

**Institut für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

Die Abflussbeschleunigung als Zielgröße zur Bewertung von Niederschlagswassereinleitungen

**Diplomarbeit von Dagmar Casper
Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg im Breisgau, 2002**

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN IM ANHANG	VII
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
VERZEICHNIS DER TABELLEN IM ANHANG	IX
ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	X
ZUSAMMENFASSUNG	XIII
ENGLISH SUMMARY	XV

1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Problemstellung und Stand der Forschung	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgehensweise	5
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1 Fließgewässer in urbanen Gebieten	7
2.1.1 Einflüsse der Siedlungswasserwirtschaft	7
2.1.2 Beeinflussung des hydrologischen Kreislaufs	10
2.2 Niederschlagswassereinleitungen	12
2.2.1 Gesetzliche Grundlagen	12
2.2.2 Ökologische Auswirkungen	13
2.2.3 Bewertung der ökologischen Belastung	15
2.3 Niederschlag-Abfluss-Simulation NASIM	16
2.4 Fazit	19

3 UNTERSUCHUNGSGEBIETE	21
3.1 Untersuchungsgebiet Schwarzbach	21
3.1.1 Naturräumliche Gliederung, Topographie und Geomorphologie	21
3.1.2 Geologie	22
3.1.3 Hydrologie	23
3.1.4 Klimatische Verhältnisse	24
3.1.5 Böden	24
3.1.6 Landnutzung	24
3.2 Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg	25
3.2.1 Charakterisierung der einzelnen Gebiete	25
3.2.2 Vergleich der Gebiete über Einzugsgebietsparameter	28
3.3 Fazit	31
4 METHODIK DER SENSITIVITÄTSANALYSEN	33
4.1 Datengrundlage	33
4.2 Berechnung der Grenzkurven der Abflussbeschleunigung	34
4.3 Einfluss der Klassenbreite	36
4.4 Vergleich verschiedener Landnutzungen	37
4.5 Einfluss der Datengenauigkeit	37
4.6 Saisonalitätsunterschiede	38
4.7 Wahrscheinlichkeitsanalysen	39
4.8 Skalenabhängigkeit	42
4.9 Variabilität der Abflussbeschleunigung	42
4.10 Reaktionsbereitschaft der vier Teilgebiete	43
4.11 Fazit	44

5 GRUNDLAGEN DER REGIONALISIERUNG	47
5.1 Einführung	47
5.2 Korrelationsanalysen	48
5.2.1 Korrelation der Abflussbeschleunigung mit Einzugsgebietsparametern	48
5.2.2 Vergleich der Zielgrößen Abflussbeschleunigung und Hochwasserabfluss	49
5.3 Grundlagen der multiplen linearen Regressionsanalyse	50
5.4 Voraussetzungen zur Verwendung eines Regressionsmodells	51
5.5 Modellaufbau	54
5.5.1 Datengrundlage	54
5.5.2 Bestimmung der Einzugsgebietsparameter	55
5.5.3 Wahl der unabhängigen Variablen	56
5.5.4 Prüfung der Modellgüte	57
5.6 Fazit	58
6 ERGEBNISSE DER SENSITIVITÄTSANALYSEN	61
6.1 Einfluss der Klassenbreite	61
6.2 Einfluss der Landnutzung	62
6.3 Datengenauigkeit	64
6.3.1 Einfluss auf die Grenzkurven	64
6.3.2 Ermittlung eines Kalibrierungsfaktors	65
6.4 Saisonalitätsunterschiede	67
6.5 Wahrscheinlichkeitsanalysen	70
6.5.1 Häufigkeiten verschiedener Abflussspendenklassen	70
6.5.2 Einfluss der Jährlichkeit	71
6.6 Skalenabhängigkeit	73

6.7 Variabilität der Abflussbeschleunigung	75
6.8 Reaktionsbereitschaft der Teilgebiete des Schwarzbachs	78
6.9 Fazit	83
7 ERGEBNISSE DER REGIONALISIERUNG	87
 7.1 Korrelationsanalysen	87
7.1.1 Zusammenhang zwischen den Zielgrößen Abflussbeschleunigung und Hochwasserabfluss	87
7.1.2 Korrelation zwischen Einzugsgebietskenngrößen	88
 7.2 Multiple lineare Regressionsanalysen	90
7.2.1 Ergebnisse der schrittweisen Vorgehensweise	90
7.2.2 Ergebnisse der Residuen-Vorgehensweise	92
7.2.3 Ergebnisse des regionalen Modells für die Schwarzwald-Einzugsgebiete	93
 7.3 Fazit	94
8 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	97
LITERATURVERZEICHNIS	99
ANHANG	i
Anhang A: Abbildungen zu den Sensitivitätsanalysen	i
Anhang B: Tabellen zum Regionalisierungsansatz	vi
Anhang C: Landnutzungsverteilung im Einzugsgebiet des Schwarzbachs	viii

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.1.1	Laufschema zur Vorgehensweise.	5
Abb.2.1	Beeinflussung der wichtigsten Parameter des Lebensraums Fließgewässer durch die Siedlungswasserwirtschaft (nach Gammeter 1996, verändert).	8
Abb.2.2	Schematische Darstellung der Belastungsaufteilung in NASIM. Dabei bedeutet ETP: Evapotranspiration, Iz: Interzeption, Q _D : Oberflächenabfluss, I: Infiltration, Pk: Perkolation, Q _I : Interflow (Zwischenabfluss), Q _B : Basisabfluss.	17
Abb.3.1	Lage des Schwarzbacheinzugsgebiets.	21
Abb.3.2	Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg und Lage ihrer Pegel.	26
Abb.3.3	Abflussregime der untersuchten Gebiete. Datengrundlage:LfU (1993). Der Darstellung fehlt die Seckach aufgrund fehlender Daten.	28
Abb.4.1	Ermittlung der Abflussbeschleunigung aus einer Ganglinie am Beispiel eines Ereignisses vom 25.9.1993 im Quellgebiet des Schwarzbachs.	34
Abb.4.2	Laufschema zur Berechnung der Hüllkurven. Dabei bedeutet AB: Abflussbeschleunigung [l/min ²], Q ₂ : Abfluss zur Zeit 2 [m ³ /s], Q ₁ : Abfluss zur Zeit 1 [m ³ /s].	35
Abb. 5.1	Graphische Darstellung der Achsenttransformation $\tilde{y} = \ln y$ (aus: Köhler et al. 1995).	52
Abb.6.1	Einfluss der Klassenbreiten der Abflussspende auf die Hüllkurven am Beispiel der Sechs-Minuten-Werte am Gebietsauslass des Schwarzbach-Einzugsgebiets im Istzustand.	61
Abb.6.2	Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für das Quelleinzugsgebiet des Schwarzbachs (Klassenbreite zehn l/s*km ²). Die Kurven stellen die berechneten Grenzkurven, die Balken die maximalen Abflussbeschleunigungen dar.	63
Abb.6.3	Einfluss der Datengenauigkeit auf die Hüllkurven der Abflussbeschleunigung am Beispiel des Quelleinzugsgebiets, Ist-Zustand.	64

Abb.6.4	Kalibrierung anhand von Jährlichkeiten am Beispiel des Gesamteinzugsgebietes G 72. Dargestellt sind die 5- und 10-jährliche Kurve der Stundenwerte sowie die Gesamtkurve der Stundenwerte und die sechsminütige Zielkurve.	67
Abb. 6.5	Grenzkurven für Sommer- und Winterhalbjahr getrennt, sowie für das gesamte hydrologische Jahr am Beispiel von G72 Istzustand, sechsminütige Daten.	68
Abb. 6.6	Häufigkeiten des Auftretens der maximalen Abflussbeschleunigung in den einzelnen Monaten (aus den sechsminütigen Werten im Istzustand), aufsummiert über alle Teilgebiete des Schwarzbachgebiets.	70
Abb. 6.7	Häufigkeiten der Abflussbeschleunigung für verschiedene Abflussspendenklassen für die Sechs-Minuten-Daten des Quelleinzugsgebietes im naturnahen Zustand.	71
Abb. 6.8	Einfluss verschiedener Jährlichkeiten auf die Grenzkurve am Beispiel der sechsminütigen Daten für den Gebietsauslass G72.	72
Abb. 6.9	Vergleich der Beschleunigungsfunktionen der vier Teilgebiete des Schwarzbachs am Beispiel der Sechs-Minuten-Werte im Istzustand.	73
Abb. 6.10	Variabilität der maximalen Abflussbeschleunigungen der einzelnen Monate für die drei Teilgebiete im Schwarzbachgebiet im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die sechsminütige Auflösung.	76
Abb. 6.11	Abflussganglinien der vier Teilgebiete (Istzustand, 6-min-Werte) vom 24.8.1994.	79
Abb. 6.12	Abflussspendenganglinien der vier Teilgebiete (Istzustand, Sechs-Minuten-Werte) vom 24.8.1994.	80
Abb. 6.13	Einfluss unterschiedlicher Lage bebauter Flächen (Stadtgebiete) auf die Abflussganglinie. Aus: Dyck & Peschke (1995).	82
Abb. 7.1	Streudiagramm für den Zusammenhang zwischen MHQ und AB2.	91

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN IM ANHANG

- Abb. A.1 Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die Teilgebiete G1 und G72 des Schwarzbachs, jeweils im Vergleich der Jahreswerte mit den Sommer- und Winterhalbjahren. i
- Abb. A.2 Einfluss der Datengenauigkeit für die drei Teilgebiete G1, G29a und G72 des Schwarzbachs im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand. ii
- Abb. A.3 Einfluss der Saisonalität in den Teilgebieten G1, G29a und G72 des Schwarzbachs im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die sechsminütige Datenauflösung. iii
- Abb. A.4 Häufigkeiten des Auftretens der maximalen Abflussbeschleunigung in den einzelnen Monaten (aus den Stundenwerten im Istzustand). Aufsummiert über alle betrachteten Teilgebiete des Schwarzbachgebiets. iv
- Abb. A.5 Skalenabhängigkeit für die drei untersuchten Datengenauigkeiten (6min, 30min, 60min) im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand. Für das Gebiet G34 lagen dabei nur die Ist-Werte vor. v
- Abb. C Landnutzung im Schwarzbach und seinen Teileinzugsgebieten. viii

TABELLENVERZEICHNIS

Tab.2.1	Abflussbeiwerte verschiedener Landnutzungen (nach DVWK 2000).	11
Tab.3.1	Landnutzungsverteilung der Teileinzugsgebiete des Schwarzbachs (Angaben in Prozent).	25
Tab.3.2	Verschiedene Höhen- und Gefälleangaben der untersuchten Gebiete (Höhe_mean, Höhe_min, Höhe_max, Slope_mean und Gewässergegfälle) sowie MHQ und der Gebietsniederschlag (Datenquelle: IHF 2000).	29
Tab.3.3	Fläche, Formfaktor nach Horton, Kreisförmigkeitsindex und Gewässernetzdichte der untersuchten Gebiete (Datenquelle: IHF 2000).	30
Tab.3.4	Landnutzungsverteilung der untersuchten Einzugsgebiete in Prozent (Datengrundlage: IHF 2000).	31
Tab.5.1	Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson und des Bestimmtheitsmaßes (Schlittgen 2000).	58
Tab.6.1	Kalibrierungsfaktor für den Wert a, um Stundenwerte höheren Auflösungen anzugeleichen.	66
Tab. 6.2a	Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Abflussbeschleunigungen der drei Teilgebiete im Istzustand (für die sechsminütige Datenauflösung). Angaben in [l/min ²].	77
Tab. 6.2b	Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Abflussbeschleunigungen der drei Teilgebiete im potenziell naturnahen Zustand (für die sechsminütige Datenauflösung). Angaben in [l/min ²].	77
Tab. 6.3	Geometriedaten der Teilgebiete des Schwarzbachs: Einzugsgebietsgröße, Umfang, Kreisförmigkeitsindex und Formfaktor nach Horton.	81
Tab. 6.4	Mittlere Abflüsse der vier Teilgebiete des Schwarzbachs.	82

Tab. 7.1:	Korrelationskoeffizienten einiger Einzugsgebietskenngrößen mit der zweijährlichen Abflussbeschleunigung.	89
Tab. 7.2	Modellzusammenfassung der schrittweisen Vorgehensweise.	90
Tab. 7.3	Modellzusammenfassung für die abhängige Variable AB2. Dargestellt sind neben dem Korrelationskoeffizient und den Bestimmtheitsmaßen auch der Faktor der Durbin-Watson-Statistik.	92
Tab. 7.4	Ergebnisse der Residuen-Vorgehensweise für die Gebiete des Schwarzwalds.	93

VERZEICHNIS DER TABELLEN IM ANHANG

Tab. B.1	Auszüge aus der Interkorrelationsmatrix.	vi
Tab. B.2	Ausgewählte Raumdaten der baden-württembergischen Einzugsgebiete (Datenquelle: IHF 2000).	vii

ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

a	Faktor zur Berechnung der Grenzkurven
Abb.	Abbildung
AB1	einjährliche Abflussspendenbeschleunigung [l/min ²]
AB2	zweijährliche Abflussspendenbeschleunigung [l/min ²]
A _{Eo}	Einzugsgebietsfläche [km ²]
A _k	Fläche eines Kreises [km ²]
A _u	versiegelter Flächenanteil [%]
Area	Einzugsgebietsfläche [km ²]
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
Ba-Wü	Baden-Württemberg
b ₀	Regressionskonstante
b _i	Regressionskoeffizienten
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V.
c	y-Achsenabschnitt
DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
D-W-Statistik	Durbin-Watson-Statistik
E	Einwohner
ETP	Evapotranspiration
EU	Europäische Union
EW	Einwohner
EZG	Einzugsgebiet
EZG_Länge	Distanz vom Pegel zum weitest entfernten Punkt [m]
F	Funktion von
FF_Horton	Formfaktor nach Horton
Flach	Anteil der flachen Flächen an der Einzugsgebietsfläche [%]
G1	Quellgebiet des Schwarzbachs
G29a	Teilgebiet Schönheitsmühle des Schwarzbachs
G34	Teilgebiet Voisweg des Schwarzbachs
G72	Gesamteinzugsgebiet des Schwarzbach (Gebietsauslass)
Geb_N	Gebietsniederschlag [mm]
Gew.Dichte	Gewässernetzdichte [km/km ²]
Gew_Gef	Gewogenes Gefälle [%]
Gew_Läng	Gesamtlänge aller Gewässer 1:50.000 im Einzugsgebiet [m]
GIS	Geo-Informations-Systeme
GW	Grundwasser
Höhe_max	maximale Höhe des Einzugsgebietes [m ü.NN]
Höhe_mean	mittlere Höhe des Einzugsgebietes [m ü.NN]

Höhe_min	minimale Höhe des Einzugsgebietes (Höhe am Pegel)[m ü.NN]
HQ1	einjährlicher Hochwasserabfluss
HQ2	zweijährlicher Hochwasserabfluss
HQ10	zehnjährlicher Hochwasserabfluss
HQ100	100-jährlicher Hochwasserabfluss
HW	Hochwasser
I	Infiltration
IHF	Institut für Hydrologie, Freiburg
IS	Gewichtetes Gefälle über alle Gewässer (1:50.000) im Einzugsgebiet [%]
Iz	Interzeption [mm]
J	Zahl der Prädiktorvariablen
k	Laufindex der Stichprobenwerte
KF	Kalibrierungsfaktor
KF_index	Kreisförmigkeitsindex
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
L	Stichprobenumfang
Landfak	Landschaftsfaktor
LANU	Landesamt für Natur- und Umweltschutz des Landes Schleswig-Holstein
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
ln	Logarithmus
m	Steigung der Geraden
M	Länge der Messreihe [a]
MaxAB	Maximale Abflussspendenbeschleunigung [l/min ²]
MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss [m ³ /s]
MHQ_gem	gemessener mittlerer Hochwasserabfluss [m ³ /s]
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss [m ³ /s]
MQ	mittlerer Abfluss [m ³ /s]
N	Zahl der Beobachtungswerte
NASIM	Niederschlag-Abfluss-Simulation
NN	Normalnull (Meeresspiegel)
NRW	Nordrhein-Westfalen
P	Niederschlag [mm]
Perimeter	Einzugsgebietsumfang [m]
Pk	Perkolation
pot.nat	potenziell naturnah
Ψ	Abflussbeiwert [%]
q	Abflussspende [l/s*km ²]
Q	Abfluss [m ³ /s]
Q _B	Basisabfluss [m ³ /s]

Q_D	Direktabfluss [mm]
Q_I	Zwischenabfluss (Interflow)
r	Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson
R_k	Kreisförmigkeitsindex
R^2	Bestimmtheitsmaß
R^2_{korr}	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
Siedlung	Anteil der Siedlungsflächen an der Einzugsgebietsfläche [%]
Slope_mean	mittlere Hangneigung im Einzugsgebiet
Sonderk.	Sonderkulturen
s_x	Standardabweichungen der x-Werte
s_y	Standardabweichungen der y-Werte
Tab.	Tabelle
T_n	Wiederkehrzeit [a]
T_{nk}	geschätzte Wiederkehrzeit [a]
U_E	Einzugsgebietumfang [km]
Umf_ent	Umfangentwicklung [-]
u_p	Parameter der Exponentialfunktion
w_p	Parameter der Exponentialfunktion
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRR	Wasserrahmenrichtlinie
x	Prädiktor
x_i	unabhängige Prädiktoren
Y	Zielgröße
Y'	berechneter Wert der Zielgröße
Zeitl.	zeitlich

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des BWK-Projekts „Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen“ sollen vor dem Hintergrund der EU-Wasserrahmenrichtlinie Auswirkungen von Niederschlagswassereinleitungen auf oberirdische Gewässer bestimmt und bewertet werden. Diese verändern insbesondere die hydraulischen Bedingungen urbaner Gewässer.

Als Zielgröße zur Bewertung dient die aktuelle Abflussbeschleunigung, die mit dem naturnahen Zustand verglichen wird. Durch Katastrophendrift kann sie zu starken ökologischen Schäden in Gewässern führen. Darüber hinaus ist sie als Steigung der Abflussganglinie leicht zu ermitteln.

Inwieweit sich die Beschleunigung als Zielgröße eignet, wurde mittels Sensitivitätsanalysen untersucht. Sie erfolgten anhand hoch aufgelöster, simulierter Daten von vier Teilgebieten des Schwarzbacheinzugsgebiets in Nordrhein-Westfalen. Diese Teilgebiete sind mit 15 bis 22 Prozent stark versiegelt.

Die Beschleunigungsverhältnisse der betrachteten Teilgebiete wurden als Hüllkurven mathematisch formuliert und als Wurzelfunktionen definiert. Die Wurzelfunktion wurde gewählt, da sie der Abflussfunktion aus Behältern entspricht und damit leichter mit dem Auslauf aus Speicherbauwerken verglichen werden kann.

Der Einfluss der Versiegelung zeigte sich durch fünffach erhöhte Beschleunigungen im Vergleich zum naturnahen Zustand. Hohe Beschleunigungen traten dabei überwiegend in den Sommermonaten auf, in denen auch die Variabilität besonders groß war. Untersuchungen der Jährlichkeiten ergaben aus ökologischer Sicht die Festlegung der zweijährlichen Beschleunigung als Zielgröße. Zwei Jahre entsprechen dem Entwicklungszyklus der meisten Organismen. Damit ist nach Schädigungen eine Wiederbesiedlung möglich.

Besonders sensitiv hinsichtlich der Abflussbeschleunigungsfunktion zeigte sich die Datengenauigkeit. Geringe Datenauflösungen ergaben erheblich niedrigere Grenzkurven als hoch aufgelöste. Die Kurven der Stundenwerte auf höhere Auflösungen anzuheben war jedoch in dieser Arbeit nicht möglich. Besonders groß war auch der Einfluss der Skale. Neben der Einzugsgebietsgröße kamen auch den anderen Gebietskennwerten wie Landnutzungsdaten und geologischen Faktoren große Bedeutung zu. Dies konnte durch die Untersuchung eines Einzelereignisses belegt werden, das im Vergleich der vier Teilgebiete des Schwarzbachs ausgewertet werden konnte.

Die Ganglinien der vier Gebiete reagieren besonders hinsichtlich der Landnutzung und der geologischen Bedingungen in den Gebieten. Der Gebietsspeicher bestimmt die Höhe des Peaks. Weitere Einflussfaktoren sind die Lage versiegelter Gebiete sowie der Kreisförmigkeitsindex.

Insgesamt ist eine Regionalisierung der Abflussbeschleunigung als Zielgröße vielversprechend. Dabei können verschiedene standardisierte Beschleunigungs-funktionen für die einzelnen Fließgewässertypen nach LAWA aufgestellt werden.

Erste Schritte in diese Richtung wurden in der vorliegenden Studie bereits unternommen. Eine regionale Übertragung erfolgte anhand von zehn Einzugsgebieten in Baden-Württemberg. Diese wurden aufgrund eines vorhandenen breiten Spektrums an Einzugsgebiets-charakteristika ausgewählt. Aus den 200 Parametern wurden für die Übertragung diejenigen ausgewählt, die allgemein verfügbar sind. Signifikante Korrelationen zeigten sich mit Hochwasserkenngrößen (über 90 Prozent) und mit geometrischen Daten (über 50 Prozent).

Die aufgestellten Regressionsmodelle ergaben allesamt eine Güte von über 90 Prozent. Ein erster Versuch, regionale Modelle zu ermitteln, konnte anhand von sieben Einzugsgebieten im Schwarzwald durchgeführt werden. Ob diese Aussagen jedoch repräsentativ sind, bleibt abzuwarten. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit sich die Aufnahme weiterer Gebiete auf die Modellgüte auswirkt.

Schlüsselwörter:

EU-Wasserrahmenrichtlinie, Niederschlagswassereinleitungen, Siedlungswasserwirtschaft, Zielgröße, Abflussdynamik, Abflussbeschleunigung, Regionalisierung, Regressionsanalysen, Fließgewässertypen (nach LAWA)

ENGLISH SUMMARY

Within the scope of a BWK project on the assessment of hydraulic stress caused by urban storm water discharges, the effects of flow acceleration on urban rivers have to be determined taking into account the specific conditions of the catchments (immission oriented approach). This project takes place in the scope of a EU-directive. Urban storm water discharges especially alter the characteristics of urban watercourses.

The ecological status of rivers was assessed taking into account the acceleration of the critical flow. Therefore the flow acceleration was compared with the flow acceleration of the potential natural catchment area. It is assumed that the flow acceleration of a potential natural catchment area does not cause any critical hydraulic stress. It can cause a catastrophic drift on organisms which lead to great ecological damage. The acceleration can be determined easily from the gradient of the hydrograph.

Whether the flow acceleration is suitable to describe ecological damages in urban rivers or not was investigated by means of the analysis of sensitivity. They were carried out with simulated data at intervals of six minutes at the Schwarzbach catchment in North-Rhine-Westphalia, West Germany. With 15 to 22 Percent the investigated parts of the Schwarzbach area are highly urbanised.

Flow acceleration of the investigated parts of the catchment were described as envelope curves. These were mathematically defined as root functions because they best described the outflow from basins. The greatest influence on envelope curves were due to the time intervals of the data used as well as the catchment size. Highly urbanised catchments were shown to have envelope curves which are up to five times higher as the natural ones. The highest accelerations were measured in the hydrologic summer months of May to October. The variability of the discharge was also at its highest in these months.

Investigations on extreme value distributions resulted in a flow acceleration every two years that were the basis for minor ecological damages. Most micro-organisms have a development cycle of about two years. Therefore after a serious damage of the ecosystem two years is sufficient time to recover.

The highest influence on the envelope curves of flow acceleration were noticed at different time intervals. Short intervals were having extremely higher envelope curves than long time intervals. In this study it was not possible to develop a method on how to predict curves of shorter time intervals. Another high influence was due to the size of the catchment area regarded. On top of the catchment size itself other specific features of the catchment had great effects on the acceleration values. This was shown taking into account a solitary event that caused high amplitudes in four parts of the Schwarzbach catchment.

The hydrographs in the four basins reacted especially due to urbanisation and geologic factors of the catchment areas. The storage of the catchments determine the peaks. There is also a greater impact depending on the site of urbanised areas. It therefore seems to be encouraging to regionalize the flow acceleration. This can lead to different standardised functions of acceleration for the different types of rivers. These types were recently put together by the LAWA for all rivers and streams in Germany.

The first steps towards regionalisation were already carried out in this study. Ten catchment areas in Baden-Württemberg were selected to study regional impacts on the acceleration. They were selected due to their wide variability of characteristics. Out of these 200 parameters the most common ones to all catchment areas were selected. Correlation was extremely significant with flood-parameters and significant in relation to geometric Data.

Regression analysis lead to high model fittings of more than 90 percent. A first step towards regional models was attempted with seven catchments in the Black Forest. Whether these results are representative or not has to be seen in future investigations. These have to show whether model fittings are still good, describing more catchments with characteristics that are not so similar.

Key-words:

EU-framework-directive on water, urban storm water, flow acceleration, Regionalisation, regression analysis, LAWA

1 EINFÜHRUNG

1.1 Problemstellung und Stand der Forschung

Problemstellung

Fließgewässer haben einen hohen ökologischen, ökonomischen und kulturellen Wert. Um sie zu schützen, wurde im Jahr 2000 die Europäische Wasserrahmenrichtlinie von der Europäischen Kommission verabschiedet. Sie zielt darauf ab, einen „Ordnungsrahmen für den Schutz der Binnenoberflächengewässer, der Übergangsgewässer^{1.1}, der Küstengewässer und des Grundwassers“ zu schaffen (Irmer 2000). Eine zentrale Rolle spielt hierbei der so genannte „gute Zustand“, der in allen Oberflächen- und Grundwässern innerhalb von 16 Jahren erreicht werden soll (Kotlarski 1999). Um diesen Anforderungen zu genügen, müssen die Gewässer zunächst bewertet werden; daraus soll ein Maßnahmenkatalog resultieren, mit dessen Hilfe der Zustand der Gewässer verbessert werden kann.

Um Fließgewässer ökologisch zu bewerten, werden in der Regel biotische oder abiotische *Zielgrößen* bestimmt. Da die räumliche Variabilität der Habitate (unterschiedliche Substrate, Gewässerquerschnitte, Vegetation, Organismen etc.) allgemein schwer zu definieren ist, wird (wie in dieser Arbeit) meist auf abiotische (hydrologische) Zielgrößen zurückgegriffen. Diese beeinflussen die Ökologie maßgeblich und können anthropogen verändert werden.

Für eine Bewertung muss der aktuelle Zustand (Istzustand) mit der naturnahen Ausprägung des Gewässertyps verglichen werden (Muhar 1996, Chovanec et al. 2000, Poff et al. 1997, Richter et al. 1998, Irmer 2000). Unter dem naturnahen Zustand versteht man die „gewachsene Kulturlandschaft“, wie sie etwa zu Anfang des 19. Jahrhunderts vorherrschte. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer potenziell naturnahen Abflussganglinie keine Gefährdung für die Gewässerbiozönose^{1.2} besteht.

^{1.1} Oberflächengewässer in der Nähe von Flussmündungen.

^{1.2} Lebensgemeinschaft im Gewässer

Die ökologische Funktionsfähigkeit im Fließgewässer wird maßgeblich von der *Abflussdynamik* bestimmt. Alle Standortbedingungen der Gewässerbiozönose werden durch sie beeinflusst (Leibundgut 1996, Poff et al. 1997). Sie beinhaltet hydrologische Kenngrößen wie die Abflussvariabilität (Schwankung zwischen Hoch- und Niedrigwasser, Abflussbeschleunigung), das Abflussvolumen bei Hochwasser sowie die Dauer und Häufigkeit von Hochwasserereignissen (Jährlichkeit, Saisonalität). Darüber hinaus kommt der Größe des Gewässers eine wichtige Rolle zu (Clausen & Briggs 2000).

Einige Parameter der Abflussdynamik werden bereits seit längerer Zeit als Zielgrößen verwendet. Dazu gehören neben dem Scheitelabfluss der Niedrigwasserabfluss, die Abflussdosis sowie die Sohlschubspannung. Diese Größen beeinflussen die Ökologie in unterschiedlicher Weise. Neben der Häufigkeit und der Dauer extremer Ereignisse sind auch deren Absolutwerte von entscheidender Bedeutung. Die Abhängigkeit der Zielgrößen von diesen Faktoren erschwert ihre Festlegung erheblich. Für alle Zielgrößen müssen also zunächst umfangreiche Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden.

Im Rahmen des BWK-Projekts^{1,3} „Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen“ sollen vor dem Hintergrund der EU-Wasserrahmenrichtlinie Auswirkungen von Niederschlagswassereinleitungen urbaner Gebiete auf oberirdische Gewässer bestimmt und bewertet werden.

Durch *Niederschlagswassereinleitungen* wird in urbanen Fließgewässern insbesondere die Konzentrationszeit des Abflusses stark verkürzt. Hierdurch wird die Abflussdynamik, allen voran Fließgeschwindigkeit, Abflussbeschleunigung und Sohlschubspannung nachhaltig verändert.

Den größten Schaden verursacht die erhöhte *Anstiegsgeschwindigkeit*. Durch die spontane, schnelle Reaktion der Abflussganglinie können aquatische Organismen nicht ausreichend reagieren und strömungsberuhigte Bereiche aufsuchen (Fenz 2001). Daher soll in dieser Arbeit die Beschleunigung als Zielgröße näher untersucht werden.

Die Abflussdynamik in einem Fließgewässer hängt vor allem von den *Einzugsgebietseigenschaften* ab. Dies erschwert die Formulierung von überregional geltenden hydrologischen Zielgrößen. Sie sind vielmehr als individuelle Größen zu verstehen, die stark variieren. Anhand von Einzugsgebietskenngrößen scheint eine Möglichkeit der Regionalisierung dieser Zielgrößen gegeben.

^{1,3} Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (2001).

Stand der Forschung

Trotz erheblicher Beeinträchtigungen für die Biozönose sind bisher nur wenige Studien hinsichtlich der Auswirkungen von Niederschlagswassereinleitungen auf urbane Fließgewässer durchgeführt worden. Insbesondere fehlt die Betrachtung eines kausalen Zusammenhangs (BWK 2001) verschiedener Einflussfaktoren.

Über die *Ökologie* urbaner Fließgewässer ist wenig bekannt. Zwar existieren biologische Arbeiten zur Abwasserbelastung bei Trockenwetter; die Beschreibung der Dynamik der Regenwettersituation und vor allem eine ganzheitliche Betrachtung unter Einbezug der Morphologie sind bisher jedoch nicht betrachtet worden (Gammeter 1996).

Die Biozönose eines von Siedlungen beeinflussten Baches ist anders zusammengesetzt als diejenige eines natürlichen Baches: Zweiflügler (Dipteren) nehmen mit der Urbanisierung stark zu, während Eintagsfliegen (Ephemeropteren), Steinfliegen (Plecopteren), Köcherfliegen (Trichopteren) und Libellen (Odonaten) in gleichem Maße zurückgehen, was schließlich die beobachtete Diversitäts-Einbuße mit sich bringt (Gammeter 1996).

Als kritischer Parameter, dem in Zukunft vermehrt Beachtung geschenkt werden sollte, ist die durch Einleitungen hervorgerufene *hydraulische Stoßbelastung* zu werten. Zahlreiche Autoren heben die sie hervor:

Podraza (1991, 1994) fand in einem kleinen Stadtbach bei Essen ausschließlich hydraulische Ursachen von Biozönose-Schäden: während die Gesamtindividuendichte unterhalb einer Einleitestelle nach jedem Ereignis markant zurückging weisen die Wenigborster (Oligochaeten) gegenüber einer unbeeinflussten Referenzstelle stets eine fünf bis zehnfach erhöhte Besiedlungsdichte auf.

Für Fischer (1994) zeigen sich in drei kleinen Bächen in Rheinland-Pfalz die einzigen signifikanten Unterschiede in der Tierwelt zwischen mischwasserbeeinflussten und – unbeeinflussten Stellen in jenen Fällen, wo hydraulische Effekte auftraten (Erosion).

Widera & Rennerich (1991) stellten in einem frisch renaturierten Stadtbach starke hydraulische Effekte von Einleitungen fest. Mit Hilfe künstlicher Substrate untersuchten sie die Biodiversität an verschiedenen beeinflussten Stellen.

Bei Untersuchungen in Südhessen wurde die Artenzahl oberhalb und unterhalb von Mischwassereinleitungen miteinander verglichen. Dabei konnte ein Rückgang von bis zu 20 Prozent in Bezug auf das gesamte Makrozoobenthos festgestellt werden (Schmidt 2000).

Die grundsätzliche Schwierigkeit der Bewertung besteht darin, dass die betroffene Biozönose alle Einflüsse auf integriert, ohne bezüglich der Einflüsse zu unterscheiden. Es gibt drei Möglichkeiten, die ursprünglichen Effekte voneinander zu trennen (Gammeter 1996):

- Untersuchungsstellen unterscheiden sich in nur einem Faktor der gemessen werden kann
- Vergleich verschiedener Untersuchungsstellen mit Referenzstellen und Aufstellen von Defizitlisten, wenn die Umweltansprüche der Organismen bekannt sind
- Anwendung multivariater Statistik, wenn über die Ansprüche einzelner Arten wenig bekannt ist

1.2 Zielsetzung

Um die Gewässerbelastung durch Niederschlagswassereinleitungen zu bewerten, soll zunächst die Abflussbeschleunigung [l/min^2] hinsichtlich ihrer Eignung als Zielgröße untersucht werden. Sie wird dabei auf der Grundlage des maximalen Beschleunigungsverlaufes im weitgehend unbeeinflussten Gewässer festgelegt. Diese maximalen Abflussbeschleunigungen können durch standardisierte Beschleunigungsfunktionen abgebildet werden (Grottke et al. 2001a).

Für die Gewässerfauna sind neben der Größe der Abflussbeschleunigung die Häufigkeit des Auftretens kritischer Werte, die Saisonalität, sowie die räumliche Variabilität und Dauer von Abflussereignissen von Bedeutung. Daher wird die Abflussbeschleunigung zunächst unter den Aspekten von Jährlichkeit, Saisonalität, Skalenabhängigkeit und zeitlichen Auflösung der Abflussdaten untersucht. Grundlage bilden hierbei Daten des Schwarzbach-Einzugsgebiets in Nordrhein-Westfalen und seiner Teileinzugsgebiete.

Auf Grundlage der Sensitivitätsanalyse des Schwarzbachs werden im Anschluss verschiedene Fließgewässer Baden-Württembergs untersucht. Hierbei wird eine Regionalisierung der Abflussbeschleunigung angestrebt. Unter Berücksichtigung von Einzugsgebietseigenschaften und Ereignisvariablen sollen Übertragungsfunktionen ermittelt werden.

Ziel der Untersuchungen ist es, die Abflussdynamik urbaner Gebiete in Richtung potenziell naturnahes Verhalten zu verändern.^{1.4} Damit soll die ökologische Funktionsfähigkeit der Gewässer sichergestellt werden, wie es in der EU-Wasserrahmenrichtlinie gefordert wird. Die Abflussbeschleunigung soll dabei für ungemessene Gebiete durch Regionalisierungsverfahren ermittelt werden.

^{1.4} Dies kann beispielsweise durch Drosseln des Abflusses geschehen.

1.3 Vorgehensweise

Zur Verdeutlichung ist die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit, in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt.

Um die Abhängigkeit der Abflussbeschleunigung vom Einzugsgebiet betrachten zu können, muss sie zunächst hinsichtlich ihrer Eignung als hydrologische Zielgröße eingehend untersucht und bewertet werden.

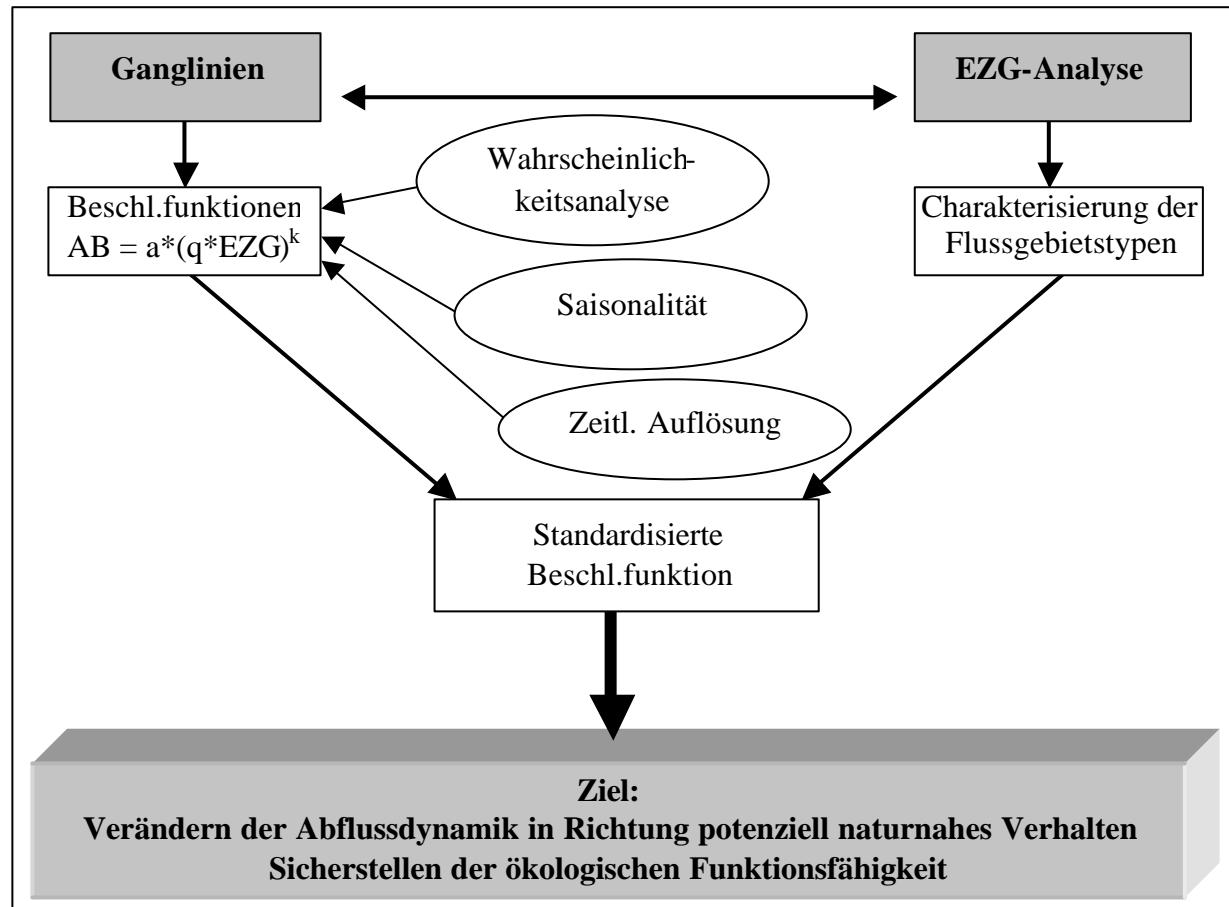


Abb. 1.1: Laufschema zur Vorgehensweise

Sensitivitätsanalysen

Datengrundlage dieser Sensitivitätsanalyse bilden modellierte Abflussdaten des stark urban geprägten Einzugsgebiets des Schwarzbach (Nordrhein-Westfalen). Die Daten liegen in einer sechsminütigen Auflösung sowohl für den aktuellen, wie auch für den potenziell naturnahen Zustand des Gewässers vor. Der potenziell naturnahe Zustand beruht dabei auf leitbildorientierten Abflüssen.

Aus den simulierten Abflussganglinien verschiedener Skalenbereiche des Schwarzbachgebiets werden zunächst die Abflussbeschleunigungen ermittelt. Diese erhält man aus der Steigung der Ganglinie. Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wird die Beschleunigung der

jeweiligen Abflussspende zugeordnet. Die Abflussspende wird in Klassen eingeteilt, in denen jeweils die Beschleunigungsverteilung bestimmt wird. Aus diesen Werten können dann die Hüllkurven (oder auch Grenzkurven) der Abflussbeschleunigung berechnet werden.

Schließlich kann der Einfluss der *Datengenauigkeit* (Auflösung der Daten) betrachtet werden. Hierfür werden die vorliegenden Daten zu Halbstunden- und Stundenwerten aggregiert und die daraus resultierenden Beschleunigungsfunktionen verglichen.

Mit Hilfe von *Wahrscheinlichkeits-* und *Saisonalitätsanalysen* wird das mittlere Verhalten der Zielgröße genauer betrachtet. Die Wahrscheinlichkeitsanalysen dienen zur Berechnung der Beschleunigungen unterschiedlicher Jährlichkeiten. Es soll die Jährlichkeit bestimmt werden, die als Zielfunktion am besten geeignet ist. In urbanen Einzugsgebieten sind halb- bis zehnjährliche Hochwasser beziehungsweise Beschleunigungen entscheidend. Daher genügt es hier auch, eine relativ kurze Zeitreihe von zehn Jahren zu betrachten (DVWK 1985).

Um allgemein gültige Aussagen treffen zu können, ist es sinnvoll, verschiedene *Skalenbereiche* miteinander zu vergleichen. Hierzu wurden vier Teileinzugsgebiete des Schwarzbachs miteinander verglichen. Diese unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer geologischen und morphologischen Einzugsgebietscharakteristika. Ferner war die Landnutzung der Gebiete eingehend bekannt; auf diese Weise war es möglich, die Abflussdynamik der Gebiete auf die jeweiligen Gebietseigenschaften zurückzuführen.

Regionale Übertragung

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen sollen schließlich in einem *Regionalisierungsansatz* integriert werden. Dafür wurde die Abhängigkeit der Abflussbeschleunigung von Einzugsgebietscharakteristika eingehend untersucht. Dies geschah anhand von Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, für die ein breites Spektrum an Einzugsgebiets- und Ereignisvariablen vorlag.^{1.5}

Über Korrelations- und Regressionsanalysen werden Zusammenhänge abgeleitet und bewertet. Dabei sollte auch die Bedeutung der Abflussbeschleunigung als Zielgröße neben dem Hochwasserabfluss herausgearbeitet werden.

Auf Grundlage der Zusammenhänge werden *Regressionsmodelle* erstellt^{1.6}, mit denen die Abflussbeschleunigung in ungemessenen Gebieten abgeschätzt werden kann. Dies ist nötig, um möglichst in allen Gebieten die Beschleunigungen soweit zu drosseln, dass eine ökologische Schädigung weitgehend ausgeschlossen werden kann.

^{1.5} IHF (Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)(2000)

^{1.6} Aufgrund der Heterogenität von Einzugsgebieten wird versucht, für verschiedenen Landschaftstypen jeweils standardisierte Funktionen aufzustellen.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Fließgewässer in urbanen Gebieten

2.1.1 Einflüsse der Siedlungswasserwirtschaft

In der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRR) kommt urbanen Gewässern ein Sonderstatus zu. „Heavily modified water bodies“ sind durch Nutzung dominierte Gewässer; sie werden nicht anhand des naturnahen Zustandes bewertet (Schmutz 1996), vielmehr wird ein gutes ökologisches Potenzial verlangt. Dazu gehören eine naturnahe morphologische Situation, eine naturähnliche Wasserführung und ein möglichst gering belasteter Wasserkörper (Borchardt et al. 1999).

Der Mensch hat schon früh Gewässer und Auenbereiche mitgestaltet und insbesondere durch den Siedlungsbau geprägt. Als „urban“ werden Fließgewässer bezeichnet, die besiedelte Gebiete durchqueren oder passieren und dabei erheblichen Veränderungen unterliegen. Diese Veränderungen umfassen Bereiche von Gewässerstruktur, Hydraulik, Abwassereinleitungen, Energie- und Stoffumsatz, Biologie und Hydrologie.

Die *Siedlungswasserwirtschaft* sieht sich also mit erhöhten Ansprüchen an Fließgewässer konfrontiert. Neben den ökologischen müssen ökonomische und soziale Aspekte berücksichtigt werden. Ökonomische Forderungen beziehen sich überwiegend darauf, überschwemmungsfreie Flächen für Siedlungen, Landwirtschaft und Industrie zu gewinnen und die Bewohner vor Hochwasser bestmöglich zu schützen. Unter sozialen Aspekten werden Bereiche der Ästhetik verstanden sowie ein erhöhter Bedarf an Erholungs- und Freizeitnutzung. Dazu gehören unter anderem Angeln, Boot fahren und Baden.

Als wesentliche Einflussfaktoren in der Siedlungswasserwirtschaft erweisen sich die hydraulische Stoßbelastung der Gewässer durch Einleitungen, ein verringelter Basisabfluss im Vorfluter sowie Maßnahmen des Hochwasserschutzes.

