

# **Renaturierung von Fließgewässern unter Beachtung des Hochwasserschutzes**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Universität Hannover

zur Erlangung des Grades einer  
Doktorin der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Claudia Bergholz**

geboren am 17.10.1973 in Ottendorf

2006

Referent: Prof. Prof. E.h. Dr.sc.techn. Kurt Lecher

Koreferent: Prof. Dr.sc.techn. Isidor Storchenegger

Tag der Promotion: 17.06.2005

## **DANKSAGUNG**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Prof. E.h. Dr.sc.techn. Kurt Lecher, der mir die Möglichkeit gab meine Promotion an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Universität Hannover durchzuführen.

Herrn Prof. Dr.sc.techn. Isidor Storchenegger vom Institut für Umweltingenieurwesen der Universität Rostock danke ich für die Übernahme des Koreferats und seinen fachlichen Zuspruch. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel für den Vorsitz in der Promotionskommission.

In sehr guter Erinnerung werden mir die fachlichen Diskussionen mit Dr.-Ing Klaus Rickert bleiben. Ihm verdanke ich wertvolle Tipps und Gedankenanstöße, die einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung der Promotionsarbeit lieferten.

Ein herzlicher Dank geht an die wissenschaftlichen Hilfskräfte und Studierenden, die mich während meiner Tätigkeit an der Universität Hannover durch ihre Mitarbeit an Projekten sowie die Bearbeitung von Studien- und Diplomarbeiten unterstützten. Die Arbeit mit ihnen hat mir sehr viel Freude bereitet. In diesem Sinne bedanke ich mich ebenfalls bei meinen Kollegen und Kolleginnen, mit denen ich fachliche Diskussionen führen und Erfahrungen austauschen konnte.

Ohne die Bereitstellung von Datenmaterial wäre die Erstellung der Arbeit in diesem Rahmen nicht möglich gewesen. Hierfür bedanke ich mich sehr beim Leineverband Göttingen, bei Herrn Dipl.-Ing. Stephan Bellin vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), dem Wasser- und Schifffahrtsamt Verden sowie dem Ingenieur-Dienst-Nord (IDN). Zudem bedanke ich mich für die Möglichkeit der Dateneinsicht beim Hauptstaatsarchiv Hannover und dem Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB).

Weiterhin bedanke ich mich bei Dipl.-Ing Silke Schmidtke und Ass. Silke Martens für das Korrekturlesen der Promotionsarbeit.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie, die mir meinen Werdegang ermöglichte und mich in meinen Vorhaben stets unterstützt. Meinem Mann danke ich insbesondere für sein Verständnis sowie Anregungen und Aufmunterungen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie war bis Ende 2004 die Bestandsaufnahme abzuschließen. In der Folge sind die Defizite festzustellen und Maßnahmenprogramme zu erarbeiten. Außerordentlich wichtig ist dabei, die Auswirkungen auf die jeweiligen Hochwasserabläufe mit zu berücksichtigen.

Wesentliche Elemente von Renaturierungsmaßnahmen sind ein naturnaher Gewässerlauf und die Wiederansiedlung von Gehölz im potenziellen Aubereich. Dies ist Grundvoraussetzung für die Entwicklung standortgemäßer Biotope im und am Fließgewässer. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich daher auf diese beiden Aspekte. Ziel ist, den Einfluss einer veränderten Linienführung und zusätzlichem Gehölzbewuchs auf den Hochwasserabfluss zu ermitteln. Herangezogen wird dafür das Wasserspiegellagenprogramm WASPTOOLS. Dieses Programm eignet sich nicht zuletzt für die hier speziell zu prüfenden Bewuchs- und Mäandrierungseinflüsse.

Das Untersuchungsgebiet liegt in Niedersachsen, im Einzugsgebiet der Weser. Der untersuchte Bereich erstreckt sich von der Bever, im südlichen Leinebergland, über die Ilme und Leine bis zur Aller im norddeutschen Flachland.

Die aus Querprofilen abgeleiteten geometrischen Größen, wie Gewässerbreite, Querschnittstiefe usw. liefern erste Hinweise für erforderliche Renaturierungsarbeiten. Im Rahmen der an ausgesuchten Gewässerstrecken durchgeführten Hochwassersimulationen wurden die Linienführung und der Gehölzbestand mehrfach variiert. Erwartungsgemäß brachte die Kombination dichter Auwald und verstärkter Windungsgrad die größten Änderungen (erhöhter Wasserstand, Abflussanteil im Hauptquerschnitt bzw. im Vorlandbereich u.a.).

Als Kompromiss zwischen Hochwasserschutz und Naturschutzbelangen wird eine Variante mit Bewuchs entlang der Ufer und einzelnen Bewuchsbeständen auf dem Vorland empfohlen. Damit ist eine Biotopvernetzung entlang der Fließgewässer möglich und die negativen Auswirkungen auf die Hochwassersituation (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten) sind tolerierbar.

Schlagwörter: Renaturierung an Fließgewässern, Hochwasser, Laufentwicklung, Gehölzbewuchs

## **ABSTRACT**

Within the scope of the Water Framework Directive (WFD) of the European Union the inventory of the river statutes had to be finished by the end of 2004. After defining deficits concerning the rivers, a programme of measures has to be set up. While planning these measures, effects on floods should be taken into account.

Main parts of the renaturization measures along rivers are the reestablishment of a natural water course and plantings of a natural cover. These aspects are elementary for a biotope adapted to the site and its development in and along rivers. For this reason these aspects are focused in this thesis. The aim is to determine the influence of a modification of the river course and a natural wood cover, as they are typical for renaturizations of rivers, particularly with regard to flood discharge. The water level programme WASPTOOLS is used for this purpose. It has the ability to assess the influence of natural wood cover and meandering river courses.

The area of investigation is located in the north of Germany, in Lower Saxony, and it is part of the River Weser catchment area. The studied water course runs from the River Bever, which is in a low mountainous area to the River Ilme and River Leine and finally to the River Aller, which is located in a plain.

From cross sections, derived geometrical dimensions like width, deepness etc. serve as reference material for intended renaturization measures. Several types of water course alignments and natural wood covers are varied at different parts of the water course under investigation. As expected, the most significant changes resulted in a combination of dense alluvial forest with an increase in the degree of meandering.

A good compromise between aspects of flood protection and nature conservation is recommended to be the combination with riparian wood cover along the river and an insular natural wood cover located in the flood plain. In this respect, a networking of biotopes along the river becomes possible and negative effects on the flood situation (water levels and flow velocities) are tolerable.

Keywords: rehabilitation of rivers, flood, river course alignment, natural wood cover



## **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>Danksagung</b>	<b>1</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>15</b>
<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>19</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>24</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>27</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>29</b>
<b>1.1 Zielstellung</b>	<b>29</b>
<b>1.2 Bedeutung des Begriffes Hochwasser</b>	<b>29</b>
<b>1.3 Bedeutung des Begriffes Retention</b>	<b>31</b>
<b>1.4 Bedeutung des Begriffes Renaturierung</b>	<b>33</b>
<b>1.5 Berührungspunkte</b>	<b>34</b>
<b>2 Einfluss der Linienführung</b>	<b>37</b>
<b>2.1 Begrifflichkeiten der Lauform</b>	<b>37</b>
<b>2.2 Abhängigkeiten der Lauform</b>	<b>43</b>
<b>2.3 Einfluss der Lauform auf den Abfluss</b>	<b>52</b>
<b>3 Bewuchseinfluss</b>	<b>55</b>
<b>3.1 DFG-Schwerpunktprogramm „Hydraulische Probleme beim   naturnahen Gewässerausbau“</b>	<b>55</b>
<b>3.2 SERC-FCF-Forschungsprogramm</b>	<b>64</b>
<b>3.3 Vergleichende Analyse von Schumacher (1995)</b>	<b>66</b>
<b>3.4 Vergleich hydraulischer Methoden zur Bestimmung von   Retentionspotenzialen naturnaher Maßnahmen</b>	<b>67</b>
<b>3.5 Art des Bewuchses und Abstand der Bewuchselemente</b>	<b>72</b>
<b>3.6 Zusammenfassung „Bewuchseinfluss“</b>	<b>80</b>

<b>4</b>	<b>Wasserspiegellagenberechnung</b>	<b>83</b>
<b>4.1</b>	<b>Anwendungsbereich</b>	<b>83</b>
<b>4.2</b>	<b>Mathematisches Verfahren</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>Beschreibung des Untersuchungsgebietes</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Charakteristische Merkmale</b>	<b>89</b>
<b>5.3</b>	<b>Ist-Zustand</b>	<b>111</b>
<b>5.4</b>	<b>Entwicklungsziele</b>	<b>113</b>
<b>6</b>	<b>Auswertung von Studien im Untersuchungsgebiet</b>	<b>117</b>
<b>6.1</b>	<b>Untersuchungen zu naturnahen Maßnahmen im Leineeinzugsgebiet</b>	<b>117</b>
<b>7</b>	<b>Gewässerentwicklung</b>	<b>123</b>
<b>7.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>123</b>
<b>7.2</b>	<b>Auswertungsmethode</b>	<b>123</b>
<b>7.3</b>	<b>Entwicklung der Geometrischen Größen</b>	<b>127</b>
<b>7.4</b>	<b>Bodendaten</b>	<b>139</b>
<b>7.5</b>	<b>Zusammenfassung und Gegenüberstellung</b>	<b>140</b>
<b>7.6</b>	<b>Klassifizierung nach Rosgen</b>	<b>144</b>
<b>8</b>	<b>Simulation</b>	<b>147</b>
<b>8.1</b>	<b>Modellanforderungen</b>	<b>147</b>
<b>8.2</b>	<b>Vorgehensweise</b>	<b>148</b>
<b>8.3</b>	<b>Beschreibung der Simulationsabschnitte</b>	<b>151</b>
<b>8.4</b>	<b>Ausgangszustand (Variante 1)</b>	<b>156</b>
<b>8.5</b>	<b>Änderung des bordvollen Abflusses</b>	<b>166</b>
<b>8.6</b>	<b>Änderung der Wasserspiegellage und der Fließgeschwindigkeit</b>	<b>167</b>
<b>8.7</b>	<b>Änderung des Retentionsvolumens</b>	<b>176</b>
<b>8.8</b>	<b>Auswirkungen der Retention auf Hochwasserwellen</b>	<b>182</b>
<b>8.9</b>	<b>Auswirkungen in den Untersuchungsabschnitten</b>	<b>188</b>
<b>8.10</b>	<b>Zusammenfassung der Simulationsergebnisse</b>	<b>194</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>201</b>

<b>Literatur</b>	<b>203</b>
<b>Anlagen</b>	<b>213</b>



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1	Verformung einer Hochwasserwelle durch fließende Retention (MARENBACH, 2002)	32
Abb. 2.1	Maßbezeichnung nach DIN 4049	38
Abb. 2.2	Laufformen entsprechend Tab. 3.1 (SCHERLE, 1999)	40
Abb. 2.3	Typisierung der Laufform nach BRICE (1983)	41
Abb. 2.4	Abhängigkeit der Laufform vom Gefälle und bordvollem Abfluss (nach LEOPOLD und WOLMAN (1957) aus PATT ET AL. (1998))	44
Abb. 2.5	Spektren der Windungsgrade und die zugehörigen mittleren Sohlengefälle der von ROSGEN (1996) untersuchten Gewässertypen	45
Abb. 2.6	Abgrenzung der Gerinnemorphologie nach DA SILVA (1991) aus HUNZINGER (1998)	48
Abb. 2.7	Abgrenzung der Gerinnemorphologie nach YALIN (1992)	48
Abb. 3.1	Übersicht der durchgeführten Untersuchungen der Koordinierungsgruppe „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerbau“ (ROUVÉ, 1987)	57
Abb. 3.2	Foto von der sichtbar gemachten Strömung (gegliedertes Profil) (ROUVE, 1987)	58
Abb. 3.3	Vektordarstellungen der Sekundärströmung für verschiedene Fließtiefenverhältnisse und glatte Vorländer (aus SCHNAUDER, 2004, nach TOMINAGA UND NEZU, 1990)	59
Abb. 3.4	Verfahren zur Berechnung des interaktionsbedingten Fließwiderstandes (ROUVÉ, 1987)	61
Abb. 3.5	Bereichseinteilung beim Trennflächenverfahren nach Pasche (PASCHE, 1984)	62
Abb. 3.6	Skizze zur Nachlauflänge beim Trennflächenverfahren nach Pasche (PASCHE, 1984)	62
Abb. 3.7	Vertikale Geschwindigkeits- und turbulente Schubspannungsverteilung für Gewässersohlen großer relativer Überdeckung (STEPHAN, 2002 nach Dittrich, 1998)	63
Abb. 3.8	Übersicht über den zeitlichen Verlauf des SERC-FCF-Versuchsprogramms (SCHUMACHER, 1995)	65

Abb. 3.9	Abflusskurven der Versuchsserien 04 (Trapezquerschnitt), 02 (Vorland ohne Bewuchs) und 07 (Vorland mit Bewuchs) (SCHUMACHER, 1995)	65
Abb. 3.10	Vergleich der experimentellen und der nach dem Verfahren von PASCHE berechneten Durchflüsse für die Versuchsserien 07 und 11 (SCHUMACHER, 1995)	67
Abb. 3.11	Vergleich der experimentellen und der nach dem Verfahren von MERTENS berechneten Durchflüsse für die Versuchsserien 07 und 11 (SCHUMACHER, 1995)	67
Abb. 3.12	Rückhaltevolumina verschiedener Szenarien im Fallbeispiel Schwülme (BAUER, 2004)	70
Abb. 3.13	Maßnahmen an Deichen und ihre Wirkung auf den Wellenablauf (BAUER, 2004)	71
Abb. 3.14	Verformung einer Weide in Auf- und Grundriss bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (OPLATKA, 1998)	76
Abb. 3.15	Widerstandsbeiwerte (friction factor, $f$ ) aufgetragen gegenüber der Reynolds-Zahl (Reynolds number, $Re$ ) und der Wassertiefe (flow depth, $h$ ) für die Versuchsreihe S3 aus der Untersuchung von JÄRVELÄ (2002) - Erklärung der Versuchsreihenbezeichnung in Tab. 2.2	78
Abb. 3.16	Widerstandsbeiwerte (friction factor, $f$ ) aufgetragen gegenüber der Reynolds-Zahl (Reynolds number, $Re$ ) und der Wassertiefe (flow depth, $h$ ) für die Versuchsreihe R2 aus der Untersuchung von JÄRVELÄ (2002) - Erklärung der Versuchsreihenbezeichnung in Tab. 2.2	79
Abb. 4.1	Abgrenzung zwischen 1-, 2- und 3-dimensionalen Strömungsmodellen bzw. physikalischen Modellen (BWK, 2000)	84
Abb. 4.2	Schematischer Flussquerschnitt	86
Abb. 5.1	Übersicht Wesereinzugsgebiet mit den Nebengewässern Aller und Leine (FGG-Weser, 2005)	91
Abb. 5.2	Übersicht Einzugsgebiet Bever und Ilme	92
Abb. 5.3	Übersicht des Untersuchungsabschnittes Leine südlich der Stadt Hannover (TOP50, LGN)	93
Abb. 5.4	Übersicht der Untersuchungsabschnitte Leine nördlich der Stadt Hannover und Aller (TOP 50, LGN)	94

Abb. 5.5	Abflussdauerlinien an den Pegelstationen entlang der untersuchten Gewässer (nach NLÖ, 2001c)	96
Abb. 5.6	Naturräumliche Gliederung Niedersachsens und Fließgewässergroßlandschaften (RASPER, 2001)	99
Abb. 5.7	Fließgewässertypen im betrachteten Bergland (RASPER, 2001)	99
Abb. 5.8	Korngrößensummenkurven der holozänen fluvialen Sedimente im unteren Ilmetal (ROTHER, 1989)	100
Abb. 5.9	Bodenquerprofil im Mündungsbereich der Ilme (ROTHER, 1989)	102
Abb. 5.10	Bohrquerprofil an der Leine (PRETZSCH, 1994)	102
Abb. 5.11	Korngrößensummenkurven der Schotter und Sande an der Leine (PRETZSCH, 1994)	103
Abb. 5.12	Unterschiedliche Korngrößensummenkurven an der Leine (PRETZSCH, 1994)	103
Abb. 5.13	Fließgewässerlandschaften im niedersächsischen Tiefland (mit Börden) (RASPER, 2001)	104
Abb. 5.14	Leineverlauf östlich von Banteln (links: 1780; rechts: heute)	111
Abb. 5.15	lichter Auwald (NLÖ, 2001a)	114
Abb. 5.16	Uferbewuchs	115
Abb. 5.17	Unterholz einer Aue (RASPER, 2001)	115
Abb. 7.1	Einteilung eines Querprofils in Hauptquerschnitt und Vorland bei einem Gewässerquerschnitt mit markanter Böschung (Skizze)	125
Abb. 7.2	Einteilung eines Querprofils in Hauptquerschnitt und Vorland bei einem Gewässerquerschnitt mit Uferrehne (Skizze)	125
Abb. 7.3	Einteilung eines Querprofils in Hauptquerschnitt und Vorland bei einem Gewässerquerschnitt mit fließendem Übergang (Skizze)	125
Abb. 7.4	In der Untersuchung der Gewässerentwicklung ermittelte geometrische Größen	127
Abb. 7.5	Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Bewer	129
Abb. 7.6	Abhängigkeit der bordvollen Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsfläche an der Bewer	130
Abb. 7.7	Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsfläche an der Bewer im bordvollen Zustand	131

