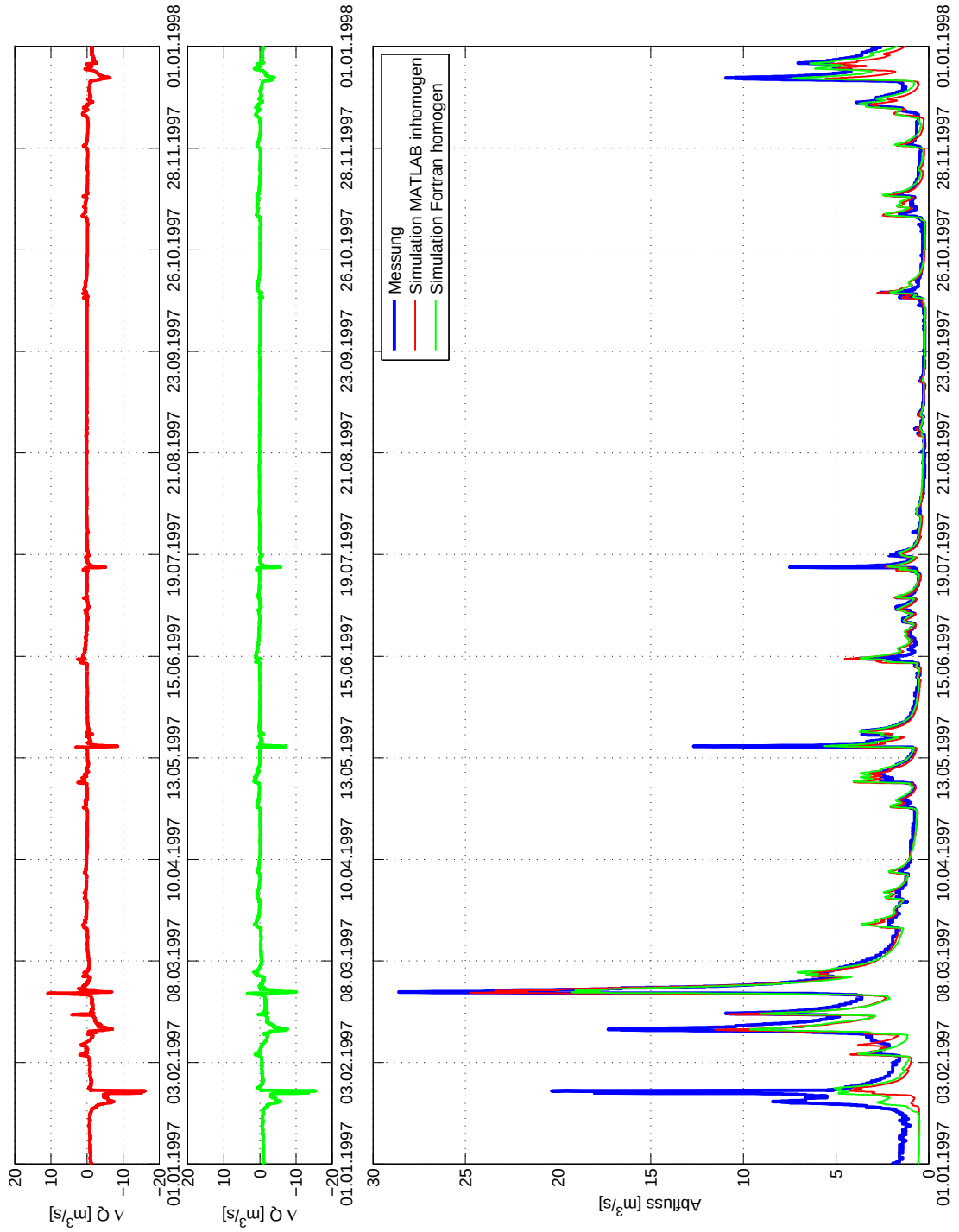

Abb. B.15. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **1997 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

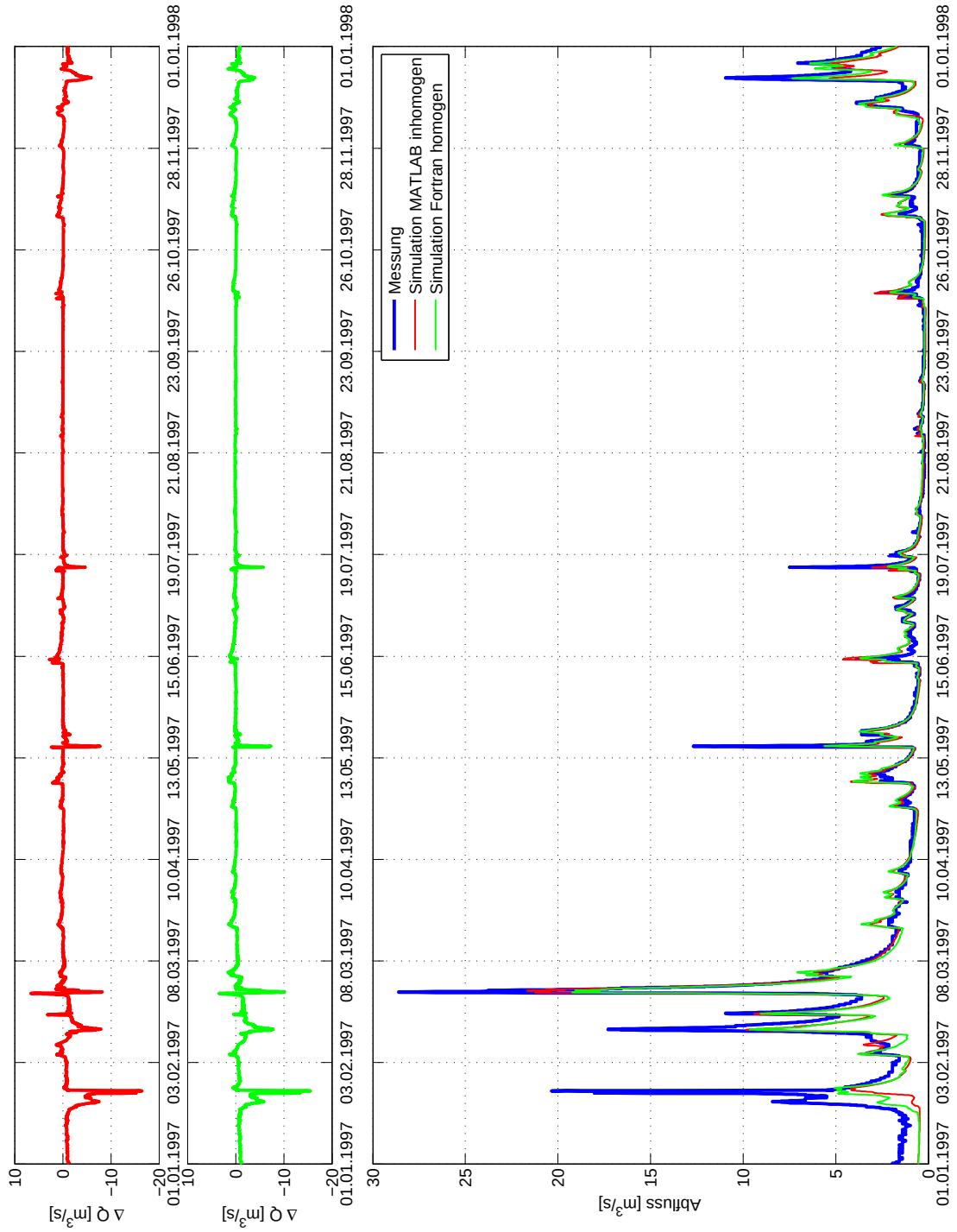

Abb. B.16. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **1997 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

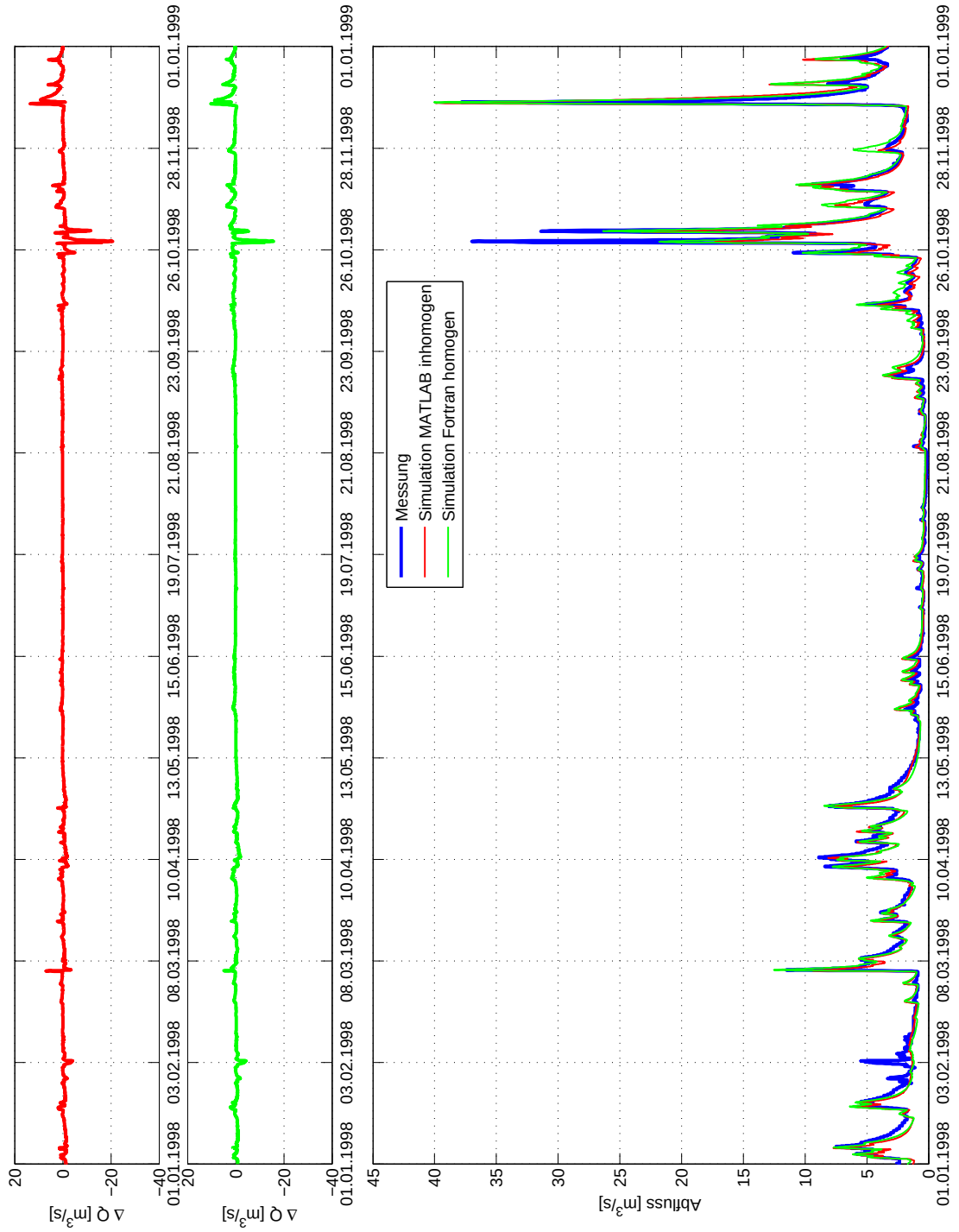

Abb. B.17. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **1998 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

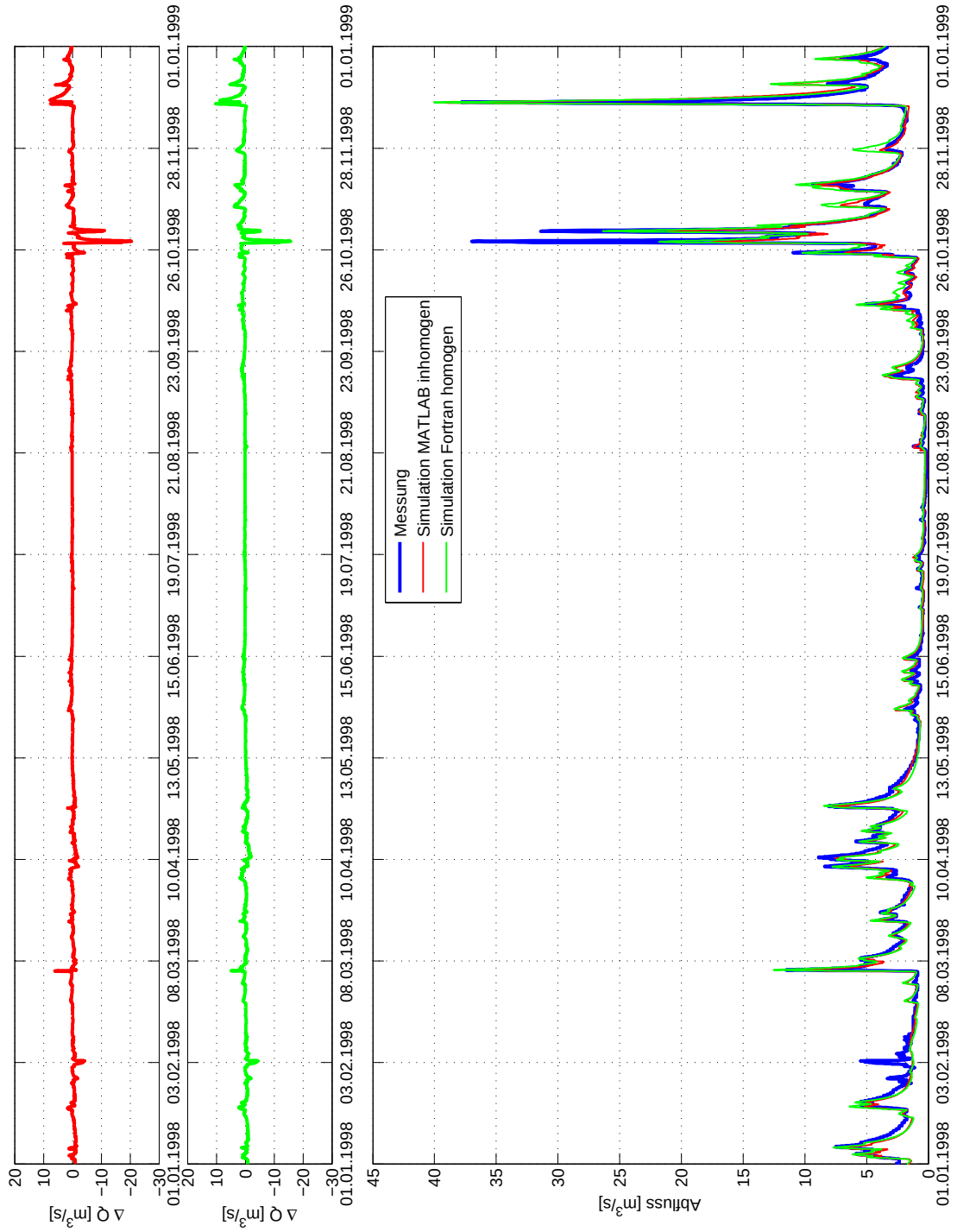

Abb. B.18. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **1998 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

