

# 5 Verknüpfung von Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren für eine sicherere Bestimmung der Modellparameter

Die Ergebnisse des Kapitels 4 haben gezeigt, dass die Abflusskonzentration anhand der entwickelten Modellstruktur erfolgreich und effizient modelliert werden kann. Die Kopplung des Sickerraummoduls an das Bodenwasserhaushaltsmodell und an das Grundwassermodell führt zu einer kompletteren und prozess-basierten Abbildung der Abflusskonzentrationsprozesse. Sie haben aber auch gezeigt, dass die einfache inverse Modellierung auf Grund der Wechselbeziehungen zwischen den Modellparametern keine gut bestimmten Parameterwerte ableiten kann, um darauf eine physikalische Interpretation der Modellergebnisse aufzubauen. Diese Erkenntnis nimmt dem Modell den Anspruch prozess-basiert zu sein. Dieses Kapitel soll dieses Problem durch seine Betrachtung als eine Kombination zwischen einem klassischen Modellierungsproblem und einer Fragestellung der Regionalisierung hydrologischer Parameter lösen.

Kapitel 5.1 stellt die Problematik der Regionalisierung in der Hydrologie vor, beschreibt die Hauptansätze und das Konzept der Lösung, die für diese Arbeit ausgewählt wurde. Kapitel 5.2 fasst die Modellierungsstrategie zusammen: die Auswahl und die Berechnung der Gebietsmerkmale, die in der Regionalisierung verwendet wurden, sowie die Implementierung des Regionalisierungsverfahrens in das Modell. Die Ergebnisse der Anwendung auf die Gebiete der Ammer und der Naab werden dann in Kapitel 5.3 vorgestellt, gefolgt von ihrer physikalischen Interpretation in Kapitel 5.4. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse werden in Kapitel 5.5 zusammengefasst.

## 5.1 Regionalisierung in der Hydrologie

„Regionalisierung hydrologischer Parameter ist deren Übertragung und Verallgemeinerung über unterschiedliche Räume und Zeiten hinweg“ (KOBUS 1992). Diese allgemeine Definition wird für die Zwecke dieses Kapitels eingeschränkt: Unter Regionalisierung versteht man hier das Aufstellen von Beziehungen (Übertragungsfunktionen), die die hydrologisch abhängigen Parameter (z.B. eine mittlere Abflusszeit) mit messbaren unabhängigen gebietsspezifischen Merkmalen (z.B. das Gefälle des Geländes) in Verbindung setzen. Es geht um die explizite Übertragung der natürlichen räumlichen Variabilität auf die Variabilität der Parameter hydrologischer Verfahren und Modelle. Zur Regionalisierung gehören auch die Ermittlung des Gültigkeitsbereiches, des Spektrums der Gebietseigenschaften und der Eingangsgrößen, für die diese Beziehungen anwendbar sind, sowie die Schätzung der Unsicherheit der Beziehungen.

Die Bedeutung von Regionalisierungsverfahren hat zweierlei Gründe:

- Durch die Regionalisierung wird der Anwendungsbereich der konzeptionellen hydrologischen Modelle wesentlich erweitert. Wegen ihrer Konzeptionalität können die Modelle nur auf Gebiete und unter Randbedingungen angewandt werden, für die langjährige Messdaten vorhanden sind. Wenn diese Daten, die für die Kalibrierung des Modells unbedingt notwendig sind, nicht in der Vergangenheit gemessen wurden, lässt sich die gestellte hydrologische Aufgabe nicht lösen. Diese Situation betrifft nicht nur Gebiete, für die es keine Messdaten gibt. Die Untersuchung der Wirkungen extremer klimatischer Ereignisse oder veränderter klimatischer und sozioökonomischer Bedingungen bedeutet auch das Durchführen von Simulationen für Situationen, die bis jetzt noch nicht beobachtet wurden; das Modell kann also dafür auch nicht kalibriert werden.

Die Regionalisierung hingegen erzielt die Bestimmung von Übertragungsfunktionen, die die Parameterbestimmung allein auf Grund der Kenntnis physikalischer Merkmale ermöglicht. Damit entfällt die Notwendigkeit der Modellkalibrierung vor jeder neuen Modellanwendung. Auch wenn die Übertragungsfunktionen am Anfang ebenfalls kalibriert werden müssen, wird erhofft, dass sie wegen ihrer stärkeren Verbindung zu den festen Gebietseigenschaften einen größeren Anwendungsbereich als die direkt angepassten Modellparameter haben.

- Beim Aufbau von hydrologischen Modellen wird meist angestrebt, möglichst viel Prozessverständnis in das Modell zu integrieren. Durch die „blinde“ Nutzung inverser Modellierung für die Berechnung der Parameterwerte wird das Modell aber praktisch zu einer Black-Box. Solange die Modelle allein von den Eingangs- und Ausgangssignalen konditioniert werden, ist ihr Anspruch, prozess-basiert zu sein, und die Begründung des zusätzlichen benötigten Aufwands berechtigterweise angreifbar (BEVEN 1989).

Wenn aber durch ein Regionalisierungsverfahren Beziehungen zwischen Werten der Modellparameter und messbaren Gebietseigenschaften nachweisbar sind und wenn diese Beziehungen dem physikalischen Verständnis entsprechen, ist die Berechtigung des oben genannten Anspruches wieder gegeben.

Für die Bestimmung der regionalisierenden Übertragungsfunktionen können die existierenden Lösungen in zwei große Gruppen eingeteilt werden:

- Auch wenn die physikalischen Grundgesetze in das angewandte Modell nicht direkt implementiert sind, ist es oft möglich, die Modellgleichungen davon durch systematische Vereinfachungen (meist unter der Annahme räumlicher Homogenität) abzuleiten. Die Modellparameter lassen sich dann als Funktion der Parameter der Grundgesetze berechnen, und gerade dies ist das Ziel der Regionalisierung. Beispiele der Anwendung dieses Ansatzes sind in SCHMIDT (1992), RIEDEL und MANIAK (1999) u.a., sowie in WITTENBERG (1997) und SCHWARZE et al. (1999) (deren Arbeiten in Kap. 3.2.3 bereits beschrieben wurden) zu finden.

Wenn die effektiven Parameter der Abflusskonzentration für den Grundwasser- oder den Sickerraum das Objekt der Regionalisierung sind, lässt sich diese

Lösung leider nicht sinnvoll einsetzen. Sie würde z.B. wie in Gl. 3.6 (Kap. 3.2.3) zu einer Beziehung zwischen dem gesuchten Parameter und der mittleren Durchlässigkeit des Untergrundes führen. Dieser letzte Wert ist zwar aus Punktmessungen (Bohrkernanalyse, Pumpversuche) bekannt, er enthält aber nicht die Heterogenitäten, die auf der Gebietsskala dominant sind.

- Die zweite Lösung besteht darin, die Modellparameter für möglichst viele Fälle unabhängig voneinander anhand inverser Modellierung zu bestimmen, um sie dann gemeinsam zu analysieren und die gesuchten Beziehungen mittels statistischer Verfahren zu identifizieren. Lineare (wie in Kap. 3.5) oder nichtlineare Regressionsanalyse, aber auch neuronale Netze, taxonometrische Methoden u.a. kommen zum Einsatz (z.B. STREIT 1992, LACEY und GRAYSON 1998, HABERLAND et al. 2001).

Problematisch ist hier die Annahme, dass die inverse Modellierung für die einzelnen Fälle (Teileinzugsgebiete) zur Bestimmung von sinnvollen physikalisch interpretierbaren Parameterwerten führt. Wie die Ergebnisse in Kapitel 4 jedoch deutlich gezeigt haben, ist die Unsicherheit, mit der diese Bestimmung assoziiert wird, sehr groß. Eine darauf basierende Regionalisierung würde mit einer Unsicherheit behaftet sein, die mindestens genau so groß ist wie die der einzelnen Werte.

Wegen der Schwächen beider Lösungen wird in der vorliegenden Arbeit eine dritte angewandt. HUNDECHA und BÁRDOSSY (2004) schlagen eine wesentliche Veränderung der zweiten Lösung vor. Statt die Regionalisierung nach der Kalibrierung einzelner Teileinzugsgebiete durchzuführen, integrieren sie die Regionalisierung selbst in das Kalibrierungsverfahren. Nicht die einzelnen Modellparameter, sondern die Koeffizienten der Übertragungsfunktionen zwischen Modellparametern und Gebietseigenschaften werden nun direkt kalibriert. Die Anpassung dieser Koeffizienten geschieht nicht unabhängig für jedes Teileinzugsgebiet, sondern die Modellgüte für eine Auswahl von Gebieten wird gleichzeitig optimiert. Die Auswahl muss für das geplante Gesamtanwendungsgebiet des Modells möglichst repräsentativ sein, was die Variabilität der Gebietsmerkmale betrifft, die in der Regionalisierung mit berücksichtigt werden.

Das Konditionieren der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen an die gleichzeitige Güte des Modells in mehreren Gebieten könnte zu einer kleineren Unsicherheit führen, die dann auf die Parameterwerte und auf ihre physikalische Interpretierbarkeit übertragbar wäre. Dieser Aspekt wird auch dadurch verstärkt, dass die Validierung des Modells nicht nur zeitlich (durch die Teilung der Zeitreihen in zwei Perioden) sondern auch räumlich erfolgen kann, indem die Übertragungsfunktionen auf neue Gebiete angewandt werden.

HUNDECHA und BÁRDOSSY (2004) benutzten diesen Ansatz, um den Einfluss potentieller Landnutzungsänderungen auf den Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Rheins zu untersuchen. Sie erzielten damit sehr gute Ergebnisse sowohl für die geprüfte Modellgüte als auch für die Interpretation der getesteten Szenarien für die Landnutzung. Mehrere Aspekte blieben allerdings noch ungeklärt (nach Wissen des Autors der vorliegenden Arbeit): die Sensitivität des Verfahrens gegenüber der Kalibrierungsauswahl von Teileinzugsgebieten und die Unsicherheit in der Bestimmung

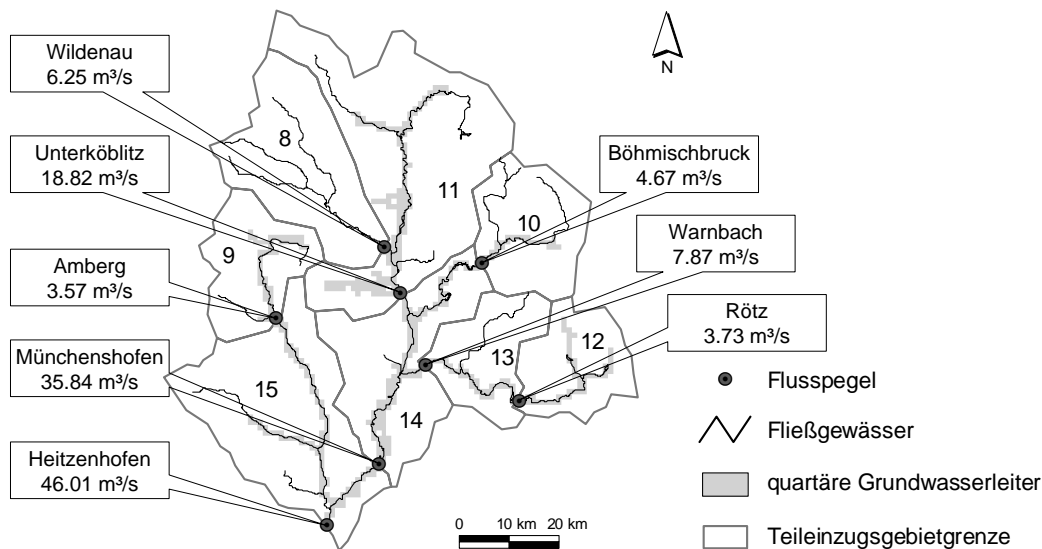


Abbildung 5.1: Das Einzugsgebiet der Naab.

der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen. In den nächsten Abschnitten dieses Kapitels wird der Ansatz auch unter diesen Gesichtspunkten geprüft.

## 5.2 Modellkonzept und Modellierungsstrategie

Um der Studie mehr Aussagekraft zu geben, wurde die Regionalisierung nicht nur für das Gebiet der Ammer, sondern auch für das Gebiet der Naab (Kap. 2.5.2) durchgeführt. Abb 5.1 stellt die Lage der Flusspegel (mit dem Namen des Pegels und dem Abflussmittelwert) und die Umrisse der darauf basierenden Teileinzugsgebiete, sowie das Oberflächengewässernetz und die Umrisse des quartären Aquifers dar. Mittels der acht Pegel wurde das Naabgebiet in acht Teileinzugsgebiete mit einer mittleren Fläche von 680 km<sup>2</sup> eingeteilt. Mit dem Ammergebiet waren somit insgesamt 15 Teileinzugsgebiete mit Daten (Abflussmessdaten an den Flusspegeln und Ergebnisse von PROMET-Berechnungen) für die Periode 01.11.1990-03.01.1999 verfügbar. Die letzten fünf Jahre dienten der Kalibrierung, die ersten drei der Validierung. Wie in Kapitel 4 wurde der Modellinput, die PROMET-Ergebnisse, mit den gemessenen Flussdaten volumenmäßig korrigiert. Für jedes flussabwärts liegende Teileinzugsgebiet wurden die gemessenen und nicht die berechneten Ganglinien für den Eingang aus den flussaufwärts liegenden Gebieten benutzt.

Der Regionalisierungsansatz wurde auf die gleiche Modellstruktur wie im Kapitel 4 (Abbildung 4.2) angewandt. Da die bis jetzt gewonnenen Ergebnisse gezeigt haben, dass der Einfluss der Integration des MODFLOW-Modells für die Diskussion der Unbestimmbarkeit der Modellparameter nicht wesentlich ist, wurde die Modellversion Fall 1 (mit einer linearen Speicherkaskade als Grundwassermodul) benutzt. Die Ergebnisse für Fall 1 gelten auch für Fall 2, nur dass man dafür deutlich kürzere Rechenzeiten benötigt.

Die Analyse konzentriert sich auf die Bestimmung der vier Parameter, die die Fließvorgänge im Untergrund charakterisieren:  $s$  (der Separationsparameter zwischen

horizontalem Zwischenabfluss und vertikaler Sickerung),  $n_2 \cdot k_2$  (die mittlere Fließzeit des horizontalen Zwischenabflusses - Modul E2),  $n_3 \cdot k_3$  (die mittlere Fließzeit der vertikalen Sickerung - E3),  $n_4 \cdot k_4$  (die mittlere Fließzeit der Grundwasserströmung - E4). Für die Parameter der Module E1 (Oberflächenabfluss) und E5 (Routing im Gerinne) wurden die Medianwerte der Pareto-Lösungen der Kalibrierung einzelner Teileinzugsgebiete festgesetzt.

Die Regionalisierung stützt sich auf zwei Gruppen von Gebietsmerkmalen, mit denen man konzeptionell die Fließprozesse im Untergrund beschreiben kann: quantitative Indikatoren der Morphologie und qualitative hydrogeologische Klassifizierung. Zur ersten Gruppe gehören folgende Eigenschaften:

- $x_1$ : die Fläche des Teileinzugsgebietes [km<sup>2</sup>];
- $x_2$ : die mittlere Geländehöhe [mNN] (gemittelt auf Grundlage des DGM mit der Auflösung 1000m × 1000m);
- $x_3$ : die Standardabweichung der Geländehöhe [m];
- $x_4$ : der Formfaktor [-] (die Fläche geteilt durch den Umfang und dann normiert mit dem Radius des Kreises mit der gleichen Fläche wie das Teileinzugsgebiet).

Aus den zehn hydrogeologischen Klassen, die für das Gesamtgebiet der Oberen Donau definiert wurden (siehe Kap. 2.5), finden sich acht in den Gebieten der Ammer oder der Naab wieder. Der Anteil der Fläche eines Teileinzugsgebietes, der einer Klasse zugeteilt wurde, diente als Regionalisierungsparameter (siehe auch Tabelle 2.5):

- $x_5$ : Anteil an BK1 - Paläozoikum des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes [-];
- $x_6$ : Anteil an BK3 - Kalkalpen [-];
- $x_7$ : Anteil an BK4 - Außeralpiner Jura (Lias und Dogger) und Trias [-];
- $x_8$ : Anteil an BK5 - Malm, bedeutender Karstaquifer [-];
- $x_9$ : Anteil an BK6 - Außeralpine Kreide [-];
- $x_{10}$ : Anteil an BK7 - Tertiär, überwiegend Molassesedimente [-];
- $x_{11}$ : Anteil an BK8 - Quartäre Moränensedimente [-];
- $x_{12}$ : Anteil an BK10 - Quartäre Aquifere, alluviale Kies- und Sandablagerungen [-];

Mit den Gebietseigenschaften  $x_i, i = 1, 12$  sind für die vier Modellparameter vier Übertragungsfunktionen  $G_j$  mit insgesamt  $4 \cdot 12 = 48$  Regionalisierungskoeffizienten  $a_k$  zu bestimmen:

$$G_j(x) = \sum_{i=1}^{12} a_k \cdot x_i, k = (j - 1) \cdot 12 + i. \quad (5.1)$$

Die Übertragungsfunktion für  $s$ ,  $G_1$ , hat die Koeffizienten  $a_k, k = 1, 12$ , für  $n_2 \cdot k_2$  hat  $G_2$  die Koeffizienten  $a_k, k = 13, 24$ , für  $n_3 \cdot k_3$  hat  $G_3$  die Koeffizienten  $a_k, k = 25, 36$ , für  $n_4 \cdot k_4$  hat  $G_4$  die Koeffizienten  $a_k, k = 37, 48$ . Das Regionalisierungsproblem

besteht also darin, die Werte der 48 Koeffizienten zu bestimmen, um damit für die 15 Teileinzugsgebiete  $4 \cdot 15 = 60$  Modellparameter zu berechnen. Obwohl die Anzahl der Unbekannten nicht viel kleiner als die Anzahl der Parameter ist, müssen die 48 Koeffizienten in allen Teileinzugsgebieten gleichzeitig zu guten Ergebnissen führen. Diese Anforderung ist deutlich härter, als bei der Anpassung von jeweils vier Parametern an die Modellgüte eines einzelnen Teileinzugsgebietes. Der Ansatz lässt sich auf beliebig viele Gebiete erweitern: Für das Gesamtgebiet der Oberen Donau gäbe es zwar 56 statt 48 Koeffizienten (weil mehr hydrogeologische Klassen), die könnten aber für die Berechnung von  $4 \cdot 210 = 840$  Modellparametern benutzt werden. Das Potential der Methode ist also erheblich.

Für die Bewertung der Modellgüte wurden die Zielfunktionen  $O_i, i = 1, 5$  (Kap. 4.2.4) benutzt. Sie wurden jeweils für jedes Teileinzugsgebiet berechnet und dann über alle Gebiete mit einem Kompensationsfaktor gleich 2 gemittelt, der den schlechteren Werten mehr Gewicht gibt ( $O_i \leq 1$  mit dem Wert 1 für eine perfekte Anpassung). Das Ergebnis der Mittelung ist die Funktion, die in der Optimierung angepasst wurde.