Abb. 7.8	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsfläche an der Bever im bordvollen Zustand	131
Abb. 7.9	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle an der Bever im bordvollen Zustand	132
Abb. 7.10	Abhängigkeit des hydraulischen Radius von der Einzugsgebietsfläche an der Bever (bordvoller Zustand)	133
Abb. 7.11	Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss an der Bever (bordvoller Zustand)	133
Abb. 7.12	Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche an der Bever (Abfluss des HQ100 = 100 % )	134
Abb. 7.13	Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen entlang der Bever	135
Abb. 7.14	Mittlere Wassertiefe bei verschiedenen Zuständen an der Bever	136
Abb. 7.15	Benetzter Umfang entlang der Bever bei verschiedenen Zuständen	136
Abb. 7.16	Breiten- / Tiefenverhältnis gegenüber dem Ton- und Schluffanteil	140
Abb. 8.1	Charakteristisches Gewässerprofil der Bever (km 4,884) (überhöhte Darstellung)	152
Abb. 8.2	Charakteristisches Gewässerprofil im betrachteten Ilmeabschnitt (km 10,563) (überhöhte Darstellung)	153
Abb. 8.3	Typisches Gewässerprofil der Leine unterhalb der Ortschaft Greene (km 172,782) (überhöhte Darstellung)	154
Abb. 8.4	Typisches Gewässerprofil der Aller nach Einmündung der Leine (km 34,170) (überhöhte Darstellung)	155
Abb. 8.5	Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 an der Bever	157
Abb. 8.6	Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 an der Bever	158
Abb. 8.7	Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 an der Ilme	159
Abb. 8.8	Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 an der Ilme	160

Abb. 8.9	Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 am Leineabschnitt	161
Abb. 8.10	Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 am Leineabschnitt	162
Abb. 8.11	Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 am Allerabschnitt	164
Abb. 8.12	Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 am Allerabschnitt	165
Abb. 8.13	Vergleich der Wasserspiegeldifferenzen zum Ausgangszustand an Bever, Ilme, Leine und Aller	171
Abb. 8.14	Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt im Vergleich zum Ausgangszustand	172
Abb. 8.15	Gegenüberstellung der Änderung der Wasserspiegellage und der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt an Bever und Ilme	173
Abb. 8.16	Gegenüberstellung der Änderung der Wasserspiegellage und der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt an Leine und Aller	174
Abb. 8.17	Volumens auf dem Vorland bei verschiedenen Varianten und verschiedenen Zuständen	179
Abb. 8.18	Anteil des Vorlandvolumens am Gesamtvolumen im Querschnitt	179
Abb. 8.19	Beispiel einer Abfluss-Volumenbeziehung an der Bever (Variante 6)	183
Abb. 8.20	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 4)	185
Abb. 8.21	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 4)	185
Abb. 8.22	Beobachtungs- und Sicherungszonen an einer Schmutzwasserleitung neben der Bever (SCHRÖDER ET AL., 2002)	189
Abb. 8.23	Ausweitung der Überflutungsfläche bei einem Wasserspiegelanstieg von 1,40 m im Untersuchungsabschnitt Leine mit notwendigen Schutzdeichen	192



## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1	Begriffe und Maßzahlen zur Unterscheidung der Laufform (SCHERLE, 1999)	40
Tab. 2.2	Bestimmungsschlüssel zur Unterscheidung der Gewässertypen nach ROSGEN (1996) aus SCHERLE (1999)	42
Tab. 2.3	Anwendung der Rosgen-Typologie auf Gewässer in Baden-Württemberg (SCHERLE, 1999)	43
Tab. 2.4	Beziehung zwischen der Art des Sedimenttransports und dem Breiten- / Tiefenverhältnis (nach SCHUMM (1977) aus NADOLNY (1994))	46
Tab. 2.5	Zuweisung des Breiten- / Tiefenverhältnisses zur relativen Rauheit	49
Tab. 2.6	Bildung von Uferrehnen aufgrund verschiedener Bewuchssituationen (nach LEHMANN ET AL., 2004)	51
Tab. 2.7	Beispiel einer Abschätzung der Abflusskapazitätsminderung bei der Strukturentwicklung eines ausgebauten Gewässers	54
Tab. 3.1	Von BAUER (2004) ermittelte Retentionsvolumina an Mittelgebirgsbächen	72
Tab. 3.2	Zusammenfassung der Versuchsreihen von JÄRVELÄ (2002)	80
Tab. 5.1	Hochwasserabflussspenden im Untersuchungsgebiet	97
Tab. 5.2	Hochwasserabflussspenden in den Winter- und Sommermonaten (BILLIB, 1973)	97
Tab. 5.3	Referenzgewässer für die untersuchten Abschnitte der Bever und Ilme (nach RASPER (2001))	107
Tab. 5.4	Ausprägung morphologischer Parameter der Leitbilder im Untersuchungsgebiet (nach RASPER, 2001)	109
Tab. 5.5	Laufformeinstufung (nach SCHERLE (1999))	110
Tab. 5.6	Windungsgrade der zu untersuchenden Gewässer ermittelt aus historischen und aktuellen Karten	116
Tab. 6.1	Überblick der untersuchten Systemzustände an der Leine zwischen Elze und Sarstedt (LECHER ET AL., 1997)	118
Tab. 6.2	Änderung des bordvollen Abflussvermögens in den Gewässerabschnitten 2 bis 10 (LECHER ET AL., 1997)	119

Tab. 6.3	Maximale Wasserstandsdifferenzen der Systemzustände S1 bis S3 zum Ist-Zustand S0 in den Untersuchungsabschnitten (LECHER ET AL., 1997)	120
Tab. 6.4	Maximale Wasserstandsdifferenzen der Systemzustände S4 bis S6 zum Ist-Zustand S0 in den Untersuchungsabschnitten	121
Tab. 6.5	Ergebnisse zum bordvollen Abfluss aus der hydraulischen Untersuchung an der Bewer (aus LECHER ET AL., 1996a)	122
Tab. 7.1	Zusammenfassung der äquivalenten Sandrauheiten ( $k_s$ ) an den Untersuchungsgewässern	126
Tab. 7.2	Übersicht der ermittelten Zusammenhänge der Gewässerparameter an Ilme, Leine und Aller	138
Tab. 7.3	Bordvoller Abfluss in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße im Allereinzugsgebiet ( $Q_b = a \cdot A_E^c$ )	141
Tab. 7.4	Bordvoller Abfluss in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße nach Zusammenstellung von SCHERLE (1999) ( $Q_b = a \cdot A_E^c$ )	142
Tab. 7.5	Bordvolle Gewässerbreite in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße ( $b = a \cdot A_E^c$ )	143
Tab. 7.6	Mittlere Wassertiefe in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße im Allereinzugsgebiet ( $h_m = a \cdot A_E^c$ )	143
Tab. 7.7	Typisierung nach ROSGEN	145
Tab. 8.1	Variantenübersicht	149
Tab. 8.2	Änderung des Mäandrierungsfaktors und der damit verbundenen Verlängerung des Talweges und der Reduzierung des Sohlgefälles im Hauptquerschnitt in den untersuchten Teilabschnitten	150
Tab. 8.3	Eingangsgrößen für die Simulationsläufe an der Bewer	151
Tab. 8.4	Eingangsgrößen für die Simulationsläufe am Ilmeabschnitt (Abfluss Q vor / nach Dießezufluss)	153
Tab. 8.5	Eingangsgrößen für die Simulationsläufe am Leineabschnitt	154
Tab. 8.6	Eingangsgrößen für die Simulationsläufe am Allerabschnitt	155
Tab. 8.7	Änderung des bordvollen Abflusses in den verschiedenen Varianten (unter Beibehaltung der Querschnittsform)	167

Tab. 8.8	Mittlere Wasserspiegeldifferenz [cm] zur Variante 1 (Ausgangszustand) (Randbedingung: Abfluss und Anfangswasserspiegel in allen Varianten gleich Variante 1)	169
Tab. 8.9	Mittlere Fließgeschwindigkeitsdifferenz [m/s] zur Variante 1 (Ausgangszustand) im Hauptquerschnitt (Randbedingung: Abfluss und Anfangswasserspiegel in allen Varianten gleich Variante 1)	170
Tab. 8.10	Verhältnis des Abflusses im Hauptquerschnitt zum Vorlandabfluss in den Varianten 1 und 6 für den HQ100 Zustand	175
Tab. 8.11	„Retentionsvolumen“ [1000 m <sup>3</sup> /km] im Hauptquerschnitt im Untersuchungsabschnitt	177
Tab. 8.12	Retentionsvolumen [1000 m <sup>3</sup> /km] auf dem Vorland im Untersuchungsabschnitt	178
Tab. 8.13	Prozentuale Erhöhung des Gesamtretentionsvolumens gegenüber dem Ausgangszustand	181
Tab. 8.14	Spitzenabflüsse der auslaufenden Wellen aus dem Untersuchungsabschnitt Leine	186
Tab. 8.15	Spitzenabflüsse der auslaufenden Wellen aus dem Untersuchungsabschnitt Ilme	186
Tab. 8.16	Spitzenabflüsse der auslaufenden Welle im Untersuchungsabschnitt Bewer	187
Tab. 8.17	Merkmale der Untersuchungsabschnitte	196
Tab. 8.18	Reduzierung des bordvollen Abflusses durch dichten Auwald und einem erhöhten Windungsgrad an Bewer, Ilme und Leine	197
Tab. 8.19	Mittlere Wasserspiegeldifferenz durch dichten Auwald mit und ohne Erhöhung des Windungsgrades gegenüber dem Ausgangszustand (geradlinig ohne Bewuchs) für den HQ100 Zustand	198
Tab. 8.20	Vergleich der Spitzenabflüsse auslaufender Wellen aus dem jeweiligen Untersuchungsabschnitt	199
Tab. 8.21	Fließgeschwindigkeitserhöhungen durch dichten Auwaldbewuchs gegenüber dem Ausgangszustand	200



## ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1	Regimegleichungen im Überblick (nach YALIN, 1992)	214
Anlage 2	Hinweise zur Anwendung des Wasserspiegellagenprogramms	215
Anlage 3	Abschnittseinteilung der „Untersuchung zur Ableitung naturnaher Maßnahmen im Leineinzugsgebiet“ zwischen Elze und Sarstedt (LECHER ET AL., 1997)	218
Anlage 4	Verzeichnis Bezugsquellen der Profile	219
Anlage 5	Gewässerprofile	220
Anlage 6	Abflussspendenlängsschnitt der hydrologischen Landschaft „Solling“ (NLÖ, 2003)	233
Anlage 7	Abflussspendenlängsschnitt des landschaftsübergreifenden Gewässers „Leine“ (NLÖ, 2003)	234
Anlage 8	Abflussspendenlängsschnitt des landschaftsübergreifenden Gewässers „Aller“ (NLÖ, 2003)	235
Anlage 9	Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Ilme	236
Anlage 10	Abhängigkeit der bordvollen Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme	236
Anlage 11	Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme im bordvollen Zustand	237
Anlage 12	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme im bordvollen Zustand	237
Anlage 13	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle an der Ilme im bordvollen Zustand	238
Anlage 14	Abhängigkeit des hydraulischen Radius von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme (bordvoller Zustand)	238
Anlage 15	Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss an der Ilme (bordvoller Zustand)	239
Anlage 16	Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche an der Ilme (Abfluss des HQ100 = 100 %)	239

Anlage 17	Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen gegenüber der Einzugsgebietsfläche an der Ilme	240
Anlage 18	Benetzter Umfang entlang der Ilme bei verschiedenen Zuständen	240
Anlage 19	Mittlerer Wasserstand bei verschiedenen Zuständen entlang der Ilme	241
Anlage 20	Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Leine	241
Anlage 21	Abhängigkeit der Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsgröße der Leine im bordvollen Zustand	242
Anlage 22	Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsfläche an der Leine im bordvollen Zustand	242
Anlage 23	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsgröße der Leine im bordvollen Zustand	243
Anlage 24	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle der Leine im bordvollen Zustand	243
Anlage 25	Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Einzugsgebiet der Leine im bordvollen Zustand	244
Anlage 26	Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss der Leine im bordvollen Zustand	244
Anlage 27	Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen entlang der Leine (Abfluss des HQ100 = 100 %)	245
Anlage 28	Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen entlang der Leine	245
Anlage 29	Mittlere Wassertiefen bei verschiedenen Zuständen entlang der Leine	246
Anlage 30	Benetzter Umfang entlang der Leine bei verschiedenen Zuständen	246
Anlage 31	Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Aller	247
Anlage 32	Abhängigkeit der Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsgröße der Aller im bordvollen Zustand	247
Anlage 33	Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsgröße der Aller im bordvollen Zustand	248

Anlage 34	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsgröße der Aller im bordvollen Zustand	248
Anlage 35	Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle der Aller im bordvollen Zustand	249
Anlage 36	Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Einzugsgebiet der Aller im bordvollen Zustand	249
Anlage 37	Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss der Aller im bordvollen Zustand	250
Anlage 38	Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen entlang der Aller (Abfluss des HQ100 = 100 %)	250
Anlage 39	Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen entlang der Aller aufgetragen	251
Anlage 40	Benetzter Umfang entlang der Aller bei verschiedenen Zuständen	251
Anlage 41	Mittlere Wassertiefen bei verschiedenen Zuständen entlang der Aller	252
Anlage 42	Simulationsabschnitt Bewer	253
Anlage 43	Bewerprofile (Simulation)	254
Anlage 44	Variante 2 (Einzelbewuchs) - Bewer	257
Anlage 45	Variante 3 (Bewuchsbereiche) - Bewer	258
Anlage 46	Variante 4 (Dichter Auwald) - Bewer	259
Anlage 47	Variante 5 (Windungsgrad 1780) - Bewer	260
Anlage 48	Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) - Bewer	261
Anlage 49	Überschwemmungsgebiet Bewer (HQ100 Zustand)	262
Anlage 50	Korridorflächen mit Sicherungs- und Beobachtungszonen an der Bewer im Abschnitt zwischen den Ortschaften Lüthorst und Deitersen (SCHRÖDER ET AL., 2002)	263
Anlage 51	Simulationsabschnitt Ilme	264
Anlage 52	Ilmeprofile (Simulation)	265
Anlage 53	Variante 2 (Einzelbewuchs) - Ilme	267
Anlage 54	Variante 3 (Bewuchsbereiche) - Ilme	268
Anlage 55	Variante 4 (Dichter Auwald) - Ilme	269

Anlage 56	Variante 5 (Windungsgrad 1780) - Ilme	270
Anlage 57	Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) - Ilme	271
Anlage 58	Überschwemmungsgebiet Ilme (HQ100 Zustand)	272
Anlage 59	Simulationsabschnitt Leine	273
Anlage 60	Leineprofile (Simulation)	274
Anlage 61	Variante 2 (Einzelbewuchs) – Leine	276
Anlage 62	Variante 3 (Bewuchsbereiche) – Leine	277
Anlage 63	Variante 4 (Dichter Auwald) – Leine	278
Anlage 64	Variante 5 (Windungsgrad 1780) – Leine	279
Anlage 65	Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) – Leine	280
Anlage 66	Simulationsabschnitt Aller (Profile in Anlage 2.6)	281
Anlage 67	Variante 2 (Einzelbewuchs) – Aller	282
Anlage 68	Variante 3 (Bewuchsbereiche) – Aller	283
Anlage 69	Variante 4 (Dichter Auwald) – Aller	284
Anlage 70	Variante 5 (Windungsgrad 1780) – Aller	285
Anlage 71	Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) – Aller	286
Anlage 72	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 1)	287
Anlage 73	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 2)	287
Anlage 74	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 3)	288
Anlage 75	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 4)	288
Anlage 76	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 5)	289
Anlage 77	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 6)	289
Anlage 78	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 1)	290
Anlage 79	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 2)	290
Anlage 80	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 3)	291
Anlage 81	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 4)	291
Anlage 82	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 5)	292
Anlage 83	Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 6)	292
Anlage 84	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 1)	293

Anlage 85	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 4)	293
Anlage 86	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 5)	294
Anlage 87	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 6)	294
Anlage 88	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 1)	295
Anlage 89	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 4)	295
Anlage 90	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 5)	296
Anlage 91	Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 6)	296
Anlage 92	Retentionswirkung an der Bever (Ereignis Dezember 1988 / Variante 1)	297
Anlage 93	Retentionswirkung an der Bever (Ereignis Dezember 1988 / Variante 4)	297
Anlage 94	Retentionswirkung an der Bever (Ereignis Dezember 1988 / Variante 5)	298
Anlage 95	Retentionswirkung an der Bever (Ereignis Dezember 1988 / Variante 6)	298