Abflussregime, Temperatur, Morphologie und Wasserchemie urbaner Gewässer weisen hierdurch meist höhere Amplituden auf als bei naturnahen Vorflutern. Je größer die Amplitude eines Parameters ist, desto stärker prägt dieser den Lebensraum der Gewässerorganismen. Inwieweit die einzelnen Parameter durch die Siedlungswasserwirtschaft beeinflusst werden, verdeutlicht Abbildung 2.1.

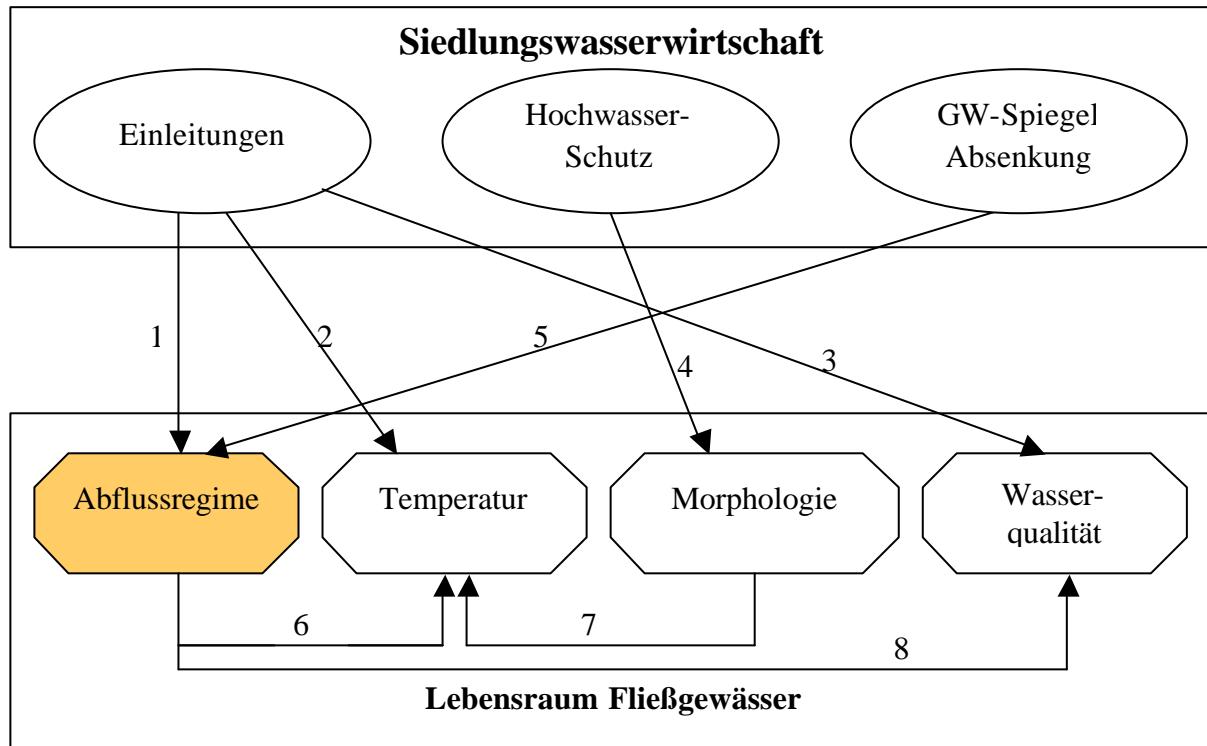


Abb. 2.1: Beeinflussung der wichtigsten Parameter des Lebensraums Fließgewässer durch die Siedlungswasserwirtschaft (nach Gammeter 1996, verändert). Dabei bedeutet

- 1 Erhöhung des Spitzendurchflusses, Zunahme von Häufigkeit und Intensität
- 2 Plötzliche Temperatursprünge während Sommergewittern
- 3 Kurzfristiger Anstieg von Schadstoffkonzentrationen (zum Beispiel Ammoniak), Sauerstoffdefizit
- 4 Geringe Habitatvielfalt
- 5 Verringelter Basisabfluss
- 6 Veränderung des Temperaturregimes durch verringerten Basisabfluss
- 7 Geringe Beschattung durch Ufervegetation
- 8 Ungünstige Verdünnungsverhältnisse durch Verringerung des Basisabflusses

Trotz Kanalisation und Abwasserbehandlung können die Fließgewässer mit hohen Schadstoffkonzentrationen und Schmutzfrachten belastet werden. Neben einer hygienischen Belastung der Gewässer zum Beispiel mit fäkal-coliformen Keimen, kann der Gewässerhaushalt besonders mit sauerstoffzehrenden Substanzen (wie Ammonium) und Feststoffen belastet werden. Für die *Wasserqualität* spielt ferner die Temperatur eine wichtige Rolle. Sie beeinflusst die Löslichkeit von Sauerstoff sowie die Abbaugeschwindigkeit von Zehr- und den Verbrauch von Nährstoffen. Mikroschadstoffquellen aus den Bereichen Verkehr, Gesundheitswesen, Gewerbe oder Industrie führen zu höheren Stoffeinträgen in Gewässer. Die Qualität hängt dabei insbesondere von den Verdünnungsverhältnissen ab; diese sind in urbanen Gebieten durch verringerten Basisabfluss häufig sehr ungünstig. Bereits ein

Verdünnungsverhältnis von 0,5:1 wird als kritisch angesehen. In urbanen Gebieten sind jedoch Verhältnisse von 100:1 keine Seltenheit (Borchardt et al. 1994).

Der *morphologische Zustand* der Gewässer beeinflusst dagegen vor allem die Extremwerte von Strömungs- und Temperaturverhältnissen. Durch Siedlungen wird das Gewässerumfeld nachhaltig beeinträchtigt. Die natürliche Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser wird quantitativ und qualitativ verändert. Das Maß der Veränderung ist dabei abhängig vom Anteil der besiedelten Flächen am hydrologischen Einzugsgebiet. Der Lebensraum Fließgewässer ist stark eingeengt und oft auf den Wasserkörper reduziert. Das hyporheische Interstitial^{2.1} ist durch Sohlbefestigungsmaßnahmen oft unzugänglich. Das natürlicherweise reich strukturierte Wasser-Land-Ökoton ist durch Uferschutzbauten praktisch vollständig eliminiert und eine schützende Ufervegetation ist oft nur spärlich vorhanden.

Oftmals ist das Fließgewässerkontinuum in Siedlungsgebieten unterbrochen, wodurch das Wiederbesiedlungspotenzial vermindert ist. Generell prägen oft Steilufer beziehungsweise Mauern das Querprofil sowie Pflaster und Beton die Sohle.

Durch Begradigung und Eindämmung werden im Fluss monotone hydraulische Bedingungen erzeugt, die zu einer Reduktion der Strukturvielfalt führen. Überschwemmungsflächen im Umland werden reduziert und auch die Häufigkeit von Überschwemmungen nimmt ab (Schmutz 1996). Ein Hochwasserabfluss erzeugt dadurch höhere Sohlschubspannungen. Es kommt zu häufigen Substratverlagerungen, was den Lebensraum für die Biozönose stark einschränkt.

Auch der *Feststofftransport* wird gestört. Sind die Schleppkräfte infolge von Regulierungen erhöht, so kann sich die Gewässersohle eintiefen. Dies führt dazu, dass das Gewässerbett eingeengt, das Fließgewässerkontinuum unterbrochen, und der Grundwasserspiegel abgesenkt wird sowie Augebiete verloren gehen.

Aufgrund geringer bis fehlender Beschattung durch Ufervegetation erhöht sich die *Temperatur* in urbanen Fließgewässern. Dieser Effekt wird durch die Nähe von strahlungsreflektierenden, wärmespeichernden Bauwerken sowie Abwassereinleitungen verstärkt. Als Folgewirkungen muss mit erhöhten Stoffumsatzraten sowie geringeren Sauerstoffkonzentrationen gerechnet werden.

Die Extreme des *Abflussregimes* werden sowohl in Niedrigwasser- wie auch in Hochwassersituationen durch urbane Gebiete verstärkt. Von einem erhöhten Spitzenabfluss sind besonders kleinere und mittlere Hochwasserwellen betroffen, die häufig auf Siedlungsabflüsse zurückzuführen sind. Große, seltene Hochwasserwellen werden durch urbane Gebiete im Allgemeinen nur unwesentlich geprägt. Dadurch verändert sich auch die Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Hochwasser - die Frequenz des Ausuferns

^{2.1} Lückenräume der fluvialen Ablagerungen unter und neben der Stromsohle (Schwoerbel 1993).

nimmt zu. In Niedrigwassersituationen werden Gewässer gewöhnlich von Grundwasser gespeist. Insbesondere die Trinkwasserentnahme sorgt in Siedlungsgebieten jedoch für eine Absenkung des Grundwasserspiegels. Eflente Bedingungen werden dadurch behindert – der Abfluss vermindert sich zusätzlich. Dies kann bis zur Austrocknung des Interstitials führen, wodurch zahlreiche Organismen ausgerottet werden.

Dieser Vielzahl anthropogener Einflüsse halten nur wenige, robuste beziehungsweise anspruchslose Arten stand, so genannte Generalisten oder euryöke Ubiquisten^{2.2}. Sie sind charakterisiert durch eine schnelle Ausbreitungs- und Vermehrungsfähigkeit, hohe Flexibilität in Lebenszyklus (zum Beispiel Unabhängigkeit von der Jahreszeit) und Ernährungsweise, geringen Ansprüchen an Lebensraum sowie an Strömung und Temperatur.

2.1.2 Beeinflussung des hydrologischen Kreislaufs

Der natürliche Wasserkreislauf setzt sich aus Niederschlag, Verdunstung, Versickerung und Abfluss zusammen. All diese Komponenten werden durch anthropogene Nutzungen beeinträchtigt. Das größte Gewicht entfällt dabei auf Verdunstung und Versickerung.

Die *Verdunstung* setzt sich zusammen aus Evaporation und Transpiration. Sie ist abhängig von Lufttemperatur und Wasserdargebot. Innerhalb urbaner Gebiete können die Temperaturen infolge der höheren Energiedichte und der erhöhten Strahlungsabsorption signifikant ansteigen. Dadurch können schwache Niederschläge vollständig verdunsten. Versiegelte Flächen behindern darüber hinaus Wasserrückhalt und Infiltration; der Oberflächenabfluss wird gefördert. Damit fehlt das Wasserdargebot für die Verdunstung, weshalb diese in urbanen Gebieten insgesamt zurückgeht (DVWK 1996).

In Siedlungsgebieten wird der Regenabfluss größtenteils in die Kanalisation abgeleitet. Dies verhindert eine natürliche *Versickerung*. Infiltration und Perkolation gehen zurück - dies vermindert Grundwasserneubildungsrate und Grundwasserspiegelhöhen. Letztere wird oftmals durch Grundwasserentnahmen zur Trinkwasserversorgung zusätzlich gesenkt. Dadurch wird in Niedrigwassersituationen eine Speisung aus dem Grundwasserkörper nahezu ausgeschlossen. Die Niedrigwasser fallen extremer aus, der aquatische Lebensraum wird eingeschränkt. Darüber hinaus gelangt das sonst dem Grundwasser zufließende Wasser ebenfalls direkt in den Vorfluter. Hierdurch vergrößert sich das Hochwasservolumen, die Abflusswelle wird erhöht.

Bei Starkniederschlägen führt die Versiegelung zum *Abfluss* großer Wassermengen über die Oberfläche, deren Abflüsse dadurch unnatürlich schnell und hoch ansteigen. Insbesondere durch die großen Beschleunigungen können Organismen verdriftet und getötet werden. Ebenso wird die Hochwassersicherheit beeinträchtigt.

^{2.2} Organismen, die Schwankungen lebenswichtiger Umweltfaktoren innerhalb weiter Grenzen ertragen. Sie können daher in den verschiedenartigsten Lebensräumen vorkommen (Schmutz 1996).

Der Abflussbeiwert Ψ sagt aus, welcher Anteil eines Niederschlagswassers oberirdisch abfließt (Dyck & Peschke 1995). Er ist damit ein geeignetes Maß, um verschiedene Landnutzungen zu charakterisieren. Er ist definiert als Verhältnis des direkten Abflusses Q_D in mm zum Niederschlag P in mm:

$$\Psi = \frac{Q_D}{P} \quad (2.1)$$

In Tabelle 2.1 ist der Abflussbeiwert für verschiedene Landnutzungsarten aufgeführt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Siedlungsgebieten, die mit Wald und Acker verglichen werden können. Auffallend ist dabei der extrem hohe Abflussbeiwert von dichter Bebauung. Hier kommt es also fast ausschließlich zu direktem, oberflächlichem Abfluss, während in Waldgebieten Interflow und Grundwasserneubildung vorherrschen.

Tab. 2.1: Abflussbeiwerte verschiedener Landnutzungen (nach DVWK 2000).

Landnutzung	Ψ [%]
sehr dichte Bebauung (350 E/ha)	80
dichte Bebauung (250 E/ha)	60
geschlossene Bebauung (150 E/ha)	40
weitläufige Bebauung (100 E/ha)	25
Asphaltstraßen	90
humusreicher Acker	20
Wald	10

Der Einfluss urbaner Gebiete auf die Abflusskonzentration ist auch abhängig von deren *Lage* im Längskontinuum des Fließgewässers. Die Lage hat Einfluss auf die Verweildauer des Wassers im Einzugsgebiet und damit auf die Abflussspitze. Insgesamt kann sich die Abflussspitze in voll versiegelten Gebieten verglichen mit unbebauten Gebieten verfünfachen; der Hochwasserabfluss springt erheblich schneller an (Emschergenossenschaft 1991, aus: DVWK 2000).

Der hydrologische Wasserkreislauf urbaner Gebiete hängt von zahlreichen weiteren Faktoren ab. Hierzu gehören Hochwasserschutzmaßnahmen, Wasserkraftwerke oder Sohlschwellen, die das Fließgewässerkontinuum unterbrechen. Auch das Zu- und Abführen von Wasser aus beziehungsweise in andere Einzugsgebiete muss hierbei erwähnt werden

2.2 Niederschlagswassereinleitungen

2.2.1 Gesetzliche Grundlagen

Im Bereich der Niederschlagswasserbehandlung fehlen bis heute konkrete bundeseinheitliche Anforderungen. Die ausgetragenen Frachten aus Misch- und Regenwassereinleitungen zu begrenzen, liegt ausschließlich im Zuständigkeitsbereich der Länder. Dabei werden nur Emissionsnormen betrachtet, die auf reine Vorsorge abzielen. Um die Gewässerbelastung durch Niederschlagswassereinleitungen zu beurteilen und technische Maßnahmen zu begründen, werden die örtlichen Verhältnisse nur unzureichend berücksichtigt (BWK 2001).

Dies reicht allerdings dann nicht aus, wenn die Belastungen die Tragfähigkeit des Ökosystems überschreiten und ein „guter Zustand“ im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie nicht erreicht wird. Diese fordert für irreversibel beeinträchtigte Gewässer (veränderte und künstliche Wasserkörper) ein gutes ökologisches Potenzial. Darunter ist ein Zustand zu verstehen, der nur geringfügig von der „unausweichlich hinzunehmenden Beeinträchtigung“ abweichen darf (Bürgel et al. 2000).

Demnach muss sich eine weitere Verbesserung des Gewässerschutzes am Schutzbedürfnis einzelner Gewässer orientieren (ATV 1993). Wie hoch das Schutzbedürfnis eines Gewässers eingestuft wird, muss im gesellschaftlichen Konsens festgelegt werden. Dieser Konsens leitet sich aus ökologischem Wunschdenken, sozialen Ansprüchen und der Zahlungsbereitschaft ab.

Die in der EU-WRR geforderte nachhaltige Entwicklung bedeutet, dass Menge und Qualität des einzuleitenden Abwassers auf das Ökosystem Gewässer eingestellt werden muss. Dies erfordert im Gegensatz zur heutigen Praxis in jedem einzelnen Fall eine Immissionsbetrachtung. Dadurch kann der Gewässerschutz gesteigert werden. In der Praxis treten dabei mangels einheitlicher Beurteilungsmaßstäbe erhebliche Probleme auf. Daher wurde in der Vergangenheit häufig gänzlich auf Immissionsbetrachtungen verzichtet. Wurde sie dennoch betrachtet, so wurden ortsspezifische Anforderungen subjektiv und nicht reproduzierbar begründet.

Bislang wurde der örtlich zulässige Einleitungsabfluss nur selten unter Gesichtspunkten des ökologischen Gewässerzustandes festgelegt. Vielmehr basierte er auf dem lokalen Hochwasserschutz sowie der Überflutungssicherheit.

Auch bei einer immissionsorientierten Beurteilung von Niederschlagswassereinleitungen sind Emissionsnormen erforderlich, damit die Gewässerbelastung nicht bis zur kritischen Grenze gesteigert wird. Dies stünde im Widerspruch zum Verschlechterungsverbot gemäß § 36b WHG^{2,3} (Bürgel et al. 2000, BWK 2001).

^{2,3} Wasserhaushaltsgesetz

2.2.2 Ökologische Auswirkungen

Fließgewässer sind sehr viel stärker physikalisch als biologisch geprägte Ökosysteme. Damit spiegeln ihre Lebensgemeinschaften vorwiegend die hydraulischen und stofflichen Umweltfaktoren wider (Borchardt et al. 1998, Wagner & Geiger 1997). Das Ausmaß zu erwartender Gewässerschädigungen wird bestimmt durch das Maß der hydraulischen Störung, die Transportkapazität des Gewässers, das Wiederbelüftungs- sowie das Wiederbesiedlungspotenzial (Bürgel et al. 2000). Relevante Kenngrößen hierfür sind die Eigenwasserführung, das Mischverhältnis, die Fließgeschwindigkeit, das Sohlsubstrat sowie strukturelle morphologische Gegebenheiten.

In Mischkanalisationen^{2.4} sind tendenziell höhere Konzentrationen an partikulären Schwebstoffen, organischen Inhaltsstoffen sowie Stickstoff- und Phosphorverbindungen zu erwarten als in Trennkanalisationen^{2.5}. Zu den *stofflichen Umweltfaktoren* zählen die mitgeführten Schmutz- und Schadstoffe der Niederschlagswassereinleitungen. Diese kommen entweder aus der Atmosphäre, werden an der Erdoberfläche aufgenommen oder aus Kanalablagerungen resuspendiert.

Für die ökologische Bewertung *hydraulischer Wirkungen* ist neben der Sohlschubspannung durch erhöhten Abfluss die Verfügbarkeit hydraulischer Refugien (Gewässersohle, Totholz, Uferbereiche) bedeutend. Hydraulische Effekte treten auch in natürlichen Gewässer während Hochwasserereignissen auf. Der Unterschied besteht in der Plötzlichkeit, mit der die hydraulischen Belastungen auftreten, sowie in der Häufigkeit solcher Ereignisse.

Ökologisch signifikante hydraulische Belastungen durch Niederschlagswassereinleitungen können in Fließgewässern auftreten, wenn der Anteil der versiegelten Fläche A_u am Einzugsgebiet A_{Eo} größer als zwei bis fünf Prozent ist (Borchardt et al. 1998). Dabei ist ihr Einfluss umso stärker, je größer das Verhältnis zwischen Entlastungs- und Gewässerabfluss ist. Er hängt ferner von hydraulischen und morphologischen Eigenschaften des Gewässers ab. Erhöhter Gewässerabfluss ist für sich allein von Bedeutung, wenn Schwellenwerte der hydraulischen Toleranzen für gewässertypische Organismen überschritten werden. Während Mischwassereinleitungen kann in kleinen Fließgewässern der Abfluss kurzzeitig um mehr als das 100fache ansteigen (Podraza 1999). Die hohen Sohlschubspannungen stellen einen hydraulischen Stress für Makroinvertebraten dar, was zu Verdriftung bis hin zur Katastrophendrift^{2.6} führt. Dies kann innerhalb von 45 Minuten - was etwa der mittleren

^{2.4} Abwasser wird zusammen mit Regenwasser (=Mischwasser) in einem gemeinsamen Kanal abgeleitet (Podraza 1999).

^{2.5} in einem Schmutzwassersammler wird das Abwasser quantitativ der Kläranlage zugeführt. Das bei Niederschlägen anfallende Regenwasser wird in einem gesonderten Regenwasserkanal dem nächsten Gewässer zugeleitet (Podraza 1999).

^{2.6} massenhaftes Abdriften der Organismen, wobei alle Makroinvertebraten in gleichem Maße von der Katastrophe betroffen werden (Podraza 1999).

Dauer von Mischwasserentlastungen entspricht - zu 30 bis 80 Prozent Populationsverlusten führen (DVWK 2000).

Stoßartige Einleitungen haben unter Umständen kritische Sohlschubspannungen zur Folge - die Abflussbeschleunigung wird dadurch extrem erhöht. Vor allem die erhöhte Anstiegsgeschwindigkeit ist ökologisch von Bedeutung. Durch die spontane, schnelle Reaktion der Abflussganglinie können aquatische Organismen nicht ausreichend reagieren und strömungsberuhigte Bereiche aufsuchen (Fenz 2001). Die Verdriftung wird dabei gefördert, wenn durch akkumuliertes Feinmaterial strömungsberuhigte Bereiche fehlen (Podraza 1994, 1999). Auf der Stufe der Benthosbiozönose^{2.7} ist zudem eine mechanische Schädigung der Organismen zu erwarten.

Die Ökologie nimmt insbesondere dann Schaden, wenn durch erhöhte Schleppspannung die Gewässersohle großflächig umgelagert wird (Schaardt & Meißner 2000, Wagner & Geiger 1997). Dies kann Katastrophendrift auslösen und damit das Aussterben vieler Lebewesen, bis hin zu ganzen Populationen. Hierbei ist eine Wiederbesiedlungsmöglichkeit aus nicht betroffenen Bachabschnitten und Refugialräumen wie Uferzonen und Interstitial nicht mehr gegeben.

Niederschlagswassereinleitungen können das Gewässer kurzzeitig, anhaltend oder langfristig verändern. Es ist damit zu unterscheiden zwischen akuten, verzögerten und akkumulierenden Wirkungen (Bürgel et al. 2000). *Akut* und *verzögert* eintretende Belastungen lassen sich zurückführen auf die hydraulische Belastung, auf sauerstoffzehrende sowie auf toxisch wirkende Substanzen wie Nitrit und Ammonium. Ursache für akkumulierend wirkende Schädigungen sind in erster Linie Nährstoffe, Feststoffe, Xenobiotika^{2.8} und persistente organische Substanzen. *Langfristige Wirkungen* entstehen aus der Akkumulation von Stoffen aus vielen Ereignissen. Auch die Eutrophierung – Folge des Eintrags von Phosphor und Stickstoff – wird durch Niederschlagswassereinleitungen beeinflusst. Ökologisch tolerierbare Belastungen müssen so festgelegt werden, dass Wechselwirkungen zwischen den wichtigsten Einzelfaktoren berücksichtigt werden (Borchardt 1992).

Je länger eine hydraulische Belastung anhält und je häufiger sie auftritt, desto stärker ermüden die Organismen und können verdriftet werden (Range & Schmidt 1999). Bei Fließgeschwindigkeiten von 0,3 bis 2,4 m/s genügt eine kurze Expositionszeit von Sekunden bis Minuten. Mit zunehmender Dauer (einige Stunden) verdriften die Organismen bereits bei niedrigeren Fließgeschwindigkeiten (ATV 1993). Faktoren, die dauerhaft oder über lange Zeiträume wirksam sind üben den stärksten Einfluss auf die Zusammensetzung der Biozönose

^{2.7} Lebensgemeinschaften, die am Boden von Fließgewässern leben. Sie halten sich überwiegend im hyporheischen Interstitial auf (Schwoerbel 1993).

^{2.8} Substanzen, die in biologischen Systemen kreislauffremd und praktisch nicht biologisch abbaubar sind, wie zum Beispiel PCB (Umweltlexikon 2002).

aus: Sie entscheiden darüber, welche Arten das Gewässer überhaupt besiedeln können (Gammeter 1996).

2.2.3 Bewertung der ökologischen Belastung

Um Maßnahmen festzulegen, mit denen eine Belastung der Biozönose minimiert werden kann, ist es zunächst notwendig, die ökologischen Reaktionen auf Niederschlagswassereinleitungen zu bewerten. Bewerten kann man nur, was man mit einer *Referenz*, dem Ideal oder Leitbild, vergleichen kann. Das Ideal der Naturwissenschaft ist die vom Menschen nicht beeinträchtigte Natur. Eine Bewertung erfolgt demnach, indem der tatsächliche mit dem potenziell naturnahen Zustand verglichen wird (Moss et al. 1987, Gammeter 1996, Hütte 2000, Poff et al. 1997, Irmer 2000). Der potenziell naturnahe Zustand ergibt sich dabei aus drei verschiedene Möglichkeiten:

- anhand von Pegeldaten aus vorurbaner Zeit
- anhand von relativ naturnahen Referenzstellen
- oder anhand einer Simulation mittels Niederschlags-Abfluss-Modellen.

Die Bewertung erfolgt dabei anhand geeigneter Parameter. Diese Indikatoren oder *Zielgrößen* müssen einerseits ökologisch relevant sein und andererseits mit vertretbarem Aufwand erhoben werden können. Dabei kommen sowohl biotische wie auch abiotische Parameter in Betracht.

Biotische Zielgrößen integrieren alle Einflüsse über mehr oder weniger lange Zeiträume. Sie haben damit den Vorteil, dass mit den Organismen gleichzeitig die beabsichtigten Effekte direkt gemessen werden. Allerdings bleiben die abiotischen Ursachen der ökologischen Defizite unberücksichtigt. Um ökologisch orientierte Maßnahmen zur Verbesserung des Gewässerzustands entwickeln zu können, müssen diese jedoch bekannt sein. Durch die Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Organismen stößt diese Ursachenermittlung häufig auf erhebliche Schwierigkeiten (Hütte 2000).

Einfacher ist es, direkt mit den abiotischen Umweltbedingungen zu arbeiten. Diese bestimmen die Organismenbesiedlung von Fließgewässern und bilden damit ein indirektes Bewertungsverfahren. Hierbei werden jene Parameter beurteilt, die im Rahmen von ökologischen Verbesserungsmaßnahmen auch direkt verändert werden können. Der Nachteil ist, dass nur der Zustand im Moment der Untersuchung erfasst wird.

Die heute gebräuchlichen statischen, für alle Fließgewässertypen einheitlichen Kriterien für Wasserqualität oder Gewässergüte wie der Saprobenindex^{2,9} genügen für eine Bewertung also nicht. Der Gewässerzustand ist vielmehr regional und in seiner zeitlichen Gültigkeit zu differenzieren. Dabei ist für die Bewertung von Niederschlagswassereinleitungen aus ökologischer Sicht Extremsituationen besonderes Augenmerk zu schenken (Bürgel et al. 2000, Wagner & Geiger 1997).

In der vorliegenden Arbeit wurde die *Abflussbeschleunigung* als abiotische Zielgröße zur Bewertung von Niederschlagswassereinleitungen gewählt. Ihre ökologische Relevanz wurde bereits in Kapitel 2.2.2 ausführlich behandelt. Sie ist aus Ganglinienaufzeichnungen leicht zu ermitteln, spiegelt verschiedene Einzugsgebietseigenschaften wider und kann durch wasserbauliche Maßnahmen beeinflusst werden.

2.3 Niederschlag-Abfluss-Simulation NASIM

Als Datengrundlage zur Berechnung der Abflussbeschleunigungen wurden simulierte Daten sowohl für den Ist- als auch für den potenziell naturnahen Zustand verwendet. Diese wurden mit Hilfe der Niederschlag-Abfluss-Simulation NASIM berechnet. NASIM wurde in den 1980er Jahren im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens „Bestimmung des Einflusses anthropogener Eingriffe auf Abflussbildung und Abflussvorgang mit Hilfe von Parameterschätzverfahren“ entwickelt und wird seit 1986 im Landesumweltamt Düsseldorf eingesetzt (Hydrotec 2000).

NASIM ist ein konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell, das die Wasserbilanz kontinuierlich simuliert. Dabei werden alle wesentlichen physikalischen Prozesse des hydrologischen Kreislaufs (Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser, Gewässer) abgebildet. Für Flächennutzung und Bodentypen werden physikalisch begründete Parameter herangezogen.

NASIM hat den Anspruch, sowohl momentane Hochwasserscheitel wie auch Langfristsimulationen so gut wie möglich wiederzugeben. Hierfür werden niederschlagsabhängige Zeitschritte innerhalb des Simulationszeitraums verwendet (Ostrowski 1982). Wird das Zeitintervall umgekehrt proportional zur Intensität der eintretenden Ereignisse gewählt, so resultiert daraus eine hohe zeitliche Auflösung in Hochwasserperioden und eine geringe Auflösung in Mittel- und Niedrigwasserperioden.

Der Bodenwasserhaushalt wird über verfügbare, physikalisch begründete Eingabedaten ermittelt und gestattet so eine gesicherte Kalibrierung.

^{2,9} Güteparameter auf Grundlage der vorkommenden Tierarten. Verschiedene Tierarten werden als Indikatoren für eine bestimmte Wasserqualität herangezogen (Borchardt 1992).

Die Länge der betrachteten Zeiträume ist frei wählbar, wobei auch hohe zeitliche Auflösungen angewendet werden können. Dabei wird das gesamte System in einem Zeitschritt simuliert (die Zeitschleife umfasst die Ortsschleife)(Ostrowski 1982), wodurch Rückkopplungen bestmöglich wiedergegeben werden können.

Innerhalb des Modells werden natürliche und versiegelte Flächen getrennt betrachtet; die Abflüsse aus beiden Gebieten werden am Ende überlagert (Hydrotec 2001). In die Simulation urbaner Abflüsse gehen sämtliche hydraulisch wirkenden Elemente eines Kanalnetzes ein. Dabei wird die Verdunstung von versiegelten Flächen, Regenwasserrückhalt, -nutzung und -versickerung, Trockenwetterabfluss sowie die Kanalretention berücksichtigt.

Über die integrierte Primärstatistik ist es möglich, Entlastungshäufigkeiten und Teilgebietsbilanzen zu ermitteln. Mischwassereinleitungen und die Mischungsverhältnisse an Einleitungsstellen können bei Langzeitsimulationen gut wiedergegeben werden.

Die Trennung der Belastungsaufteilung in versiegelte und natürliche Gebiete in NASIM wird in Abbildung 2.2 skizziert. Dabei sind die bedeutenden hydrologischen Prozesse dargestellt.

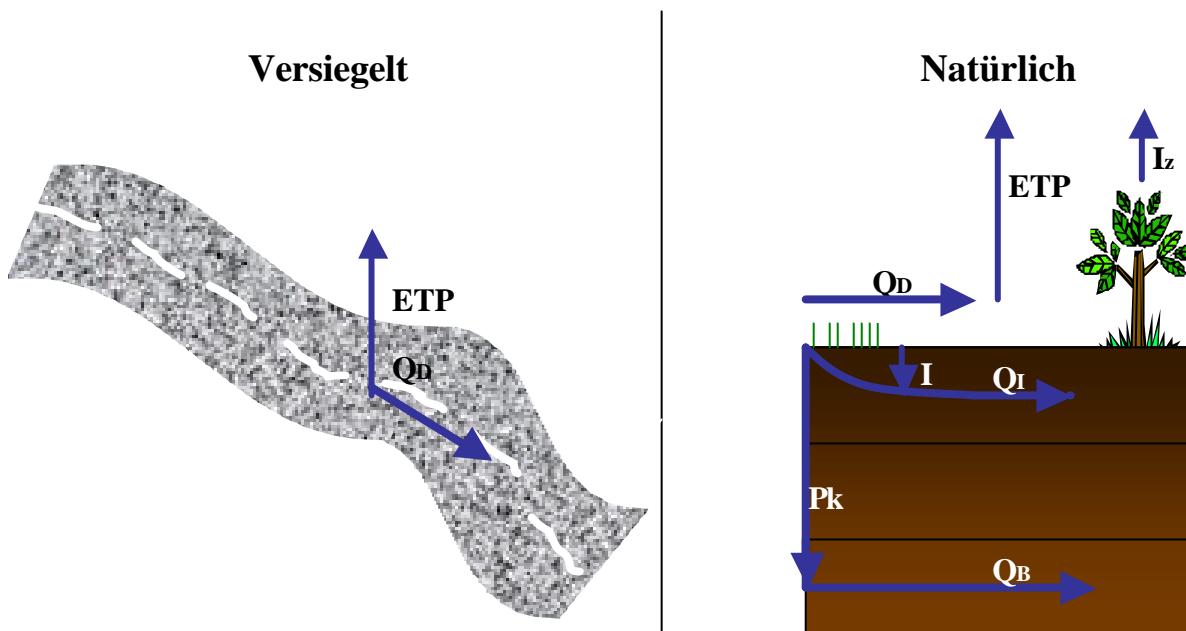


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Belastungsaufteilung in NASIM. Dabei bedeutet ETP: Evapotranspiration, Iz: Interzeption, Q_D: Oberflächenabfluss, I: Infiltration, Pk: Perkolation, Q: Interflow (Zwischenabfluss), Q_B: Basisabfluss.

Die *Belastungsbildung* umfasst den Input durch Regen oder Schneeschmelze. Während Regen zu einer sofortigen Belastung führt, wird Schnee erst nach der Schmelze aktiv. In NASIM wird dies mit einem Temperaturfaktor beschrieben.

Die *Belastungsverteilung* ermittelt den Gebietsniederschlag aus Punktwerten. Dieser ist insbesondere von Exposition und Höhenlage abhängig. Hierfür gibt es in NASIM drei Möglichkeiten (Hydrotec 2001). Der Gebietsniederschlag kann manuell über die Thiessen-Polygon-Methode zugewiesen werden, die jedoch die orographischen Verhältnisse nicht

berücksichtigt. Im Gebirge wird zusätzlich auf die Höhenlage zurückgegriffen. Außerdem kann der Gebietsniederschlag über ein eigenes Modell berechnet werden.

Inwieweit der Niederschlag versickert, verdunstet oder in die Abflussanteile Direktabfluss, Zwischenabfluss oder Basisabfluss überführt wird, wird in der *Belastungsaufteilung* beschrieben. Wichtigster Parameter im Modell ist hierbei die potenzielle Evapotranspiration, die nach Haude oder Penman berechnet wird.

Bei der Belastungsaufteilung beginnt die Trennung in versiegelte und unversiegelte Flächen. Die Bodenfeuchtesimulation erfolgt für unversiegelte Flächen nichtlinear. Aufgrund fehlender Eingangsdaten wird jedoch vereinfachend von linearen Verhältnissen ausgegangen; hierfür werden die Parameter über die betrachtete Fläche gemittelt. In versiegelten Gebieten wird die Verdunstung nach verschiedenen Hangneigungen als linear angenommen (Hydrotec 2000).

Die *Abflusskonzentration* erklärt die Transformation vom Effektivniederschlag in Direktabfluss; dabei steht die Verformung durch Retention und Translation im Vordergrund. Sie wird in NASIM über eine nichtlineare Speicherkaskade dargestellt, wobei jeder Speicher eine andere Retention aufweist.

Für natürliche Flächen wird für den Oberflächenabfluss eine Zeit-Flächen-Funktion aus einem Isochronen-Verfahren mit nachfolgender Retention ermittelt. Interflow und Basisabfluss werden über je einen Einzelleinarspeicher beschrieben. Versiegelte Flächen führen fast ausschließlich zu Oberflächenabfluss. Dieser wird im Modell mit zwei bis drei Speichern verknüpft. Als dritte Komponente wird das tiefe Grundwasser getrennt betrachtet. Dieses ist insbesondere in Karstgebieten von Bedeutung, in denen die unterirdische Wasserscheide nicht mit der oberirdischen übereinstimmt.

Die Abflusswelle wird durch die Gerinneretention verformt. Dieser *Wellentransport* wird in NASIM mit dem Kalinin-Miljukov-Verfahren simuliert, wobei Speicher unterschiedlicher Retentionen dazwischen geschaltet werden. Dieses Verfahren wird sowohl für das Gerinne wie auch für das Kanalnetz angewendet.

Die Güte des Modells wurde eingehend in Ostrowski (1982) untersucht; die Ergebnisse werden dabei als äußerst ermutigend bezeichnet. Die Abbildung der kontinuierlichen Wasserbilanz, gemessen an bekannten Gütekriterien war erfolgreich.

In der vorliegenden Arbeit liegen Abflussdaten des Modells als Eingangsgrößen für die Berechnung der Beschleunigungen sowie die Sensitivitätsanalysen am Einzugsgebiet des Schwarzbachs vor.

2.4 Fazit

Nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie dürfen urbane Gewässer die Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes nicht einschränken. Um dieser Forderung nachzukommen, müssen insbesondere die Auswirkungen von Einleitungen bewertet und minimiert werden.

Niederschlagswassereinleitungen verändern sowohl stoffliche wie auch hydraulische Bedingungen. Dabei kommt insbesondere dem hydraulischen Stress für die Fließgewässerorganismen extreme Bedeutung zu. Häufige, plötzliche hydraulische Belastungen beeinflussen die Lebensgemeinschaften. Refugien im Gewässer sind selten. Dies verstärkt die Katastrophendrift, die durch erhöhte Sohlschubspannungen hervorgerufen wird. Durch die Umlagerung der Gewässersohle wird die Drift noch verstärkt. Bis zu 80 % der Populationen können verloren gehen.

Auswirkungen treten in Einzugsgebieten auf, die zu mehr als zwei bis fünf Prozent versiegelt sind. Durch versiegelte Gebiete wird die Abflusskonzentration verkürzt. Der Abflusspeak kann dadurch verfünffacht werden; dies erhöht auch die Beschleunigung im Gewässer, wodurch Organismen verdriftet werden können.

Die Niederschlagswasserbehandlung ist bis heute nicht einheitlich geregelt. Sie ist vielmehr Ländersache und zielt auf reine Vorsorge ab. Immissionsbetrachtungen werden nicht berücksichtigt.

Der Gewässerzustand wird durch einen Vergleich mit dem naturnahen Zustand bewertet. Dieser wird als Ideal angesehen. Bewertet wird meist über abiotische Zielgrößen, die die ökologischen Defizite verursachen. Sie sind es auch, die durch wasserbauliche Maßnahmen verändert werden können.

Die Sensitivitätsanalysen der Abflussbeschleunigung erfolgen anhand simulierter Daten des Schwarzbach-Einzugsgebiets in Nordrhein-Westfalen. Diese wurden mit dem konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM simuliert. Bei der kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz werden die Prozesse des hydrologischen Kreislaufs abgebildet. Das Modell betrachtet natürliche und versiegelte Flächen getrennt. Bei letzteren liegt das Gewicht auf den hydraulisch wirkenden Elementen des Kanalnetzes.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIETE

3.1 Untersuchungsgebiet Schwarzbach

3.1.1 Naturräumliche Gliederung, Topographie und Geomorphologie

Das Einzugsgebiet des Schwarzbachs befindet sich in Nordrhein-Westfalen, zwischen Ruhr und Wupper (Abb.3.1).

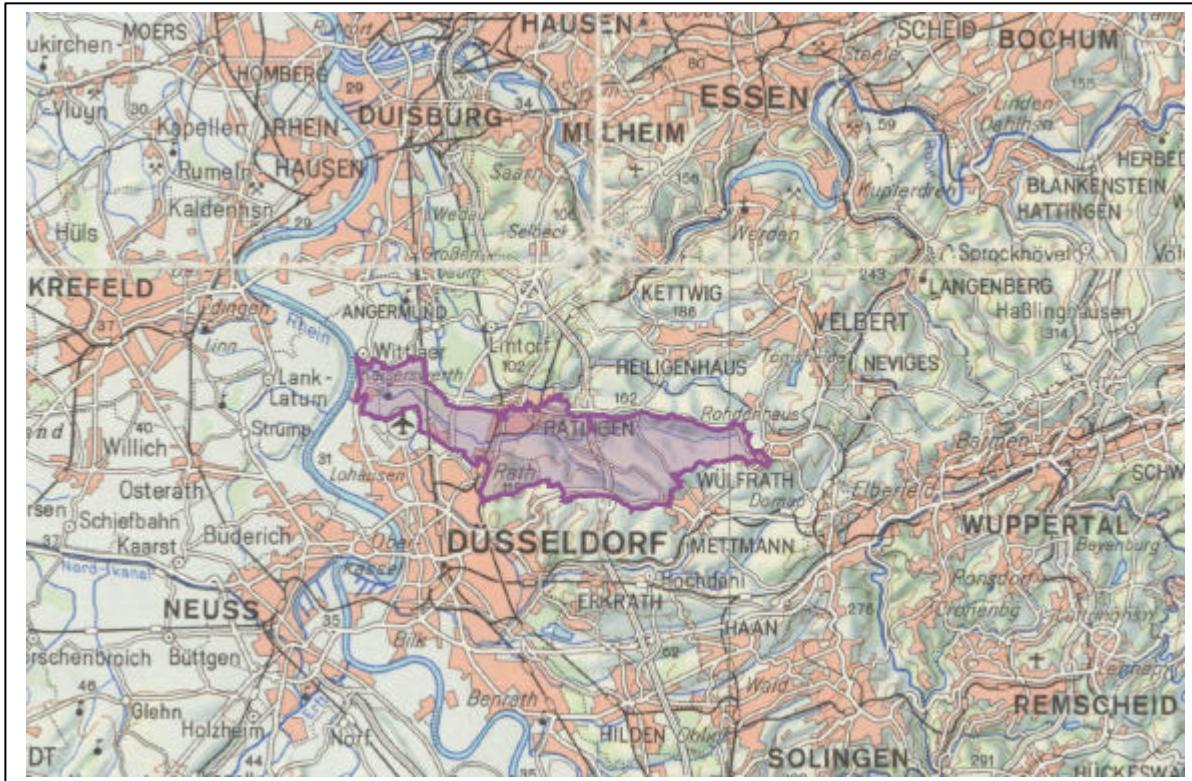


Abb. 3.1: Lage des Schwarzbacheinzugsgebiets.

Sein lang gestrecktes Einzugsgebiet ist mit einer Größe von 54,2 Quadratkilometern der hydrologischen Mesoskale zuzuordnen (Dyck & Peschke 1995). Er entspringt im Bergischen Land (Rheinisches Schiefergebirge). Nachdem er bei Ratingen die Mittelterrasse überquert

hat, mündet er nördlich von Düsseldorf im Niederrheinischen Tiefland in den Rhein. Er ist damit dem Rhein direkt tributär. In seinem Lauf überwindet er einen Höhenunterschied von 142 Metern – von 170 Meter über NN auf 28 Meter über NN. Er hat damit ein Gesamtgefälle von 0,7 Prozent, wobei er sein größtes Gefälle am Übergang vom Bergischen Land ins Niederrheinische Tiefland aufweist. Bis Ratingen fließt der Schwarzbach von Ost nach West, nach dem Eintritt ins Tiefland verläuft er in südost-nordwestlicher Richtung. Dies lässt sich auf Mündungsverschleppung zurückführen.

3.1.2 Geologie

Die Beschreibung der Geologie des Untersuchungsgebietes entstammt den geologischen Untersuchungen von Grabert (1998) sowie dem Topographischen Atlas von Nordrhein-Westfalen NRW (Schüttler 1969).

Fast im gesamten Schwarzbachgebiet herrschten devonische Ablagerungen vor. Das Devon^{3.1} war geprägt von weiten Wattflächen der Tethys, dem paläozoischen Mittelmeer. Dieses befand sich zwischen dem Oldred-Kontinent im Norden und dem damals noch einheitlichen Südkontinent. Die allmähliche Verschiebung der Küstenlinie nach Norden ging einher mit der Aktivität eines untermeerischen Vulkanismus.

Die Fauna konnte nun einen breiten, durchlichteten Schelf besiedeln und große Riffsysteme aufbauen. Da die stetige Absenkung des Untergrunds fortlaufend durch den biogenen Aufwuchs des Riffkörpers ausgeglichen wurde, kam es schließlich zu einer über 1000 Meter mächtigen Ansammlung von Karbonaten, dem sogenannten Massenkalk; er kann heute noch in der Gemeinde Wülfrath im Oberlauf des Schwarzbach beobachtet werden. Marines Tertiär findet sich nur in Binnensenken mit Tonen und Braunkohlen als Reste einer Dolinenfüllung im Massenkalk von Wülfrath. Dadurch lässt sich auch das relativ hohe Alter der dortigen Verkarstung belegen.

Die Konglomerate des Devon wurden in Prielen abgelagert, in denen ein kräftiger Wasserstrom auch gröberes Material transportierte. Das Schwarzbachtal-Konglomerat ist einem lokalen gravitativen Massentransport aus einem Küstenbereich zu verdanken.

