

## 4. Dynamische Analysen von Wasserhaushalt und Abflusskomponenten

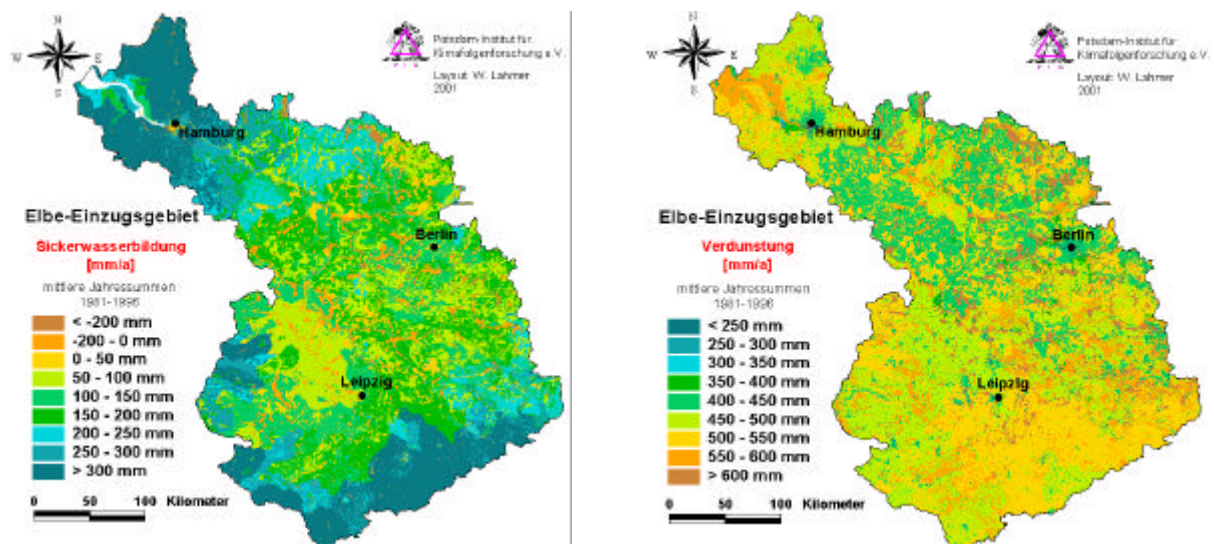
### 4.1 Allgemeines

Gegenstand vorliegender Untersuchungen war zunächst die flächendeckende Simulation der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Grundwasserneubildung für das gesamte deutsche Einzugsgebiet der Elbe ohne Berücksichtigung der lateralen Abflussprozesse (Kap. 4.2). Anschließend wurden detaillierte Simulationen der gekoppelten vertikalen und lateralen hydrologischen Prozesse in ausgewählten meso- bis makroskaligen Teileinzugsgebieten der Elbe und ihrer Nebenflüsse durchgeführt (Kap. 4.3). Schließlich wurden mit zwei verschiedenen hydrologischen Modellen Untersuchungen zur Quantifizierung der einzelnen Abflusskomponenten in 25 mesoskaligen Teilgebieten der Elbe durchgeführt (Kap. 4.4).

### 4.2 Simulation der Vertikalprozesse des Wasserhaushaltes im Gesamtgebiet

Detaillierte hydrologische Untersuchungen unter Einbeziehung von vertikalen und lateralen Prozessen für makroskalige Untersuchungsräume sind ausgesprochen Daten- und zeitintensiv. Die alleinige Betrachtung der vertikalen Prozesse (Niederschlag, Schneeschmelze, Interzeption, Bodenfeuchtedynamik, reale Verdunstung) erlaubt eine relativ einfache Abschätzung der Wasserhaushaltskomponenten Versickerung und Verdunstung für große Gebiete. Ein Nachteil bei dieser Herangehensweise ist die fehlende Möglichkeit einer genauen Validierung anhand von gemessenen Abflusszeitreihen und daraus resultierende erhöhte Unsicherheiten. Mit den hier durchgeführten vereinfachten Simulationen soll zunächst ein Überblick zum Wasserhaushalt des Gesamtgebietes gegeben werden und anschließend durch Vergleich der Ergebnisse mit denen von kompletten und validierten Niederschlag-Abfluss-Simulationen für ausgewählte Teilgebiete (Vgl. Kap. 4.3) die auftretenden Unsicherheiten abgeschätzt werden. Zur Anwendung kommt das Modell ARC/EGMO (siehe Modellbeschreibung in Kap. 2), wobei hier nur der vertikale Wasserhaushalt bis zur Unterkante der Wurzelzone betrachtet wird. Die Simulationen wurden für die Zeitperiode von 1981 bis 1995 durchgeführt.