## SYMBOLVERZEICHNIS

A	durchflossene bzw. angeströmte Fläche [m <sup>2</sup> ]
A <sub>E</sub>	Einzugsgebietsfläche [km <sup>2</sup> ]
A <sub>EQ</sub>	mittlere Einzugsgebietsgröße der Quellbäche [km <sup>2</sup> ]
a <sub>NB</sub>	Nachlaufbreite [m]
a <sub>NL</sub>	Nachlauflänge [m]
a <sub>x</sub> , a <sub>z</sub>	Abstand der Rauheitselemente [m]
b <sub>b</sub>	Flussbreite als mittlerer Abstand zwischen den Vegetationssäumen [m]
b <sub>bQ</sub>	mittlere Flussbreite der Quellbäche bei der Mündung in den Gewässerlauf höherer Ordnung
b <sub>F</sub>	Breite des gehölzfreien Gerinneteils bzw. Hauptgerinnes [m]
b <sub>F</sub>	Breite des Hauptquerschnitts [m]
b <sub>m</sub>	mitwirkende Vorland- bzw. Bewuchsbreite / Mäanderschwingungsbreite [m]
b <sub>V</sub>	bordvolle Gewässerbreite [m]
c <sub>D</sub>	Widerstandskoeffizient [-]
c <sub>T</sub>	dimensionslose Trennflächengeschwindigkeit [-]
c <sub>W</sub>	Formwiderstandsbeiwert [-]
c <sub>W,m</sub>	Formwiderstandsbeiwert des Kreiszyinders in der Übergangszone des Bewuchsbereiches (Gerinnebereich II) [-]
c <sub>w∞</sub>	Formbeiwert eines einzelnen Kreiszyinders [-]
d <sub>ch</sub>	charakteristischer Korndurchmesser [m]
d <sub>hy</sub>	hydraulischer Durchmesser [m]
d <sub>p</sub>	mittlerer Stammdurchmesser [m]
D <sub>50</sub>	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang [mm]
e <sub>l</sub>	Windungsgrad nach MANGELSDORF ET AL. (1980) [-]
f	benetzte Fläche von Einbauten im Fließquerschnitt [m <sup>2</sup> ]
F	Fließquerschnitt ohne Einbauten [m <sup>2</sup> ]
f <sub>K</sub>	Energielinienverlustfaktor infolge Krümmung [-]
f <sub>R</sub>	Energielinienverlustfaktor infolge Reibung [-]
Fr*	Feststoff-Froudezahl [-]
g	Fallbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

$h$	Wassertiefe [m]
$h_m$	mittlere Wassertiefe [m]
$h_{max}$	maximale Wassertiefe [m]
$h_v$	Verlusthöhe [m]
$h_{Vor}$	mittlere Fließtiefe auf dem Vorland [m]
$I$	Gefälle [-]
$I_E$	Energieliniengefälle [-]
$I_{gr}$	Grenzgefälle [-]
$I_S$	Sohlgefälle [-]
$K$	Speicherkonstante [min]
$k_1 - k_9$	Faktoren der Regimegleichungen [-]
$k_g$	geometrische Rauheitshöhe [m]
$k_S$	äquivalente Sandrauheit [m]
$l$	Streckenabschnitt [m]
$l_F$	Flusslänge [m]
$l_M$	Mäanderlänge [m]
$l_T$	Tallänge [m]
$M$	Massenprozent (Schluff und Ton) [%]
$n$	Anzahl der Bewuchselemente [-]
$Q$	Durchfluss [ $m^3/s$ ]
$Q_a$	Abfluss aus einem Gewässerabschnitt [ $m^3/s$ ]
$Q_b$	bordvoller Durchfluss [ $m^3/s$ ]
$Q_F$	Durchfluss im Hauptquerschnitt [ $m^3/s$ ]
$Q_{Vor}$	Vorlanddurchfluss [ $m^3/s$ ]
$Q_z$	Zufluss in einen Gewässerabschnitt [ $m^3/s$ ]
$r$	Krümmungsradius [m]
$R$	Korrelationskoeffizient [-]
$Re^*$	Feststoff-Reynoldszahl [-]
$r_{hy}$	hydraulischer Radius [m]
$S$	Speicherinhalt einer Gewässerstrecke [ $m^3$ ]
$S_W$	Strömungskraft, Beanspruchung der Pflanze [kN]
$v$	Fließgeschwindigkeit [m/s]
$v_0^*$	sohlenbezogene Schubspannungsgeschwindigkeit $v_0^* = \sqrt{g \cdot r_{hy,so} \cdot I}$ [m/s]
$v_{*T}$	Schubspannungsgeschwindigkeit in der fiktiven Trennfläche [m/s]

$v_m$	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
$v_T$	mittlere Fließgeschwindigkeit in der Trennfläche [m/s]
$v_{Vor}$	mittlere Fließgeschwindigkeit im Vorlandbereich [m/s]
$W$	Windungsgrad nach SCHERLE (1999) [-]
$y_c$	charakteristisches Rauheitsmaß für raue Sohlen [m]
$y_{Wsp,i}$	Wasserstand an der Stelle i [m]
$z$	Zentriwinkel der Laufkrümmung [°]
$\alpha$	Korrekturbeiwert für Geschwindigkeitserhöhung nach Naudascher bzw. Verbauungsgrad [-]
$\lambda$	Widerstandsbeiwert [-]
$\varepsilon$	relative Rauheit [-]
$\lambda_I$	Interaktionswiderstandsbeiwert [-]
$\lambda_T$	Widerstandsbeiwert der fiktiven Trennfläche am Bewuchssaum [-]
$\lambda_{T,0}$	Widerstandsbeiwert für die Gehölzstruktur an der fiktiven Trennfläche am Gehölzsaum [-]
$\lambda_{Vor}$	Widerstandsbeiwert im Vorlandbereich [-]
$\beta$	Beiwert zur Berücksichtigung einer plötzlichen Querschnittserweiterung [-]
$\zeta_{V,Ges}$	Verlustbeiwert [-]
$\nu$	kinematische Zähigkeit [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_F$	Dichte des Feststoffs [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_W$	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho'$	relative Feststoffdichte, $\rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Omega$	Bewuchssparameter [-]
$\psi_\varepsilon$	Verhältniszahl zwischen dem Breiten-/ Tiefenverhältnis und der relativen Rauheit nach YALIN 1992 [-]

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
EG	Europäische Gemeinschaft
GOK	Geländeoberkante
FCF	Flood-Channel-Facility
HQ	Hochwasserabfluss
HQS	Hauptquerschnitt
HR	Hydraulic Research Ltd.
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
li	links
MQ	Mittelwasserabfluss
re	rechts
SERC	Science and Engineering Research Council
V	Vorland
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSP	Wasserspiegellage



# **1 EINLEITUNG**

## **1.1 ZIELSTELLUNG**

Ziel der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft ist die Erreichung bzw. Erhaltung eines „guten Zustands“ der Gewässer. Zur Erlangung dieses Ziels werden in den nächsten Jahren Renaturierungsmaßnahmen an den Fließgewässern geplant und umgesetzt. Dabei sollte der Hochwasserschutz nicht außer Acht gelassen werden. Hochwässer, wie zum Beispiel an der Elbe 2002, weisen immer wieder darauf hin, dass von den sonst friedlichen Flüssen auch Gefahren ausgehen können.

Für die Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen ist es hilfreich, die natürlichen Gewässerparameter zu kennen. Eine Ermittlung der wesentlichen Gewässerparameter soll exemplarisch von einem Quellgewässer über mehrere Gewässer verschiedener Größenordnung bis zur Mündung in die Weser durchgeführt werden. In einem zweiten Schritt sollen zwei entscheidende Elemente von Renaturierungsmaßnahmen näher betrachtet werden, die Ansiedlung bzw. Entwicklung von Bewuchs und die Wiederherstellung einer natürlichen Laufform. Diese werden in der Arbeit hinsichtlich ihres Einflusses auf den Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit im Hochwasserfall untersucht. Die sich dabei ergebenden Änderungen werden schließlich auf ihre Wirkung bezüglich des Retentionsvolumens und einer Reduzierung des Hochwasserscheitels geprüft. Diese Fragestellung ist insbesondere für Unterhaltungsverbände von Interesse, denn diese sollen eine naturnahe Entwicklung zulassen und für einen ordnungsgemäßen Hochwasserabfluss sorgen.

Die Standortbedingungen bezüglich Aufstauhöhe und möglicher Gefährdung sind sehr individuell. Daher sollen die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse in erster Linie als Anregung gesehen werden, was bei einer Renaturierungsmaßnahme beachtet werden sollte, um auch dem Hochwasserschutz gerecht zu werden. Die Ergebnisse können bei Renaturierungsmaßnahmen nicht unreflektiert übertragen werden; sie sollen vielmehr das Verständnis für die Problematik schärfen und als Hinweise für die zu beachtenden Randbedingungen verstanden werden.

## **1.2 BEDEUTUNG DES BEGRIFFES HOCHWASSER**

In der Literatur gibt es recht einheitliche Definitionen für Hochwasser. Nach MANIAK (1993) ist ein „Hochwasser das kurzzeitige Ansteigen des Wasserstandes bzw. des Abflusses über den Mittelwasserbereich. Es kann durch natürliche Ursachen wie

Starkregen, Schneeschmelze oder Eisversetzung entstehen und gegebenenfalls durch anthropogene Einflüsse wie große Versiegelungsflächen verschärft werden.“

Die in englischer Sprache angeführte Definition von SUBRAMANYA (1998) lautet übersetzt: „Ein Hochwasser zeichnet sich durch einen ungewöhnlich hohen Wasserstand im Gewässer aus. Im Allgemeinen wird ab dem Zeitpunkt des Uferübertritts, wenn die angrenzenden Flächen überschwemmt werden, von Hochwasser gesprochen.“ Dies entspricht den Vorstellungen von Hochwasser, wie er im allgemeinen Sprachgebrauch üblich ist.

PATT (2001) gibt in seinem Hochwasser-Handbuch eine sehr ausführliche Definition und Beschreibung zur Entstehung von Hochwässern. Demnach sind: „Hochwasser Bestandteil des natürlichen Wasserkreislaufs und daher nicht zu vermeiden. Zu Beginn eines Niederschlagsereignisses wird das Wasser auf Pflanzen und auf der Bodenoberfläche zurückgehalten. Mit weiter andauerndem Niederschlag versickert ein Teil des Wassers und fließt so dem Grundwasserleiter zu. Gleichzeitig erhöht sich der Oberflächenabfluss. Beides führt in den Fließgewässern zu steigenden Wasserständen (Hochwasser). Regnet es viel und sind die natürlichen Rückhaltevermögen des Bodens erschöpft, wird der größte Teil des Niederschlags unmittelbar oberflächlich abgeführt. Extreme Hochwasser – im Sprachgebrauch auch „Jahrhunderthochwasser“ genannt – entstehen durch das Zusammentreffen besonders ungünstiger, den Oberflächenabfluss fördernde Konstellationen, wie zum Beispiel starke Regenfälle auf einen gesättigten Bodenspeicher.“

Die DIN 4049 geht von den gemessenen Werten eines betrachteten Zeitraums aus, wodurch sich die Angaben für verschiedene Zeitabschnitte unterscheiden können. Es werden in der DIN 4049 der höchste bekannte Wasserstand (HHW), der höchste Wasserstand gleichartiger Zeitabschnitte einer bestimmten Zeitspanne (HW) und der mittlere höchste Wasserstand gleichartiger Zeitabschnitte in der betrachteten Zeitspanne (MHW) definiert.

Alle Definitionen weisen auf einen hohen Wasserstand hin, der sich im Begriff „Hochwasser“ wiederfindet. Die anzusetzende Höhe des Wasserstandes reicht dabei vom Überschreiten des Mittelwasserstandes (MW)<sup>1</sup> in Anlehnung an die DIN 4049 bis zu Ausuferungen und weiter steigenden Wasserständen. Während das Überschreiten des Mittelwasserstandes auf statistisch ausgewerteten Messungen basiert, ist das Ausuferen und das weitere Ansteigen des Wasserstandes auf subjektive Emp-

---

<sup>1</sup> MW – Arithmetisches Mittel aller Tageswerte gleichartiger Zeitabschnitte der betrachteten Zeitspanne (DIN 4049)

findungen zurückzuführen. Es beinhaltet jedoch auch das Einbinden der Aue als Teil des Gewässers.

Lediglich die Definition der DIN 4049 ist allgemein gültig. Die anderen oben angegebenen Definitionen beziehen sich auf Hochwässer im Binnenland. Hochwässer an der Küste werden hauptsächlich durch starken Wind (Sturm) verursacht (OUMERACI, 2001), worauf in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen werden soll. Bei der Entstehung im Binnenland wird zwischen weiträumigen und lokal begrenzten Hochwässern unterschieden. Weiträumige Hochwässer entstehen durch langanhaltende starke Niederschläge, während lokal begrenzte Hochwässer durch lokale Starkniederschläge oder durch technisches Versagen, wie zum Beispiel einen Dammbbruch, entstehen. Wie schon von PATT (2001) angeführt, entstehen Hochwässer oftmals, wenn Oberflächenabfluss fördernde Konstellationen zusammentreffen. Hier ist neben dem gesättigten Boden auf eine gefrorene Oberfläche hinzuweisen, die dem Niederschlag nur geringe Möglichkeiten zur Versickerung gibt. Einige extreme Winterhochwässer sind auf diese Ursache zurückzuführen.

Weiterhin werden Hochwässer nach ihrer „Häufigkeit“ unterschieden. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Hochwasser statistisch gesehen in einer bestimmten Zeitspanne auftritt. So wird zum Beispiel von 10jährigen und 100jährigen Hochwässern gesprochen. Jeder Zeitspanne wird durch statistische Methoden ein bestimmter Hochwasserstand zugeordnet. Zurzeit gibt es dazu Diskussionen, da verschiedene Methoden unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dies ist in erster Linie auf den nicht einheitlichen Umgang mit Extremwerten zurückzuführen.

Für die von einem Hochwasser Betroffenen kann die Schadensursache entscheidend sein. Die Höhe des Schadens ist zu einem erheblichen Teil davon abhängig, ob es sich um drückendes Grundwasser, welches recht frei von Partikeln ist, oder um stehendes oder fließendes Oberflächenwasser handelt. Je stärker die Strömung des Wassers, desto mehr Sedimente und gröbere Materialien (Äste, Unrat etc.) können mitgeführt werden. Die Beseitigung dieser Sedimente verursacht erhebliche Kosten und führt somit zu höheren Schäden.

### **1.3 BEDEUTUNG DES BEGRIFFES RETENTION**

Nach DIN 4049 wird der Begriff Retention als „Durchflussverzögerung infolge der Speicherwirkung natürlicher Gegebenheiten oder künstlicher Maßnahmen“ definiert. Hierin kommt lediglich die zeitliche Verzögerung des Eintretens der Hochwasserspitze zum Ausdruck, jedoch nicht die Reduzierung des Spitzendurchflusses.

HAIDER (1994) bezeichnet als Retention den „Prozess in einem Flussabschnitt, bei dem ein Teil des Zuflusses kurzfristig zurückgehalten wird und verzögert oberirdisch

zum Abfluss gelangt, oder langfristig zurückgehalten wird und nicht oberirdisch abfließt“. MARENBACH (2002) verfolgt diese Richtung und definiert Retention in Anlehnung an DIN 4049 als „Abminderung und Verzögerung einer Abflusswelle infolge der Rückhaltewirkung natürlicher Gegebenheiten oder künstlicher Maßnahmen“.

Genau wie HAIDER (1994) unterscheidet MARENBACH (2002) zwischen fließender und stehender Retention. Die fließende Retention zeigt sich durch die Verformung einer Hochwasserwelle entlang eines Gewässerabschnittes (Abb. 1.1). Dabei wird der Hochwasserspitzenabfluss mehr oder weniger stark abgemindert und die Anstiegszeit bis zum Wellenscheitel erhöht. Dieser Effekt tritt in geringem Maße bereits im Hauptquerschnitt selbst auf und wird nach Überschreiten des bordvollen Abflusses bei Inanspruchnahme der Vorländer besonders deutlich. Die Abminderung und Verzögerung des Scheitelabflusses verursacht durch das Vorland wird als Vorlandretention bezeichnet und ist in erster Linie auf die geringeren Fließgeschwindigkeiten auf dem Vorland und den damit verbundenen Interaktionsprozessen zwischen Vorland und Hauptquerschnitt (Kapitel 3.1) zurückzuführen.

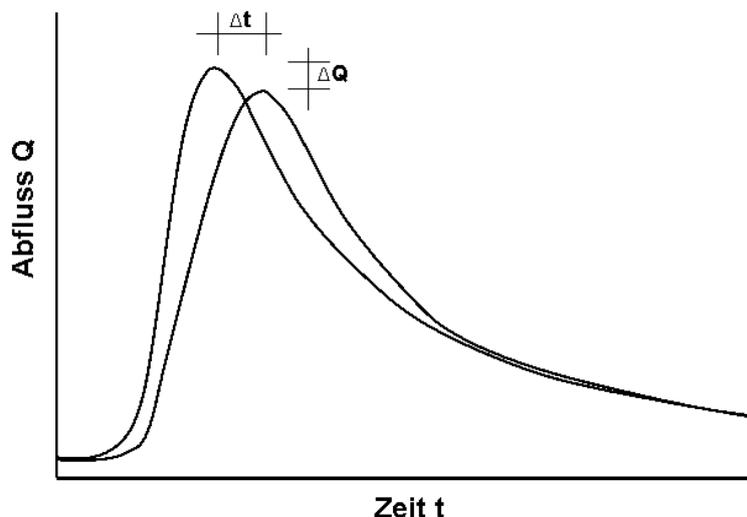


Abb. 1.1 **Verformung einer Hochwasserwelle durch fließende Retention (MARENBACH, 2002)**

Unter stehender Retention wird die so genannte „Seeretention“ verstanden. Hierbei wird ein Teil der zufließenden Hochwasserwelle zunächst im See gespeichert, wobei der nahezu horizontale Wasserspiegel des Sees ansteigt. Die Abflusswelle aus dem See ist im Vergleich zur Zulaufwelle gedämpft.