Um mit der bisherigen Strategie konsistent zu bleiben, wurden auch hier die Mehrziel-Optimierung und die GLUE-Analyse in der gleichen Art und Weise wie bisher eingesetzt (Kap. 4.2.5 und 4.2.6). Für die Mehrziel-Optimierung wurden 210 Wichtungskombinationen  $w_i, i = [1, 5]$  gebildet (mit den Nebenbedingungen  $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$  und  $w_i \in [0; 0.167; 1]$ ), die zu 210 Punkten in der Pareto-Lösung führten. Zwei unterschiedliche Fälle wurden untersucht:

**Fall a** die  $a_i, i = 1, 48$  Koeffizienten wurden anhand einer Auswahl von sechs Teileinzugsgebieten (2, 5, 8, 10, 12, 14 - die Nummerierung der Gebiete ist in Abb. 4.3 und 5.1 verdeutlicht) kalibriert. Die Auswahl wurde so getroffen, dass ihre innere Variabilität der Gebieteigenschaften vergleichbar mit der Variabilität der Gruppe mit allen Teileinzugsgebieten ist. Es wäre nicht sinnvoll gewesen, die Übertragungsfunktionen für Gebiete mit der mittleren Geländehöhe zwischen 200 mNN und 500 mNN zu kalibrieren, um sie später auf ein Gebiet mit 1000 mNN anzuwenden. Tabelle 5.1 stellt die Spannweite der Werte der zwölf Regionalisierungsparameter  $x_i$  für die Kalibrierungsauswahl und für alle untersuchten Teileinzugsgebiete vor.

**Fall b** die  $a_i, i = 1, 48$  Koeffizienten wurden anhand aller fünfzehn Teileinzugsgebiete kalibriert.

Für den Fall a wird die Anpassung der  $6 \cdot 4 = 24$  Parameterwerte mit der Anpassung von  $12 \cdot 4 = 48$  Werten der Koeffizienten ersetzt. Das scheint erst nicht sinnvoll zu sein. Dabei muss man bemerken, dass dies nicht als die übliche Überparametrisierung interpretiert werden sollte, weil die 48 Koeffizienten ganz andere Bedingungen (gute Ergebnisse in den sechs Kalibrierungsgebieten und in den neun Validierungsgebieten) als die 24 Parameter (gute Modellergebnisse in jeweils einem Teileinzugsgebiet) erfüllen müssen.

In der GLUE-Analyse bilden  $10^6$  zufällig generierte Koeffizientensätze die a priori Verteilung. Die Grenzwerte für die Modellgüte zwischen behavioural und non-behavioural Modellen wurde ursprünglich zu  $O_i^{best} - d$ , mit  $d = 0.1$  gesetzt ( $O_i^{best}$  ist das Einzieloptima),  $d$  wurde wie später berichtet (Kap. 5.3) verändert. Um als

Gebietseigenschaft		Kalibrierungsauswahl		Alle Teileinzugsgebiete	
		Min	Max	Min	Max
Fläche [km <sup>2</sup> ]	$x_1$	43.39	1006.57	42.18	1327.43
Mittel_DGM [mNN]	$x_2$	436.20	1229.35	436.20	1310.07
Stabw_DGM [m]	$x_3$	52.64	155.16	36.97	269.79
Formfaktor [-]	$x_4$	0.51	0.89	0.44	0.89
Anteil an BK1 [%]	$x_5$	0.00	92.00	0.00	99.00
Anteil an BK3 [%]	$x_6$	0.00	94.00	0.00	94.00
Anteil an BK4 [%]	$x_7$	0.00	54.00	0.00	54.00
Anteil an BK5 [%]	$x_8$	0.00	66.00	0.00	66.00
Anteil an BK6 [%]	$x_9$	0.00	22.00	0.00	42.00
Anteil an BK7 [%]	$x_{10}$	0.00	16.00	0.00	32.00
Anteil an BK8 [%]	$x_{11}$	0.00	39.00	0.00	58.00
Anteil an BK10 [%]	$x_{12}$	2.00	47.00	1.00	47.00

**Tabelle 5.1:** Spannweite der Werte der Gebietseigenschaften für die Kalibrierungsauswahl und für alle untersuchten Teileinzugsgebiete

behavioural klassifiziert zu werden, muss ein Koeffizientensatz die Bedingung  $O_i > O_i^{best} - d$  für alle fünf Zielfunktionen, alle 15 Teileinzugsgebiete und für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum erfüllen: es gibt insgesamt also 150 Bedingungen.

In beiden Fällen wurde der Raum, in dem den Koeffizienten Werte zugeteilt werden durfte, anhand des zulässigen Raumes  $\mathbb{P}^n$  (Kap. 4.2.3) für die Modellparameter bestimmt. Die Verteilungen der Koeffizienten-Werte innerhalb der Pareto- und GLUE-Sätze wurden als Maß für die strukturelle Unsicherheit des Regionalisierungsansatzes benutzt. Darauf basierend ließen sich die entsprechenden Spannweiten für die Modellparameter selbst berechnen. Bei den Pareto-Sätzen diente der Vergleich zwischen Fall a und Fall b als Test für die Sensitivität des Ansatzes gegenüber der Kalibrierungsauswahl.

## 5.3 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse

Wie in Kapitel 4 wird die Vorstellung der Modellierungsergebnisse in zwei Kapitel untergeteilt. Kap. 5.3.1 diskutiert die Güte des Modells, Kap. 5.3.2 die Analyse der Koeffizienten- und Parameterwerte und ihrer Bestimmbarkeit. Für beide Fälle werden zuerst die Ergebnisse der Mehrziel-Optimierungs- und dann die der GLUE-Analyse vorgestellt.

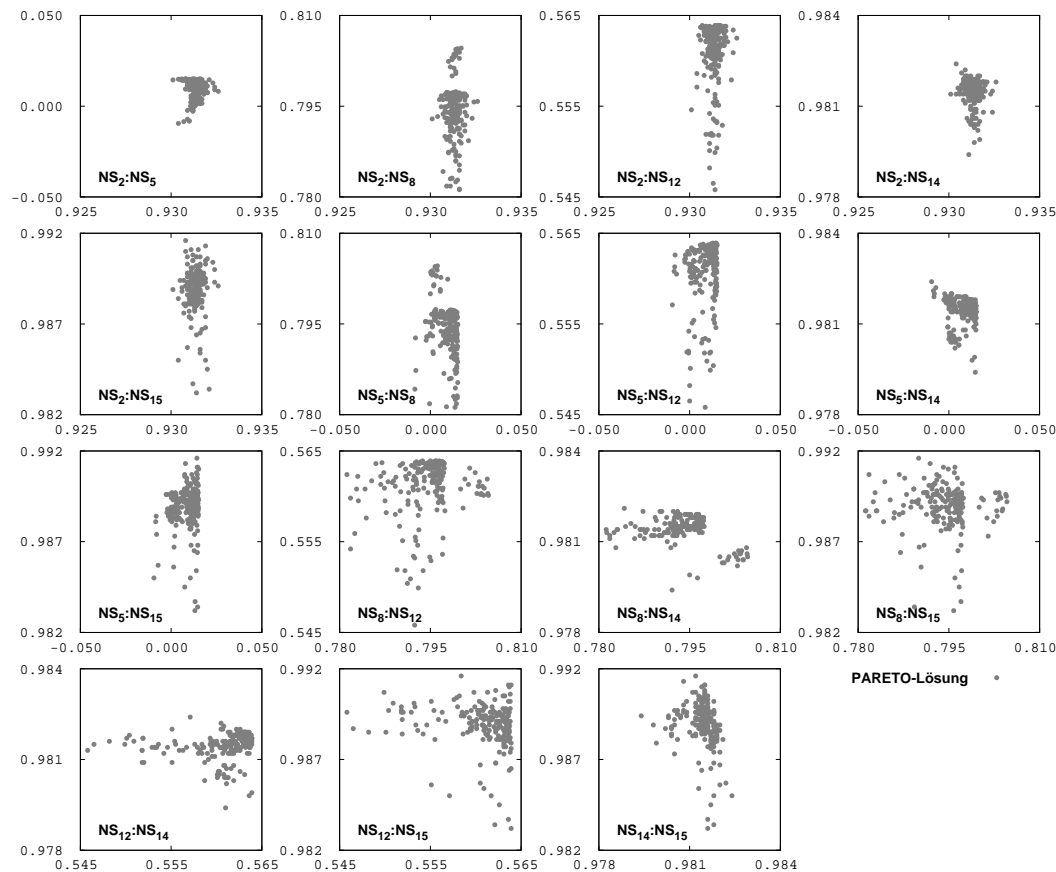
### 5.3.1 Analyse der Güte der Modellergebnisse

#### Ergebnisse der Mehrziel-Optimierungsanalyse

Abb 5.2 zeigt die Pareto-Lösung im Kriterienraum: Die  $O_1$ -Werte (die Nash-Sutcliff-Effizienz) für die verschiedenen Teileinzugsgebiete der Kalibrierungsauswahl werden dargestellt. Ohne Ausnahme sind die Pareto-Lösungen miteinander nicht korreliert. Dies ist ein Beweis, dass die Verbesserung der Modellgüte jedes Teileinzugsgebietes tatsächlich eine unabhängige Bedingung für das Konditionieren der Regionalisierungskoeffizienten bildet.

Tab 5.2 fasst die Gütewerte für alle Teileinzugsgebiete für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode für Fall a und Fall b zusammen. Die erste wichtige Bemerkung

## 5 Verknüpfung von Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren



**Abbildung 5.2:** Pareto-Lösung im Kriterienraum für Fall a. Die Werte wurden über die vier berechneten Zeitskalen (1, 2, 15, 30 d) gemittelt.

ist, dass sich die Werte der beiden Fälle kaum unterscheiden: Trotz einzelner Abweichungen innerhalb des 150 Gütewerte umfassenden Datensatzes ist die große Mehrheit der Lösungen gleich gut. Das Ergebnis zeigt, dass der Regionalisierungsansatz gegenüber der Kalibrierungsauswahl insensitiv ist. Sobald die Bedingung, dass die Auswahl repräsentativ sein soll, erfüllt ist, besteht keine Notwendigkeit, zusätzliche Teileinzugsgebiete in der Kalibrierung mit zu berücksichtigen. Die Bedeutung dieser Erkenntnis liegt vor allem im Einsparungspotential in der CPU-Leistung für Studien, die eine große Anzahl von Teileinzugsgebieten untersuchen.

Viele Gütewerte zeigen bei der Validierungsperiode eine deutliche Verschlechterung gegenüber der Kalibrierungsperiode. Wie bereits erwähnt, wird für die Kalibrierung hydrologischer Modelle ein Zeitraum von mindestens zehn Jahre für ein stabiles Ergebnis empfohlen (SMITH et al. 2003). Die schlechteren Validierungsergebnisse zeigen eindeutig, dass die fünf Jahre der Kalibrierungsperiode, die von der Datenverfügbarkeit vorgegeben wurden, zu wenig waren, und bestätigen damit die Literaturangaben.

Der Erfolg des Regionalisierungsansatzes muss gegenüber den Ergebnissen der normalen inversen Modellierung bewertet werden. Mathematisch ist eine Verschlechterung auf jeden Fall zu erwarten, weil die einzelne Kalibrierung jedes Teileinzugsgebietes räumlich eine Gruppe von Einzel-Optima bildet. Tabelle 5.3 fasst den Vergleich der beiden Lösungen zusammen. Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede zwi-



Fall a: Regionalisierung anhand der Teileinzugsgebiete 2, 5, 8, 12, 14 und 15

	Pegel	Tez	Kalibrierungsperiode					Validierungsperiode				
			NS	NS <sub>dr</sub>	NS <sub>ndr</sub>	SAE	NS <sub>tr</sub>	NS	NS <sub>dr</sub>	NS <sub>ndr</sub>	SAE	NS <sub>tr</sub>
Gebiet der Ammer	Fischen	1	0.95	0.90	0.95	0.93	0.97	0.94	0.88	0.91	0.92	0.95
	Weilheim	2	<b>0.93</b>	<b>0.94</b>	<b>0.89</b>	<b>0.90</b>	<b>0.93</b>	0.94	0.93	0.94	0.91	0.95
	Peissenberg	3	0.78	0.79	0.70	0.78	0.77	0.72	0.77	0.62	0.76	0.68
	Oberammergau	4	-0.07	-0.19	-0.30	0.57	-0.05	-0.43	-0.62	-1.88	0.52	-0.20
	Unternogg	5	<b>0.02</b>	<b>-0.02</b>	<b>-0.08</b>	<b>0.47</b>	<b>0.01</b>	0.08	0.01	-0.01	0.44	0.08
	Oberhausen	6	0.72	0.62	0.71	0.78	0.73	0.66	0.55	0.69	0.75	0.66
	Obernach	7	0.06	0.01	0.03	0.34	0.06	0.02	0.02	-0.01	0.29	0.00
Gebiet der Naab	Wildenau	8	<b>0.80</b>	<b>0.75</b>	<b>0.80</b>	<b>0.73</b>	<b>0.76</b>	0.60	0.55	0.42	0.71	0.65
	Amberg	9	0.59	0.60	0.48	0.71	0.54	0.19	0.26	-0.17	0.74	0.22
	Böhmischbruck	10	0.50	0.37	0.47	0.63	0.49	0.02	0.00	-0.25	0.58	0.02
	Unterköblitz	11	0.86	0.83	0.83	0.77	0.83	0.57	0.51	0.40	0.69	0.56
	Rötz	12	<b>0.56</b>	<b>0.42</b>	<b>0.58</b>	<b>0.69</b>	<b>0.59</b>	0.32	0.13	0.06	0.68	0.36
	Warnbach	13	0.89	0.78	0.89	0.85	0.90	0.81	0.80	0.68	0.84	0.81
	Münchshofen	14	<b>0.98</b>	<b>0.95</b>	<b>0.98</b>	<b>0.93</b>	<b>0.98</b>	0.97	0.92	0.97	0.93	0.97
	Heitzenhofen	15	<b>0.99</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>	<b>0.95</b>	<b>0.99</b>	0.98	0.98	0.98	0.95	0.98

Fall b: Regionalisierung anhand aller Teileinzugsgebiete

	Pegel	Tez	Kalibrierungsperiode					Validierungsperiode				
			NS	NS <sub>dr</sub>	NS <sub>ndr</sub>	SAE	NS <sub>tr</sub>	NS	NS <sub>dr</sub>	NS <sub>ndr</sub>	SAE	NS <sub>tr</sub>
Gebiet der Ammer	Fischen	1	0.95	0.90	0.95	0.93	0.97	0.94	0.88	0.91	0.92	0.95
	Weilheim	2	0.93	0.94	0.89	0.90	0.93	0.94	0.93	0.94	0.91	0.95
	Peissenberg	3	0.77	0.79	0.70	0.78	0.76	0.72	0.76	0.62	0.76	0.68
	Oberammergau	4	-0.08	-0.20	-0.31	0.56	-0.07	-0.43	-0.63	-1.89	0.52	-0.19
	Unternogg	5	0.00	-0.03	-0.09	0.47	-0.01	0.08	0.01	-0.01	0.44	0.08
	Oberhausen	6	0.70	0.60	0.70	0.77	0.71	0.67	0.55	0.69	0.75	0.66
	Obernach	7	0.00	0.00	0.00	0.31	-0.01	0.02	0.01	-0.01	0.29	0.00
Gebiet der Naab	Wildenau	8	0.81	0.76	0.80	0.73	0.77	0.62	0.56	0.45	0.72	0.67
	Amberg	9	0.63	0.60	0.53	0.73	0.57	0.16	0.27	-0.25	0.73	0.17
	Böhmischbruck	10	0.55	0.37	0.58	0.67	0.57	0.07	0.02	-0.20	0.59	0.07
	Unterköblitz	11	0.87	0.83	0.82	0.76	0.83	0.54	0.50	0.36	0.68	0.53
	Rötz	12	0.56	0.41	0.57	0.68	0.58	0.35	0.14	0.10	0.69	0.39
	Warnbach	13	0.89	0.78	0.89	0.84	0.89	0.82	0.81	0.70	0.84	0.83
	Münchshofen	14	0.98	0.95	0.98	0.93	0.98	0.97	0.92	0.97	0.93	0.97
	Heitzenhofen	15	0.99	0.98	0.99	0.95	0.99	0.98	0.98	0.98	0.94	0.98

Tabelle 5.2: Zusammenfassung aller Güterwerte bei der Mehrziel-Optimierung für Fall a und Fall b. Die Werte wurden über die vier berechneten Zeitskalen (1, 2, 15, 30 d) gemittelt. Die zufriedenstellenden Werte ( $O_i \geq 0.55$ ) wurden grau hinterlegt.

schen den Gebieten der Ammer und der Naab. Für den Fall der Naab sinken die Güterwerte für den Regionalisierungsansatz durchschnittlich um nur 0.04. Die Güte des Modells bleibt somit erhalten.

Für den Fall der Ammer weisen die Ergebnisse eine durchschnittliche Verschlechterung von 0.26 auf. Vor allem für die alpinen Teileinzugsgebiete 4 (Pegel Oberammergau) und 5 (Pegel Unternogg) sind die Unterschiede sehr hoch. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass sich die alpine Hydrogeologie nicht mit einer einzelnen Klasse (Kalkalpin) ausreichend beschreiben lässt. Das Teileinzugsgebiet 5 mit dem Pegel Unternogg besteht in der Tat nicht aus alpinem Kalkgestein sondern aus Flysch (einem breiten Saum aus Mergeln und Sandsteinen, LUDWIG 2000). Der Flysch hat auf der Skala des Gesamtgebietes der Oberen Donau keine große Bedeutung, deshalb wurde er im Gesamtkonzeptmodell nicht berücksichtigt und vereinfachend zu den Kalkalpen hinzugefügt. Obwohl beide Festgesteine (Flysch und Kalkalpin) sehr gering durchlässig sind, unterscheiden sich geomorphologisch die runden bewaldeten Gipfel des Flysches deutlich vom steilen kalkalpinen Gebirge. SCHWARZE (2001) berechnete mittels DIFGA eine Rückgangskonstante von ca. 180 Tagen für Kalkstein und ca. 410 Tagen für Flysch, was auch auf die großen Unterschiede hinweist.