Die variszische Orogenese begann bereits im Devon und beendete schließlich vor circa 280 Millionen Jahren die Vorherrschaft des paläozoischen Meeres; das Gebiet wurde erstmals landfest. Der Verwitterungsschutt des aufsteigenden Gebirges liegt heute als wohlgerundete Konglomerate vor.

^{3.1} Formation des Erdaltertums (Paläozoikum); das Devon dauerte von 410 bis 355 Mio Jahre vor heute (Leser 1997).

Die alpidische Gebirgsbildung (Tertiär^{3.2}) ging von der Ausfaltung der Alpen aus, griff aber auch auf das variszisch konsolidierte Vorland im Norden über. Sie überprägte dieses nicht mehr faltbare Tektogen mit einer saxonischen Bruchtektonik zum Bruchfaltengebirge. Die Rheinische Masse hob sich zum heutigen Mittelgebirge des Rheinischen Schiefergebirges. Die Bruchtektonik war begleitet von meist basischem Vulkanismus. Heute findet man das anstehende Grundgebirge des Bergischen Landes (Devon) auch im Untergrund der Niederrheinischen Bucht. Es handelt sich dabei um stark gefaltete Grauwacken, Schiefer und Sandsteine.

Im Schwarzbachgebiet finden sich damit überwiegend Sandsteine, Quarzite, Schluff- und Tonsteine sowie Lenneschiefer^{3.3}. Hinzu kommen örtliche Einlagerungen größerer Sandschüttungen sowie Kalksteine.

Von der Quelle bis zur Mündung durchfließt der Schwarzbach damit vier unterschiedliche geologische Formationen: Er entspringt in stark verkarstetem Kalkgebiet bei Mettmann. Nach einer Passage durch silikatisches Grundgebirge des Rheinischen Schiefergebirges durchläuft er Sandgebiete der Mittelterrasse bei Ratingen. Schließlich quert er die Rheinische Tiefebene in Form eines Niederungsgewässers.

3.1.3 Hydrologie

Vom Rheintal nach Osten nimmt die Niederschlagshöhe mit zunehmender Höhe zu. Die Mittelgebirge sind im allgemeinen schlechte Grundwasserleiter. Dies liegt zum einen an den Gesteinen mit einer geringen Wasseraufnahmefähigkeit, und zum anderen an der Abfluss fördernden Morphologie. Infolgedessen fließt ein Großteil des Wassers oberirdisch ab. Da hier jedoch die hohen Niederschlagsmengen fallen, wird das Wasser im Bergische Land an vielen Stellen von Talsperrensystemen aufgefangen.

Das Grundwasser des Niederrheins ist an mehr als tausend Meter mächtige Lockergesteine gebunden. Diese wurden seit der Tertiärzeit vom Rhein und seinen Nebenflüssen wie auch durch die zeitweiligen Meeresvorstöße aus dem Nordsee-Gebiet in den niederrheinischen Senkungsraum eingebracht. Eingeschaltete Tonlager verteilen das Grundwasser auf einzelne Stockwerke. Es sind bis zu 16 Stockwerke übereinander bekannt (Grabert 1998). Die Grundwasserneubildung durch Niederschläge wird im Niederrheingebiet mit sechs bis sieben Litern pro Sekunde und Quadratkilometer angenommen.

^{3.2} erste Periode der Erdneuzeit (Känozoikum); das Tertiär dauerte von ca. 70 bis zwei Millionen Jahre vor heute (Leser 1997).

^{3.3} Sedimentation karbonatischer Ton- und Schluffsteine (Grabert 1998).

Da ein Pegel am Gebietsauslass des Schwarzbachs erst 1998 eingerichtet wurde, fehlen Abflusskennwerte und hydrologische Hauptzahlen.

3.1.4 Klimatische Verhältnisse

Das Einzugsgebiet des Schwarzbachs liegt im gemäßigt-humiden atlantisch geprägten Klima. Es zeichnet sich aus durch milde Winter und mäßig warme Sommer bei relativ gleichmäßig über das Jahr verteilten Niederschlägen. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 9 Grad Celsius. Die Niederschlagsverteilung variiert stark. Während im Bergischen Land mittlere Niederschläge von 800 Millimeter typisch sind, fallen in der Rheinischen Tiefebene im Schnitt nur etwa 630 Millimeter Niederschlag im Jahr (Schüttler 1969).

3.1.5 Böden

Die Überprägung des Gebietes durch das nordische Inlandeis verursachte eine flache Landschaft und wertvolle Böden (Münsterland). Beim Rückzug der Gletschermassen wurden hier Sand und Staub abgelagert. Das milder werdende Klima wandelte diese Ablagerungen in wertvolle Böden um, auf denen anspruchsvolle Nutzpflanzen wie die Zuckerrübe gedeihen können.

In der Niederrheinischen Bucht wird die Landschaft von den Sedimenten des Rheinstroms geprägt. Die ebenfalls wertvollen Böden verdanken ihre Entstehung weitgehend Prozessen des pleistozänen und holozänen Klimas. Reste einer tertiärzeitlichen Bodenbildung sind jedoch an geschützten Orten in recht vielfältiger Form erhalten geblieben. Je nach Ausgangsmaterial, Bodentiefe, Hangneigung und dem Einfluss des Grund- und Stauwassers lassen sich die Böden einordnen. Im Schwarzbachgebiet finden sich überwiegend Gley, Rendzina, Ranker und Braunerden.

3.1.6 Landnutzung

In dieser Studie wurden vier Teilgebiete des Schwarzbach untersucht. Diese Teilgebiete und ihre Landnutzung gehen aus Abbildung C im Anhang hervor. Die Gebietsbezeichnungen G1, G29a, G34 und G72 beruhen auf Angaben des Bergisch-Rheinischen Wasserverbands. Sie sind in Kapitel 4.1 näher erläutert. Die weißen Flächen beruhen dabei auf Datenlücken. Ferner die Landnutzung in Tabelle 3.1 dargestellt. Daraus geht hervor, dass sämtliche Teilgebiete überwiegend vom Ackerbau geprägt sind. Der versiegelte Anteil ist mit 15 bis 22 Prozent erheblich; er ist sogar größer als der Waldbestand. Im gesamten Einzugsgebiet nehmen die

Wiese- und Weideflächen ebenfalls einen wesentlichen Teil ein. Sie sind überwiegend in unmittelbarer Nähe zum Rhein zu finden; häufige Überschwemmungen verhindern hier die ackerbauliche Nutzung.

Tab. 3.1: Landnutzungsverteilung der Teileinzugsgebiete des Schwarzbachs (Angaben in Prozenet).

	EZG-Größe	Acker	Versiegelung	Wiese/Weide	Wald	Gewässer
G1	1,76	40,73	22,11	22,14	13,42	1,61
G29a	27,94	56,17	15,34	20,85	7,12	0,53
G34	31,32	55,73	16,45	19,64	7,66	0,51
G72	54,19	39,47	14,36	27,56	16,51	2,09

Bereits ab einem Versiegelungsgrad von zwei bis fünf Prozent muss mit gravierenden Beeinträchtigungen des Abflussprozesses gerechnet werden. Dieser Prozentsatz wird von allen vier Teilgebieten um mehr als das Dreifache übertroffen. Auffällig ist, dass das kleinste Gebiet den stärksten Versiegelungsgrad von 22,11 Prozent aufweist.

3.2 Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg

3.2.1 Charakterisierung der einzelnen Gebiete

Die Übertragung von Gebietseigenschaften zu Flussgebietsarten erfolgte anhand von 10 Einzugsgebieten in Baden-Württemberg. Diese Einzugsgebiete werden im Folgenden kurz skizziert, um einen groben Überblick zu erhalten. Kapitel 3.2.2 werden einzelne Gebietsparameter tabellarisch miteinander verglichen. Aus Abbildung 3.2 geht die Lage der Einzugsgebiete und ihrer Pegel hervor. Zu beachten ist, dass neun der zehn Gebiete ein rheanisches Bild aufweisen – lediglich die Breg ist danubisch.

Die **Wiese** entspringt südlich des Feldbergs. Sie fließt durch das kristalline Grundgebirge des Südschwarzwaldes und mündet bei Lörrach in den Rhein. Trotz einer vergleichbaren Einzugsgebietsgröße mit der Seckach ist der mittlere Hochwasserabfluss mit 88 m³/s mehr als doppelt so hoch. Die Gewässernetzdichte ist sehr groß. Der höchste Punkt des Einzugsgebiets liegt auf 1485 Meter über NN. Die mittlere Hangneigung ist mit 18 Prozent sehr hoch. Das Einzugsgebiet ist zu nur zwei Prozent versiegelt – den größten Teil machen Waldflächen aus.

Das Einzugsgebiet der **Dreisam** liegt im Südschwarzwald; es ist bis zum Pegel Ebnet gekennzeichnet durch ein hohes Gefälle, enge Täler und geringe Versiegelung. Ihr Einzugsgebiet kann zweigeteilt werden: Einerseits ist es geprägt durch tief eingeschnittene Täler des Südschwarzwalds, andererseits durch einen flach ausgebildeten Schwemmkessel mit mächtigem Talaquifer (fluviale Schotter) im Zartener Becken kurz oberhalb des Pegels Ebnet. Im Einzugsgebiet herrscht kristallines Grundgebirge mit Gneisen und Graniten vor.

Die **Elz** (*Pegel Gutach*) ist geprägt durch das kristalline Grundgebirge des Südschwarzwalds. Ihr Einzugsgebiet hat damit eine hohe Gewässernetzdichte. Der höchste Punkt liegt bei 1225 Meter über NN. Die mittlere Neigung des Einzugsgebietes ist mit 16 Prozent erheblich. Seine Form ist nahezu kreisförmig (IHF 2000).

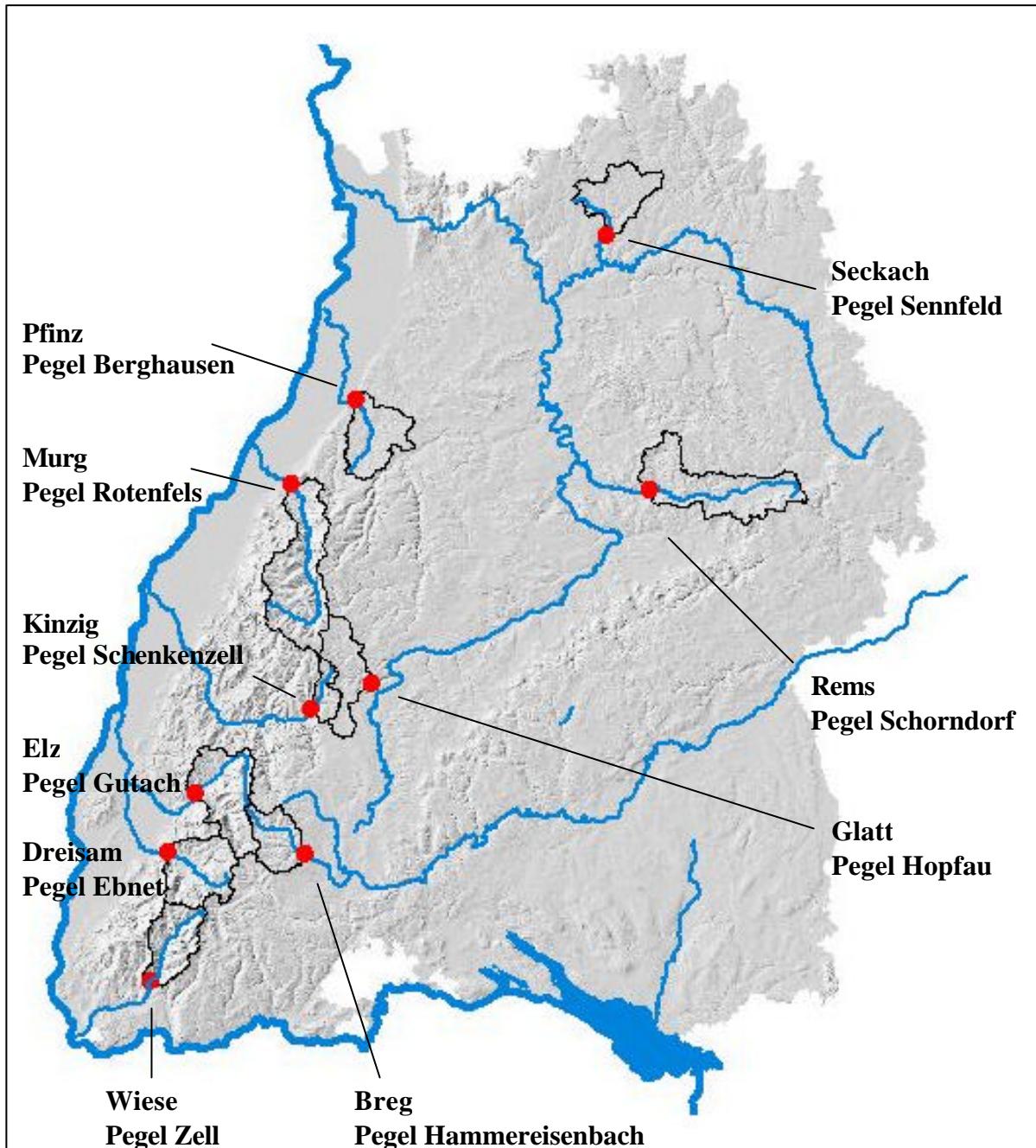


Abb. 3.2: Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg und Lage ihrer Pegel

Breg und **Brigach** bilden zusammen die beiden Quellflüsse der Donau. Die Breg ist damit das einzige in dieser Arbeit untersuchte Gebiet, das nicht dem Rhein tributär ist. Sie entspringt im mittleren Schwarzwald; ihr Einzugsgebiet ist geprägt von Buntsandstein, Muschelkalk und Jura. Der höchste Punkt liegt auf 1150 Meter über NN. Die mittlere Hangneigung liegt bei über elf Prozent. Das Einzugsgebiet ist mit über 73 Prozent von Wald bedeckt. Auffallend sind ferner größere Feuchtflächen.

Die Quelle der **Kinzig** liegt südlich von Freudenstadt im Mittelschwarzwald. Das Kinzigtal durchschneidet den gesamten Schwarzwald von Ost nach West. Der Übergangsbereich zwischen dem kristallinen Grundgebirge des Südschwarzwalds und den Sedimentschichten des Mittelschwarzwalds bestimmt das Relief. Es ist im Westen stark unruhig mit Höhen zwischen 500 und 800 Meter über NN; im Osten geht es in eine wellige Fläche über. Aufgrund der tiefliegenden Erosionsbasis des Rheins hat die Kinzig das Grundgebirge weitgehend seiner Sedimentschicht beraubt. Das Gewässernetz ist hier dicht.

Am Ostrand des nördlichen Schwarzwalds nimmt die **Glatt** ihren Lauf in Richtung Neckar. Das Gewässernetz ist eher weitmaschig und von periodisch fließenden Bächen gekennzeichnet. Das Einzugsgebiet der Glatt befindet sich im oberen Muschelkalk. Steile Trichterdolinen zeugen von starker Verkarstung. Die höchste Erhebung ist 846 Meter hoch.

Die **Murg** befindet sich im Nordschwarzwald; sie mündet bei Rastatt in den Rhein. Ihr Einzugsgebiet ist damit geprägt vom Buntsandstein. Lange Zeit fließt sie durch eine enge, V-förmige Schlucht. Erst ab Gernsbach weitet sich das Tal. Es wird hier komplett von den Siedlungen in Anspruch genommen. Sie fließt ab Ottenau von Süden nach Norden – senkrecht zur Schwarzwald-Randverwerfung. Die Murg weist sehr hohe Abflusswerte auf. Auch die Gewässernetzdichte des Einzugsgebiets ist sehr hoch.

Zwar liegt die Quelle der **Pfinz** noch im Nordschwarzwald – ihr Einzugsgebiet erstreckt sich jedoch über die weiten Flächen des Kraichgaus. Sie fließt in nördlicher Richtung, um bei Karlsruhe in den Rhein zu münden. Die Gewässernetzdichte ist sehr niedrig. Der höchste Punkt liegt auf 534 Meter über NN. Die Hangneigung ist eher gering. Mit knapp zehn Prozent versiegelter Fläche ist ihr Einzugsgebiet stark urban geprägt. Auffallend groß ist auch der Anteil der Flächen, die für Ackerbau und Sonderkulturen genutzt werden. Nur knapp 35 Prozent sind waldbestanden.

Dahingegen entspringt die **Rems** am Nordrand der Schwäbischen Alb und fließt in der Ebene zwischen Schwäbischer Alb und Welzheimer Wald in ost-westlicher Richtung. Nördlich von Stuttgart mündet sie in den Neckar. Bis zum *Pegel Schorndorf* mäandriert sie stark, ihre Sohle ist schmal – die Talhänge sind steil und bewaldet. Hier steht Stubensandstein aus der Keuperzeit an. Kleine Teile sind auch vom Jura geprägt. Die Hochflächen sind Ausläufer des Schurwalds. Das Einzugsgebiet ist mit zwölf Prozent stark versiegelt. Daneben fallen große Sonderkulturflächen mit Weinbau und Obstplantagen auf. Das Einzugsgebiet hat die größte Gewässernetzdichte der untersuchten Gebiete.

Die **Seckach** liegt in der Hohenloher Ebene - im Nordosten des Landes. Er mündet zunächst in die Jagst und ist damit indirekt dem Neckar tributär. Das Einzugsgebiet des *Pegel Sennfeld* liegt in der niederschlagsärmsten Region Baden-Württembergs, im Windschatten von Schwarzwald und Odenwald. Hier fallen circa 600 Millimeter Niederschlag im Jahr. Die

Abflusswerte sind sehr niedrig. Die zahlreichen Nebenflüsse von Norden führen mehr Wasser als der Fluss im durchlaufenden Tal. Sie kommen aus dem regenreichen Odenwald. Das Gebiet ist geprägt von Muschelkalk, der stellenweise von Lettenkeuper und Löss^{3.3} bedeckt ist. Daher spielt hier der Ackerbau die dominierende Rolle.

3.2.2 Vergleich der Gebiete über Einzugsgebietsparameter

Aus hydrologischer Sicht ist zunächst immer das Abflussregime von Bedeutung. Er ist Ausdruck von maßgebenden Regimefaktoren; hierzu gehören klimatologische, geologische, pedologische, geomorphologische, vegetative und anthropogene Gegebenheiten (Baumgartner & Liebscher 1996).

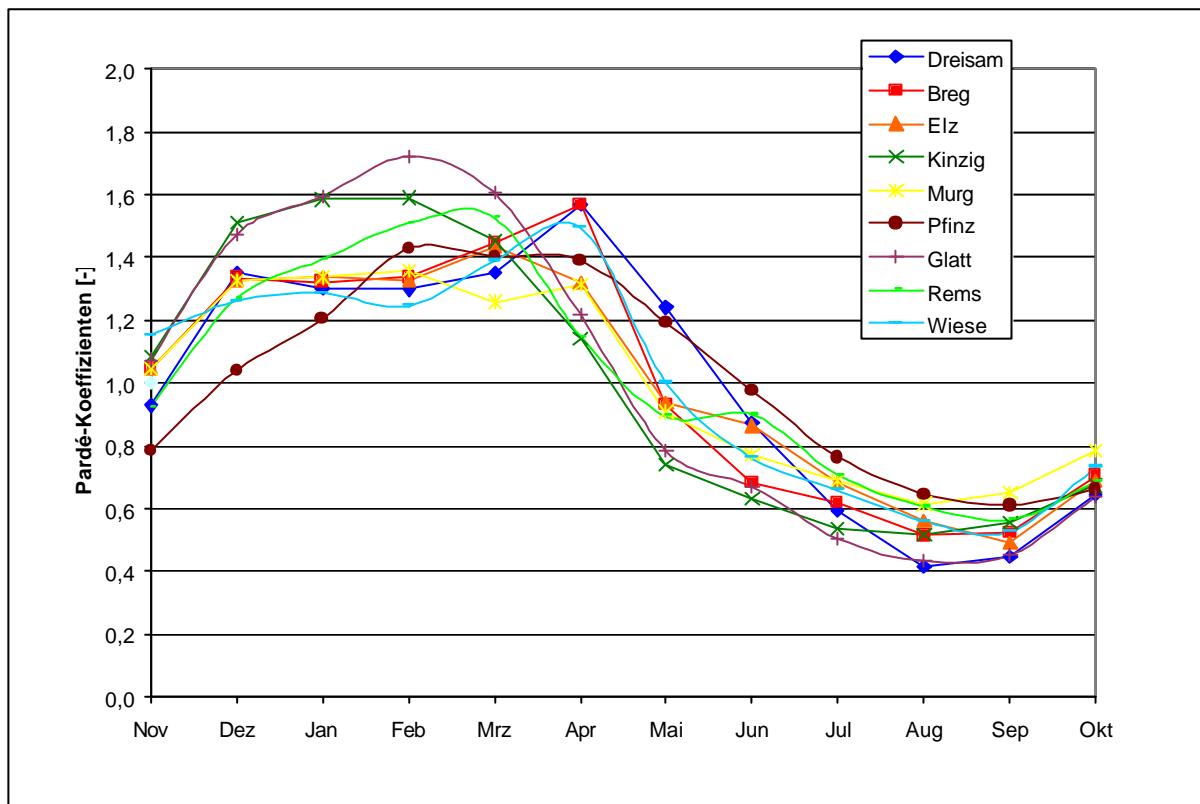


Abb. 3.3: Abflussregime der untersuchten Gebiete. Datengrundlage: LfU (1993). Der Darstellung fehlt die Seckach aufgrund fehlender Daten.

In Abbildung 3.3 sind die Abflussregime von neun der zehn untersuchten Gebiete dargestellt. Auffallend ist ein recht einheitlicher Verlauf in allen Gebieten. Dreisam, Breg und Wiese weisen einen im Vergleich zu den anderen Gebieten erhöhten Koeffizienten im Monat April auf. Dieser kann auf die Schneeschmelze im Schwarzwald zurückgeführt werden. Es handelt sich dabei auch um die drei Einzugsgebiete mit den größten mittleren Höhen (siehe Tabelle

^{3.3} Kalkhaltiges, gelblich-braunes, ungeschichtetes und äolisch abgelagertes feinstkörniges Lockersediment mit Vorherrschaft der Korngröße Schluff. Löss hat ein gutes Wasserhaltevermögen, ist kalk- und mineralreich. Böden auf Löss sind damit tiefgründig, fruchtbar und leicht bearbeitbar (Leser 1997).

3.2). Da in diesen Gebieten hohe Koeffizienten nicht nur durch Schneeschmelze sondern auch pluvial entstehen, spricht man von nivo-pluvialen Regimen.

Bei Elz, Glatt, Kinzig, Rems und Pfinz tritt das Maximum bereits ein bis zwei Monate früher auf. Der pluviale Einfluss in diesen Gebieten zeigt sich deutlicher. Lediglich die Rems erreicht dabei ähnlich hohe Koeffizienten wie Dreisam, Breg und Wiese. Die Rems ist mit über zehn Prozent stark versiegelt.

Wiese, Dreisam, Elz, Breg und Murg weisen keine Variabilität in den Monaten Dezember bis Februar auf. Hier ist der Pardé-Koeffizient auf hohem Niveau (um 1,3) konstant. Elz und Murg haben keinen eindeutigen Peak. Während das Regime der Elz im Monat März einen Peak noch andeutet, ist ein solcher für das Einzugsgebiet der Murg nicht zu erkennen.

In den Einzugsgebieten von Glatt und Kinzig treten zwischen Dezember und Februar die höchsten Pardé-Koeffizienten auf; beide Gebiete weisen im Monat Mai bereits die niedrigsten Werte auf. Sie werden folglich von einer großen Variabilität geprägt. Beides sind hoch gelegene Einzugsgebiete, wobei die maximale Höhe 850 Meter über NN nicht übersteigt (vgl. Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Verschiedene Höhen- und Gefälleangaben der untersuchten Gebiete (Höhe_mean, Höhe_min, Höhe_max, Slope_mean und Gewässergefälle) sowie MHQ und der Gebietsniederschlag (Datenquelle: IHF 2000)

	Höhe_mean [m ü. NN]	Höhe_min [m ü. NN]	Höhe_max [m ü. NN]	Slope_mean [%]	Gew_Gef	MHQ_Gem [m³s]	Geb_N [mm]
Wiese	898,74	423,60	1485,50	18,08	1,6	88,1	1720
Dreisam	778,29	316,20	1495,10	15,84	2,2	58,4	1380
Elz	706,89	286,00	1225,30	16,06	1,5	96,1	1450
Breg	965,69	733,80	1150,40	11,35	0,9	51,2	1440
Kinzig	636,57	364,90	840,90	10,69	1,7	33,5	1350
Glatt	648,28	428,10	846,00	6,10	0,9	85,4	1240
Murg	658,27	135,70	1160,30	14,73	0,9	260,8	1510
Pfinz	268,22	124,60	534,30	5,30	0,7	30,9	900
Rems	426,84	246,50	795,60	7,53	0,4	113,0	938
Seckach	337,87	208,30	459,90	5,24	0,5	38,7	804

Die mittlere Höhe der Einzugsgebiete schwankt zwischen 337 und 965 Meter über NN. Bei den Gebieten im Schwarzwald liegen die mittlere sowie die maximale Höhe der Einzugsgebiete extrem hoch. Die minimale Höhe, also die Höhe am Pegel, ist allgemein recht niedrig, da sieben der zehn Gebiete direkt dem Rhein tributär sind. Das Gewässergefälle zeichnet die Höhenverhältnisse der Gebiete nach. Der mittlere Hochwasserabfluss ist neben der Einzugsgebietsgröße insbesondere von der Höhenlage der Gebiete abhängig. So kann der mittlere Abfluss (MQ) eines Gebiets nach dessen Region abgeschätzt werden (Baumgartner & Liebscher 1996): In der norddeutschen Tiefebene sind demnach mittlere Abflüsse von 200 bis 250 Millimeter pro Jahr typisch, während in Mittelgebirgen wie dem Schwarzwald 300 bis 1200 Millimeter pro Jahr erwartet werden können.

Der Gebietsniederschlag fällt lediglich in drei Gebieten unter 1000 Millimeter. Es handelt sich dabei um die Einzugsgebiete von Rems, Seckach und Pfinz; um die Gebiete also, die nicht im Schwarzwald liegen. Entspringt die Pfinz noch im Nordschwarzwald – ihre höchste Erhebung liegt auf gut 500 Meter, so ist ihr Einzugsgebiet überwiegend von weiten Tälern geprägt.

Hinsichtlich der physiographischen Daten unterscheiden sich die Gebiete ebenfalls stark. Aus Tabelle 3.3 kann die Einzugsgebietsgröße abgelesen werden. Sie variiert zwischen 76 (für die Kinzig) und 465 km² für die Murg. Die Mehrzahl der Gebiete weisen eine Größe von 200 bis 260 km² auf. Es kann vermutet werden, dass kleinere Gebiete hinsichtlich der Abflussdynamik und damit auch hinsichtlich der Abflussbeschleunigung stärker reagieren.

Tab. 3.3: Fläche, Formfaktor nach Horton, Kreisförmigkeitsindex und Gewässernetzdichte der untersuchten Gebiete (Datenquelle: IHF 2000).

	Fläche [km ²]	FF_Horton [-]	KF_Index [-]	Gew.Dichte [km/km ²]
Wiese	206,25	0,39	0,53	1,31
Dreisam	257,56	0,71	0,56	1,44
Elz	302,86	0,72	0,40	1,34
Breg	163,62	0,45	0,55	1,08
Kinzig	76,04	0,39	0,39	0,96
Glatt	201,52	0,46	0,26	0,89
Murg	465,68	0,26	0,34	1,26
Pfinz	231,87	0,59	0,44	0,71
Rems	419,27	0,27	0,28	1,50
Seckach	213,15	0,47	0,38	0,88

Der Formfaktor nach Horton (FF_Horton) wächst mit zunehmender Kompaktheit des Einzugsgebiets. Er ist definiert als Quotient aus Einzugsgebietsfläche und dem Quadrat der Einzugsgebietslänge; er kann damit maximal den Wert eins erreichen. Wie auch der Kreisförmigkeitsindex nimmt er Einfluss auf die Abflusskonzentration. Auf den Kreisförmigkeitsindex wird in Kapitel 4.10 näher eingegangen (Formel 4.9).

Dagegen spiegelt die Gewässernetzdichte die geologischen und pedologischen Eigenschaften der Gebiete wider. Sie charakterisiert die Entwässerungsfähigkeit eines Gebiets. Eine Gewässernetzdichte zwischen 0,5 und 2,5 km/km² wird als gute Entwässerung angesprochen. Im Land Baden-Württemberg schwankt sie zwischen 0,2 (Schwäbische Alb) und 2,4 (Südschwarzwald). Je kleiner sie ist, desto durchlässiger ist der Untergrund. Im Falle der Seckach bildet Muschelkalk den Untergrund; da ihn jedoch Keuper und Lössschichten bedecken, ist die Gewässernetzdichte noch relativ hoch.

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Gebieten im Nord- und Südschwarzwald zu erkennen. Der Nordschwarzwald besteht überwiegend aus Buntsandstein, während im Südschwarzwald kristallines Grundgebirge mit Gneisen und Graniten vorherrscht; diese

bilden einen weniger durchlässigen Untergrund als der Buntsandstein. Es kann wenig Wasser versickern, was zu einer höheren Gewässernetzdichte führt.

Hinsichtlich der Landnutzung können sehr große Unterschiede festgestellt werden (Tabelle 3.4). In hoch gelegenen Einzugsgebieten mit starker Neigung gibt es naturgemäß wenige Siedlungen. Der Siedlungsanteil in den Einzugsgebieten von Breg, Wiese, Elz, Kinzig und Dreisam ist damit äußerst gering; in diesen Gebieten nimmt der Waldanteil über 60 Prozent der Einzugsgebietsfläche ein.

Tab. 3.4: Landnutzungsverteilung der untersuchten Einzugsgebiete in Prozent (Datengrundlage: IHF 2000).

	Siedlung	Acker	Grünland	Sonderk.	Wald	Brache	Feuchtpl.	Wasser
Wiese	1,94	1,18	18,68	3,16	62,84	11,97	0,22	0,01
Dreisam	3,05	4,27	20,77	3,09	61,08	7,59	0,09	0,06
Elz	1,72	2,25	16,01	3,56	71,63	4,60	0,21	0,03
Breg	2,88	0,47	9,61	2,30	73,79	10,32	0,61	0,02
Kinzig	3,67	4,97	20,65	4,19	64,96	1,53	0,00	0,02
Glatt	5,10	16,24	29,52	4,31	41,32	3,44	0,01	0,05
Murg	4,52	0,47	3,23	4,53	84,84	2,16	0,05	0,19
Pfinz	9,39	20,06	8,77	23,60	34,59	3,55	0,02	0,01
Rems	10,23	11,67	20,05	10,07	44,18	3,54	0,15	0,11
Seckach	4,45	42,51	11,86	5,66	30,01	5,48	0,01	0,02

Seckach, Rems und Pfinz – die drei Gebiete mit den niedrigsten Höhen – zeigen ein vollkommen anderes Bild. Die Rems ist zwar mit über zehn Prozent das am stärksten versiegelte Gebiet, sie hat mit über 40 Prozent aber noch einen sehr hohen Waldanteil. Auffallend sind große Grünlandflächen und insbesondere ein erheblicher Anteil an Sonderkulturen; hierzu gehören Weinbau und Obstplantagen.

3.3 Fazit

Das Einzugsgebiet des Schwarzbach ist 54,2 km² groß und liegt in Nordrhein-Westfalen. Es ist der hydrologischen Mesoskala zuzuordnen. Der Schwarzbach entspringt im Rheinischen Schiefergebirge, quert bei Ratingen die Mittelterrasse und mündet schließlich nördlich von Düsseldorf in den Rhein. Die wertvollen Böden werden zu 40 bis 55 Prozent ackerbaulich genutzt. Die Teilgebiete sind zu 15 bis 22 Prozent versiegelt.

Sein Quellgebiet liegt in verkarsteten Kalkvorkommen. Das Schiefergebirge besteht weitestgehend aus silikatischem Grundgebirge. Die Mittelterrasse bei Ratingen wird von weiten Sandgebieten geprägt.

Im Bergischen Land wird viel Wasser in Talsperrensystemen gesammelt. Grundwasservorkommen beschränken sich auf die Lockergesteine der Rheinischen Tiefebene.

Der Regionalisierungsansatz wurde anhand von zehn Einzugsgebieten in Baden-Württemberg entwickelt. Diese sind alle kleiner als 500 km², da in größeren Gebieten die hydraulischen Belastungen nur noch eine untergeordnete Rolle spielen.

Neun der zehn Gebiete sind dem Rhein tributär; lediglich die Breg ist als Quellfluss der Donau danubisch. Sieben der Gebiete liegen im Schwarzwald. Sie sind gekennzeichnet durch hoch gelegene Einzugsgebiete mit großem Gefälle und starken Niederschlägen. Das Relief bedingt den hohen Waldanteil der Gebiete (über 60 Prozent). Der Versiegelungsgrad ist eher gering. Die Gewässer weisen überwiegend nivo-pluviale Abflussregime auf.

Auffallend ist dabei ein deutlicher Unterschied der Einzugsgebietscharakteristika von Gebieten aus dem Nord- und Südschwarzwald. Der Buntsandstein im Nordschwarzwald ist durchlässiger als das Kristalline Grundgebirge im Südschwarzwald. Die Gewässernetzdichte ist hier um einiges größer. Darüber hinaus liegen die Gebiete höher.

Dahingegen liegen die Jahresniederschläge der Einzugsgebiete von Seckach, Rems und Pfinz unter 1000 Millimeter. Diese sind geprägt von Ackerbau, Grünland, hoher Versiegelung, und Sonderkulturflächen.

4 METHODIK DER SENSITIVITÄTSANALYSE

4.1 Datengrundlage

Datengrundlage für die Sensitivitätsanalysen waren Daten des Schwarzbacheinzugsgebiets in Nordrhein-Westfalen (siehe Kapitel 3.1). Diese wurden vom Bergisch-Rheinischen Wasserverband bereitgestellt. Hierbei handelte es sich um Abflussdaten, die mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM simuliert worden sind (vgl. Kapitel 2.3). Die simulierten Datenreihen lagen in sechsminütiger Auflösung sowohl für den Ist- wie auch für den potenziell naturnahen Zustand vor. Dabei wurden die einzelnen Teileinzugsgebiete getrennt betrachtet.

Der potenziell naturnahe Zustand ist definiert als ortsübliche Kulturlandschaft. Versiegelte Teilgebiete des Istzustandes wurden hierfür nach dem Nutzungsgrad der nichtversiegelten Flächen je Nutzungsart umgerechnet.

Die Gewässerabschnitte des Schwarzbach wurden vom Bergisch-Rheinischen Wasserverband durchnumeriert, so dass jedes Teilgebiet durch eine Nummer eindeutig gekennzeichnet ist. Betrachtet wurden Teileinzugsgebiete, die sich aufgrund ihrer Einzugsgebietscharakteristika unterscheiden. Die Wahl fiel hierbei auf das Quelleinzugsgebiet G1 mit einer Größe von 1,76 km² sowie das Gesamteinzugsgebiet des Schwarzbachs (G72) mit einer Größe von 54,19 km². Darüber hinaus wurden zwei weitere Teilgebiete betrachtet, die sich vor der Siedlung Ratingen befinden. Schönheitsmühle G29a (27,94 km²) wurde ausgewählt aufgrund seiner Lage kurz nach der Einmündung des relativ naturnahen Hasselbachs. Voisweg (G34) hat eine Größe von 31,32 km², ist also nur unwesentlich größer als G29a. Dieser Abschnitt ist jedoch von großen Entlastungsbauwerken geprägt. Für das Teilgebiet Voisweg wurde lediglich der aktuelle Zustand betrachtet, da der potenziell naturnahe Zustand nicht vorlag.

Zusätzlich konnte auf Landnutzungsdaten sowie die mittlere Höhe zurückgegriffen werden. Ferner waren die genauen Orte von Einleitungen bekannt (Gdi 2002).

Die Daten standen für die einzelnen Teilgebiete in unterschiedlich langen Zeitreihen zur Verfügung. Dabei war die 25-jährige Zeitreihe von 1972 bis 1997 fast immer vollständig vorhanden. Nach DVWK (1985) genügt es für die Stadtentwässerung Zeitreihen von zehn Jahren zu betrachten, da hier kleine Jährlichkeiten von Interesse sind. Aus diesem Grund beschränkten sich die Auswertungen auf die Zeitreihe von 1985 bis 1994.

4.2 Berechnung der Grenzkurven der Abflussbeschleunigung

Um die Auswirkungen von Regenwassereinleitungen zu betrachten, ist die *Abflussspende* am besten geeignet. Sie berücksichtigt die „Entwicklungen im Einzugsgebiet entsprechend der Fließgewässerentwicklung“ (Borchardt et al. 1998); damit konnten die Beschleunigungen verschiedener Skalen verglichen werden. In einem ersten Schritt wurden aus den vorliegenden Abflussganglinien die Abflussspenden ermittelt und in Abflussspendenklassen eingeteilt.

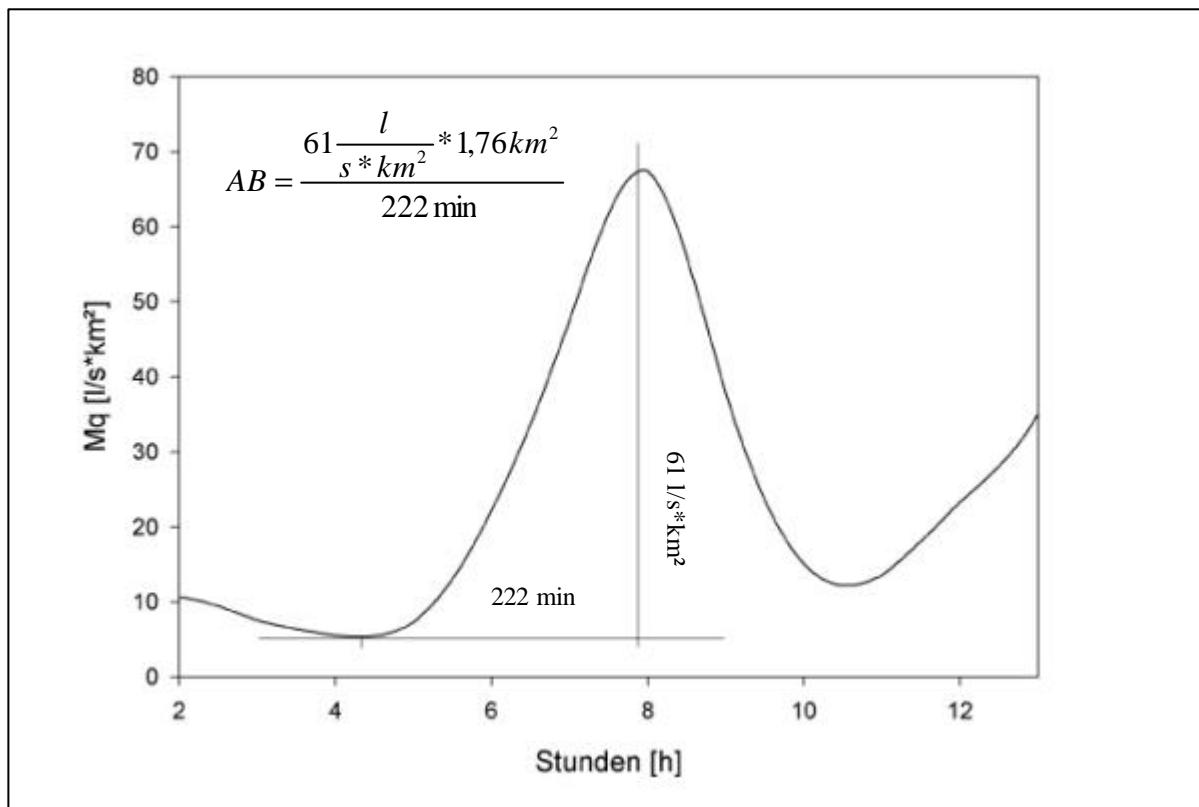


Abb. 4.1: Ermittlung der Abflussbeschleunigung aus einer Ganglinie am Beispiel eines Ereignisses vom 25.9.1993 im Quellgebiet des Schwarzbachs.

Die Beschleunigung ist die Abflussdifferenz pro Zeiteinheit und ergibt sich aus der Steigung der Abflussganglinie (Grottke et al. 2001b). Wie sie genau ermittelt wird, geht aus Abbildung 4.1 anhand eines Einzelereignisses hervor. Um eine Grenzfunktion ermitteln zu können, wurden den Steigungswerten [l/min²] die entsprechenden Abflussspendenklassen zugeordnet

(siehe Kapitel 4.3). Abbildung 4.1 zeigt, wie die Abflussbeschleunigung (AB) aus den Ganglinien gewonnen wurde.

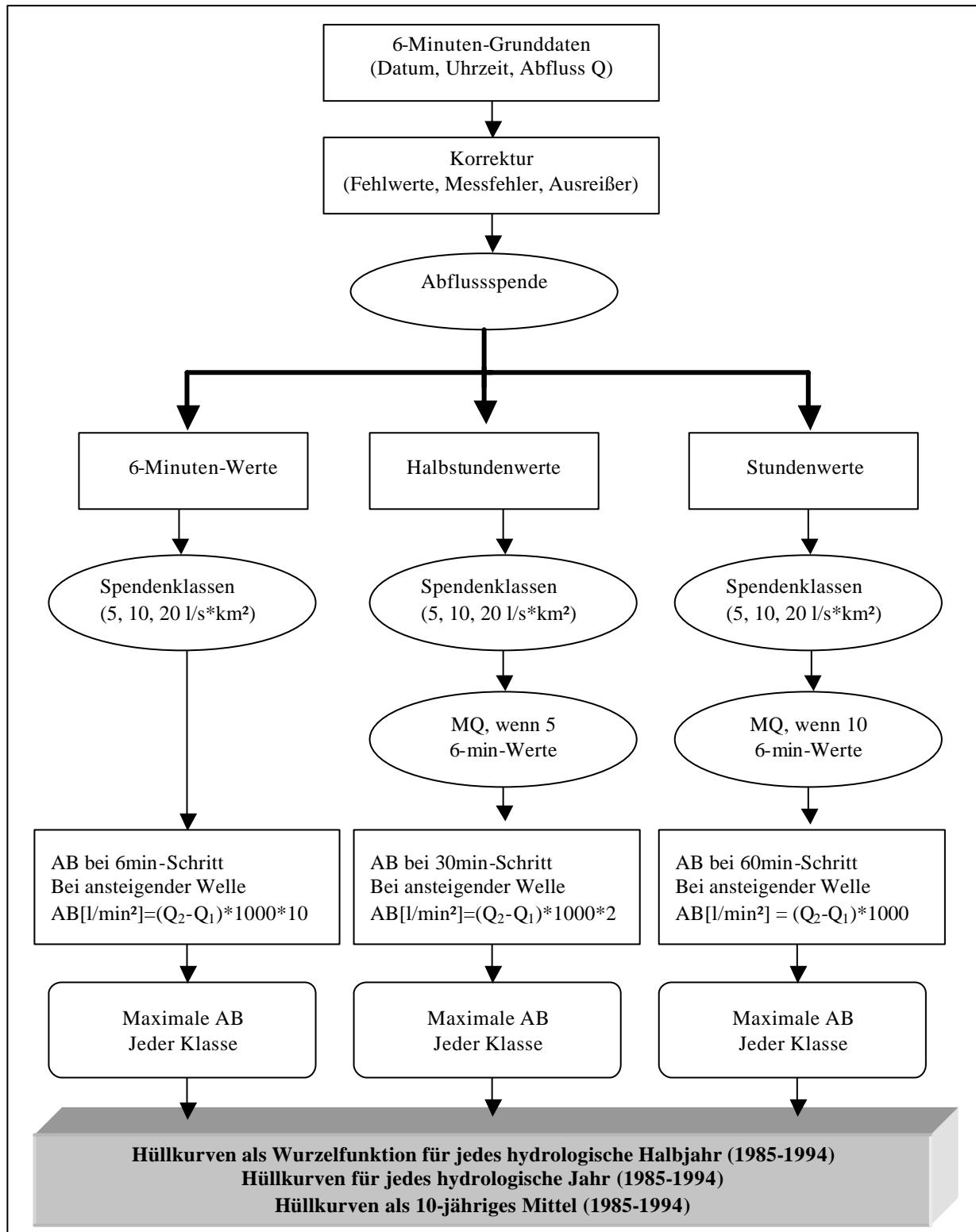


Abb. 4.2: Laufschema zur Berechnung der Hüllkurven. Dabei bedeutet AB: Abflussbeschleunigung [l/min^2], Q_2 : Abfluss zur Zeit 2 [m^3/s], Q_1 : Abfluss zur Zeit 1 [m^3/s].