## 1.4 BEDEUTUNG DES BEGRIFFES RENATURIERUNG

Die Definitionen zum Begriff „Renaturierung“ sind sehr vielfältig und vor allem in ihrer möglichen Auslegung sehr vielseitig. Dies zeigt, wie unterschiedlich die Vorstellungen über Renaturierung sind.

Nach PATT ET AL. (1998) wird unter Renaturierung die „weitgehende Wiederherstellung eines Gewässers mit seinen Randbereichen entsprechend seinem natürlichen Charakter“ verstanden. Bei LANGE ET AL. (1989) wird Renaturierung unter dem Aspekt der Gewässerregulierung betrachtet. Danach ist „alleiniges Ziel einer Gewässerregulierung heute vielfach die Rückführung des Gewässers in einen möglichst naturnahen Zustand.“

Diese beiden Definitionen werfen die Fragen auf, was unter einem Gewässer zu verstehen ist und wie der natürliche Charakter beziehungsweise der naturnahe Zustand definiert ist. Nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) ist ein oberirdisches Gewässer ein „ständig oder zeitweilig in Betten fließendes oder stehendes oder aus Quellen wild abfließendes Wasser“. Nach DIN 4049 ist „Gewässer die Bezeichnung für das in der Natur fließende oder stehende Wasser einschließlich Gewässerbett und Grundwasserleiter.“ Die LAWA erweiterte diese Definition 1996 wiederum, indem sie den Talraum mit einschloss (DVWK, 1996).

Zum natürlichen Charakter heißt es bei PATT ET AL. (1998), dass „natürliche Gewässer mit ihren Lebensräumen und Lebensgemeinschaften vielfältige Ökosysteme sind.“ Hierbei wird das Gewässer als ein Teil seines Umfeldes gesehen. In der DIN 4047 findet sich dieser Ansatz ebenfalls wieder. Danach wird „unter Renaturierung die Rückführung eines genutzten Landschaftsteiles in einen naturnahen Zustand durch natürliche (sekundäre) Sukzession verstanden. Die Renaturierung soll zu naturnahen oder soweit möglich zu natürlichen Biotopen hinführen und die Landschaft ökologisch aufwerten (bereichern).“ Diese Definition der DIN 4047 zeigt sehr deutlich wie weit sich unsere Gesellschaft von der Natur entfernt hat. Es gibt für sie auf der einen Seite die Natur und auf der anderen Seite die Menschen mit ihren Produkten. Tatsache ist jedoch, dass der Mensch an sich ein Teil der Natur ist. Von daher ist der Maßstab des Natürlichkeitsgrades, welcher im Folgenden erläutert wird, nach Ansicht der Autorin nicht passend definiert. Der Bewertungsmaßstab setzt sich aus fünf Stufen zusammen: natürlich, naturnah, bedingt naturnah, naturfern und naturfremd (BAUER, 1985). Dabei entsprechen bei „natürlich“ die Bewertungsmerkmale vollständig einer vom Menschen nicht beeinflussten Ausprägung. Bei naturfremd liegen die Bewertungsmerkmale in einer vom Menschen vollständig veränderten Ausprägung vor. Die Begriffe naturnah, bedingt naturnah und naturfern liegen zwischen den beiden Extremen. Da es fast unmöglich ist, sich den Menschen aus unserem Land-

schaftsbild wegzudenken, wird inzwischen die Zeit vor der Industriellen Revolution als Maßstab für den natürlichen Zustand herangezogen.

Im englisch sprachigen Raum hat sich für Renaturierung der Begriff „rehabilitation“ durchgesetzt. Im Deutschen steht dieser Begriff als Synonym für die „Wiedereingliederung von durch Krankheit oder Unfall Geschädigten in die Gesellschaft“. In diesem Sinne kann auch die Renaturierung eines Gewässers gesehen werden. Für den Vorzug des Begriffs „rehabilitation“ gegenüber „restoration“ werden nach DE WAAL ET AL. (1998) folgende Argumente angeführt:

- Das Erreichen des so genannten Idealzustands (natürlich) ist im Prinzip nicht möglich.
- Unser Landschaftsbild hat sich verändert, wodurch andere Rahmenbedingungen gegeben sind.
- Die natürliche Entwicklung eines Gewässers wird bei der Zielfestlegung (zum Beispiel Zustand vor Beginn der Industriellen Revolution) nicht berücksichtigt.

Da eine „restoration“ so viele Probleme schon im Ansatz mit sich bringt, sollte der Schwerpunkt auf eine durchführbare „rehabilitation“ liegen. Unter Rehabilitation wird nach DE WAAL (1998) im einfachen Sinne die Zurückführung in einen guten, funktionierenden Zustand verstanden. JENSEN (1998) begründet ihre Wahl für den Begriff Rehabilitation mit dem Argument, dass mit ihm „der Versuch ausgedrückt werden kann, teilweise die natürlichen Prozesse oder Schlüsselfunktionen des natürlichen Wasserkreislaufs wieder herzustellen oder zu simulieren.“

## **1.5 BERÜHRUNGSPUNKTE**

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Gewässer umso stärker verändert werden, sprich naturfremder sind, je höher der Besiedlungsdruck ist. Industrialisierte Länder mit hoher Bevölkerungsdichte, wie zum Beispiel Deutschland, sind davon besonders betroffen. Werden nun Renaturierungen an Fließgewässern durchgeführt, sei es aus naturschutzfachlicher Sicht oder zur allgemeinen Auflockerung unserer zum Teil sehr eintönigen Landschaft zur Erhöhung des Freizeitpotenzials, so ist meist die nächste Besiedlung nah.

Die Bewohner der angrenzenden Siedlungen argwöhnen den Maßnahmen am Gewässer und nehmen eine abwehrende Haltung diesen Projekten gegenüber ein, da sie eine Verschärfung der Hochwassergefahr befürchten. Demgegenüber stehen die Befürworter der Renaturierungsmaßnahmen, die eine Reduzierung des Hochwasserscheitels gerade mit solchen Maßnahmen erreichen wollen.

Oftmals fehlt es dann an Fachwissen, um diesen Konflikt zu lösen. Erschwert wird die Einschätzung der Situation durch die hohe Anzahl der Einfluss nehmenden Fak-

toren wie zum Beispiel Einzugs- und Niederschlagscharakteristika, die zudem sehr variabel sind. Eine Pauschalantwort kann es deshalb nicht geben. Jeder Standort muss für sich betrachtet werden, wobei sowohl das oberhalb liegende Gebiet zur Feststellung der Eingangswerte, als auch das beeinflusste unterhalb liegende Gebiet in die Betrachtung eingehen müssen. Mögliche Rückstaueffekte wirken sich zudem auf den unmittelbar oberhalb liegenden Bereich aus.



## 2 EINFLUSS DER LINIENFÜHRUNG

Das folgende Kapitel ist so aufgebaut, dass dem Leser zunächst ein Überblick der Begrifflichkeiten, die in Zusammenhang mit der Linienführung stehen, gegeben wird. Weiterhin wird die Abhängigkeit der Laufform von anderen Parametern erläutert. Abschließend werden Erkenntnisse über den Einfluss der Laufform auf den Wasserstand aufgeführt.

### 2.1 BEGRIFFLICHKEITEN DER LAUFFORM

Bestimmte Formen eines Gewässerverlaufs treten regelmäßig auf. Dadurch ist es möglich, die Fließgewässer zu typisieren. Diese Einteilung der Gewässer wird in Kapitel 2.1.2 behandelt. Zuvor werden in Kapitel 2.1.1 die Formparameter eines kleinen Gewässerabschnittes definiert.

#### 2.1.1 Formparameter des Gewässerverlaufs

Zur Beschreibung eines Gewässerverlaufs gibt es die im Folgenden erklärten Begriffe. Diese werden in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet, so dass die jeweilige Definition genau beachtet werden sollte.

Der Windungsgrad ( $e_L$ ), der auch Mäandrierungsgrad genannt wird, beschreibt das Verhältnis der Flusslänge ( $I_F$ ) zur Tallänge ( $I_T$ ) nach MANGELSDORF ET AL. (1980):

$$e_L = \frac{I_F - I_T}{I_T}$$

Die Abb. 2.1 verdeutlicht, wie die Fluss- und Tallänge zu ermitteln sind.

Die Mäandergürtelbreite ( $b$ ) gibt den Abstand der parallelen Linien, die die größten Schwünge des Laufes einhüllen, an.

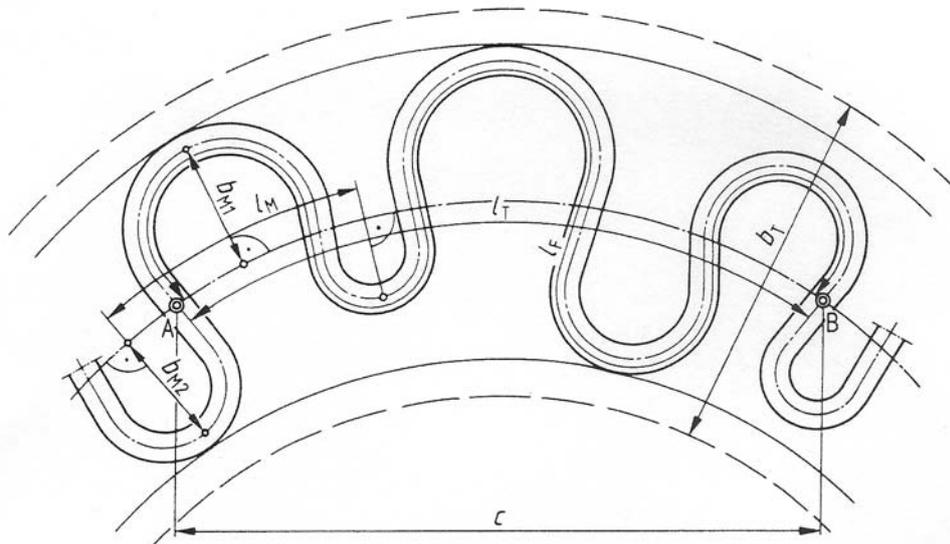
Die Mäanderschwingungsbreite ( $b_M$ ), auch Schwingungs- oder Mäanderamplitude genannt, bezeichnet den Abstand zweier aufeinander folgender gegenseitiger Krümmungsscheitel (Abb. 2.1).

Die Mäanderlänge (Wellenlänge) ( $I_M$ ) bezeichnet den mittleren Abstand zweier aufeinander folgender Laufkrümmungen.

Das Mäanderverhältnis ist nach ROSGEN (1996) als das Verhältnis der Mäanderschwingungsbreite zur bordvollen Bettbreite definiert.

Der Krümmungsradius ( $r$ ) gibt den Radius eines am Scheitel der Laufkrümmung angelegten Kreises an.

Der Zentriwinkel ( $z$ ) gibt die Richtungsänderung im Verlauf einer Krümmung an.



- |                         |  |
|-------------------------|--|
| $b_M = b_{M1} + b_{M2}$ | : Mäanderschwingungsbreite             |
| $l_M$                   | : Mäanderlänge                         |
| $b_T$                   | : Breite der Talsohle                  |
| $l_F$                   | : Flusslänge zwischen A und B          |
| $l_T$                   | : Tallänge zwischen A und B            |
| $c$                     | : Abstand zwischen A und B (Luftlinie) |

Laufentwicklung	$e_L = \frac{l_F - l_T}{l_T}$
-----------------	-------------------------------

Flussentwicklung	$e_F = \frac{l_F - c}{c}$
------------------	---------------------------

Talentwicklung	$e_T = \frac{l_T - c}{c}$
----------------	---------------------------

Abb. 2.1 **Maßbezeichnung nach DIN 4049**

### 2.1.2 Laufformen

Grundsätzlich können Gewässerläufe in „gestreckt“, „gewunden“ (mäandrierend) und „verzweigt“ eingestuft werden. Diese Unterteilung ist jedoch keineswegs ausreichend, um eine eindeutige Klassifizierung der Fließgewässer vorzunehmen. SCHERLE (1999) führt folgende Gründe dafür auf:

- ein mäandrierender Verlauf kann auch gestreckt sein
- gestreckte oder mäandrierende Gewässer können grundsätzlich auch verzweigt sein, weshalb der verzweigte Lauf keine eindeutige Beschreibung der Laufform ist
- vom gestreckten über ein nur leicht mäandrierendes bis zum stark mäandrierenden Gewässer existieren kontinuierliche Übergänge, weshalb mit diesem Begriffspaar keine ausreichende Differenzierung möglich ist
- als mäandrierend wird meist nur ein Gewässer bezeichnet, das eine gewundene Laufform besitzt (Windungsgrad  $> 1,5$ ), während geschwungene Gewässer noch zu den gestreckten gezählt werden
- der Begriff verzweigt wird nicht nur für Gewässer verwendet, deren Laufarme durch Inseln oder größere Aueflächen voneinander getrennt sind. Es werden fälschlicherweise oft auch Wildflüsse und Wildbäche damit charakterisiert, deren Mittel- und Niedrigwasserrinnen nur durch Bänke voneinander getrennt sind, die bei höheren Abflüssen aber eine insgesamt geschwungene oder gestreckte Laufform besitzen.

SCHERLE (1999) führt daraufhin die in der Tab. 2.1 aufgeführten 10 Begriffe für die Laufform ein, welche in der Abb. 2.2 grafisch veranschaulicht werden. Die Laufformen werden in der Tab. 2.1 durch den Windungsgrad und eine Definition sehr genau festgelegt. Die feine Unterteilung kann mit bloßem Auge jedoch nicht nachvollzogen werden, so dass die von ihm eingeführten Begriffe zur Laufform sich in der Praxis wohl nur schwer durchsetzen werden.

Die feine Einteilung von SCHERLE (1999) ist mit der Gliederung von BRICE (1983) konform. BRICE unterscheidet jedoch nur vier Gewässertypen (Abb. 2.3). Er nennt gewundene Verläufe mit einer kontinuierlichen Gewässerbreite (sinuous canaliform) und einer gewundenen Laufform mit einer verstärkten Gewässerbreite in der Krümmung und sichtbaren Anlandungen auf der Kurveninnenseite (sinuous point bar). Weiterhin definiert BRICE gewundene verflochtene (sinuous braided) und nicht gewundene verflochtene (nonsinuous braided) Gewässerverläufe. Eine Verzweigung des Gewässerverlaufs ist nach BRICE (1983) für alle Fließgewässertypen gegeben, so dass dies keine gesonderte Einteilung mehr für ihn ist (anabranche = Seitenarm).

Tab. 2.1 **Begriffe und Maßzahlen zur Unterscheidung der Laufform (SCHERLE, 1999)**

Laufform	Windungsgrad	Definition
gestreckt	1 - 1,05	nur seltene schwache Krümmungen und / oder sprunghafte Richtungsänderungen mit kleinem Winkel zur Talachse
unregelmäßig gestreckt	1 - 1,05	weitestgehend gestreckter Lauf mit seltenen aber ausgeprägten Krümmungen, die in unregelmäßigem Abstand auftreten
leicht geschwungen	1,05 - 1,3	regelmäßig wiederkehrende Krümmungen, deren Zenriwinkel nicht größer als 90° ist
stark geschwungen	1,3 - 1,5	regelmäßig wiederkehrende Krümmungen, deren Zenriwinkel zwischen 90° und 180° liegen
unregelmäßig geschwungen	1,05 - 1,5	Lauf, bei dem sich kleine und große Krümmungen mit unterschiedlichen Richtungsänderungen abwechseln
eingeschränkt stark geschwungen	1,3 - 1,5	durch Talflanken oder Terrassen eingeschränkter stark geschwungener Lauf, dessen Krümmungen sich deshalb nicht ausformen können
gewunden	> 1,5	Lauf, dessen Krümmungen einen Zenriwinkel von i. d. R. mehr als 180° oder eine verhältnismäßig große Amplitude besitzen
geflochten, insgesamt gestreckt	1 - 1,05	Lauf mit zwei oder mehr Rinnen, die i. d. R. durch Bänke voneinander getrennt sind, und dessen gesamtes Bett gestreckt ist
geflochten, insgesamt geschwungen	1 - 1,5	Lauf mit zwei und mehr Rinnen, die i. d. R. durch Bänke voneinander getrennt sind, und dessen gesamtes Bild geschwungen ist
verzweigt	einzelne Arme können alle o.g. Windungsgrade besitzen	Lauf mit zwei oder mehr Armen, die i. d. R. durch Inseln oder Teile der Aue voneinander getrennt sind. Die einzelnen Arme können alle Charakteristika der o. g. Eingerinne aufweisen