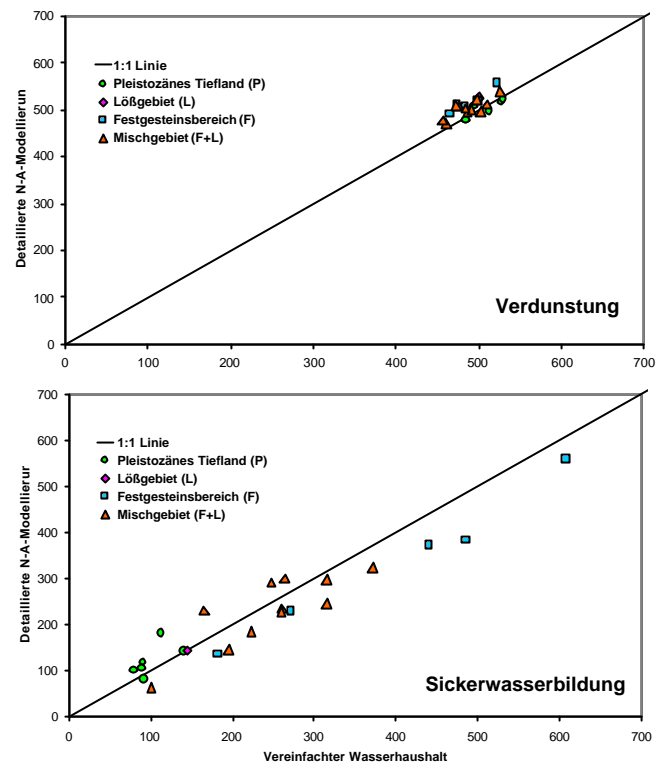
In der **Abb. 4.1** sind die simulierten langjährigen Mittelwerte der Wasserhaushaltselemente Versickerung und Verdunstung in ihrer räumliche Verteilung im Elbegebiet dargestellt. Die Sickerwassermengen erreichen Werte bis ca. 500 mm/a und können für grundwassernahe Zehrgebiete negativ sein.



**Abb. 4.1:** Mit ARC/EGMO simulierte langjährige Mittelwerte von Versickerung und Verdunstung für das Elbe-einzugsgebiet (Periode: 1981-96)

Während die höchsten Werte in den Mittelgebirgen und im nordwestlichen Teil des Elbegebietes auftreten, sind geringe oder negative Werte vor allem im Regenschatten des Harzes und in Teilen von Brandenburg zu finden. Die Verdunstung liegt im wesentlichen zwischen 350 mm/a und 600 mm/a mit den höchsten Werten in den Gebirgsvorländern und im Mündungsbereich der Elbe und niedrigen Werten in regenarmen grundwasserfernen Gebieten des norddeutschen Tieflandes.

Die **Abb. 4.2** zeigt eine Gegenüberstellung der langjährigen mittleren Verdunstung und Versickerung aus der vereinfachten vertikalen Wasserhaushaltssimulation und der kompletten N-A-Simulation für die Beispielgebiete (Vgl. Abb. 3.1 und Tabelle 3.1). Die vereinfachte Modellierung führt zu mittleren Abweichungen von -13mm/Jahr für die Verdunstung und +16mm/Jahr für die Versickerung. Wegen der geringeren Absolutwerte ergibt sich für die Versickerung ein relativer Fehler von 20% gegenüber einem Fehler von 4% bei der Verdunstung. Obwohl ersterer schon einen deutlichen Unterschied zu den Ergebnissen der detaillierten Modellierung darstellt, kann man insgesamt davon ausgehen mit dem vereinfachten Verfahren noch eine brauchbare Abschätzung des langjährigen mittleren Wasserhaushaltes zu erzielen.