Die Sensitivität des Regionalisierungsansatzes gegenüber Vereinfachungen, die sich als zu grob erwiesen haben, ist eine positive Eigenschaft des Verfahrens, da es ausdrücklich auf die notwendigen Verbesserungen hinweist. Eine Verfeinerung des hy-

## 5 Verknüpfung von Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren

Vergleich der Ergebnisse für die gesamte Zeitperiode 01.11.1990 - 03.01.1999

	Pegel	Tez	Ergebnisse der einzelnen Kalibrierung					Ergebnisse der Regionalisierung (Fall a)				
			NS	NS <sub>dr</sub>	NS <sub>ndr</sub>	SAE	NS <sub>lr</sub>	NS	NS <sub>dr</sub>	NS <sub>ndr</sub>	SAE	NS <sub>lr</sub>
Gebiet der Ammer	Fischen	1	0.96	0.92	0.97	0.94	0.98	0.95	0.90	0.94	0.92	0.96
	Weilheim	2	0.96	0.93	0.93	0.93	0.96	0.94	0.94	0.91	0.91	0.94
	Peissenberg	3	0.91	0.88	0.85	0.85	0.89	0.77	0.79	0.69	0.78	0.74
	Oberammergau	4	0.71	0.68	0.61	0.73	0.68	-0.18	-0.28	-0.64	0.55	-0.09
	Unternogg	5	0.54	0.52	0.37	0.60	0.51	0.05	0.00	-0.04	0.46	0.06
	Oberhausen	6	0.94	0.93	0.93	0.88	0.93	0.71	0.60	0.71	0.77	0.71
	Obernach	7	0.37	0.17	0.20	0.44	0.34	0.04	0.01	0.02	0.32	0.04
Gebiet der Naab	Wildenau	8	0.80	0.77	0.78	0.74	0.78	0.77	0.73	0.75	0.73	0.75
	Amberg	9	0.64	0.62	0.60	0.78	0.64	0.56	0.58	0.43	0.73	0.49
	Böhmischbruck	10	0.53	0.36	0.55	0.69	0.57	0.48	0.35	0.44	0.63	0.47
	Unterköblitz	11	0.87	0.81	0.87	0.81	0.87	0.84	0.79	0.82	0.77	0.81
	Rötz	12	0.55	0.41	0.55	0.70	0.59	0.54	0.41	0.48	0.68	0.56
	Warnbach	13	0.91	0.90	0.88	0.86	0.91	0.88	0.79	0.87	0.85	0.89
	Münchshofen	14	0.99	0.98	0.98	0.94	0.98	0.98	0.95	0.98	0.93	0.98
	Heitzenhofen	15	0.99	0.99	1.00	0.96	0.99	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99

**Tabelle 5.3:** Vergleich zwischen der einzelnen Teileinzugsgebiets-Kalibrierung und dem Regionalisierungsansatz (Fall a). Die Werte wurden über die vier berechneten Zeitskalen (1, 2, 15, 30 d) gemittelt. Die zufriedenstellenden Werte ( $O_i \geq 0.55$ ) wurden grau hinterlegt.

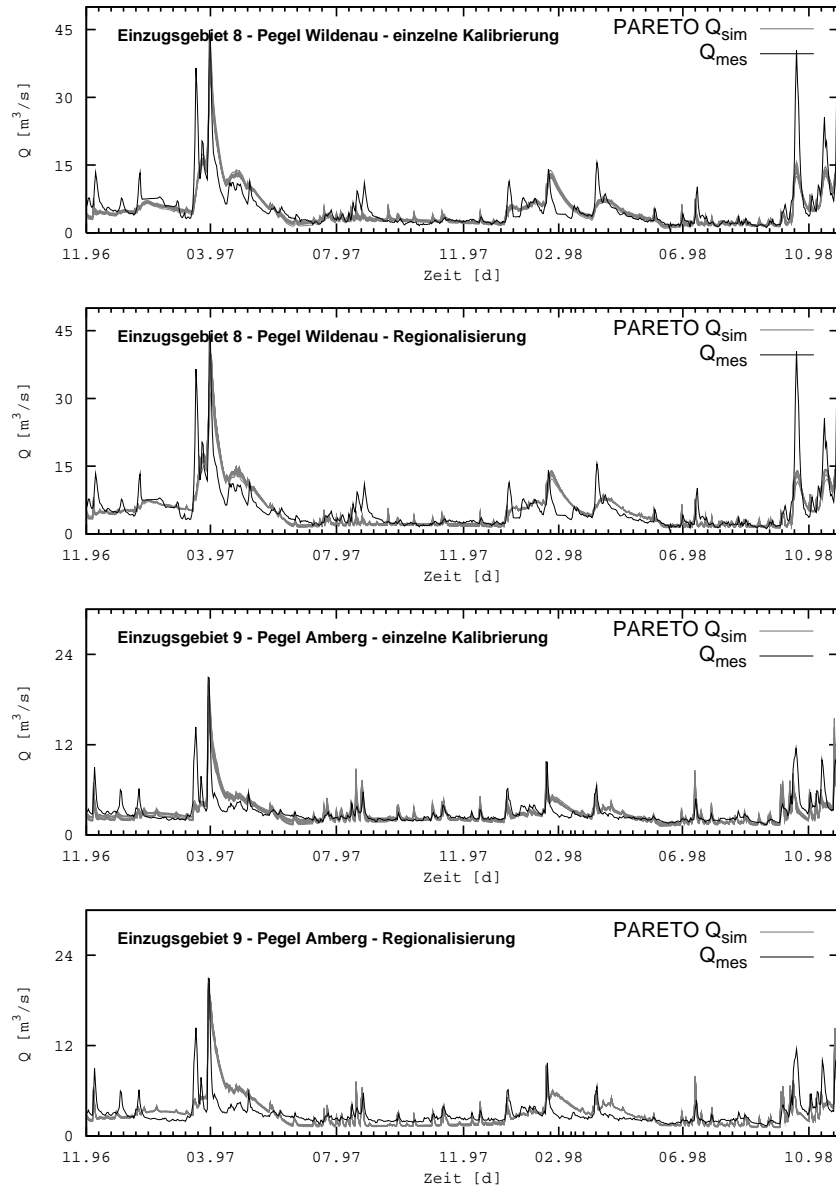
drogeologischen Konzeptmodells hätte den Rahmen der Arbeit gesprengt; es ist aber ein signifikantes Ergebnis, dass sich für grobe Skalen ausreichende Konzepte lokal als unzureichend erweisen.

Für zwei Teileinzugsgebiete der Naab stellt Abbildung 5.3 die Lösungen der einzelnen Kalibrierungen und des Regionalisierungsansatzes exemplarisch dar. Im ersten Fall (Tezg 8, Pegel Wildenau) sind die beiden berechneten Pareto-Sätze praktisch identisch. Für den zweiten Fall (Tezg 9, Pegel Amberg) hat der Regionalisierungsansatz eine systematische Tendenz, die Rückgänge großer Ereignisse zu flach zu berechnen, was zu unterschätzten Niedrigwasserabflüssen führt. Die detaillierte Analyse solcher Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Kalibrierung und der Regionalisierung könnte für die zukünftigen Anwendungen der Regionalisierungsmethodik ein Weg sein, die Auswahl der Parameter und die benutzte Klassifizierung zu prüfen und zu verbessern.

### Ergebnisse der GLUE-Optimierungsanalyse

In Kapitel 4 wurden alle generierten Punkte, die die Bedingung  $O_i \geq O_i^{best} - d$  mit  $d = 0.1$  für alle Gütewerte erfüllten, als behavioural klassifiziert. Für den Regionalisierungsansatz musste diese Bedingung zusätzlich für die Gütewerte aller Teileinzugsgebiete erfüllt werden. Dazu kommt dass ein Punkt durch 48 Koeffizientenwerte definiert wird, verglichen mit 5 bis 11 Werten bei der einzelnen Kalibrierung. Die beiden Aspekte machen die Wahrscheinlichkeit, dass ein zufällig genommener Punkt aus dem Koeffizientenraum ein „guter“ Punkt ist, deutlich geringer. Die praktische Folgerung dieser Erkenntnis ist, dass keiner aus den  $10^6$  mit Direct-Sampling generierten Punkten die gestellten Bedingungen erfüllte. Dadurch ließ sich die GLUE-Analyse als Werkzeug für die Bewertung der Modellgüte nicht mehr direkt anwenden.

Die Methode kann aber weiter für die Schätzung der generalisierten Sensitivität der Koeffizienten- und indirekt der Parametersätze benutzt werden. Dafür wurde der Faktor  $d$  sukzessiv vergrößert, um eine a posteriori Koeffizientenverteilung zu erlangen. Unterschiedliche  $d$ -Werte für die Teileinzugsgebiete wurden ausgewählt, um



**Abbildung 5.3:** Vergleich zwischen der einzelnen Teileinzugsgebiets-Kalibrierung und dem Regionalisierungsansatz (Fall a): Exemplarische Abflusszeitreihen.

so auf ihre unterschiedliche Sensitivität zu reagieren. Für die Teileinzugsgebiete, für die bereits die Mehrziel-Optimierung eine schlechte Modellgüte zeigte, war ein  $d$ -Wert von bis zu 0.4 notwendig, um genügend Punkte finden zu können. Die Liste der behavioural Punkte beinhaltete am Ende nur 363 Punkte mit einem mittleren  $d = 0.14$ . Verglichen mit den Ergebnissen der normalen inversen Modellierung (Kap. 4.3.1), bei der über 50.000 Punkte für die gleiche Modellstruktur ausgewählt werden konnten, ist dies ein starker Nachweis für das deutlich härtere Konditionieren des Koeffizientenraumes beim Regionalisierungsansatz. Eine klare Verbesserung der Parameterbestimmbarkeit ist also zu erwarten. Darüber wird im nächsten Kapitel 5.3.2 berichtet.

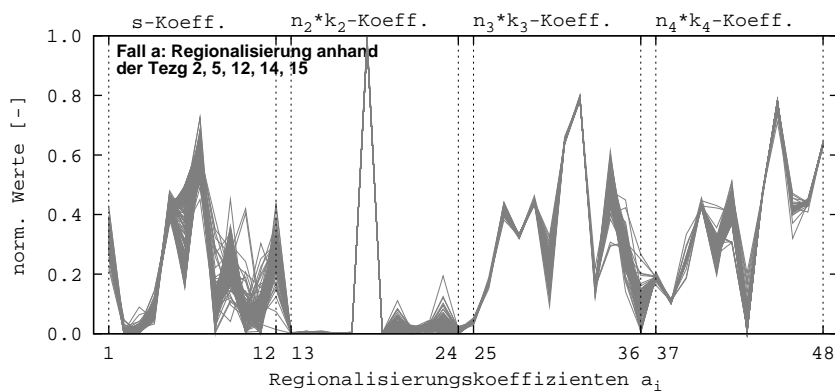


Abbildung 5.4: Pareto-Lösung im Koeffizientenraum für Fall a.

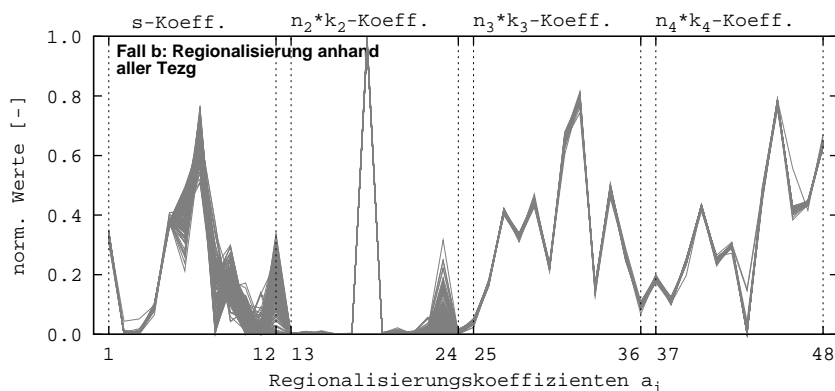


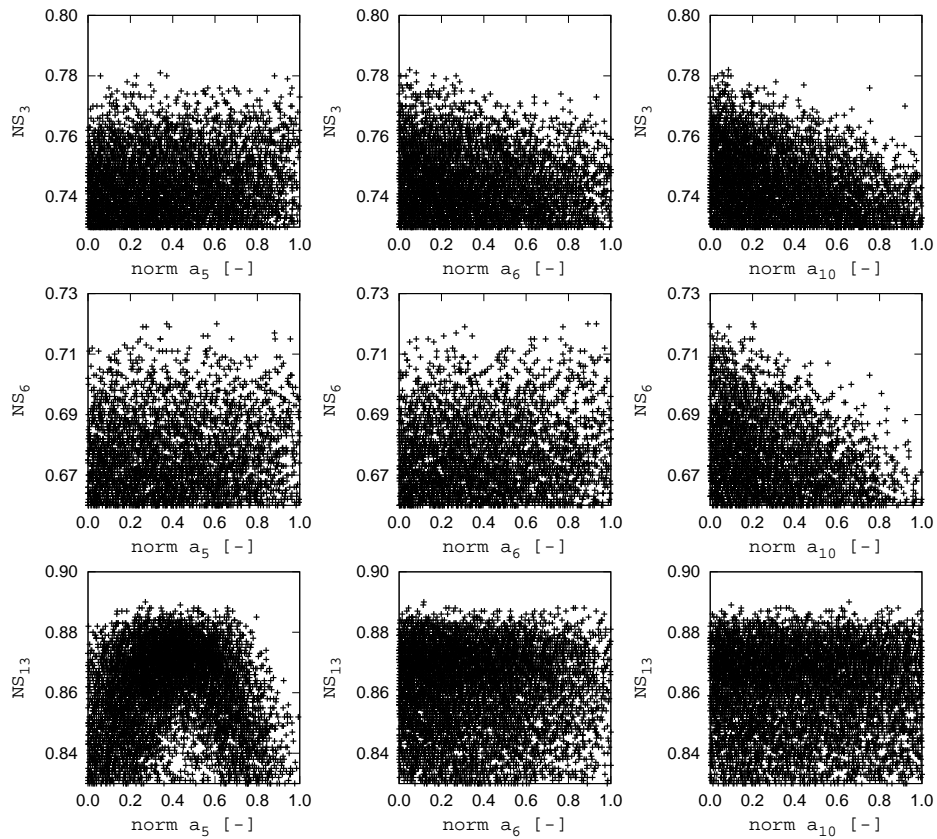
Abbildung 5.5: Pareto-Lösung im Koeffizientenraum für Fall b.

### 5.3.2 Analyse der Regionalisierungskoeffizienten, der Modellparameter und ihrer Bestimmbarkeit

#### Ergebnisse der Mehrziel-Optimierungsanalyse

Abbildung 5.5 stellt die Pareto-Lösungen im Raum der Regionalisierungskoeffizienten für Fall a und Fall b dar. Verglichen mit der ähnlichen Darstellungen für die normale inverse Modellierung (Abb. 4.16) zeichnet sich die Lösung des Regionalisierungsansatzes durch eine sehr gute Bestimmbarkeit aus: Die Pareto-Sätze bilden ein schmales Band, das nur für wenige Koeffizienten von den Rändern des Raumes bestimmt wird. Wenn das der Fall ist, findet die Agglomeration an den Rändern systematisch statt: Für die Koeffizienten von  $n_2 \cdot k_2$  sind mit einer Ausnahme alle Werte am unteren Rand konzentriert. Das Ergebnis deutet auf ein strukturelles Modellverhalten hin und nicht auf einen von Wechselbeziehungen bedingten numerischen Zufall, wie bei der Kalibrierung einzelner Teileinzugsgebiete.

Wie die Güterwerte sind die beiden Lösungen (Fall a und Fall b) fast identisch. Fall b führte zu einer leicht kleineren Unsicherheit für die Koeffizienten von  $n_3 \cdot k_3$  und  $n_4 \cdot k_4$ . Je härter das Modell konditioniert ist, desto schwieriger wird es, mehrere „regions of attraction“ im Parameterraum zu finden, und dieses Verhalten ist genau die Lösung für eine bessere Bestimmbarkeit und eine kleinere Unsicherheit. Prinzipiell aber lässt sich die Erkenntnis von Kap. 5.3.1 bestätigen: Fall a ist eine repräsentative



**Abbildung 5.6:** Sensitivität der Regionalisierungskoeffizienten gegenüber Gütewerten in mehreren Teileinzugsgebieten. Die Werte gelten für die Validierungsperiode.

$\alpha_{KS}(a_j)$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00
$n_2 \cdot k_2$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$n_3 \cdot k_3$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.24	0.24	0.95	0.84	0.95	1.00
$n_4 \cdot k_4$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.15	1.00	0.84	0.84	0.84	0.68	0.36

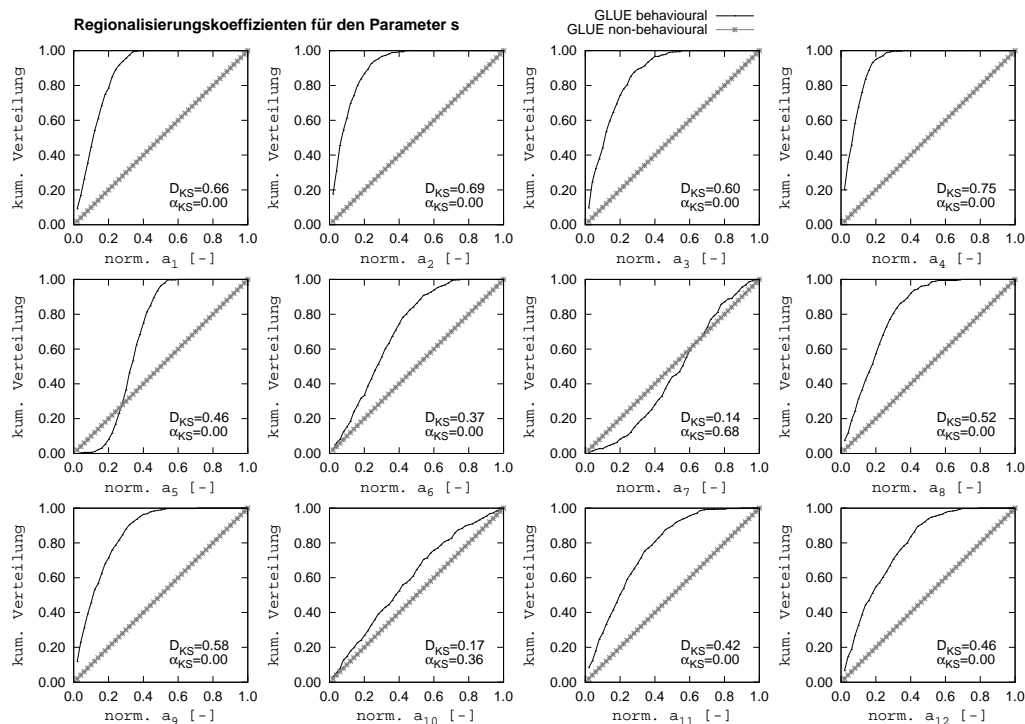
**Tabelle 5.4:** Zusammenfassung der Ergebnisse des Kolmogoroff-Smirnov-Tests nach der GLUE-Analyse. Die Werte des Signifikanzniveaus  $\alpha_{KS} < 0.50$ , die eine höhere Bestimmbarkeit der behavioural Punkte zeigen, wurden auf grauem Hintergrund dargestellt.

Stichprobe bezüglich der Variabilität der Gebietsmerkmale, so dass in Fall b die Regionalisierung anhand aller Teileinzugsgebiete keine neue Information mitbringt.