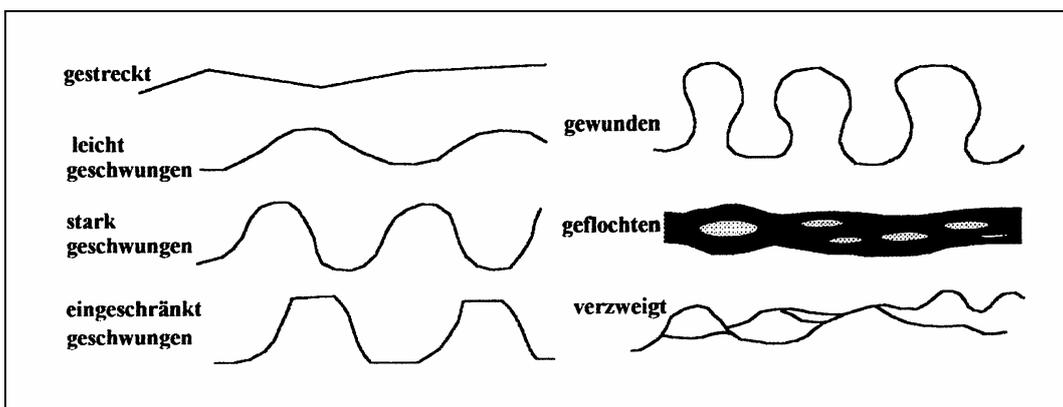
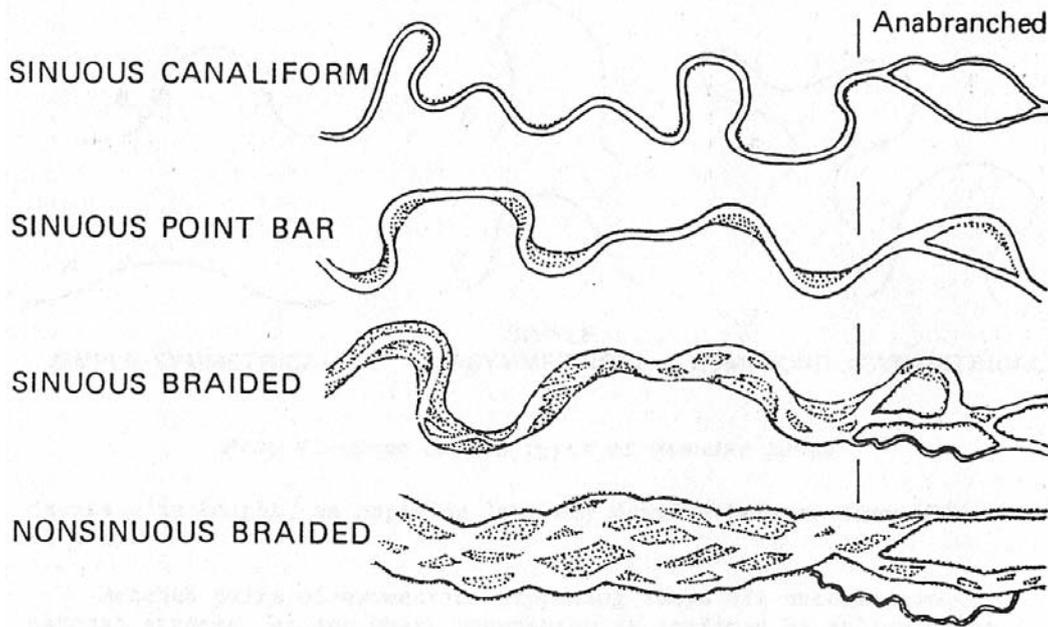


Abb. 2.2 **Laufformen entsprechend Tab. 2.1 (SCHERLE, 1999)**



**Abb. 2.3** Typisierung der Laufform nach BRICE (1983)

Die verschiedenen Möglichkeiten der Fließgewässertypisierung nach der Laufform, die hier beispielhaft wiedergegeben wurde, zeigt, wie schwierig es ist, die ineinander übergehenden Formen klar zu definieren und dabei eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten. ROSGEN (1996) entwickelte hierzu, aufgrund einer breiten Datenbasis von Fließgewässern in Kanada, den USA und Neuseeland, eine sehr differenzierte Typologie (Tab. 2.2). Dabei unterscheidet er Ein- und Mehrbettgerinne. Aufgrund des Eintiefungsgrades, des Breiten- / Tiefenverhältnisses und des Windungsgrades wird eine Grundklassifizierung mit Typbezeichnungen von A bis E vorgenommen. Eine weitere Untergliederung erfolgt anhand des Gefälles und des Sohlsubstrates. Letzteres wird durch Ziffern bezeichnet (1 = Fels, 2 = Blöcke, 3 = Steine, 4 = Kies, 5 = Sand, 6 = Schluff / Ton).

Die Tab. 2.3 zeigt eine beispielhafte Anwendung der ROSGEN-Typologie auf Gewässer in Baden-Württemberg (SCHERLE, 1999). Eine Einordnung in die Klassifizierung von ROSGEN war meist möglich. Da dabei jedoch oftmals an die Toleranzgrenzen gestoßen wurde, scheint eine Anpassung an mitteleuropäische Verhältnisse hier ratsam.

Tab. 2.2 **Bestimmungsschlüssel zur Unterscheidung der Gewässertypen nach ROSGEN (1996) aus SCHERLE (1999)**

1	Einbettgerinne						Mehrbettgerinne									
	stark (< 1,4)	mäßig (1,4 - 2,2; + -0,2)	gering (> 2,2)		nicht relevant											
2	Eintiefung $b_{T(2h)} / b_{T(h)}$															
3	$b_b / h_m$	klein (< 12)	mäßig bis groß (> 12)	sehr klein (< 12)	mäßig bis groß (> 12)	sehr groß (> 40)										
4	Windungsgrad	klein (< 1,2)	mäßig (> 1,2)	sehr groß (> 1,5)	groß (> 1,4)	klein	kl. bis groß									
5	Grundtyp	A	B	E	C	D	DA									
6	Gefällebereich (%)	A1 > 10	A2 4 - 9,9	A3 2 - 3,9	A4 < 2	A5 2 - 3,9	A6 < 2	B1 4 - 9,9	B2 2 - 3,9	B3 < 2	B4 2 - 3,9	B5 < 0,1	B6 0,1 - 2	B7 2 - 3,9	B8 < 0,1	B9 < 0,5
	Fels	A1a+	A1	G1	F1	F1b	F1c	B1a	B1	B1c	E3b	E3	C1b	C1	C1c	
	Blöcke	A2a+	A2	G2	F2	F2b	F2c	B2a	B2	B2c	E4b	E4	C2b	C2	C2c	
	Steine	A3a+	A3	G3	F3	F3b	F3c	B3a	B3	B3c	E5b	E5	C3b	C3	C3c	D3b
	Kies	A4a+	A4	G4	F4	F4b	F4c	B4a	B4	B4c	E6b	E6	C4b	C4	C4c	D4b
	Sand	A5a+	A5	G5	F5	F5b	F5c	B5a	B5	B5c	E6b	E6	C5b	C5	C5c	D5b
	Schluff / Ton	A6a+	A6	G6	F6	F6b	F6c	B6a	B6	B6c	E6b	E6	C6b	C6	C6c	D6b

**Tab. 2.3 Anwendung der Rosgen-Typologie auf Gewässer in Baden-Württemberg (SCHERLE, 1999)**

Gewässername	Gewässertyp	Eintiefungsgrad	Breite/Tiefe	Windungsgrad	Gefälle [%]	Typ nach ROSGEN	Einpassung
Schobbach (NADOLNY 1994)	Schwemmfächerbach	> 2,2	13	1,36	0,28	C4	in Toleranz
Kammbach (NADOLNY 1994)	Flachland-auebach	> 2,2	8	1,24	0,07	E5 - E6	leicht außer Toleranz
Trienzbach 1 (SCHERER & SCHERLE 1994)	Bergbach	< 1,4	> 12	~ 1	1,5	G3c	in Toleranz
Trienzbach (HUMBORG 1995)	Bergbach	< 2,2	~ 10	~ 1	1,08	G3c	problematisch
Wiese (SCHERLE ET AL. 1995)	kleiner Wildfluss	> 2,2	40	~ 1	0,5	D3 - D4	gut

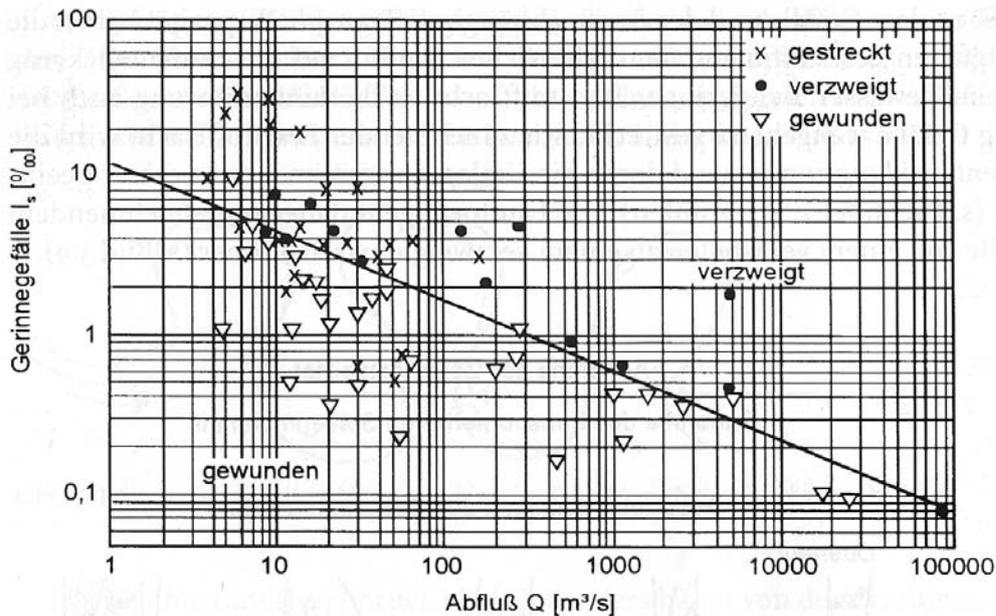
## 2.2 ABHÄNGIGKEITEN DER LAUFFORM

Von verschiedenen Wissenschaftlern konnte nachgewiesen werden, dass die Lauf- form vom Gefälle und vom Korndurchmesser des Sohlenmaterials abhängig ist (LEO- POLD und WOLMAN, 1957, LEOPOLD ET AL. 1960, SCHUMM, 1977, ROSGEN, 1996 etc.). Durch die sehr unterschiedlichen naturräumlichen Voraussetzungen (Vegetation, Klima etc.) können meist jedoch nur Tendenzen angegeben werden.

### 2.2.1 Abhängigkeit der Lauform vom Gefälle

Grundlegende Arbeiten zu dieser Thematik stammen von LEOPOLD und WOLMAN, die eine ganze Reihe von Gewässern bezüglich der Lauform untersucht haben. Von ihnen stammt die Abb. 2.4, die die Abhängigkeit der Lauform vom Sohlgefälle und bordvollem Abfluss aufzeigt. Dabei unterscheiden sich gestreckte Lauformen durch einen Windungsgrad < 1,5 von den gewundenen Lauformen. Die Linie in der Grafik markiert die Trennung zwischen den gewundenen und verzweigten Läufen. Es ergibt sich im metrischen System folgende Gleichung für die Trennlinie:

$$I_S = 0,012 \cdot Q^{-0,44}$$



**Abb. 2.4** *Abhängigkeit der Lauform vom Gefälle und bordvollem Abfluss (nach LEOPOLD und WOLMAN (1957) aus PATT ET AL. (1998))*

CHARLTON (1975) erhielt aufgrund von Laborversuchen mit gestreckten Läufen als Ausgangssituation folgende Gleichung für das Gefälle zur Beschreibung des Beginns einer Mäandrierung:

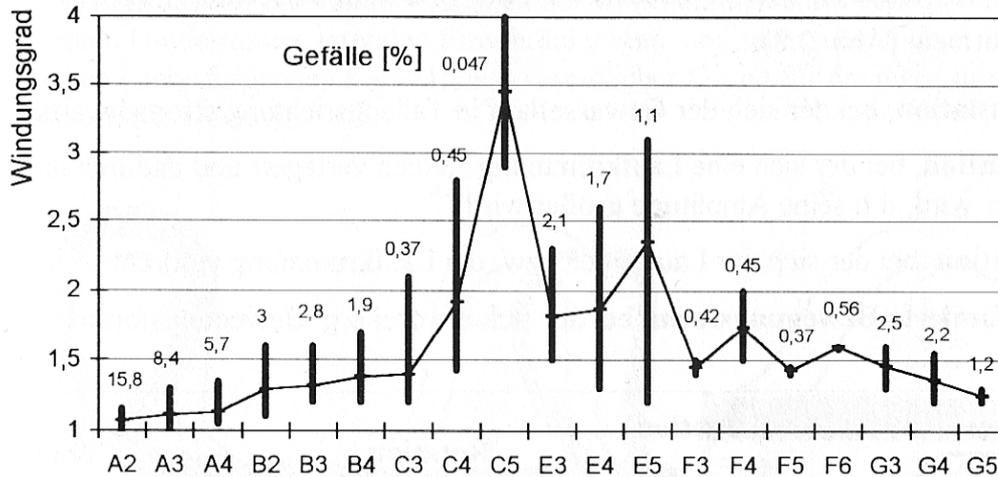
$$I_{gr} = 0,00085 \cdot Q_b^{-0,21}$$

SCHERLE (1999) weist darauf hin, dass diese Gleichung interessant ist für begradigte Gewässer, die ihre natürliche Lauform eigendynamisch wieder entwickeln sollen. Dies kann sehr lange Zeit in Anspruch nehmen. Die meisten Gewässer entwickeln sich jedoch nicht aus einem ganz geraden Verlauf heraus, so dass äußere Störungen und kleine Inhomogenitäten ausreichen, um bei geringem Gefälle einen geschwungenen Lauf entstehen zu lassen.

Untersuchungen von EDGAR (1983) zeigten unter Laborbedingungen, dass mit steigendem Gefälle der Windungsgrad bis zu einem Maximalwert zunimmt. Nach Erreichen dieses Wertes verzweigt sich der Gewässerverlauf bei weiter steigendem Gefälle.

Aus den Untersuchungsergebnissen von ROSGEN (1996) wird ersichtlich, dass der Windungsgrad nicht allein vom Gefälle abhängt, sondern auch in starkem Maße vom Sohlensubstrat (Abb. 2.5). In der Regel ist der Windungsgrad höher, je feiner das vorliegende Sohlenmaterial ist. In diesem Zusammenhang muss auch der Eintiefungsgrad betrachtet werden. Je stärker sich ein Gewässer eintieft, desto weniger stark ausgeprägt ist die Mäandrierung. Gering eingetieft Gewässer werden in der

ROSGEN-Typologie mit E und C bezeichnet. In Abb. 2.5 sind dies die Gewässertypen mit dem höchsten Windungsgrad.



**Abb. 2.5** *Spektren der Windungsgrade und die zugehörigen mittleren Sohlgefälle der von ROSGEN (1996) untersuchten Gewässertypen*

### 2.2.2 Abhängigkeit der Lauform vom Feststofftransport

Als Feststofftransport wird laut DIN 4049 T.3 die „Masse der Feststoffe, die in einer Zeiteinheit durch den gesamten Gewässerquerschnitt treibt“, bezeichnet. Feststoffe werden in Schwimm-<sup>2</sup> und Schwebstoffe<sup>3</sup> sowie Geschiebe<sup>4</sup> unterteilt.

SCHUMM (1977) untersuchte in alluvialen Fließgewässern mit sandigen Sohlen die Beziehung zwischen der Art des Sedimenttransports und dem Breiten- / Tiefenverhältnis. Dabei zeichnete sich ab, dass je mehr Geschiebe transportiert wird, desto flacher und breiter sind die Querschnitte. Tab. 2.4 zeigt eine grobe Zuordnung des Breiten- / Tiefenverhältnisses zum Geschiebetransport von SCHUMM (1977).

---

<sup>2</sup> Feststoffe, die auf dem Wasser schwimmen (DIN 4049 T. 3)

<sup>3</sup> Feststoffe, die durch das Gleichgewicht der Vertikalkräfte in Schwebelage gehalten werden (DIN 4049 T. 3)

<sup>4</sup> Feststoffe, die nur im Bereich der Sohle bewegt werden (DIN 4049 T. 3)

Tab. 2.4 **Beziehung zwischen der Art des Sedimenttransports und dem Breiten- / Tiefenverhältnis (nach SCHUMM (1977) aus NADOLNY (1994))**

Art des Sedimenttransports	Anteil des Geschiebes am Feststofftransport	Breiten- / Tiefenverhältnis in stabilen Gerinnen
Schwebstofffracht	< 3 %	< 10
gemischte Fracht	3 – 11 %	zwischen 10 und 40
Geschiebe	> 11 %	> 40

Obwohl die Entstehung von Sohlen- und Gerinneformen physikalisch noch nicht vollständig erfasst ist (HUNZINGER, 1998), gilt laut YALIN (1992) als gesichert, dass das Auftreten der einen oder anderen Sohlen- bzw. Gerinneform von den folgenden dimensionslosen Größen abhängt:

$$Re^* = \frac{d_{ch} \cdot v_0^*}{\nu} \quad (\text{Feststoff-Reynoldszahl}), \text{ mit } v_0^* = \sqrt{g \cdot r_{hy,So} \cdot I}$$

$$Fr^* = \frac{v_0^{*2}}{\rho' \cdot g \cdot d_{ch}} \quad (\text{Feststoff-Froudezahl})$$

$$\varepsilon = \frac{h}{d_{ch}} \quad (\text{relative Rauheit})$$

$$\rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W} \quad (\text{relative Feststoffdichte})$$

Die Feststoff-Reynoldszahl  $Re^*$  berücksichtigt den Einfluss der Viskosität und die Feststoff-Froudezahl  $Fr^*$  den Einfluss der relativen Feststoffdichte. Bei Betrachtung des Sedimenttransports in der Masse wird die relative Feststoffdichte durch die Feststoff-Froudezahl ausreichend berücksichtigt. Lediglich bei der Bewegung einzelner Sedimentpartikel reicht dieses nicht aus (YALIN, 1992). Für große Wassertiefen geht nach RÖTTNER (1959) der Einfluss der relativen Rauheit auf den Geschiebetransport deutlich zurück. Für Werte von  $h/d_{ch} > 100$  bis 200 ist der Einfluss der relativen Rauheit nur noch sehr gering (SPECHT, 2002).