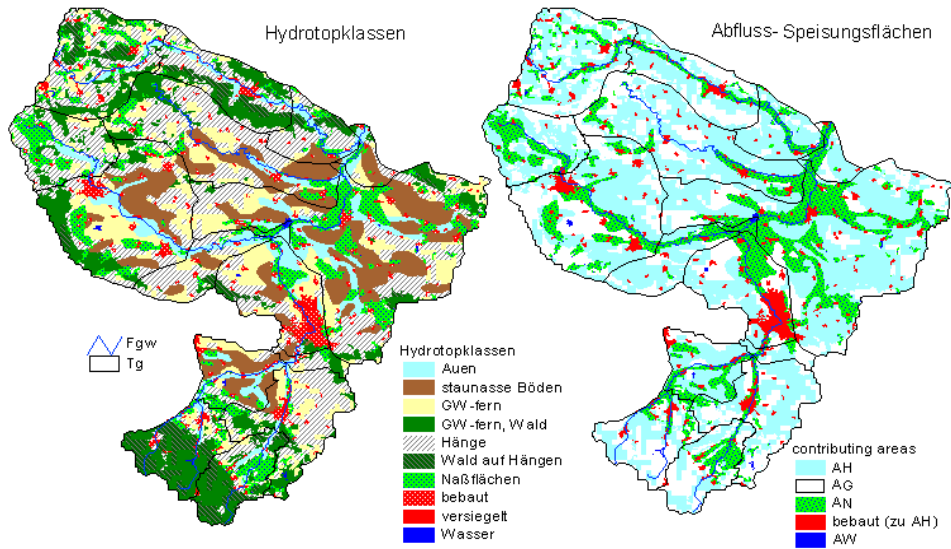


**Abb. 4.2:** Vergleich der Ergebnisse von detaillierter N-A-Modellierung und vereinfachter Wasserhaushaltssimulation (1981-95)

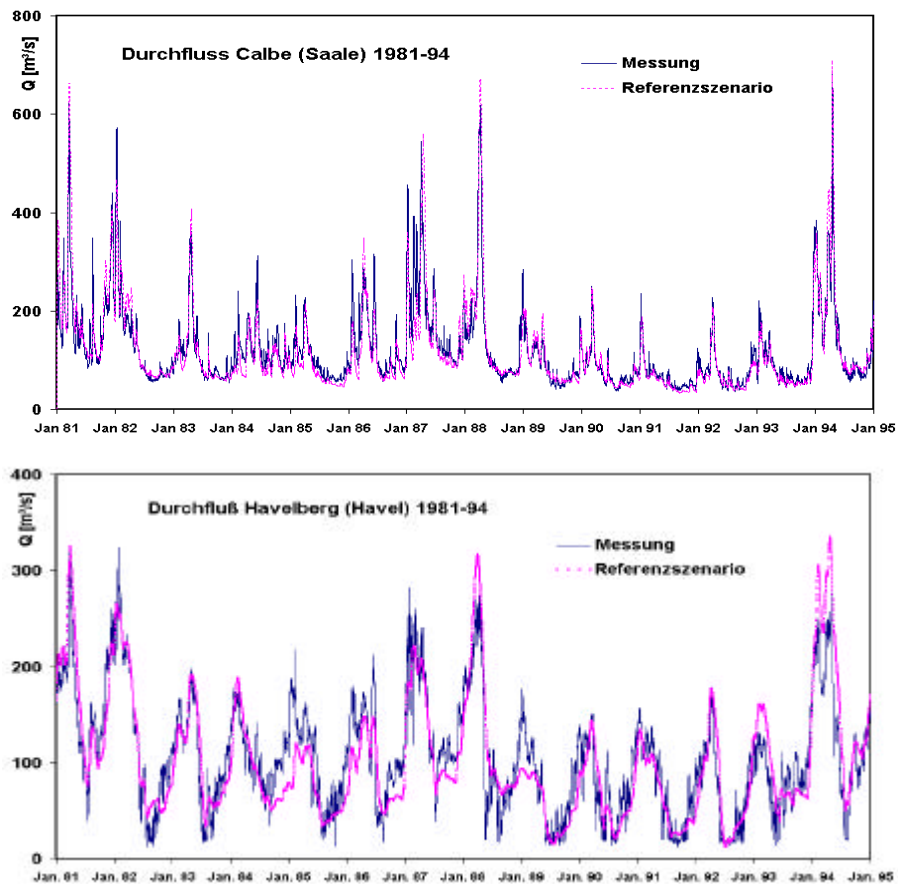
### 4.3 Simulation des Wasserhaushaltes von Saale und Havel