### Ergebnisse der GLUE-Optimierungsanalyse

Wie das Konditionieren der Koeffizienten der Regionalisierung über mehrere Teileinzugsgebiete funktioniert, wird in Abb. 5.6 exemplarisch verdeutlicht. Jeder Koeffizient entspricht einer bestimmten Gebietseigenschaft. Nicht jede Eigenschaft ist für jedes Teileinzugsgebiet entscheidend. So ist  $a_5$  nur für Teileinzugsgebiet 13 (Pegel Warnbach) sensitiv und umgekehrt, Tez<sub>g</sub> 13 ist nur auf  $a_5$  und nicht auf  $a_6$  oder  $a_{10}$

## 5 Verknüpfung von Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren



**Abbildung 5.7:** Parameterverteilungen (behavioural und non-behavioural) nach der GLUE-Analyse für die ersten zwölf Koeffizienten der Regionalisierung.  $D_{KS}$  und  $\alpha_{KS}$  sind die Ergebnisse des Kolmogoroff-Smirnov-Tests zwischen den dargestellten Verteilungen.

sensitiv.  $a_5$  entspricht der BK1-Klasse: Paläozoikum des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes. Die Klasse ist in den anderen beiden Gebieten überhaupt nicht vorhanden, so dass es sinnvoll ist, dass das Modell darauf nicht reagiert. Ähnlich wird  $a_6$  in Tezg 3 und  $a_{10}$  in Tezg 3 und 5 bestimmt. Für ein bestimmtes Teileinzugsgebiet bleibt das Modell nur schlecht bestimmt. Nur die Regionalisierung über mehrere Teileinzugsgebiete gleichzeitig führt zu einer kleineren Unsicherheit. Darin liegt auch der Grund, warum die 48 Koeffizienten der Regionalisierung eine deutlich bessere Bestimmbarkeit als die 24 Modellparameter der Kalibrierungsauswahl haben.

Die kumulative Verteilung der behavioural GLUE-Lösungen bestätigt das gute Ergebnis. Graphisch wird sie in Abb. 5.7 dargestellt. Die eindeutige Abtrennung von den Verteilungen der non-behavioural Lösungen führt zu sehr guten Signifikanzen des Kolmogoroff-Smirnov-Tests. Die  $\alpha_{KS}$ -Werte werden in Tab. 5.4 zusammengefasst. 38 aus 48 Koeffizienten (79% verglichen mit 24% und 33% bei der Kalibrierung einzelner Teileinzugsgebiete) sind gut und sehr gut bestimmt.

Die schlecht bestimmten Koeffizienten entsprechen den Parametern  $n_3 \cdot k_3$  und  $n_4 \cdot k_4$  und fast den gleichen Gebietsmerkmalen ( $x_9, x_{10}, x_{11}$ ), was vielleicht ein Zeichen für übrig gebliebene Wechselbeziehungen zwischen den beiden Parametern ist. Kapitel 4 zeigte in der Tat, dass die stärksten Abhängigkeiten zwischen den Modulen E3 und E4 stattfinden. Diese Hypothese ließ sich allerdings nicht direkt bestätigen: die lineare Korrelation zwischen den zwei Parametern innerhalb der GLUE-Lösung beträgt nur 0.07 nach Mittelung über alle fünfzehn Teileinzugsgebiete. Obwohl nach

Gebietseigenschaft		Relativer Einfluss der Eigenschaft auf die Modellparameter			
		s	n2*k2	n3*k3	n4*k4
Fläche	$x_1$	0.22	0.00	0.01	0.06
Mittel_DGM	$x_2$	0.00	0.00	0.06	0.04
Stabw_DGM	$x_3$	0.00	0.00	0.14	0.08
Formfaktor	$x_4$	0.04	0.00	0.11	0.14
Anteil an BK1	$x_5$	0.21	0.00	0.15	0.09
Anteil an BK3	$x_6$	0.18	0.95	0.07	0.15
Anteil an BK4	$x_7$	0.17	0.00	0.12	0.00
Anteil an BK5	$x_8$	0.04	0.02	0.18	0.10
Anteil an BK6	$x_9$	0.04	0.00	0.02	0.11
Anteil an BK7	$x_{10}$	0.01	0.01	0.05	0.04
Anteil an BK8	$x_{11}$	0.02	0.01	0.05	0.08
Anteil an BK10	$x_{12}$	0.07	0.01	0.02	0.10

**Tabelle 5.5:** Relativer Einfluss der Gebietseigenschaft auf die Modellparameter. Die Werte größer als 0.10, die einen starken Einfluss zeigen, wurden grau hinterlegt.

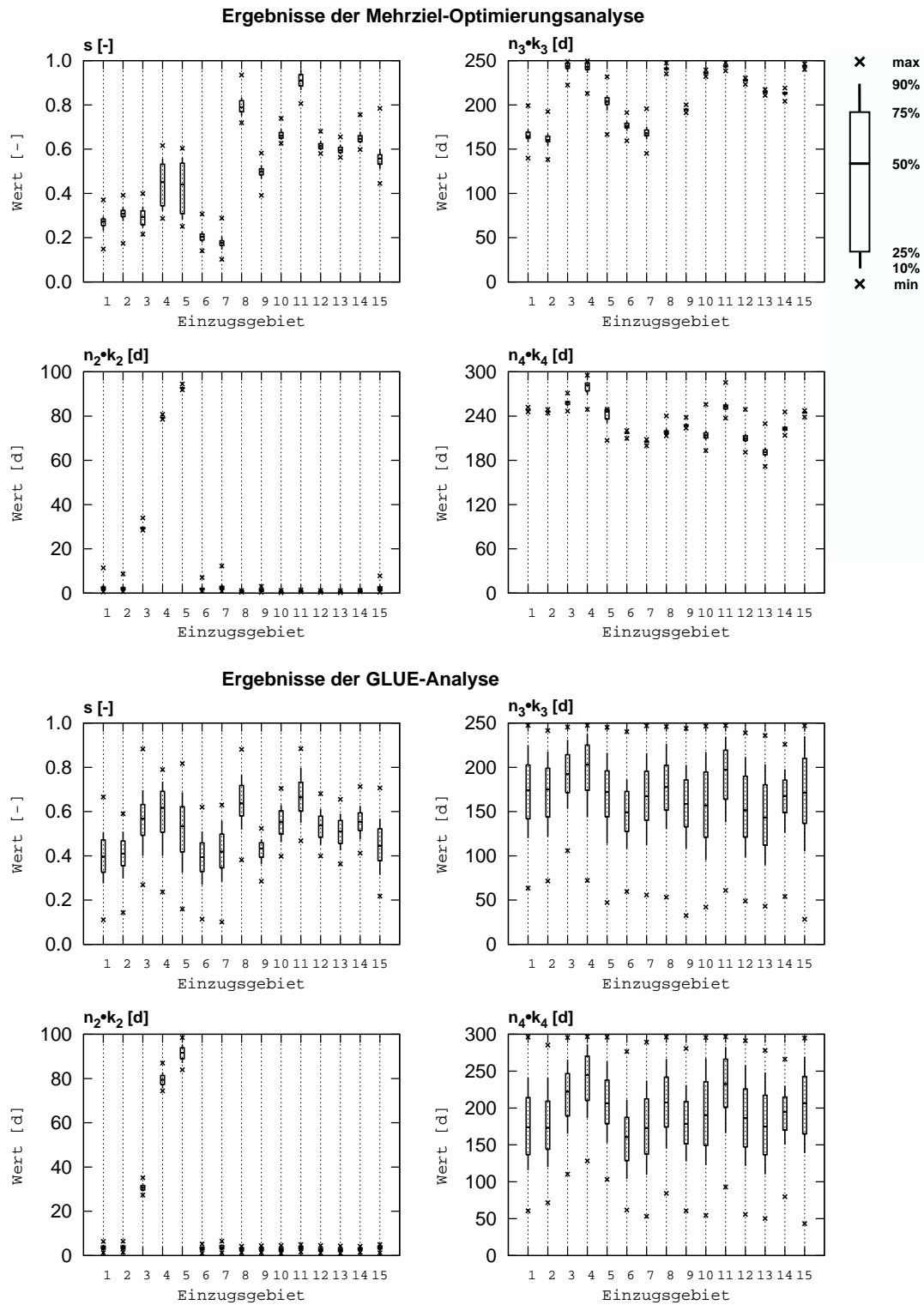
dem t-Test signifikant zum Niveau 0.91 scheint der Wert zu klein zu sein, um ihn als Beweis anzunehmen.

## 5.4 Physikalische Interpretation der Ergebnisse

Über die Analyse der Regionalisierungsbeziehungen lassen sich die Gebietseigenschaften identifizieren, die den größten Einfluss auf die einzelnen Modellparameter ausüben. Für die Quantifizierung dieses Einflusses wurde zuerst jeder Koeffizient einer Eigenschaft mit dem Maximalwert der Eigenschaft aller untersuchten Teileinzugsgebiete multipliziert. Es folgte für jeden Modellparameter die Normierung der veränderten Koeffizienten, so dass ihre Summe gleich 1 ist. Das Ergebnis ist die gesuchte Schätzung des Einflusses jeder Eigenschaft auf jeden Parameter. Für eine Eigenschaft ist diese Schätzung nicht nur relativ zum Einfluss anderer Eigenschaften sondern auch zu den Eigenschaftswerten in jedem Teileinzugsgebiet zu verstehen. Wenn der Einfluss einer hydrogeologischen Klasse  $BK_i$  auf einem bestimmten Parameter  $p_j$  z.B zu 0.8 geschätzt wurde, bedeutet dies, dass in einem Gebiet, in dem der Anteil an  $BK_i$  nicht sehr klein oder null ist, der Wert dieses Anteiles dominant für die Berechnung von  $p_j$  ist.

Für die Berechnung wurden die Medianwerte der Koeffizienten der Lösungen der Mehrziel-Optimierung in Fall a benutzt. Tabelle 5.5 stellt die Ergebnisse des angewandten Verfahrens für die vier Modellparameter und die zwölf Eigenschaften, die bei der Regionalisierung mit berücksichtigt wurden, dar. Auch wenn die einzelnen Teile des Modells konzeptionell bleiben, weil sie nicht auf den Grundgleichungen der Prozesse beruhen, lässt sich eine physikalische Interpretation der Ergebnisse aufbauen. Es ist allerdings wichtig zu konstatieren, dass die folgenden Aussagen Deutungen von Modellergebnissen und nicht von direkten Felduntersuchungen sind.

- s Auf den Separationsparameter  $s$  zwischen Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung haben nach der Fläche des Teileinzugsgebietes die Anteile der Klassen BK1 (Paläozikum des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes), BK3 (Kalkal-



**Abbildung 5.8:** Zusammenfassung der Parameterverteilungen nach dem Regionalisierungsansatz anhand der Mehrziel-Optimierung und der GLUE-Analyse.



pen) und BK4 (Nichtalpiner Jura und Trias) den größten Einfluss. Der Einfluss der Fläche könnte dadurch erklärt werden, dass in einem größeren Einzugsgebiet der Abstand vom Perkolationspunkt bis zum Talaquifer größer ist, und dies könnte zu einem höheren Zwischenabfluss führen. Die drei genannten hydrogeologischen Klassen sind die undurchlässigsten aus der ganzen Klassifikation. Es ist aus der hydrogeologischen Perspektive ein sehr logisches Ergebnis: Die von Klüften dominierte Strömung in undurchlässigem Festgestein führt zu einer höheren Exfiltrationsrate entlang des Hanges (Zwischenabfluss).

$n_2 \cdot k_2$  Der Anteil der BK3-Klasse ist der einzige Parameter, der als besonders einflussreich auffällt. Er deutet darauf hin, dass mit Ausnahme der kalkalpinen Gebiete (Teileinzugsgebiete 4 und 5)  $n_2 \cdot k_2$  sehr klein ist (Abbildung 5.8). Der Parameter beschreibt die Modelleinheit (E2), die für den horizontalen Zwischenabfluss steht. Physikalisch ist es schwer zu verstehen, warum der Unterschied zwischen den beiden Teileinzugsgebieten im Süden des Ammergebiets und dem Rest so groß sein soll. Der Grund liegt in der sehr schlechten Modellgüte, die dort wegen der fehlerhaften Klassifizierung (Flysch und Kalkalpin in einer Klasse BK3) erzielt wurde. Wenn die Anpassungsalgorithmen komplett versagen, die Dynamik der Abflusskurve richtig abzubilden, kommt es zu einer viel zu flachen berechneten Kurve mit einer zu hohen Speicherkonstanten: Daher die hohen  $n_2 \cdot k_2$ -Werte in den beiden Gebieten.

$n_3 \cdot k_3$  Die Parameter  $n_3$  und  $k_3$  der Modelleinheit E3 bilden die vertikale Sickerung durch das Gebirge und ihr Exfiltrieren im Tal als laterale Grundwasserneubildung ab. Die mittlere Standardabweichung der Höhe des Gebietes und der Formfaktor haben von den morphologischen Parametern den größten Einfluss. Eine hohe Standardabweichung bedeutet auch eine große Mächtigkeit des Sickerraumes und dadurch längere Fließzeiten (Translation) und stärkere Abschwächung (Retention) der Perkolation. Auch die Größe des Formfaktors deutet auf die Länge des Fließweges hin. Von den geologischen Klassen sind BK1 (Paläozoikum des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes), BK3 (Kalkalpen), BK4 (Nichtalpiner Jura und Trias) und vor allem BK5 (Malm) signifikant. Die Auswahl enthält alle Festgesteins-Klassen, für die die vertikale Sickerung eine größere Rolle zu spielen scheint.

$n_4 \cdot k_4$  Für die Parameter  $n_4$  und  $k_4$  der Grundwassereinheit E4 spielen außer dem Formfaktor, der durch die Form des Einzugsgebietes mit der Fließlänge korreliert ist, die Anteile der Klassen, die meist von einer bedeutsamen Durchlässigkeit des Grundwasserraumes charakterisiert sind, die größten Rollen. BK1 (Paläozoikum des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes) und BK3 (Kalkalpen) sind die Ausnahme, für den Rest stimmt aber diese Bemerkung: BK5 (Malm), BK6 (Außeralpine Kreide), BK8 (Quartäre Moränen) und BK10 (Quartäre Aquifere).

Die Werte der Modellparameter wurden in Abbildung 5.8 als Ergebnisse der Mehrziel-Optimierung Fall a und der GLUE-Analyse aufgetragen. Zu bemerken sind die sehr engen Spannweiten der Verteilungen der Mehrziel-Optimierung. Die Verteilungen der GLUE-Analyse sind ebenfalls deutlich enger als die, die anhand der normalen inver-

sen Modellierung berechnet wurden. Zwei Aspekte betonen die Qualität der Ergebnisse: Erstens sind die Werte, wie bereits für die Koeffizienten der Regionalisierung erwähnt, nicht von den Rändern des Parameterraumes bestimmt, ein Nachweis für ein gutes Modellverhalten. Zweitens sind die Pareto-Lösungen stets in den GLUE-Verteilungen enthalten. GLUE hat schwächere Akzeptanzkriterien als die Mehrziel-Optimierung, und dies hat die breiteren GLUE-Verteilungen zur Folge. Die Güte der Ergebnisse wird aber davon bestätigt, dass die beiden Sätze von Ergebnissen, die vollständig unabhängig berechnet wurden, miteinander konsistent sind.

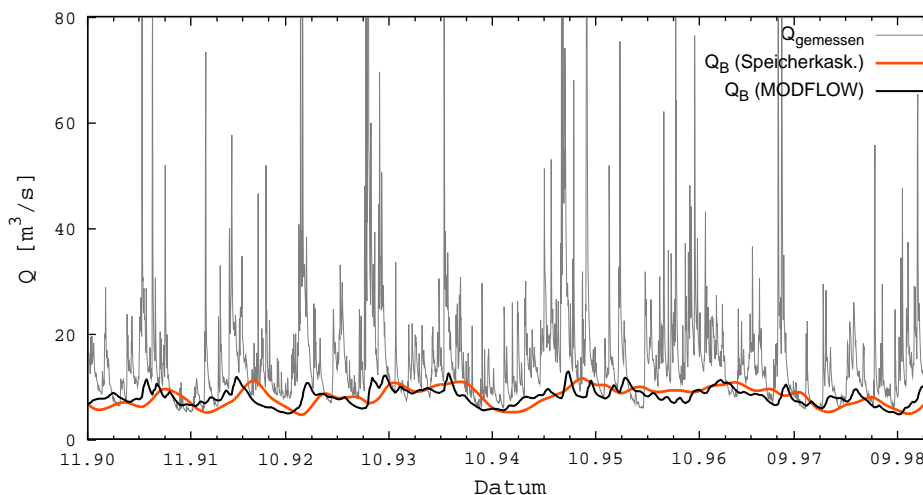
Bei den  $s$ -Werten sind deutliche Unterschiede zwischen den Gebieten der Ammer und der Naab zu sehen: der mittlere Wert für die Ammer ist 0.31, für die Naab 0.66. Der Grund dafür ist neben der deutlich größeren Fläche der Naab-Teileinzugsgebiete, dass in dieser Arbeit nur der quartäre Grundwasserleiter (BK10) für das Grundwassermodul berücksichtigt wurde. BK10 spielt eine viel größere Rolle im Ammergebiet (23% der Fläche verglichen mit 6% für die Naab) und dies erklärt den Unterschied. Im Ammergebiet resultieren daraus die größten Anteile am Zwischenabfluss in den alpinen Teileinzugsgebieten 4 und 5 (Pegel Oberammergau und Unternogg). Im Naabgebiet haben die durchlässigsten Teileinzugsgebiete 9 und 15 (Pegel Amberg und Heitzenhofen in der Frankenalb und im Oberfälzischen Hügelland), die einzigen, die großflächig durch den Malm-Grundwasserleiter aufgebaut sind, den niedrigsten Zwischenabflussanteil. Die Teileinzugsgebiete 10, 11, 12 und 13 (Oberpfälzer Wald und Fichtelgebirge), die sich vollständig im Bereich des Kristallins befinden, haben die höchsten Anteile an Zwischenabfluss.

Die Ergebnisse (auch wenn geschwächt von der schlechten Modellgüte in den alpinen Gebieten) bestätigen die Hypothese von SCHWARZE et al. (1999) über den Unterschied zwischen dem hydraulischen Verhalten von Festgestein- und Lockergesteinseinzugsgebieten: Im ersten Fall entstehen wegen der Heterogenität des Gebietes hydraulisch unterschiedlich reagierende Teilsysteme mit mehreren signifikanten Abflusskomponenten. Der Zwischenabfluss als eigene Komponente gewinnt an Bedeutung. Der Unterschied zur Interpretation von SCHWARZE et al. (1999) ist, dass hier die stark verkarsteten Malmgebiete im Gebiet der Naab von der Bedeutung des Grundwasserleiters her wie die von Moränen und Molasse dominierten Lockergesteinseinzugsgebiete im Gebiet der Ammer reagieren.

Für die Parameter  $n_2 \cdot k_2$  des horizontalen Zwischenabflusses sind alle Werte, wie von der Analyse der Koeffizienten erwartet, mit der Ausnahme der alpinen Einzugsgebiete sehr niedrig, im Bereich von wenigen Tagen. Diese Abflusskomponente fließt also fast gleichzeitig mit dem Oberflächenabfluss, ohne dass eine bedeutsame Translation oder Retention stattfindet. Der Rechenzeitschritt von einem Tag ist wahrscheinlich zu grob, um weitere Unterschiede zwischen den Teileinzugsgebieten zu identifizieren.