Auf den Zusammenhang von Sohlenformen und Gerinneformen geht ZANKE (1982) ein. Dies soll hier jedoch nicht vertieft werden.

Das Breiten- / Tiefenverhältnis eines Gewässers findet sich in den oben aufgeführten dimensionslosen Größen indirekt in der Wassertiefe  $h$  und der Schubspannungsgeschwindigkeit  $v_0^*$ , in die das Gefälle eingeht, wieder. Diese wiederum stehen in Beziehung zum Abfluss  $Q$ . Die Breite des Abflussquerschnitts geht nicht direkt in die dimensionslosen Größen ein. Es gibt jedoch laut YALIN (1992) einen Zusammenhang

zwischen Breiten- / Tiefenverhältnis und der relativen Rauheit  $h/d_{ch}$ . Bei einem Verhältnis von

$$\frac{b}{h} < \psi_{\varepsilon} \left( \frac{h}{d_{ch}} \right)$$

können sich an der Gewässersohle Dünen, Antidünen und Riffel bilden, dessen Länge und Steilheit nicht vom Breiten- / Tiefenverhältnis abhängt. Bei einem Verhältnis von

$$\frac{b}{h} > \psi_{\varepsilon} \left( \frac{h}{d_{ch}} \right)$$

können sich Mehrfachbänke und alternierende Bänke ausbilden, dessen Größe und Anordnung vom Breiten- / Tiefenverhältnis beeinflusst werden.

Zur Veranschaulichung weist YALIN (2002) darauf hin, dass sich Dünen, Antidünen und Riffel nicht nur an Gewässersohlen bilden, sondern auch, verursacht durch Windeinfluss, in den Wüsten. Das Phänomen der Mehrfach- und alternierenden Bänke ist dort jedoch nicht vorzufinden.

Entsprechend der Feststoff-Reynoldszahl  $Re^*$  werden drei Ebenen unterschieden. Die Ebene 1 steht für den glatten Bereich, in dem lediglich Riffel auftreten. Die Ebene 2 zeigt den Übergangsbereich in dem Riffel größere Sohlenformen überlagern. Der raue Bereich, in der sich die Flussmorphologie befindet, wird als Ebene 3 bezeichnet (Abb. 2.6 und Abb. 2.7). Je nach Froudezahl können in der Ebene 3 Dünen auftreten, wenn  $Fr < 1$ , oder Antidünen, wenn  $Fr > 1$  ist. Daneben kommen im rauen Bereich Bänke vor. Die durchgezogenen Linien in den Abb. 2.6 und Abb. 2.7 begrenzen den Bereich der alternierenden Bänke. Oberhalb ( $I_1$ -Linie) stellen sich verzweigte Flussläufe mit Mehrfachbänken ein. Die Begrenzungslinien sind durch folgende Formeln definiert:

$I_1$ -Linie (obere Begrenzung)

$$\frac{b}{h} = 25 \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$I_{\varepsilon}$ -Linie (untere Begrenzung)

$$\text{wenn } \frac{h}{d} < \approx 100, \text{ dann} \quad \frac{b}{h} = 0,25 \cdot \frac{h}{d}$$

$$\text{wenn } \frac{h}{d} > \approx 100, \text{ dann} \quad \frac{b}{h} = 25$$

Der Bereich der mäandrierenden Laufform ist nicht eindeutig definiert. YALIN (1992), der sich auf die Versuche von DA SILVA (1991) bezieht, gibt einen größeren Bereich

für Mäander an als DA SILVA selbst und bezieht den Übergangsbereich mit ein, in dem Mäander als auch alternierende Bänke vorgefunden werden.

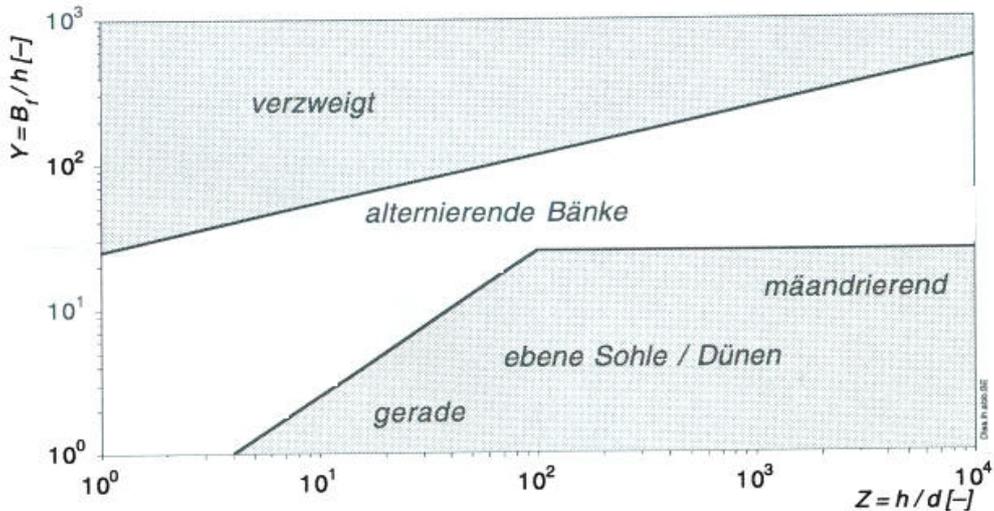


Abb. 2.6 **Abgrenzung der Gerinnemorphologie nach DA SILVA (1991) aus HUNZINGER (1998)\***

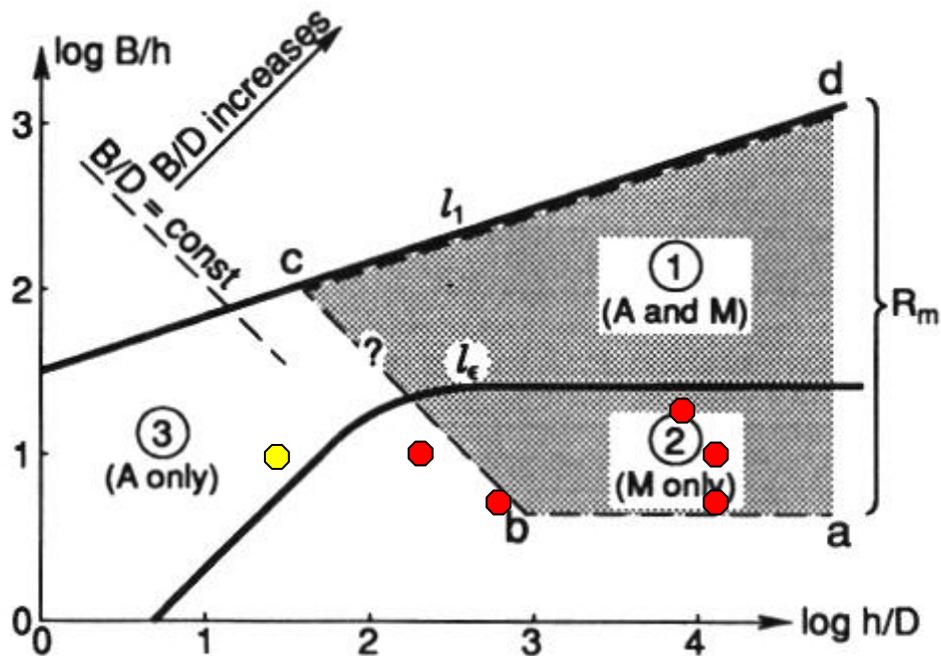


Abb. 2.7 **Abgrenzung der Gerinnemorphologie nach YALIN (1992)\***

\* Die Bezeichnung für die Breite (b und B) sowie für den Korndurchmesser (d und D) werden hier synonym verwendet

Die in dieser Arbeit zu untersuchenden Gewässer liegen in dem von YALIN bezeichneten Bereich 2 (Tab. 2.5 und Abb. 2.7), indem nur Mäander vorkommen. Lediglich

eine Sohlenprobe bei Poppenburg an der Leine liegt außerhalb dieses Bereiches. In Kombination mit der Bodenprobe an der Böschung im Bereich Poppenburg würde sich das h/d-Verhältnis jedoch so verschieben, dass die Leine hier ebenfalls in den Bereich 2 von YALIN (Abb. 2.7) fallen würde.

**Tab. 2.5 Zuweisung des Breiten- / Tiefenverhältnisses zur relativen Rauheit**

<b>Gewässerabschnitt (Probenahme)</b> (Vergleiche Abschnitte Kap. 8)	<b>bordvolle Wassertiefe h</b>	<b>Breite / Tiefe b/h</b>	<b>Korn- größe d<sub>50</sub></b>	<b>relative Rauheit h/d</b>	<b>log b/h</b>	<b>log h/d</b>
	[m]	[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]
Bewer (Kiesschicht 2,85 m u. GOK)	1,0	4	0,60	1700	0,6	3,2
Bewer (unterer Bö- schungsbereich)	1,0	4	0,03	33.000	0,6	4,5
Bewer (mittlerer Bö- schungsbereich)	1,0	4	0,01	100.000	0,6	5,0
Ilme (Auesedimente)	1,4	8	0,04	35.000	0,9	4,5
Leine (Kiesschicht)	3,0	10	6,00	500	1,0	2,7
Leine (Auelehmschicht)	3,0	10	0,03	100.000	1,0	5,0
Aller (Sohle)	4,5	18	0,25*	18.000	1,3	4,3
Leine (Sohle bei Pop- penburg)	3,0	11	35,00	86	1,0	1,9
Leine (Böschung bei Poppenburg)	3,0	11	0,02	150.000	1,0	5,2

\* vorliegende Kornverteilungskurve liegt oberhalb des Untersuchungsabschnittes

Die Bereiche sind nicht so strikt voneinander abgegrenzt, wie es aufgrund der Zeichnung erscheinen mag. Die Tab. 2.5 führt die stichprobenartige Zuweisung entlang der hier untersuchten Gewässer auf. Da die vorliegenden Korngrößenverteilungen auf sehr unterschiedlichen Probenahmen basieren, ist ein entsprechender Hinweis in der ersten Spalte der Tab. 2.5 zu finden. Die starken Schwankungen in der Korngrößenverteilung, die sich besonders in der relativen Rauheit widerspiegeln, zeigen gut die Variabilität an natürlichen Gewässerverläufen, wodurch eine genaue Vorhersage der Laufentwicklung nicht möglich ist. Die Spannweite der daraus resultierenden theoretischen Entwicklungsmöglichkeiten zeigt jedoch, welche Korridore für eine freie Gewässerentwicklung zur Verfügung stehen sollten und worauf sich Besitzer angrenzender Ländereien einstellen müssen.

Auffällig bei den zu untersuchenden Gewässern ist die Bildung von Uferreehen. Hierunter werden Uferaufhöhungen an einem Wasserlauf verstanden, die durch Ablagerungen von Feststoffen bei Hochwasser (oder durch Räumgut) entstehen (DIN 4049 T.3). Während Geschiebe lediglich in Sohlnähe transportiert wird, können die kleineren Schwebstoffpartikel bei entsprechender Fließgeschwindigkeit und Turbulenzen in allen Wassertiefenlagen transportiert werden. Bei Reduzierung der Fließgeschwindigkeit sinken die Partikel zu Boden. Da die Fließgeschwindigkeiten auf dem Vorland bzw. an der Uferböschung geringer sind als im Hauptquerschnitt setzen sich hier die feineren Sedimentpartikel ab. Dies hat zur Folge, dass die bordvolle Wassertiefe des Hauptquerschnitts, dessen Sohle auf dem gleichen Niveau bleibt, zunimmt. Damit nimmt die Ausuferungshäufigkeit ab.

Besonders auffällig ist die Ablagerung der Sedimente am Ufer bei aufgeweiteten Profilen. Gut beobachtet in diesem Zusammenhang ist eine Hochwasserumflut an der Saale bei Elze kurz vor ihrer Mündung in die Leine. Aus Hochwasserschutzgründen soll die Aue des Umflutgewässers ein bestimmtes Niveau nicht überschreiten. Umfangreiche Unterhaltungsmaßnahmen, bei denen das sich während Hochwasserereignissen abgesetzte Sediment regelmäßig abgegraben wird, sind dadurch erforderlich (LECHER ET AL., 1996b). Innerhalb von drei Jahren (1993 bis 1996) betrug hier die mittlere Auflandung 20 cm.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ wurden im vergangenen Jahr Laborversuche durchgeführt, die das Sedimentationsverhalten entlang von mit Bewuchs bestandenen Ufern beleuchten (LEHMANN ET AL., 2003). In Tab. 2.6 sind die Versuchsergebnisse aufgeführt. Die Versuche zeigen, dass die Sedimentationsraten bei dichtem Bewuchs entlang des Ufers besonders hoch sind. Umströmter Einzelbewuchs hingegen fördert die Uferreehenbildung in weit geringem Maße. Weiterhin wird deutlich, dass geringere Fließgeschwindigkeiten bei geringeren Fließtiefen die Ablagerung von Feststoffen fördert und Makroturbulenzen im Übergangsbereich des Uferbewuchses zum freien Gewässer die Sedimentation stark beeinflussen.

Für die Unterhaltungsmaßnahmen bedeutet dies, dass vor allem buschiger Jungbewuchs einen erheblichen Mehraufwand verursacht, wenn die Bildung der Uferreehen nicht erwünscht ist. In Hochwasser sensiblen Bereichen kann durch die Uferreehen insbesondere im Zusammenhang mit dichtem Bewuchs ein Aufstau erfolgen, der den Wasserspiegel im Oberlauf anhebt. In der Unterhaltung sollte deshalb in diesen Bereichen dafür gesorgt werden, dass möglichst schnell ein Bestand von Großbewuchs entsteht, dessen Stämme umströmt werden.

**Tab. 2.6 Bildung von Uferrehnen aufgrund verschiedener Bewuchssituationen  
(nach LEHMANN ET AL., 2004)**

Versuchs- serie	Bewuchssituation	Sedimentationsverhalten
1	Anordnung kollektiver Bewuchsbestände	Sedimentation von feinputikulären Feststoffen innerhalb des Bewuchs
2	Ufersaum aus Hochstaudenfluren und kleinen, biegsamen Gehölzen	sehr intensive Sedimentation feiner Feststoffe
3	Gehölzstummel durch Auslichtungsarbeiten	besonders hohe lokale Sedimentation von Feststoffen in ihrem Umfeld
4	Dichter Saum aus älteren Weiden bzw. Bäumen entlang der Uferlinie	sehr geringe Sedimentationstendenz
5 - 8	Zweireihige Anordnung eines Weidenbestandes	stärkere Verlandung der landseitigen Vegetationsreihe im Vergleich zur ufernahen Vegetationsreihe
9 - 11	Querreihe diagonale Anordnung eines Weidenbestandes	Ausbildung einer Rehne direkt entlang der Uferlinie sowie einer parallel dazu verlaufenden Rehne am vorlandseitigen Rand der Bewuchsgruppe

An der Donau östlich von Wien wurde beim Hochwasser im August 2002 eine ähnliche Beobachtung gemacht. Es wurde festgestellt, dass der Wasserspiegel um 0,6 m über dem angenommenen HW100-Spiegel lag, obwohl der gemessene Abfluss ein HQ100 unterschritt. Als Ursache hierfür werden flächige Aulehm- und Ausandablagerungen auf den Donauvorländern und in der geänderten forstlichen Bewirtschaftung der Auen seit Einrichtung des Nationalparks angeführt (KLASZ ET AL., 2004).

### **2.2.3 Regime-Theorie**

Die Regime-Theorie wurde Ende des 19. / Anfang des 20. Jahrhunderts auf dem indischen Subkontinent entwickelt, als britische Ingenieure dort zahlreiche Bewässerungskanäle planten und bauten (BROOKES U. SHIELDS, 1996). Ziel war es, Kanäle zu bauen, die einen möglichst geringen Unterhaltungsaufwand mit sich ziehen. Die Kanäle sollten gerade sein und mit nahezu konstantem Abfluss beschickt werden. Von diesen Rahmenbedingungen ausgehend wurde die Annahme aufgestellt, dass ein Gewässer einen Gleichgewichtszustand einnehmen kann. Das heißt, dass sich je nach Abfluss eine bestimmte Lauform und Querprofilform einstellt. Die zuerst von LACEY (1930) aufgestellten Grundgleichungen wurden auf Sohl- und Ufermaterialien sowie weiteren Parametern erweitert (LEOPOLD U. MADDOCK, 1953, KELLERHALS,

1967, BLENCH, 1969). Damit wurde der Versuch gestartet, eine Anpassung der Regime-Gleichungen an natürliche Gewässer, die eine sehr viel größere Variabilität in ihrer Lauform und dem auftretenden Abfluss aufweisen, vorzunehmen.