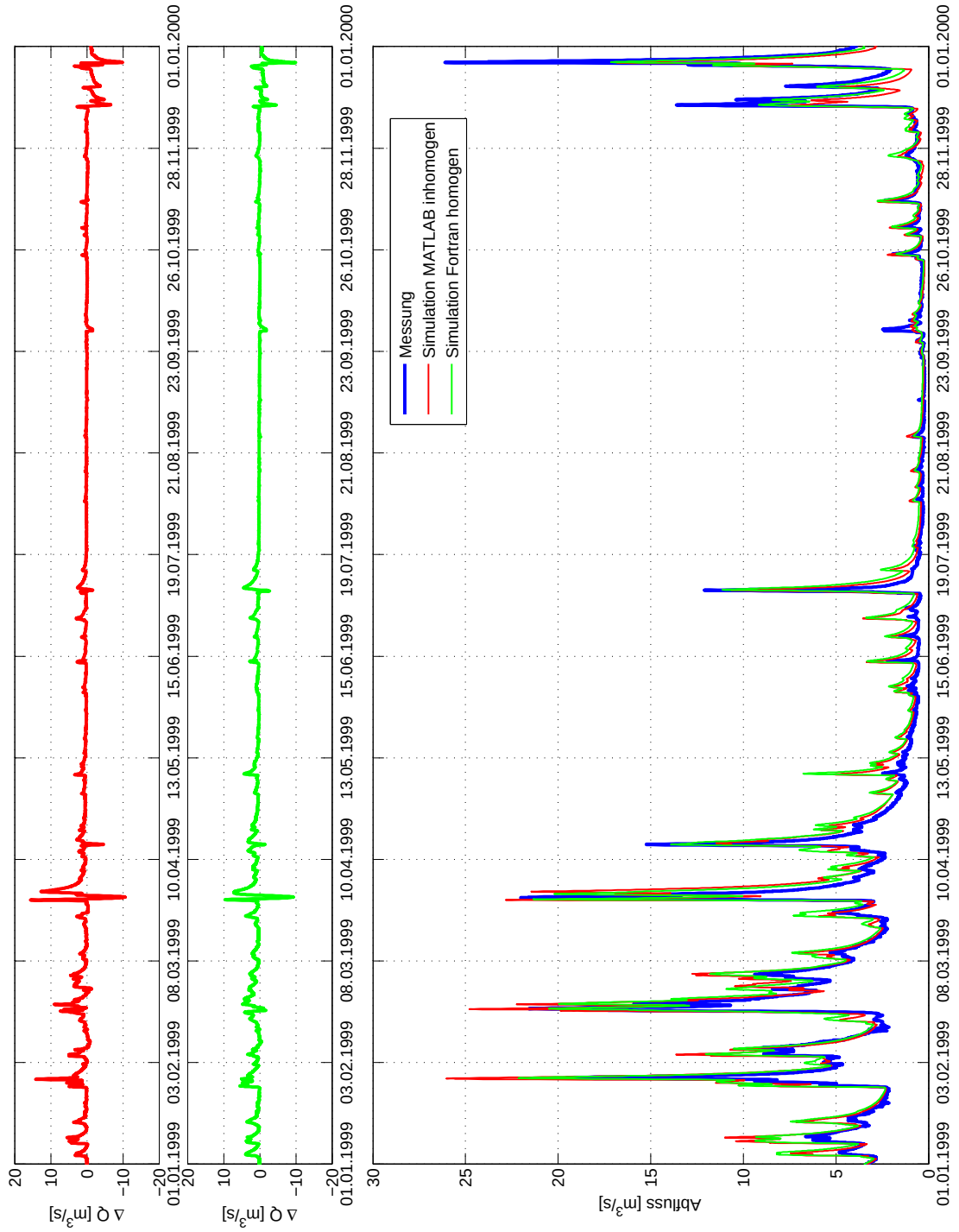

Abb. B.19. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **1999 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

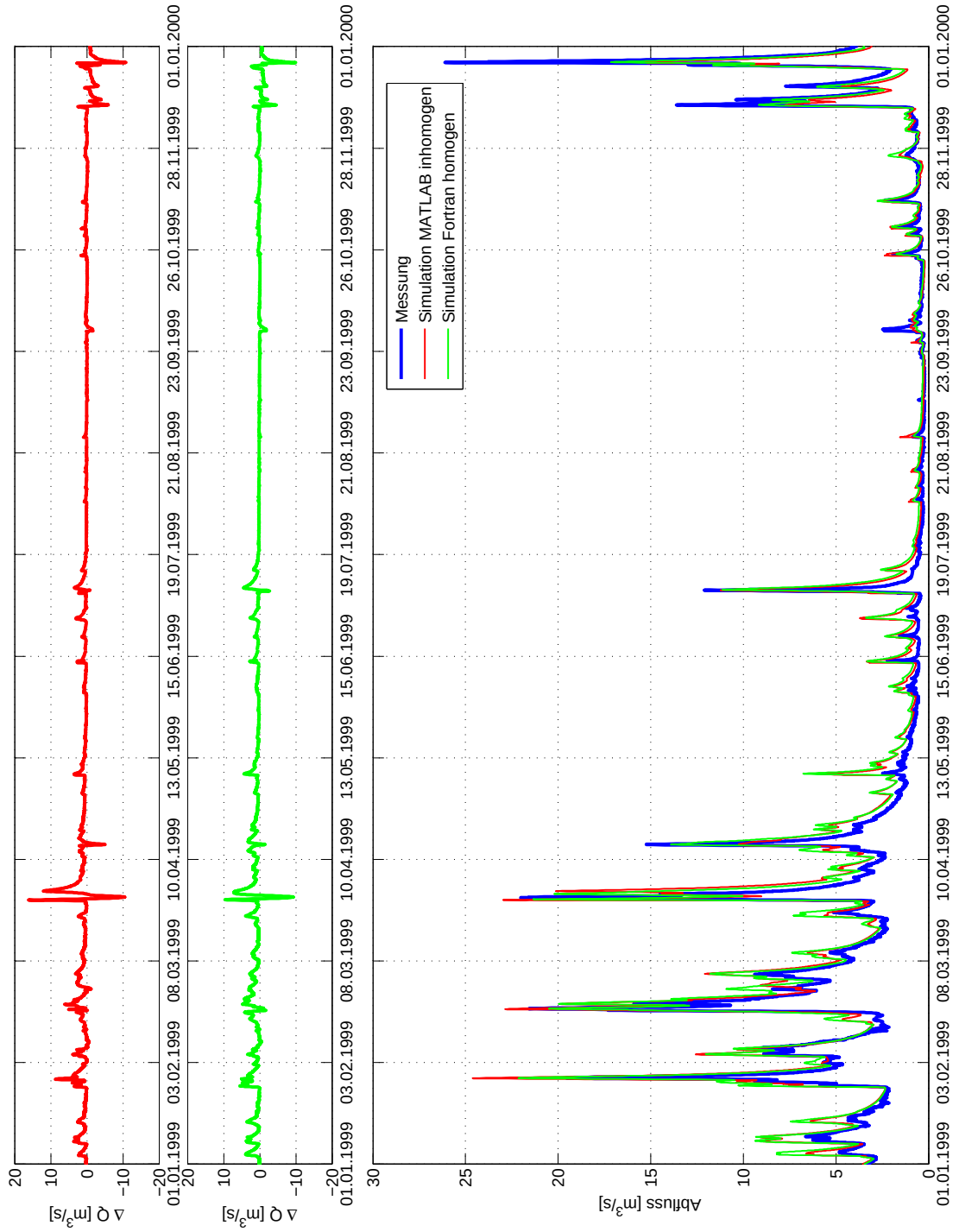

Abb. B.20. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **1999 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

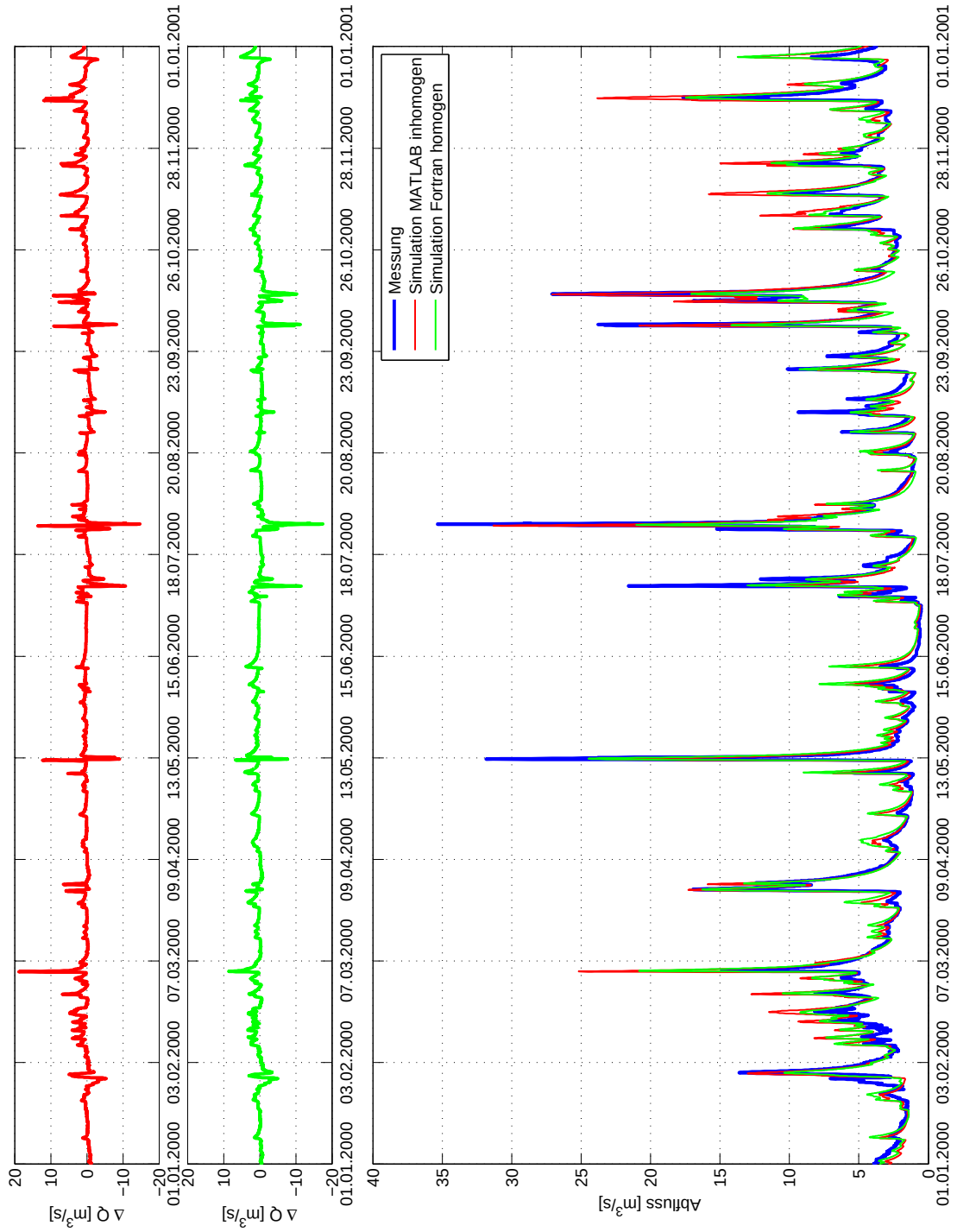

Abb. B.21. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2000 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

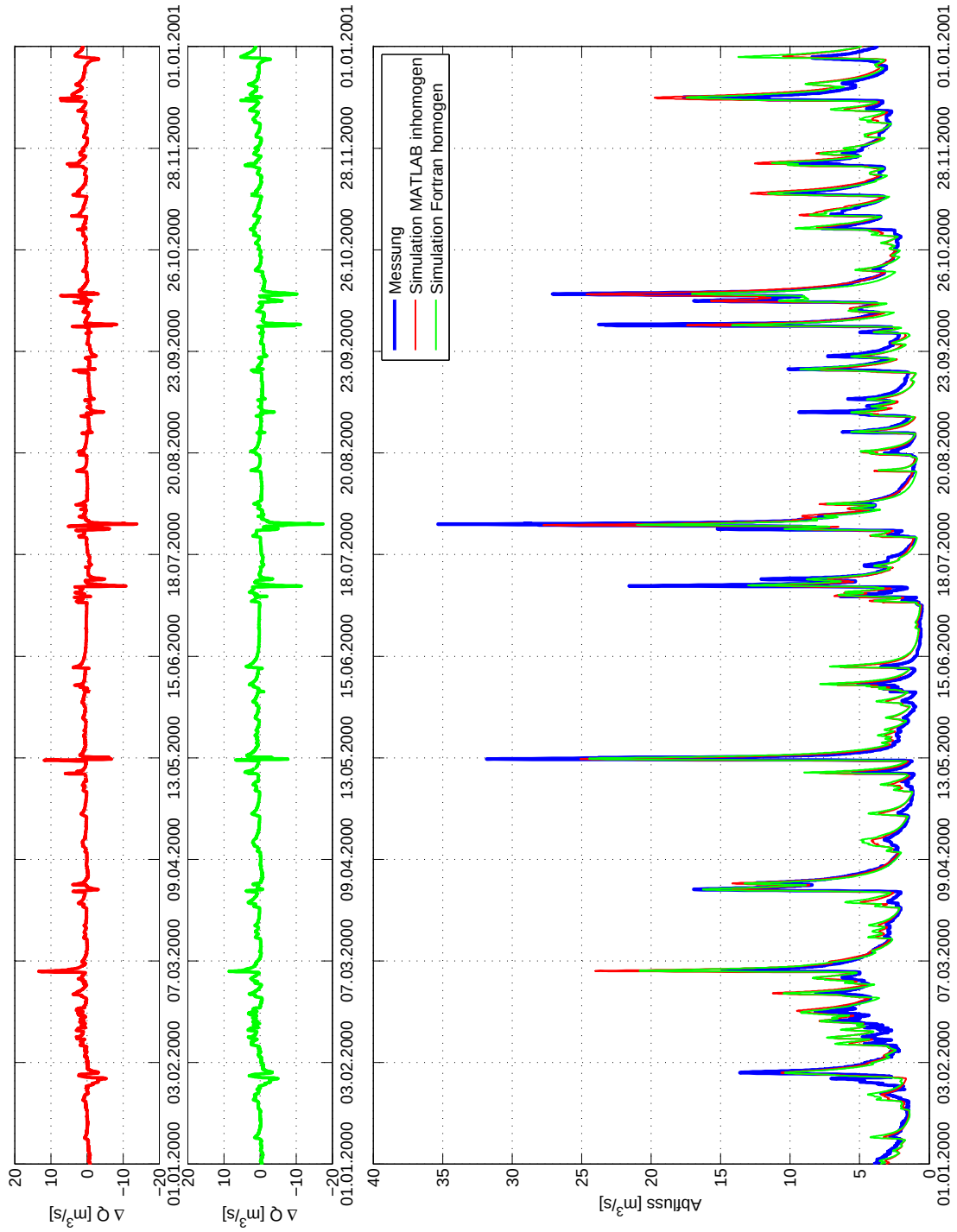

Abb. B.22. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2000 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