Makroskalige Modellierungen des Gebietswasserhaushaltes mit ARC/EGMO erfolgten in zwei großen Nebenflussgebieten der Elbe, dem Saalegebiet, das für den Mittelgebirgsbereich und große Teile der Lößregion repräsentativ ist, und dem für das pleistozäne Tiefland charakteristischen Haveleinzugsgebiet oberhalb des Spreepiegels Leibs. Das primäre Ziel bestand hier in der Validierung der eingesetzten Modelle als Vorbereitung zur flussgebietsbezogenen Abschätzung von Abflusskomponenten (Kap. 4.4) und für Analysen von Landnutzungsänderungen (Kap. 4.5). Zur Validierung wurden die simulierten mit den gemessenen Durchflüssen am Gebietsauslass (Mündung der Saale in die Elbe bei Calbe-Crizehne bzw. der Havel bei Havelberg) sowie gleichzeitig an den Auslasspegeln aller enthaltenen mesoskaligen Validierungsgebiete (Vgl. **Abb. 3.1** und **Tabelle 3.1**) verglichen.

Das Grundprinzip bei der hydrologischen Modellierung nach Abflusskomponenten mit ARC/EGMO ist die Ausweisung von Flächen gleicher Prozessdominanz. Dazu werden zunächst die durch Verschneidung der räumlichen Basisdaten (Topographie, Landnutzung, Boden, etc.) gewonnenen quasihomogenen Elementarflächen zu Hydrotopklassen zusammengefasst. Bei der Simulation der Konzentration der unterirdischen Abflüsse werden diese Hydrotopklassen dann entsprechend den Speisungsflächen („contributing areas“) der betrachteten Abflusskomponenten (RG, RH, RN usw.), d.h. bezogen auf die Raumdomäne für diese Prozesse, wieder zusammengefasst (**Abb. 4.3**). Grundsätzlich wird zwischen Flächen, die hauptsächlich langsamen Basisabfluss liefern (AG), Flächen mit einem hohen Anteil an schnellem hypodermischen Abfluss (AH) und potentiellen Sättigungsflächen (Feucht- und Auengebiete AN) mit hohem Sättigungsabflussanteil RN unterschieden. Für eine ausführliche Beschreibung der methodischen Aspekte wird auf den 2. Zwischenbericht (Becker et al., 1999) verwiesen.



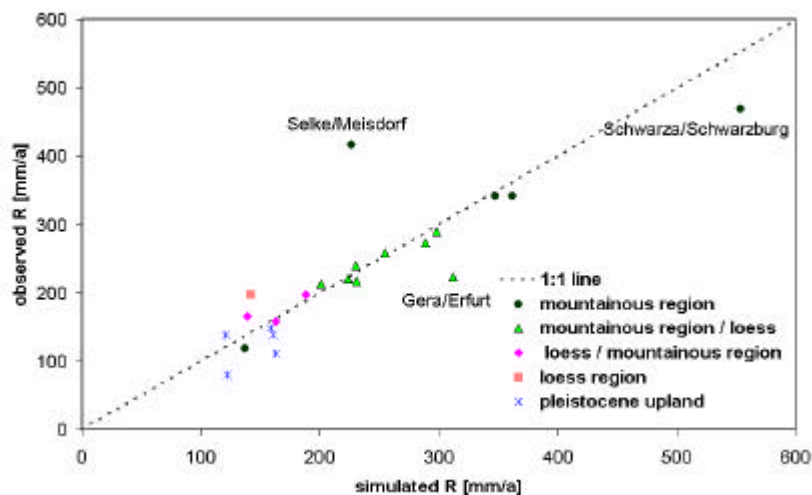
**Abb. 4.3:** Ausweisung von Hydrotopklassen und ihre Aggregation zu Grundwasserspeisungsflächen am Beispiel des Einzugsgebietes der Unstrut bis Oldisleben (4174 km<sup>2</sup>, ID: 13)



**Abb. 4.4:** Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Durchflüsse an den Gebietsauslässen von Saale und Havel für den Referenzzustand unter Berücksichtigung der Zuflüsse in die Havel