Für  $n_3 \cdot k_3$  und  $n_4 \cdot k_4$  sind zwar kleine Unterschiede zwischen den Teileinzugsgebieten bei der Pareto-Lösung zu sehen, die GLUE-Analyse zeigt aber, dass für alle Teileinzugsgebiete akzeptable Ergebnisse für  $n_3 \cdot k_3$  im Bereich 140 - 210 Tage und für  $n_4 \cdot k_4$  im Bereich 140 - 250 Tage erzielt wurden. Außerhalb der Erkenntnisse, die aus der Analyse der Regionalisierungsbeziehungen gewonnen wurden, lassen sich keine Tendenzen erkennen.

Für ihre Interpretation stellt sich die Frage, wie man die Werte der Parameter des Speichermodells physikalisch verstehen sollte. Mathematisch gesehen ist  $k$  für einen linearen Speicher oder  $n \cdot k$  für eine Speicherkaskade die mittlere Reaktionszeit



**Abbildung 5.9:** Vergleich von zwei Modellversionen (mit MODFLOW oder mit einer Speicherkaskade als Grundwassermodell) für das Gebiet der Ammer.  $Q_{gemessen}$  ist der am Flusspegel Fischen gemessene Gesamtabfluss,  $Q_B$  ist der berechnete Basisabfluss.

(nicht zu verwechseln mit der tatsächlichen Transportzeit) des Systems. Der Schwerpunkt des Eingangssignals wird um diese Zeit nach vorne verschoben. Es ist schwer zu akzeptieren, dass es in mittelgroßen Einzugsgebieten ein halbes Jahr dauert, bis der Untergrund auf ein Niederschlagsereignis reagiert. Studien, die Tracermessungen analysieren (z.B. TILCH et al. 2003), zeigen im Gegenteil, dass der Grundwasserabfluss sehr schnell nach dem Anfang des Ereignisses startet.

Bezüglich der Bedeutung der Speicherkoeffizienten stellte Kap. 3.2.3 mehrere Versuche vor, Ähnlichkeiten zwischen dem hydrologischen Speichermodell und den physikalischen Grundgleichungen zu finden. Sowohl SCHWARZE et al. (1999) für mehrere parallele lineare Speicher als auch WITTENBERG (1997) für einen nichtlinearen Speicher benutzten dafür das Modell eines entwässernden Aquifers in Abwesenheit jeglicher Neubildung. In diesem Kontext ist die Speicherkonstante die Zeit, nach der die Hälfte des Grundwasservolumens abgeflossen ist. Es gibt aber nach dem Wissen des Autors der vorliegenden Arbeit keinen ähnlichen Versuch, eine Interpretation der Speicherkonstante auch im Sinne einer realen Reaktionszeit zu geben.

Abbildung 5.9 zeigt für das Gebiet der Ammer einen Vergleich zwischen den Grundwasserabflusskurven, die mit dem MODFLOW-Modell und mit einer linearen Speicherkaskade berechnet wurden. Beide Kurven führen zu einer ähnlichen Modellgüte, das Gesamtvolumen an Grundwasser ist ebenfalls sehr ähnlich. Eine nähere Betrachtung der Dynamik zeigt aber eindeutig eine systematische Zeitverschiebung von ca. 60-80 Tagen der Speicherkurve relativ zur MODFLOW-Kurve. Gemittelt über jeden Monat des Jahres zeigt der Jahresgang der MODFLOW-Kurve ein Maximum im April, das in Übereinstimmung mit dem von der Schneeschmelze verursachten Frühjahr-Maximum der Gesamtabflusskurve steht. Der Jahresgang der Abflusskurve der linearen Speicherkaskade hat ihr Maximum im Juni und bestätigt damit den Unterschied, der bei der Analyse der täglichen Werte beobachtet wurde.

In der automatischen Anpassung der Speicherkoeffizienten wird numerisch nach einer flachen Grundwasserabflusskurve gesucht. MODFLOW regelt durch die räum-

lich verteilte Lösung der Grundwasserströmungsgleichung das Verhältnis zwischen der Reaktionszeit auf ein Ereignis und der längerfristigen Entwässerung, die danach folgt. Das deutlich einfachere Speichermodell kann aber eine Verflachung der Kurve nur durch größere Speicherkonstanten, das heißt durch die Verschiebung des Signals nach vorne, erreichen.

Die Folgerung aus diesem Ergebnis ist, dass die physikalische Interpretation der Koeffizienten eines Speichermodells außerhalb des erwähnten Entwässerungskontextes nicht zulässig ist. Damit wird nicht nur die Aussagekraft der Modellparameter eingeschränkt. Daraus resultiert auch, dass auf dem Speicherkonzept basierte hydrologische Modelle die Dynamik der Abflusskurve langsamer Komponenten systematisch verfälschen. Diese Wirkung wird während der Anpassung der Gesamtkurve von den anderen Komponenten kompensiert und ist für die meisten Anwendungen nicht relevant. Für die explizite Beschreibung der Fließprozesse im Untergrund bedeutet das aber, dass Speichermodelle nur für die langfristige (im Bereich der jährlichen Skala) Bilanzierung der Wasserumsätze und nicht für das instationäre Systemverhalten benutzt werden sollten.

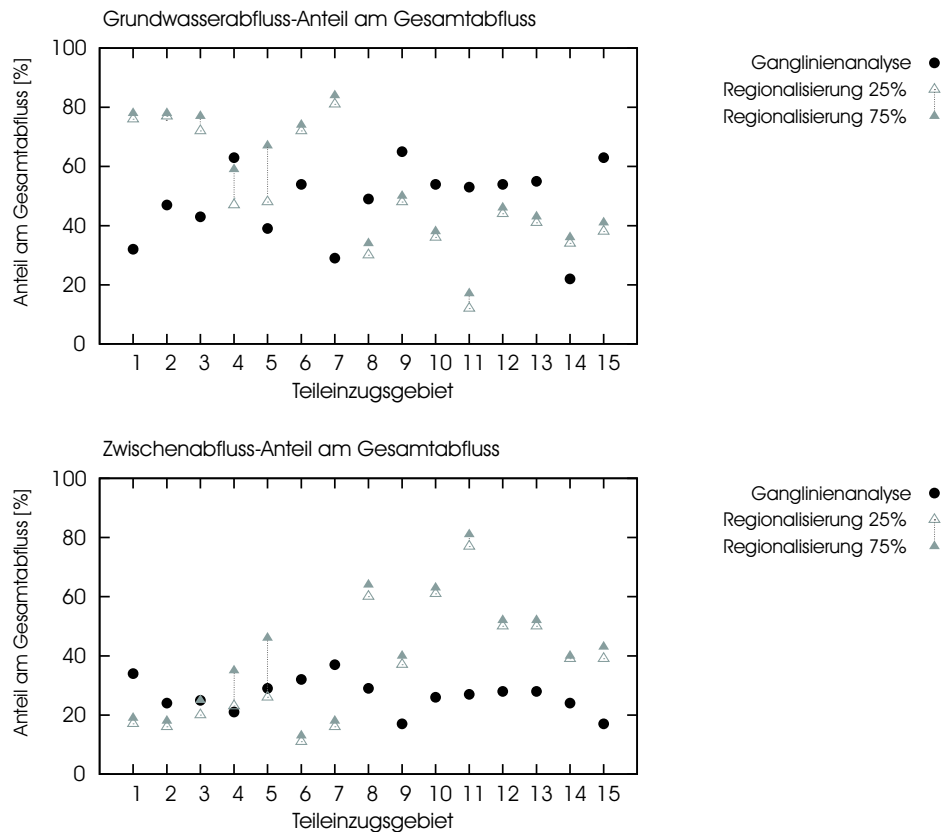
Abbildung 5.10 stellt die abschließenden Ergebnisse des Kapitels dar: die Grundwasser- und Zwischenabflussanteile für alle Teileinzugsgebiete der Ammer und der Naab wie sie anhand des Regionalisierungsansatzes berechnet wurden. Die Grundwasserkomponente spielt im Ammergebiet eine höhere Rolle als im Naabgebiet. Das wurde bereits hauptsächlich durch den dort bedeutsameren quartären Aquifer erklärt. Die Ergebnisse der beiden alpinen Teileinzugsgebiete sind von den größten Unsicherheiten charakterisiert, eine Folge der schlechten Modellgüte. Sonst ist aber die strukturelle Modellunsicherheit sehr klein, was ein Hinweis auf die Vorteile des Regionalisierungsansatzes gegenüber der normalen inversen Modellierung ist.

Die Schätzung der Ganglinienseparationsverfahren ist ebenfalls dargestellt. Wie in Kapitel 4 bei der Studie des Ammergebietes mit Hilfe der normalen inversen Modellierung ist keine Korrelation zwischen den beiden Sätzen von Ergebnissen zu beobachten. Zwischen den Werten der Modellparameter (Abb. 5.10) und der geschätzten Eigenschaften der hydrologischen Prozesse anhand von Ganglinienanalyseverfahren (Kap. 3.6, Tab. 3.6) gibt es keine erkennbaren Korrelationen.

Die Ganglinienanalyseverfahren wenden eine Informationsquelle an, die bei der Modellierung ungenutzt bleibt. Es geht um das konzeptionelle Bild der Dynamik der langsameren Abflusskomponenten relativ zu der Dynamik der Gesamtabflusskurve. Unter Berücksichtigung der großen Unsicherheit, die mit den Verfahren assoziiert werden muss, bleibt es unklar, wie man diese Information für die Verbesserung der hydrologischen Modelle nutzen sollte.

### 5.5 Zusammenfassung

Nachdem die Kalibrierung der Parameter einzelner Teileinzugsgebiete zu einer sehr hohen strukturellen Unsicherheit geführt hat, wurde ein neuer Ansatz angewandt: die Kombination der Modellkalibrierung mit einem Regionalisierungsverfahren. Dabei werden wie bei HUNDECHA und BARDOSSY (2004) nicht mehr direkt die Parameterwerte an die Modellgüte angepasst, sondern die Koeffizienten der Übertragungs-



**Abbildung 5.10:** Grundwasser- und Sickerwasseranteile nach dem Regionalisierungsansatz.

funktionen, die die Parameter mit ausgewählten Gebietseigenschaften in Verbindung bringen. Die Übertragungsfunktionen und die Koeffizienten jeder Eigenschaft bleiben für alle untersuchten Teileinzugsgebiete gleich, so dass die Werte deutlich stärker konditioniert werden.

Die Anwendung des Regionalisierungsansatzes für die Modellierung der Gebiete der Ammer und der Naab führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Für die meisten Teileinzugsgebiete blieb die zufriedenstellende Modellgüte, die bei der normalen einzelnen Kalibrierung erzielt wurde, erhalten. Dabei muss man berücksichtigen, dass die dafür notwendige CPU-Leistung signifikant niedriger war. Die Ausnahmen zum allgemeinen guten Ergebnis wurden durch ein Missverhältnis zwischen der Skala der Erstellung der hydrogeologische Klassifizierung (das Gesamtgebiet der Oberen Donau, 77.000 km<sup>2</sup>) und der Skala ihrer Anwendung (das Gebiet der Ammer 710 km<sup>2</sup> und das Gebiet der Naab 5512 km<sup>2</sup>) verursacht, was die Sensitivität des Ansatzes gegenüber Missdeutungen der Daten beweist.
- Der Erfolg der Methode konnte vor allem durch die Benutzung der Übertragungsfunktionen auf Gebiete, die nicht zur Kalibrierungsauswahl gehörten, nachgewiesen werden. Damit hat die Methode ein bedeutsames Potential für die Übertragung von Modellen auf Gebiete, für die nur wenige Messdaten vorhanden sind. Wenn die Kalibrierungsauswahl repräsentativ für die Variabilität

der physikalischen Gebietsmerkmale ist, bleiben die Modellergebnisse bemerkenswert stabil gegenüber Änderungen in der Anzahl der Einzugsgebiete, die für die Bestimmung der Koeffizienten benutzt werden.

- Die Methodik der Regionalisierung führte zu einer deutlich verbesserten Bestimmbarkeit der Modellparameter. Die Mehrziel-Optimierungsanalyse erzielte sehr stabile Lösungen, die in einem kleinen Teil des Parameterraumes konzentriert waren. Durch das mehrfache Konditionieren des Modells ist die Antwort des Modells im Parameterraum deutlich komplexer, was dazu führte, dass die GLUE-Analyse kombiniert mit einer einfachen Direct-Sampling-Methode nur mit großen Schwierigkeiten eine kleine Anzahl von akzeptablen Lösungen finden konnte. Grundsätzlich sollten in diesem Fall verbesserte Sampling-Methoden (Alternativen werden in Kap. 2.4.1 erwähnt) zum Einsatz kommen, obwohl der Misserfolg von Direct-Sampling auch ein Zeichen der erhöhten Modellsensitivität ist. Obwohl für die Kalibrierungsauswahl mehr Werte während der Regionalisierung angepasst wurden, war ihre Sensitivität viel höher als bei der normalen inversen Modellierung.
- Die kleine Unsicherheit in der Bestimmung der Modellparameter führte auch zu einer kleinen Unsicherheit in der Berechnung von internen Modellergebnissen, wie die einzelnen Abflusskomponenten. Dieses Ergebnis hat eine besondere Bedeutung für Studien der Wasserqualität, für die eine richtige Schätzung der Wassermengen, die durch einen bestimmten physikalischen Raum fließen, sehr wichtig ist. Im Kontext dieser Arbeit ist es aber wichtig, dass ein solcher Ansatz die Bewertung der Güte einzelner Teile aus einem integrierten Modellkomplex ermöglicht.

Ein wichtiger Vorteil bei dem Regionalisierungsansatz ist die Möglichkeit, die berechnete Form der Übertragungsfunktionen direkt zu analysieren, ihre Plausibilität mittels des vorhandenen qualitativen Verständnisses der physikalischen Prozessen zu bewerten und damit dieses Verständnis zu erweitern:

- Durch die Modellergebnisse konnte bestätigt werden, dass der Grundwasserraum in Lockergesteins- und Karstgebieten die primäre hydrologische Rolle spielt und, dass für Festgesteinsgebiete diese Rolle vom Sickerraum übernommen wird.
- Die Zwischenabflusskomponente, die mit dem Sickerraum in Verbindung gesetzt wird, erwies sich als sehr schnell, mit Reaktionszeiten im Bereich von wenigen Tagen.
- Die Grundwasserabflusskomponente ist viel langsamer, die Interpretation der gut bestimmten Werte für die Modellparameter wurde allerdings von einem grundsätzlichen Problem des benutzten Speichermodells behindert. Die mathematische Interpretation der Parameter als mittlere Fließzeit lässt sich wegen einer systematischen Tendenz des Modells, die Parameterwerte zu überschätzen, praktisch nicht übernehmen.

Wie für die Ergebnisse des Kapitels 4 ließen sich auch hier die Schätzungen der Ganglinienanalyseverfahren mit den Modellergebnissen nicht bestätigen. Damit konnten keine Beweise für das Potential solcher Verfahren für die Unterstützung von Studien der hydrologischen Modellierung gefunden werden.

Ein Aspekt, der in der vorliegenden Studie unerforscht geblieben ist, ist die Sensitivität des Regionalisierungsansatzes gegenüber der Auswahl der Gebietseigenschaften. Eine für die gestellte Aufgabe zu grobe hydrogeologische Klassifizierung hat in der Tat zu schlechten Modellergebnissen geführt. Es wäre aber wichtig zu wissen, wie sich die Güte des Modells und die bestimmten Parameterwerte ändern würden, wenn man unterschiedliche Gebietsmerkmale (z.B. andere Indikatoren der Morphologie) nehmen würde. Ein mehrstufiges Verfahren, das ähnlich zu der Methodik von Kapitel 3.5 für die Regionalisierung der Ergebnisse der Ganglinienanalyseverfahren wäre, könnte systematisch die Anzahl der Merkmale reduzieren und damit als Ergebnis die Liste der notwendigen und ausreichenden Eigenschaften haben. Die Zuverlässigkeit der physikalischen Interpretation der Ergebnisse wäre damit gestärkt.





## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit evaluiert die Möglichkeit der hydrologischen Modellierung der Abflusskonzentration unter expliziter Berücksichtigung des Sickerraumes als eigenständiges Element des Wasserkreislaufes und als Bindeglied zwischen Bodenraum, Grundwasserraum und Oberflächengewässern für mesoskalige Einzugsgebiete. Die explizite Betrachtung des Sickerraumes beinhaltet die Quantifizierung des Zwischenabflusses (der Anteil des Gesamtabflusses, der aus dem Sickerraum stammt) und des Grundwasserabflusses, aber auch die Bestimmung der Eigenschaften dieser Komponenten (z.B. mittlere Fließzeiten) und ihrer Verbindung zu den Gebietseigenschaften. Diese Arbeit wurde auf das Gebiet der Oberen Donau und auf die Testgebiete Ammer und Naab angewandt.

Um diese Aufgabe zu erfüllen, wurde zuerst die Anwendbarkeit von Ganglinienanalyseverfahren für die Bestimmung von Abflusskomponenten untersucht, die physikalischen Herkunftsräumen zugeteilt werden können. Ein neues Modellkonzept, das die übliche Modellstruktur Bodenraum-Grundwasserraum-Oberflächengewässer mit der Betrachtung des Sickerraumes ergänzt, wurde dazu entwickelt und implementiert. Eine komplexe Modellierungsstrategie, die die Mehrziel-Optimierungsanalyse, das generalisierte Sensitivitätsverfahren GLUE und die lineare Hauptkomponentenanalyse beinhaltet, wurde mit dem Ziel aufgebaut, die neue Modellstruktur in all ihren Aspekten ausführlich zu bewerten. Mehrere Modellversionen mit unterschiedlichen Graden der Konzeptualisierung wurden hauptsächlich nach der Bestimmbarkeit und Interpretierbarkeit ihrer Parameter verglichen, um so Schlüsse über die Ansprüche und die Vor- und Nachteile der hydrologischen physikalisch-basierten Modellierung zu erlangen. Ein Regionalisierungsverfahren wurde mit der normalen inversen Modellierung gekoppelt, mit dem Ziel die Modellparameter direkt mit den physikalischen Eigenschaften des Gebietes zu verbinden und so die Unsicherheit in ihrer Bestimmung zu verringern.

### 6.1 Ganglinienanalyseverfahren zur Bestimmung von Abflusskomponenten

Ganglinienanalyseverfahren gehören zu den meist benutzten Verfahren in der angewandten Hydrologie, wenn die Quantifizierung einzelner Abflusskomponenten (Grundwasser-, Zwischen- oder Oberflächenabfluss), der Grundwasserneubildung oder der effektiven Reaktionszeiten unterschiedlicher Abflussräume benötigt wird. Trotz ihrer großen praktischen Relevanz wurde die Berechtigung ihrer Anwendung oft hart angegriffen, was eine zusätzliche Motivation für die ausführliche Studie war, die hier durchgeführt wurde.