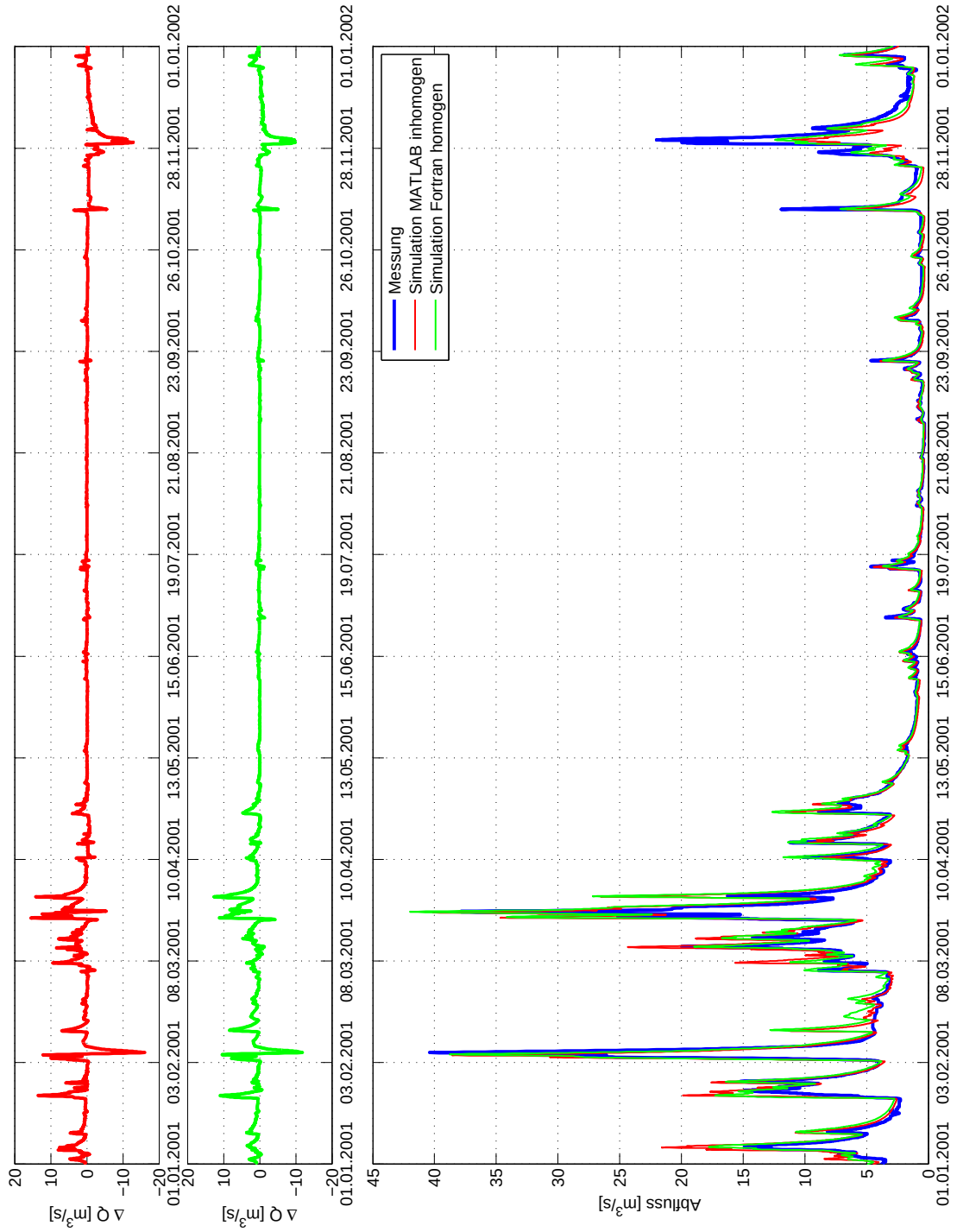

Abb. B.23. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2001 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

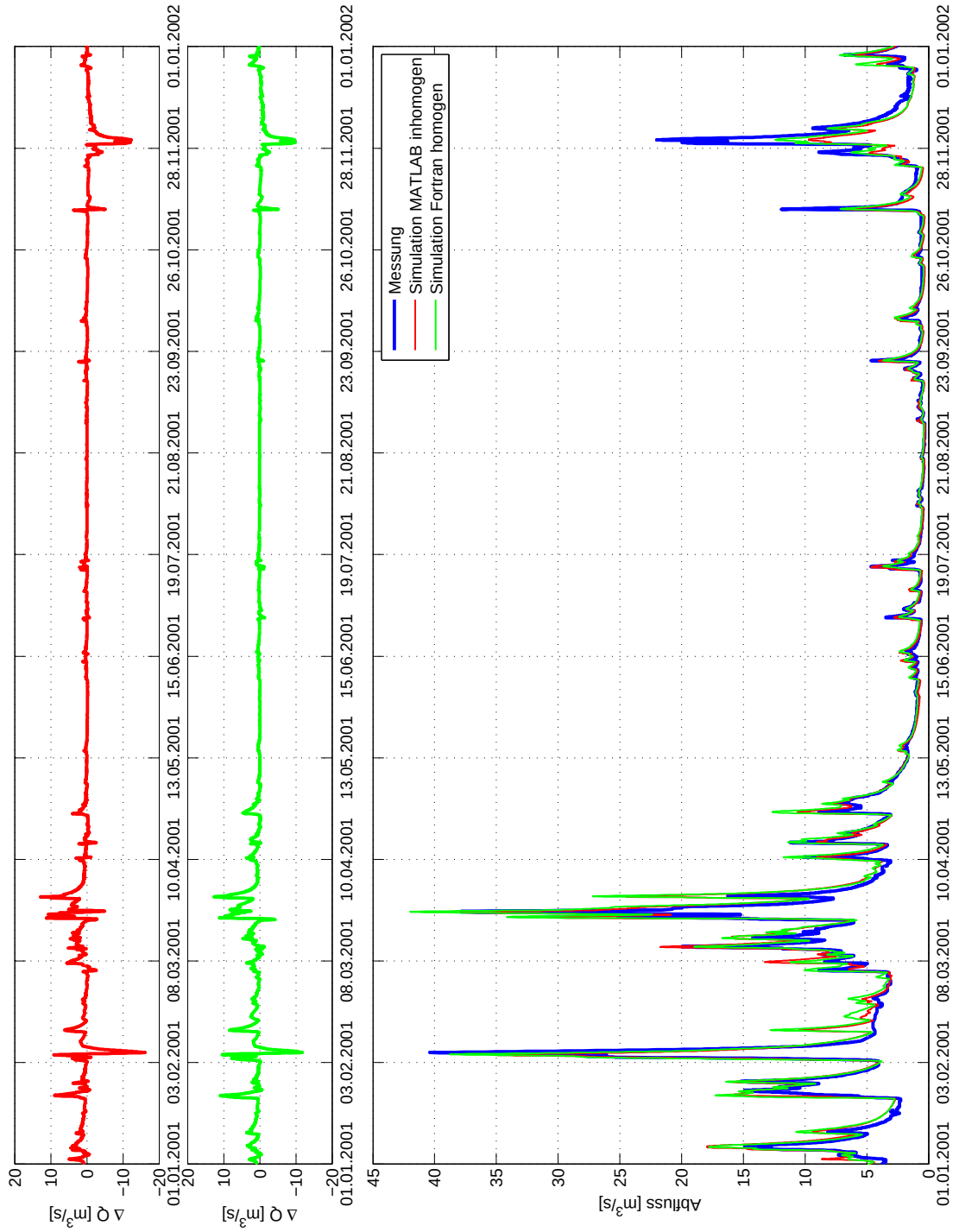

Abb. B.24. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2001 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

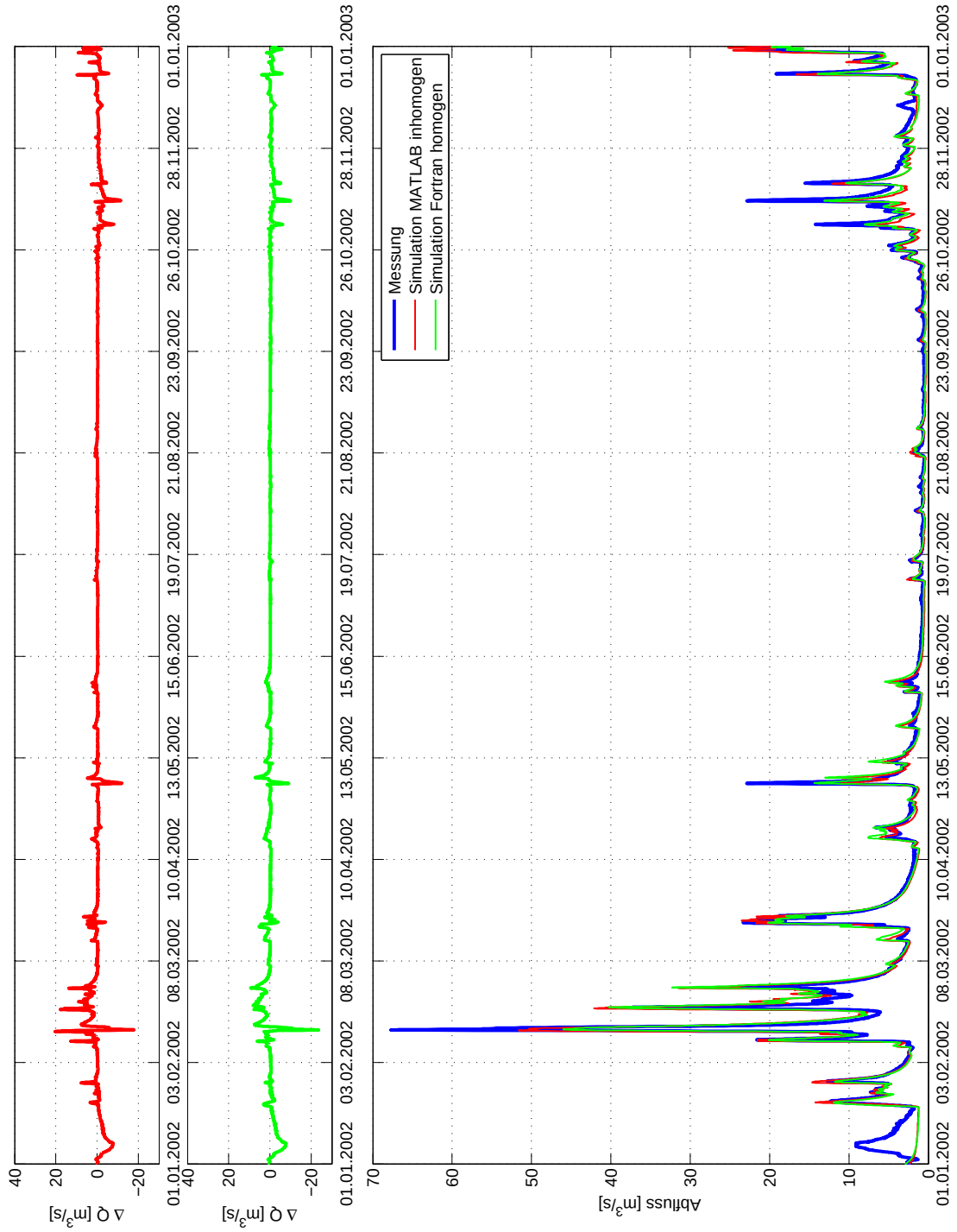

Abb. B.25. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2002 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

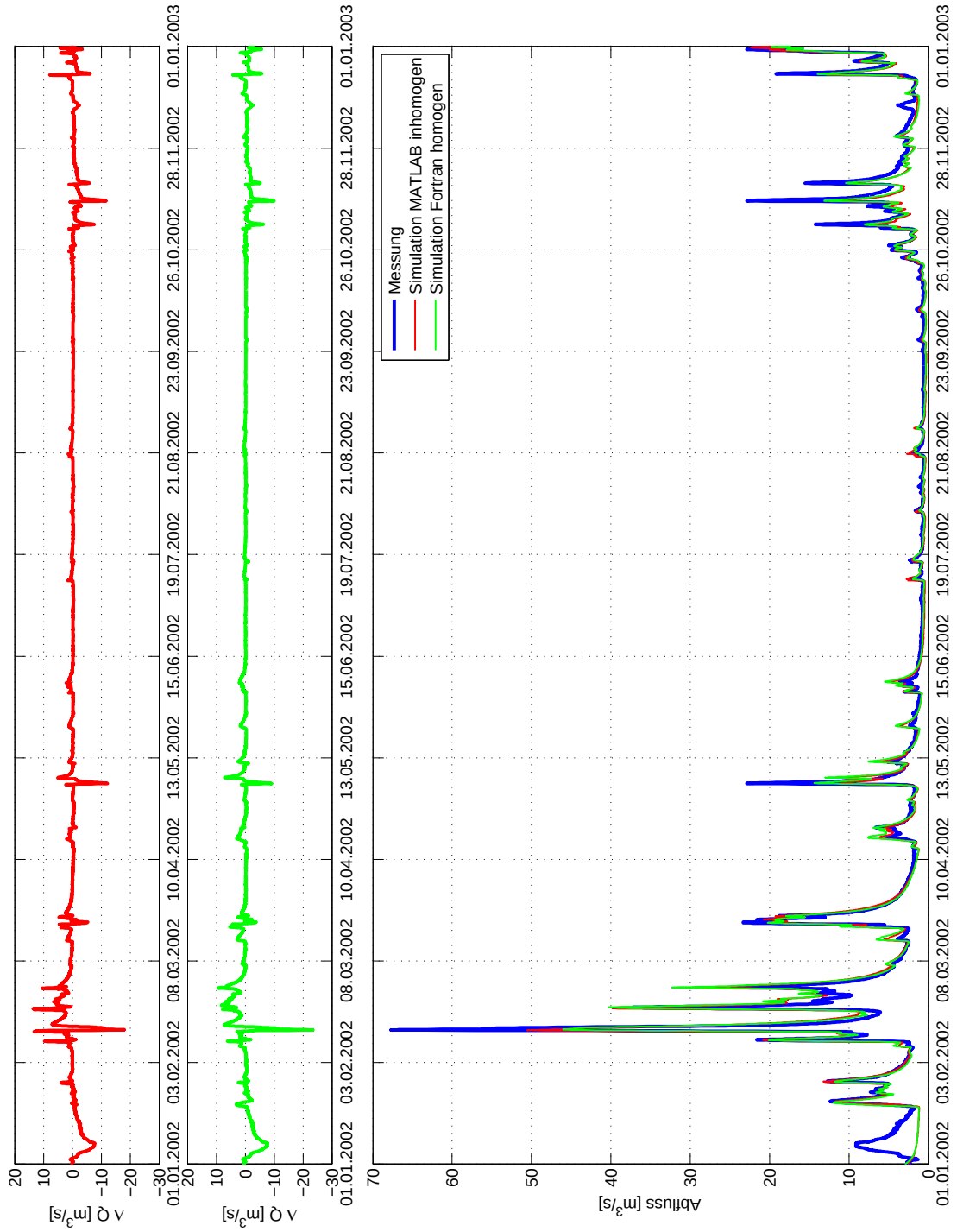

Abb. B.26. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2002 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