Insgesamt konnten mit dem Modell die beobachteten Durchflüsse an den einzelnen Pegeln recht gut wiedergegeben werden, wie durch die Gangliniendarstellung in **Abb. 4.4** (Calbe bzw. Havelberg) als auch durch die Darstellung in **Abb. 4.5** verdeutlicht wird. So liegen die Nash/Sutcliff-Effizienzen für die Gesamtgebiete bei 0,82 (Calbe/Saale) und 0,7 (Havelberg/Havel). Für die Validierungsgebiete wurde eine mittlere Effizienz von 0,6 erzielt (siehe auch **Tabelle 4.1**). Probleme treten in einigen topographisch gering strukturierten Gebieten des Tieflandes auf, und zwar besonders dann, wenn die unterirdischen Wasserscheiden von den oberirdischen deutlich abweichen und dementsprechend die Fließwege nicht genau genug bekannt sind. Dies konnte durch eine Detailstudie im Nuthegebiet (Pfützner et al., 1998) explizit nachgewiesen werden. Genauso problematisch sind Wasserbewirtschaftungs- bzw. Steuerungssysteme wie gesteuerte Kanalverbindungen zwischen den einzelnen Teilgebieten (z.B. Spree/Dahme bei Leibsch), Speicher (speziell in vielen Teileinzugsgebieten im Feststeinsbereich), Überleitungen bzw. Entnahmen durch die Wasserwerke (z.B. Mulde/Parthe, Selke/Meisdorf) und natürlich bedingte Störungen durch Verkarstung etc. (z.B. Gera/Erfurt). Die Modellierung dieser natürlichen und anthropogene Störungen ist insbesondere wegen der fehlenden Datenbasis schwierig.

Die in **Abb. 4.4** teilweise festzustellenden Abweichungen bei Hochwasser und in Havelberg nach einigen Niedrigwasserperioden sind vorrangig auf die im Modell bisher nicht ausreichend umgesetzte Erfassung der Retentionswirkung von Seen und Speichern sowie der Abflusssteuerungen zurückzuführen. Das wird auch als Ursache für die in **Abb. 4.5** deutlich werdende Überschätzung der Abflüsse einiger Havelgebiete angesehen.



**Abb. 4.5:** Simulierte und gemessene langjährige mittlere Abflüsse der Validierungsgebiete

#### 4.4 Dynamische Modellierung von Abflusskomponenten

Da die meisten Wasserqualitätsparameter stark von den Fließwegen von der Eintragsquelle (diffus oder punktuell) bis hin zum Fließgewässer beeinflusst werden, ist die Kenntnis über die einzelnen Abflusskomponenten essentiell für eine integrierte Betrachtung des Gebietswasserhaushaltes bezüglich der Menge und Qualität. Nur in kleinen Einzugsgebieten bis zu wenigen km<sup>2</sup> Größe können hierfür detaillierte Messungen (zumeist auf der Basis von Tracer-Versuchen) erfolgen. Falls Abflussmessungen vorliegen können für mesoskalige Gebiete die einzelnen Abflusskomponenten mittels Ganglinienanalysen (z.B. Schwarze et al., 1997) bestimmt werden, was jedoch bei anthropogen gesteuerten Gewässern schwierig ist. Ein anderer Weg ist die Ableitung von Abflusskomponenten mit Hilfe hydrologischer Einzugsgebietsmodelle, welche die einzelnen hydrologischen Prozesse in ihrer zeitlichen und räumlichen Varianz abbilden. Da dieser Bestimmung jedoch spezifische Modellannahmen zugrunde liegen, können sich die Größenordnungen der berechneten Anteile der Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, hypodermischer Abfluss und Basisabfluss von Modell zu Modell unterscheiden.

Deshalb erfolgte in dieser Studie der parallele Einsatz von zwei Modellen (ARC/EGMO und HBV-D) in mehreren Gebieten, um die Unsicherheit dieser Methode bei der Quantifizierung von Abflusskomponenten abschätzen zu können. Beiden Modellen liegen unterschiedliche Algorithmen für die Generierung und das Routing der einzelnen ober- und unterirdischen Abflusskomponenten zugrunde (Vgl. dazu Kap. 2 sowie Haberlandt et al., 2001). Entsprechend sind die Anpassungen an die beobachteten Ganglinien unterschiedlich. Die **Tabelle 4.1** gibt neben den berechneten Anteilen der Abflusskomponenten auch einen Überblick über die erreichten Anpassungsgüten in Form der Quadratischen Abweichung (*rmse*) und des Nash-Sutcliffe Kriteriums *NS* (Nash Sutcliffe, 1970):

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i^* - z_i)^2}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i^* - z_i)^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_i)^2},$$

$z_i$  ist hierbei der beobachtete und  $z_i^*$  der simulierte Abfluss. Um speziell die für den Basisabfluss relevante Anpassung im Niedrigwasserbereich besser abschätzen zu können, wurde zusätzlich das Nash-Sutcliffe-Kriterium für die logarithmierten Abflüsse  $NS_L$  gebildet. Die Modellanpassungen sind unterschiedlich für die einzelnen Teileinzugsgebiete. Besonders kritisch sind sie für die Gebiete 102, 10 und 120 (vgl. dazu die Diskussion in Kap. 4.3).