Die Beschleunigungen wurden nur für positive Steigungen der Welle berechnet. Negative Werte (abfallender Ast der Ganglinie) und Nullsteigungen blieben unberücksichtigt. Innerhalb

der einzelnen Abflussspendenklassen wurde jeweils die Verteilung der Beschleunigungen bestimmt.

Aus den maximalen Beschleunigungen der einzelnen Klassen konnte dann die Beschleunigungsfunktion als maximale Grenzkurve ermittelt werden. Als Zielkurve der Abflussbeschleunigungsfunktion wurde eine Wurzelfunktion in der Form angenommen:

$$f(AB) = a * (q * A_{Eo})^{0,5} \quad (4.1)$$

AB Abflussbeschleunigung [l/min^2]

a Parameter der Grenzkurve [-]

q Abflussspende [$\text{l}/\text{s} * \text{km}^2$]

A_{Eo} Einzugsgebietsfläche [km^2]

Die Wurzelfunktion wurde gewählt, da sie der Abflussfunktion aus Behältern entspricht und damit ggf. leichter mit dem Auslauf aus Speicherbauwerken verglichen werden kann (Grottke et al. 2001b). Der Parameter a ergibt sich dabei aus folgendem Zusammenhang:

$$\sum_{Klassen}^{Klassen} \left(a * (q * A_{Eo})^{0,5} - MaxAB \right)^! = Minimum \quad (4.2)$$

MaxAB ist dabei die maximale Abflussbeschleunigung innerhalb der einzelnen Klassen.

Der Parameter a der kleinst möglichen Grenzkurve ergab sich so aus der Bedingung, dass die einzelnen Summanden aus Gleichung 4.2 immer einen Wert ≥ 0 annehmen müssen.

Um die Methodik zur Berechnung der Beschleunigungsfunktionen deutlich zu machen, ist sie in Abbildung 4.2 noch einmal schematisch dargestellt. Aus dieser Abbildung ist die unterschiedliche Vorgehensweise für die 6-minütigen sowie die aggregierten Daten zu ersehen. Auf die aggregierten Daten wird in Kapitel 4.5 genauer eingegangen.

Die einzelnen Schritte wurden für die Auswertung automatisiert. Hierdurch war es trotz der hohen Datenauflösung möglich, eine Periode von zehn Jahren zu betrachten. Wie bereits erwähnt genügt diese relativ kurze Zeitspanne, um Aussagen über Jährlichkeiten, Saisonalitäten und Wiederkehrintervalle in Stadtgebieten treffen zu können, da hier kleine Jährlichkeiten von Bedeutung sind (DVWK 1985).

4.3 Einfluss der Klassenbreite

Um Grenzkurven der Abflussbeschleunigung zu berechnen, müssen zunächst die Abflussspenden in Klassen eingeteilt werden. Die Breite der Klassen wurde dabei so gewählt,

dass genügend Klassen mit ansteigender Abflussbeschleunigung entstanden. Dies ist Voraussetzung für die Wahrscheinlichkeitsanalysen. Zur Berechnung von Jährlichkeiten sollten dabei mindestens fünf Klassen betrachtet werden können, in denen die Beschleunigungen zunehmen. Zu viele Klassen wiederum sollten ebenfalls vermieden werden. Sie ergeben lediglich unübersichtliche Ergebnisse. Ferner gibt es hierdurch nur wenige Werte pro Klasse, wodurch repräsentative Maximalwerte innerhalb der einzelnen Klassen nicht ermittelt werden können.

4.4 Vergleich verschiedener Landnutzungen

Da die simulierten Daten für das Einzugsgebiet des Schwarzbachs sowohl für den aktuellen wie auch für den potenziell naturnahen Zustand vorlagen, konnten die Beschleunigungsfunktionen für beide Zustände berechnet und miteinander verglichen werden.

Für den potenziell naturnahen Zustand wurden die versiegelten Flächen des Istzustandes prozentual auf die weiteren Nutzungen umgerechnet. Die unterschiedlichen Grenzkurven konnten schließlich anhand der Landnutzungsdaten der einzelnen Teilgebiete interpretiert werden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.2 dargestellt.

4.5 Einfluss der Datengenauigkeit

Die zugrunde liegenden Daten des Schwarzbachs lagen in sechsminütiger Auflösung vor. Diese Daten wurden zu Halbstunden- und Stundenwerten aggregiert, um den Einfluss der Datengenauigkeit beurteilen zu können. Die Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 6.3 beschrieben.

Die Vorgehensweise zu dieser Untersuchung zeigt Abbildung 4.2. Aus den hoch aufgelösten Daten wurden zunächst die mittleren Abflüsse über 30 und 60 Minuten berechnet. Bei den Halbstundenwerten ergaben sie sich aus den Sechs-Minuten-Werten 00 bis 24 bzw. 30 bis 54 jeder Stunde. Die mittleren Stundenabflüsse wurden respektive aus den Sechs-Minuten-Werten 00 bis 54 gebildet.

Die Halbstunden- und Stundenwerte wurden jeweils nur dann gebildet, wenn die simulierten Sechs-Minuten-Werte über die volle Zeit vorlagen. Das bedeutet, dass für die Halbstundenwerte ein Mittelwert aus fünf Werten, für die Stundenwerte ein Mittelwert aus zehn Werten gebildet wurde. Gab es bei den hoch aufgelösten Werten Datenlücken, so entstand

ebenfalls eine Lücke bei den Halbstunden- beziehungsweise Stundenwerten. Dies sichert die Vergleichbarkeit der Daten.

Den gemittelten Abflüssen wurden analog zu den Sechs-Minuten-Werten ebenfalls Abflussspenden und Abflussspendenklassen zugeordnet. Schließlich wurden die Abflussbeschleunigungen bestimmt. Diese wurden innerhalb der Klassen der Größe nach sortiert - aus den maximal auftretenden Werten konnten so die Beschleunigungsfunktionen ermittelt werden (siehe Kapitel 4.2).

Da in vielen Einzugsgebieten gemessene Abflussdaten in Stundenauflösung vorliegen, wurde versucht, einen *Kalibrierungsfaktor* zu ermitteln. Mit seiner Hilfe sollen Funktionen höherer Auflösung abgeleitet werden. Hierfür wurden die berechneten Funktionen verschiedener Datengenauigkeiten miteinander verglichen. Der Vergleich erfolgte einerseits direkt über den Parameter a , den einzigen zu bestimmenden Parameter einer Wurzelfunktion. Andererseits wurde versucht, die erhaltenen Grenzkurven der sechsmintütigen Werte als Jährlichkeiten der Stundenwerte auszudrücken.

4.6 Saisonalitätsunterschiede

Bei der Berechnung der Grenzkurven wurden die Daten getrennt nach hydrologischem Sommer- und Winterhalbjahr betrachtet, um den Einfluss der Saisonalität untersuchen zu können. Die Saisonalität beschreibt, wann überwiegend mit dem Auftreten von Extremereignissen zu rechnen ist.

Zunächst wurden die Grenzkurven der Abflussbeschleunigung sowohl für das ganze hydrologische Jahr, wie auch für die Sommer- und Winterhalbjahre gesondert bestimmt und miteinander verglichen (siehe Kapitel 6.4).

Ferner wurden die relativen Häufigkeiten ermittelt, mit denen die maximale Beschleunigung in den einzelnen Monaten auftritt. Dies bringt einen Überblick über den zeitlichen Verlauf des Auftretens der maximalen Abflussbeschleunigungen. Dabei wurde zunächst das Datum der Jahreshöchstwerte bestimmt. Auf dieser Basis wurde die relative Auftretenshäufigkeit des Jahresmaximums für jeden Monat berechnet (Michaud et al. 2001).

Der Modalwert ist der dichteste Wert einer Verteilung, also der Monat, in dem das Jahresmaximum am häufigsten auftritt. Er wurde bestimmt, um die Gebiete untereinander besser vergleichen zu können. Neben unimodalen (eingipfligen) können auch multimodale (mehrgipflige) Verteilungen auftreten. An die Verteilung wurde eine Gaußverteilung angepasst, um die Güte der Anpassung empirisch zu überprüfen.

4.7 Wahrscheinlichkeitsanalysen

Um den ökologischen Zustand eines Gewässers zu bewerten, wurde die maximal auftretende Abflussbeschleunigung im natürlichen Gewässer betrachtet. Hierbei stellte sich jedoch die Frage der *Jährlichkeit*. Unter Jährlichkeit versteht man die mittlere Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Überschreitungen einer bestimmten Beschleunigung (Koppe 2001). Damit Jährlichkeiten eindeutig bestimmt werden können, sind äußerst lange Zeitreihen notwendig. Allgemein gilt, dass zehnmal längere Zeitreihen vorliegen müssen, als es der zu betrachtenden Jährlichkeit entspricht (Klemens 1987). Dies war trotz der kleinen Jährlichkeiten, die bei der Stadtentwässerung von Bedeutung sind, nicht gegeben.

Um dennoch Aussagen über Ereignisse solcher Jährlichkeiten treffen zu können, werden auf Basis der vorhandenen Daten Modelle erstellt. Diese *theoretischen Verteilungsfunktionen* werden an die empirischen angepasst. Als Grundlage dienen dabei jährliche oder partielle Serien. Jährliche Serien setzen sich zusammen aus den maximalen Werten eines jeden Jahres. Bei partiellen Serien werden die x höchsten Werte einer vorhandenen Zeitreihe ermittelt. Um die Voraussetzungen der Extremwertstatistik zu erfüllen, sollte die Anzahl der Ereignisse das Zwei- bis Dreifache der Beobachtungsjahre nicht übersteigen (DVWK 1985). In diesem Fall ergaben sich die partiellen Serien also aus den 30 größten Werten im Untersuchungszeitraum. Die Unabhängigkeit der Werte wird dadurch garantiert, dass jeweils nur ein Wert pro Kalendertag zugelassen wird (DVWK 1999).

Jährliche Serien sollten dann verwendet werden, wenn Zeitreihen von über 20 Jahren vorliegen und Wiederkehrzeiten von fünf Jahren und mehr gesucht werden. Ansonsten sind partielle Serien vorzuziehen (DVWK 1985, DVWK 1999). Mit Blick auf die zeitlichen Dimensionen der Stadtentwässerung wurde mit partiellen Serien gearbeitet. Dies galt nicht nur für die Jährlichkeiten der Abflussbeschleunigungen, sondern auch für diejenigen der Hochwasserabflüsse. Bei letzteren werden in der Literatur jährliche Serien in Zusammenhang mit der Gumbelverteilung als bester Anpassung hervorgehoben (Dyck & Peschke 1995, Koppe 2001, DVWK 1999); bei Wiederkehrzeiten von Hochwasserabflüssen kommt es jedoch im Normalfall auf große Jährlichkeiten an. In diesem Fall konnten also ohne Bedenken partielle Serien verwendet werden.

Für partielle Serien wird als theoretische Verteilungsfunktion die Exponentialfunktion empfohlen. Um sie zu ermitteln, wurde nach DVWK (1985) vorgegangen. Die Exponentialfunktion wurde in folgender Form verwendet:

$$AB(T_n) = u_p * w_p * \ln T_n \quad (4.3)$$

AB Abflussbeschleunigung [l/min^2]

T_n Wiederkehrzeit [a]

u_p, w_p Parameter der Verteilungsfunktion [-]

Halblogarithmisch aufgetragen mit AB in der Ordinate und $\ln T_n$ in der Abszisse ergibt sich eine Gerade. Der Parameter u_p stellt den Achsenabschnitt auf der Ordinate für $T_n = 0$ dar; w_p ist die Steigung der Geraden.

Nachdem die Werte der partiellen Serie der Größe nach geordnet waren, konnten geschätzte Wiederkehrzeiten T_{nk} ermittelt werden:

$$T_{nk} = \frac{L + 0,2}{k - 0,4} * \frac{M}{L} \quad (4.4)$$

M Länge der Messreihe [a]

L Stichprobenumfang [-]

k Laufindex der Stichprobenwerte der Größe nach geordnet

$k=1$ größter Wert, $k=L$ kleinster Wert der Stichprobe [-]

Aus diesen geschätzten Wiederkehrzeiten wurden die Parameter der Ausgleichsgeraden über eine lineare Regression bestimmt mit:

$$w_p = \frac{\sum_{k=1}^L (AB_{nk} * \ln T_{nk}) - L * \overline{AB}_N * \overline{\ln T_n}}{\sum_{k=1}^L (\ln T_{nk})^2 - L * \overline{\ln T_n}^2} \quad (4.5)$$

$$u_p = \overline{AB}_N - w_p * \overline{\ln T_n} \quad (4.6)$$

\overline{AB} beziehungsweise $\overline{\ln T_n}$ sind die arithmetischen Mittel der Abflussbeschleunigung beziehungsweise der logarithmischen Wiederkehrzeiten.

Zunächst wurden Hüllkurven verschiedener Jährlichkeiten der betrachteten Teilgebiete berechnet. Sie ergaben sich analog der Methode aus Kapitel 4.2. Datengrundlage bildeten hier jedoch die Jährlichkeiten innerhalb der einzelnen Abflussspendenklassen. An diese Jährlichkeiten wurde eine Wurzelfunktion als Hüllkurve angepasst. Die Parameter a ergaben sich so für jede betrachtete Jährlichkeit.

Das Augenmerk war hierbei auf kleine Jährlichkeiten von einem halben bis zu zehn Jahre gerichtet. Noch kleinere Wiederkehrzeiten konnten nicht mehr ermittelt werden – die Voraussetzungen der Extremwertstatistik ließen dies nicht zu. Die Hüllkurven der Wiederkehrzeiten von 0,5, 1, 1,5, 2, 5 und 10 Jahren wurden miteinander verglichen; sie konnten dabei auch in Relation zur Gesamtkurve gebracht werden (vgl. Abb. 6.8, Kapitel 6.5.2). Bei diesen Untersuchungen ging es primär um die Frage, die Beschleunigung welcher Jährlichkeit als Zielgröße am besten geeignet ist.

Außerdem konnten, wie in Kapitel 4.5 bereits beschrieben, die Jährlichkeiten auch in die Ermittlung von Kalibrierungsfaktoren mit einbezogen werden.

Ferner wurden die Jährlichkeiten dazu herangezogen, die Abflussbeschleunigungen mit verschiedenen Einzugsgebietscharakteristika zu korrelieren; schließlich sollte die Regionalisierung der Beschleunigung als Zielgröße über die Jährlichkeit erfolgen. Die Korrelations- und Regressionsanalysen wurden an Einzugsgebieten in Baden-Württemberg vorgenommen (siehe Kapitel 5). Hierzu wurde eine feste Größe benötigt, die mit den verschiedenen Einzugsgebietscharakteristika korreliert werden konnte. Die Wahl fiel sowohl auf das Verhältnis:

$$\frac{AB2}{AB1} - 1 , \quad (4.7)$$

wie auch auf AB1 und AB2 selbst.

AB1 und AB2 beziehen sich auf die Abflussbeschleunigungen mit einer Wiederkehrzeit von einem beziehungsweise zwei Jahren.

Um die Sensitivität dieser Größe zu überprüfen, wurde sie ebenfalls für die Teilgebiete des Schwarzbachs ermittelt. Zur Berechnung dieses Verhältnisses wurden die aus den Hüllkurven berechneten Jährlichkeiten herangezogen; damit ergab sich innerhalb aller Abflussspendenklassen dieselbe Verhältniszahl.

Über diese Bezugsgröße war ebenfalls ein Vergleich mit dem Hochwasserabfluss HQ als Zielgröße möglich. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde auf das Verhältnis von zwei- zu einjährlichem Hochwasserabfluss zurückgegriffen:

$$\frac{HQ2}{HQ1} - 1 . \quad (4.8)$$

Darüber hinaus wurde der Zusammenhang zwischen der zweijährlichen Beschleunigung und dem zweijährlichen Hochwasserabfluss berechnet (Kapitel 7.1.1). Hierfür mussten also die Wiederkehrzeiten auch für die Hochwasserabflüsse ermittelt werden. Wie oben bereits erwähnt, wurde auch hier aufgrund der kleinen Jährlichkeiten und der kurzen betrachteten Zeitreihe mit partiellen Serien und der Exponentialfunktion als theoretischer Anpassungsfunktion gearbeitet. Die Methodik ist die selbe wie für die Abflussbeschleunigung. Auf die Unterteilung in Spendenklassen konnte in diesem Fall jedoch verzichtet werden, weil alle Klassen gleichermaßen in die Berechnung der Jährlichkeiten eingingen.

Der Vergleich der beiden Zielgrößen erfolgte über eine Korrelationsanalyse. Auf diese wird in Kapitel 5.2 näher eingegangen. Dabei soll die Frage geklärt werden, inwieweit die

Abflussbeschleunigung eine eigene Aussagekraft hat und damit als zusätzliche Zielgröße neben dem Hochwasserabfluss eine Berechtigung findet.

4.8 Skalenabhängigkeit

Dass die Skale einen Einfluss auf die Abflussbeschleunigung hat, ist leicht ersichtlich. Mit zunehmender Einzugsgebietsfläche nehmen die spezifischen Hq_x -Werte ab. Dies ist ein in der Hydrologie schon länger bekanntes Phänomen, das unter anderem durch die zunehmende Verweilzeit des Wassers im Einzugsgebiet erklärt werden kann. Die stärkere Retention in einem größeren Einzugsgebiet führt zudem zu einer Abflachung der Abflusswellen. Die spezifischen Abflusswerte wie beispielsweise die Abflussbeschleunigung sind somit also nicht skalenunabhängig.

In dieser Arbeit wurden im Istzustand vier verschiedene Teileinzugsgebiete des Schwarzbachs untersucht (vgl. Kapitel 4.1.1), im naturnahen Zustand waren es drei. Für jedes Teilgebiet wurde die Grenzkurve ermittelt. Durch einen Vergleich der Gebiete konnte so die Skalenabhängigkeit der Abflussbeschleunigung betrachtet werden (Kapitel 6.6).

Dies ist insofern wichtig, als in dieser Studie eine Regionalisierung der Abflussbeschleunigung als Zielgröße durchgeführt werden soll. Einzugsgebietsmerkmale sollen dabei die Größe der Beschleunigung bestimmen. Um einen solchen Zusammenhang herzustellen, ist eine Skalenbetrachtung notwendig.

4.9 Variabilität der Abflussbeschleunigung

Ein weiteres, ökologisch bedeutendes Charakteristikum der Abflussdynamik in Fließgewässern stellt die Variabilität der Abflüsse dar (Poff et al. 1997, Leibundgut 1996). Insbesondere diese Größe wird anthropogen beeinflusst. Aus allen Beschleunigungen Mittelwert und Standardabweichung zu bilden führt zu keinem sinnvollen Ergebnis. Die hohe Anzahl der äußerst niedrigen Beschleunigungen würde dieses Ergebnis zu sehr bestimmen.

Sinnvoller ist es, das Verhalten der monatlichen Maximalwerte in ihrer Variabilität zu betrachten. Hierfür müssen zunächst diese monatlichen Maximalwerte ermittelt werden. Sie konnten aus den Grunddaten zur Berechnung der Grenzkurven auf einfache Weise gewonnen werden.

Aus diesen Werten werden Mittelwert und Standardabweichung innerhalb jeden Monats ermittelt und verglichen. Es ergibt sich somit ein Bild darüber, in welchen Monaten allgemein

die größten Beschleunigungen zu erwarten waren. Über die Standardabweichung konnte ferner die Variabilität der drei untersuchten Teilgebiete verglichen werden (siehe Kapitel 6.7).

Eine graphische Darstellung veranschaulicht die Variabilität der Abflussbeschleunigung. Dabei ist ein Vergleich der naturnahen mit den anthropogen beeinflussten Werten möglich (siehe Abb.6.10).

4.10 Reaktionsbereitschaft der vier Teilgebiete

Um die Prozesse zu verstehen, die die hohen Beschleunigungen verantworten, sollen die vier Teilgebiete hinsichtlich ihrer Reaktionsbereitschaft untersucht werden. Dies geschieht anhand der Abflussganglinien eines extremen Einzelereignisses (siehe Abb. 6.11 und 6.12, Kapitel 6.8).

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Niederschlagsereignis in allen Teilgebieten des Schwarzbachs zu einem spürbaren Anstieg der Abflussganglinie führt und damit auch die Abflussbeschleunigungen beeinflusst. Für die Reaktionsfähigkeit der Gebiete sind verschiedene Faktoren verantwortlich:

- Ereignischarakteristika wie die Zugrichtung einer Niederschlagszelle über das Gesamtgebiet
- Einzugsgebietseigenschaften (Geologie, Morphologie, Pedologie beeinflussen die Speicherfähigkeit und damit die Abflusskonzentration)

Da es sich um einen Vergleich simulierter Daten handelt, konnten Ereignisfaktoren nicht berücksichtigt werden.

Grunddaten zu Geometrie und Lage von Einzugsgebieten bestimmen das Abflussverhalten maßgeblich. Hierzu gehören Kennwerte wie Einzugsgebietsfläche, Einzugsgebietslänge und der Kreisförmigkeitsindex. Der Kreisförmigkeitsindex ergibt sich aus folgendem Zusammenhang:

$$R_k = \frac{A_{Eo}}{A_K(U_E)} = 4 * p * \frac{A_{Eo}}{U_E} \quad (4.9)$$

- | | |
|----------|--|
| A_{Eo} | Einzugsgebietsfläche [km^2] |
| U_E | Einzugsgebietsumfang [km] |
| A_K | Fläche eines Kreises [km^2] |

Er bestimmt die Abflusskennwerte dahingehend, dass Niederschlagswasser in kreisförmigen Einzugsgebieten zeitgleicher am Pegel eintrifft und die Hochwasserwellen damit höher

ausfallen, als dies in langgestreckten Einzugsgebieten zu erwarten wäre. Die Konzentrationszeit wird dadurch erheblich verkürzt.

Neben der Größe des Anstiegs in den einzelnen Teilgebieten wurde auch die zeitliche Verzögerung im Auftreten der Beschleunigungspeaks verglichen.

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bietet der mittlere Abfluss der Teilgebiete. Da er nicht in Form einer hydrologischen Hauptzahl vorlag, wurde er in dieser Studie aus den vorliegenden Daten der zehn Jahre berechnet. Diese Stichprobe war dabei sicherlich nicht repräsentativ. Da jedoch für alle Teilgebiete die gleichen zehn Jahre zu Grunde lagen, konnte auf dieser Basis ein Vergleich der Gebiete untereinander stattfinden. Damit sollte beispielsweise quantifiziert werden, wie viel Wasser die einzelnen Zuflüsse des Schwarzbachs einbringen.

4.11 Fazit

Inwieweit die Abflussbeschleunigung auf bestimmte Bedingungen sensitiv reagiert wurde anhand des Schwarzbachgebiets in Nordrhein-Westfalen untersucht. Hier lagen simulierte Daten in sechsminütiger Auflösung für den Ist- und den potenziell naturnahen Zustand vor. Vier unterschiedliche Teilgebiete konnten dabei getrennt betrachtet und verglichen werden. Es wurden Daten der Zehn-Jahres Periode von 1985-1994 ausgewertet.

Die Abflussbeschleunigung entspricht der Steigung der Abflussganglinie. Um verschiedene Gebiete vergleichen zu können, wurde mit Abflussspenden gerechnet. Die Grenzkurven wurden dabei als Wurzelfunktionen definiert; um sie zu erstellen, wurden die Abflussspenden in Klassen eingeteilt, in denen die Beschleunigungsverteilung festgestellt wurde.

Nachdem der Einfluss der gewählten Klassenbreite untersucht wurde, wurde der Einfluss verschiedener Landnutzungen betrachtet. Dafür wurde der Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand verglichen. Ein Vergleich der Datengenauigkeit erfolgte anhand von Datenaggregierung der hochaufgelösten sechsminütigen Daten.

Saisonalitätsuntersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, wann die größten Beschleunigungen auftreten. Für die Wahrscheinlichkeitsanalysen wurden als theoretische Verteilungsfunktionen die Exponentialfunktion an die empirisch erhobenen Daten angepasst. Dabei wurde mit partiellen Serien gerechnet. Das Schwergewicht lag auf kleinen Jährlichkeiten. Darüber sollte auch der Vergleich der Zielgrößen Abflussbeschleunigung und Hochwasserabfluss stattfinden.

Um den Einfluss der Skale zu betrachten, wurden die vier Teilgebiete verglichen. Die Variabilitätsanalyse erfolgte anhand der Monatsmaxima der einzelnen Gebiete im Vergleich

des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand. Anhand eines Einzelereignisses konnte schließlich die Reaktionsbereitschaft der Gebiete betrachtet werden. Dabei konnte aufgezeigt werden, wie sich verschiedene Einzugsgebietscharakteristika auf die Abflussdynamik auswirken. Die Einzugsgebietscharakteristika bildeten die Grundlage für einen Regionalisierungsansatz.

5 GRUNDLAGEN DER REGIONALISIERUNG

5.1 Einführung

Für viele Einzugsgebiete gibt es keine oder nur unzureichende Abflussmessungen. Da auch für solche Gebiete die Beschleunigung als Zielgröße fungieren soll, muss ihre Größe zumindest abgeschätzt werden können. Dies ist mit Hilfe der Methoden der Regionalisierung möglich. Dabei soll aus den Abflussdaten gemessener Gebiete und deren Einzugsgebietskenngrößen auf die Beschleunigungen von unbeobachteten Gebieten geschlossen werden. Statistische Verfahren dienen dazu, geeignete mathematische Funktionen für die Regionalisierung zu ermitteln. Ein Ziel dieser Arbeit war es, eine Übertragungsfunktion zu finden, um die Abflussbeschleunigung als Funktion von Einzugsgebietsparametern darzustellen:

$$\text{Abflussbeschleunigung} = f(\text{Einzugsgebietsparameter})$$

Unter Regionalisierung versteht Kleeberg (1999) die „Ausweisung (Ausgliederung) einer Region mit ähnlichen hydrologischen Regimen“. Dabei können verschiedene hydrologische Komponenten, wie die Grundwasserneubildung, Abflussmenge über die Zeit oder jahreszeitliche Abflussschwankungen betrachtet werden.

Schwentker & Streit (1983) definieren Regionalisierung als regionale Übertragung. Sie verstehen darunter das Anwenden hydrologischer Modelle auf Gebiete, für die sie wegen fehlender Daten nicht kalibriert sind. Die Übertragung erfolgt hierbei indirekt über gebietsspezifische Charakteristika.

Diese Definition wurde von Becker (1992) dahingehend erweitert, dass neben der räumlichen Übertragung auch die flächenhafte Interpolation von Punktdaten zu berücksichtigen sei. Demnach ist die Regionalisierung „die regionale Übertragung oder flächenmäßige Verallgemeinerung (Generalisierung) einer Größe oder einer Funktion (eines Modells) beziehungsweise der Parameter der Funktion (dieses Modells)“.

Unter Berücksichtigung der Skale unterscheidet Becker dabei drei Haupttypen:

Typ A: Bestimmung der flächenmäßigen Verteilung einer Größe mit oder ohne Anwendung geeigneter Übertragungsfunktionen (Generalisierung, Verallgemeinerung).

Typ B: Flächenmäßige Aggregierung beziehungsweise Integration von lokalen, elementar- oder teilflächenbezogenen Informationen.

Typ C: Flächenmäßige Disaggregierung beziehungsweise Differenzierung von größerflächig vorliegenden Informationen auf Teilflächen (Rasterflächen, Elementarflächen).

Die Regionalisierung erfolgte in dieser Arbeit mittels Korrelation und multipler Regression. Diese sind nach Becker dem Typ B zuzuordnen.

5.2 Korrelationsanalysen

5.2.1 Korrelation der Abflussbeschleunigung mit Einzugsgebietsparametern

Einführung

In der Arbeit war eine Regionalisierung der Abflussbeschleunigung als abiotischer Zielgröße angestrebt; sie sollte in Abhängigkeit von Einzugsgebietscharakteristika dargestellt werden. Dafür wurden zunächst Korrelationsanalysen durchgeführt. Eine Korrelation beschreibt den Zusammenhang zwischen zwei Variablen. Wie bei jedem bivariaten Zusammenhangsmaß basiert die Berechnung auf Wertepaaren, die aus den Stichproben gebildet werden.

Der Korrelationskoeffizient r gibt die Stärke des Zusammenhangs an. Er liegt zwischen -1 und $+1$, wobei ein Betrag nahe 1 einen starken und ein Betrag nahe 0 einen schwachen Zusammenhang bedeutet.

Ist der Korrelationskoeffizient negativ, zeigt dies einen gegenläufigen Zusammenhang: je größer der Wert der einen Variablen wird, desto kleiner wird der Wert der anderen. Über die Interpretation der Stärke des Zusammenhangs gibt Tab. 5.1 Auskunft. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet sich aus (Bühl & Zöfel 2000):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{(n - 1) * s_x * s_y} \quad (5.1)$$

Dabei sind x_i und y_i die Werte der beiden Variablen, \bar{x} und \bar{y} die dazugehörigen Mittelwerte und s_x und s_y die Standardabweichungen; n ist die Anzahl der Wertepaare.

Anwendung

Zunächst wurden die Zusammenhänge zwischen allen Variablen betrachtet. Neben den zahlreichen Einzugsgebiets- und Ereignischarakteristika wurden die berechneten Beschleunigungen berücksichtigt. Dafür standen die ein- und zweijährlichen Abflussbeschleunigungen sowie das Beschleunigungsverhältnis zur Verfügung (siehe Kapitel 4.7). Die Ergebnisse sind in Kapitel 7.1.1 beschrieben. Aus der Korrelationsmatrix (siehe Tab. B1 des Anhangs) konnten diejenigen Parameter bestimmt werden, die bestmöglich mit der Abflussbeschleunigung korrelieren. Die Korrelationsanalysen bilden die Grundlage für die multiple lineare Regressionsanalyse. Durch sie können Aussagen über Interkorrelationen der einzelnen unabhängigen Variablen getroffen werden.

5.2.2 Vergleich der Zielgrößen Abflussbeschleunigung und Hochwasserabfluss

Inwieweit die Abflussbeschleunigung mit dem Hochwasserabfluss korreliert, geht ebenfalls aus Korrelationsanalysen hervor. Der Hochwasserabfluss wird in der Literatur häufig als hydrologische Zielgröße zur ökologischen Bewertung von Fließgewässern herangezogen. Die Korrelationsanalysen sollen zeigen, wie sehr sich die beiden Zielgrößen beeinflussen und ob aus der Abflussbeschleunigung neue Impulse gewonnen werden können.

Es sollte der unmittelbare kausale Zusammenhang zwischen den beiden Variablen bestimmt werden. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beschreibt diese Beziehung jedoch nur unzureichend. Es ist vielmehr möglich, dass Störvariablen^{5.1} eine Scheinkorrelation vortäuschen. Die Möglichkeit des Ausschlusses einer solchen Störvariablen bietet die Berechnung der sogenannten *partiellen Korrelation*. Für den partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen der Beschleunigung und dem Hochwasserabfluss gilt (Bühl & Zöfel 2000):

$$r_{ABHQX} = \frac{r_{ABHQ} - r_{ABX} * r_{HQX}}{\sqrt{(1 - r_{ABX})^2 * (1 - r_{HQX})^2}} \quad (5.2)$$

AB Abflussbeschleunigung

HQ Hochwasserabfluss

r_{ABHQX} partieller Korrelationskoeffizient

r_{ABX} Korrelationskoeffizient zwischen AB und der Störvariablen

r_{HQX} Korrelationskoeffizient zwischen HQ und der Störvariablen

Über partielle Korrelationsanalysen konnte so der Zusammenhang zwischen AB und HQ auf seine Signifikanz untersucht werden (siehe Kapitel 7.1.1).

^{5.1} Variablen, die einen Zusammenhang von zwei anderen Variablen vortäuschen. Sie korrelieren signifikant mit den beiden untersuchten Variablen (Bühl & Zöfel 2000).

5.3 Grundlagen der multiplen linearen Regressionsanalyse

Übertragungsmodelle lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen. Zu der ersten Gruppe gehören die komplexen mathematischen Modelle. Diese haben zum Ziel, das Wechselspiel zwischen Einzugsgebietsgrößen und hydrologischen Prozessen über mathematische Gleichungen zu beschreiben. Dabei können zahlreiche unterschiedliche theoretische Konzepte zugrunde liegen. Die zweite Gruppe bilden die statistischen Methoden und hier besonders die Methoden der multivariaten statistischen Verfahren. Zu diesen zählen auch die multiple lineare Regressionsanalyse.

Für die Regionalisierung von Abflusskenngrößen wird in der Hydrologie häufig die multiple Regression verwendet. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt vor allem in der Direktheit, Objektivität und der einfachen Handhabung (Demuth 1993, Holder 1985). Die multiple Regression analysiert die Beziehungen zwischen einer abhängigen Variablen Y, den sogenannten Zielvariablen, und einer oder mehreren unabhängigen Variablen, den Prädiktoren. Im Gegensatz zur Korrelation besteht bei der Regressionsanalyse eine eindeutige Richtung des Zusammenhangs. Regressionsanalysen dienen dazu:

- Zusammenhänge zu erkennen und zu interpretieren
- Die abhängige Variable zu schätzen beziehungsweise vorherzusagen

Ein bestehender Zusammenhang kann graphisch in einem *Streudiagramm* dargestellt werden. Aus diesem geht hervor, ob es einen Zusammenhang gibt und wie stark er ist. Hierfür werden auf den beiden Achsen die zu vergleichenden Variablen aufgetragen. Ein linearer Zusammenhang besteht, wenn sich die beiden Variablen in die gleiche Richtung entwickeln und sich die Wertepaare an eine Gerade anschmiegen. Für diese Regressionsgerade gilt der einfache lineare Zusammenhang (Kähler 1998):

$$Y = m^* x + c . \quad (5.3)$$

Y	Zielgröße
x	Prädiktor
m	Steigung der Geraden
c	y-Achsenabschnitt

Aufgabe der *einfachen linearen Regression* ist es, die Parameter m und c abzuschätzen. Als optimale Lösung gilt diejenige Gerade, für welche die Summe der quadrierten vertikalen Abstände von den einzelnen Messpunkten minimal wird. Linear bedeutet, dass sich die abhängige und die unabhängige Variable nur in konstanten Relationen verändern (Backhaus et al. 1996).

Bei multiplen linearen Regressionsanalysen^{5.2} wird die Abhängigkeit von mehreren Prädiktoren untersucht. Dabei werden die Koeffizienten folgender Gleichung geschätzt (Kähler 1998):

$$Y' = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (5.4)$$

Y'	geschätzte Funktion der abhängigen Variablen
n	Anzahl der unabhängigen Prädiktoren
b_0	Regressionskonstante
b_i	Regressionskoeffizienten
x_i	unabhängige Prädiktoren

Die unabhängigen (erklärenden) Variablen können selbst untereinander korrelieren, was bei der Schätzung der Koeffizienten entsprechend berücksichtigt wird, um Scheinkorrelationen auszuschließen.

Der aus den Werten der Prädiktorvariable ermittelte Y' -Wert stellt die beste Vorhersage für die abhängige Variable Y dar. Mit der Gleichung 5.4 wird versucht, einen möglichst großen Anteil der Abweichung der Beobachtungswerte von ihrem gemeinsamen Mittelwert zu erklären. Anpassungskriterium wird die Methode der kleinsten Quadrate herangezogen, bei der folgender Ausdruck minimiert wird (Bühl & Zöfel 2000):

$$\sum (Y' - Y)^2 = \min . \quad (5.5)$$

Y	Zielgröße
Y'	berechneter Y -Wert

5.4 Voraussetzungen zur Verwendung eines Regressionsmodells

Bevor eine statistische Analyse durchgeführt werden kann, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein. Dazu gehört die Unabhängigkeit der Stichprobe, die Normalverteilung der Daten, die Homoskedastizität, das gleiche Skalenniveau, keine Autokorrelation sowie keine Multikolinearität. Diese Voraussetzungen werden im Folgenden näher beschrieben.

Unabhängigkeit der Stichprobe

Die einzelnen Ereignisse einer Stichprobe dürfen sich nicht gegenseitig beeinflussen. Für hydrologische Einzugsgebiete bedeutet das, dass sich die betrachteten Einzugsgebiete nicht

^{5.2} Die Regressionsanalysen wurden in dieser Arbeit mit dem Statistikprogramm SPSS SCIENCE durchgeführt. Als Ergebnis gibt dieses die Konstante b_0 zusammen mit den Regressionskoeffizienten b_i aus.

überlappen dürfen. Die Anwendung eines Regressionsmodells innerhalb des Einzugsgebiets des Schwarzbachs wird damit bereits ausgeschlossen.

Normalverteilung

Die Daten, in einer statistischen Analyse müssen normalverteilt sein. Um diese Voraussetzung sicherzustellen, können verschiedene Tests^{5.3} sowie graphisch-mathematische Verfahren durchgeführt werden. Zu letzteren gehören beispielsweise Histogramme. Zeigen die Tests und Verfahren für die einzelnen Parameter starke Abweichungen von der Normalverteilung, werden die Parameter transformiert.

Eine gängige Transformation ist das Logarithmieren der Variablen, was Exponentialfunktionen in lineare Funktionen umwandelt. Dieses Verfahren wurde bereits für die Häufigkeitsverteilung der Jährlichkeiten angewendet und soll daher hier eingehender beschrieben werden:

$$Y = a * b^x \quad (5.6)$$

wird durch Logarithmieren auf beiden Seiten zu:

$$\bar{Y} = \tilde{a} + x * \tilde{b}. \quad (5.7)$$

Es ist also eine Geradengleichung entstanden mit \tilde{a} als Achsenabschnitt und \tilde{b} als Steigung. Durch die logarithmische Transformation wird also nur die Y-Achse verzerrt. Abbildung 5.1 zeigt diesen Sachverhalt graphisch (Köhler et al. 1995, 72).

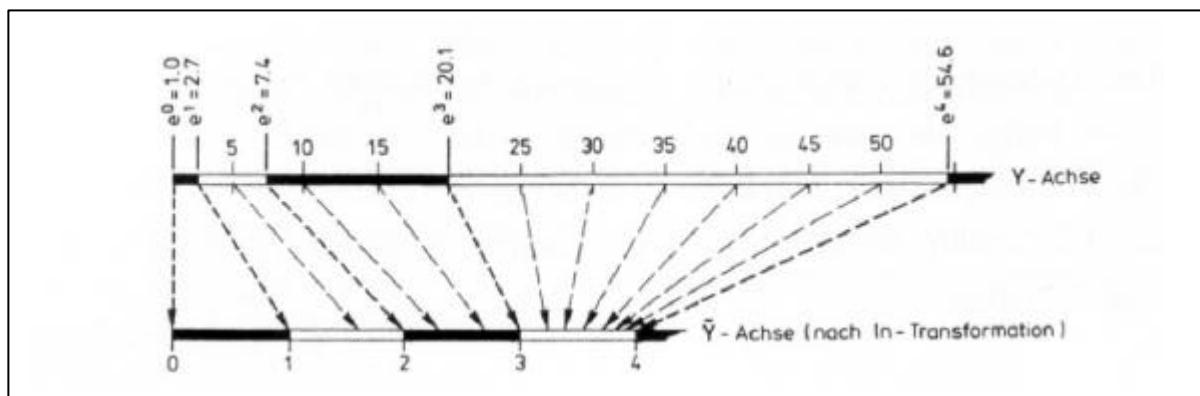


Abb. 5.1: Graphische Darstellung der Achsentransformation $\tilde{y} = \ln y$ (aus: Köhler et al. 1995).

Da Einzugsgebietsparameter auch den Wert 0 annehmen können, für den die Logarithmusfunktion nicht definiert ist, muss die Transformation modifiziert werden. Dies geschieht, indem zu jedem Wert der Wert 1 addiert wird:

^{5.3} wie zum Beispiel der χ^2 -Test

$$\tilde{Y} = \ln(y + 1) = \ln(a + 1) + x * \ln(b + 1) \quad (5.8)$$

Die Rücktransformation zum gewünschten Endwert y lautet schließlich:

$$Y = \exp(\tilde{Y}) - 1 \quad (5.9)$$

Die Normalverteilung der Residuen^{5.4} kann graphisch über ein Probability-Plot-Diagramm überprüft werden. Darin wird die empirisch ermittelte kumulative Verteilung der Residuen der zu erwartenden kumulativen Häufigkeitsverteilung gegenübergestellt (Bühl & Zöfel 2000). Liegen die Werte auf einer Geraden, so sind sie normalverteilt (Kähler 1998). Die Voraussetzung der Normalverteilung ist damit gegeben.

Homoskedastizität^{5.5}

Eine weitere statistische Voraussetzung des multiplen linearen Regressionsmodells ist die Homoskedastizität, das heißt, dass die Varianzen der Grundgesamtheit homogen sein müssen. Die Werte ordnen sich in einem Band um die Regressionsgerade derart an, dass die Streuung um alle Werte in etwa dieselbe ist. Diese Voraussetzung kann graphisch durch das Auftragen der Residuen über die Messwerte Y ermittelt werden. Liegt kein sichtbares Muster vor, kann man von Homoskedastizität ausgehen. Heteroskedastizität verfälscht den Standardfehler der Regressionskoeffizienten und verzerrt damit die Schätzung des Konfidenzintervalls.

Skalenniveau

Bei der Regressionsanalyse müssen im Gegensatz zu anderen multivariaten Verfahren sowohl die abhängige als auch die unabhängige Variable metrisch skaliert sein (Holder 1985). Die prozentuale Angabe von Flächenanteilen, wie sie beispielsweise für die Landnutzung herangezogen wurde, erlaubt auch nominal skalierte Variablen in die Berechnung mit einzubeziehen.

Da innerhalb eines Modells ferner kein Skalsprung stattfinden darf, wird das Übertragungsmodell auf Einzugsgebiete der selben Größe angewendet. Da hydraulische Belastungen im Fließgewässer nur bei Einzugsgebieten messbar sind, die kleiner als 500 km² sind (BWK 2001), ist diese Voraussetzung ohne Probleme erfüllt.

Keine Autokorrelation

Autokorrelation tritt auf, wenn die Residuen der Zielgröße miteinander korrelieren; wenn sie also von der Reihenfolge ihres Auftretens beeinflusst werden. Autokorrelation liegt

^{5.4} Differenz zwischen den Messwerten Y und den berechneten Werten Y'.

^{5.5} Die Verteilungen der Zufallsvariablen haben alle die gleiche Varianz (homogene Varianzen)(Kähler 1998).

insbesondere bei Zeitreihenanalysen vor, die zeitliche Trends widerspiegeln. Sie kann den Standardfehler der Regressionskoeffizienten verzerren (Backhaus et al. 1996).

Um Daten auf Autokorrelation zu überprüfen, kann der Durbin-Watson-Test durchgeführt werden (Holder 1985). Der Durbin-Watson-Koeffizient kann Werte zwischen 0 und 4 annehmen; liegt er in der Nähe von 2, so kann von paarweiser statistischer Unabhängigkeit der Residuen ausgegangen werden (Kähler 1998).

Keine Multikolinearität

Des Weiteren muss die lineare Unabhängigkeit der erklärenden Variablen untereinander gegeben sein. Empirische Daten unterliegen zumeist einem gewissen Grad an linearer Abhängigkeit, der so genannten Multikolinearität (Backhaus et al. 1996). Zunehmende Multikolinearität schränkt die Aussagekraft der Regressionskoeffizienten stark ein. Dies verhindert Rückschlüsse von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit.

Um dies zu vermeiden, werden zunächst die Korrelationskoeffizienten der erklärenden Variablen - also der Einzugsgebietsparameter - miteinander verglichen. Starke Zusammenhänge ($r > 0,8$, siehe Tab. 5.1) weisen auf hohe Multikolinearität hin (Lewis-Beck 1991). Dabei werden die Koeffizienten anfangs nur paarweise miteinander verglichen. Multikolinearität kann jedoch auch dann bestehen, wenn die einzelnen Korrelationskoeffizienten niedrig sind. Um diesen Fall auszuschließen, werden die aufgenommenen Variablen nacheinander als abhängige Variable einer Regressionsbeziehung betrachtet. Weist eine der Regressionsgleichungen ein Bestimmtheitsmaß in der Nähe von $R^2 = 1$ auf, besteht hohe Multikolinearität (Lewis-Beck 1991). In diesem Fall müssen eine oder mehrere Variablen aus der Regressionsgleichung entfernt werden.