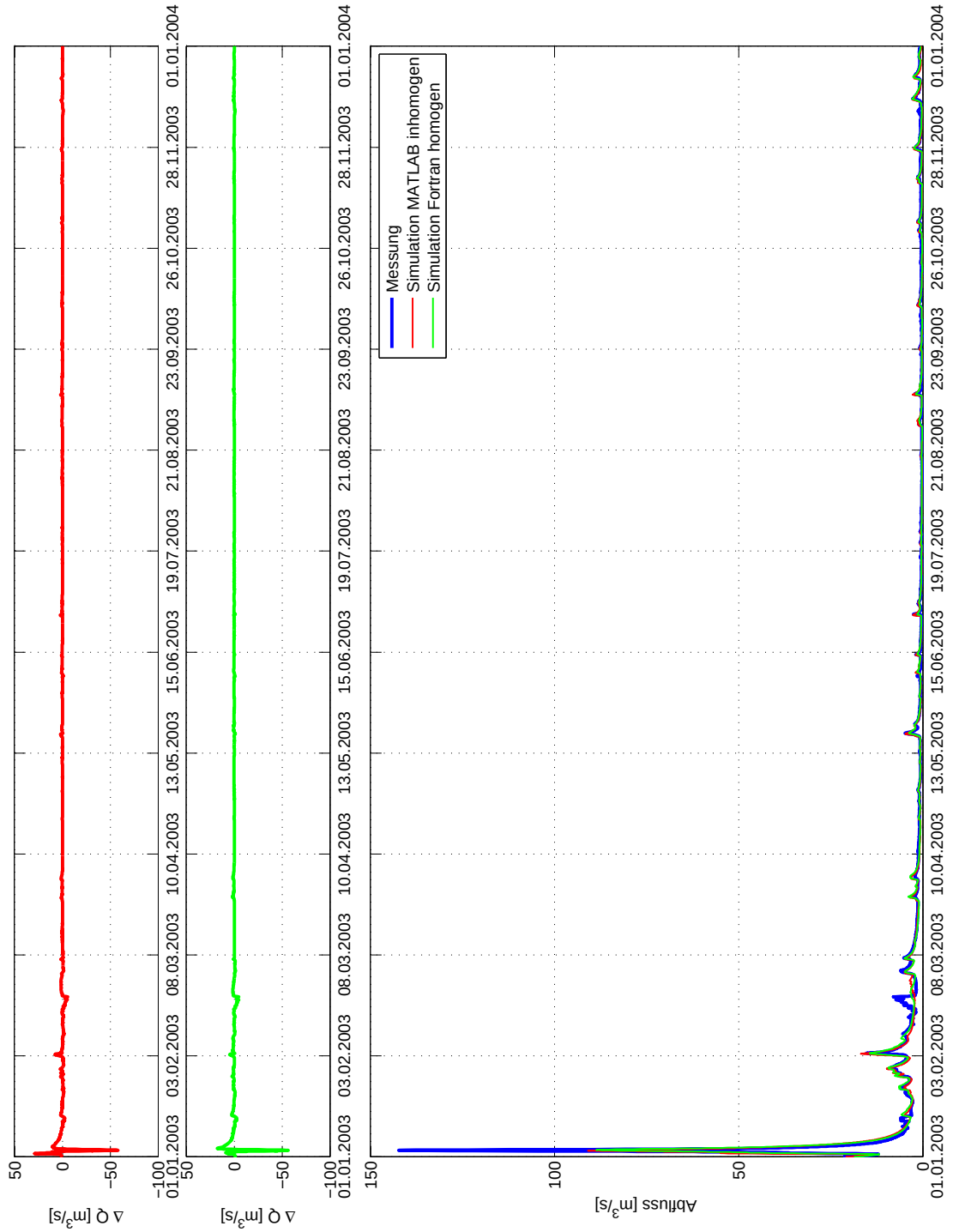

Abb. B.27. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2003 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

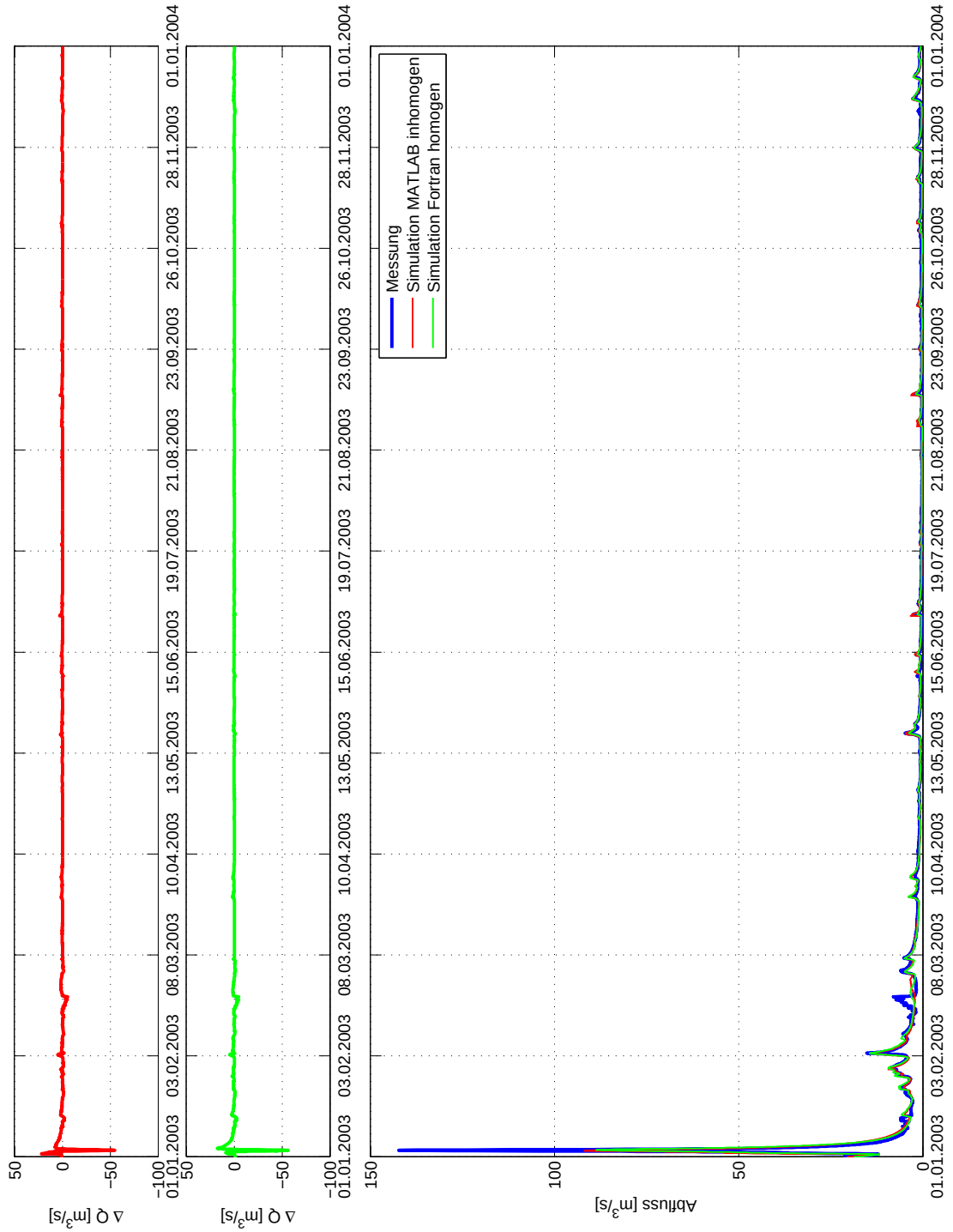

Abb. B.28. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Kellenbach** für das Jahr **2003 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

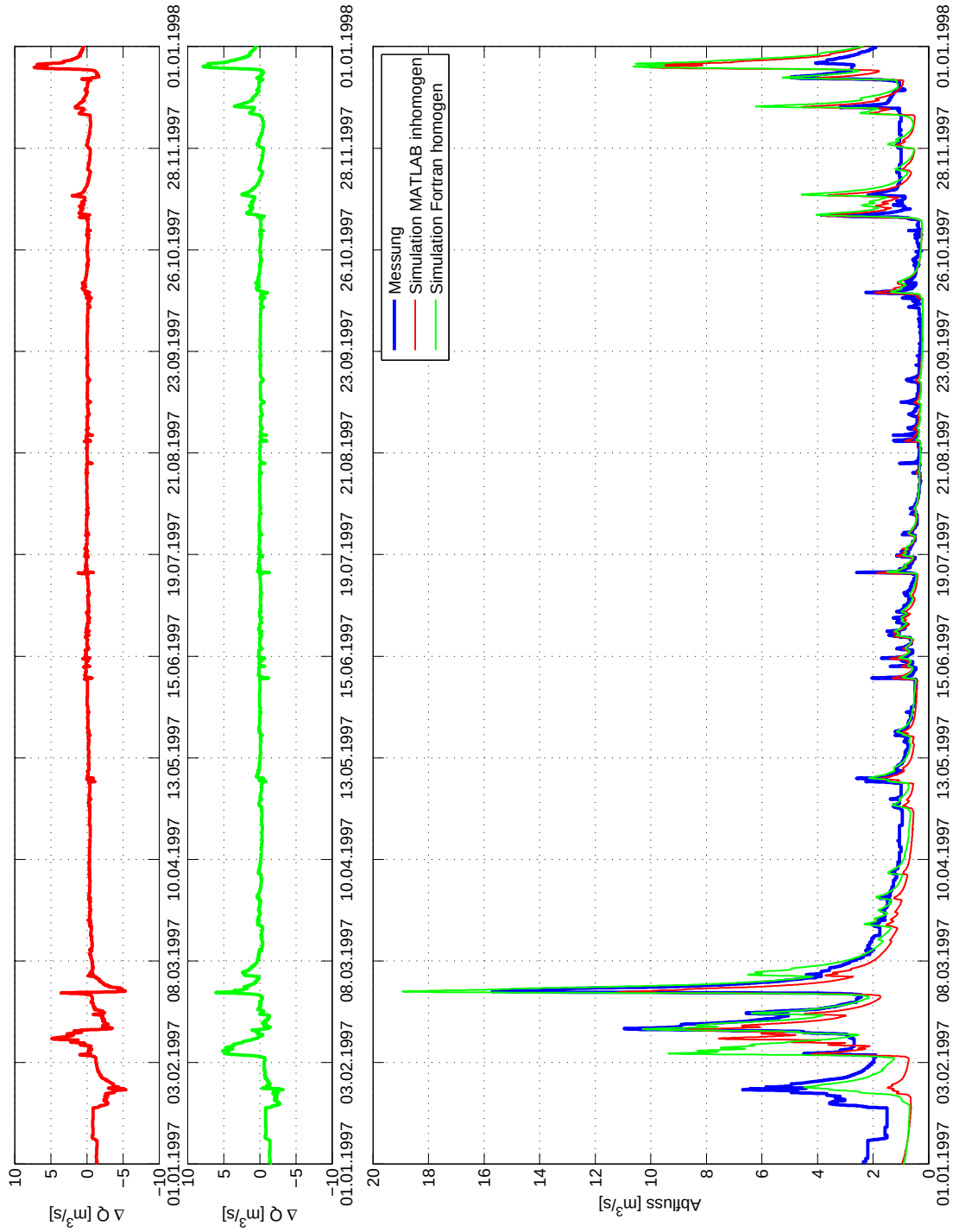

Abb. B.29. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **1997 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