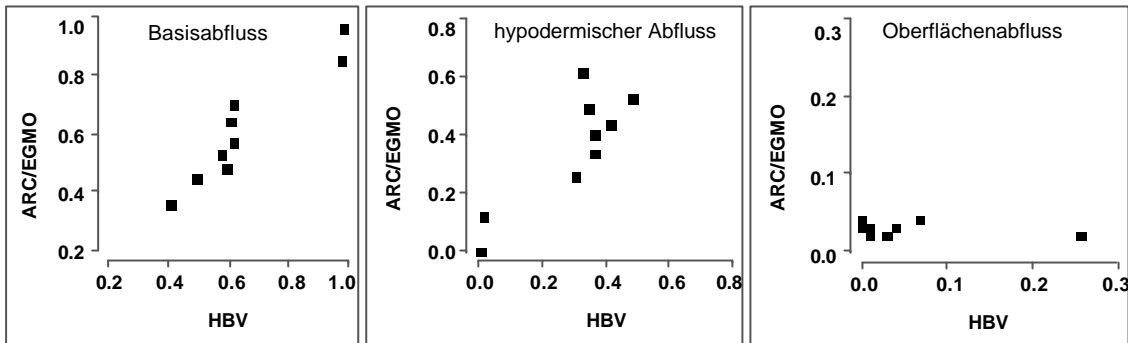
**Tabelle 4.1:** Simulationsgüte und Anteil der Abflusskomponenten am Gesamtabfluss für die 25 mesoskaligen Beispielgebiete im Elbe-Einzugsgebiet

ID	Naturraum	ARC/EGMO			HBV-D			RB		RH		RO	
		<i>RMSE</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>NS</i> (-)	<i>NS<sub>L</sub></i> (-)	<i>RMSE</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>NS</i> (-)	<i>NS<sub>L</sub></i> (-)	ARC/ EGMO	HBV- D	ARC/ EGMO	HBV	ARC/ EGMO	HBV
1	F	-	-	-	1.69	0.87	0.90	-	0,43	-	0,41	-	0,16
17	F	6.43	0.51	0.76	3.81	0.82	0.84	0,36	0,41	0,62	0,33	0,02	0,26
106	F	0.90	0.59	0.38	-	-	-	0,46	-	0,52	-	0,02	-
109	F	2.15	0.61	0.83	-	-	-	0,46	-	0,54	-	0,00	-
110	F	2.74	0.64	0.84	-	-	-	0,43	-	0,56	-	0,01	-
101	F	1.01	0.50	0.48	-	-	-	0,47	-	0,45	-	0,08	-
11	F+L	3.60	0.47	0.57	2.48	0.73	0.58	0,45	0,50	0,53	0,49	0,02	0,01
103	F+L	2.00	0.43	0.79	-	-	-	0,65	-	0,33	-	0,02	-
12	F+L	2.45	0.83	0.74	1.04	0.88	0.80	0,57	0,62	0,40	0,37	0,03	0,01
6	F+L	4.78	0.53	0.67	1.92	0.92	0.85	0,48	0,60	0,49	0,35	0,03	0,04
107	F+L	0.62	0.60	0.68	-	-	-	0,54	-	0,43	-	0,03	-
16	F+L	1.87	0.82	0.89	2.00	0.80	0.75	0,64	0,61	0,34	0,37	0,02	0,03
105	L+F	2.08	0.48	0.78	1.81	0.61	0.69	0,70	0,62	0,26	0,31	0,04	0,07
102	L+F	0.70	0.62	-0.10	-	-	-	0,52	-	0,44	-	0,04	-
113	L+F	-	-	-	0.97	0.63	0.47	-	0,49	-	0,23	-	0,28
118	L+F	-	-	-	1.07	0.69	0.60	-	0,47	-	0,39	-	0,15
10	L	1.05	-0.48	0.30	0.53	0.63	0.33	0,53	0,58	0,44	0,42	0,03	0,00
123	T	0.11	0.43	0.53	-	-	-	0,96	-	0	-	0,04	-
125	T	4.60	0.67	0.68	4.23	0.72	0.58	0,96	0,99	0	0,01	0,04	0,00
120	T	-	-	-	0.70	0.16	0.14	-	0,98	-	0,02	-	0,00
30	T	3.57	0.49	0.48	3.33	0.55	0.42	0,85	0,98	0,12	0,02	0,03	0,00
37	T	0.90	0.88	0.97	-	-	-	0,74	-	0,24	-	0,02	-
129	T	-	-	-	1.24	0.44	0.51	-	0,87	-	0,13	-	0,00
34	T	-	-	-	2.63	0.78	0.60	-	0,80	-	0,20	-	0,00
38	T	-	-	-	0.75	0.73	0.55	-	0,67	-	0,32	-	0,01
φ			0.53	0.63		0.69	0.60						