5.5 Modellaufbau

5.5.1 Datengrundlage

Datengrundlage für die Regionalisierung der Zielgröße Abflussbeschleunigung bilden die Daten des KLIWA-Berichts^{5,6}. Für insgesamt 29 Pegel in Baden-Württemberg liegen hier gemessene Stundenwerte des Abflusses vor. Außerdem wurden für die KLIWA-Untersuchungen zahlreiche Einzugsgebietskennwerte ermittelt. Dabei handelt es sich um Abflusshauptwerte, Grunddaten zu Geometrie und Lage, Gewässernetzdaten, Höhenlage, Gefälle, Exposition, Landnutzung, Bodenkennwerte, Gebirgsdurchlässigkeiten, klimatische Wasserbilanz, Abflussfaktoren, Zeit-Flächen-Verteilung, Ereignishäufigkeiten, Raumdaten,

^{5,6} Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (IHF 2000).

Spektralanalyse, Niederschlagsdaten, Regime und Saisonalitätsvektoren. Insgesamt lagen 200 Einzugsgebietskenngrößen vor (IHF 2000).

Da hydraulische Belastungen nur in Einzugsgebieten mit einer Größe kleiner als 500 km² spürbar sind (BWK 2001), wurden größere Gebiete in die Untersuchungen nicht einbezogen. Es blieben zehn Einzugsgebiete übrig. Im Einzelnen handelt es sich dabei um Dreisam (Pegel Ebnet), Wiese (Zell), Murg (Rotenfels), Kinzig (Schenkenzell), Glatt (Hopfau), Rems (Schorndorf), Breg (Hammereisenbach), Pfinz (Berghausen), Seckach (Sennfeld), Elz (Gutach) und Schussen (Gerbertshaus)(siehe Kapitel 3.2). Das Einzugsgebiet der Schiltach (Hinterlehengericht) mit einer Größe von 105,8 km² konnte aufgrund großer Datenlücken nicht berücksichtigt werden.

Wie für das Einzugsgebiet des Schwarzbachs wurde auch für die baden-württembergischen Einzugsgebiete auf Daten des Zeitraums von 1985 bis 1994 zurückgegriffen.

5.5.2 Bestimmung der Einzugsgebietsparameter

Regressionsmodelle werden nach fachlichen Gesichtspunkten aufgestellt (Backhaus et al. 1996). Der Untersuchungsansatz sollte dabei möglichst die vermuteten Ursache-Wirkungs-Beziehungen vollständig enthalten. Die Auswahl der Einzugsgebietscharakteristika aus einer nahezu unübersehbar großen Anzahl (200) möglicher Einflussgrößen basiert dabei auf mehreren Grundsätzen:

- Die Prädiktorvariablen sollen repräsentativ sein für klimatische Steuergrößen, morphometrische Gebietseigenschaften, hydrologische und pedologische Gegebenheiten sowie Oberflächenbedeckung
- Es sollen nur solche Variablen einbezogen werden, die nach dem hydrologischen Prozessverständnis (das heißt aus Erfahrungen anderer Studien) als relevant bezüglich der korrelativen Kopplung mit der Zielgröße angesehen werden. Aus den 200 möglichen Prädiktorvariablen wurde so eine Vorauswahl getroffen. Da beispielsweise ein Zusammenhang der Beschleunigung mit den Expositionen hydrologisch nicht zu erklären ist, wurden diese als erklärende Variablen ausgeschlossen
- Die räumliche Anordnung der Geophänomene innerhalb eines Einzugsgebietes kann im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden, deshalb werden nur solche Variablen einbezogen, die als räumliche Mittelwerte interpretierbar sind beziehungsweise absolute Werte darstellen
- Um den Anspruch auf eine praxisorientierte Anwendbarkeit zu genügen, ist auf eine möglichst einfache und zeitsparende Bestimmung der Prädiktorvariablen zu achten.

Die Prädiktoren sollten möglichst Gebietsmerkmale sein, die allgemein verfügbar sind (vgl. Kapitel 7.1.2)

Es wird angenommen, dass die verbleibenden Variablen die Zielgröße beeinflussen. Dies würde bedeuten, dass in das Regressionsmodell alle Variablen aufgenommen werden. Dieser simultane Ansatz wird in der Literatur jedoch meist abgelehnt (Lehner 1999).

Je mehr Variablen in das Modell aufgenommen werden, desto größer ist die Gefahr des „overfittings“ des Modells; die Summe der Abweichungsquadrate wird künstlich erniedrigt, was ein hohes Bestimmtheitsmaß hervorruft, obwohl die Zielgröße nur zufällig mit der abhängigen Variablen korreliert (Backhaus et al. 1996, Lewis-Beck 1991). Dies führt zu ineffizienten Schätzungen der Regressionskoeffizienten.

Eine weitere Gefahr besteht darin, dass ein signifikanter Einflussfaktor nicht als solcher erkannt wird, weil er von Störeinflüssen überdeckt ist.

Dem Problem des overfittings kann mit einer Korrektur des Bestimmtheitsmaßes begegnet werden (siehe Kapitel 5.5.4). Grundsätzlich sollte die maximale Anzahl unabhängiger Variablen nicht mehr als die Hälfte beziehungsweise ein Drittel des Stichprobenumfangs betragen (Backhaus et al. 1996). In der vorliegenden Studie betrug die Anzahl der untersuchten Einzugsgebiete zehn; damit konnten in das Modell maximal drei erklärende Variablen aufgenommen werden.

5.5.3 Wahl der unabhängigen Variablen

Um die optimale Kombination der aufgenommenen Variablen zu bestimmen, gibt es verschiedene automatische Methoden, die aus unterschiedlichen Algorithmen bestehen. Es stehen folgende Methoden zur Verfügung (Kähler 1998, Demuth 1993):

Einschluss: Alle unabhängige Variablen werden blockweise auf einmal in die Analyse mit einbezogen.

Vorwärts: Begonnen wird mit der unabhängigen Variablen, die die höchste Korrelation mit Y aufweist. Als nächste wird diejenige Variable in die Regression aufgenommen, die den größten partiellen Korrelationskoeffizienten mit der abhängigen Variablen aufweist; als weiteres Kriterium muss durch die Aufnahme jeder weiteren Variablen das Bestimmtheitsmaß erhöht werden.

Rückwärts: Hierbei wird zunächst ein Modell aufgestellt, das sämtliche Variablen enthält. Daraus wird Schritt für Schritt eine unabhängige Variable entfernt; entfernt wird diejenige

Variable, für die der zugehörige Regressionskoeffizient nicht signifikant ist und die den kleinsten partiellen Korrelationskoeffizienten mit der Zielgröße aufweist.

Schrittweise: Diese Methode ähnelt dem Vorwärts-Prinzip, wobei nach jedem Schritt sämtliche Variablen nach den Rückwärts-Kriterien überprüft und gegebenenfalls wieder ausgeschlossen werden. Die Variablen, die aufgrund dieses Kriteriums von der Regression ausgeschlossen werden, stehen beim nachfolgenden Schritt wiederum zur Verfügung (siehe Kapitel 7.2.1).

Ausschluss: Alle unabhängigen Variablen werden blockweise auf einmal von der Regressionsanalyse ausgeschlossen.

In dieser Arbeit wurde zunächst die schrittweise Methode zum Aufstellen der Modelle verwendet. Da jedoch sehr viele Parameter in das Modell aufgenommen wurden^{5.7} und damit das Bestimmtheitsmaß künstlich erhöht, wurde darüber hinaus eine zweite Methodik angewandt. Dazu wurden einfache lineare Regressionen durchgeführt: die abhängige Variable war zunächst die zweijährliche Beschleunigung selbst. Schließlich gingen die unerklärten Residuen des ersten Modells als unabhängige Variable ins nächste Modell ein. Auf diese Weise konnte die Anzahl der aufgenommenen Prädiktoren von Hand geregelt werden.

5.5.4 Prüfung der Modellgüte

Um die Aussagekraft des Regressionsmodells beurteilen zu können, muss die Modellgüte geschätzt und überprüft werden. Dafür stehen verschiedene Parameter und Tests zur Verfügung. Während die Tests erst bei großen Datenkollektiven sinnvolle Ergebnisse liefern, steht das Bestimmtheitsmaß als Güteparameter auch bei wenigen Gebieten zur Verfügung.

Das *Bestimmtheitsmaß R²* gibt an, wie gut sich eine Regressionsfunktion an die empirische Punkteverteilung anpasst (Bühl & Zöfel 2000). R² ist der Anteil, den die unabhängigen Variablen \hat{x}_i an der Streuung der y_i -Werte erklären. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt damit den Anteil der erklärten Streuung an der Gesamtstreuung und lässt sich ausdrücken als:

$$R^2 = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}} \quad (5.10)$$

Definitionsgemäß liegt er damit immer zwischen 0 (kein Zusammenhang) und 1 (vollständiger Zusammenhang). Die Quadratwurzel aus dem Bestimmtheitsmaß, als R bezeichnet, ist bei der einfachen Regressionsanalyse gleich dem Korrelationskoeffizienten

^{5.7} Dies ist ein spezifisches Problem des verwendeten Statistikprogramms SPSS (nach mündlicher Mitteilung von Andreas Steinbrich vom 25.6.2002).

nach Pearson, bei der multiplen Analyse ist diese Größe weniger anschaulich als das Bestimmtheitsmaß. Tabelle 5.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Bestimmtheitsmaß und Korrelationskoeffizient sowie deren Interpretation.

Tab. 5.1: Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson und des Bestimmtheitsmaßes (Schlittgen 2000).

Bestimmtheitsmaß (R^2)	Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson (r)	Interpretation
0	0	kein Zusammenhang
0,01 - 0,25	0,0 - 0,5	schwacher Zusammenhang
0,25 - 0,64	0,5 - 0,8	mittlerer Zusammenhang
0,64 - 0,99	0,8 - 1,0	starker Zusammenhang
1	1	perfekter Zusammenhang

Um den Einfluss der Anzahl der unabhängigen Variablen auf die Größe des Bestimmtheitsmaßes zu eliminieren, wird das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{korr} berechnet. Mit zunehmender Anzahl der Prädiktorvariablen wird ein Erklärungsanteil hinzugefügt, der zufällig bedingt sein kann. Der Wert des Bestimmtheitsmaßes kann auch mit Aufnahme von irrelevanten Prädiktorvariablen zunehmen (Backhaus et al. 1996). Dies kann berücksichtigt werden, indem das Bestimmtheitsmaß um eine Korrekturgröße vermindert wird. Diese ist umso größer, je größer die Zahl der unabhängigen Variablen und je kleiner die Zahl der Freiheitsgrade ist. Die Gleichung für das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{korr} lautet (Bühl & Zöfel 2000):

$$R^2_{korr} = R^2 - \frac{J * (1 - R^2)}{N - J - 1} \quad (5.11)$$

N	Zahl der Beobachtungswerte
J	Zahl der Prädiktorvariablen
N-J-1	Zahl der Freiheitsgrade

Zur Entscheidung, wie viele Variablen in das endgültige Modell aufgenommen werden, dient neben der „Änderung des Bestimmtheitsmaßes“ auch die Angabe des korrigierten Bestimmtheitsmaßes.

5.6 Fazit

Ziel einer Regionalisierung ist es, Parameter in ungemessenen Gebieten abzuschätzen. Dies geschieht in der Hydrologie anhand von Übertragungsfunktionen, die in Abhängigkeit von

Einzugsgebietscharakteristika aufgestellt werden. Als Modell wird dabei häufig die Regressionsanalyse angewendet.

Die multiple Regression dient dazu, eine abhängige Variable (in diesem Fall also die Beschleunigung) anhand von Prädiktoren in ungemessenen Gebieten zu schätzen oder vorherzusagen. Dafür müssen die Daten unabhängig und normalverteilt sein. Die Varianzen müssen homogen sein, gleiche Skalen betrachtet werden. Autokorrelation und Multikolinearität dürfen nicht bestehen.

Die letzten beiden kann man über Korrelationsanalysen ausfindig machen und verhindern. Dabei wird der Zusammenhang zwischen zwei Variablen untersucht. Durch das Aufstellen partieller Korrelationsanalysen können Scheinkorrelationen ausgeschlossen werden. Der Zusammenhang der beiden Zielgrößen von Beschleunigung und Hochwasserabfluss konnte damit ebenfalls betrachtet werden.

Bei den erklärenden Variablen für das Regressionsmodell handelt es sich um Einzugsgebietscharakteristika, die repräsentativ und leicht zu bestimmen sind. Darüber hinaus dürfen sie das hydrologische Prozessverständnis nicht verletzen. Die Anzahl der aufgenommenen erklärenden Variablen darf ein Drittel der gemessenen Gebiete nicht übersteigen. In dieser Studie wurden Einzugsgebiete aus den KLIWA-Daten herangezogen, die kleiner als 500 km² sind. Dabei handelte es sich um 10 Gebiete; es dürfen also maximal drei Prädiktoren in das Modell aufgenommen werden.

Neben der schrittweisen Vorgehensweise des Statistikprogramms SPSS wurde die Anzahl der Prädiktoren durch eine eigenhändig durchgeführte Residuen-Vorgehensweise verringert. Diese erfolgte anhand der aufgestellten Korrelationen zwischen den Einzugsgebietsparametern und der zweijährlichen Abflussbeschleunigung.

Die Güte der ermittelten Modelle kann anhand von Bestimmtheitsmaßen überprüft werden. Aufgrund der geringen Datengrundlage waren weder Tests noch eine Validierung der erstellten Modelle möglich.

6 ERGEBNISSE DER SENSITIVITÄTSANALYSEN

6.1 Einfluss der Klassenbreite

Um Grenzkurven der Abflussbeschleunigung zu berechnen, müssen zunächst die Abflussspenden in Klassen eingeteilt werden. Zuerst wird untersucht, inwieweit die Wahl der Klassenbreite die Ergebnisse beeinflusst (siehe Kap. 4.3). Am Beispiel des Gebietsauslasses (G72) ist ein Vergleich der Klassenbreiten 5, 10 und 20 $\text{l/s} \cdot \text{km}^2$ in Abbildung 6.1 dargestellt.

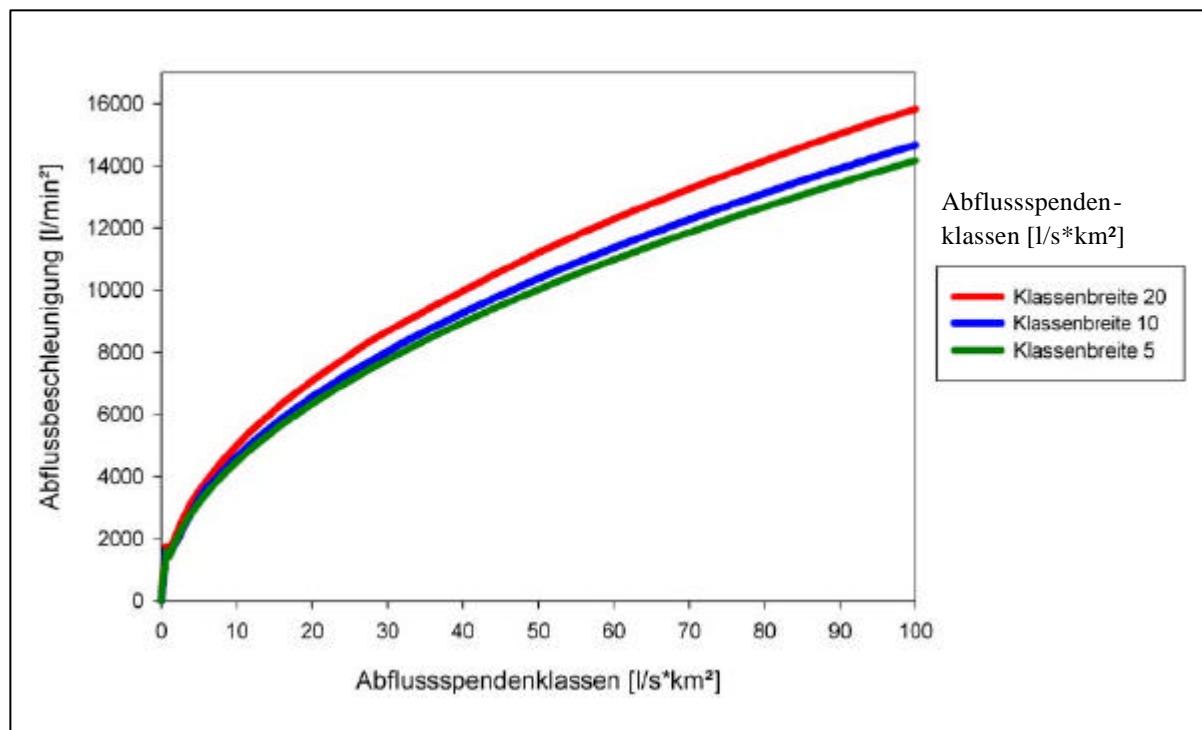


Abb. 6.1: Einfluss der Klassenbreiten der Abflussspende auf die Hüllkurven am Beispiel der Sechs-Minuten-Werte am Gebietsauslass des Schwarzbach-Einzugsgebietes im Istzustand.

Der Einfluss der Klassenbreiten kann dabei als gering eingestuft werden. Die Klassenbreite 20 $\text{l/s} \cdot \text{km}^2$ weist die höchste Grenzkurve auf, während eine Klassenbreite von nur fünf $\text{l/s} \cdot \text{km}^2$ die niedrigste Kurve ergibt. Die höchsten Beschleunigungen sind grundsätzlich in allen Klassen

vertreten. Da eine Grenzkurve alle Beschleunigungen umhüllt, hängt ihre Form vom Auftreten dieser hohen Beschleunigungen ab. Je niedriger die Klasse, in der eine höchste Beschleunigung auftritt, desto höher ist die Kurve.

Bei einer Breite von 20 l/s*km² ist es wahrscheinlicher, eine große Beschleunigung gleich in der ersten Klasse vorzufinden. Dies erklärt die größere Hüllkurve. Bei kleineren Klassenbreiten sind dagegen vor allem niedrigere Beschleunigungen vorhanden. Dadurch wird auch die Grenzkurve erniedrigt.

Aufgrund des geringen Einflusses der Klassenbreite ist allein die Anzahl der Klassen mit ansteigenden Beschleunigungen für die Wahl ausschlaggebend; dies ist in Hinblick auf die Extremwertstatistik besonders wichtig. Hierfür müssen mindestens fünf bis sieben Klassen mit ansteigenden Beschleunigungen vorliegen. Die Beschleunigung nimmt für hohe Abflussspenden wieder ab, weil sie im Maximum den Wert 0 annimmt. Ferner reagieren die Ganglinien bei großen Abflussspenden erheblich träger. Für das Einzugsgebiet des Schwarzbachs und seine Teileinzugsgebiete ist eine Klassenbreite von zehn l/s*km² am besten geeignet.

Eine Klassenbreite von fünf l/s*km² ergibt zwischen 16 (G72, Winterhalbjahr, 60-Minuten-Daten) und 102 (G1, gesamtes Jahr, sechminütige Daten) verschiedene Klassen; bei einer Klassenbreite von 20 l/s*km² liegen insbesondere für das hydrologische Winterhalbjahr für die einzelnen Teilgebiete nur drei oder vier Klassen vor. Die Anzahl der aufgetretenen Klassen hängt dabei insbesondere von der Datengenauigkeit ab. Bei sechsminütiger Auflösung treten bis zu sechs Mal so viele Klassen auf wie bei Stundenwerten. Bei der Klassenbreite zehn l/s*km² ergeben sich für das Gesamtgebiet (60 minütige Daten) elf verschiedene Klassen. Der Datensatz für die Extremwertstatistik ist damit ausreichend.

Im Weiteren wurde ausschließlich die Klassenbreite zehn l/s*km² für die Untersuchungen herangezogen.

6.2 Einfluss der Landnutzung

Der Einfluss von Niederschlagswassereinleitungen in urbanen Gewässern kann unter anderem über einen Vergleich des potenziell naturnahen mit dem aktuellen Zustand quantifiziert werden; dieser ist stark anthropogen beeinflusst. Es soll hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich um einen Vergleich simulierter Daten handelt. Dabei werden für den naturnahen Zustand vorhandene Versiegelungen durch die natürliche Nutzung (wie Wald, Grünland oder Acker) im Umfeld dieser versiegelten Flächen ersetzt. Der Vergleich zwischen Ist- und potenziell naturnahem Zustand wird also allein anhand der Landnutzungen interpretiert (siehe Kap. 4.4).

In Abbildung 6.2 ist der Vergleich zwischen Ist- und potentiell naturnahen Zustand für das Quelleinzugsgebiet G1 dargestellt. Dieses stellt mit über 22 Prozent das am stärksten versiegelte Teilgebiet der Untersuchungen dar (siehe Tab. 3.1). Es sind sowohl die berechneten Grenzkurven, wie auch die maximalen Beschleunigungen innerhalb der Klassen dargestellt.

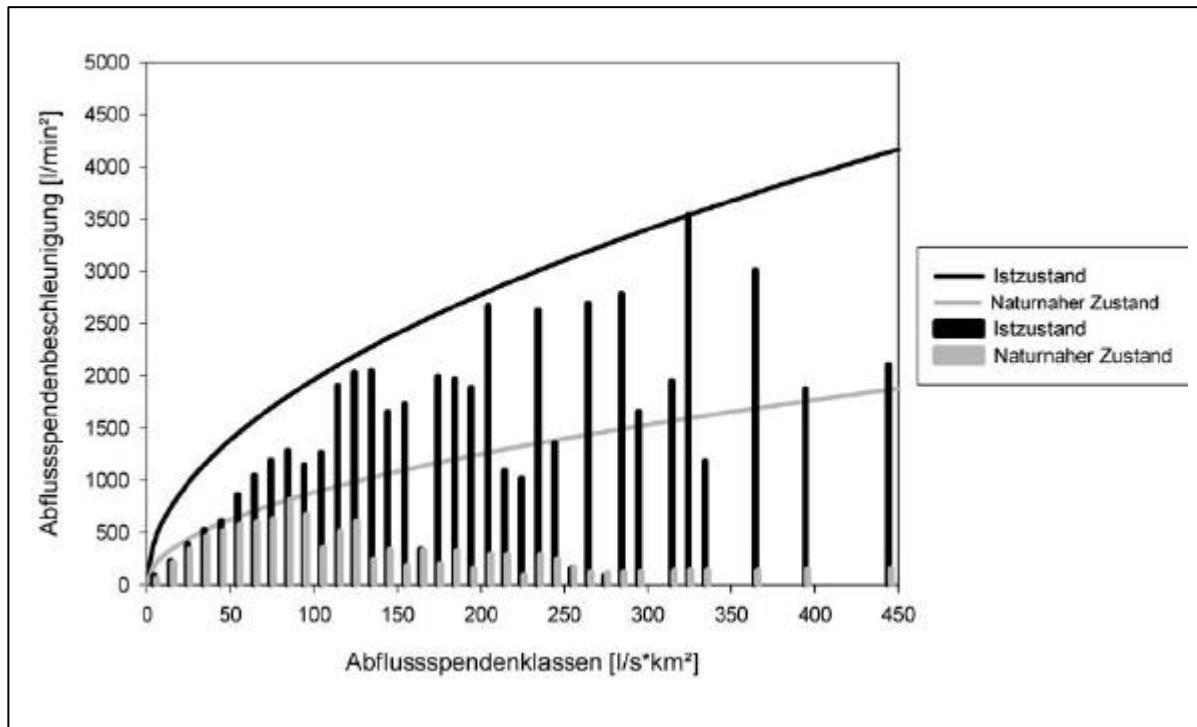


Abb. 6.2: Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für das Quelleinzugsgebiet des Schwarzbachs (Klassenbreite zehn $\text{l/s} \cdot \text{km}^2$). Die Kurven stellen die berechneten Grenzkurven, die Balken die maximalen Abflussbeschleunigungen dar.

Im Istzustand ist eine deutlich höhere Hüllkurve zu erkennen als im potenziell naturnahen Zustand. Dies macht die erhebliche Beeinflussung durch anthropogene Veränderungen in den letzten 100 Jahren deutlich. Die hohe Hüllkurve beruht unter anderem auf schnellen Abflusskomponenten in Kanalnetzen. Versiegelte Flächen führen zu kurzen Konzentrationszeiten, besonders deutlich bei Niederschlagswasser, das über das Kanalsystem in den Vorfluter gelangt.

Der potenziell naturnahe Zustand hat einen größeren Wald- und Wiesenanteil mit hohen Infiltrationsraten. Wegen der höheren Verdunstung und Interzeption sowie der großen Verluste durch Infiltration und Perkolation gelangt ein geringeres Wasservolumen zum Abfluss. Die Konzentrationszeit verlangsamt sich durch die Zwischenabflusskomponente. Die größere Rauigkeit natürlicher Oberflächen verringert die Abflussbeschleunigung ebenfalls.

Aus Abbildung A.1 im Anhang geht der Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die Teilgebiete G1 und G72 jeweils im Vergleich der Jahreswerte mit den Sommer- und Winterhalbjahren hervor. Im aktuellen Zustand herrschen drei bis fünfmal höhere Beschleunigungen vor als im naturnahen Zustand. Siedlungsflächen haben hierbei

einen großen Einfluss. Versiegelte Flächen verhindern Infiltration und Perkolation. Fast das gesamte Niederschlagswasser gelangt direkt oberflächlich zum Abfluss (siehe auch Tab. 2.1). Die Konzentrationszeit verkürzt sich erheblich, wodurch es im Vorfluter zu ungünstigen Überlagerungen kommt. Dies erhöht nicht nur den Scheitelabfluss, sondern auch die Abflussbeschleunigung und Sohlumlagerungen der Gewässersohle. Diese verursachen Katastrophendrift zahlreicher Organismen.

Es tritt also bereits im Quellgebiet mit einer Größe von nur $1,7 \text{ km}^2$ ein deutlicher Unterschied zwischen Ist- und potenziell naturnahem Zustand auf. Die Gemeinde Mettmann nimmt hier über 22 Prozent der Fläche des Teileinzugsgebiets ein. Sie befindet sich am äußersten Rand des Gebiets und beinhaltet die Quelle selbst. Der große Unterschied zwischen aktuellem und potenziell naturnahem Zustand kann also neben dem hohen Teil an versiegelter Fläche auch auf deren Lage im Gebiet zurück zu führen sein (vgl. Abb. 6.13).

6.3 Datengenauigkeit

6.3.1 Einfluss auf die Grenzkurven

Der Einfluss der Datengenauigkeit wurde anhand von Datenaggregierungen der sechsminütigen Daten untersucht (siehe Kap. 4.5). Ein solcher Vergleich ist in Abbildung 6.3 am Beispiel des Quelleinzugsgebiets im Istzustand dargestellt.

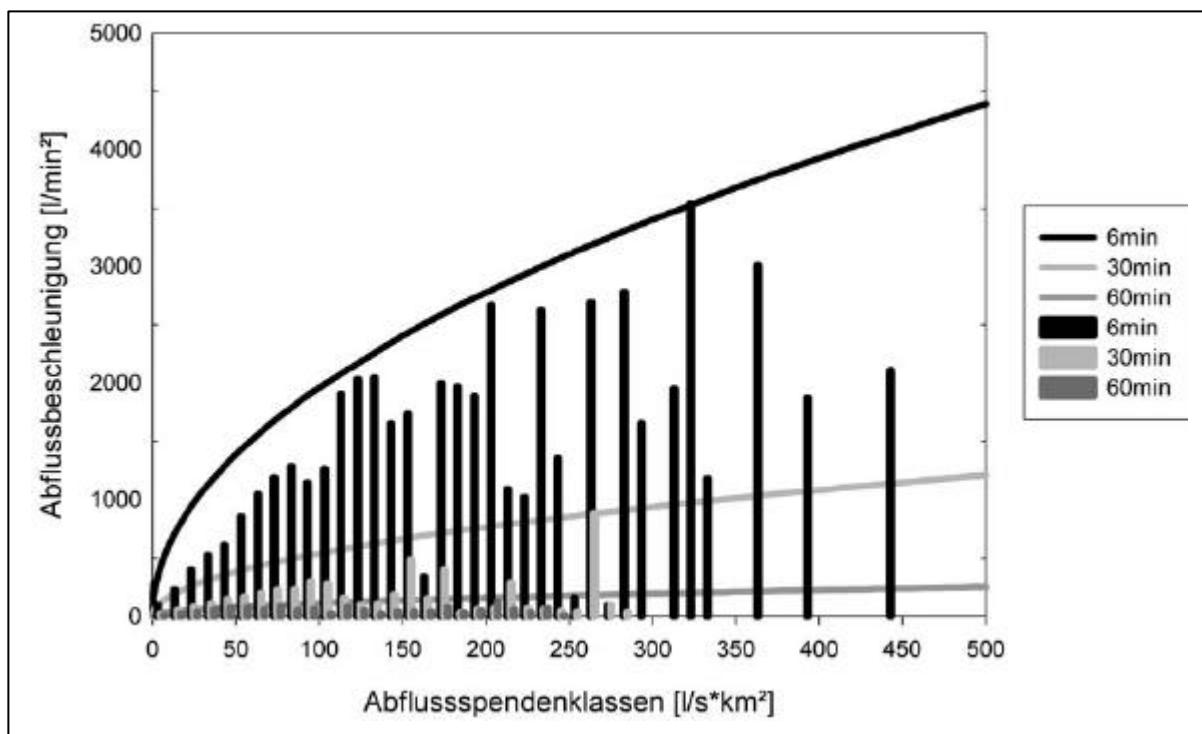


Abb. 6.3: Einfluss der Datengenauigkeit auf die Hüllkurven der Abflussbeschleunigung am Beispiel des Quelleinzugsgebiets, Ist-Zustand.

Unterschiedliche Auflösungen der Daten (6min, 30min, 60min) lassen große Unterschiede in den Hüllkurven erkennen. Je höher die Auflösung, desto höher ist auch die Hüllkurve. Eine Aggregierung hochauflöster Daten führt zu einer Mittelung der Werte über einen bestimmten Zeitraum; dadurch fallen Extremwerte nicht mehr so sehr ins Gewicht. Die Extremwerte der aggregierten Daten werden erheblich verringert.

Es kann festgestellt werden, dass bereits eine geringe Aggregierung einen starken Einfluss hat: der Abstand der Hüllkurven der sechs- von den 30-Minuten-Werten ist erheblich größer als der von den 30- zu den 60-Minuten-Daten.

Die maximale Abflussbeschleunigung der Sechs-Minuten-Werte beträgt in G1 3540 l/min²; für die Halbstundenwerte 883 l/min² und für die Stundenwerte nur 126 l/min². Das bedeutet eine in diesem Fall 30 Mal größere Grenzkurve für die sechsmittigen Werte wie für die Stundenwerte. In Gebiet G72 ist die sechsmittige Grenzkurve nur etwa sieben Mal höher als die Grenzkurve der Stundenwerte. Der Einfluss der Datengenauigkeit für die drei Teilgebiete G1, G29a und G72 im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand geht aus Abbildung A.2 des Anhangs hervor. Daraus erkennt man auch, dass im Teilgebiet G29a ein äußerst geringer Unterschied zwischen den sechsmittigen und halbstündigen Auflösungen besteht. Die Grenzkurve der Stundenwerte ist vermutlich aufgrund von Fehldaten erheblich niedriger. Die Stundenwerte wurden nur dann gebildet, wenn alle zehn Daten innerhalb einer Stunde gemessen wurden. Für die Beschleunigung mussten ferner zwei aufeinanderfolgende Stunden komplett gemessen worden sein, damit die Beschleunigung ermittelt werden konnte. Dies war hier aufgrund der extrem hohen Werte nicht mehr gegeben.

6.3.2 Ermittlung eines Kalibrierungsfaktors

Da in den meisten Einzugsgebieten die Daten nur in 60-minütiger Auflösung vorliegen, wird versucht, über einen Kalibrierungsfaktor die Grenzkurven auf höhere Auflösungen anzuheben. Da die Abflussbeschleunigungsfunktion als Wurzelfunktion definiert ist, hängt sie nur von einer Variablen a ab (Gleichung 4.1). Diese kann über einen einfachen Faktor so erhöht werden, dass die Grenzkurve einer ermittelten Grenzkurve aus 6-Minuten Daten möglichst nahe kommt.

Ein solcher Kalibrierungsfaktor kann abhängig von Einzugsgebietsgröße und anderen hydrologischen Kennwerten sein. Daher ist in Tabelle 6.1 neben den für die verschiedenen Datenauflösungen berechneten Werten für die Variable a (vgl. Gleichung 4.1 in Kapitel 4.2) die Einzugsgebietsgröße der untersuchten Teileinzugsgebiete sowie für den potenziell naturnahen Zustand der HQ1 sowie der MNQ angegeben. In den beiden untersten Zeilen ist ein Multiplikationsfaktor aufgeführt, der die 30-minütigen beziehungsweise die 60-minütigen Werte der Variablen a auf den Variablenwert der sechsmittigen Auflösung anhebt.

Tab. 6.1: Kalibrierungsfaktor für den Wert a, um Stundenwerte höheren Auflösungen anzugeleichen.

	Istzustand			Potenziell naturnaher Zustand		
	G1	G29a	G72	G1	G29a	G72
EG-Größe [km ²]	1,76	27,94	54,19	1,76	27,94	54,19
HQ1 [m ³ /s]	-*	-*	-*	0,38	5,57	4,12
MNQ [l/s]	-*	-*	-*	9,94	131,50	284,10
6min	148,03	188,17	199,25	66,69	127,09	104,60
30min	40,88	157,26	57,27	18,05	123,02	30,73
60min	8,55	70,86	26,51	11,39	69,21	19,80
30min -> 6min	3,62	1,20	3,48	3,69	1,03	3,40
60min -> 6min	17,31	2,66	7,52	5,86	1,90	5,28

*Daten lagen nicht vor.

Für den potenziell naturnahen Zustand kann der Kalibrierungsfaktor mit:

$$KF = MNQ / A(E_o) \quad (6.1)$$

festgelegt werden. Dabei steht KF für Kalibrierungsfaktor. MNQ ist der mittlere Niedrigwasserabfluss in Litern pro Sekunde, und A(E_o) steht für die Fläche des Einzugsgebiets in Quadratkilometern.

Allgemein sind die Unterschiede im Istzustand deutlich größer als im potenziell naturnahen Zustand. Für den aktuellen Zustand kann kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Datenauflösungen erkannt werden. Der Multiplikationsfaktor variiert zwischen 2,66 (G29a) und 17,31 (für G1). Die größten Unterschiede weist das Quellgebiet auf; dieses ist mit gut 22 Prozent auch das am stärksten versiegelte Teilgebiet. Als Faustregel kann abgeleitet werden, dass der Parameter a mindestens verdoppelt werden muss, um auf eine 6minütige Auflösung angehoben zu werden.

In einem weiteren Schritt werden die Sechs-Minuten-Werte mit großen Jährlichkeiten der Stundenwerte verglichen. Dies zeigt Abbildung 6.4 am Beispiel des Gesamteinzugsgebiets. Der Achsenbereich ist so gewählt, dass die vier Grenzkurven deutlich unterschieden werden können.

Aus dieser Abbildung geht hervor, dass selbst die zehnjährliche Grenzkurve der Stundenwerte (grün) bei weitem die Grenzkurve der sechsmintütigen Auflösung nicht erreicht. Um die sechsmintütige Grenzkurve erklären zu können, sind also noch viel größere Jährlichkeiten nötig. Aufgrund der kurzen Zeitspanne von nur zehn Jahren sind größere Jährlichkeiten jedoch nicht zu ermitteln (siehe Kapitel 4.2).

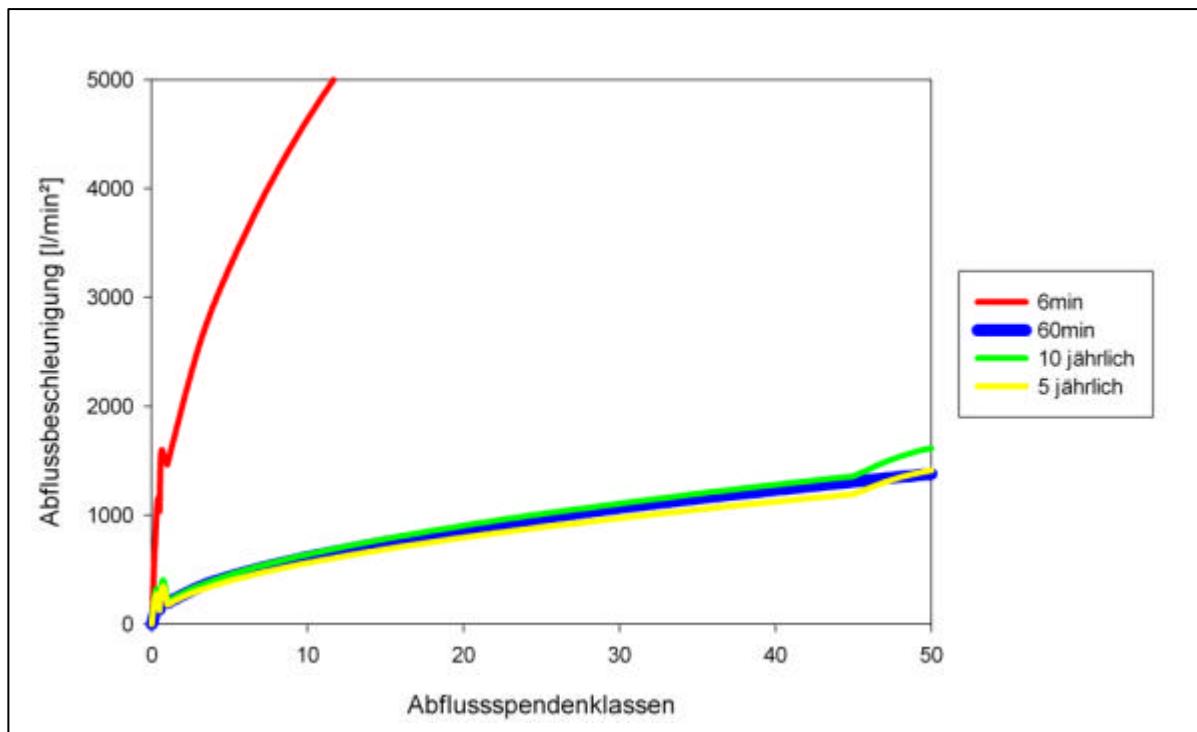


Abb. 6.4: Kalibrierung anhand von Jährlichkeiten am Beispiel des Gesamteinzugsgebietes G72. Dargestellt sind die 5- und 10-jährliche Kurve der Stundenwerte sowie die Gesamtkurve der Stundenwerte und die 6-minütige Zielkurve.

Darüber hinaus sind mehr Teilgebiete von Nöten, um einen sinnvollen Kalibrierungsfaktor zu erhalten und eventuelle Ausreißer zu eliminieren. Eine Kurvenanpassung kann dann übertragbare Ergebnisse liefern. Darüber hinaus müsste eine erheblich längere Zeitreihe betrachtet werden, um eine Kalibrierung über Jährlichkeiten zu ermöglichen.

6.4 Saisonalitätsunterschiede

Die ökologische Belastung - von extremen Beschleunigungen verursacht - ist abhängig vom zeitlichen Auftreten innerhalb der Lebenszyklen der Organismen. Saisonalitätsuntersuchungen geben Aufschluss darüber, wann überwiegend mit hohen Beschleunigungen zu rechnen ist (siehe Kap. 4.6). Hierfür werden die Daten nach den hydrologischen Halbjahren getrennt ausgewertet und die jeweiligen Grenzkurven ermittelt (Abb. 6.5).

Aus Abbildung 6.5 geht hervor, dass die Grenzkurven für das hydrologische Sommerhalbjahr und das gesamte hydrologische Jahr deckungsgleich sind; die größten Beschleunigungen treten damit fast ausschließlich im Sommerhalbjahr auf.

Daraus lässt sich schließen, dass insbesondere kurze, heftige Schauer und Gewitter für hohe Beschleunigungen sorgen – die Intensität ist ausschlaggebend. Dahingegen erbringen

langanhaltende Niederschläge mit geringer Intensität auch nur geringe Beschleunigungen. Diese sind kennzeichnend für das Winterhalbjahr. Dieser Zusammenhang wird noch verstärkt durch kurze Konzentrationszeiten, wie sie für stark versiegelte Gebiete typisch sind.

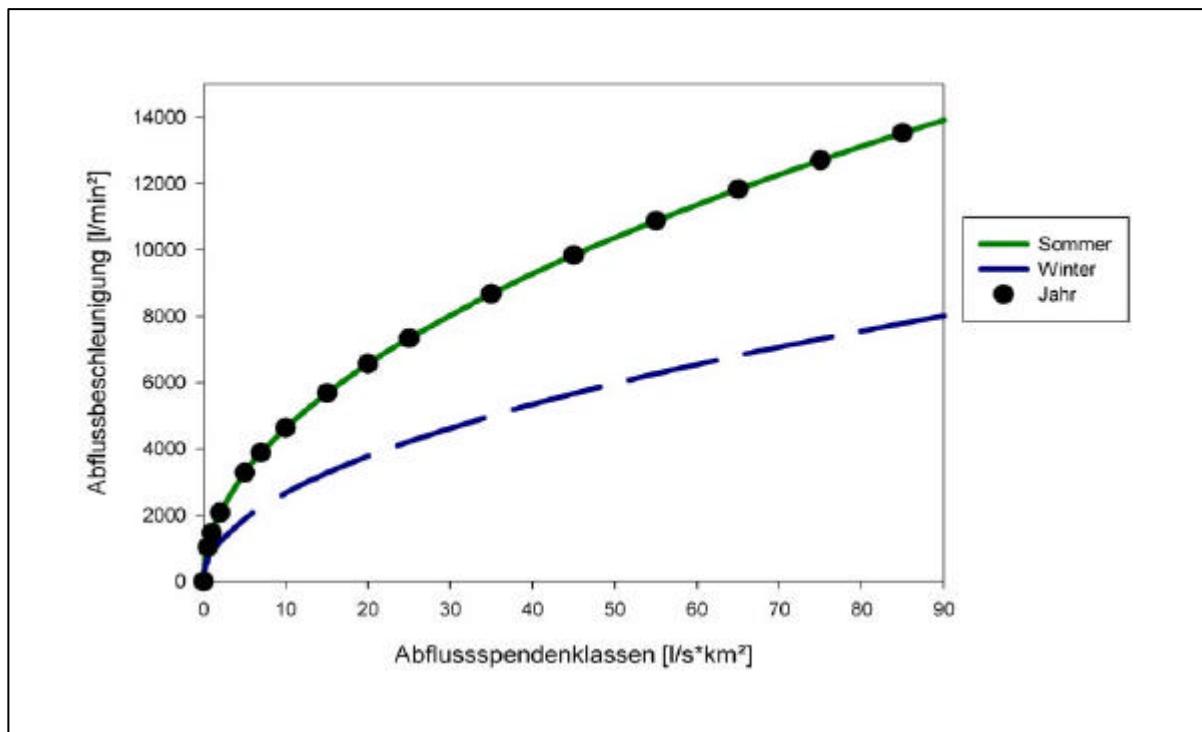


Abb. 6.5: Grenzkurven für Sommer- und Winterhalbjahr getrennt, sowie für das gesamte hydrologische Jahr am Beispiel von G72 Istzustand, 6min-Daten.

Ein wichtiger Beurteilungsmaßstab für die Auswirkung im Gewässer ist die Häufigkeit der Ereignisse. Aus Untersuchungen in Schleswig-Holstein geht hervor, dass erst Intensitäten von über $1,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ in der Kanalisation abflusswirksam werden. Das bedeutet, dass nur 60 Prozent der Niederschlagsereignisse eines Jahres zu einem Abfluss aus der Kanalisation führen (LANU 1999).

Für Gebiet G72 beträgt das Maximum des Sommerhalbjahres mit $8678 \text{ l}/\text{min}^2$ das eineinhalbache des Beschleunigungsmaximums im Winterhalbjahr. Dieses relativ große Gebiet wird nur in Teilen von Konvektivzellen beregnet, so dass deren Einfluss nicht so erheblich ist wie in kleineren Gebieten. Beispielsweise beträgt das Sommermaximum für das Quellgebiet mit $3540 \text{ l}/\text{s} \cdot \text{km}^2$ das Dreifache des Wintermaximums. Saisonalitätsvergleiche sind in Abbildung A.3 des Anhangs für die drei Teilgebiete G1, G29a und G72 jeweils im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand gegenübergestellt. Die geringsten Unterschiede weist dabei das Gebiet G1 auf. Hier sind die Beschleunigungen im Winter nur unwesentlich kleiner als diejenigen des Sommerhalbjahrs. Dies kann eindeutig auf die Größe des Gebietes zurückgeführt werden und auf die allgemein geringen Abflüsse.