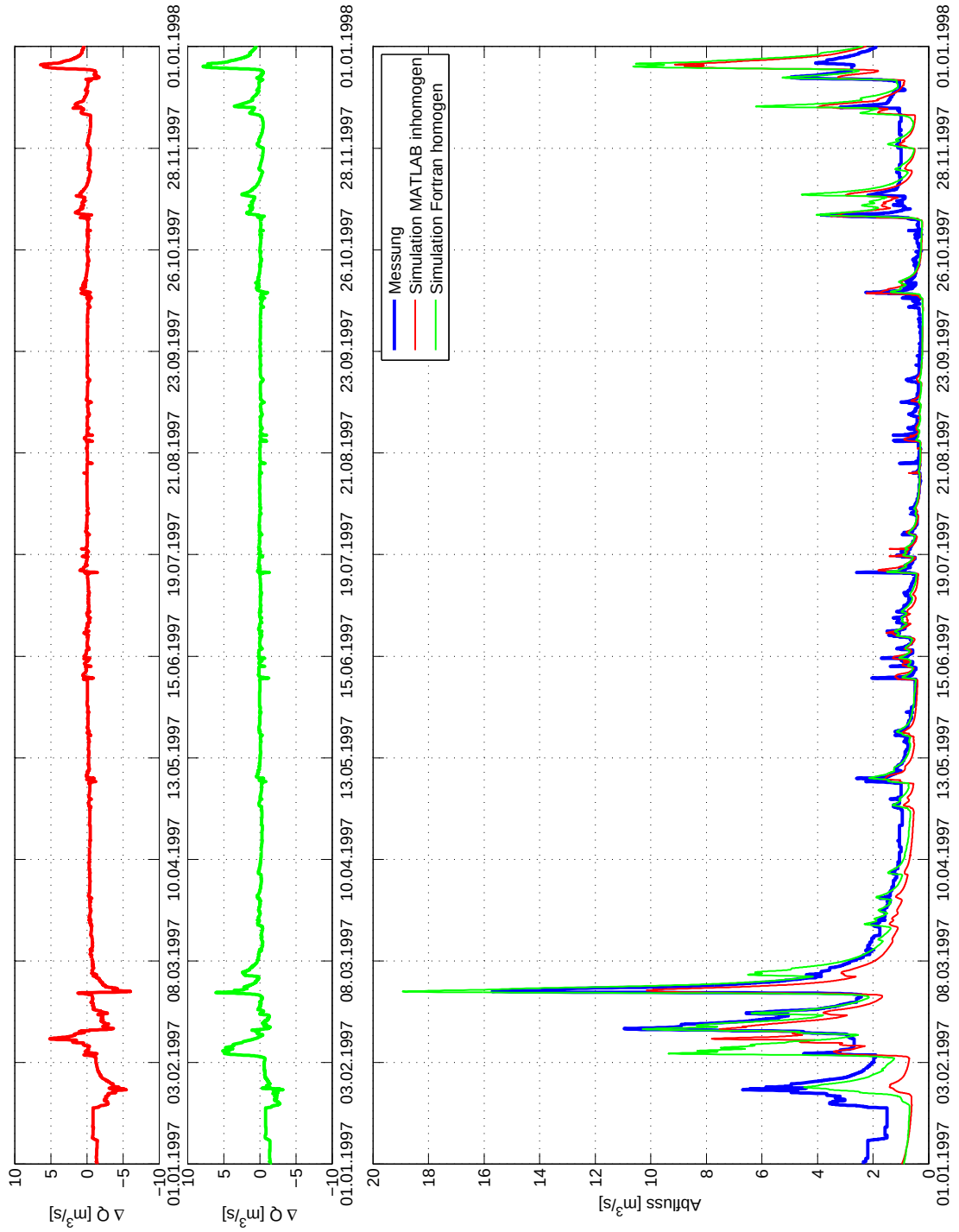

Abb. B.30. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **1997 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

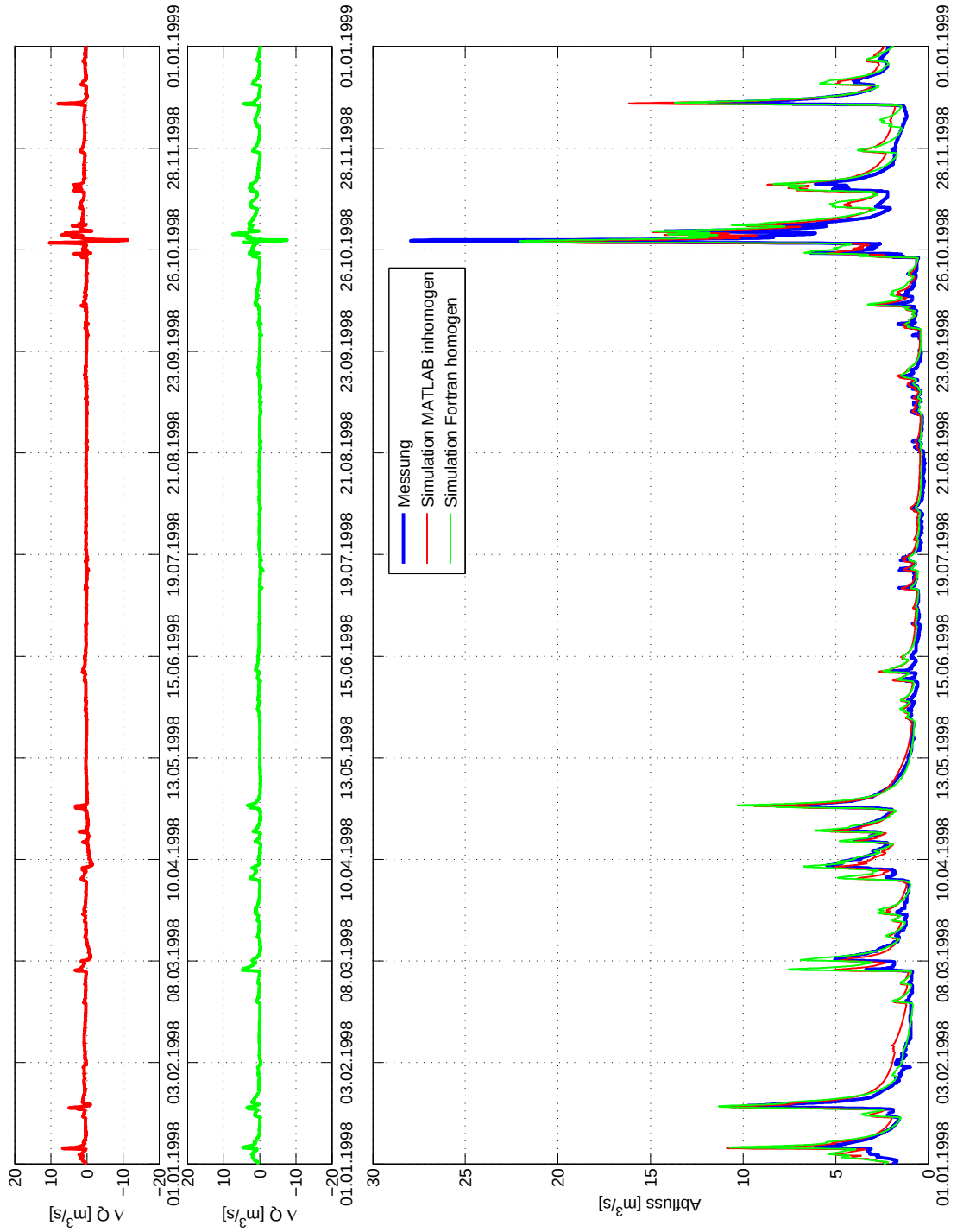

Abb. B.31. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **1998 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

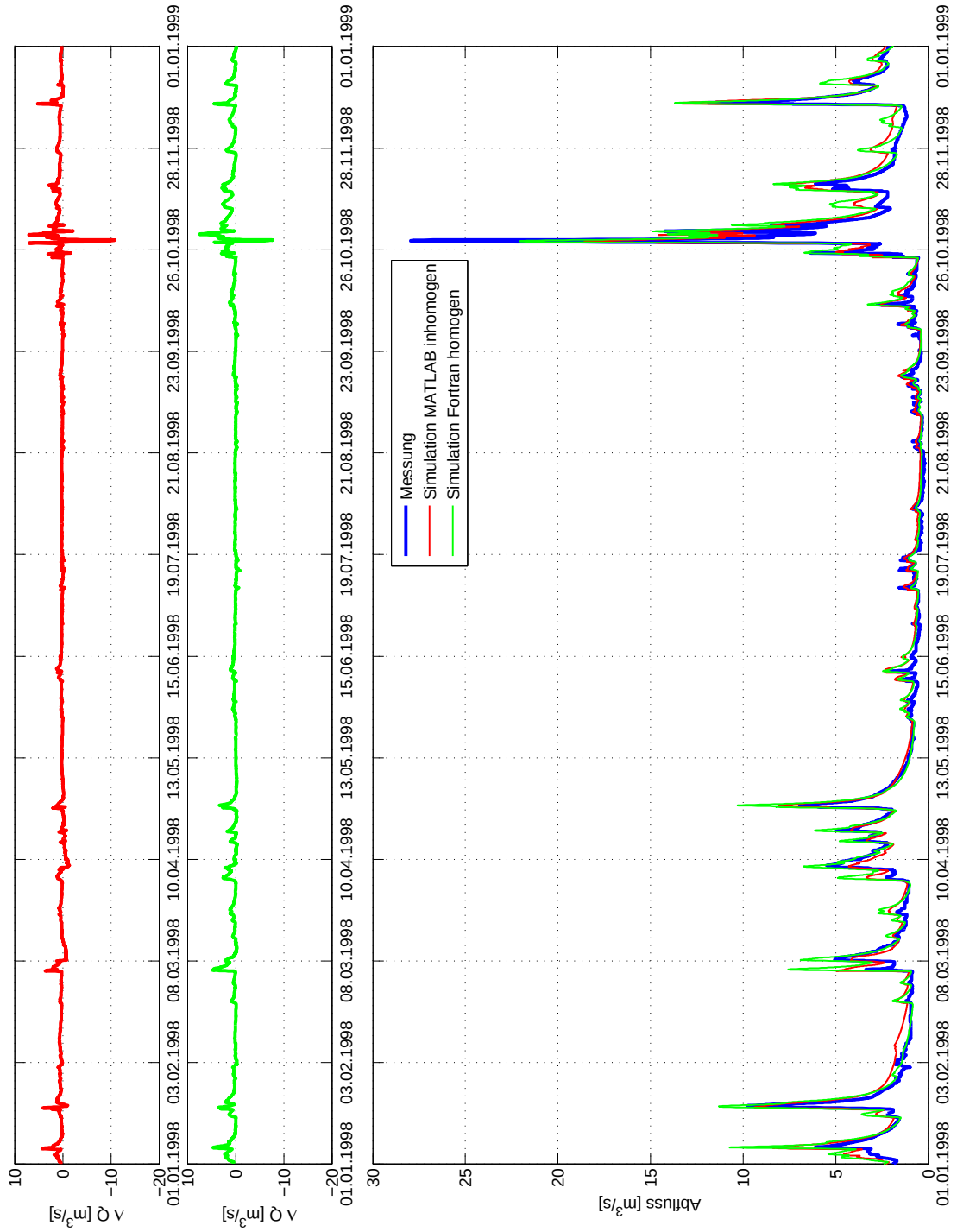

Abb. B.32. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **1998 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

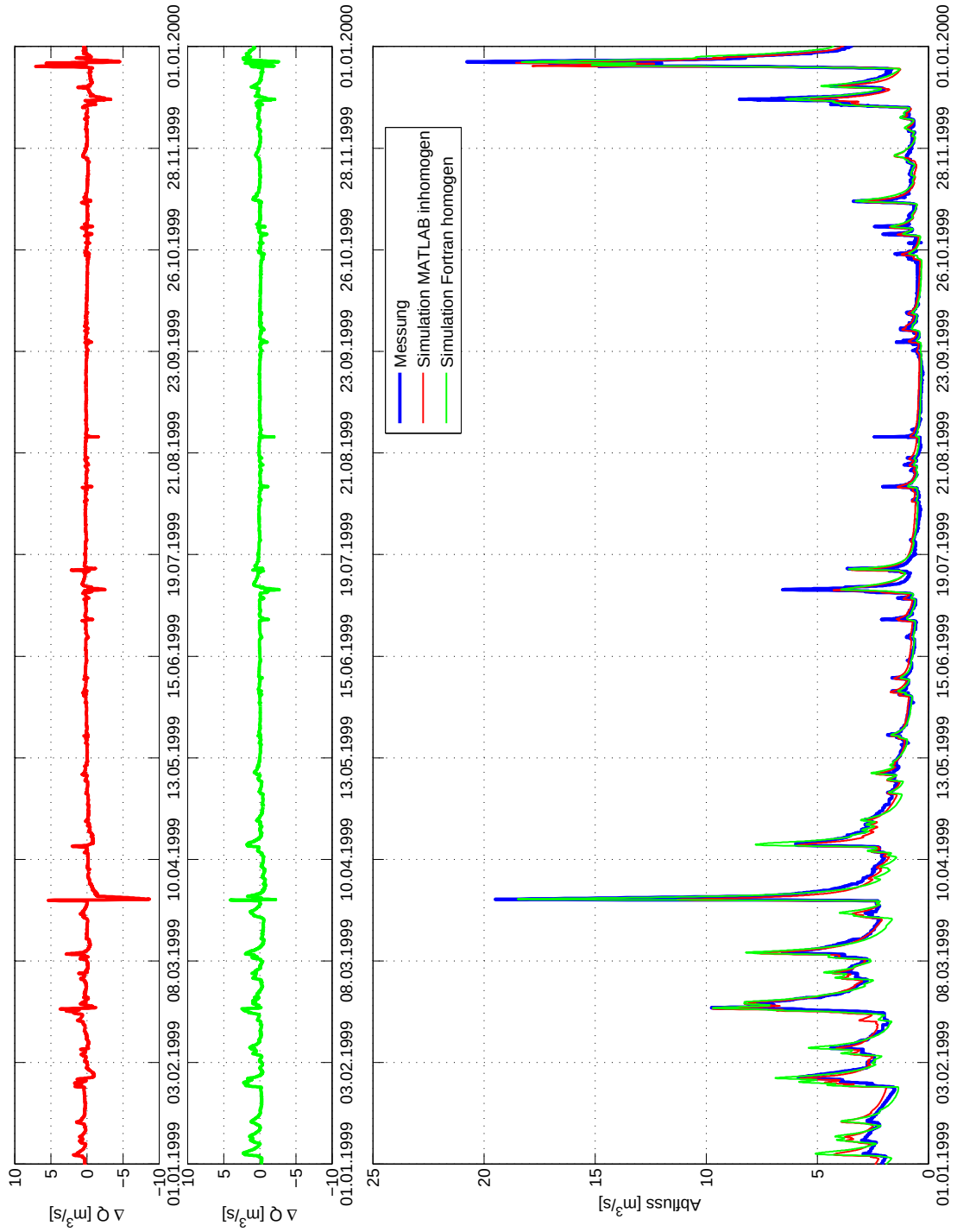

Abb. B.33. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **1999 (Kalibrierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