Nach der Zusammenfassung der Grundprinzipien und -annahmen, die allen Ganglinienanalyseverfahren zu Grunde liegen, wurden die relevanten Ganglinienseparati-

onsmethoden systematisch erkundet und klassifiziert. Ein Programm wurde entwickelt, das zwölf verbreitete Methoden gleichzeitig implementiert und so ihren direkten Vergleich ermöglicht. Ihre Anwendbarkeit auf alle Teileinzugsgebiete (und nicht nur auf die Kopfeinzugsgebiete) wurde durch die Entwicklung und numerische Implementierung eines Flussroutingprogramms für Gewässernetze erweitert.

Die zwölf unterschiedlichen Separationsverfahren wurden auf einen Datensatz von 209 Ganglinien aus dem Einzugsgebiet der oberen Donau angewandt und anhand mathematischer und statistischer Methoden mit Fokus auf den Einfluss zeitlicher und räumlicher Skalen bewertet und verglichen. Ein komplexes Regionalisierungsverfahren überprüfte die Berechtigung der physikalischen Interpretation der Ergebnisse. Drei weitere Ganglinienanalyseverfahren für die Berechnung von effektiven Eigenschaften der Abflusskomponenten wurden im Testeinzugsgebiet der Ammer angewandt.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeitsschritte waren:

- Die sehr unterschiedlichen Separationsalgorithmen führen, wenn auf höhere zeitliche Skalen aggregiert, zu sehr ähnlichen Linien in ihrer Dynamik, die als quasi-parallel bezeichnet werden können. Weil sie sich in ihrer Dynamik kaum unterscheiden, können die Separationsverfahren ausreichend durch den Basisabflussindex BFI (das Verhältnis zwischen dem mittleren Basisabfluss und dem mittleren Gesamtabfluss) differenziert werden. Es gibt Verfahren, die systematisch hohe BFI-Werte liefern (Fixed-Interval, Rora, Wittenberg, DIFGA-QG1+QG2) und Verfahren, die systematisch niedrige BFI-Werte liefern (LfW, Kille, DIFGA-QG2).

Um das Spektrum der Ergebnisse aller Verfahren abzudecken, reicht es also aus, nur zwei Verfahren anzuwenden, eins für die obere BFI-Grenze und eins für die untere Grenze. Die zwei Komponenten der DIFGA-Methode sind dafür geeignet; andere Paare (z.B. Fixed-Interval und LfW), die einfacher zu berechnen sind, sind aber auch einsetzbar.

- Ab einer bestimmten Größe des Teileinzugsgebietes korrelieren die berechneten BFI-Werte stark mit der Fläche. Die nachgewiesene Grenze liegt zwischen 1000 und 1300 km<sup>2</sup> und bestätigt andere Literaturangaben. Wahrscheinlich resultierend aus der räumlichen Heterogenität des Niederschlagfeldes ist damit eine klare Grenze für die Anwendbarkeit von Ganglinienanalyseverfahren gesetzt.
- Alle Separationsverfahren verhalten sich stark nicht-additiv. Die Additivitätsprüfung wurde erstmals in dieser Arbeit durch die Berechnung von Ganglinien für einzelne Teileinzugsgebiete ermöglicht. Der Basisabfluss für ein Einzugsgebiet kann über die Addition der Basisabflussanteile seiner Teileinzugsgebiete berechnet werden. Wenn mehrere Pegel vorhanden sind, lassen sich viele Berechnungsmöglichkeiten aufstellen. Ohne Ausnahme zeigten die Ergebnisse der Prüfung große systematische Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Berechnungen: Je größer die mittlere Fläche der Teileinzugsgebiete war, desto größer war der aggregierte Basisabfluss. Die mögliche Erklärung besteht in der Veränderung der Abflussganglinie durch das Fließen in Gerinnen, das die reine Signatur des Gebietes teilweise überschreibt.

Die erste Folgerung dieses Ergebnis ist, dass auf unterschiedlichen räumlichen Skalen berechnete BFI-Werte miteinander nicht direkt vergleichbar sind. Die Aussagekraft der Verfahren ist aber insgesamt stark eingeschränkt, weil es nicht klar ist, wie man den Einfluss der obengenannten Veränderung der Ganglinien in Gerinnen mit berücksichtigen sollte.

- Zwei physikalische Interpretationen sind für die untere und die obere BFI-Grenze möglich. Zum einen kann der dazwischen liegende BFI-Bereich als ein Plausibilitäts- oder Unsicherheitsbereich gesehen werden, mit dem man den langsamen Teil der Abflusskurve bestimmen kann. Diese Interpretation, obwohl relativ sicher, ist für das hier untersuchte Problem nicht sehr aussagekräftig. Interessanter wäre eine zweite Interpretation des BFI-Bereiches als Zwischenabflussanteil und der unteren BFI-Grenze als Grundwasserabflussanteil.

Zusätzlich zu mehreren Literaturquellen konnte diese letzte Deutung auch durch das Regionalisierungsverfahren und durch die Anwendung anderer Ganglinienanalyseverfahren (zusätzlich zu den Separationsmethoden) teilweise bestätigt werden. Daraus folgend konnten zwei Karten für das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau erstellt werden: Sie stellen die geschätzten prozentualen Grundwasser- und Zwischenabflussanteile für jedes Teileinzugsgebiet dar. Der größere Anteil am Zwischenabfluss in den Alpen, insbesondere in den nicht verkarsteten Südalpen und im Bayerischen Wald konnte so quantifiziert werden, sowie die Aufteilung zwischen Grundwasser und Zwischenabfluss im Molassebecken. Die Tatsache, dass solche Werte nicht komplett validierbar sind, ermutigt allerdings nicht zu ihrer Anwendung für quantitative Aussagen.

## 6.2 Modellierung der Abflusskonzentration in den Wasserhaushaltsmodellkomplex unter Berücksichtigung des Sickerraumes. Anwendung im Gebiet der Ammer

Ein neues Modellkonzept, das die explizite Betrachtung des Sickerraumes ermöglicht und damit die Modellierungslücke zwischen dem Bodenwasserhaushalts- und dem Grundwassermodell schließt, wurde, entwickelt, implementiert und auf das Gebiet der Ammer angewandt. Die Implementierung beachtet insbesondere die Modularität der Modellstruktur und des numerischen Programms, eine Modularität, die mit dem Prinzip eines gekoppelten hydrologischen Modellkomplexes konsistent ist. Das gibt dem Modell eine hohe Anpassungsfähigkeit, so dass Änderungen und Erweiterungen problemlos möglich sind.

Methoden der Modellierung, die dem Stand der Technik entsprechen, wurden in das numerische Programm implementiert. Nicht nur die Modellgüte, sondern auch die strukturelle Unsicherheit der Modellergebnisse und bei der Bestimmung der Modellparameter, die generalisierte und einzelne Sensitivität des Modells im Parameterraum, sowie die Wechselbeziehungen zwischen den Modellparametern können damit ausführlich untersucht werden. Zu diesen Methoden gehören die Mehrziel-Optimierung, die GLUE-Analyse und die Hauptkomponentenanalyse.

- Der parallele Einsatz der Mehrziel-Optimierung für die Prüfung der optimalen Modellgüte und der GLUE-Analyse für die Prüfung der Modellsensitivität erwiesen sich als komplementäre Werkzeuge, die ein profundes Verständnis des Modells ermöglichen. Durch die Anwendung der Hauptkomponentenanalyse läßt sich dieses Verständnis durch die explizite Aufstellung der wichtigsten Beziehungen zwischen den Modellparametern erweitern.

Zwei Versionen des entwickelten Modells wurden benutzt: eine mit dem eingebauten Grundwasserströmungsmodell MODFLOW und eine mit einer linearen Speicherkaskade für das Grundwassermodul. Die zusätzliche Anwendung des klassischen Niederschlags-Abfluss-Modells HBV erhöhte die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse. Der Vergleich der drei Modelle mit ihren unterschiedlichen Graden der Konzeptionalisierung diente der Ermittlung der Vor- und Nachteile eines möglichst physikalisch-basierten Ansatzes in der hydrologischen Modellierung.

### **Güte der Modellergebnisse und Schätzung ihrer strukturellen Unsicherheit**

Beide Versionen des entwickelten Modells konnten in der Mehrheit der Teileinzugsgebiete gute bis sehr gute Ergebnisse erzielen. Zusätzlich zur erfolgreichen Abbildung der Gesamtabflussdaten konnte die Modellversion mit dem implementierten MODFLOW-Modell anhand gemessener Grundwasserspiegel validiert werden.

Die Integration des PROMET- (Bodenwasserhaushalt) und des MODFLOW-Modells mit festgesetzten Parametern hatte teilweise einen negativen Einfluss auf die Modellergebnisse. Trotz der theoretisch fundierteren Beschreibung der physikalischen Prozesse reichte die Modellparametrisierung mittels Feldmessungen und sektoraler Kalibrierung für optimale Ergebnisse des Gesamtmodells nicht aus:

- Kalibrierte Parameter können als effektive Werte nur im Kontext ihrer Bestimmung gültig sein. Sobald sie aus diesem Kontext genommen werden, ist ihre Validität nicht mehr gewährleistet. Die validierte Berechnung einer bestimmten Variablen kann also nicht als Argument für die Bewertung anderer nicht validierter berechneter Variablen benutzt werden. Wie physikalisch-basiert das Modell oder der Modellteil ist, spielt im Kontext dieser Frage keine Rolle.

### **Analyse der Modellparameter und ihrer Bestimmbarkeit**

Die Verteilung der Parameterwerte innerhalb der Mehrziel-Optimierung- und GLUE-Sätze gibt Aufschlüsse über die Unsicherheit der Bestimmung dieser Parameter. Die weitere Analyse der Sätze mittels der Hauptkomponentenanalyse erklärt die Gründe der Unsicherheit und beantwortet die Frage, ob physikalisch-interpretierbare Parameterwerte durch Verfahren der inversen Kalibrierung eindeutig bestimmt werden können.

Die parallele Analyse der drei Modelle und die Konsistenz ihrer Ergebnisse führte zu mehreren Erkenntnissen über allgemeine Eigenschaften hydrologischer Modelle. Diese sind die folgenden:

- Die Bestimmung einzelner Parameterwerte der hydrologischen Modelle anhand inverser Modellierung ist von einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Die

Nutzung von Messdaten des Gesamtabflusses konditioniert das Modell nicht stark genug, um die Berechnung von physikalisch-interpretierbaren Werten zu ermöglichen. Die relative Verbesserung der Bestimmbarkeit durch die Nutzung von zusätzlicher Information für die Kalibrierung, d.h. Messwerte für den Grundwasserspiegel, deutete an, dass die Konditionierung des Modells mittels Messdaten von weiteren Modellvariablen der richtige Weg für die Lösung des Unsicherheitsproblems ist. In diesem Kontext haben prozess-basierte Modelle ein erhöhtes Potential, weil sie mehr Variablen berücksichtigen können.

- Die Ursache für die Unbestimmbarkeit einzelner Parameterwerte liegt in den strukturspezifischen Wechselbeziehungen zwischen den Modellparametern, die auch in Modellen mit relativ wenigen Parameter vorhanden sind. Die Analyse dieser Beziehungen anhand der Hauptkomponentenanalyse führt zwar nicht zu einem besseren Verständnis der physikalischen Prozesse, aber zu einem besseren Verständnis des Modellverhaltens. Das Muster der Kompensierung ist von der Modellstruktur vorgegeben, so dass es zwischen verschiedenen Modellen stark variiert.
- Auf Grund der strukturellen Unsicherheit der Modelle und der fehlenden direkten Messdaten lassen sich interne Modellergebnisse, wie die Separation zwischen Grundwasser- und Zwischenabfluss, nicht durch inverse Modellierung eindeutig bestimmen. Unterschiedliche Modellstrukturen führen zu unterschiedlichen Ergebnissen, deren Wahrheit ohne zusätzliche Informationen nicht bewertet werden kann.

### 6.3 Verknüpfung von Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren

Nachdem die einfache inverse Modellierung wegen sehr hohen strukturellen Unsicherheiten teilweise nicht zufriedenstellende Ergebnisse, was die Bestimmbarkeit der Parameter betrifft, geliefert hatte, wurde ein anderer Ansatz angewandt: Durch die Kombination der Modellkalibrierung mit einem Regionalisierungsverfahren werden nicht mehr die Parameterwerte an die Modellgüte direkt angepasst, sondern die Koeffizienten der Übertragungsfunktionen, die die Parameter mit ausgewählten Gebitseigenschaften in Verbindung bringen, kalibriert.

- Für die meisten Teileinzugsgebiete blieb die zufriedenstellende Modellgüte, die bei der normalen einzelnen Kalibrierung erzielt wurde, auch für den Regionalisierungsansatz erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die dafür notwendige CPU-Leistung signifikant niedriger war. Die Ausnahmen von den allgemeinen guten Ergebnissen wurden durch ein Missverhältnis zwischen der Skala der Erstellung der hydrogeologische Klassifizierung (das Gesamtgebiet der Oberen Donau, 77.000 km<sup>2</sup>) und der Skala ihrer Anwendung (das Gebiet der Ammer 710 km<sup>2</sup> und das Gebiet der Naab 5512 km<sup>2</sup>) verursacht, was die Sensitivität des Ansatzes gegenüber Missdeutungen der Daten beweist.
- Die Anwendung der Übertragungsfunktionen nach ihrer Kalibrierung auf neue Gebiete führte ebenfalls in der Regel zu einer zufriedenstellenden Modellgüte.

Der Vergleich zwischen mehreren Gebietsauswahlen für die Kalibrierung zeigte sehr stabile Ergebnisse, was das Potential der Methode für große Gebiete neu unterstreicht: Das Modell muss nur für eine kleine Anzahl von Teileinzugsgebieten (mit repräsentativen Gebietsmerkmalen) kalibriert werden und kann anschließend auch für den Rest des Gebietes genutzt werden. Wesentlich ist auch die Möglichkeit der Anwendung in Gebieten, für die keine Messdaten vorhanden sind.

- Der wichtigste Vorteil der Methode ist aber das gleichzeitige Konditionieren des Modells mit der Modellgüte mehrerer Teileinzugsgebiete. Dies führt zu einer sehr guten Bestimmbarkeit der Modellparameter und löst das Problem der strukturellen Unsicherheit. Damit erweist sich der Regionalisierungsansatz als eine bessere Alternative zur üblichen Modellkalibrierung: Er verbraucht weniger Rechenressourcen und führt zu sichereren Parametern. Er ermöglicht auch durch die Interpretation der Übertragungsfunktionen eine Prüfung der physikalischen Plausibilität des Modells. Die Sensitivität gegenüber Fehlern in der Klassifizierung der Gebieteigenschaften verbessert das Gebietsverständnis. Gut bestimmte Parameter bedeuten, dass die internen Ergebnisse des Modells ebenfalls von einer kleinen Unsicherheit behaftet sind. Der einzige Nachteil, eine relativ geringe Verschlechterung der Modellgüte, kann in Kauf genommen werden.

Die Interpretation der Modellergebnisse in den Testgebieten der Ammer und der Naab führt zu folgenden Schlüssen:

- Es konnte bestätigt werden, dass der Grundwasserraum in Lockergesteins- und Karstgebieten die primäre Rolle bei der Abflusskonzentration spielt und, dass für Festgesteinsgebiete diese Rolle vom Sickerraum übernommen wird.
- Die Zwischenabflusskomponenten, die mit dem Sickerraum in Verbindung gesetzt werden, erweisen sich als sehr schnell, mit Reaktionszeiten im Bereich von wenigen Tagen.
- Die Grundwasserabflusskomponente ist von Parameterwerten des Speichermodells im Bereich von 140 bis 250 Tagen charakterisiert, ihre Interpretation als mittlere Fließzeiten wurde allerdings von einem grundsätzlichen Problem des benutzten Speichermodells behindert. Eine systematische Überschätzung der Reaktionszeiten scheint bei den langsameren Komponenten die Anwendung des Speicherkonzeptes zu beeinträchtigen.
- Der Vergleich zwischen Ergebnissen des Modells und den Ganglinienanalyseverfahren zeigte keine Übereinstimmung. Die Menge an direkter Information, auf der das Modell aufbaut, ist deutlich höher. Deswegen sollte ihnen mehr vertraut werden. Die Anwendung von Ganglinienanalyseverfahren für die Unterstützung von Studien der hydrologischen Modellierung konnte also nicht begründet werden.

## 6.4 Hydrologische Sickerraummodellierung

Aus den Ergebnissen der Arbeit lassen sich folgende Hauptkenntnisse über die Möglichkeit der expliziten Sickerraummodellierung in mesoskaligen Einzugsgebieten ableiten:

- Es konnten keine harten Beweise gefunden werden, die die Anwendung von Ganglinienseparationsmethoden, die allein auf dem gemessenen Gesamtabfluss beruhen, für die Bestimmung des Sickerraumabflusses und Grundwasserabflusses rechtfertigen. Auch für Studien, für die keine anderen Daten zur Verfügung stehen, ist es fraglich, ob solche Verfahren benutzt werden sollten.
- Der Sickerraum konnte in einem hydrologischen Modell erfolgreich explizit abgebildet werden. Durch die bessere Abbildung der echten Abflusskonzentrationsstruktur, hat das Modell eine höhere Anpassungsfähigkeit als das klassische Schema: Bodenwasser-Grundwasser-Flusswasser. Wenn man dazu noch ein explizites Grundwasserströmungsmodell benutzt, gewinnt das Modell an Aussagekraft durch die zusätzliche Berechnung des Grundwasserspiegels und der räumlichen verteilten Grundwasserströmung. Dazu kommt, dass das Konditionieren an den Messwerten der Aquifereigenschaften zu einer besseren Bestimmbarkeit der Parameter nach der inversen Modellierung führt. Die Verbesserung ist aber nicht signifikant genug, um die strukturelle Modellunsicherheit auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. In Verbindung zu den üblichen verfügbaren Messdaten (Gesamtabfluss und Grundwasserstand) liefert die normale inverse Modellierung für hydrologische Einzugsgebietmodelle unbefriedigende Ergebnisse, wenn man an einer guten Parameterbestimmbarkeit interessiert ist.
- Die explizite Sickerraummodellierung konnte anhand des Regionalisierungsansatzes erfolgreich abgeschlossen werden, indem das verbliebene Problem der strukturellen Unsicherheit durch das gleichzeitige Konditionieren der Regionalisierungsbeziehungen für mehrere Teileinzugsgebieten gelöst werden konnte. Das hier entwickelte Modell und die Modellierungsstrategie können also jetzt mit guten Erwartungen auf zufriedenstellende Modellgüte und Parameterbestimmbarkeit für mesoskalige Einzugsgebiete angewandt werden. Die Berechtigung der Anwendung der Modellergebnisse und Modellparameter ist damit gegeben, um Rückschlüsse über die mit dem Grundwasserraum und mit dem Sickerraum verbundenen physikalischen Prozesse zu ziehen.