Um die maximalen Abflussbeschleunigungen im Schwarzbacheinzugsgebiet zu drosseln genügte es folglich, nur die Abflussganglinien der Sommerhalbjahre zu betrachten. Abhängig

von der jeweiligen Klimaregion und vom hydrologischen Regime sowie der Landnutzung, könnte so in bestimmten Einzugsgebieten das Datenkollektiv zur Auswertung verringert werden.

Die Betrachtung des Sommerhalbjahres ist auch aus ökologischer Sicht bedeutender. Stromaufwärts gerichtete Wanderungen der im Sediment lebenden Organismen finden überwiegend im Sommer statt (LANU 1999). Diese Wanderungen werden durch die hydraulische Belastung stromabwärtsgerichteten Sedimenttransports infolge von Niederschlagswassereinleitungen behindert. Damit sind auch die negativen Auswirkungen extremer Ereignisse auf die Ökologie im Sommer stärker.

Je nach Ausmaß der oben genannten Faktoren kann also die Betrachtung eines hydrologischen Halbjahres zur Berechnung der maximalen Beschleunigungsfunktion ausreichen. Dies kann in Winterregengebieten genauso gut das hydrologische Winterhalbjahr sein.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass für die Extremwertstatistik ein großes Datenkollektiv notwendig ist. Um die Ergebnisse der Jährlichkeiten sinnvoll interpretieren zu können, müssen insgesamt mindestens fünf Klassen mit ansteigenden Beschleunigungen existieren. Innerhalb dieser Klassen muss eine genügend große Anzahl an Beschleunigungen vorhanden sein, aus denen der Maximalwert gesucht wird. Ferner soll mit Zielgrößen gerade das Kontinuum betrachtet werden. Daraus ergibt sich für die weiteren Untersuchungen eine Betrachtung der ganzen hydrologischen Jahre.

Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss der Saisonalität zu untersuchen, liefert die Bildung von Häufigkeitsverteilungen der Jahresmaxima für die einzelnen Monate (siehe Kap. 4.6). Abbildung 6.6 liefert eine solche Verteilung anhand aller Teilgebiete. Daraus ist eine eingipflige Verteilung mit dem Maximum im Monat Juni zu erkennen. Die Anpassung einer Gaußverteilung erbringt eine sehr gute Übereinstimmung mit über 95 Prozent.

Auffallend sind die vier Maximalwerte im Monat Januar. Drei dieser vier Werte stammen aus dem Gebiet G34, das durch ein großes Entlastungsbauwerk der Autobahn geprägt ist. Das vierte Maximum des Januars kommt von Gebiet G72. Winterliche Maxima sind überwiegend anthropogen bedingt.

Auffallend ist dabei eine äußerst gute Anpassung an die Gauß'sche Normalverteilung. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung liegt für die sechsminütige Datenauflösung bei 96 Prozent.

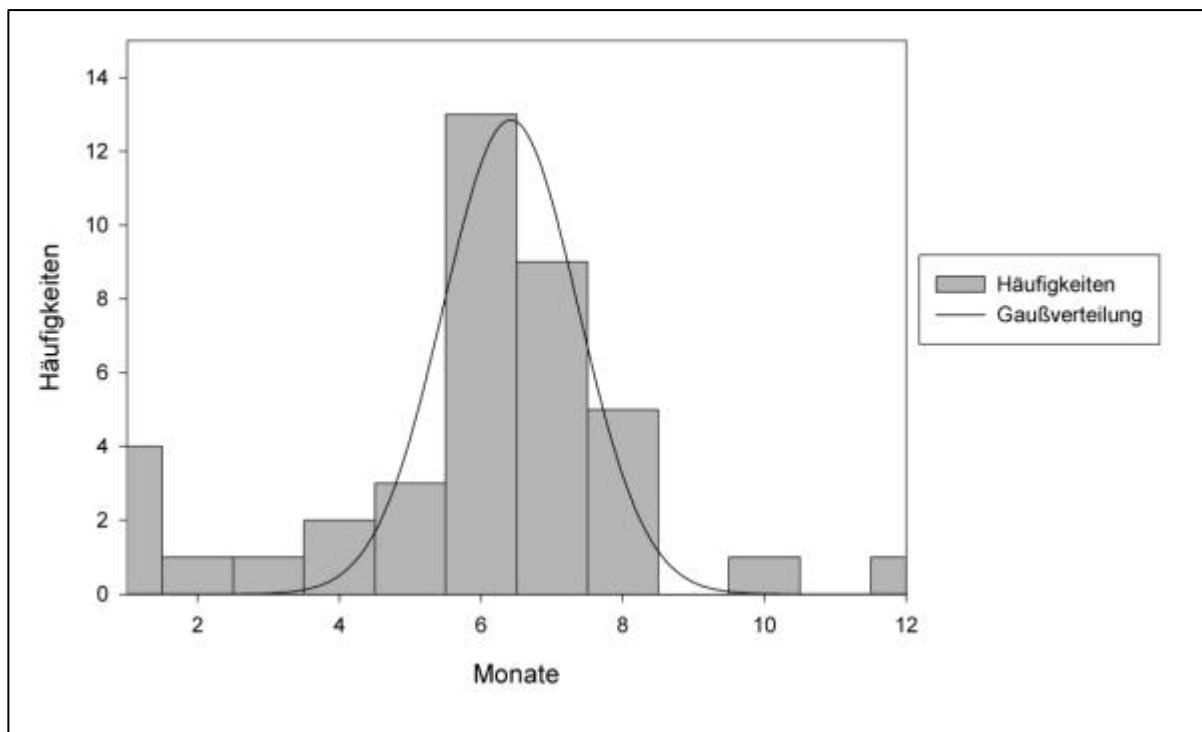


Abb. 6.6: Häufigkeiten des Auftretens der maximalen Abflussbeschleunigung in den einzelnen Monaten (aus den sechsminütigen Werten im Istzustand), aufsummiert über alle Teilgebiete des Schwarzbachgebiets.

Für die Stundenwerte sieht die Verteilung bereits anders aus. Maximalwerte tauchen hier erheblich seltener in den Wintermonaten auf; die vier Januarmaxima der sechsminütigen Werte sind komplett verschwunden (siehe Abb. A.4 im Anhang). Dies deutet darauf hin, dass die Januarmaxima der sechsminütigen Werte auf extrem kurze Einzeleignisse zurückzuführen sind; bei der Mittelung über eine ganze Stunde kommen diese nicht mehr zum Tragen.

6.5 Wahrscheinlichkeitsanalysen

6.5.1 Häufigkeiten verschiedener Abflussspendenklassen

Als Anpassung für partielle Serien ist die Exponentialfunktion am besten geeignet (DVWK 1985). Durch logarithmisches Auftragen ergibt sich dabei eine Geradenschar für die unterschiedlichen Abflussspendenklassen. Abbildung 6.7 zeigt eine solche Schar anhand des Quelleinzugsgebiets für die sechsminütigen Daten.

Die Güte der Anpassung lässt sich über das Bestimmtheitsmaß ermitteln. Es liegt zwischen $R^2 = 0,86$ (für Klasse 9 in Gebiet G72) und $R^2 = 0,98$ (für Klasse 3 in Gebiet G1); das schlechteste Bestimmtheitsmaß, das immer noch auf einen starken Zusammenhang hindeutet,

wurde dabei lediglich aus den 26 höchsten Beschleunigungen berechnet^{6,1}. Der Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes ergibt im Quellgebiet $R^2 = 0,93$. Aus Tabelle 5.1 geht hervor, dass bereits ab $R^2 = 0,64$ ein starker Zusammenhang gegeben ist.

Die Abbildung zeigt, dass bei niedrigen Abflussspenden (niedrige Klassen) die Abflussbeschleunigung nur relativ wenig variiert. Dies zeigt sich durch eine geringe Steigung der Geraden. Bei großen Abflüssen dagegen nimmt die Steigung zu; das heißt, die Abflussbeschleunigung steigt mit größer werdender Jährlichkeit rasch an.

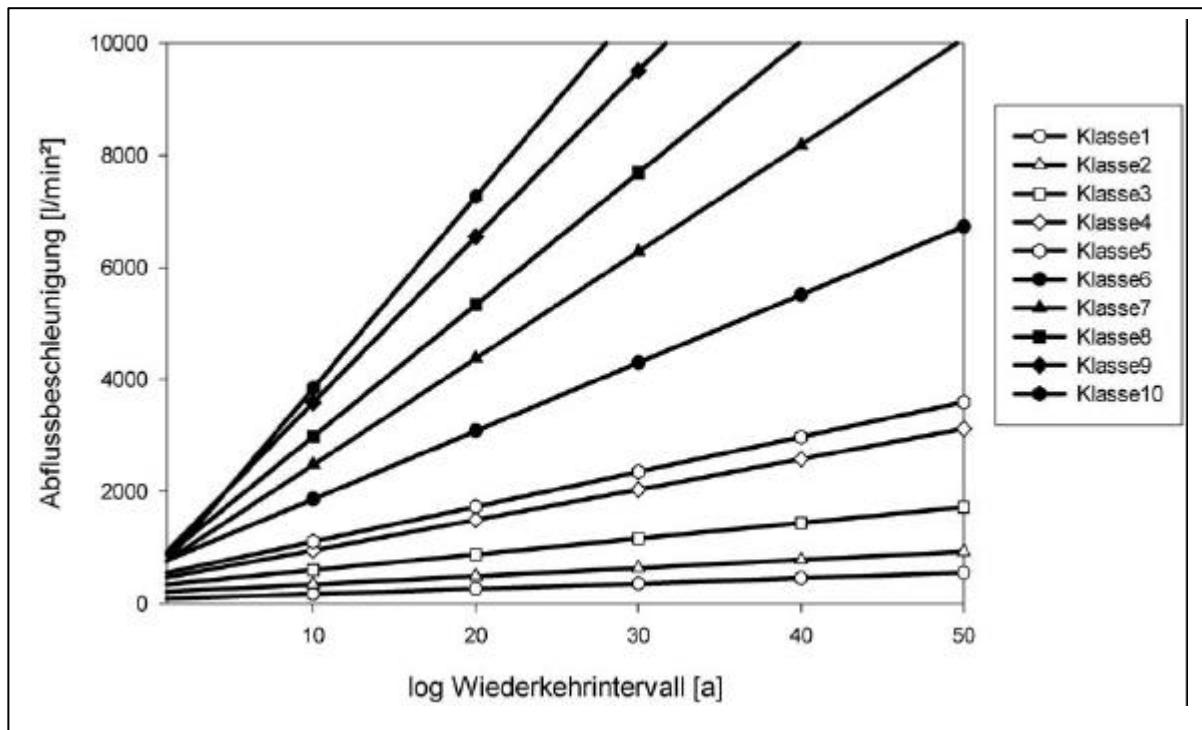


Abb. 6.7: Häufigkeiten der Abflussbeschleunigung für verschiedene Abflussspendenklassen für die Sechs-Minuten-Daten des Quelleinzugsgebiets im naturnahen Zustand.

Bei seltenen Ereignissen steigt bei geringer Abflussspende auch die Beschleunigung nicht so extrem an wie bei großen Abflussspenden. Dies ist der Fall für hohe Jährlichkeiten.

6.5.2 Einfluss der Jährlichkeit

Ziel der Jährlichkeitsuntersuchungen war es, diejenige Jährlichkeit zu bestimmen, die als Grenzkurve am besten geeignet ist (auf die also gedrosselt werden soll).

Die Jährlichkeiten wurden aus partiellen Serien der 30 größten Werte der Periode ermittelt (siehe Kap. 4.7). Zur Wahrung der Unabhängigkeit wurde jeweils nur ein Wert pro Kalendertag zugelassen (DVWK 1985). In Abbildung 6.8 ist ein Vergleich der Grenzkurven

^{6,1} diese Anzahl ergibt sich statt 30, weil in dieser Klasse nur wenige unabhängige Beschleunigungen vorlagen und zur Wahrung der Unabhängigkeit nur ein Wert pro Kalendertag zugelassen ist.

unterschiedlicher Jährlichkeiten dargestellt. Je nachdem welche Jährlichkeit zugrunde gelegt wird, ergeben sich unterschiedliche Kurven. Dabei sind kleine Jährlichkeiten von 0,5, 1, 1,5, 2, 5 und 10 aufgetragen, die aus der kurzen Zeitreihe ohne Probleme ermittelt werden konnten.

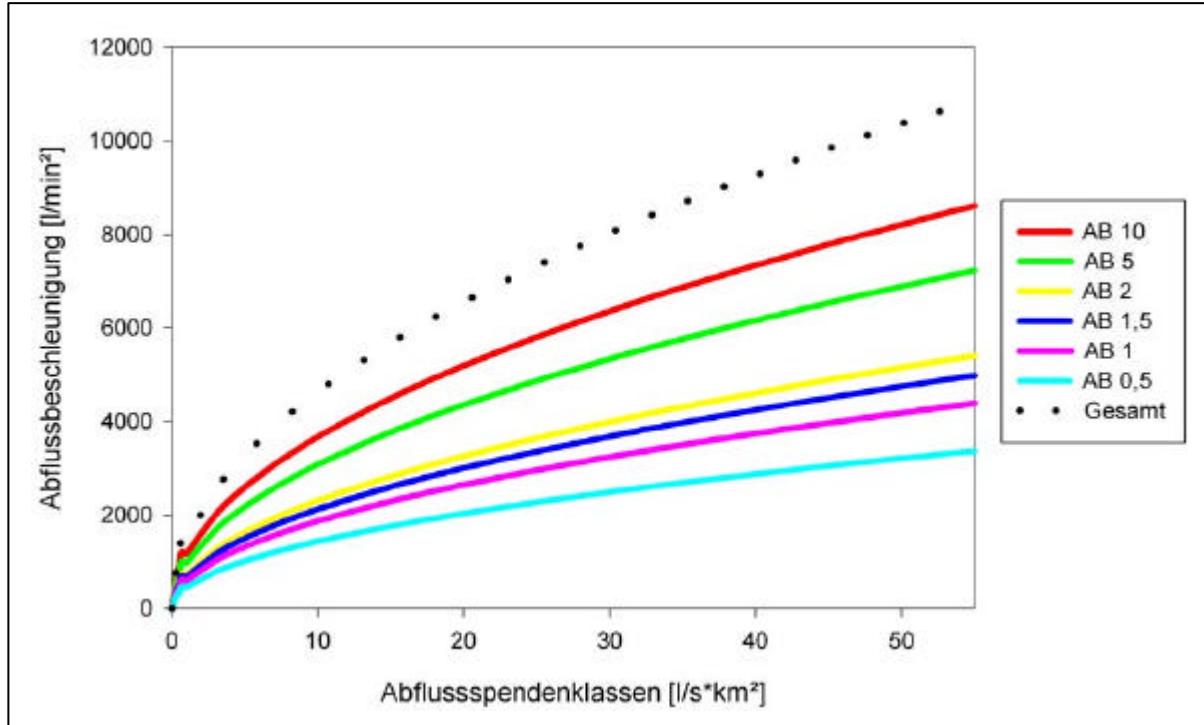


Abb. 6.8: Einfluss verschiedener Jährlichkeiten auf die Grenzkurve am Beispiel der sechsminütigen Daten für den Gebietsauslass G72.

Aus dieser Abbildung geht hervor, dass Grenzkurven kleiner Jährlichkeiten niedrigere Kurven aufweisen als diejenigen größerer Jährlichkeiten. Die Gesamtkurve aus den zehn betrachteten Jahren, wie sie für die vorangehenden Kapitel (6.1 bis 6.4) berechnet wurde, liegt noch höher als die zehnjährliche Beschleunigungsfunktion. Dies konnte bei allen untersuchten Teilgebieten beobachtet werden. Das bedeutet, dass die Gesamtkurven allesamt größer als zehnjährliche Kurven beschreiben. Daraus kann geschlossen werden, dass die zehn Jahres Periode von 1985 bis 1994 nicht repräsentativ war. Vielmehr ist in dieser Zeitspanne mindestens ein Extremereignis aufgetreten.

Aus Untersuchungen über den Hochwasserabfluss (Borchardt et al. 1999) geht hervor, dass eine zehnprozentige Überschreitung des HQ1-Wertes bereits einem HQ2 entspricht. Bei 30 prozentiger Überschreitung ist bereits ein fünfjährliches Hochwasser gegeben, während eine Überschreitung des natürlichen Abflusses von 50 Prozent sogar ein zehnjährliches Hochwasser bedeutet.

Durch das Betrachten verschiedener Jährlichkeiten sollte diejenige Jährlichkeit ermittelt werden, auf die gedrosselt werden soll. Allein aufgrund der Kurvenschar, wie sie Abbildung 6.8 wiedergibt, lässt sie sich jedoch nicht bestimmen.

Sie kann vielmehr ökologisch begründet werden. Aus ökologischen Gesichtspunkten ist die Jährlichkeit 2 am besten geeignet, da sie dem Entwicklungszyklus der meisten Organismen entspricht. Dadurch bleibt ihnen genügend Zeit, um sich von Extremereignissen zu erholen.

Darüber hinaus muss auch der ökonomische Aspekt betrachtet werden: eine Drosselung auf kleinere Jährlichkeiten ist praktisch nicht mehr umsetzbar. Die Kosten für die wasserbaulichen Maßnahmen wären hierbei zu hoch.

6.6 Skalenabhängigkeit

Um die Skalenabhängigkeit bewerten zu können, werden die verschiedenen Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Größe miteinander verglichen (siehe Kap. 4.8). In Abb. 6.9 ist dieser Vergleich anhand der sechsminütigen Daten dargestellt.

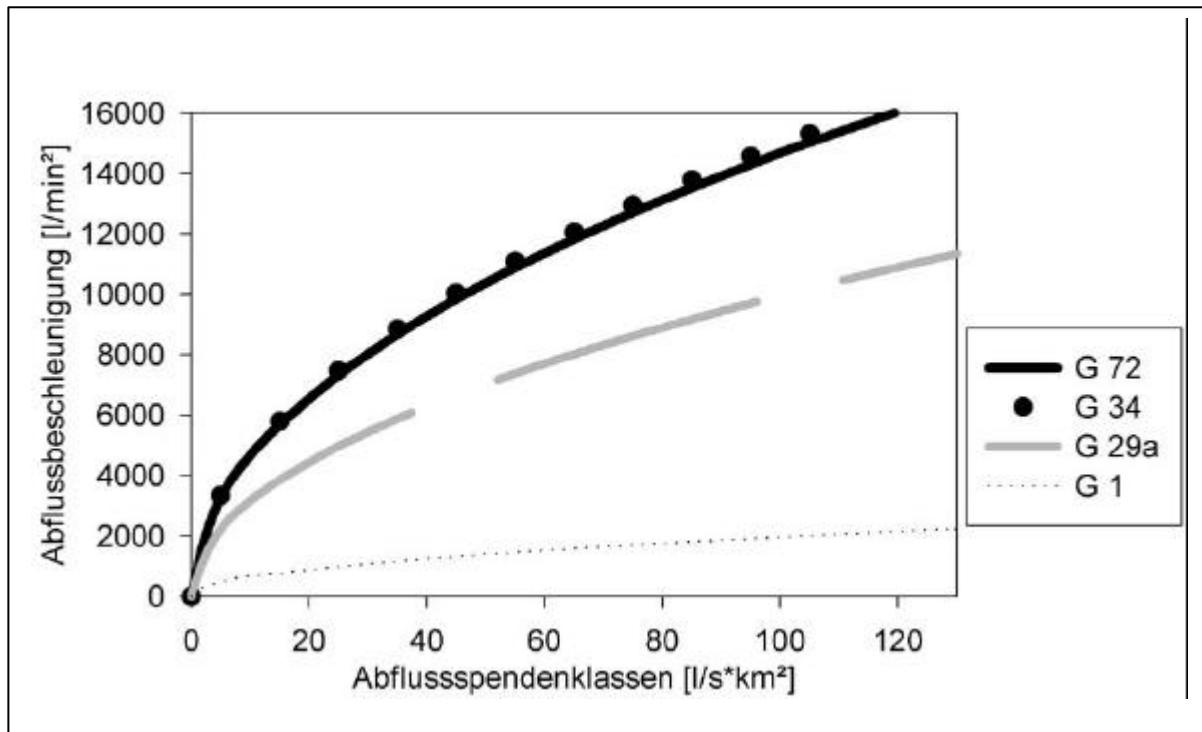


Abb. 6.9: Vergleich der Beschleunigungsfunktionen der vier Teilgebiete des Schwarzbachs am Beispiel der Sechs-Minuten-Werte im Istzustand.

Aus dieser Abbildung geht hervor, dass sich die Einzugsgebietsgröße stark auf die Beschleunigungsfunktion auswirkt. Das Quellgebiet weist dabei die geringsten Beschleunigungen auf. Dies relativiert sich jedoch wieder, betrachtet man die Größe des Einzugsgebietes. Vergleicht man die „Abflussspendenbeschleunigungen“ so ergeben sich sehr große Werte im Quellgebiet. In diesem kleinen Teilgebiet kann davon ausgegangen werden, dass Unterschiede in der Quellschüttung Hauptursache für große Beschleunigungen sind. Auch wenn es sich um eine Karstquelle handelt, schwankt deren Schüttung nur gering. Bei

einer Gebietsgröße von nur 1,7 km² können hohe Niederschlagsintensitäten als Ursache großer Beschleunigungen nahezu ausgeschlossen werden. Vielmehr fällt hier der Anteil und die Lage der versiegelten Fläche ins Gewicht. Mit 22 % ist G1 das am stärksten versiegelte Teilgebiet. Dabei konzentriert sich die Versiegelung auf die Siedlung Wülfrath, in der sich die Karstquelle befindet.

Anders sieht das Bild für den Gebietsauslass G72 aus. Hier können zusammen mit dem Teilgebiet G34 die größten Grenzkurven festgestellt werden. Allgemein sollte hier betont werden, dass große Gebiete träger reagieren als kleinere, weshalb auch die Abflussbeschleunigung geringer ist. Dass sich dieser Sachverhalt hier nicht widerspiegelt, beruht vor allem auf der Tatsache, dass das Gebiet mit einer Größe von 54,2 km² noch nicht als groß und träge zu bezeichnen ist. Darüber hinaus spielen geomorphologische Gesichtspunkte eine große Rolle. Der Gebietsauslass befindet sich in der Niederrheinischen Tiefebene. Der Schwarzbach hat hier das große Gefälle vom Schiefergebirge in die Rheinebene bereits passiert. Am Übergang kommt es aufgrund des hohen Gefälles zu einer starken Beschleunigung des Abflusses.

Die Stelle G34 befindet sich unmittelbar vor der Siedlung Ratingen und damit noch bevor der Schwarzbach sein größtes Gefälle durchläuft. Das Einzugsgebiet ist mit einer Größe von 31,32 km² nur unwesentlich größer als Teilgebiet G29a mit 27,94 km². Der Abfluss von G29a ist geprägt von der Einleitung des relativ naturnahen Hasselbaches in den Schwarzbach. Der Hasselbach bildet das größte Seitengewässer des Schwarzbach.

Der deutliche Unterschied der beiden nahezu gleichgroßen Gebiete muss also andere Ursachen haben. Diese können beispielsweise anthropogen bedingt sein. Ein Blick auf die Landnutzung im Schwarzbachgebiet (Kapitel 3.1.6, Abbildung C im Anhang) zeigt, dass G34 eine Stelle im Schwarzbach markiert, die sich direkt hinter der Autobahn A3 östlich von Ratingen befindet. Dies legt die Vermutung nahe, dass große Entlastungsbauwerke der Autobahn für die extremen Beschleunigungen in Gebiet G34 verantwortlich sind. Diese Vermutung kann aufgrund der Karte mit den Einleitungsbauwerken (Gdi 2002) gestützt werden.

Abbildung A.5 des Anhangs zeigt den Skalenvergleich für die drei Datenauflösungen im Vergleich der Ist- mit den potenziell naturnahen Daten. Dabei sind für den naturnahen Zustand nur die drei Teilgebiete G1, G29a und G72 dargestellt, da Daten für das Gebiet G34 nicht vorlagen.

Dabei zeigen sich große Unterschiede auch zwischen den verschiedenen Datenauflösungen. Sowohl für den Ist- wie auch für den naturnahen Zustand liegt bei den sechsminütigen Daten die Kurve des Gebietsauslasses höher als diejenige von Gebiet G29a. Dieses Bild dreht sich für die 30- und 60minütige Datenauflösung um. Dieser Sachverhalt ist Folge von Fehlwerten

in G34. Stundenwerte wurden nur dann gebildet, wenn über die gesamte Stunde die sechsmütigen Daten vorlagen. Dadurch sollte auch die Vergleichbarkeit der Daten sichergestellt werden. Auch wenn es sich um simulierte Daten handelt, so traten Fehlwerte insbesondere bei extremen Abflusswerten auf. Die aggregierten Daten sind dadurch nicht besonders repräsentativ.

6.7 Variabilität der Abflussbeschleunigung

Um die Variabilität des Abflusses als ökologisch bedeutende Größe der Abflussdynamik bewerten zu können, werden die maximalen Beschleunigungen der einzelnen Monate für die gesamte Zeitreihe von zehn Jahren ermittelt und dargestellt (siehe Kap. 4.9). Dies wird für die drei Teilgebiete durchgeführt, für die sowohl der aktuelle wie auch der naturnahe Zustand vorliegen.

Abbildung 6.10 stellt das Verhalten der Gebiete jeweils im Ist- dem naturnahen Zustand gegenüber. Dabei muss die unterschiedliche Wertespanne der einzelnen Gebiete beachtet werden, in der sich die Werte bewegen. Im Quellgebiet beträgt das Maximum 3540 l/min^2 (Juni 1989), für G29a 15289 l/min^2 (Juni 1990) und im Gebietsauslass 6312 l/min^2 (Oktober 1993).

Die absoluten Maxima sind im Gebiet G29a größer als im Gesamtgebiet; hier wirkt sich die Einmündung des Hasselbaches aus. Durch das Zusammenfließen können extrem hohe Beschleunigungen auftreten. Darüber hinaus sind die geologischen Verhältnisse mitverantwortlich. G29a befindet sich am Übergang zur Niederterrasse im Bergischen Land. Dieses besteht aus silikatischem Grundgebirge und ist damit nur gering durchlässig. Die Abflusskonzentration ist kurz. Dahingegen befindet sich der Gebietsauslass bereits in der Rheinischen Tiefebene mit äußerst durchlässigem Untergrund. Es kann davon ausgegangen werden, dass hier die Wasserspeicherung einen großen Einfluss auf die Abflussdynamik hat: Die Welle wird nicht nur erniedrigt – die Beschleunigungen nehmen ebenfalls ab.

Aus Abbildung 6.10 erkennt man einen einheitlichen Verlauf der beiden kleineren Gebiete (Quellgebiet und G29a). Die Maxima sind für G29a zwar erheblich höher, die einzelnen Peaks können jedoch gut übertragen werden. Der Verlauf im Ist- und im naturnahen Zustand variiert nur schwach.

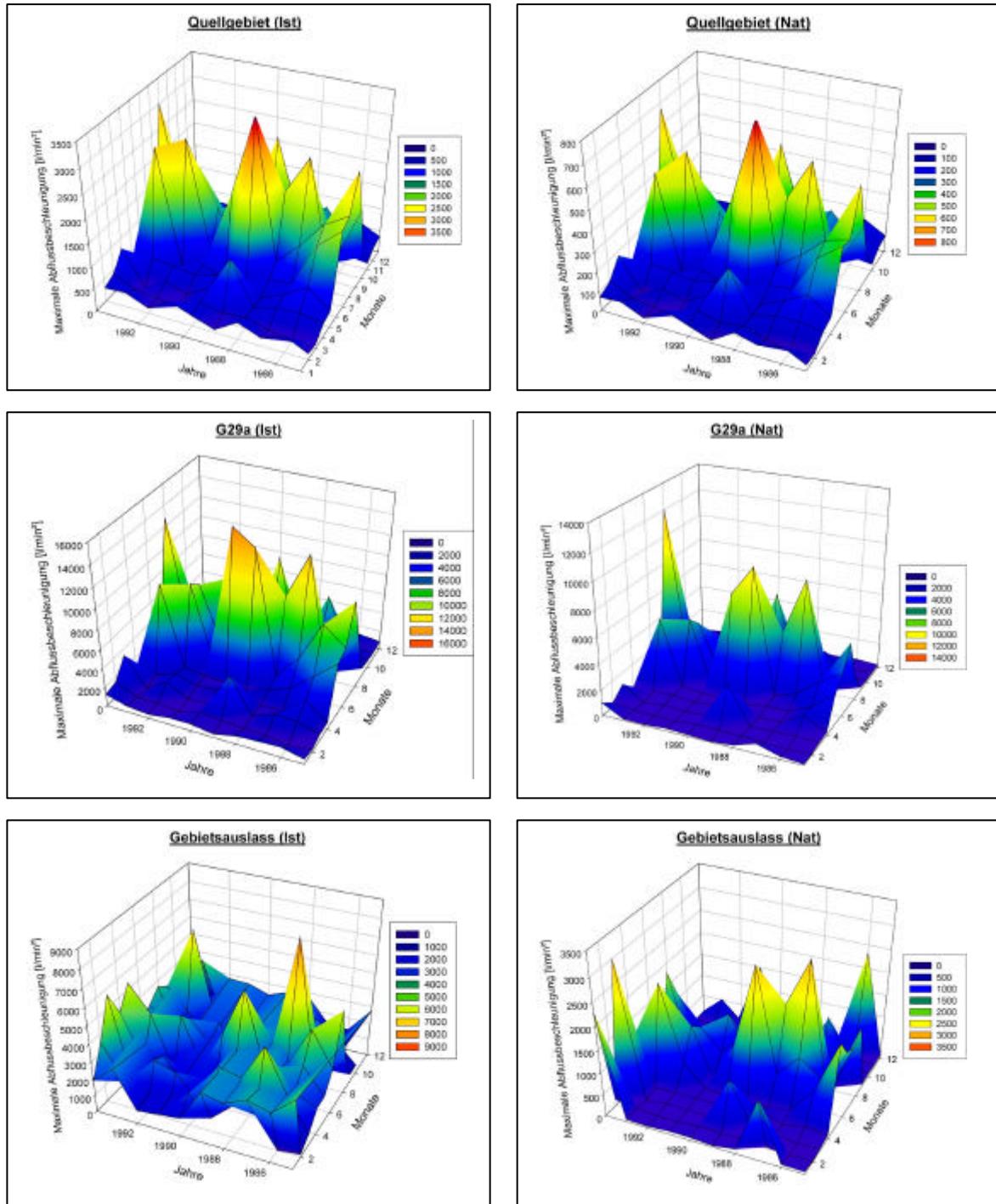


Abb. 6.10: Variabilität der maximalen Abflussbeschleunigungen der einzelnen Monate für die drei Teilgebiete im Schwarzbachgebiet im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die sechsminütige Auflösung.

Weitere Interpretationsmöglichkeiten ergeben sich, wenn man Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Gebiete berücksichtigt. Diese sind den Tabellen 6.2a und 6.2b für den Ist- und den naturnahen Zustand entnommen werden.

Die größten Mittelwerte weisen die Sommermonate Juni (für G1 und G29a) sowie Juli (G72) auf. Dies ergibt sich auch aus der Saisonalitätsanalyse. Die absoluten Maximalwerte treten ebenfalls in den Sommermonaten auf (für G1 und G29a im Monat Juni, für den Gebietsauslass

G72 im Monat Oktober). Das Verhältnis von Sommer- zu Winterhalbjahr wird also nicht durch anthropogene Eingriffe verschoben.

Die Sommermonate sind gleichzeitig die Monate mit der größten Schwankung (größte Standardabweichung). Dies zeigt sich – wenn auch nicht ganz so deutlich - ebenfalls für den potenziell naturnahen Zustand.

Tab. 6.2a: Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Abflussbeschleunigungen der drei Teilgebiete im Istzustand (für die sechsminütige Datenauflösung). Angaben in [l/min²].

Mittelw.	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
G1	254	177	414	440	833	1544	1361	1185	778	420	356	334
G29a	779	525	1452	1062	2724	6240	5000	4743	2325	1501	1013	1187
G72	2344	1193	2574	2191	2147	2767	3194	1808	1423	1811	1413	2329

St.abw.	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
G1	374	373	1007	421	2606	3226	2876	2548	2160	978	534	358
G29a	879	1205	3906	1728	8517	15603	13659	12251	8750	5434	1533	1222
G72	3319	3425	5347	3004	4680	4807	6895	3195	2537	5300	3583	2116

Tab. 6.2b: Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Abflussbeschleunigungen der drei Teilgebiete im potenziell naturnahen Zustand (für die sechsminütige Datenauflösung). Angaben in [l/min²].

Mittelw.	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
G1	62	42	96	103	174	324	301	254	176	98	85	79
G29a	288	117	540	312	1061	3072	2553	2426	928	367	225	349
G72	415	49	441	192	584	927	979	658	336	213	81	492

St.abw.	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
G1	87	89	222	95	502	719	614	531	464	218	129	90
G29a	960	298	2742	845	5047	10440	9294	10655	5766	1621	339	1084
G72	2334	113	2847	902	2443	2507	2735	1955	1215	1004	73	2342

In den Wintermonaten ist die Abflussbeschleunigung in Quellgebiet und G29a allgemein gering. Dies kann auf die allgemein geringen Winterabflüsse zurückgeführt werden (vgl. Abb. 6.7). Bei niedrigen Abflüssen sind im allgemeinen auch die Beschleunigungen noch relativ gering.

Am Gebietsauslass treten neben sommerlichen auch winterliche Peaks auf. Das Bild zeigt allgemein einen über das Jahr ausgeglichenen Verlauf der Abflussbeschleunigung. Peaks sind über das ganze Jahr verteilt. Die höchsten Spitzen befinden sich noch immer in den Sommermonaten. Hier macht sich das Durchfließen der Siedlung Ratingen aus. Das Verhalten im Winter könnte auch auf die Lage Ratingens in der Mitte des Einzugsgebietes zurückgeführt werden und die dadurch verursachte anthropogene Beeinträchtigung.

Allgemein herrscht im Winter ein geringeres Abflussvolumen im Gewässer vor. Damit genügen geringere Veränderungen, um die Beschleunigung sprunghaft ansteigen zu lassen.

Aufgrund der klimatischen Bedingungen im Einzugsgebiet müssen winterliche Peaks auf lang anhaltende Dauerregen zusammen mit kurzen Konzentrationszeiten zurückgeführt werden. Die sommerlichen Peaks röhren dagegen aus kurzen Schauerniederschlägen mit hohen Intensitäten her.

Aus Tab. 6.2 zeichnet sich ein ähnliches Bild ab: die Standardabweichung der Beschleunigung ist im Gebiet G72 in den Wintermonaten beachtlich. Die größte Variabilität zeigen noch immer die Sommermonate. Im Gegensatz zu den anderen Gebieten sind die Mittelwerte für die Monate Dezember bis Juli annähernd gleich.

Der potenziell naturnahe Zustand des Gebietsauslasses korreliert gut mit den kleineren, unbeeinflussten Teileinzugsgebieten. Ohne anthropogene Eingriffe reagieren die Gebiete also einheitlich.

Die Schwankungsbreite ist am Gebietsauslass sehr ausgeglichen. Das heißt, die Standardabweichung der verschiedenen Monate variiert hier über das Jahr geringer als G29a (siehe Abb. 6.10 und Tab. 6.2a & 6.2b). Der Gebietsauslass bildet mit 54,2 km² das größte der untersuchten Gebiete. Große Gebiete mit höherem MQ reagieren träger auf Veränderungen als kleinere Gebiete mit geringeren Abflüssen.

6.8 Reaktionsbereitschaft der Teilgebiete des Schwarzbachs

Bisher wurden die Teilgebiete hauptsächlich bezüglich ihrer Abflussbeschleunigung miteinander verglichen. In einem weiteren Schritt sollen nun aufgrund der Abflussdynamik Rückschlüsse auf das Abflussverhalten gezogen werden.

Ausgehend von den vier Teileinzugsgebieten G1, G29a, G34 und G72 (Istzustand) wird versucht, die im Schwarzbachgebiet für die hohe Beschleunigungen verantwortlichen Gebietseigenschaften aufzufinden zu machen. Die Unterschiede im Abflussverhalten der Teilgebiete werden dabei auf Unterschiede in den Gebietseigenschaften zurückgeführt (siehe Kap. 4.10).

Die Reaktionsbereitschaft eines Einzugsgebiets hängt ab von Ereignis- und Einzugsgebietscharakteristika. Inwieweit sie durch das Niederschlagsverhalten beeinflusst wird, kann in dieser Studie nicht betrachtet werden. Auch wenn dieses mit Sicherheit eine große Rolle spielt. In dieser Studie geht es darum, den Einfluss von Einzugsgebietskenngrößen zu interpretieren. Dies geschieht anhand eines Einzelereignisses vom 24. August 1994, das in den Teilgebieten sieben- bis zehnjährliche Beschleunigungen hervorgerufen hat. Die Abflussganglinien der Teilgebiete sind in Abbildung 6.11 zu sehen.

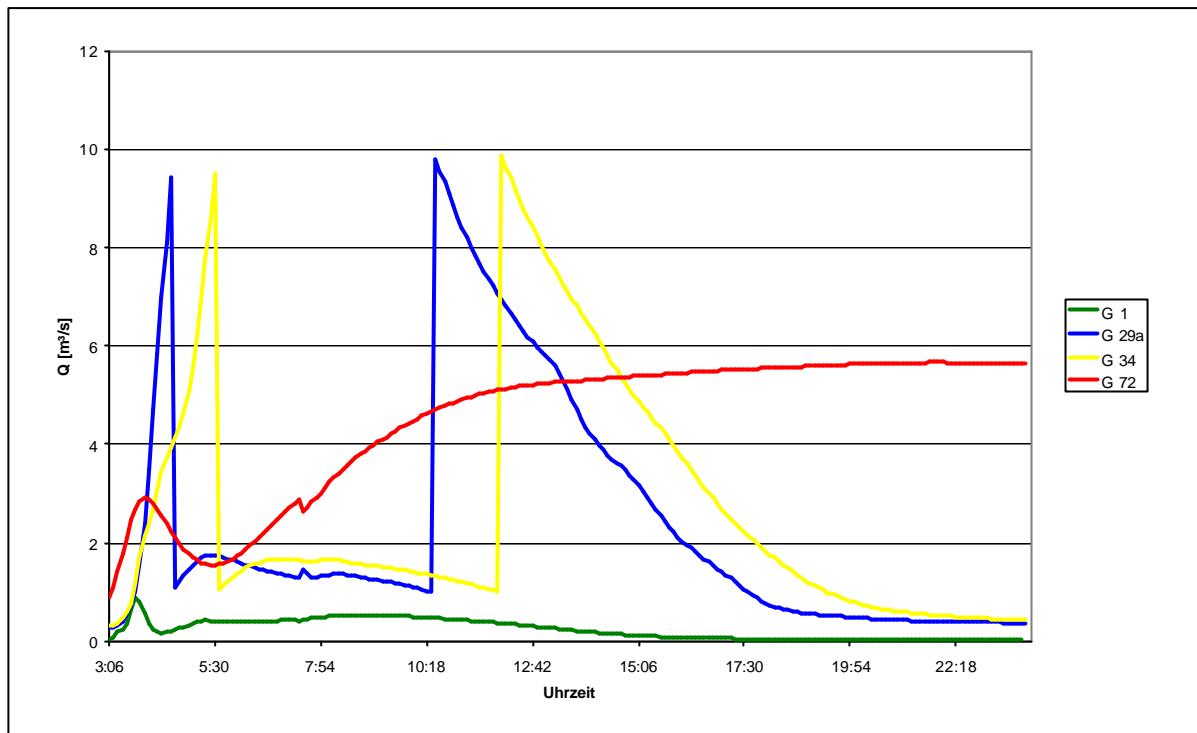


Abb. 6.11: Abflussganglinien der vier Teilgebiete (Istzustand, 6-min-Werte) vom 24.8.1994.

Es zeigen sich fast überall zwei Peaks, die gut fünf Stunden auseinander liegen. Am deutlichsten sind sie in den Teilgebieten G29a und G34 ausgeprägt. Auffallend ist bei diesen Gebieten neben dem extrem raschen Anstieg der Ganglinie - und damit einer hohen Beschleunigung - auch ein extremer Abfall nach Ende des Ereignisses. Der Abfluss des Schwarzbachs wird nur für eine äußerst kurze Zeitspanne angehoben. Nach Durchlauf des Ereignisses erreicht der Abfluss fast wieder sein ursprüngliches Niveau. Dies spricht dafür, dass kaum Wasser im System gehalten wird; die Speicherfähigkeit in diesen Gebieten ist sehr gering.

Das Abflussverhalten des Quellgebietes (G1) zeigt ein gänzlich anderes Bild: nach einem kleinen ersten Peak steigt der Abfluss nur langsam an und fällt auch sanft wieder ab. Ein zweiter Peak kann hier nicht mehr ausgemacht werden. Dieses Bild deutet auf gute Speichereigenschaften des Gebiets hin. Hier muss jedoch der Unterschied zur Abflussspendenganglinie (Abb. 6.12) erwähnt werden. In dieser Abbildung sind äußerst starke Reaktionen der Ganglinie zu erkennen. Der Verlauf des zweiten Peaks deutet auf bessere Speichereigenschaften im Vergleich zu den Gebieten G29a und G34 hin.

Auch im Gesamtgebiet (G72) existiert kein eindeutiger zweiter Peak. Nach einem ebenfalls nur schwach ausgeprägten ersten Peak steigt der Abfluss über die folgenden sechs Stunden kontinuierlich an, bis zu einem konstanten Abfluss von knapp sechs m^3/s . Das Abfallen der Ganglinie ist in der Abbildung nicht mehr dargestellt.

Die Annäherung an einen konstant hohen Abfluss beruht auf der länglichen Form des Einzugsgebiets G72. Die Hochwasserwellen, die im gesamten Gebiet relativ gleichzeitig gebildet werden erreichen die Messstelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten; die Wellen überschneiden sich nicht. Die ferner gelegenen Teile erzeugen ebenfalls Hochwasserwellen, die jedoch zeitverzögert - und damit auch leicht abgeflacht - an der Austrittsstelle des Gebietes auftreten. Dies führt zu einem Plateau auf hohem Niveau, das jedoch nicht die Extremwerte der Gebiete G29a und G34 erreicht.

Geometrische Einzugsgebietscharakteristika können also zu ungünstigen Überlagerungen der Abflusswelle führen. In kreisförmigen Gebieten beispielsweise kann es zu höheren Peaks kommen, da das Wasser aus dem Einzugsgebiet zeitgleich am Pegel ankommt. Hier wird also mit einem hohen, kurzen Peak der Abflussganglinie gerechnet.

In der vorliegenden Studie ist das Quellgebiet das kreisförmigste ($KF_index = 0,2$); je größer die Teilgebiete werden, desto langgestreckter werden sie (siehe Abb. C im Anhang). G1 müsste daher auch das Teilgebiet sein, das im Schnitt am schnellsten und stärksten reagiert. Dies wird durch die zeitliche Reihenfolge im Auftreten der Hochwasserscheitel bestätigt. Dass dieses Gebiet nicht so stark reagiert wie die größeren Gebiete, ist auf die Größe von nur $1,7 \text{ km}^2$ zurückzuführen. Um dies auszugleichen, sollen im Folgenden die Abflussspenden für die Interpretation herangezogen werden.