- Model nicht angewendet

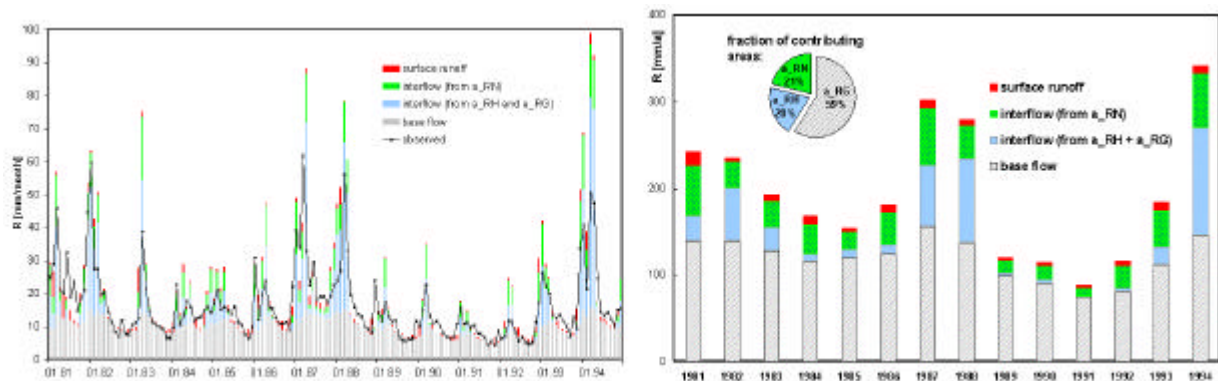


In der **Abb. 4.6** sind die ermittelten Abflussanteile beider Modelle gegenübergestellt. Obwohl die Zahl der Einzugsgebiete, für die Simulationsergebnisse sowohl für ARC/EGMO als auch für HBV vorliegen, mit neun recht gering ist, kann für die ermittelten Anteile des Basisabflusses eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Andererseits wird deutlich, dass die Modellierung der schnellen Abflusskomponenten (vor allem des Oberflächenabflusses) mit größeren Unsicherheiten behaftet ist.