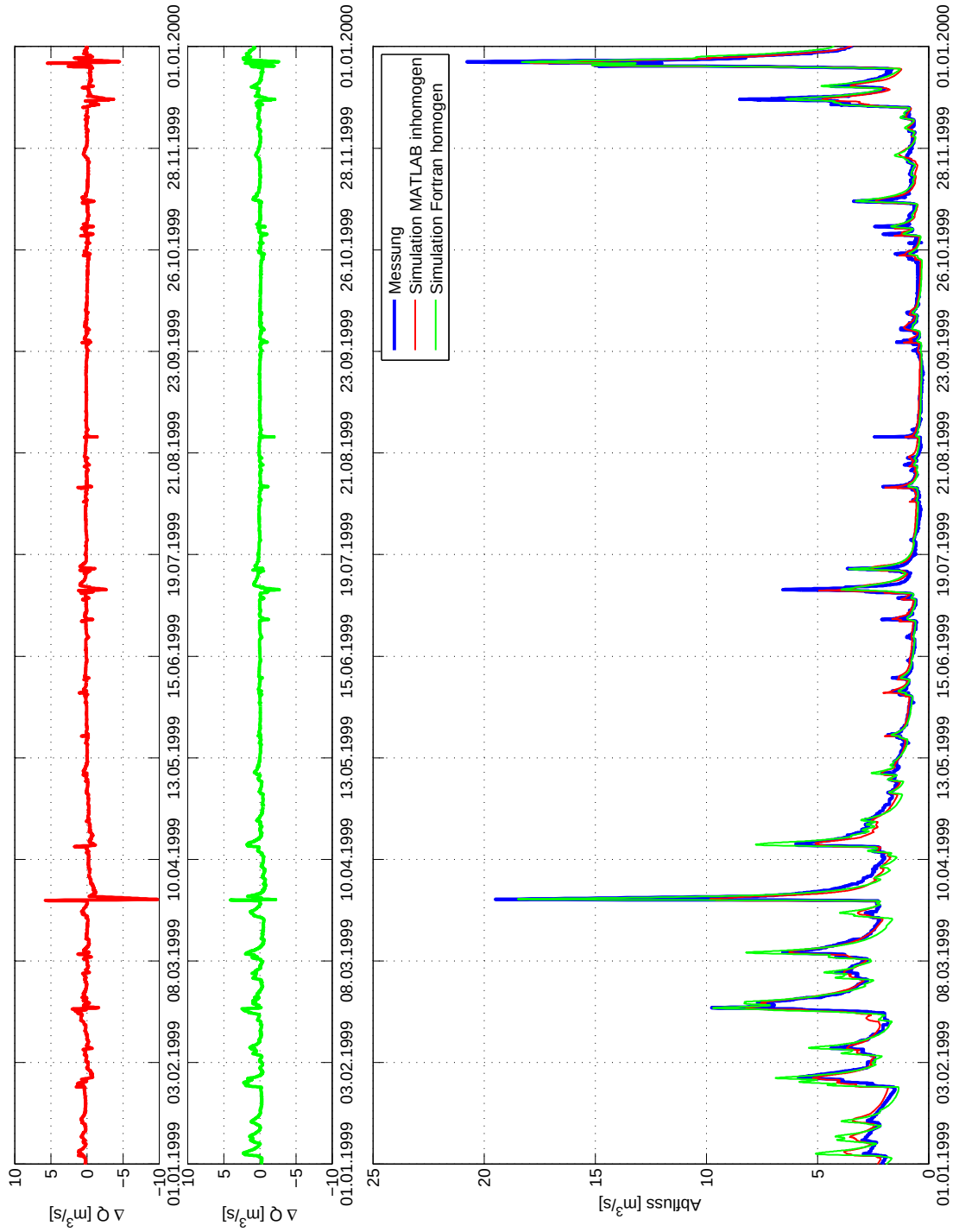

Abb. B.34. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **1999 (Kalibrierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

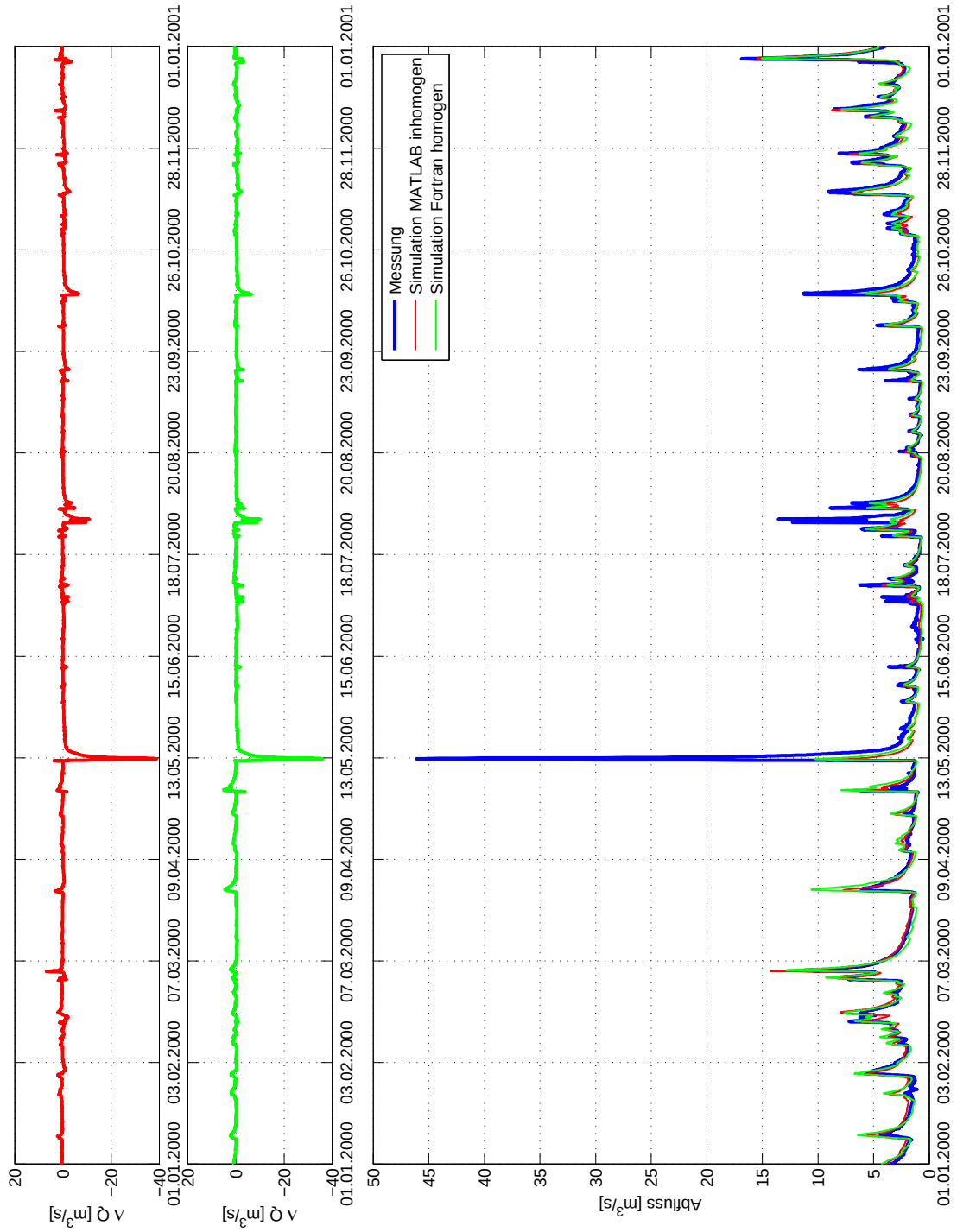

Abb. B.35. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **2000 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

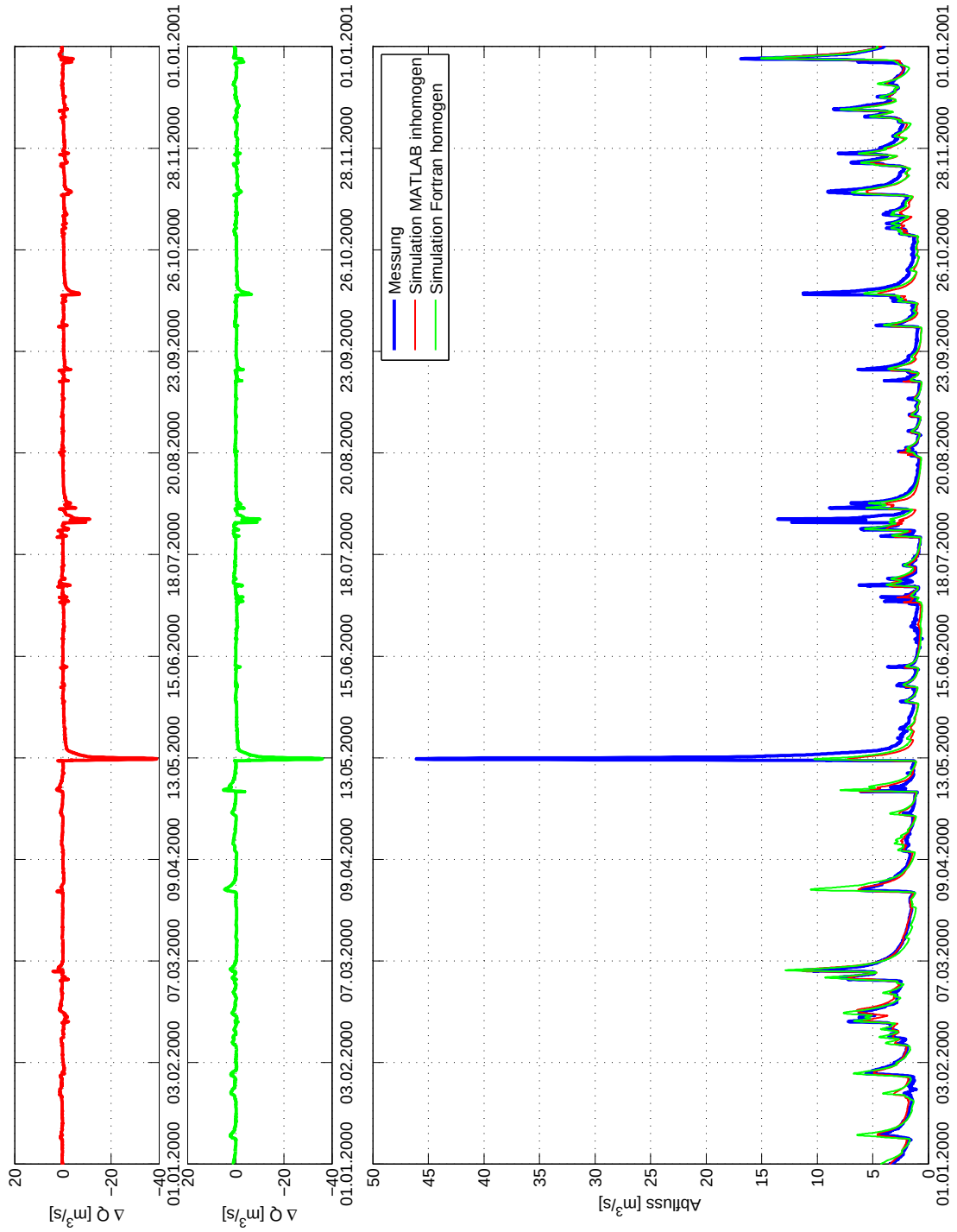

Abb. B.36. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **2000 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

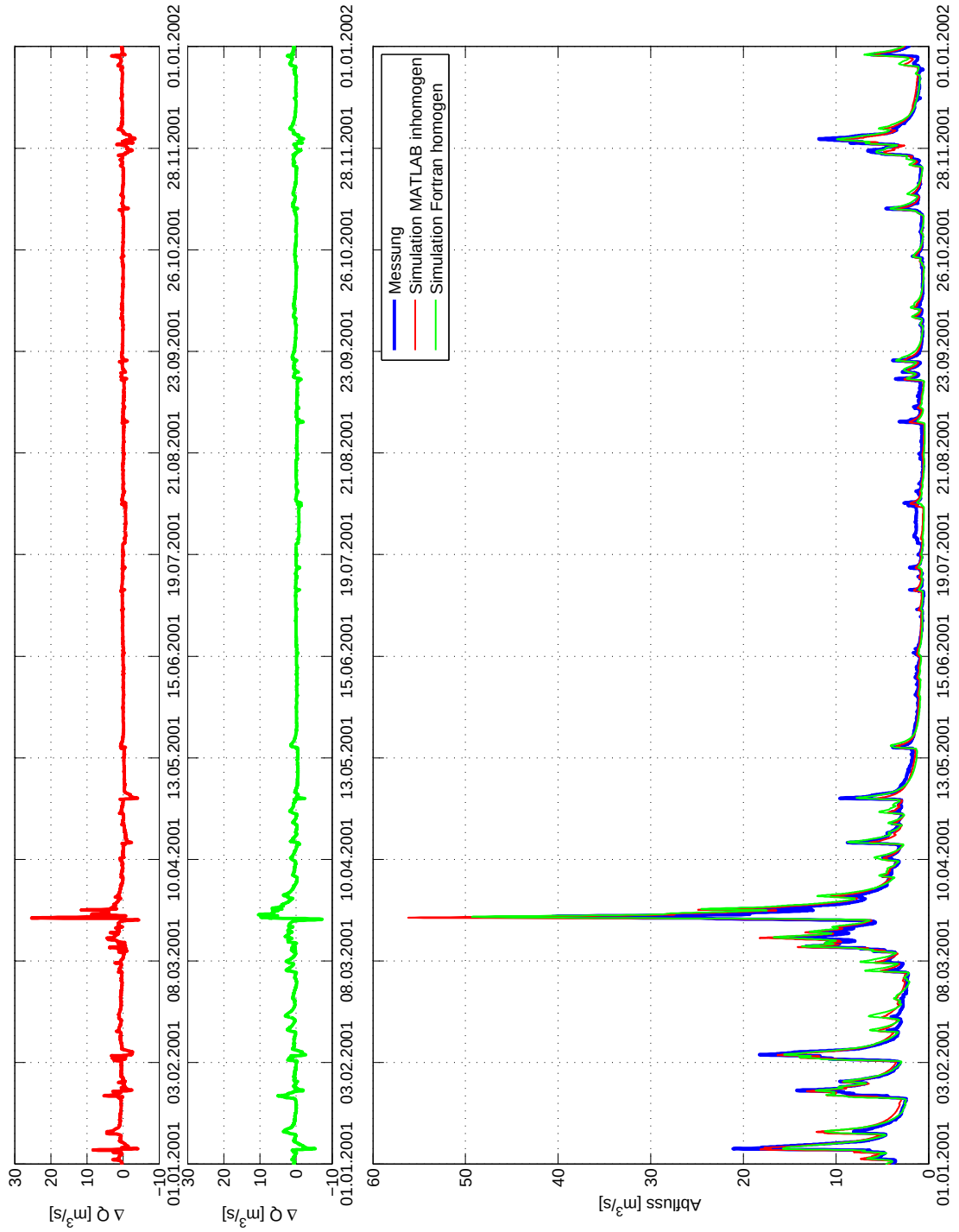

Abb. B.37. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **2001 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