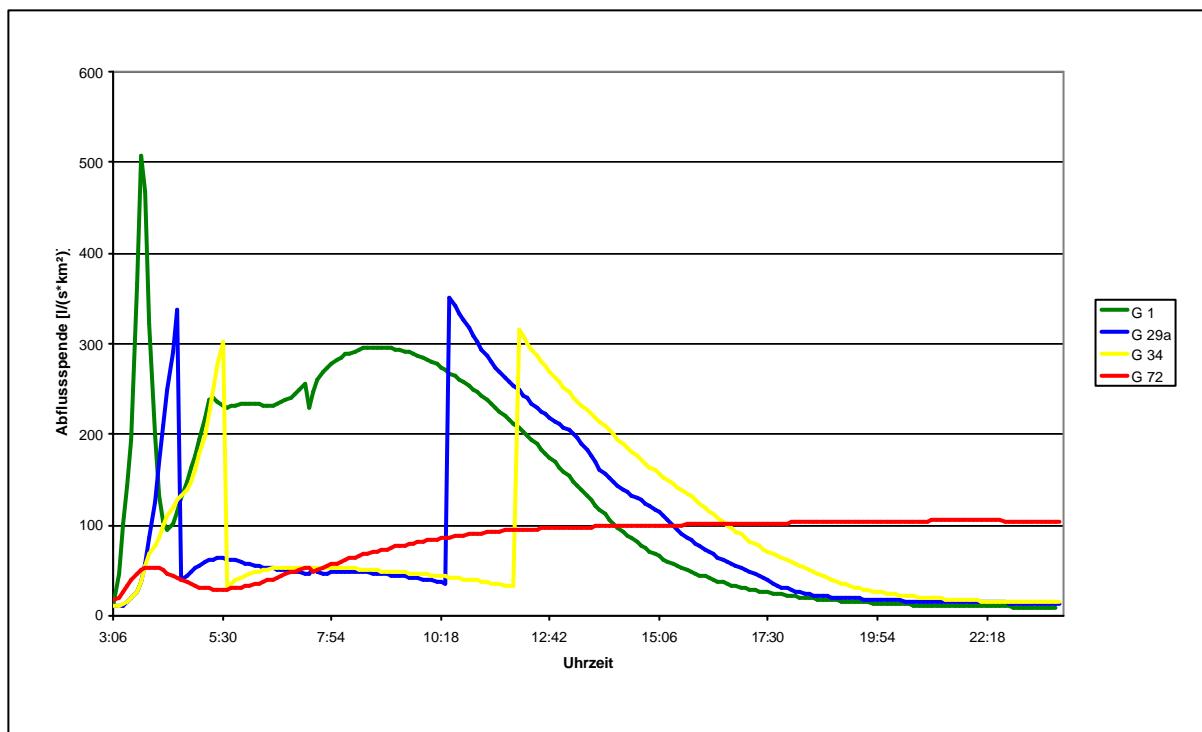


Abb. 6.12: Abflussspendenganglinien der vier Teilgebiete (Istzustand, 6-min-Werte) vom 24.8.1994.

Darüber hinaus bildeten die Abflussspenden auch die Grundlage zur Ermittlung der Beschleunigungsfunktionen. In Abbildung 6.12 sind die Ganglinien der Abflussspenden

dargestellt. Daraus geht hervor, dass das Teilgebiet G1 tatsächlich dasjenige ist, das am stärksten und am schnellsten reagiert.

Ein abweichendes Verhalten zeigt der Gebietsauslass, der trotz geringem Kreisförmigkeitsindex sehr schnell reagiert. In diesem Gebiet muss demnach etwas die Reaktion beschleunigen. Dies könnte beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad in der Mitte des Gebiets (Siedlung Ratingen) sein.

Die wesentlichen geometrischen Daten wie Kreisförmigkeitsindex, Formfaktor nach Horton sowie Umfang der Teilgebiete und deren Einzugsgebietsgrößen sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Tab. 6.3: Geometriedaten der Teilgebiete des Schwarzbachs: Einzugsgebietsgröße, Umfang, Kreisförmigkeitsindex und Formfaktor nach Horton.

	G1	G29a	G34	G72
Fläche [km²]	1,76	27,94	31,58	54,19
Umfang[km]*	7,29	31,53	35,86	72,78
KF_index [-]*	0,42	0,35	0,31	0,13
FF_Horton H*	0,33	0,26	0,25	0,13

* Daten berechnet aus den Shapefiles

Während sich die beiden mittleren Gebiete am Übergang in die Niederterrasse befinden, liegt der Unterlauf des Gebietsauslasses in der niederrheinischen Tiefebene; da hier auch der anthropogene Einfluss wieder zurückgeht, unterliegt der Schwarzbach hier keinen Beschleunigungen mehr.

Um die Ganglinien zu interpretieren, kann ferner die Lage bebauter Flächen herangezogen werden. Der Grad der anthropogenen Beeinträchtigung spielt hierbei eine untergeordnete Rolle, da er in den Teilgebieten zwischen 14 Prozent für den Gebietsauslass G72 und 22 Prozent im Gebiet G1 schwankt. Es variiert jedoch die Lage extremer Versiegelung innerhalb der Einzugsgebiete, die erheblichen Einfluss auf die Form der Abflussganglinie hat (Abb. 6.13).

Demnach reagiert das Gebiet am stärksten, das die überwiegende Bebauung im Quellgebiet aufweist (Fall a). Dies trifft im Falle des Schwarzbachs auf das Quellgebiet G1 zu. Bebauung im Pegelbereich führt zu einem zeitigeren Anstieg der Welle. Befindet sich die überwiegende Bebauung eines Einzugsgebiet in dessen Mitte (Fall b), so steigt die Welle etwas früher an und erreicht ähnliche Höhen wie im Fall c. Dies ist der Fall für das Gesamtgebiet G72, in dessen Mitte die Siedlung Ratingen liegt. Die Gebiete G29a und G34 sind diesem Schema nicht eindeutig zuzuordnen. Sie bilden eine Zwischenstufe zwischen Fall a und Fall c.

Aufgrund der unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen müssen diese allgemein gültigen Tatsachen im Schwarzbachgebiet auf die Abflussspendenganglinien bezogen werden.

Dies ist insbesondere deshalb wichtig, weil die unterschiedlichen Abflussvolumina der Teilgebiete berücksichtigt werden müssen. Sie können anhand des mittleren Abflusses (MQ) ebenfalls verglichen werden.

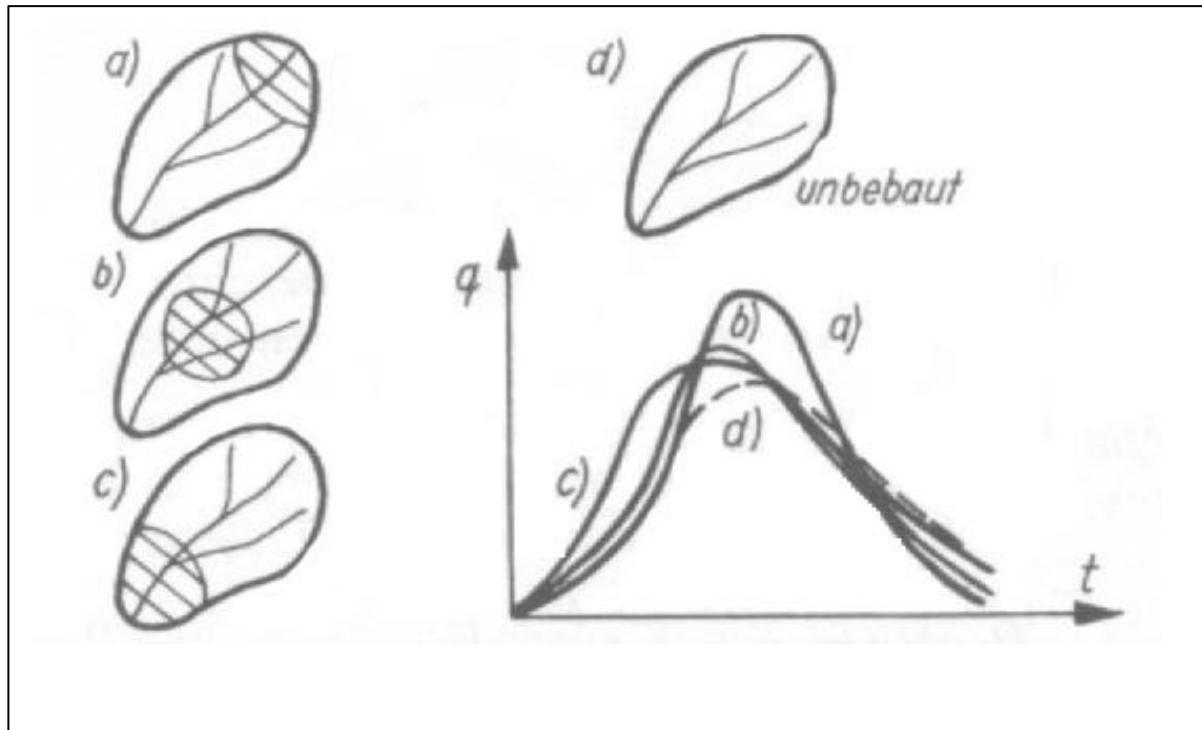


Abb. 6.13: Einfluss unterschiedlicher Lage bebauter Flächen (Stadtgebiete) auf die Abflussganglinie. Aus: Dyck & Peschke (1995).

Der MQ ergab sich aus einer Mittelung der Sechs-Minuten-Abflüsse der zehnjährigen Zeitreihe, die in dieser Studie ausgewertet worden ist^{6.2}. Die mittleren Abflüsse der vier Teilgebiete können Tab. 6.4 entnommen werden.

Hieraus können einige Feststellungen getroffen werden: Zunächst einmal ist der extrem niedrige Abfluss des Quellgebiets mit nur 36 l/s auffällig. Es ist mit 1,76 km² auch extrem klein. Nach etwa elf Kilometern Fließstrecke hat sich im Schwarzbach bereits ein MQ von 874 l/s eingestellt. Auf dieser doch relativ kurzen Strecke münden zahlreiche Seitengewässer in den Schwarzbach ein. Der größte von ihnen ist der Hasselbach kurz vor der Stelle G29a.

Tab. 6.4: Mittlere Abflüsse der vier Teilgebiete des Schwarzbach.

	G 1	G 29a	G 34	G 72
MQ [m ³ /s]	0,036	0,874	1,295	1,143

^{6.2} An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass dieser mittlere Abfluss der Teilgebiete nicht mit MQ Werten anderer Gebiete verglichen werden darf (vgl. Kapitel 4.10). Er wird hier lediglich dazu herangezogen, um die Prozesse innerhalb der vier Teilgebiete besser verstehen zu können.

Darüber hinaus unterscheiden sich die Teilgebiete G29a und G34 erheblich. Die beiden Stellen liegen zwar nur gut zwei Kilometer auseinander; in diesem kurzen Gewässerabschnitt vermehrt sich der Abfluss aber um die Hälfte.

Des Weiteren fällt auf, dass das Abflussvolumen bis zum Gebietsauslass G72 wieder abnimmt. Dies kann damit zusammenhängen, dass mehrheitlich influente Verhältnisse^{6,3} vorherrschen. Ferner entstehen Mengenverluste durch anthropogene Wasserentnahmen zur Trink- und Brauchwassernutzung^{6,4}. Einige kleinere Speicherseen sind in Abbildung C im Anhang auch zu erkennen.

Die Retentionswirkung des Grundwasserspeichers kann auch den lang anhaltenden zweiten Peak von G72 erklären. Nachdem das Grundwasser viel Wasser des Vorfluters aufgenommen hat (influente Verhältnisse), gibt es dies nach Abklirren des Hochwasserereignisses wieder an den Vorfluter ab (exfluente Verhältnisse). Dadurch wird die Dauer verlängert und gleichzeitig die Höhe des Peaks verringert.

Für die Beschleunigungen in den einzelnen Teilgebieten hat das zahlreiche Auswirkungen. Die größten Werte treten in Gebiet G34 auf. Während G29a ähnlich große Beschleunigungen erreicht, sind im Gebietsauslass G72 die Werte wieder geringer. Dies kann auf die guten Speichereigenschaften der Rheinischen Tiefebene zurückgeführt werden. Das Gebiet reagiert dadurch in seinem Unterlauf verzögert.

Die kurze zeitliche Verzögerung zwischen den Gebieten G29a und G34 kann dahingehend gedeutet werden, dass das silikatische Grundgebirge des Rheinischen Schiefergebirges eine geringe Durchlässigkeit aufweist. Ein großer Teil des Niederschlagswassers kommt direkt oberflächlich zum Abfluss. Die zeitliche Verzögerung resultiert also aus der Zeit, die das Wasser von Punkt G29a bis G34 benötigt.

6.9 Fazit

Die Abflussbeschleunigung als hydrologische Zielgröße zur ökologischen Bewertung zeigt sich in vieler Hinsicht sensitiv. Sensitivitätsanalysen wurden dabei anhand simulierter Daten des Schwarzbacheinzugsgebiets in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Dieses Gebiet zeichnet sich durch einen hohen Grad an Versiegelung aus. Dabei standen Daten in sechsminütiger Auflösung für den Ist- und den potenziell naturnahen Zustand zur Verfügung. Einzelne Teilgebiete konnten dabei getrennt betrachtet werden.

^{6,3} Der Wasserspiegel steigt so stark an, dass sich ein Gefälle aus dem Vorfluter in das Grundwasser einstellt und dementsprechend Flusswasser in das Grundwasser abfließt. Dies kann in ebenen Gebieten vorkommen (Höltig 1996).

^{6,4} Für den technischen und landwirtschaftlichen Gebrauch verwendbares, vorgeklärtes Grund- oder Oberflächenwasser ohne Trinkqualität.

Während die Wahl der Klassenbreite nur einen sehr geringen Einfluss auf die Grenzkurven hat, ist der Einfluss anthropogener Eingriffe auf die Abflussbeschleunigung immens. Eine Rückführung zu einem möglichst naturnahen Verhalten ist für die Ökologie daher von entscheidender Bedeutung. Im Schwarzbach sind im Vergleich zum naturnahen Zustand bis zu fünfmal erhöhte Beschleunigungen aufgetreten. Der naturnahe Zustand ergab sich lediglich durch die prozentuale Rückführung der versiegelten Gebiete auf die anderen Landnutzungen des Istzustandes. Daher können die extrem hohen Beschleunigungen allein auf den Versiegelungsgrad sowie dessen Lage im Einzugsgebiet zurückgeführt werden.

Die Datengenauigkeit bestimmt maßgeblich die Höhe der Grenzkurven. Durch geringe Datenauflösungen entsteht ein erheblicher Informationsverlust. In dieser Arbeit war es jedoch nicht möglich, Stundenwerte auf Werte höherer Auflösungen anzuheben. Dazu wären sowohl mehr Teilgebiete notwendig wie auch die Untersuchung längerer Zeitreihen. Damit könnten größere Jährlichkeiten berechnet werden, die für eine Kalibrierung notwendig wären.

Das saisonale Auftreten der großen Beschleunigungen konzentriert sich auf die Sommermonate. Hier sind die Beschleunigungen für den Gebietsauslass G72 (Istzustand) eineinhalb Mal so groß wie im Winter. Die Grenzkurven des Sommerhalbjahres sowie des gesamten Jahres sind deckungsgleich. Im Monat Juni treten die Jahresmaxima am häufigsten auf. Da das Ziel die Betrachtung des Kontinuums ist sowie als Grundlage für die Extremwertstatistik wurde dennoch das gesamte Jahr betrachtet.

Nach dem Auftreten von Extremereignissen muss eine Wiederbesiedlung der ursprünglichen Organismen sichergestellt werden. In der zweijährlichen Beschleunigung scheinen diese ökologischen Bedingungen mit den ökonomischen Forderungen am besten vereinbar. Zwei Jahre entsprechen einem typischen Entwicklungszyklus von Fließgewässerorganismen. Dadurch erhalten sie genügend Zeit, um sich von Extremen wieder zu erholen.

Die Jährlichkeiten wurden aus partiellen Serien der 30 größten Werte innerhalb der betrachteten zehn Jahre berechnet. Als Anpassungsfunktion wurde dabei die Exponentialfunktion gewählt. Sie findet in der Literatur bei partiellen Serien am häufigsten Anwendung. Das Bestimmtheitsmaß der Güte der Anpassung betrug im Schnitt 93 Prozent.

Hinsichtlich der Skalenbetrachtung sind neben der Einzugsgebietsgröße insbesondere die anthropogenen Eingriffe sowie Einzugsgebietscharakteristika für die großen Unterschiede ausschlaggebend. Anhand des Teilgebietes G34 konnte gezeigt werden, dass Niederschlagswassereinleitungen die Beschleunigung im Gewässer extrem erhöhen. Ausschlaggebend ist hier ein großes Entlastungsbauwerk der Autobahn.

Auch bei der Variabilität der Abflussbeschleunigung zeigte sich eine eindeutige anthropogene Beeinflussung. Peaks treten überwiegend in den Sommermonaten auf. Auch die Standardabweichung der Maximalwerte ist hier am höchsten. Allgemein zeigen die

naturnahen Zustände der Teilgebiete ein ähnliches Verhalten der Variabilität. Auch die Istzustände von Quellgebiet und Gebiet G29a spiegeln dieses Verhalten wider. Lediglich der Istzustand im Gebietsauslass weist Peaks über das ganze Jahr verteilt auf. Winterliche Peaks entstehen durch extrem lang anhaltende Dauerregen, in Zusammenhang mit einer verkürzten Konzentrationszeit durch die starke Versiegelung in der Einzugsgebietsmitte (Siedlung Ratingen).

Am sensitivsten reagiert die Abflussbeschleunigung auf die Datenauflösung und die Skale. Die Skalenabhängigkeit sollte im Folgenden dazu dienen, Übertragungsfunktionen zu ermitteln. Da diese in Abhängigkeit von Einzugsgebietskenngrößen erstellt werden sollen, wurde die Reaktionsbereitschaft der Gebiete anhand eines Einzelereignisses untersucht und aufgrund ihrer Kenngrößen interpretiert.

Die Ganglinien der vier Teilgebiete unterscheiden sich dabei immens. Die Gebiete G29a und G34 verhalten sich zeitversetzt gleich. Die Ganglinien steigen extrem stark an und fallen ebenso rasch wieder auf ihr Ursprungs niveau ab. Diese Gebiete sind geprägt durch geringes Speichervermögen und eine stark dominante Rolle des direkten oberflächlichen Abflusses. Ihre Einzugsgebiete sind geprägt von silikatischem Grundgebirge des Bergischen Landes.

Da die Größe der Teilgebiete das Abflussverhalten stark beeinflusst, wurden die Teilgebiete insbesondere aufgrund der Ganglinien der Abflussspenden miteinander verglichen. Im Quellgebiet wirkt sich dessen runde Form sowie die konzentrierte Lage der versiegelten Gebiete am Oberlauf aus. Aufgrund des großen Kreisförmigkeitsindex reagiert das Quellgebiet besonders schnell; dabei entstehen hohe Peaks.

Im Gebiet G72 fallen influente Verhältnisse in dessen Unterlauf (in der Rheinischen Tiefebene) ins Gewicht. Der große Grundwasserspeicher führt zu einer abgeflachten Ganglinie mit niedrigeren Peaks. Er ist auch mitverantwortlich für die geringeren mittleren Abflüsse in G72 im Vergleich zu G34. Die influenten Verhältnisse erklären, dass Wasser aus dem System verloren geht. Hierbei spielen ebenso Trink- und Brauchwasserentnahmen eine Rolle.

Die Beschleunigungen im Schwarzbachgebiet spiegeln also ebenfalls stark die geologischen Unterschiede wider: verkarstete Kalkgebiete im Quellbereich, undurchlässiges silikatisches Grundgebirge, Sandablagerungen der Niederterrasse sowie gute Speichereigenschaften der Rheinischen Tiefebene prägen die Abflussdynamik und damit auch die Beschleunigungen.

Aus dieser Tatsache kann geschlossen werden, dass eine Regionalisierung hinsichtlich der verschiedenen Flussgebietstypen nach LAWA vielversprechend erscheint.

7 ERGEBNISSE DER REGIONALISIERUNG

7.1 Korrelationsanalysen

7.1.1 Zusammenhang zwischen den Zielgrößen Abflussbeschleunigung und Hochwasserabfluss

Zunächst sollte die Abflussbeschleunigung als Zielgröße neben dem Hochwasserabfluss profiliert werden. Ihre erheblichen Auswirkungen auf die Ökologie wurden bereits in Kapitel 2.2.2 gezeigt. Ob sie jedoch als Zielgröße auch eigene Impulse bringt, kann durch eine Korrelationsanalyse mit dem Hochwasserabfluss festgestellt werden. Die Analyse des Zusammenhangs zwischen den beiden Zielgrößen geschieht zunächst anhand der Verhältnisse:

$$\frac{AB2}{AB1} - 1 \quad \text{und} \quad \frac{HQ2}{HQ1} - 1$$

Die Korrelationsanalysen wurden anhand der zehn ausgewählten Einzugsgebiete in Baden-Württemberg durchgeführt. Ein Vergleich der beiden Verhältnisgrößen ergibt eine negative Korrelation von $r = -0,278$. Das deutet auf einen schlechten Zusammenhang hin (siehe Tab. 5.1). Dahingegen besteht ein starker positiver Zusammenhang zwischen den Größen AB2 und HQ2 von $r = 0,948$. Aufgrund der Verhältnisbildung geht also der Zusammenhang verloren. Die Richtung des Zusammenhangs der Verhältniszahlen ist negativ, während die einfachen Wertepaare einen positiven Zusammenhang aufweisen.

Der starke positive Zusammenhang von AB2 und HQ2 muss hinsichtlich seiner Signifikanz untersucht werden, so dass eventuelle Scheinkorrelationen ausgeschlossen werden. Als Methode dienen partielle Korrelationsanalysen. Dabei wird untersucht, inwieweit diejenigen Variablen für die hohe Korrelation von AB2 mit HQ2 sorgen, die am stärksten mit den beiden Größen AB2 und HQ2 zusammenhängen.

Der mittlere Hochwasserabfluss MHQ hat von den Variablen den größten Zusammenhang mit der zweijährlichen Abflussbeschleunigung AB2 (95,8 %); gleichzeitig korreliert er auch mit dem zweijährlichen Hochwasserabfluss HQ2 zu 99,6 %. Kontrolliert man die hohe Korrelation zwischen AB2 und HQ2 auf Scheinkorrelationen, die aufgrund der starken Zusammenhänge beider Größen mit dem MHQ auftreten, so ergibt sich Folgendes: Der partielle Korrelationskoeffizient beträgt nur noch $r = -0,257$. Er ist also signifikant niedriger geworden. Der Zusammenhang zwischen den beiden Zielgrößen wird als „schwach“ interpretiert (siehe Tab.5.1). Er erreicht ähnliche Werte wie für die Verhältniszahlen. Die hohe Korrelation zwischen AB2 und HQ2 ist also überwiegend auf den mittleren Hochwasserabfluss zurückzuführen. Auffallend ist, dass sich sogar die Richtung des Zusammenhangs der beiden Größen ändert.

Weitere Kontrollvariablen wie der hundertjährige Hochwasserabfluss oder die Einzugsgebietsgröße verändern dieses Bild nur noch unwesentlich.

Insgesamt ist also der Zusammenhang zwischen den beiden Zielgrößen als gering zu bewerten. Da die beiden Größen unterschiedliche Auswirkungen auf die Ökologie der Fließgewässer haben muss davon ausgegangen werden, dass die Beschleunigung als Zielgröße sehr wohl neue Impulse zur ökologischen Bewertung liefert.

7.1.2 Korrelation zwischen Einzugsgebietskenngrößen

Die regionale Übertragung der Abflussbeschleunigung erfolgt anhand von zehn Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, für die eine große Anzahl an Gebietskenngrößen zur Verfügung stand.

Um allgemein anwendbare Übertragungsfunktionen zu erhalten, sollten diese von leicht verfügbaren Prädiktoren abhängen. Die 200 Variablen aus dem KLIWA-Bericht reduzierten sich auf diese Weise auf lediglich 20 mögliche erklärende Variablen (siehe Tab. B.2 im Anhang). Dabei blieb der Versiegelungsanteil als Variable enthalten; er liegt zwar bei den meisten Einzugsgebieten nicht vor, aufgrund der Voruntersuchungen am Schwarzbach-Einzugsgebiet wurde er dennoch beibehalten.

Die Matrix der Korrelationskoeffizienten zwischen diesen Variablen sowie der zweijährlichen Abflussbeschleunigung gehen aus Tabelle B.1 des Anhangs hervor. Dabei sind die Koeffizienten grau unterlegt, die auf dem Fünf-Prozent-Niveau einen starken Zusammenhang aufweisen.

Die Parameter, die am stärksten mit der zweijährlichen Abflussbeschleunigung korrelieren, zeigt Tabelle 7.1. Es handelt sich dabei um den gemessenen mittleren Hochwasserabfluss (MHQ_gem), die 100-, zehn-, und zweijährlichen Hochwasser (HQ100, HQ10 und HQ2), die

Einzugsgebietslänge (EZG_Länge), die Einzugsgebietsgröße (Area), den Umfang des Einzugsgebiets (Perimeter), die Gewässerlänge (Gew_länge), den Kreisförmigkeitsindex (KF_index) sowie den Formfaktor nach Horton (FF_Horton). Durch die hohen Korrelations-koeffizienten mit der Einzugsgebietsgröße, den Abflusshauptzahlen und dem Kreisförmigkeits-index können die Aussagen aus Kapitel 6.8 bestätigt werden.

Tab. 7.1: Korrelationskoeffizienten einiger Einzugsgebietskenngrößen mit der zweijährlichen Abflussbeschleunigung.

MHQ_gem	0,958
HQ100	0,954
HQ10	0,953
HQ2	0,948
EZG_Länge	0,849
Area	0,800
Perimeter	0,769
Gew_Länge	0,707
KF_Index	-0,513
FF_Horton	-0,512

Hieraus wird deutlich, dass insbesondere zwei Gruppen von Daten die Abflussbeschleunigung beeinflussen. Es handelt sich dabei einerseits um Hochwasserkenngrößen und andererseits um geometrische Daten. Der Gebietsniederschlag als ereignisspezifischer Kennwert weist nur einen sehr geringen Zusammenhang von 24 Prozent mit der AB2 auf. Weitere Niederschlags-kennwerte wurden als Prädiktoren ausgeschlossen.

Wie bereits in Kapitel 7.1.1 beim Verhältnis von AB2 mit HQ2 stellt sich für manche Faktoren die Frage des positiven oder negativen Zusammenhangs. Beispielsweise ist der Zusammenhang zwischen AB2 und der Einzugsgebietsgröße signifikant positiv. Dies scheint zunächst verwunderlich, da große Beschleunigungen durch kleine Konvektivzellen starker Intensitäten entstehen. Wird dabei nur ein Teil des betrachteten Gebietes berechnet, so ist mit kleineren Beschleunigungen zu rechnen als bei kleinen Gebieten; diese werden mit größerer Wahrscheinlichkeit von kleinen Konvektivzellen komplett getroffen und sollten daher schneller reagieren.

Um den starken positiven Zusammenhang von $r = 0,8$ zwischen den beiden Größen erklären zu können, müssen Interkorrelationen betrachtet werden. Beispielsweise ergibt sich eine logische Kausalkette aus folgenden Zusammenhängen: Je größer das Einzugsgebiet, desto niedriger liegt es im Durchschnitt. Damit weisen große Einzugsgebiete oft einen höheren Siedlungsanteil auf als kleinere. Die Abflusskonzentration in urbanen Gebieten ist stark verkürzt, woraus hohe Beschleunigungen resultieren.

7.2 Multiple lineare Regressionsanalysen

7.2.1 Ergebnisse der schrittweisen Vorgehensweise

Bei einer multiplen linearen Regression mit der schrittweisen Vorgehensweise erhält man mehrere Modelle mit zunehmender Anzahl an Prädiktoren. In Tabelle 7.2 ist die Modellzusammenfassung aufgeführt. Es werden fünf Modelle erstellt, wobei in jedem Schritt ein Prädiktor hinzukommt. In Modell fünf werden insgesamt also 5 Prädiktoren aufgenommen.

Es handelt sich dabei um den mittleren Hochwasserabfluss (MHQ_gem), die maximale Höhe im Einzugsgebiet (Höhe_max), das Gewässergefälle (Gew_gef), den Siedlungsanteil (Siedlung) sowie das gewichtete Gefälle über alle Gewässer im Einzugsgebiet (IS). Anhand der Änderungen des jeweiligen Bestimmtheitsmaßes, die sich von Modell zu Modell ergibt, kann auch ein Modell mit weniger Variablen gewählt werden. Grundsätzlich ist eine geringe Anzahl an Variablen vorzuziehen (siehe Kapitel 5.5.2). Verbessert sich also durch die Aufnahme einer Variablen das Bestimmtheitsmaß nur geringfügig, so kann das neue Modell wieder verworfen werden.

Tab. 7.2: Modellzusammenfassung der schrittweisen Vorgehensweise.

Modell	Güte			Änderungsstatistik		
	R	R ²	R ² corr	in R ²	in F	in Signifikanz von F
1	0,958	0,918	0,908	0,918	89,820	0,000
2	0,981	0,962	0,951	0,044	87,733	0,000
3	0,991	0,982	0,973	0,020	110,712	0,000
4	0,998	0,996	0,993	0,014	301,696	0,000
5	1,000	0,999	0,998	0,003	846,611	0,000

1: Einflussvariablen: MHQ

2: Einflussvariablen MHQ, Höhe_max

3: einflussvariablen MHQ, Höhe_max, Gew_gef

4: Einflussvariablen MHQ, Höhe_max, Gew_gef, Siedlung

5: Einflussvariablen MHQ, Höhe_max, gew_gef, Siedlung, IS

abhängige Variable ist AB2

Außer dem MHQ weist keiner der Prädiktoren einen starken Zusammenhang mit der zweijährlichen Beschleunigung auf. Die Regressionsbeziehung zwischen dem MHQ und der AB2 wird aus dem Streudiagramm in Abbildung 7.1 verdeutlicht. Dabei ist zu erkennen, dass die Lage der linearen Anpassungskurve überwiegend durch den Punkt in der oberen rechten Ecke bestimmt wird. Es handelt sich dabei um den Wert des Einzugsgebiets der Murg – dem Gebiet mit den höchsten mittleren Abflüssen. Aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten Gebieten kann nicht eindeutig festgestellt werden, ob es sich dabei um einen Ausreißer handelt oder ob nur in der vorliegenden Studie weitere Gebiete mit hohen mittleren Hochwasser-abflüssen fehlen.

Wie bereits in Kapitel 5.5.2 beschrieben neigt SPSS dazu, viele Prädiktoren aufzunehmen, die nur zufällig den Zusammenhang erhöhen. Das Regressionsmodell der Form:

$$AB2 = 3814 * MHQ - 169 * Höhe_max + 137528 * Gew_gef + \\ 13532 * Siedlung - 747164 * IS - 112814 \quad (7.1)$$

weist ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,99 auf; das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{korr} beträgt 0,998. Die Beschleunigung lässt sich mit diesem Modell also nahezu vollständig beschreiben.

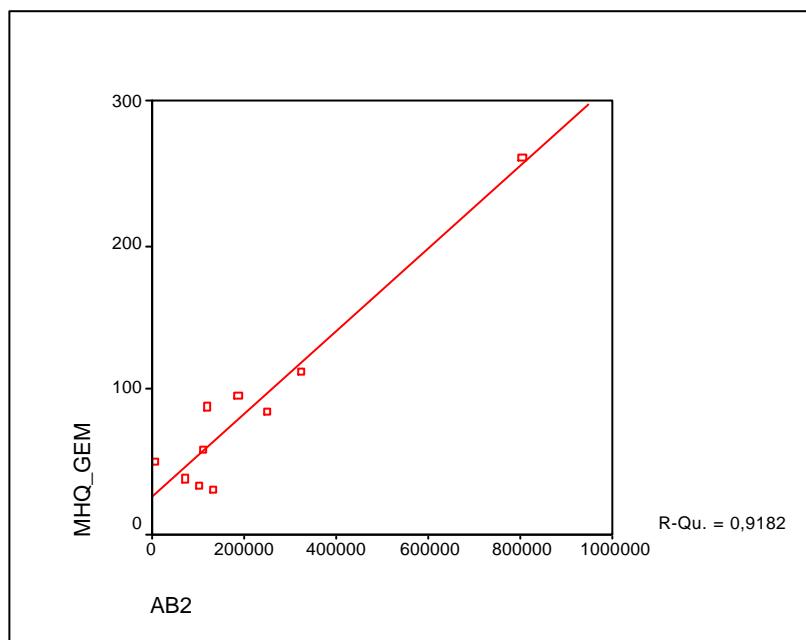


Abb. 7.1: Streudiagramm für den Zusammenhang zwischen MHQ und AB2

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass für eine sinnvolle Regression bei der Untersuchung von zehn Einzugsgebieten nur maximal drei Prädiktoren aufgenommen werden sollen (vgl. Kapitel 5.5.2). Auch dies wird bei der schrittweisen Vorgehensweise in SPSS verletzt.

Aufgrund der Änderungsstatistik, die aus Tabelle 7.2 hervorgeht, kann die Aufnahme weiterer Variablen ausgeschlossen werden, wenn sich die Güte des Modells dadurch nicht erheblich verbessert. Im vorliegenden Fall verbessert die Aufnahme eines zweiten Prädiktors (der maximalen Höhe) die Modellgüte um 4,4 %. Das Gewässergefälle als dritter Prädiktor hebt die Güte um weitere zwei Prozent an. Diese geringen Veränderungen zeugen davon, dass Modell 1 nach der schrittweisen Vorgehensweise in SPSS am geeignetsten ist. Die Beschleunigung wird also nur über den mittleren Hochwasserabfluss erklärt.

7.2.2 Ergebnisse der Residuen-Vorgehensweise

Um die Anzahl der aufgenommenen Variablen zu verringern und gleichzeitig zu gewährleisten, dass Variablen einen wahren Zusammenhang mit der Zielgröße AB2 aufweisen, wurde über einfache Regressionen verfahren. Dabei bildete zunächst die zweijährliche Beschleunigung die abhängige Variable. Schließlich wurden die unerklärten Residuen zur neuen Zielvariablen.

Aus Tabelle 7.3 geht das Ergebnis hervor: Als Prädiktor mit der größten Korrelation wird der gemessene mittlere Hochwasserabfluss aufgenommen (MHQ_gem). Für diesen ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,918$. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2_{\text{korr}} = 0,908$.

Tab.7.3: Modellzusammenfassung für die abhängige Variable AB2. Dargestellt sind neben dem Korrelationskoeffizient und den Bestimmtheitsmaßen auch der Faktor der Durbin-Watson-Statistik.

Prädiktoren	R	R^2	R^2_{korr}	D-W-Statistik
MHQ	0,958	0,918	0,908	-
MHQ & Höhe_max	0,981	0,962	0,951	1,896

Als Prädiktor, der die unerklärten Residuen am besten erklärt wird in einem zweiten Schritt die maximale Höhe im Einzugsgebiet aufgenommen. Sie zeigt einen signifikanten Zusammenhang von -0,695 mit den Residuen. Die Modellgüte beträgt dadurch 98 Prozent.

Als nächste erklärende Variable für die verbleibenden Residuen würde das Modell die Höhe_min aufnehmen, die mit $r = -0,424$ nur einen mittleren Zusammenhang mit den Residuen aufweist. Insgesamt ergibt das Modell damit ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,968$. Im Vergleich zu dem Modell mit nur zwei Prädiktoren wird also der Zusammenhang nur unwesentlich erhöht. Die Aufnahme weiterer Variablen wird also verworfen. Das Modell enthält zwei erklärende Variablen.

Für die Regressionsgleichung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$AB2 = 3426 * MHQ - 137 * \text{Höhe_max} + 54448 . \quad (7.2)$$

Der Faktor der Durbin-Watson-Statistik beträgt 1,896. Er liegt damit nahe bei 2. Das bedeutet, dass keine Autokorrelation der aufgenommenen Prädiktoren vorherrscht. Es kann von paarweiser statistischer Unabhängigkeit ausgegangen werden (Kapitel 5.4).

7.2.3 Ergebnisse des regionalen Modells für die Schwarzwald-Einzugsgebiete

Für den Aufbau eines Modells kommen verschiedene Vorgehensweisen in Frage. In einem „globalen Modell“ wird das gesamte Untersuchungsgebiet auf einmal betrachtet. Dieses Prinzip wird in den Kapiteln 7.2.1 und 7.2.2 durchgeführt. Gliedert man die Untersuchungsgebiete dagegen in einzelne Teilläume, so spricht man von „regionalen Modellen“. Ein solches soll im Folgenden vorgestellt werden.

Aufgrund der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 6) erscheint es vielversprechend, einen Regionalisierungsansatz differenziert nach den einzelnen Flussgebietstypen zu wählen. Anhand der Schwarzwald-Einzugsgebiete wird in dieser Arbeit ein solcher Ansatz entwickelt, da diese Gebiete einem Flussgebietstyp angehören.

Im Einzelnen handelt es sich um die sieben Einzugsgebiete von Breg, Kinzig, Elz, Glatt, Dreisam, Wiese und Murg. Pfinz, Rems und Seckach wurden aufgrund ihrer völlig anderen Einzugsgebietscharakteristika ausgeschlossen. Ihre Einzugsgebiete sind nicht vom Schwarzwald geprägt. Es sind also sieben Gebiete.

Das Ergebnis der Residuen-Vorgehensweise geht aus Tabelle 7.4 hervor.

Tab. 7.4: Ergebnisse der Residuen-Vorgehensweise für die Gebiete des Schwarzwald

Prädiktoren	R	R ²	R ² _{korr}	D-W-Statistik
MHQ	0,958	0,918	0,908	-
MHQ & Höhe_max	0,985	0,970	0,955	1,9

Die Bestimmtheitsmaße werden also gegenüber der Untersuchung aller zehn Einzugsgebiete noch einmal leicht erhöht. R² beträgt jetzt 97 %, während das korrigierte Bestimmtheitsmaß immer noch bei R²_{korr} = 0,955 liegt.

Das Regressionsmodell für die Schwarzwald-Einzugsgebiete nimmt damit die Form an:

$$AB2 = 3433 * MHQ - 167 * Höhe_max + 91110 . \quad (7.3)$$

Für die Regressionsbeziehung werden die selben Prädiktoren zur Erklärung der zweijährlichen Abflussbeschleunigungen herangezogen, wie bei der Betrachtung aller zehn Einzugsgebiete. Dies deutet auf den großen Einfluss der Schwarzwald-Gebiete hin. Das Bestimmtheitsmaß für alle Gebiete liegt geringfügig niedriger. Der Einfluss der drei Einzugsgebiete, die nicht im Schwarzwald liegen, kann damit als gering bezeichnet werden. Sie dürfen ein völlig anderes Bild aufweisen, das jedoch von den Schwarzwald-Gebieten überdeckt wird und nicht mehr zum Vorschein kommt. Eine

regionale Übertragung anhand der verschiedenen Flussgebietstypen nach LAWA erscheint damit sinnvoll. In der vorliegenden Arbeit konnte dieser Schritt aufgrund der geringen Zahl der untersuchten Gebiete nicht durchgeführt werden.

7.3 Fazit

Multiple lineare Regressionsanalysen dienen dazu, hydrologische Kenngrößen auf ungemessene Gebiete zu übertragen und sie flächendeckend darzustellen.

Zunächst wurde der Zusammenhang zwischen den Zielgrößen Abflussbeschleunigung und Hochwasserabfluss untersucht. Betrachtet man die beiden zweijährlichen Größen, so ergibt sich zunächst ein signifikant positiver Zusammenhang von knapp 95 Prozent. Dieser beruht jedoch weitestgehend auf einer Scheinkorrelation. Wird nämlich der mittlere Hochwasserabfluss mitberücksichtigt, so ergibt sich nur noch ein schwacher negativer Zusammenhang von 28 Prozent.

Für die Regionalisierung wurden schließlich aus dem KLIWA-Datensatz von 200 möglichen erklärenden Variablen diejenigen ausgewählt, die für die meisten Einzugsgebiete bereits vorliegen oder ohne größeren Aufwand bestimmbar sind. Daraufhin blieben 20 Variablen übrig.

Dabei zeigten sich signifikante Korrelationen von über 50 Prozent mit Hochwasserkenngrößen sowie mit geometrischen Daten. Für die Hochwasserkenngrößen besteht sogar durchgehend ein starker Zusammenhang von über 90 Prozent.

Das Regressionsmodell bei der schrittweisen Vorgehensweise nimmt fünf erklärende Prädiktoren auf; für das Gesamtmodell erhält man damit ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$. Die Prädiktoren erklären die Abflussbeschleunigung damit nahezu vollständig. Es hat sich jedoch gezeigt, dass einige der Variablen die Modellgüte nur rein zufällig erhöhen. Allgemein soll die Anzahl der in ein Regressionsmodell aufgenommenen Variablen maximal ein Drittel der Anzahl untersuchte Gebiete entsprechen, in diesem Fall also maximal drei.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird im Weiteren über die Residuen-Vorgehensweise verfahren. Dabei werden schrittweise einfache Regressionen durchgeführt. Zunächst bildet dabei die zweijährliche Abflussbeschleunigung die abhängige Variable, in den weiteren Schritten wird sie durch die unerklärten Residuen ersetzt.

Das Modell nimmt nunmehr zwei erklärende Variablen auf. Es handelt sich dabei um den mittleren Hochwasserabfluss sowie die maximale Höhe des Einzugsgebiets. Die Modellgüte beträgt noch immer knapp 92 Prozent.

Die regionale Übertragung über Einzugsgebietskenngrößen für verschiedene Flussgebietstypen zeigt vielversprechende Lösungsansätze. Daher wurden mit einem weiteren Regionalisierungsansatz nur diejenigen Einzugsgebiete untersucht, die eindeutig dem Schwarzwald zuzuordnen sind. Dies traf auf sieben der zehn Einzugsgebiete zu. Das ermittelte Modell nimmt die gleichen erklärenden Variablen auf und weist nun eine Güte von 97 Prozent auf; sie wird damit noch leicht erhöht.

Das heißt, dass die Schwarzwaldgebiete die Güte des Modells für alle Gebiete maßgeblich bestimmen. Die anderen Gebiete beeinflussen die Modellgüte nur unwesentlich. Die Beschleunigungen dieser Gebiete wird vermutlich durch andere Einzugsgebietskenngrößen besser erklärt. Dies bestätigt die Sinnhaftigkeit der Zuordnung zu Flussgebietstypen.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Um das in der EU-Wasserrahmenrichtlinie vorgeschriebene Ziel eines guten Potenzials für urbane Fließgewässer zu erreichen wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen von Niederschlagswassereinleitungen untersucht und bewertet. Dabei fungierte die Abflussbeschleunigung als Zielgröße. Sie zeigt sich als gut geeigneter Bewertungsmaßstab, da durch sie neue ökologische Gesichtspunkte gewonnen werden.

Ziel des Gewässerschutzes muss eine Veränderung des Anstiegs der Abflusskurve in Richtung potenziell naturnahem Verhalten und insgesamt eine Streckung des Impulses sein. Damit erhalten die Gewässerorganismen mehr Zeit zum Rückzug in geschützte Habitate.

Aufgrund der durchgeführten Sensitivitätsanalysen am Beispiel des Schwarzbach-Einzugsgebiets konnte gezeigt werden, dass die Abflussbeschleunigung als Zielgröße sehr gut geeignet ist. Sie sollte daher zur ökologischen Bewertung verstärkt herangezogen werden. Die Beschleunigung reagiert insbesondere hinsichtlich der Skale und der Datengenauigkeit sensitiv.

Um die Beschleunigungsfunktionen von Stundenwerten auf höhere Datenauflösungen anzuheben, wurden zwei unterschiedliche Verfahren erprobt. Dabei stellte sich heraus, dass ein einfach ermittelter Anhebungsfaktor nicht genügt. Vielversprechend ist es aber, große Jährlichkeiten der Stundenwerte an die Kurven hoher Auflösungen anzupassen. Die in dieser Studie untersuchte Zeitreihe von nur zehn Jahren ermöglichte es auch nur bis zu zehnjährliche Beschleunigungen zu ermitteln. Die Betrachtung einer längeren Zeitreihe ermöglicht Aussagen über 100- oder gar 200-jährliche Ereignisse. Diese könnten zielführend sein für die Ermittlung eines Anhebungsfaktors (Kalibrierungsfaktors).

Des Weiteren wären ähnliche Sensitivitätsanalysen anhand gemessener Daten sinnvoll. Dadurch könnten auch die zahlreichen ereignisspezifischen Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die die Beschleunigung maßgeblich mitbestimmen. So ist insbesondere in urbanen Gebieten bekannt, dass

das Kanalnetz nur bei kurzen Starkregenereignissen anspringt. Im Kanalnetz kommt es zu kurzen Konzentrationszeiten, was wiederum die Beschleunigung im Fließgewässer erhöht.

Betrachtet man schließlich das Verhalten der Abflussdynamik verschiedener Gebiete, so können auch hier ereignisspezifische Parameter einbezogen werden. Dadurch werden Aussagen über Konzentrationszeiten und zeitliches Verhalten der Gebiete möglich. Ein erster Versuch erfolgte in dieser Arbeit anhand geometrischer Daten wie dem Kreisförmigkeitsindex.