Das Ziel, die hydrologisch relevanten physikalischen Eigenschaften des Sickerraumes so zu bestimmen, dass die berechneten Werte auch außerhalb des direkten Modellierungskontextes ihre Gültigkeit haben, wurde nur teilweise erreicht. Der Mangel an direkten Daten über den Sickerraum, über seine auf einer räumlich signifikanten Skala ermittelten Eigenschaften oder Ströme, zwang die Anwendung einer generischen mathematischen Funktion (das Integral der unvollständigen Gammafunktion, die mathematische Form der linearen Speicherkaskade) für die Modellierung der Strömungsprozesse. Mit dieser Funktion konnten die gestellten Modellierungsaufgaben zwar erfolgreich gelöst werden, ihre Konzeptualität führt aber dazu, dass ihre Parameter nicht als tatsächliche physikalische Eigenschaften interpretiert werden

können. Um dieses Ziel zu erreichen, wäre die Entwicklung eines neuen theoretischen Modells notwendig, das die vertikale Strömung in der ungesättigten Zone mit der horizontalen Strömung über die schwebenden Aquifere und unter Berücksichtigung der bevorzugten Fließrichtungen so komprimiert, dass es aus Modellierungssicht sinnvoll und effizient bleibt. Die Effizienz des Modells ist vor allem deswegen unbedingt erforderlich, weil die Modellparameter weiter anhand hydrologischer Verfahren der inversen Modellierung bestimmt werden müssten. Ein solches theoretisches Modell zu entwickeln, ist eine beachtliche Forschungsaufgabe, die den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte.

### 6.5 Abschließende Bemerkungen und Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Die Abbildung von Gesamtabflusskurven mittels hydrologischer Modelle ist schon seit relativ langer Zeit meist eine lösbare Aufgabe. Viele verfügbare Modelle zusammen mit Anpassungsalgorithmen und genügend langen Messdatenreihen lösen effizient und regelmäßig diese Aufgabe. Die Anwendung der Modelle unter neuen sozioökonomischen und klimatischen Bedingungen, das Streben nach mehr als nur den Gesamtabfluss als Modellergebnis nutzen zu können oder der Wunsch nach mehr physikalischer Interpretierbarkeit der Parameterwerte sind allerdings noch größtenteils ungelöste Fragen. Solange keine deterministische Erfassung der räumlich verteilten Struktur und Eigenschaften des Untergrundes möglich ist, wird eine echte prozess-basierte hydrologische Modellierung auf der Mesoskala ein Ideal bleiben. Das bedeutet allerdings nicht, dass es sinnlos ist, danach zu streben.

Die vorliegende Arbeit bestätigt die bereits existierenden Literaturangaben, indem sie bewies, dass die Einbindung von zusätzlichen direkten (gemessenen) Informationen außer den klassischen Niederschlags- und Gesamtabflussdaten der richtige Weg für das Angehen dieser Herausforderung ist. Die Einbindung kann direkt sein: Dabei wird die Komplexität des Modells erhöht, so dass es in der Lage ist, mehr Variablen, für die es Messdaten gibt, zu berechnen und damit konditioniert zu werden. Ein Beispiel für diesen Ansatz ist die Integration eines expliziten Grundwasserströmungsmodells. Die Einbindung kann auch indirekt erfolgen, indem die zusätzliche Information nicht in das Modell, aber in die Modellierungsstrategie integriert wird. Dieser Weg wurde bei der Verknüpfung der Modellkalibrierung mit einem Regionalisierungsverfahren ausgewählt.

Sowohl die direkte als auch die indirekte Einbindung von zusätzlichen Daten haben Schwachpunkte, sie bieten aber auch wesentliche Vorteile für die Lösung des Problems. Solche und neue Ansätze müssen weiterentwickelt werden, um nicht nur die Bestimmbarkeit der Modellparameter sondern auch die Struktur der angewandten Modelle zu verbessern. Das Ziel ist, die richtige Modellstruktur für die natürliche Gegebenheit und für die verfügbaren Daten zu finden. Die Bemessung von Qualitätsmerkmalen des Wassers entlang seines Kreislaufes (z.B. Temperatur, Konzentration von diversen chemischen Stoffen) und ihre Verbindung mit den Beschreibungen der Prozesse könnten das Potenzial der Methoden durch ihren zusätzlichen Informationsgehalt erheblich erweitern; es ist ein Potenzial, das zu einer besseren und wertvolleren quantitativen Hydrologie führt.



# Literaturverzeichnis

- [1] ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E., RASMUSSEN, J., 1986. *An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system*, Journal of Hydrology, No. 87, S. 61-77.
- [2] AHMED, E., DE MARSILY, G., 1987. *Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity*, Water Resources Research, Vol. 23, No. 9, S. 1717-1737.
- [3] AKSOY, H., WITTENBERG, H., 2001. *Jahreszeitliche Veränderung der Trockenwetterganglinie - Fallstudie für einen Fluss im europäischen Teil der Türkei*, Wasserwirtschaft, Vol. 91, No. 1, S. 38-41.
- [4] APPLEBY, V.C., 1970. *Recession and the baseflow problem*, Water Resources Research, Vol. 6, No. 5, S. 1398-1403.
- [5] ARMBRUSTER, V., 2002. *Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg*, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17.
- [6] ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M., BERNHARDT, G., 1993. *A comprehensive surface-groundwater flow model*, Journal of Hydrology, No. 142, S. 47-69.
- [7] ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M., MUTTIAH, R., BERNHARDT, G., 1995. *Automated base flow separation and recession techniques*, Ground Water, Vol. 33, No. 6, S. 1010-1018.
- [8] ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M., 1999. *Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records*, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 35, No. 2, S. 411-424.
- [9] ARNOLD, J.G., MUTTIAH, R.S., SRINIVASAN, R., ALLEN, P.M., 2000. *Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin*, Journal of Hydrology, No. 227, S. 21-40.
- [10] BARNES, B.S., 1939. *The structure of discharge recession curves*, Transactions of American Geophysical Union, No. 20, S. 721-725.
- [11] BÁRDOSSY, A., GIESE, H., HALLER, B., RUF, J., 2001. *Regionalisierte Niederschlagsreihen im 5-minuten-Zeittraster für Baden-Württemberg*, KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Vol. 48, No. 3, S. 300-308.

- [12] BECKER, A., 1995. *Problems and progress in macroscale hydrological modeling*. In: FEDDES, R.A. (Hrsg.), *Space and time scale variability and interdependencies in hydrological processes*, S. 135-144, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [13] BERENSON, M.J., LEVINE, M.L., GOLDSTEIN, M., 1998. *Intermediate statistical methods and applications: a computer package approach*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- [14] BERGSTRÖM, S., 1995. *The HBV model*. In: SING, V. P. (Hrsg.), *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications, S. 443-476, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- [15] BESBES, M., DE MARSILY G., 1984. *From infiltration to recharge: use of a parametric transfer function*, Journal of Hydrology, No. 74, S. 271-293.
- [16] BEVEN, K. J., 1989. *Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models*, Journal of Hydrology, No. 105, S. 157-172.
- [17] BEVEN, K. J., BINELY, A., 1992. *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*, Hydrological Processes, Vol. 6, S. 279-298.
- [18] BEVEN, K. J., 2000. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, John Willey & Sons, Ltd, Chichester, England.
- [19] BEVERLY, C. R., CROTON, J. T., 2002. *Formulation and application of the unsaturated/saturated catchment model SUSCAT and WEC-C*, Hydrological Processes, No. 16, S. 2369-2394.
- [20] BIRTLES, A. B., 1978. *Identification and separation of major base flow components from a stream aquifer*, Water Resources Research, Vol. 14, No. 5, S. 791-803.
- [21] BLÖSCHL, G., 1996. *Scale and scaling in hydrology*, Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer, Band 132, Wien.
- [22] BOX, G.E.P., COX, D.R., 1964. *An analysis of transformation*, Journal of the Royal Statistical Society, Vol. B26, S. 211-252.
- [23] BOYLE, D.P., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., 2003. *Multicriteria calibration of hydrologic models*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 185-196, Washington, USA.
- [24] CANTY, A.J., 2002. *An S-Plus Library for Resampling Methods*, url: <http://statwww.epfl.ch/davison/BMA/libraray.html>. Letzter Zugriff 24. März 2005.
- [25] CHAPMAN, T.G., 1991. *Comment on „Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analysis“ by R.J. Nathan and T.A. McMahon, Reply to the comment by R.J. Nathan and T.A. McMahon*, Water Resources Research, Vol. 27, No. 7, S. 183-1784.

- [26] CHAPMAN, T.G., MAXWELL, A.I., 1996. *Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments*, Proceedings 23<sup>rd</sup> Hydrology and Water Resources Symposium, Hobart Australia, May 21-24, 1996, Institution of Engineers Australian National Conference Publication 96/05, S. 539-545.
- [27] CHAPMAN, T., 1996. *A comparison for stream flow recession and baseflow separation*, Hydrological Processes, Vol. 13, S. 701-714.
- [28] CHAVEZ, A., SOROOSHIAN, S., DAVIS, S.N., 1994. *Estimation of mountain front recharge to regional aquifers 1. Development of an analytical hydroclimatic model*, Water Resources Research, Vol. 30, No. 7, S. 2157-2167.
- [29] CHRISTENSEN, S., RASMUSSEN, K.R., MØLLER, K., 1998. *Prediction of regional ground water flow to streams*, Ground Water, Vol. 36, No. 2, S. 351-360.
- [30] COOK, P.K., JOLLY, I.D., WALKER, G.R., ROBINSON, N.I., 1996. *From drainage to recharge to discharge: some timelags in subsurface hydrology*. In: ALSHARHAN, A.S., WOOD, W.W. (Hrsg.), *Water Resources Perspectives: Evaluation, Management and Policy*, Developments in Water Science, No. 50, S. 319-326, Elsevier Science, Amsterdam.
- [31] DEUTSCH, C.V., 1996. *Geostatistical Reservoir Modeling*, Oxford University Press, USA.
- [32] DIN 4049, 1979, 1994. *Teil 1 Hydrologie. Grundbegriffe und Teil 3 Begriffe zur quantitativen Hydrologie*, Deutsches Institut für Normung e. V., Normenausschuß für Wasserwesen, Berlin.
- [33] DOBEN, K., 1976. *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 8433 Eschenlohe*, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- [34] DOGGE, J.C.I., 1973. *Linear Theory of Hydrologic Systems*, Techn. Bull. 1468, US Department of Agriculture, Washington D.C.
- [35] DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, H.V., 1992. *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. Water Resources Research, Vol. 28, No. 4, S. 1015-1031.
- [36] DUAN, Q., 2003. *Global optimization for watershed model calibration*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 89-104, Washington, USA.
- [37] DVWK, 1991. *Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland. Erläuterungen und Ergänzungen zu KOSTRA*, DVWK-Schriften 97/1991, Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- [38] DYCK, S., PESCHKE, G., 1995. *Grundlagen der Hydrologie*, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [39] EAGLESON, P. S., 1978. *Climate, soil and vegetation 1. introduction to water balance dynamics*, Water Resources Research, Vol. 14, No. 5, S. 705-712.

- [40] EDMUNDS, W.M., TYLER, S.W., 2002. *Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions*, Hydrogeology Journal, Vol. 10, S. 216-228.
- [41] EHRET, U., 2003. *Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar*, Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, H. 121, Eigenverlag des Instituts für Wasserbau, Stuttgart.
- [42] FREER, J., BEVEN, K., PETERS, N., 2003. *Multivariate seasonal period model rejection within the generalised likelihood uncertainty estimation procedure*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 69-87, Washington, USA.
- [43] FREEZE, J.B., HARLAN, R.L., 1969. *Blue-print for a physically-based digitally simulated hydrological response model*, Journal of Hydrology, No. 9, S. 237-258.
- [44] FUREY, P.R., GUPTA, V.K., 2001. *A physically based filter for separating base flow from streamflow time series*, Water Resources Research, Vol. 37, No. 11, S. 2709-2722.
- [45] GABRIEL, J., ZIEGLER, L.W., 1989. *Lithofaziesseinheiten - ein neues Konzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Festgesteinsbereich*, Wasserwirtschaft-Wassertechnik, No. 7, S. 163-165.
- [46] GAN, T.Y., BIFTU, G.F., 2003. *Effects of model complexity and structure, parameter interconnections and data on watershed modeling*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 317-329, Washington, USA.
- [47] GARBRECHT, B., MARTZ, G., 1995. *TOPAZ: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization*, TOPAZ User Manual, USDA-ARS Publication No. NAWQL 95-3, USDA-ARS, Durant, Oklahoma.
- [48] GARZÓN, A. P., 2005. *Hydrological modelling in the Ammer catchment using the HBV model*, Independent Study, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- [49] GEERTS, B., 2002. *Precipitation and Orography*. In: GEERTS, B., LINACRE, E., OOLMAN, L. (Hrsg.), *Resources in atmospheric sciences*, url: <http://www-das.uwyo.edu/geerts/cwx/> (letzter Zugriff 22. April 2005).
- [50] GILCHRIST, W., 1984. *Statistical modelling*, Wiley, Chichester, England.
- [51] GRAYSON, R. B., MOORE, I. D., MCMAHON, T. A., 1992. *Physically based hydrologic modeling. 2 Is the concept realistic?*, Water Resources Research, Vol. 26, No. 10, S. 2659-2666.
- [52] GUPTA, V.H., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O., 1998. *Towards improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information*, Water Resources Research, Vol. 34, No. 4, S. 751-763.

- [53] GUPTA, V.H., BASTIDAS, L.A., VRUGT, J.A, SOROOSHIAN, S., 2003. *Multiple criteria global optimization for watershed model calibration*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 125-132, Washington, USA.
- [54] GUSTARD, A., 1993. *Flow regimes from international experimental and network data. Vol. 1: hydrological studies*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- [55] HABERLANDT, U., KLÖCKING, B., KRYSONOVA, V., BECKER, A., 2001. *Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components*, Journal of Hydrology, No. 248, S. 35-53.
- [56] HALL, F.R., 1968. *Base-flow recessions - a review*, Water Resources Research, Vol. 4, No. 5, S. 973-983.
- [57] HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., McDONALD, M.G., 2000. *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process*, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92.
- [58] HARLIN, J., KUNG, C.-S., 1992. *Parameter uncertainty and simulation of design floods in Sweden*, Journal of Hydrology, No. 137, S. 209-230.
- [59] HARTER, T., HOPMANS, J.W., 2004. *Role of vadoze-zone flow processes in regional-scale hydrology: review, opportunities and challenges*. In FEDDES, R.A., DE ROOIJ, G.H., VAN DAM, J.C. (Hrsg.), *Proceedings of the workshop: Unsaturated-zone modeling: progress, challenges and applications, Wageningen 3-5 Oktober 2004*, S. 179-204.
- [60] HARTUNG, J., ELPELT, B., KLÖSENER, K-H., 2002. *Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, R. Oldenburg Verlag, München.
- [61] HENNING, H., SCHWARZE, R., 2001. *Geohydraulische Interpretation des Konzeptmodells Einzellinearspeicher und Konsequenzen für die Modellierung des Grundwasserabflusses*, Wasserwirtschaft, No. 90, S. 42-48.
- [62] HEWLETT, J.D., HIBBERT, A.R., 1967. *Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas*. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Hrsg.), *International Symposium on Forest Hydrology*, S. 275-290, Pergamon, New York, USA.
- [63] HERRON, N., WILSON, C., 2001. *A water balance approach to assessing the hydrologic buffering potential of an alluvial fan*, Water Resources Research, Vol. 37, No. 2, S. 341-351.
- [64] HOLLICK, M., LYNE, V., 1979. *Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling*, Proceedings Hydrology and Water Resources Symposium, S. 89-92, Perth, Australia.
- [65] HÖLTING, B., 1996. *Hydrogeologie*, Enke, Stuttgart.

- [66] HORNBERGER, G.M., SPEAR, R.C., 1981. *An approach to the preliminary analysis of environmental systems*, Journal of Environmental Management, No. 12, S. 7-18.
- [67] HUNDECHA, Y., BÁRDOSSY, A., 2004. *Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalisation of a watershed model*, Journal of Hydrology, No. 209, S. 281-295.
- [68] INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980. *Low flow studies*, Res. Rep. 1, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- [69] IPCC (Hrsg.), 2001. *Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [70] JELINEK, S., KLUGE, W., WIDMOSER, P., 1999. *Über das Abflussverhalten kleiner Einzugsgebiete in Norddeutschland am Beispiel der oberen Stör in Schleswig-Holstein*, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, No. 43 (1), S. 1-16.
- [71] JENSON, S.K., DOMINGUE, J.O., 1988. *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No. 11, S. 1593-1600.
- [72] JOLLIFE, I.T., 1986. *Principal Component Analysis*, Springer-Verlag, New York.
- [73] JOHNSTON, P.R., PILGRIM, D., 1976. *Parameter Optimization for Watershed Models*, Water Resources Research, Vol. 12, No. 3, S. 477-486.
- [74] KAVETSKI, D., FRANKS, S.W., KUCZERA, G. 2003. *Confronting input uncertainty in environmental modelling*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 49-68, Washington, USA.
- [75] KILLE, K., 1970. *Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse*, Z. deutsch. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem., S. 89-95, Hannover.
- [76] KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., VECCHI, M. P., 1983. *Optimisation by simulated annealing*, Science, Vol. 220, No. 4598, S. 671-680.
- [77] KOBUS, H., 1992. *Vorwort*. In: KLEEGERG, H.B. (Hrsg.), *Regionalisierung in der Hydrologie*, Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Deutsche Forschungsgemeinschaft, VCH, S. V-VII, Weinheim,.
- [78] KÖNIG, P., LANG, H., SCHWARZE, R., 1994. *On the runoff formation in the small pre-alpine research basin Rietholzbach*, IAHS Publ., No. 221, S. 39-398.
- [79] KOKKONEN, T. S., JAKEMAN, A. J., 2001. *A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modeling and its implication*, Water Resources Research, Vol. 37, No. 9, S. 2345-2352.

- [80] KOREN, V., SMITH, M., DUAN, Q., 2003. *Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 239-254, Washington, USA.
- [81] KRISHNAIAH, P.R., KANAL, L.N., 1982. *Classification Pattern Recognition and Reduction of Dimensionality*. In: KRISHNAIAH, P.R. (Hrsg.), *Handbook of Statistics*, Vol. 2, North-Holland, Amsterdam.
- [82] KRYSANOVA, V., BRONSTERT, A., MÜLLER-WOHLFEIL, D.-I., 1999. *Modelling river discharge for large drainage basins: from lumped to distributed approach*, Hydrological Sciences, Vol. 44, No. 2, S. 313-331.
- [83] KUCZERA, G., PARENT, E., 1998. *Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm*, Journal of Hydrology, No. 211, S. 1145-1168.
- [84] KUCZERA, G., MROCKOWSKI, M., 1998. *Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multireponse data*, Water Resources Research, Vol. 34, No. 6, S. 1481-1489.
- [85] LACEY, G.C, GRAYSON, R.B., 1998. *Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia*, Journal of Hydrology, No. 204, S. 231-250.
- [86] LANCZOS, C., 1964. *SIAM Journal on numerical analysis*, ser. B, Vol. 1, S. 86-96.
- [87] LANG, U., 1995. *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, H. 85, Eigenverlag des Instituts für Wasserbau, Stuttgart.
- [88] LAPIN, M., 1990. *Measurement and processing of atmospheric precipitation in mountainous areas of Slovakia*, IAHS Publ. No. 190, S. 47-55.
- [89] LEXIKON DER GEOWISSENSCHAFTEN, 2005. Bereitgestellt von Spektrum Akademischer Verlag, url: <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geo>. Letzter Zugriff 22. August 2005.
- [90] LFW, 1996. *Die Grundwasserneubildung in Bayern berechnet aus den Niedrigwasserabflüssen der oberirdischen Gewässer*, Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 5/96.
- [91] LINSLEY, R.K., JR., M.A. Kohler, Paulhus, J.L.H., 1975. *Hydrology for engineers*, McGraw-Hill Book Co., UK.
- [92] LUDWIG, R. 2000. *Die flächenverteilten Modellierung von Wasserhaushalt und Abflussbildung im Einzugsgebiet der Ammer*, Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B 32, München.