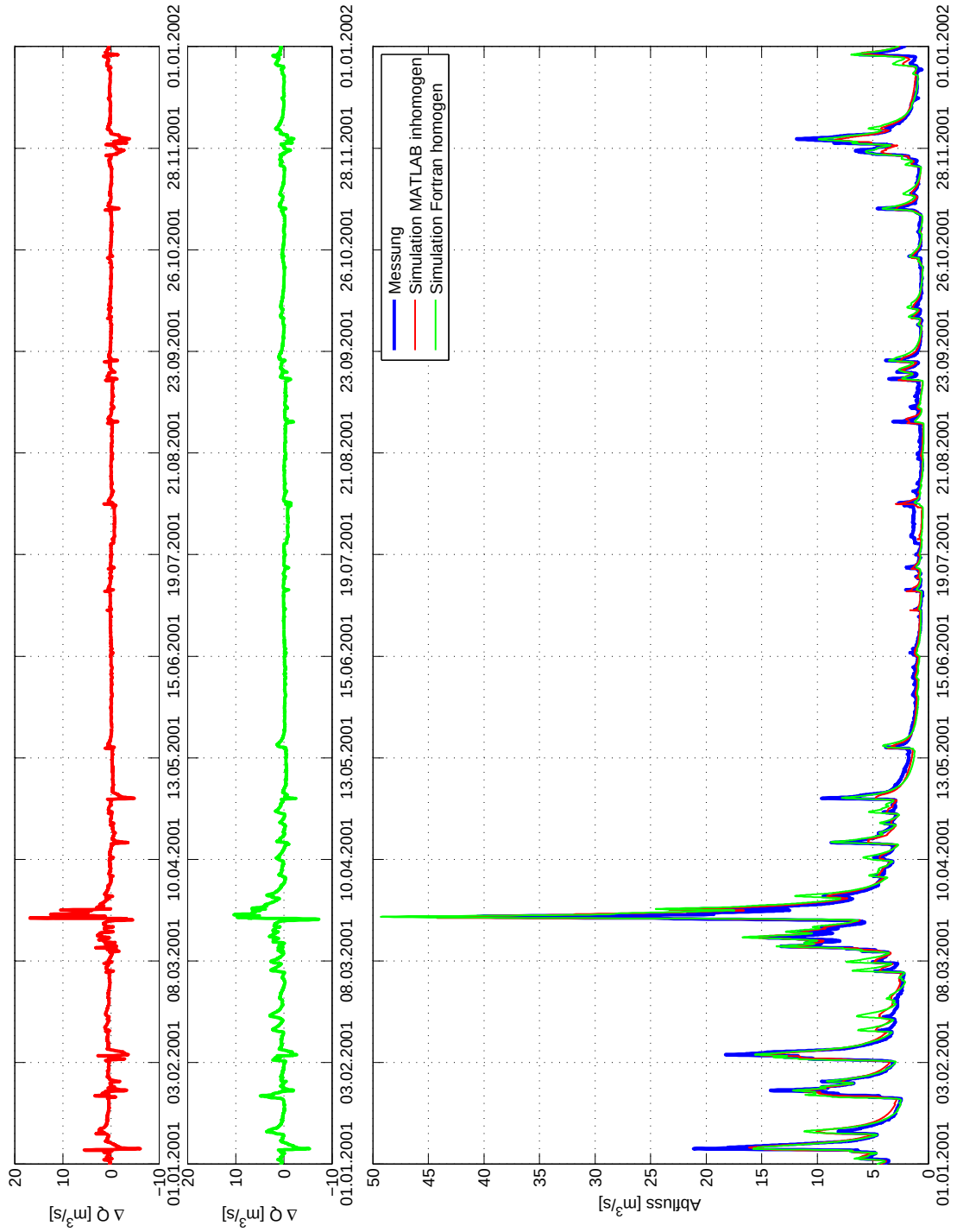

Abb. B.38. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **2001 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

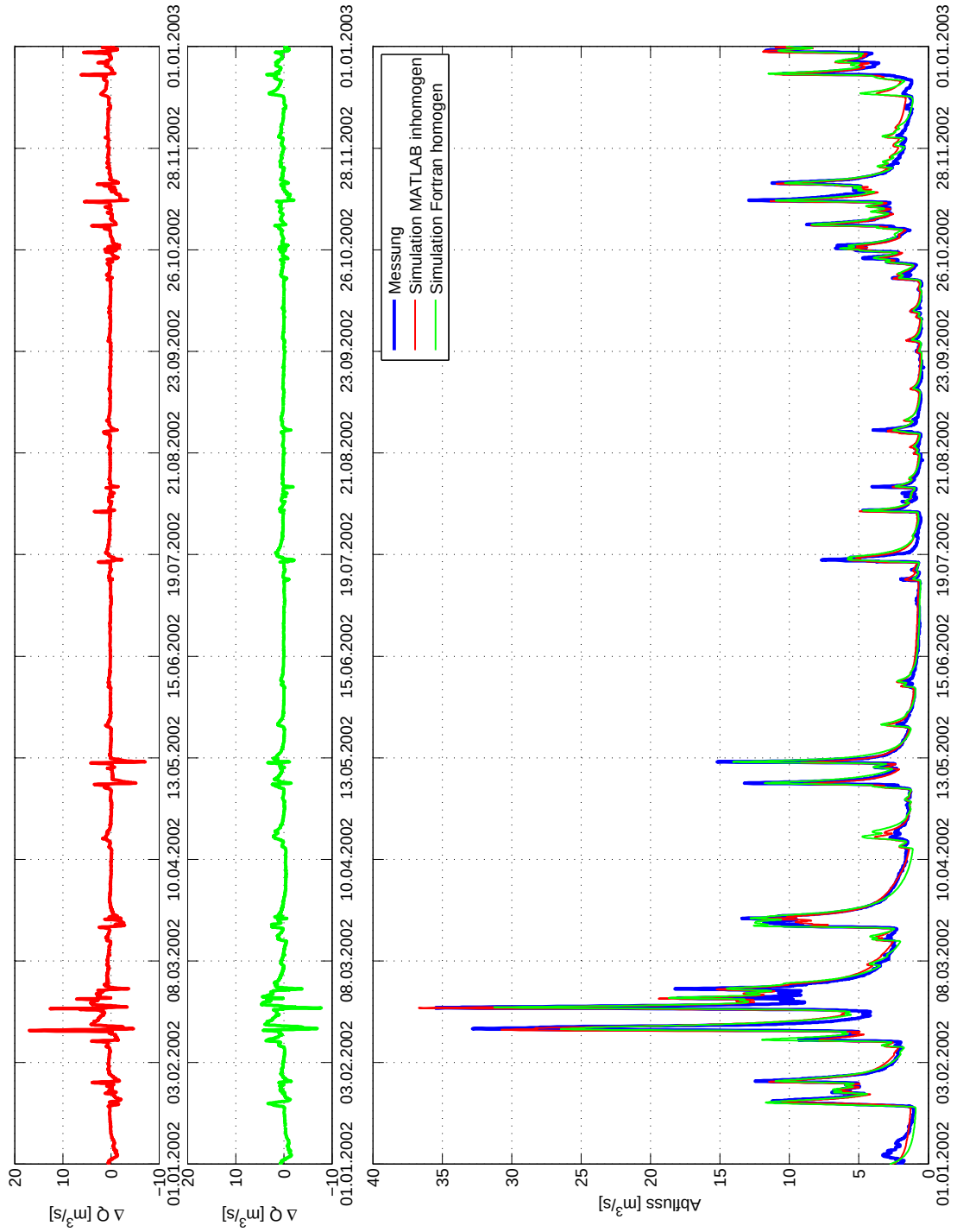

Abb. B.39. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **2002 (Validierungszeitraum, 4Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

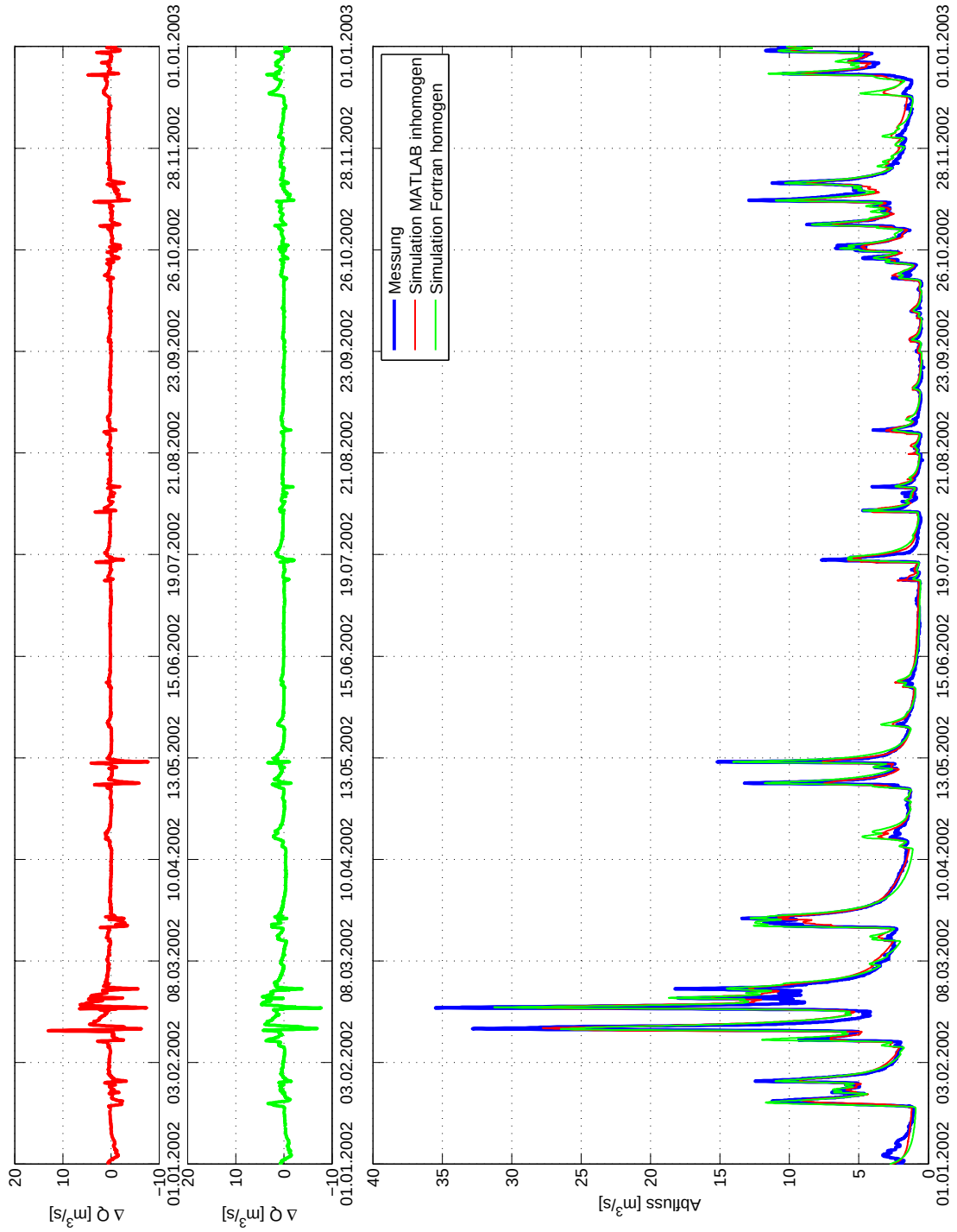

Abb. B.40. Simulierte Abflüsse im Vergleich zur gemessenen Ganglinie im Einzugsgebiet **Altenbamberg** für das Jahr **2002 (Validierungszeitraum, 12Q-Komponenten)**. In den oberen Diagrammen wird mit ΔQ die Differenz zwischen Simulation und Messung angegeben.

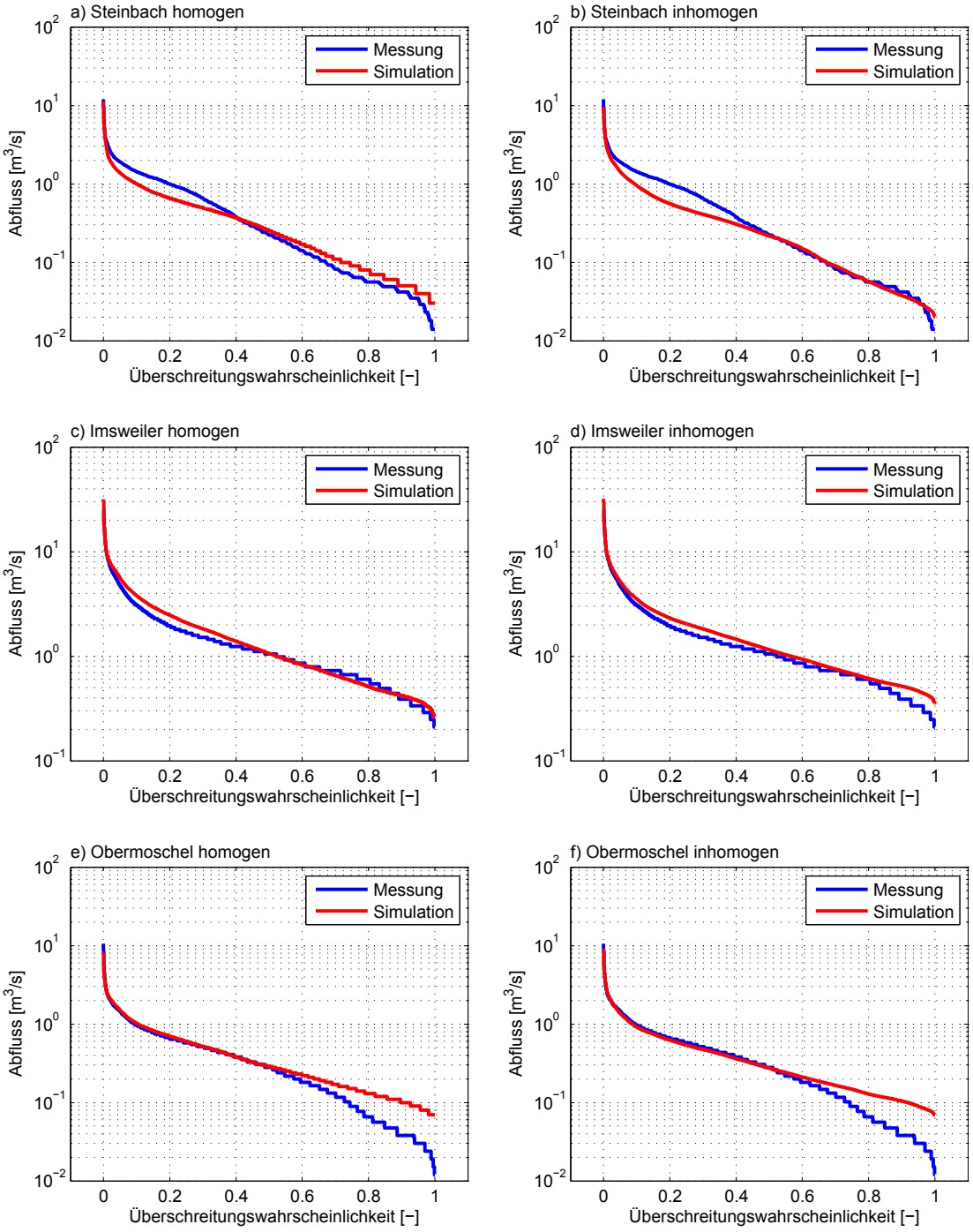

Abb. B.41. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in einfachlogarithmischer Darstellungsweise für die Einzugsgebiete Steinbach (a und b), Imsweiler (c und d) sowie Obermoschel (e und f). In der linken Spalte sind die Ergebnisse der homogenen parametrisierten Fotran-Version dargestellt, in der rechten Spalte die Ergebnisse der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version.