Die Grundformen der Regimegleichungen lauten:

$$b = k_1 \cdot Q_b^{k_2} \cdot D_{50}^{k_3}$$

$$h = k_4 \cdot Q_b^{k_5} \cdot D_{50}^{k_6}$$

$$I = k_7 \cdot Q_b^{k_8} \cdot D_{50}^{k_9}$$

Sie nehmen zum Teil je nach Literaturquelle eine abgewandelte Form an, wie aus Anlage 1 ersichtlich wird. Recht einheitlich geben verschiedene Autoren für den Faktor  $k_2$  einen Wert von 0,5 an (Anlage 1). Dies ist laut YALIN (1992) darauf zurückzuführen, dass die Breite eines Gewässers schneller auf Abflussänderungen reagiert als die Tiefe oder gar das Gefälle eines Gewässerlaufs.

Für die in dieser Arbeit zu untersuchenden Gewässer werden entsprechende Gleichungen im Kapitel 7 abgeleitet und Gleichungen ähnlicher Gewässer gegenübergestellt.

### 2.3 EINFLUSS DER LAUFFORM AUF DEN ABFLUSS

Wird bei einem begradigten Fließgewässer wieder eine Mäandrierung zugelassen bzw. angeregt, verringert sich mit zunehmendem Windungsgrad das Sohlgefälle. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf den Abfluss. Durch die Verringerung des Gefälles nimmt die Fließgeschwindigkeit ab. Dies kann zum Beispiel mit der Formel für die mittlere Fließgeschwindigkeit mit dem Allgemeinen Fließgesetz nach DARCY-WEISBACH berechnet werden:

$$v_m = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot d_{hy} \cdot I_E}{\lambda}}$$

mit:  $g$  Fallbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$d_{hy}$  hydraulischer Durchmesser [m]

$I_E$  Energiehöhengefälle [-]

$\lambda$  Widerstandsbeiwert [-]

Bei Verringerung der Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) muss sich, um den gleichen Abfluss ( $Q$ ) abführen zu können, die durchflossene Fläche ( $A$ ) vergrößern, indem der Wasserstand steigt. Dieses geht aus der Kontinuitätsgleichung hervor:

$$Q = v \cdot A$$

Neben der Verringerung des Sohlengefälles und damit des Energiehöhengefälles, erhöht sich der Anteil im Widerstandsbeiwert, der auf die Laufkrümmungen zurückzuführen ist.

Der Widerstandsbeiwert aufgrund der Laufkrümmung wird abgeleitet aus dem Verhältnis der Wasserspiegelbreite ( $b$ ) und dem Krümmungsradius ( $r_M$ ). LEOPOLD ET AL. stellten 1960 folgendes Verhältnis für den Energiehöhenverlust infolge Krümmung ( $f_K$ ) gegenüber dem Verlust durch Rauheit eines nicht gekrümmten Verlaufs ( $f_R$ ) auf:

$$\frac{f_K}{f_R} = 2,625 \cdot \frac{b}{r_M} - 0,525$$

Durch diese Gleichung wird ersichtlich, dass schon bei einem Verhältnis  $b/r_M$  von 0,2 die Verlusthöhe infolge Krümmung gegenüber der infolge Rauheit gegen Null geht. Damit sind die Energieverluste durch Krümmungen bei kleinen  $b/r_M$  Verhältnissen vernachlässigbar.

COWAN (in CHOW, 1959) nahm eine Abschätzung der Abflusskapazitätsminderung bei der Strukturentwicklung eines ausgebauten Gewässers vor. Er berücksichtigte folgende Entwicklungszustände:

1. Am Entwicklungsbeginn ist ein nahezu vegetationsfreies und strukturloses Gewässerbett vorhanden, dessen Rauheit von der Oberflächenrauheit des Bettmaterials bestimmt ist.
2. Nach Einstellung der Gewässerunterhaltung und Beseitigung der Ufersicherung entsteht insbesondere durch Ufererosion ein Bett mit einer unregelmäßigen Oberfläche.
3. Durch unterschiedliche Ufervegetation und Inhomogenitäten des Bettmaterials entstehen durch Erosion und Anlandung wechselnde Querschnittsformen und -größen (Uferbuchten, Weitungen, Bänke, Ufergehölzstrukturen etc.).
4. Nach längerer Zeit entwickelt sich wieder die ursprüngliche Laufform mit Krümmungsverlusten und einer größeren Lauflänge (erhöhter Windungsgrad).
5. Ein Uferwald entsteht, der sich selbst überlassen bleibt. Mit der Zeit gelangt Totholz ins Gewässer, das Strömungshindernisse bildet und weitere Bettstrukturen verursacht.

In der Tab. 2.7 sind die von COWAN ermittelten prozentualen Anteile des ursprünglichen Abflusses aufgeführt und diesen Ergebnissen von SCHERLE (1999) gegenübergestellt. COWAN verwendete für die Ermittlung einen an die Formel von MANNING-STRICKLER angelehnten Ansatz.

SCHERLE (1999) nahm den Ansatz von COWAN auf und ermittelte unter Zugrundelegung der natürlichen morphologischen Daten bzw. Maßzahlen, die von NADOLNY (1994) und HUMBORG (1995) erhoben wurden, die Veränderung der Abflusskapazität an verschiedenen Bächen. Es wurde dabei die vereinfachende Annahme getroffen, dass beim Ausbau ein Hochwasserabfluss gewählt wurde, der nur so groß war, dass die Begradigung und Profilierung des Bettes beim Ausbau gerade ausgereicht hat, um den Abfluss bordvoll im Profil abzuführen. Es kommt in der Tab. 2.7 sehr deutlich zum Ausdruck, dass die naturnahe Zurückführung der Laufstruktur bei Bergbächen einen sehr viel geringeren Einfluss auf die Abflusskapazität hat als bei Schwemmfächerbächen und Flachlandbächen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die steilen Berglandbäche natürlicherweise einen geringeren Windungsgrad aufweisen. Bei Berglandbächen kommen dafür Behinderungen des Abflusses durch Totholz sehr viel stärker zum Ausdruck.

**Tab. 2.7 Beispiel einer Abschätzung der Abflusskapazitätsminderung bei der Strukturentwicklung eines ausgebauten Gewässers**

Entwicklungs- zustand	% des ursprünglichen Abflusses				
	COWAN (in CHOW 1959)	SCHERLE (1999)			
		Bergbäche		Schwemmfächer- u. Flachlandbäche	
		Finken- bach	Stein- bach	Schob- bach	Kamm- bach
1 Ausbauzustand	100	100	100	100	100
2 Rauheitserhöhung	71	83	92	90	75
3 Bettweitungen	55	75	91	76	59
4 natürl. Laufform	33	68	83	43	43
5 Totholzstrukturen	21	53	52	35	34

### **3 BEWUCHSEINFLUSS**

Unter Bewuchs werden laut DVWK (1991) sowohl Pflanzenarten, wie z. B. Gräser, krautartige Pflanzen und Gehölze in Busch- und Baumform verstanden als auch ihre Anordnung im und am Gewässer, wobei unterschieden werden muss, ob die Pflanzen einzeln wirken oder als Bestand betrachtet werden. Eine einzelne Pflanze oder ein einzelnes Pflanzenteil (Stamm, Stengel, Rute, Ast) wird dabei als Bewuchselement bezeichnet und wenn mehrere Pflanzen (Mittel- oder Großbewuchs) im Grundriss oder im Querschnitt als Gruppe stehen, wird dies als Bewuchsbestand bezeichnet.

Neben der Einteilung der natürlichen Ufervegetation in die vier Zonen Wasserpflanzen-, Röhricht-, Weich- und Hartholzzone, gibt es eine Einteilung in Klein-, Mittel- und Großbewuchs. Diese beziehen sich auf die Wasserstände. Beim Kleinbewuchs kommt es zu einer vollständigen Überströmung. Beim Mittelbewuchs ist die Höhe des Bewuchses nahezu gleich dem Wasserstand, wird jedoch noch überströmt und beim Großbewuchs ist die Bewuchshöhe größer als der Wasserstand.

Die Berechnung des Bewuchseinflusses auf den Abfluss ist durch viele Wechselwirkungen und nicht zuletzt durch die Mannigfaltigkeit des Bewuchses keine leichte Aufgabe. Durch ein Schwerpunktprogramm der DFG von 1979 bis 1986 zum Thema „Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Prozesse“ mit einer Arbeitsgruppe, die sich der „Hydraulischen Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“ annahm, wurden auf diesem Gebiet große Fortschritte erzielt. Lange Messreihen gibt es weiterhin vom britischen „Science and Engineering Research Council“ (SERC), welches von 1986 bis 1994 am wasserbaulichen Versuchslabor Hydraulic Research Ltd. (HR) in Wallingford, England, eine großmaßstäbliche Versuchsrinne betrieb. Seit 1996 wird eine von der Stadt Wien errichtete ingenieurbiologische Versuchsstrecke im Wienfluss für Naturversuche genutzt. Auf die oben aufgeführten sowie weitere Untersuchungen zur Bewuchsproblematik im Hinblick auf den Abfluss wird in diesem Kapitel eingegangen und somit ein Überblick über den aktuellen Stand des Wissens wiedergegeben.

#### **3.1 DFG-SCHWERPUNKTPROGRAMM „HYDRAULISCHE PROBLEME BEIM NATURNAHEN GEWÄSSERAUSBAU“**

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Prozesse“ sollten innerhalb der Koordinierungsgruppe „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“ die in naturnahen Gewässern auftretenden

physikalischen Vorgänge behandelt werden. Aufgrund der Komplexität beschränkte sich die Untersuchung auf folgende Punkte:

- gegliederte Profilierung,
- durchströmter und überströmter Ufer- bzw. Vorlandbewuchs,
- abschnittsweise veränderliche Rauheiten sowohl längs als auch quer zur Fließrichtung,
- gemäßigt unregelmäßige Geometrie.

In der Abb. 3.1 werden die Themen der Einzeluntersuchungen gegenübergestellt und die wichtigsten Merkmale hervorgehoben.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Forschungsbericht „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“ (ROUVE, 1987) ausführlich beschrieben. Im Folgenden sollen hier lediglich die theoretischen Ansätze kurz erläutert werden, wobei in erster Linie auf das Verfahren von Pasche eingegangen wird, welches sich durch weitere Untersuchungen als die Methode herausstellte, die physikalisch am besten begründet ist. In der Untersuchung der Gewässerabschnitte im Allereinzugsgebiet wird deshalb auch dieser Ansatz gewählt.

Allen in dieser Koordinierungsgruppe erarbeiteten Verfahren liegt die Idee des so genannten Trennflächenverfahrens zugrunde. Es wurde abgeleitet aus der Beobachtung, dass es einen intensiven Wasseraustausch bei Gerinnen mit unterschiedlich strukturierten Abflussbereichen gibt. Dies ist zum Beispiel bei gegliederten und / oder mit Bewuchs bestandenen Querschnitten der Fall. Diese Austauschvorgänge können die Abflussleistung im Gesamtquerschnitt erheblich herabsetzen. Bei ROUVE (1987) heißt es dazu: „Dieser so genannte Interaktionsvorgang ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Impulstransport nicht nur von der Hauptgerinneströmung über die fiktive Trennwand ins Vorland erfolgt, sondern über eine Sekundärbewegung Turbulenzballen höherer Geschwindigkeit in das Vorland gelangen und umgekehrt Turbulenzballen geringerer Geschwindigkeit aus dem Vorland ins Hauptgerinne“. Die Abb. 3.2 verdeutlicht dieses. In diesem Zusammenhang stehen auch Versuche von TOMINGA ET AL. (1989) mit verschiedenen Fließtiefendifferenzen zwischen Hauptquerschnitt und Vorland. Die Abb. 3.3 zeigt eine Vektordarstellung der Sekundärströmung für Fließtiefenverhältnisse zwischen Vorland und Hauptquerschnitt von 0,25 bis 0,75, wie sie sich bei einem Rechteckgerinne ohne Bewuchs einstellen. Die sich einstellenden Wirbel werden von den Autoren in Vorland- und Hauptgerinnewirbel unterteilt. An der Böschungskante summieren sich diese zu einem (in  $45^\circ$  bis  $60^\circ$ ) nach oben gerichteten Geschwindigkeitsvektor. Die Ausprägung der Wirbel ist abhängig vom Fließtiefenverhältnis zwischen Vorland und Hauptquerschnitt. So ist bei einem geringen Fließtiefenverhältnis der Vorlandwirbel sehr ausgedehnt. Bei einem Verhältnis von 0,5 sind beide Wirbel sehr dominant und bei einem hohen Fließtiefenverhältnis

bildet sich eine nach unten gerichtete Gegenströmung zum oberflächennahen Hauptgerinnewirbel stärker aus.

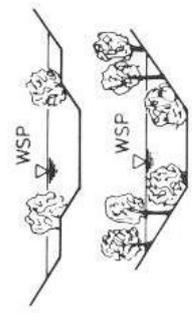
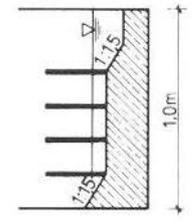
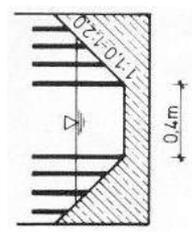
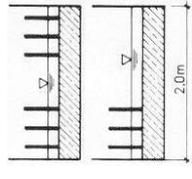
	U Hannover	TH Aachen	TU Braunschweig	TH Darmstadt
Thema	Der Einfluss biologischer Maßnahmen auf den Abflusswiderstand und die Abflussgeometrie offener Gerinne - Naturmessungen -	Grundlagenuntersuchungen über den Einfluss von naturnahen Gewässerbaumaßnahmen - Laboruntersuchungen -	Der Einfluss biologischer Maßnahmen auf den Abflusswiderstand und die Abflussgeometrie offener Gerinne - Laboruntersuchungen -	Auswirkungen von einseitigem Uferbewuchs auf den Abflussvorgang - Laboruntersuchungen -
Abflussquerschnitt				
variabler Parameter		Gefälle, Abfluss, Modellvegetation (Art, Anordnung, Dichte), Verhältnis Vorland- / Mittelwasserbettbreite	Gefälle, Abfluss, Modellbewuchs (Art, Anordnung, Dichte)	Gefälle, Abfluss, Art des Bewuchses, Verhältnis Wasserspiegellbreite / Wassertiefe
gemessene Parameter	Geschwindigkeiten (Isotachenpläne), Wassertiefen, Wasserspiegellgefälle, Bewuchskenngrößen ( $d_p$ , $a_x$ , $a_z$ )	Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverteilung, Wassertiefen, Turbulenz, turbulente Schubspannungen, Sohlenschubspannungen	Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverteilung, Wassertiefen	Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverteilung, Sohlenschubspannungsverteilung, Wassertiefen
Untersuchungen	Widerstandsverhalten des Bewuchses in Naturgerinnen (gegliedert und kompakt)	Abflussbehinderung durch Vegetation auf dem Vorland, Interaktion Hauptgerinne / Vorland	Widerstandsverhalten von Vegetation auf Böschungen, Interaktion Mittelquerschnitt / Böschungsreich	Widerstandsverhalten, Interaktion, Erosionsangriff
Ziel	Überprüfung der am Modell abgeleiteten Ergebnisse und Berechnungsverfahren an den wirklichen Verhältnissen	1- und 2-dimensionale Verfahren für die Abflussberechnung in gegliederten Querschnitten mit Vegetation	Berechnungs- und Bemessungsverfahren für den Wasserabfluss in Gerinnen mit natürlich bewachsenen (bzw. bepflanzt) Uferböschungen	Erarbeitung von hydraulisch- und flussmorphologischem Grundwissen zur Entwicklung und Dimensionierung biologischer Flussuferforschungen

Abb. 3.1 Übersicht der durchgeführten Untersuchungen der Koordinierungsgruppe „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerbaus“ (ROUVÉ, 1987)

Bei den Laboruntersuchungen im DFG-Schwerpunktprogramm wurden lediglich „steife“ Bewuchselemente berücksichtigt. Nachfolgende Untersuchungen an Schilf und Jungweidenbewuchs (OPLATKA, 1998, GERSTGRASER, 2000, JÄRVELA, 2002) zeigen, dass bei „flexiblen“ Bewuchselementen weitere Faktoren eine Rolle spielen (Kapitel 3.5).