Um die Abflussbeschleunigung als Zielgröße auf ungemessene Gebiete übertragen zu können, sind mehr Gebiete für die Untersuchung notwendig. Aufgrund der geringen Anzahl an Einzugsgebieten in dieser Studie war keine Validierung des entwickelten Modells möglich. Eine Modellprüfung anhand von Tests konnte ebenso wenig durchgeführt werden. Die hohen Bestimmtheitsmaße der in dieser Studie entwickelten Modelle sind jedoch eine vielversprechende Grundlage, für weitere Untersuchungen.

Da in der Zukunft eine Regionalisierung nach verschiedenen Flussgebietstypen nach LAWA angestrebt wird, müssen weitere Gewässertypen untersucht werden. Dafür müssen zunächst die Flussgebietstypen der LAWA auf ihre Eignung kontrolliert werden. Schließlich soll der Ansatz dahin führen, standardisierte Beschleunigungsfunktionen für die verschiedenen Fließgewässerlandschaften zu erstellen. Dabei sollen die jeweiligen Einzugsgebiets-charakteristika berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits ein erster Ansatz an Mittelgebirgsgebieten im Schwarzwald erarbeitet.

Auffallend war ferner, dass die Lage der linearen Regressionskurve zwischen AB2 und MHQ insbesondere durch das Einzugsgebiet der Murg bestimmt wurde. Bei nur zehn Einzugsgebieten stellt sich die Frage, inwieweit diese Gebiete repräsentativ oder zufällig sind. Repräsentative Aussagen über die Güte der Regressionsfunktionen sind ebenfalls erst dann möglich, wenn mehr Gebiete aufgenommen werden. Dadurch können auch eventuelle Ausreißer eliminiert werden.

Schließlich müssen die gestellten Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen praxistauglich festgelegt werden. Diese sollen bei der Planung wasserbaulicher Maßnahmen als Richtlinien gelten, um neben wirtschaftlichen und sozialen Aspekten vor allem die ökologischen Folgen anthropogener Eingriffe zu berücksichtigen. Dafür müssen zunächst Drosselkurven ermittelt werden, durch die die Auswirkungen von Entlastungsabflüssen minimiert werden können. Als Maßstab für die Einleitung gilt dabei die maximal im naturnahen Gewässer auftretende Beschleunigung.

LITERATURVERZEICHNIS

ATV (1993): Weitergehende Anforderungen an Mischwasserentlastungen. ATV-Arbeitsberichte. Korrespondenz Abwasser 40. Jg. Nr. 5, S. 802-806.

BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE & R. WEIBER (1996): Multivariate Analysemethoden. 8. Auflage. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.

BAUMGARTNER, A.P. & H.J. LIEBSCHER (1996): Allgemeine Hydrologie. 2. Auflage. Gebrüder Borntraeger: Berlin, Stuttgart.

BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Wiley-VCH GmbH: Weinheim, S. 16-32.

BORCHARDT, D., J. FISCHER & E. MAUSCH (1998): Auswirkungen von Mischwassereinleitungen auf den Stoffhaushalt und die Biozönose von Fließgewässern. Ökologische und wasserwirtschaftliche Folgerungen. GWF Wasser – Abwasser 139 Nr. 7, S. 418-423.

BORCHARDT, D., C. XANTHOPOULOS & G. WARG (1994): Verfahren zur Abschätzung des Gefährdungspotentials von Mischwassereinleitungen in Fließgewässer. Wasserwirtschaft 84 Nr. 9, S. 480-486.

BORCHARDT, D. (1992): Wirkungen stoßartiger Belastungen auf ausgewählte Fließgewässerorganismen. Ein Beitrag zur Beurteilung ökologischer Schäden durch Niederschlagswassereinleitungen aus Kanalisationen. Wasser-Abwasser-Abfall 10. Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft: Kassel.

BÜHL, A. & P. ZÖFEL (2000): SPSS für Windows Version 10. Addison-Wesley: Bonn, Paris.

BÜRGEL, T., U. GEIGER, S. KUTZNER, M. PRINZ & L. WILLEMS (2000): Gedanken zur Festlegung von Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen. Wasserwirtschaft 90 Nr. 7-8, S. 389-393.

- BWK (Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V.) (2001): Ableitungen von Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse. Merkblatt 3. BWK e.V. Düsseldorf.
- CHOVANEC, A., P. JÄGER, M. JUNGWIRTH, V. KOLLER-KREIMEL, O. MOOG, S. MUHAR & S. SCHMUTZ (2000): The Austrian way of assessing the ecological integrity of running waters: a contribution to the EU Water Framework Directive. *Hydrobiologia* 422/423, S. 445-452.
- CLAUSEN, B. & B. BRIGGS (2000): Flow variables for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance. *Journal of Hydrology* 237, S. 184-197.
- DEMUTH, S. (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in Westeuropa. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 1, Hrsg. Prof. Dr. C. Leibundgut. Selbstverlag: Freiburg.
- DVWK (2000): Gestaltung und Pflege von Wasserläufen in urbanen Gebieten. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 252/2000.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Regeln zur Wasserwirtschaft 251/1999.
- DVWK (1996): Fluss und Landschaft – ökologische Entwicklungskonzepte. DVWK Merkblätter 240/1996.
- DVWK (1985): Niederschlag – Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer. Regeln zur Wasserwirtschaft 124/1985.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3., stark bearbeitete Auflage. Verlag für Bauwesen: Berlin. 536 Seiten.
- EMSCHERGENOSSENSCHAFT (1991): Konzept zur Verminderung der Hochwasserabflüsse. Materialien zum Umbau des Emschersystems Heft 3: Essen.
- FENZ, R. (2001): Emissions- und Immissionsüberlegungen für Mischwasserentlastungen. Teil I: Emissionsanforderungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft Jg. 53, Heft 3/4, S.66-71.
- FEZER, F. (1979): Topographischer Atlas Baden-Württemberg: eine Landeskunde in 110 Karten. Hrsg.: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg. Neumünster: Wacholtz, 259 Seiten.
- FISCHER, J. (1994): Der Einfluss von Mischwassereinleitungen auf die Gewässerbiozönose kleiner Bäche im ländlichen Raum. Erweiterte Zusammenfassungen der 10. DGL-Jahrestagung: Hamburg, S. 413-414.

- GAMMETER, S. (1996): Einflüsse der Siedlungsentwässerung auf die Invertebraten-Zönose kleiner Fließgewässer. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Diss. ETH Nr. 11673.
- GDI (2002): Pilot-Projekt des Landes Nordrhein-Westfalen zur Bereitstellung von gewässerbezogenen Daten zur Bewertung von Niederschlagswassereinleitungen via Internet. <http://www.gdi-nrw.de> (6.5.2002).
- GRABERT, H. (1998): Abriss der Geologie von Nordrhein-Westfalen. Schweizbart: Stuttgart, 351 Seiten.
- GROTTKER, M., J. NAUHAUS, M. SCHMELZER, S. TEICHERT, T. EINFALT, M. JESSEN (2001a): Konzept für die Regenwasserbehandlung in Schleswig-Holstein.
- GROTTKER, M., T. EINFALT, M. JESSEN (2001b): Vermeidung von hydraulischem Stress durch Begrenzung der Abflussbeschleunigung von Regenwassereinleitungen.
- GROTTKER, M. ET AL (2001c) : Wissenschaftlich-technische Grundlagen zur Bewertung hydraulischer Gewässerbelastungen durch Regenwassereinleitungen, Forschungsbericht für das Landesamt für Natur und Umwelt, Schleswig-Holstein.
- GROTTKER, M., T. EINFALT, M. JESSEN, D. TETZLAFF (2002): Limited Flow Acceleration – a Measure for Reduction of Hydraulic Stress from Storm Flows into Rivers and Creeks. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Storm Drainage, Portland, USA, No. 9.
- HOLDER, R.L. (1985): Multiple Regression in Hydrology. Institute of Hydrology, Wallingford.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Auflage. Enke-Verlag: Stuttgart; 439 Seiten.
- HÜTTE, M. (2000): Ökologie und Wasserbau. Ökologische Grundlagen von Gewässerverbauung und Wasserkraftnutzung. Parey Buchverlag: Berlin. 281 Seiten.
- HYDROTEC (2001): Das Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM. Unveröffentlicht.
- IHF (INSTITUT FÜR HYDROLOGIE DER ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG)(2000): Analyse der Entstehung extremer Hochwasser. Abschlussbericht für die zweite Projektphase, KLIWA-Projekt A 2.1.6. Bericht Nr. 100, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, unveröffentlichter Bericht.

- IRMER, U. (2000): Die neue EG-Wasserrahmenrichtlinie: Bewertung der chemischen und ökologischen Qualität von Oberflächengewässern. *Acta hydrochimica hydrobiologia* 28, S. 7-14.
- KÄHLER, W.M. (1998): SPSS für Windows: eine Einführung in die Datenanalyse für die aktuelle Version. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. Vierweg: Braunschweig, Wiesbaden.
- KLEEBERG, H.B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie. In: Kleeberg, H.B. (Hrsg.): Hydrologie und Regionalisierung; Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Wiley-VCH GmbH: Weinheim, S. 3-12.
- KLEMENS, V. (1987): Hydrological and Engineering Relevance of Flood Frequency Analysis. In Singh: Hydrologic Frequency Modeling (3). Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis, 14-17 May 1986, Louisiana State University, Baton Rouge, USA. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo.
- KÖHLER, W., G. SCHACHTEL & P. VOLESKE (1995): Biostatistik. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.
- KOPPE, C. (2001): Analyse von Niederschlags-, Abfluss- und physiographischen Daten in Hinblick auf die Hochwasserbildung für verschiedene Gebiete im Südschwarzwald. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau unter Leitung von Prof. Ch. Leibundgut. Unveröffentlicht.
- KOTLARSKI, S. (1999): Die EU-Wasserrahmenrichtlinie – nötige hydrologische Grundlagen. Hauptseminar am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg unter Leitung von Prof. Ch. Leibundgut. Unveröffentlicht.
- LANU (LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN)(1999): Hinweise zur Bewertung hydraulischer Auswirkungen in Fließgewässern bei der Einleitung von Niederschlagswasser aus Trennkanalisation. Merkblatt 2 (Entwurf vom 22.7.1999), Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbeck.
- LEHNER, B. (1999): Entwicklung einer GIS-gestützten Methode zur Bestimmung der räumlichen Dürregefährdung mittels regionalisierter Rezessionskurven. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie in Freiburg unter Leitung von Prof. Ch. Leibundgut. Unveröffentlicht.

- LEIBUNDGUT, C. (1996): Abflussdynamik – unbekannte Größe für den Gewässerschutz. In: L.W. & W.B.W.e.V.(WBW)(Hrsg.): Lebensraum Gewässer – nachhaltiger Gewässerschutz im 21. Jahrhundert, Heidelberg, S. 37-51.
- LESER, H. (1997): Diercke Wörterbuch Allgemeine Geographie. Westermann: Braunschweig.
- LEWIS-BECK, M.S. (1991): Applied Regression – An Introduction. Sage University paper, Newbury Park, California.
- LFU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) (1993): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Rheingebiet, Teil 1, Hoch- und Oberrhein.
- MICHAUD, J., K. HIRSCHBOECK, M. WINCHELL (2001): Regional variations in small-basin floods in the United States. Water Resources Research, Vol. 37, No.5, S. 1405-1416.
- MOSS, D., M. FURSE, J.F. WRIGHT & P.D. ARMITAGE (1987): The prediction of the macroinvertebrate fauna of unpolted running-water sites in Great Britain using environmental data. Freshwater Biology 17, S. 41-52.
- MUHAR, S. (1996): Bewertung der ökologischen Funktionsfähigkeit von Fließgewässern auf Basis typspezifischer Abiotik und Biotik. Wasserwirtschaft 86 Nr. 5, S. 238-242.
- OSTROWSKI, M.W. (1982): Ein Beitrag zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz. Mitteilungen 42 der Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, 188 Seiten.
- PODRAZA, P. (1994): Auswirkungen von Regenentlastungen der Mischwasserkanalisation auf die Makroinvertebratenzönose eines Stadtbaches. Erweiterte Zusammenfassungen der 10. DGL-Jahrestagung: Hamburg, S. 824-828.
- PODRAZA, P. (1991): Der Einfluss von Mischwasserbeschlügen aus einem Regenüberlauf auf die Makrozoobenthoszönose eines Stadtbaches – Erste Ergebnisse. In: H. Schuhmacher & B. Thiesmeier (1991)(Hrsg.): Urbane Gewässer. Essen, S. 175-186.
- POFF, N.L., D.J. ALLAN, N.B. BAIN, J.R. KARR, K.L. PRESTEGAAARD, B.D. RICHTER, R.E. SPARKS & J.C. STROMBERG (1997): The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. Bio Science Vol. 47 No. 11, S. 769-783.
- RANGE, W. & W.D. SCHMIDT (1999): Abfluss, Gewässermorphologie und Biologie als Wirkungsdreieck in Fließgewässern. Wasserwirtschaft 89 Nr. 2, S. 84-88.
- RICHTER, B.D., J.V. BAUMGARTNER, R. WIGINGTON & D.P. BRAUN (1998): How much water does a river need? Freshwater Biology 37, S. 231-249.

- SCHAARDT, V. & E. MEIßNER (2000): Hydraulische Belastbarkeit von Fließgewässern. Vergleich zwischen ATV-DWK-M153 und BWK-Entwurf-M3. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall (47) Nr. 8, S. 1124-1130.
- SCHLITTGEN, R. (2000): Einführung in die Statistik. 9. Auflage. R. Oldenbourg Verlag: München, Wien.
- SCHMIDT, G. (2000): Identifizierung gewässerökologischer Schäden durch Mischwasser-einleitungen. Beispiele aus dem südhessischen Raum. Korrespondenz Abwasser – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall Jg. 47 Nr. 6, S. 882-889.
- SCHMUTZ, S. (1996): Anthropogene Eingriffe in Fließgewässer und deren Einfluss auf die Lebensgemeinschaften. Wasserwirtschaft 86 Nr. 5, S. 230-235.
- SCHÜTTLER, A. (1969): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen: 138 Kartenausschnitte. Hrsg.: Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. Bad Godesberg, 345 Seiten.
- SCHWENTKER, F. & U. STREIT (1983): Regionale Übertragung hydrologischer Parameter – ein Überblick. In: Kurvvortrag vor dem AK Hydrologie, Jahrestreffen vom 17.-20. November 1983 in Göttingen.
- SCHWOERBEL, J. (1993): Einführung in die Limnologie. 7. Auflage. Fischer-Verlag: Stuttgart, Jena.
- WAGNER, A. & W.F. GEIGER (1997): Hydraulische Gewässerbelastungen durch stoßartige Einleitungen der Stadtentwässerung. Wasserwirtschaft 87 Nr. 6, S. 308-312.
- WIDERA, F. & T. RENNERICH (1991): Zum Einfluss von Kanalentlastungen auf die Zoozönosenstruktur eines rückgebauten Stadtbaches. In: Urbane Gewässer. Reihe Ökologie, Band 4. Westarp Wissenschaften: Essen, S. 187-202.

AAnhang A: Abbildungen zu den Sensitivitätsanalysen

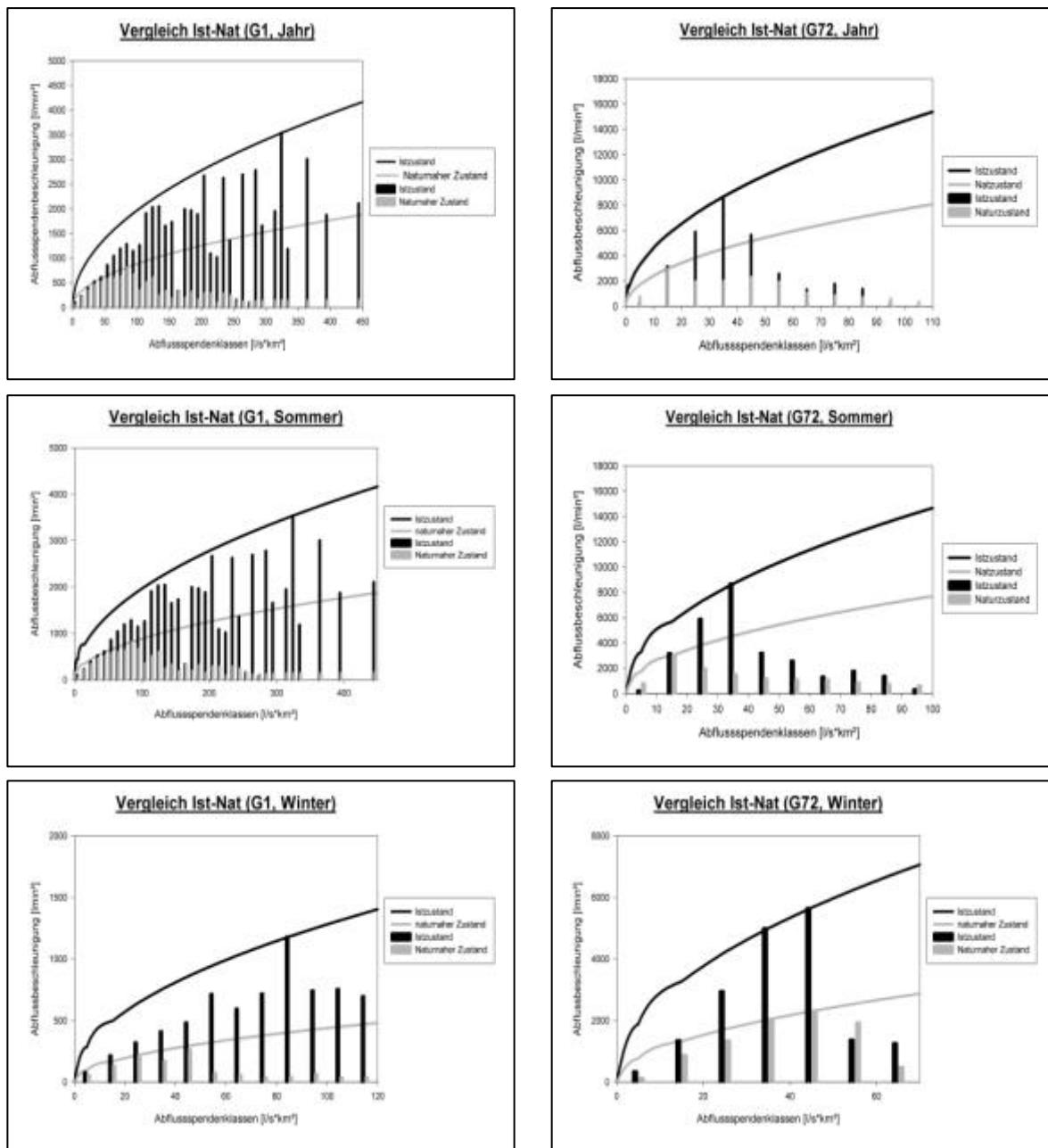


Abb. A.1: Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die Teilgebiete G1 und G72 des Schwarzbachs, jeweils im Vergleich der Jahreswerte mit den Sommer- und Winterhalbjahren.

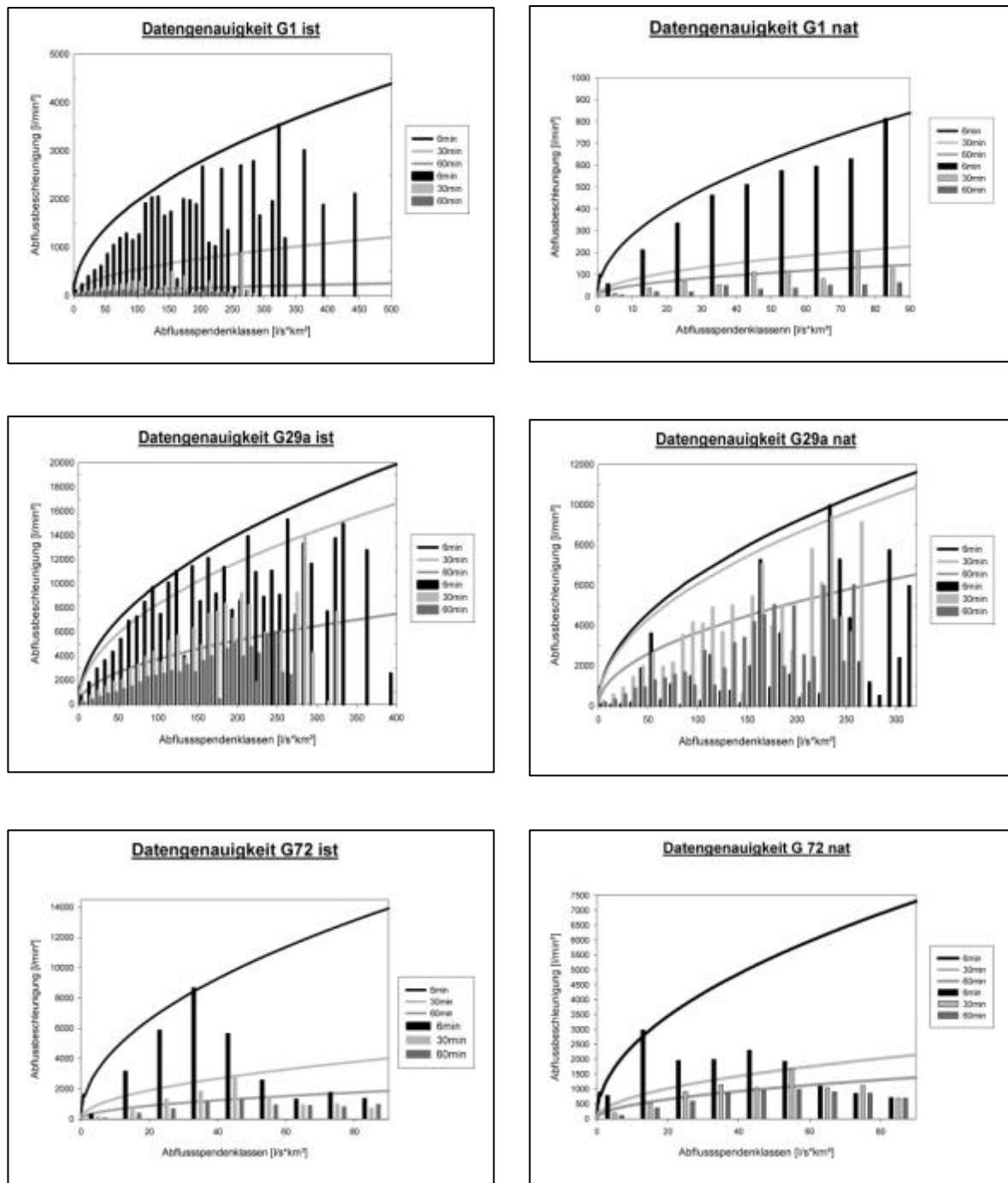


Abb. A.2: Einfluss der Datengenauigkeit für die drei Teilgebiete G1, G29a und G72 des Schwarzbach im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand.

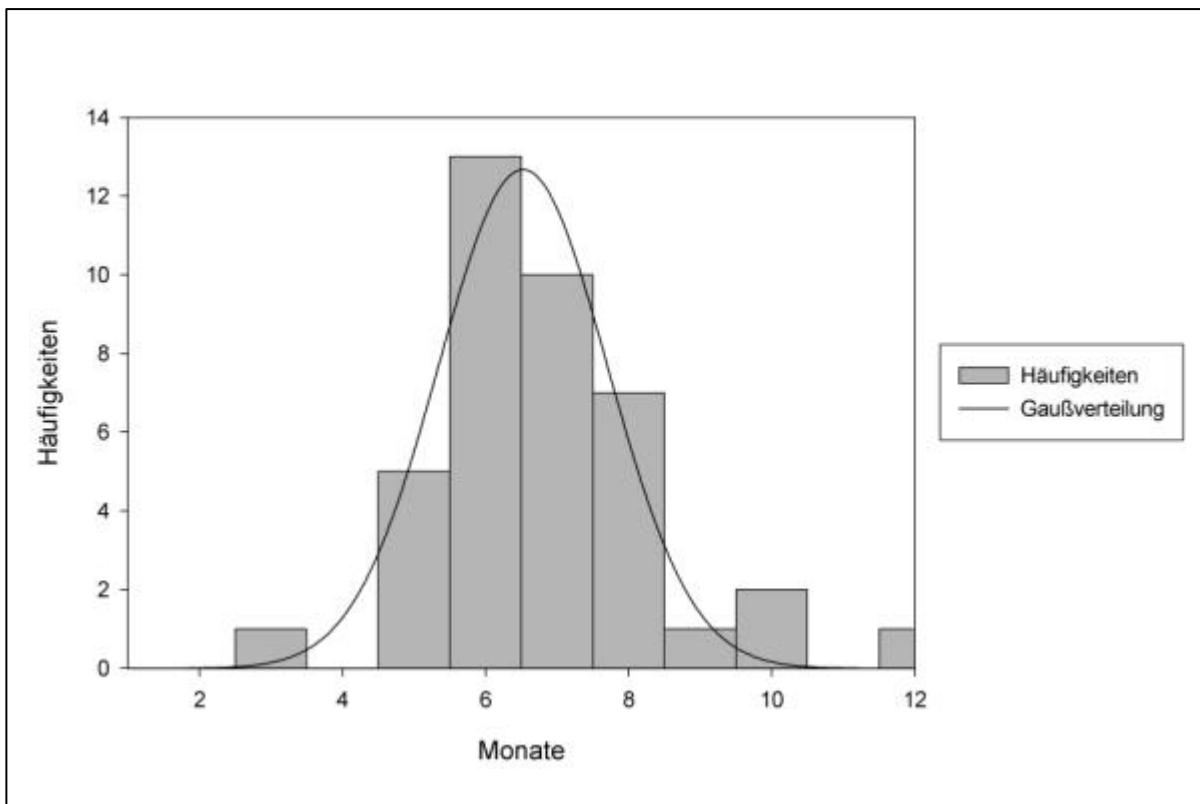


Abb. A.4: Häufigkeiten des Auftretens der maximalen Abflussbeschleunigung in den einzelnen Monaten (aus den Stundenwerten im Istzustand). Aufsummiert über alle betrachteten Teilgebiete des Schwarzbachgebiets.

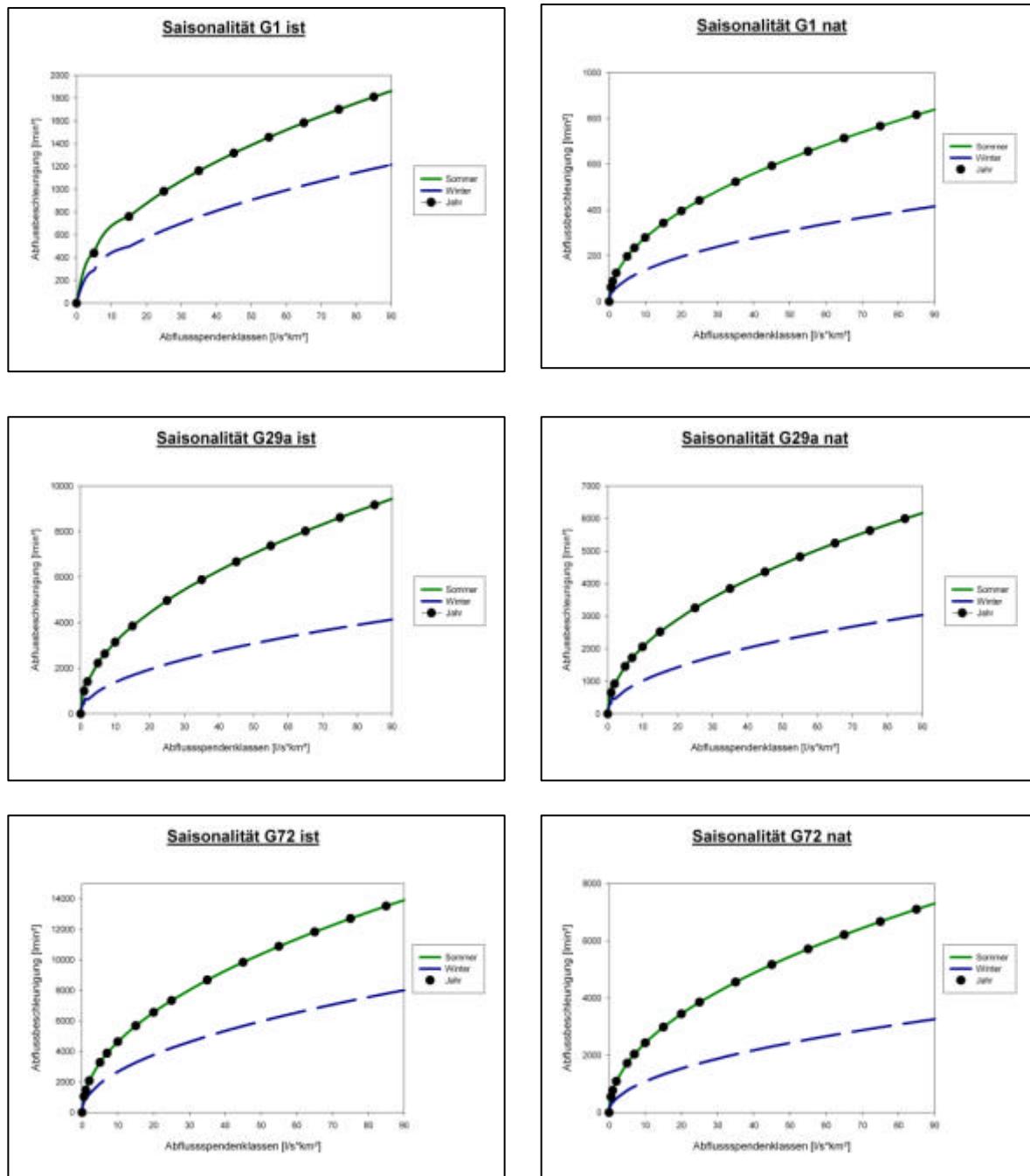


Abb. A.3: Einfluss der Saisonalität in den Teilgebieten G1, G 29a und G 72 des Schwarzbach im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand für die sechsminütige Datenauflösung.

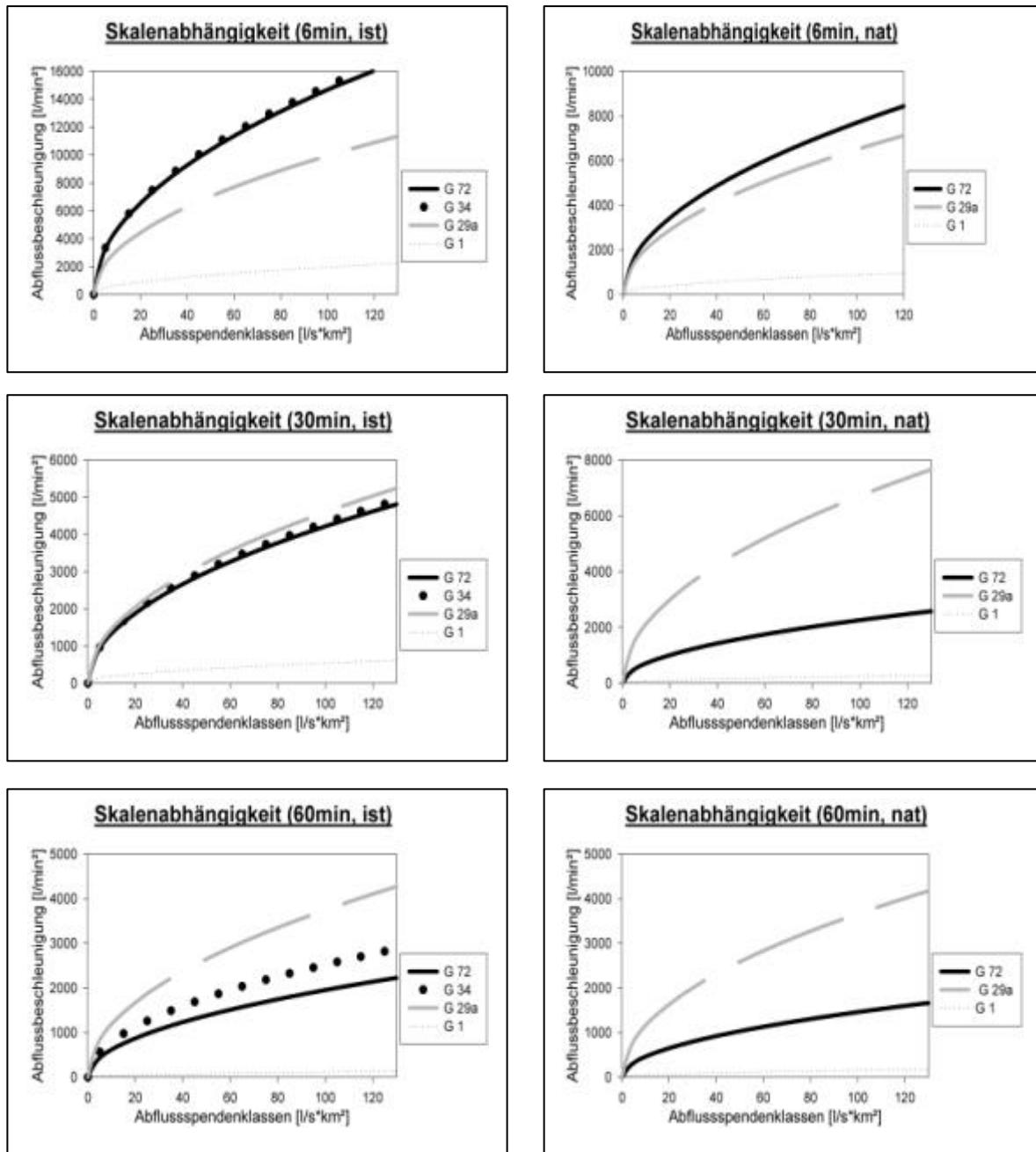


Abb. A.5: Skalenabhängigkeit für die drei untersuchten Datengenauigkeiten (6min, 30min, 60min) im Vergleich des Ist- mit dem potenziell naturnahen Zustand. Für das Gebiet G 34 lagen dabei nur die Ist-Werte vor.

Anhang B: Tabellen zum Regionalisierungsansatz

Tab. B.1: Auszüge aus der Interkorrelationsmatrix

	AB2	MHQ_gem	HQ2	HQ10	HQ100	Area	Perimeter	EZG_Läng
AB2	1	0,958	0,948	0,953	0,954	0,8	0,769	0,849
MHQ_gem	0,958	1	0,996	0,996	0,994	0,81	0,732	0,849
HQ2	0,948	0,996	1	0,999	0,996	0,779	0,693	0,818
HQ10	0,953	0,996	0,999	1	0,999	0,794	0,707	0,827
HQ100	0,954	0,994	0,996	0,999	1	0,81	0,722	0,829
Area	0,8	0,81	0,779	0,794	0,81	1	0,929	0,919
Perimeter	0,769	0,732	0,693	0,707	0,722	0,929	1	0,894
EZG_Länge	0,849	0,849	0,818	0,827	0,829	0,919	0,895	1
FF_Horton	-0,512	-0,491	-0,475	-0,467	-0,441	-0,278	-0,369	-0,633
KF_Index	-0,513	-0,363	-0,333	-0,341	-0,348	-0,381	-0,668	-0,469
Umf_ent	0,472	0,334	0,298	0,305	0,309	0,366	0,672	0,463
Gew_Länge	0,707	0,759	0,732	0,749	0,951	0,951	0,861	0,877
Gew_Dichte	0,28	0,44	0,4	0,402	0,415	0,562	0,409	0,479
Höhe_min	-0,493	-0,321	-0,283	-0,309	-0,335	-0,536	-0,522	-0,418
Höhe_max	0,09	0,301	0,304	0,284	0,279	0,119	-0,111	0,028
Slope_mean	0,161	0,364	0,369	0,354	0,351	0,154	-0,113	0,057
Siedlung	0,196	-0,001	-0,044	-0,029	-0,026	0,357	0,498	0,419
Gew_gef	-0,232	-0,148	-0,148	-0,159	-0,154	-0,331	-0,51	-0,465
Geb_N	0,162	0,356	0,38	0,349	0,329	-0,055	-0,234	-0,041
FF_Horton								
KF_Index								
Umf_ent								
Gew_Länge								
Gew_Dichte								
Höhe_min								
Höhe_max								
Slope_mean								
AB2	-0,512	-0,513	0,472	0,707	0,28	-0,493	0,09	0,161
MHQ_gem	-0,491	-0,363	0,334	0,759	0,44	-0,321	0,301	0,364
HQ2	-0,475	-0,333	0,298	0,719	0,4	-0,283	0,304	0,369
HQ10	-0,467	-0,341	0,305	0,732	0,402	-0,3009	0,284	0,354
HQ100	-0,441	-0,348	0,309	0,749	0,415	-0,335	0,279	0,351
Area	-0,278	-0,381	0,366	0,951	0,562	-0,536	0,119	0,154
Perimeter	-0,369	-0,668	0,672	0,861	0,409	-0,522	-0,111	-0,113
EZG_Länge	-0,633	-0,469	0,463	0,877	0,479	-0,418	0,028	0,057
FF_Horton	1	0,443	-0,448	-0,274	-0,057	-0,003	0,189	0,163
KF_Index	0,443	1	-0,984	-0,288	0,138	0,424	0,56	0,532
Umf_ent	-0,448	-0,984	1	0,299	-0,08	-0,326	-0,501	-0,532
Gew_Länge	-0,274	-0,288	0,299	1	0,779	-0,395	0,3	0,319
Gew_Dichte	-0,057	0,138	-0,08	0,779	1	0,033	0,707	0,681
Höhe_min	-0,003	0,424	-0,326	-0,395	0,033	1	0,372	0,186
Höhe_max	0,189	0,56	-0,501	0,3	0,707	0,372	1	0,936
Slope_mean	0,163	0,532	-0,532	0,319	0,681	0,186	0,936	1
Siedlung	-0,311	-0,499	0,506	0,245	-0,191	-0,469	-0,654	-0,702
Gew_gef	0,49	0,568	-0,546	-0,148	0,352	0,2	0,734	0,736
Geb_N	-0,006	0,433	-0,412	0,081	0,438	0,448	0,884	0,886
Siedlung								
Gew_gef								
Geb_N								
AB2	0,196	-0,232	0,162	-0,232	0,162			
MHQ_gem	-0,001	-0,148	0,356	-0,148	0,356			
HQ2	-0,044	-0,148	0,38	-0,148	0,38			
HQ10	-0,029	-0,159	0,349	-0,159	0,349			
HQ100	-0,026	-0,154	0,329	-0,154	0,329			
Area	0,357	-0,331	-0,055	-0,331	-0,055			
Perimeter	0,498	-0,51	-0,234	-0,51	-0,234			
EZG_Länge	0,419	-0,465	-0,041	-0,465	-0,041			
FF_Horton	-0,311	0,49	-0,006	0,49	-0,006			
KF_Index	-0,499	0,568	0,433	0,568	0,433			
Umf_ent	0,506	-0,546	-0,412	-0,546	-0,412			
Gew_Länge	0,245	-0,148	0,081	-0,148	0,081			
Gew_Dichte	-0,191	0,352	0,438	0,352	0,438			
Höhe_min	-0,469	0,2	0,448	0,2	0,448			
Höhe_max	-0,654	0,734	0,884	0,734	0,884			
Slope_mean	-0,702	0,736	0,886	0,736	0,886			
Siedlung	1	-0,668	-0,747	-0,668	-0,747			
Gew_gef	-0,668	1	0,664	1	0,664			
Geb_N	-0,747	0,664	1	0,664	1			

Tab. B.2: Ausgewählte Raumdaten der baden-württembergischen Einzugsgebiete (Datenquelle: IHF 2000).

MHQ_gem	Gemessener MHQ [m^3/s]
HQ2	Scheitelabfluss der Jährlichkeit 2 [m^3/s]
HQ10	Scheitelabfluss der Jährlichkeit 10 [m^3/s]
HQ100	Scheitelabfluss der Jährlichkeit 100 [m^3/s]
Area	Einzugsgebietsfläche [km^2]
Perimeter	Einzugsgebietsumfang [m]
EZG_Länge	Distanz vom Pegel zum weitest entfernten Punkt [m]
FF_Horton	Formfaktor nach Horton [-]
Umf_Ent	Umfangentwicklung [-]
Gew_Läng	Gesamtlänge aller Gewässer 1:50000 im Einzugsgebiet [m]
Gew_Dichte	Gewässernetzdichte [km/km^2]
Is	Gewichtetes Gefälle über alle Gewässer (1:50.000) im Einzugsgebiet [%]
Seen_Ant	Anteil der Seenfläche an der Einzugsgebietsfläche [%]
Seen_Fla	Gesamtfläche aller Seen im Einzugsgebiet [m^2]
Höhe_mean	Mittlere Höhe [m ü. NN]
Höhe_min	Tiefster Punkt [m ü. NN]
Höhe_max	Höchster Punkt [m ü. NN]
Siedlung	Anteil der Siedlungsflächen an der einzugsgebietsfläche [%]
Gew_gef	Gewogenes Gefälle [%]
Geb_n	Mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag [mm]

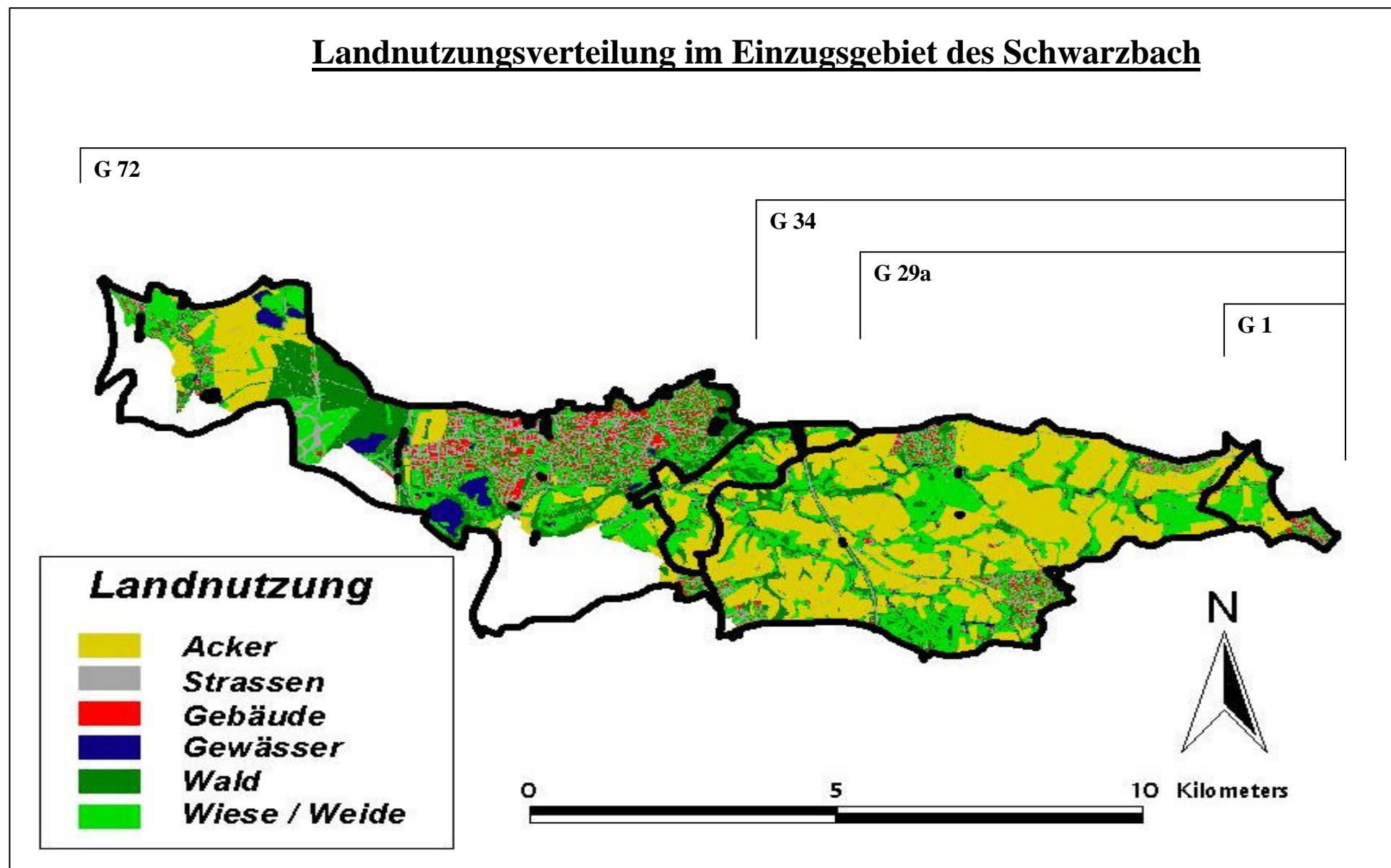


Abb. C: Landnutzung im Schwarzbach und seinen Teileinzugsgebieten