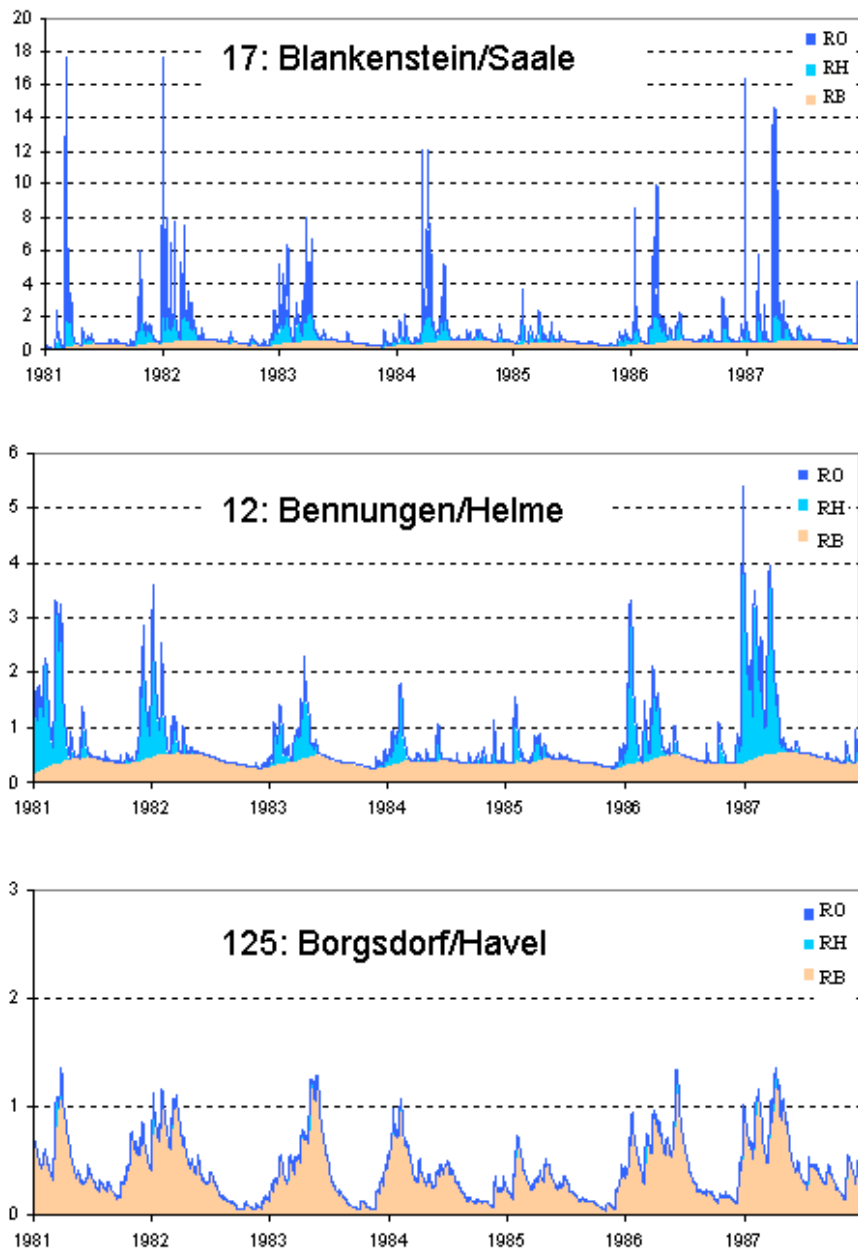
**Abb. 4.6:** Vergleich der mit den beiden Modellen ARC/EGMO und HBV-D berechneten langjährigen mittleren Abflusskomponenten (als Anteile am Gesamtabfluss)

Insbesondere die schnellen Abflusskomponenten weisen eine hohe zeitliche Dynamik auf, wie aus der Darstellung der monatlichen bzw. jährlichen Abflussdynamik für das Einzugsgebiet des Unstrutpegels Nängelstedt deutlich wird (**Abb. 4.7**). Diese Dynamik kann durch die in **Tabelle 4.1** enthaltenen mittleren Abflussanteile natürlich nicht wiedergegeben werden. Die im rechten Teil der **Abb. 4.7** enthaltene Gegenüberstellung der jährlichen Abflusskomponenten und des Gebietsanteils der Speisungsflächen verdeutlicht, dass hier nur ein bedingter Zusammenhang vorliegt. Viel stärker prägt sich die Witterungssituation der einzelnen Jahre aus.



**Abb. 4.7:** Mit ERC/EGMO berechnete Abflusskomponenten für den Pegel Nängelstedt (Einzugsgebiet 716 km<sup>2</sup>, ID: 105) in monatlicher und jährlicher Auflösung

Entsprechend der Zuordnung der untersuchten Gebiete zu den einzelnen Naturräumen treten deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung des Gebietsabflusses auf, wie in **Abb. 4.8** für drei Beispielsgebiete dargestellt ist. Im Festgesteinsbereich (oben) wird der Abfluss durch die schnellen Abflusskomponenten dominiert (Basisabfluss < 50%). Dagegen macht der Basisabfluss im Tiefland mit ca. 90% den Hauptanteil des Abflusses aus (unten). Einzugsgebiete, die sowohl Festgesteinsbereiche (hohes Niederschlagsdargebot, Schneeschmelze im Frühjahr, erhöhte Hangneigung) als auch größere ebene Lößbereiche mit ihren bindigen und oft drainierten Böden umfassen, weisen Basisabflussanteile zwischen 50 und 70 % auf (Mitte). Der Gesamtabfluss eines Gebietes wird ebenfalls durch den Naturraum beeinflusst. Hier ist ein deutliches Gefälle der täglichen Abflüsse von 1 mm/d im pleistozänen Tiefland (unten) bis zu 20 mm/d im Festgesteinsbereich (oben) zu beobachten.



**Abb. 4.8:** Mit HBV-D berechneten Abflusskomponenten [mm/d] für ausgewählte Teileinzugsgebiete