- [93] McDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W., 1988. *A modular three dimensional finite difference groundwater flow model*, U.S. Geological Survey Technique of Water Resources Investigations, book 6, chap. A1, Washington, USA.
- [94] MAU, D.P., WINTER, T.C., 1997. *Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate*, New Hampshire, USA, Ground Water, Vol. 35, No. 2, S. 291-304.
- [95] MAUSER, W., 1989. *Die Verwendung hochauflösender Satellitendaten in einem Geographischen Informationssystem zur Modellierung von Flächenverdunstung und Bodenfeuchte*, Habilitationsschrift, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- [96] MAUSER, W., STRASSER, U. (Hrsg), 2004. *Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zum Globalen Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel des Einzugsgebietes der Oberen Donau*, Abschlussbericht des GLOWA-Donau Forschungsprojektes, Phase 1, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- [97] MCCARTHY, G.T., 1938. *The unit hydrograph and flood routing*, Conf. North Atlantic Div., U.S. Corps of Engineers, New London, Connecticut, USA.
- [98] MCCUEN, R., 1998. *Hydrologic analysis and design*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- [99] METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A., ROSENBLUTH, M., TELLER, A., TELLER, E., 1953. *Simulated annealing*, Journal of Chemical Physics, Vol. 21, S. 1087-1092.
- [100] MORIN, E., GEORGAKAKOS, P., SCHAMIR, U., GURTI, R., ENZEL, Y., 2002. *Objective, observation-based, automatic estimation of the catchment response timescale*, Water Resources Research, Vol. 38, No. 10, S. 1212-1227.
- [101] MÜLLER, T., 1999. *Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [102] NASH, J.E., 1958. *The form of the instantaneous Unit Hydrograph*, IAHS Publ. 45, Vol. III, S. 114-121.
- [103] NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., 1970. *River flow forecasting through conceptual models I: discussion of principles.*, Journal of Hydrology, No. 10, S. 282-290.
- [104] NATERMANN, E., 1951. *Die Linie des langfristigen Grundwassers (A<sub>u</sub>L) und die Trockenwetter-Abflußlinie (TWL)*, Wasserwirtschaft, Tagung in München 1950, S. 12, Stuttgart.
- [105] NATHAN, R.J., MCMAHON, T.A., 1990. *Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis*, Water Resources Research, Vol. 26, No. 7, S. 1465-1473.
- [106] NELDER, J.A., MEAD, R., 1965. *A Simplex Method for Function Minimization*, Computer Journal, Vol. 7, S. 308-313.



- [107] NEUMANN, J., 2004. *Makroskalige Modellierung der Grundwasserneubildung - Verfahrensentwicklung für den Hydrologischen Atlas Deutschland*. In: LUDWIG, R., REICHERT, D., MAUSER, W. (Hrsg.), *7. Workshop zur großskaligen Modellierung in der Hydrologie*, Kassel University Press, S. 145-154, Kassel.
- [108] PEDHAZUR, E.J., 1997. *Multiple regression in behavioural research*, Thomson Learning, London.
- [109] PETTYJOHN, W.A., HENNING, R., 1979. *Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio*, Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report No. 552.
- [110] PLATTE, E.J., SCHULTZ, G.A., SEUS, G.J., WITTENBERG, H., 1977. *Ablauf von Hochwasserwellen in Gerinnen*, Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser und Kulturbauwesen, Heft 27, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- [111] PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T., FLANNERY, B.P., 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77*, Cambridge University Press, New York, USA.
- [112] PRUESS, K., 1999. *A mechanistic model for water seepage through thick unsaturated zones in fractured rocks of low permeability*, Water Resources Research, Vol. 35, No. 4, S. 1039-1051.
- [113] RAIKO, T., 2001. *Hierarchical Nonlinear Factor Analysis*, Master's Thesis an der Helsinki University of Technology, url: <http://www.cis.hut.fi/praiiko/dippa/dippa.html>. Letzter Zugriff 10. Juni 2005.
- [114] REFSGAARD, J.C., 1996. *Terminology, Modelling Protocol and Classification of Hydrological Model Codes*, In: REFSGAARD, J.C., ABBOTT, M.B. (Hrsg.), *Distributed Hydrological Modelling*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Die Niederlande.
- [115] RICHTER, D., 1995. *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Fehlers des Hellmann-Niederschlagsmesser*. In: *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, No. 194, Offenbach am Main.
- [116] RIEDEL, G., MANIAK, U., 1998. *Ableitung und Regionalisierung von Laufzeit und Speicherfunktion für direkte Abflusskomponenten aus direkt beobachtbaren geographischen Informationen*. In: KLEEBERG, H.B., MAUSER, W., PESCHKE, G., STREIT, U. (Hrsg.), *Hydrologie und Regionalisierung*, Forschungsbericht, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, S. 235-248, Weinheim.
- [117] RIEKEL, R., 1983. *Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Flußgebiet der Ammer*, Dissertation an der Technischen Universität München.
- [118] RIELAND, M., 2004. *Das BMBF-Programm GLOWA: Instrumente für ein vorausschauendes Management großer Flusseinzugsgebiete*, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Vol. 48, No. 2, S. 83-84.
- [119] RODRIGUEZ-ITURBE, I., RINALDO, A., 1997. *Fractal River Basins. Chance and Self-Organization*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- [120] RORABAUGH, M.I., 1964. *Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow*, International Association, of Scientific Hydrology, Vol. 63, S. 432-441.
- [121] RUTLEDGE, A.T., DANIEL, C.C., 1994. *Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records*, Ground Water, Vol. 32, No. 2, S. 180-192.
- [122] RUTLEDGE, A.T., 1998. *Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records*, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 98-4148.
- [123] SAMANIEGO, L.E., 2003. *Hydrological consequences of land use / land cover and climatic changes in mesoscale catchments*, Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, H. 118, Eigenverlag des Instituts für Wasserbau, Stuttgart.
- [124] SCANLON, B. R., HEALY, R. W., COOK, P. G., 2002. *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*, Hydrogeology Journal, No. 10, S. 18-39.
- [125] SCHAEFLI, B., 2005. *Quantification of hydrological modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources: application to a glacier-fed hydropower production system*, Dissertation, Swiss Institute of Technology, Lausanne.
- [126] SCHMIDT, K.-H., 1992. *Regionalisierung mit Hilfe morphometrischer Parameter*. In: KLEEGERG, H.B. (Hrsg.), *Regionalisierung in der Hydrologie*, Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Deutsche Forschungsgemeinschaft, VCH, Weinheim, S. 317-324.
- [127] SCHMIDT, F., 2001. *ArcView GIS Script - Watershed from Point Theme*, [online], Letzte Aktualisierung: 14.08.2001. Erhältlich unter: <http://arcscripsts.esri.com/details.asp?dbid=11465>.
- [128] SCHNEIDER, K., 1999. *Gekoppelte, flächenverteilte Modellierung von Pflanzenwachstum und Verdunstung im Ammereinzugsgebiet mit dem prozessorientierten Evapotranspirations- und Vegetationsmodell PROMET-V*, Geowissenschaftliche Fakultät der Ludwigs-Maximilians-Universität München, Dissertation.
- [129] SCHRAEBER, D., SZYMCAK, P., 1984. *Zur Ermittlung des Basisabflusses und der Abschätzung dränabler Kluftvolumina aus Quellschüttungsmessungen in Festgesteinen*, Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 30, Heft 3, S. 135-139.
- [130] SCHWARZE, R., HERRMANN, A., MÜNCH, A., GRÜNEWALD, U., SCHÖNIGER, M., 1991. *Rechnergestützte Analyse von Abflusskomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten*, Acta hydrophysica, Vol. 35, No. 2, S. 143-184, Berlin.

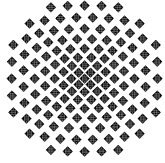
- [131] SCHWARZE, R., DRÖGE, W., OPPERDEN, K., 1999. *Regionalisierung von Abflusskomponenten und Verweilzeiten für kleine Mittelgebirgseinzugsgebiete*, In: Kleeberg, H.B., Mauser, W., Peschke, G und Streit, U. (Hrsg.), *Hydrologie und Regionalisierung - Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998)*, Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), S. 345-370, Weinheim.
- [132] SCHWARZE, R., 2001. *Programmdokumentation DIFGA2000*, Version 1.2.0, Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden, Stand 09/2001.
- [133] SCHREIBER, P.M., 1995. *Regionalisierung des Niedrigwassers mit statistischen Verfahren unter Verwendung eines Geographischen Informationssystems*, Dissertationarbeit, Professur für Hydrologie Universität Freiburg i.Br.
- [134] SCHUOL, J., 2003. *Vergleich verschiedener Ganglinieseparationsverfahren angewendet in Teileinzugsgebieten der oberen Donau*, Diplomarbeit, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- [135] SEILER, K.-P., 1977. *Hydrogeologie glazial übertiefer Täler der Bayerischen Alpen zwischen Lech und Wössner Tal*, Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, No. 29, S. 5-118.
- [136] SHERMAN, L.K., 1932. *Stream-flow from rainfall by the unit-graph method*, Engineering News-Record, Vol. 108, S. 501-505.
- [137] SIMONOFF, J.S., 1996. *Smoothing methods in statistics*, Springer, New York.
- [138] SINGH, V.P., 1995. *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- [139] SINCLAIR, K.A., PITZ, C.F., 1999. *Estimated baseflow characteristics of selected Washington rivers and streams*, Water Supply Bulletin, No. 60, Washington State Department of Ecology, Publ. No. 99-327.
- [140] SLOTO, R.A., CROUSE, Y.M., 1996. *HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis*, U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 96-4040.
- [141] SMAKHTIN, V.U., 2001. *Estimating continuous monthly based time series and their possible applications in the context of the ecological reserve*, Water South Africa, Vol. 27, No. 2, S. 213-217.
- [142] SMITH, M.B., LAURINE, D.P., KOREN, V.I., REED, S.M., ZHANG, Z., 2003. *Hydrologic Model Calibration in the National Weather Service*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 317-329, Washington, USA.
- [143] SNOWLING, S.D., KRAMER, J.R., 2001. *Evaluating modelling uncertainty for model selection*, Ecological Modelling, No. 138, S. 17-30.

- [144] SPONGBERG, M.E., 1990. *Spectral analysis of base flow separation with digital filters*, Water Resources Research, Vol. 36, No. 3, S. 745-752.
- [145] STMLU (Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen), 1998. *Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Naab-Regen*, Verlag Bartels & Wernitz, München.
- [146] STONE, D.B., MOOMAW, C.L., DAVIS, A., 2001. *Estimating recharge distribution by incorporating runoff from mountainous areas in an alluvial basin in the great basin region of the southwestern United States*, Ground Water, Vol. 39, No. 6, S. 807-818.
- [147] STREIT, U., 1992. *Taxonomische Methoden, neuronale Netze und Regionalisierung*. In: KLEEBERG, H.B. (Hrsg.), *Regionalisierung in der Hydrologie*, Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Deutsche Forschungsgemeinschaft, VCH, S. 333-344, Weinheim.
- [148] SZILÁGYI, J., PARLANGE, M.B., 1998. *Baseflow separation based on analytical solutions of the Boussinesq equation*, Journal of Hydrology, No. 204, S. 251-260.
- [149] TALLAKSEN, L.M., 1995. *A review of baseflow recession analysis*, Journal of Hydrology, No. 165, S. 349-370.
- [150] TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., LEIBUNDGUT, Ch., ZILLGENS, B., KIRNBAUER, R., MERZ, B., 2003. *Entschlüsselung von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer Ansätze in einem alpinen Einzugsgebiet*, Österr. Wasser und Abfallwirtschaft, Vol. 55, No. 1-2, S. 9-17.
- [151] THYER, M., KUCZERA, G., BATES, B.C., 1999. *Probabilistic optimisation for conceptual rainfall-runoff models: a comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms*, Water Resources Research, Vol. 35, No. 3, S. 767-773.
- [152] UHLENBROOK, S., SEIBERT, J., LEIBUNDGUT, Ch., RODHE, A., 1999. *Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models*, Hydrological Science Journal, Vol. 44, No. 5, S. 277-299.
- [153] UHLENBROOK, S., FREY, M., LEIBUNDGUT, Ch., MALOSZWSKI, P., 2002. *Hydrograph separation in a mesoscale mountainous basin at event and seasonal timescales*, Water Resources Research, Vol. 38, No. 6, S. 1-14.
- [154] UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, Ch., 2002. *Process-oriented catchment modeling and multiple-response validation*, Hydrological Processes, No. 16, S. 423-440.
- [155] VITVAR, R.M., BURNS, D.A., LAWRENCE, G.B., MCDONNELL, J.J., WOLOCK, D.M., 2002. *Estimation of baseflow residence times in watersheds from the runoff hydrograph recession: method and application in the Neversink watershed, Catskill Mountains, New York*, Hydrological Processes, No. 16, S. 1871-1877.

- [156] VOGEL, R.M., KROLL, C.N., 1992. *Regional geohydrologic-geomorphic relations for the estimation of low-flow statistics*, Water Resources Research, Vol. 28, No. 9, S. 2451-2458.
- [157] VOGEL, R.M., KROLL, C.N., 1996. *Estimation of baseflow recession constants*, Water Resources Management, No. 10, S. 303-320.
- [158] WUNDT, W., 1958. *Einem Beitrag über die kleinsten Abflusspenden*. In: GRAHMANN R. (Hrsg.), *Das Wasserdargebot in der Bundesrepublik Deutschland. Teil II: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung*, Forschungen zu deutschen Landeskunde, Band 105, Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde Remagen/Rhein, S. 47-54.
- [159] WAGENER, T., BOYLE, D.P., LEES, M.J., WHEATER, H.S., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., 2001. *A Framework for development and application of hydrological models*, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 5, No. 1, S. 13-26.
- [160] WAGENER, T., WHEATER, H.S., GUPTA, H.V., 2003. *Identification and evaluation of watershed models*. In: DUAN, Q., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R. (Hrsg.), *Calibration of watershed models*, Water Science and Application, No. 6, S. 29-48, Washington, USA.
- [161] WITTENBERG, H., 1994. *Nonlinear analysis of flow recession curves*, Proceedings of the Braunschweig FRIEND Conference, October 1993, IAHS Publ. No. 221, S. 61-75.
- [162] WITTENBERG, H., 1997. *Der nichtlineare Speicher als Alternative zur Beschreibung von Basisabfluß, Grundwasserspeicherung und Trockenwetterganglinie*, Wasserwirtschaft, No. 87, S. 570-574.
- [163] WITTENBERG, H., 1998. *Einfluss der Feldberechnung auf den Grundwasserhaushalt im Uelzener Becken - Ermittlung aus dem Basisabfluß*, Wasser & Boden, No. 50/8, S. 41-44.
- [164] WITTENBERG, H., 1999 a. *Modellierung von Rückganglinien des Abflusses durch nichtlineare Speicher und Regionalanalyse der Parameter*. In: Kleeberg, H.B., Mauser, W., Peschke, G und Streit, U. (Hrsg.), *Hydrologie und Regionalisierung - Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998)*, Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), S. 405-416, Weinheim.
- [165] WITTENBERG, H., 1999 b. *Baseflow recession and recharge as a nonlinear storage process*, Hydrological Processes, No. 13, S. 715-726.
- [166] WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M., 1999. *Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation*, Journal of Hydrology, No. 219, S. 20-33.
- [167] WOLF, J., 2006. *Räumlich differenzierte Modellierung für Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Eigenverlag des Instituts für Wasserbau, Stuttgart.

*Literaturverzeichnis*

- [168] YAPO, P.O., GUPTA, H.V., SORROSHIAN, S., 1997 *Multi-objective global optimization for hydrologic models*, Journal of Hydrology, No. 204, S. 83-97.
- [169] ZECHARIAS, Y.B., BRUTSAERT, W., 1988. *Recession characteristics of groundwater outflow and base flow from mountain watersheds*, Water Resources Research, Vol. 24, No. 10, S. 1651-1658.



## Institut für Wasserbau Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart (Vaihingen)  
Telefon (0711) 685 - 4717/41/52 o. - 4679  
Telefax (0711) 685 - 7020 o. 4746 o. 4681  
email: [iws@iws.uni-stuttgart.de](mailto:iws@iws.uni-stuttgart.de)  
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

### Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig  
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

### Vorstand (Stand 31.01.2006)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy  
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig  
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht  
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Westrich  
Jürgen Braun, PhD  
Dr.-Ing. H. Class  
Dr.-Ing. A. Färber  
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky  
PD Dr.-Ing. W. Marx

### Emeriti

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke  
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, Ph.D.

### Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht  
Stellv.: PD Dr.-Ing. Walter Marx, AOR

### Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Stellv.: Dr.-Ing. Arne Färber

### Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig  
Stellv.: Dr.-Ing. Holger Class, AOR

**VEGAS**, Versuchseinrichtung zur Grundwasser-  
und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD  
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

### Versuchsanstalt

Leiter: apl. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Westrich

## Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart,*  
und  
Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand,* 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau,* 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen,* 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau,*  
und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens,* 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht, und*  
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gestehungskosten und jeweilige Vorteile, sowie Unny, T.E.: Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber, 1967*
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschiffahrt an diesem Wert, 1967*
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von*  
Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse, 1968*
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund, 1968*
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften, 1968*
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem, 1969*
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität, 1969*
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschiffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle, 1969*
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion, 1970*
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper, 1970*
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit, 1970*
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken, 1970*



- 18 Gál, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von*  
Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972
- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebewerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau, und Brombach, Hansjörg: Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974

- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974
- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotationssymmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0

- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdiolen und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen
- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestau tem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen

- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2
- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebenen Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X
- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2

- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0
- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen

- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung*-, 1998, ISBN 3-921694-91-4
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9
- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, ISBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5

- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Reinhold Josef.: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7
- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Poros Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9
- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7

- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen* -, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3
- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0
- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Upscaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004, 5. Oktober 2004*, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7



- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9
- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Subsurface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5
- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yeshewatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8
- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von Komplexen Systemen im Untergrund*, 2005, 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2

Die Mitteilungshefte ab dem Jahr 2005 stehen auch als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: [www.iws.uni-stuttgart.de](http://www.iws.uni-stuttgart.de) zur Verfügung.