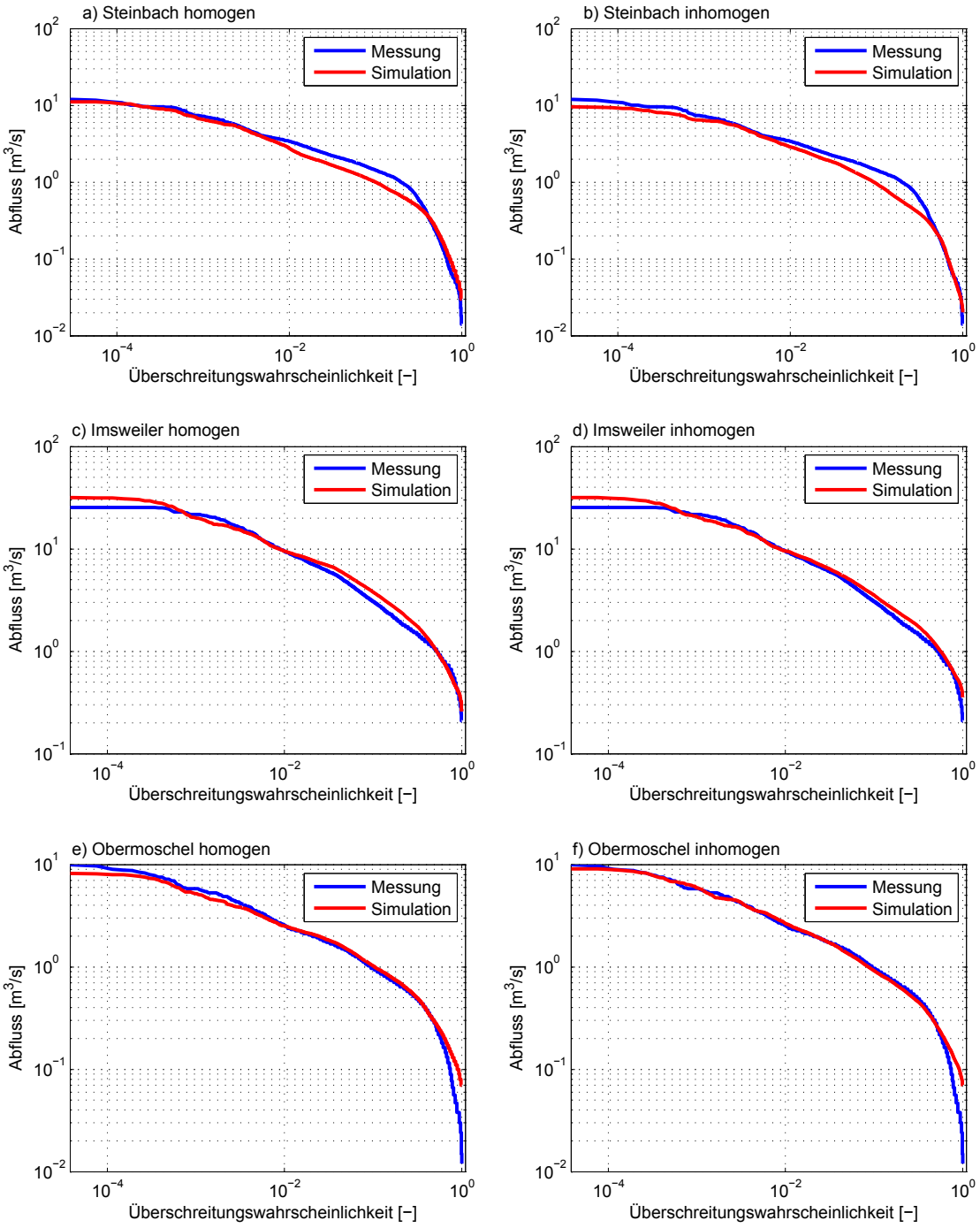

Abb. B.42. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Abflussdauerlinien der Jahre 2000-2003 in doppeltlogarithmischer Darstellungsweise für die Einzugsgebiete Steinbach (a und b), Imsweiler (c und d) sowie Obermoschel (e und f). In der linken Spalte sind die Ergebnisse der homogenen parametrisierten Fotran-Version dargestellt, in der rechten Spalte die Ergebnisse der inhomogen parametrisierten MATLAB-Version.

C

Lebenslauf

Oliver Gronz

Geburtstdatum: 1. Juli 1978
Geburtsort: Trier

Schulbildung

1984 - 1988:	Grund- und Hauptschule Waldrach
1988 - 1997:	Max-Planck-Gymnasium Trier
7/1997:	Allgemeine Hochschulreife

Hochschulausbildung

1999 - 2005:	Diplomstudiengang Angewandte Informatik, Hochschule Trier, Anwendungsfach: Technik
2005 - 2007:	Masterstudiengang Informatik, Hochschule Trier Gesamturteil: „Mit Auszeichnung bestanden“
seit 2007:	Promotion an der Universität Trier

Berufstätigkeit

1997 - 1999:	Soldat auf Zeit, Laufbahn der Offiziere
2005 - 2011:	Mitarbeiter im Institut für Innovative Informatik- Anwendungen der Hochschule Trier, Arbeitsgebiete zunächst „Hochwasservorhersage mit Fuzzy-System“ sowie „Computer unterstütze Stereotaxie“, ab 2007 Drittmittelprojekt „LARSIM“
seit 2007:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Modellbildung und Simulation“ im Fachbereich VI, Raum- und Umweltwissenschaften an der Universität Trier

D

Schriftenverzeichnis

Buch

- Gronz, Oliver: *Zieloptimierung bei tiefer Hirnstimulation*. VDM Verlag Dr. Müller AG & Co. KG, Saarbrücken, 2008

Artikel – peer reviewed

- Casper, M. C. ; Grigoryan, G. ; Gronz, O. ; Gutjahr, O. ; Heinemann, G. ; Ley, R. ; Rock, A.: *Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices*. In: Hydrology and Earth System Sciences Bd. 16 (2012), Nr. 2, S. 409-421
- Casper, Markus ; Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Johst, Margret ; Stüber, Manfred: *Fuzzy logic-based rainfall-runoff modelling using soil moisture measurements to represent system state*. In: Hydrological Sciences Journal 52(3), 2007, S. 478-490

Sonstige Artikel

- Gronz, Oliver ; Casper, Markus ; Gemmar, Peter : *Nutzung von Abflussprozessinformation in LARSIM*. In: Casper, M. ; Gronz, O. (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Bd. 33.13, 2013 - ISBN 978-3944328027, S. 131-146
- Faust, Christophe ; Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Casper, Markus: *Automatische Auswahl von Zustandsgrößen für N-A-Modelle*. In: Casper, M. ; Gronz, O. (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Bd. 28.10, 2010 - ISBN 978-3-941897-22-9, S. 201-208
- Gemmar, Peter ; Stüber, Manfred ; Greving, Martin ; Gronz, Oliver: *Automatische, datengetriebene Modellgenerierung – Entwicklung und praktische Anwendung*. In: Casper, M. ; Gronz, O. (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Bd. 28.10, 2010 - ISBN 978-3-941897-22-9, S. 187-200
- Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Fisch, Karin ; Mrosek, Peter ; Hertel, Frank ; Decker, Christian: *Automated Target Location And Trajectory Selection For Stereotactic Planning In Deep Brain Stimulation*. In: Analysis of Biomedical Signals and Images. Brno, Czech Republic, 2008

- Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Henrichs, Thorsten ; Hertel, Frank: *Advanced Methods for Target Navigation using Microelectrode Recordings in Stereotactic Neurosurgery for Deep Brain Stimulation.* In: Puuronen, Seppo (Hrsg.) ; Pechenizkiy, Mykola (Hrsg.) ; Tsymbal, Alexey (Hrsg.) ; Lee, Dah-Jye (Hrsg.): Proceedings of the Twenty-First IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems, June 17-19, 2008, Jyväskylä, Finland, IEEE Computer Society, 2008
- Casper, Markus ; Johst, Margret ; Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Stüber, Manfred: *Enhancement in flood prediction for small basins by using soil moisture observations in high spatial and temporal resolution and fuzzy logic systems.* In: Pfister, Laurent (Hrsg.) ; Matgen, Patrick (Hrsg.) ; Bos, Rudi van d. (Hrsg.) ; Hoffmann, Lucien (Hrsg.): Uncertainties in the „monitoring-conceptualisation-modelling“ sequence of catchment research, Proceedings of the Eleventh Biennial Conference of the Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins, 2006, S. 22-26
- Johst, Margret ; Casper, Markus ; Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Stüber, Manfred: *Der Einsatz von Fuzzy-Systemen zur Einbindung von Bodenfeuchteinformationen in die Niederschlag-Abfluss-Modellierung.* In: Casper, Markus (Hrsg.) ; Herbst, Marcus (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Bd. 16.06, 2006, S. 41-45
- Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Stüber, Manfred: *Effiziente Erstellung und praktischer Einsatz von NA-Modellen mittels Fuzzy-Logik und automatisierter Entwicklungsverfahren.* In: Casper, Markus (Hrsg.) ; Herbst, Marcus (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Bd. 16.06, 2006, S. 27-40
- Oechsle, Rainer ; Gronz, Oliver ; Schüler, Markus: *VisuSniff: A Tool for the Visualization of Network Traffic.* In: Mordechai, Ben-Ari (Hrsg.): Proceedings of the Second Program Visualization Workshop, 2002, S. 118-124
- Gronz, Oliver ; Oechsle, Rainer ; Schüler, Markus: *VisuSniff: Visualisierung des abgehörten Datenverkehrs eines lokalen Netzes.* In: Schulze, Thomas (Hrsg.) ; Schlechtweg, Stefan (Hrsg.) ; Hinz, Volkmar (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2002, SCS Publishing House e.V., 2002, S. 173-186

Kurzfassungen

- Casper, Markus ; Reiter, Philipp ; Gronz, Oliver ; Gutjahr, Oliver ; Heinemann, Günther ; Wittig, Marlen : *Effects of differently interpolated observational precipitation data on hydrological modeling.* In: Geophysical Research Abstracts. Bd. 15 : European Geosciences Union, 2013
- Gronz, Oliver ; Casper, Markus ; Gemmar, Peter: *Concepts to accelerate water balance model computation.* In: Geophysical Research Abstracts. Bd. 12 : European Geosciences Union, 2010
- Gemmar, Peter ; Thesen, Yannick ; Gronz, Oliver ; Hertel, Frank: *Improved targeting for DBS combining MER- and MRT-derived model structures.* In: 24th International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery CARS, Geneva, 2010

- Casper, Markus ; Gronz, Oliver ; Gemmar, Peter: *Exploring behavior of soil modules with spatially inhomogeneous parameters in water balance models.* In: Geophysical Research Abstracts. Bd. 12 : European Geosciences Union, 2010
- Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Faust, Christophe ; Casper, Markus: *Data driven model generation based on computational intelligence.* In: Geophysical Research Abstracts. Bd. 12 : European Geosciences Union, 2010
- Gronz, Oliver ; Casper, Markus ; Gemmar, Peter: *Spatially Distributed Estimation of Mesoscale Water Balance Model Parameters using Hydrological Soil Maps.* In: Geophysical Research Abstracts. Bd. 11 : European Geosciences Union, 2009
- Faust, Christophe ; Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Casper, Markus: *Generating Fuzzy Logic-Based Rainfall-Runoff Models Using Self-Organizing Maps.* In: TIES Bologna, 2009
- Gronz, Oliver ; Gemmar, Peter ; Casper, Markus: *Restricting Parameter Space in Mesoscale Water Balance Models using Hydrological Soil Maps.* TIES Bologna, 2009
- Gronz, Oliver ; Casper, Markus ; Gemmar, Peter: *Automatic Analysis of hydrologic Time Series using Time Series Knowledge Mining to identify System States.* In: Richter, Arne (Hrsg.): Geophysical Research Abstracts Bd. 10, European Geosciences Union, 2008
- Gronz, Oliver ; Gemmar, Peter ; Hertel, Frank ; Decker, Christian: *Matching of Microelectrode Recording and MRI Data for 3D Target Visualization in Functional Stereotactic Surgery.* In: Bosch, D. A. (Hrsg.) ; Broggi, G. (Hrsg.) ; Krauss, J. K. (Hrsg.) ; Lazorthes, Y. (Hrsg.) ; Villemure, J. G. (Hrsg.): Abstracts of the Proceedings of the XVIIth Congress of the European Society for Stereotactic and Functional Neurosurgery (ESSFN), Montreux, Switzerland, October 4-7, 2006, Springer Wien, 2006, S. 60.
- Johst, Margret ; Casper, Markus ; Gemmar, Peter ; Gronz, Oliver ; Stüber, Manfred: *Using fuzzy systems to integrate soil moisture information into rainfall runoff models.* In: Richter, Arne (Hrsg.): Geophysical Research Abstracts Bd. 8, European Geosciences Union, 2006

Qualifikationsarbeiten

- Gronz, Oliver: *DropDelayRelay - Simulierte Verluste und Verzögerungen bei der Übertragung von Audio- und Videodaten mit dem Java Media Framework.* Hochschule Trier, Projektarbeit, 2005, unveröffentlicht
- Gronz, Oliver: *Verfahrensentwicklung zur Erstellung eines patientenspezifischen Hirnatlasses zur intraoperativen Auswahl von Makroelektroden.* Hochschule Trier, Diplomarbeit, 2005, unveröffentlicht, ausgezeichnet mit dem Wiso-Preis
- Gronz, Oliver: *Automatische Analyse hydrologischer Zeitreihen zur datengetriebenen Modellbildung.* Hochschule Trier, Master Abschlussarbeit, 2007, unveröffentlicht