### **Trennflächenwiderstand $\lambda_T$**

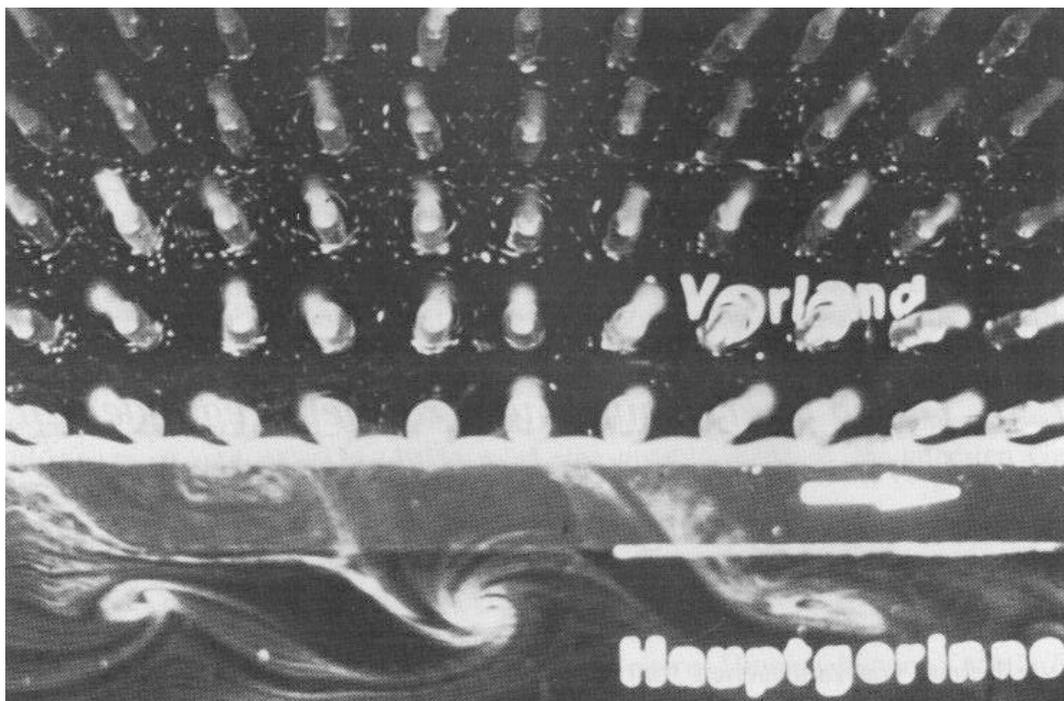
Grundüberlegung zum Verfahren des Trennflächenwiderstandes ist die Gliederung des Gerinnes in hydrodynamische Teilbereiche. So gibt es das Hauptgerinne und das Vorland, sowie Bereiche mit und ohne Bewuchs. Zwischen dem bewachsenen und freien Gerinne wird eine fiktive Trennfläche, welche mit einer Schubspannung behaftet ist, angesetzt. Diese Scheinwandschubspannung wird mit Hilfe des folgenden dimensionslosen Darcy / Weisbach Koeffizienten angegeben.

$$\lambda_T = \lambda_{T,0} + \lambda_I$$

mit:  $\lambda_{T,0}$  Formwiderstandsbeiwert des Bewuchssaums

$\lambda_I$  Interaktionswiderstand

Von diesem gemeinsamen Ansatz aus wurden innerhalb der Koordinierungsgruppe verschiedene Verfahren zur Berechnung des interaktionsbedingten Fließwiderstandes entwickelt. Diese sind der Abb. 3.4 zu entnehmen.



**Abb. 3.2 Foto von der sichtbar gemachten Strömung (gliedertes Profil) (ROUVE, 1987)**

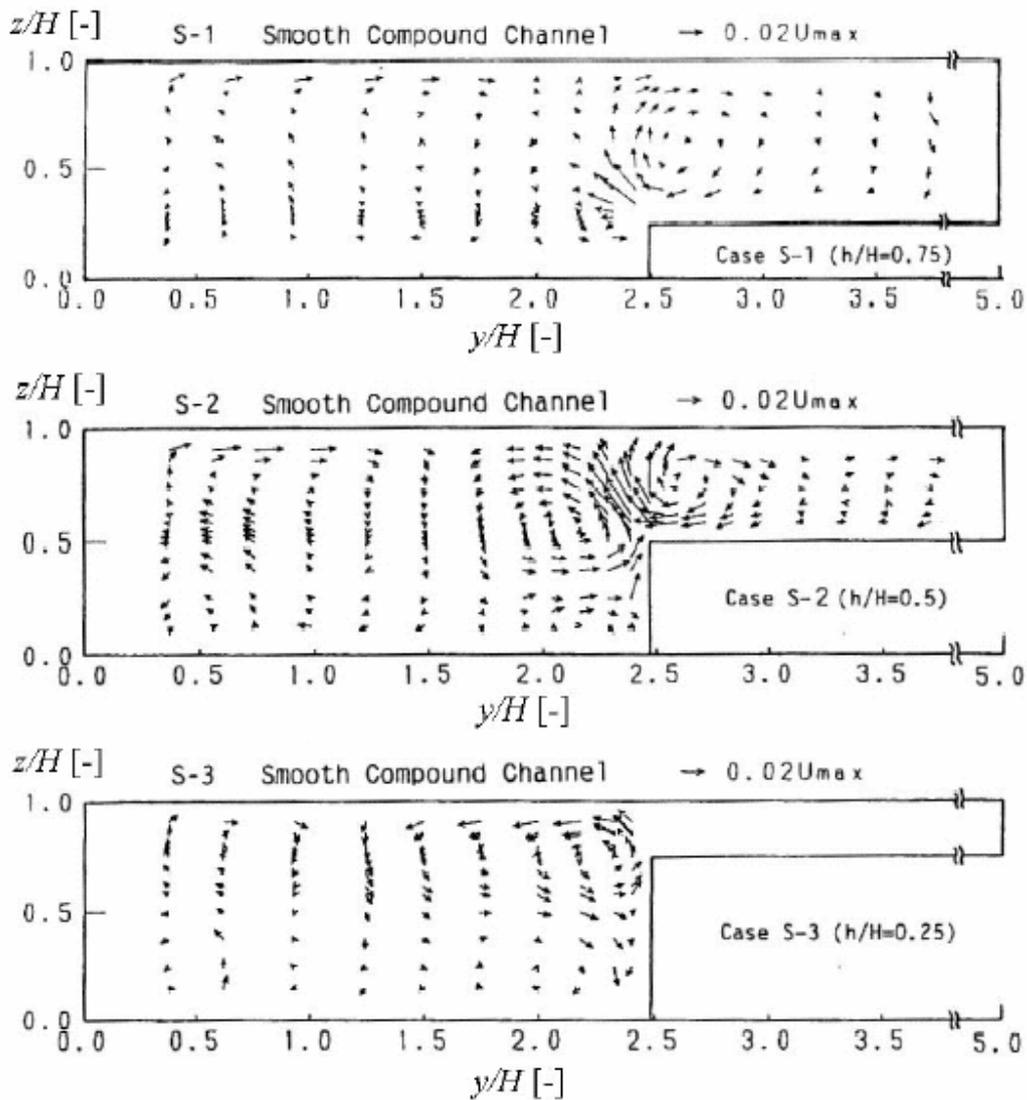


Abb. 3.3 Vektordarstellungen der Sekundärströmung für verschiedene Fließtiefenverhältnisse und glatte Vorländer (aus SCHNAUDER, 2004, nach TOMINAGA UND NEZU, 1990)

Das von PASCHE (1984) aufgestellte Berechnungsverfahren ist das Verfahren aus Abb. 3.4 mit den meisten zu ermittelnden Parametern. Er erhält für den Trennflächenwiderstandsbeiwert

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2,03 \cdot \log \left[ 0,072 \cdot \left[ \frac{b_m}{b_F/2} \right]^{1,07} \cdot \Omega \right]$$

mit:

$$\Omega = \left[ 0,071 \cdot \frac{a_{NL}}{a_x} \right]^{3,29} + \left[ \frac{a_{NB}}{a_z} \right]^{0,95}$$

$$a_{NL} = 128,876 \cdot c_{w\infty} \cdot d_p \cdot \left[ 1 + \frac{g \cdot a_{NL} \cdot l_E}{v_T^2 / 2} \right]^{-2,143}$$

$$a_{NB} = 0,24 \cdot a_{NL}^{0,59} \cdot (c_{w\infty} \cdot d_p)^{0,41}$$

zur Berücksichtigung der Bewuchswirkung mit Analogie zu einem von SHEN und LI (1973) aufgestellten Widerstandsgesetz. Die verwendeten Parameter werden im Folgenden erläutert.

In ROUVE (1987) heißt es dazu: „Durch die Abhängigkeit des Bewuchsparameters  $\Omega$  von der relativen Nachlaufänge  $a_{NL}/a_x$  und -breite  $a_{NB}/a_z$  (Abb. 3.6) werden in der Widerstandsbeziehung für  $\lambda_T$  die bei der Umströmung von Bewuchselementen auftretenden Maßstabseffekte berücksichtigt. Dass dieser Effekt in bestimmten Fällen sehr bedeutsam sein kann, geht aus dem Vergleich der Fließwiderstände bei gleicher Elementdichte  $d_p / (a_x \cdot a_z)$ , aber unterschiedlicher Elementzahl hervor.“

Bei der Berücksichtigung des Trennflächenwiderstandes wird davon ausgegangen, dass nur ein Teil der Bewuchszone am Interaktionsaustausch zwischen Hauptgerinne und Vegetationszone beteiligt ist. Dieser Bereich wird als „mitwirkende Vorlandbreite“  $b_m$  bezeichnet (Abb. 3.5). Für sie wurde unter Vernachlässigung der Sohlrauheit folgende strömungsphysikalisch exakte Gleichung hergeleitet:

$$\frac{2 \cdot a_x}{d_p} \cdot \frac{c_s + c_{f,m}}{c_{w,m}} = \sum_{i=1}^n \left[ \left( 1 - \frac{z_i}{b_m} \right)^3 + c_{Vor} \right]^2$$

mit:

$$c_{f,m} = v_{*T}^2 / \Delta v_{Vor}^2$$

$$c_s = g \cdot l_{So} \cdot b_m / \Delta v_{Vor}^2$$

$$c_{Vor} = v_{Vor} / \Delta v_{Vor}$$

$$\Delta v_{Vor} = v_T - v_{Vor}$$

$$c_{w,m} = 1,3 \text{ (aus Messungen von PASCHE ermittelt)}$$

$i$  Anzahl der Bewuchsreihen quer zur Fließrichtung

Als gute Näherung kann aber auch folgende empirische Beziehung für  $b_m$  verwendet werden:

$$\frac{b_m}{h_{Vor}} = \frac{1}{\lambda_{Vor}} \cdot \frac{1}{(0,068 \cdot e^{(0,56 c_T)} - 0,056)}$$

$$c_T = v_{*T} / v_{*F} = -3,27 \log \Omega + 2,85.$$

	Pasche, Rouvé, Arnold	Bertram, Garbrecht	Schröder
Darstellung des interaktionsbedingten Fließwiderstandes $\lambda_T$ durch:	„Scheinrauheit“ an der fiktiven Trennwand zwischen Hauptgerinne und Vorland	„Scheinrauheit“ an der fiktiven Trennwand zwischen Böschung und Fluß	„Scheinrauheit“ an der fiktiven Trennwand zwischen Bewuchszone und Flußschlauch
Querschnittsaufteilung			
Widerstandsbeziehung	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2,03 \cdot \lg \left[ 0,072 \left[ \frac{b_m}{b_F/2} \right]^{1,07} \cdot \Omega \right]$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = 2,035 \cdot \lg \frac{4 \cdot 3,046 \cdot \Gamma_{hy,T}}{k_T}$ $k_T = k_{T,V} + k_{T,I}$	$\lambda_T = \lambda_{T,0} + \lambda_I$ $\lambda_{T,0} = f \left( \frac{v_{0,F}^2}{v_{0,V}^2} \right)$
Wirkung des Bewuchses berücksichtigt durch:	$\Omega = \left[ 0,071 \cdot \frac{a_{NL}}{a_x} \right]^{3,29} + \left[ \frac{a_{NB}}{a_z} \right]^{0,95}$ $a_{NL} = 128,87 \cdot c_{W\infty} \cdot d_p \cdot \left[ 1 + \frac{g \cdot a_{NL} \cdot I_s}{v_{*F}^2/2} \right]^{-2,14}$ $a_{NB} = 0,24 \cdot a_{NL}^{0,59} \cdot (c_{W\infty} \cdot d_p)^{0,41}$	$k_{T,V} = 1,2 - 1,5 \cdot d_p$	$\lambda_{T,0} = 0,06 - 0,10$ und über $v_{0,V}^2 = \frac{2 \cdot g \cdot I \cdot (1 - \epsilon_p)}{CWR \cdot \omega_p}$
Wirkung der Interaktion berücksichtigt durch:	$\frac{b_m}{h_{Vor}} = \frac{1}{\lambda_{Vor}} \cdot (0,068 e^{(0,56 c_T)} - 0,056)$ mit $c_T = v_{*T} / v_{*F} = -3,27 \log \Omega + 2,85$	$k_{T,I,1} = \sqrt[3]{\frac{v_{I,2}}{v_{I,1}}} \cdot k_{T,I,2}$ mit $k_{T,I,2} = 0,77 \cdot b_{m,m} = 0,77 \cdot A_{II} / h_T$	$\lambda_I = \alpha_1 \cdot \lambda_{I,max}; \quad \alpha_1 < 1,0$ $\lambda_{I,max} = 0,18 \cdot \lg \left[ 0,0135 \frac{v_{0,F}^2 \cdot I \cdot m}{v_{0,V}^2 \cdot I_{U,T}} \right]$ mit $\alpha_1 = 1 - \left[ 1 - \frac{b_V}{b_{m,max}} \right]^{3,5}$ und $b_{m,max} = 17,5 \cdot \frac{v_{0,V}^2 \cdot \lambda_{I,max}}{g \cdot I}$

Abb. 3.4 Verfahren zur Berechnung des interaktionsbedingten Fließwiderstandes (ROUVÉ, 1987)

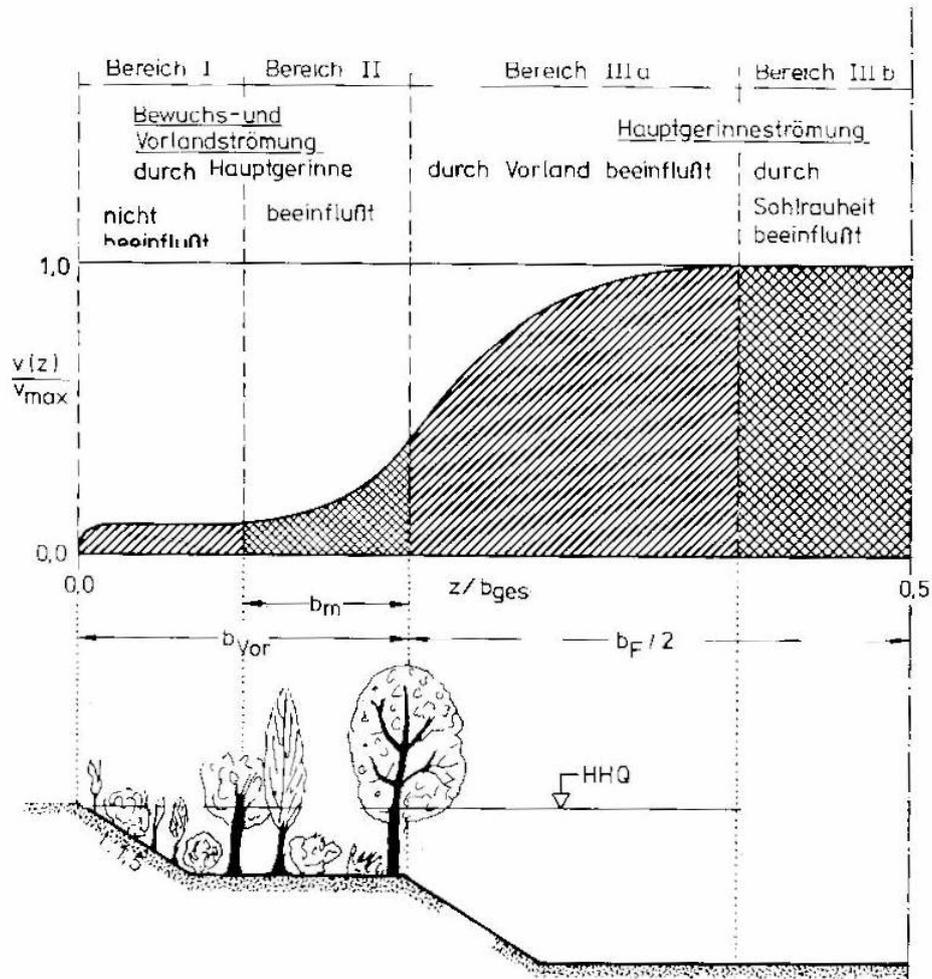


Abb. 3.5 Bereichseinteilung beim Trennflächenverfahren nach Pasche (PASCHE, 1984)

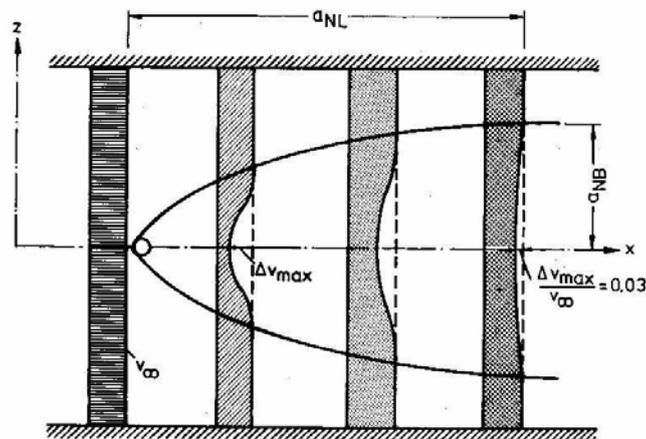


Abb. 3.6 Skizze zur Nachlauflänge beim Trennflächenverfahren nach Pasche (PASCHE, 1984)

Das vorgestellte Verfahren von PASCHE wurde von SCHUMACHER (1995) nach einem Vergleich der Untersuchungsergebnisse des britischen SERC-FCF-Forschungsprogramms in Wallingford, England (Kapitel 3.2) mit den Berechnungsansätzen, die im DVWK-Merkblatt 220 (1991) und im BWK-Merkblatt (1999) vorgestellt werden, als empfehlenswert eingestuft. Von RICKERT (1986) wurden zudem Messungen in der Natur vorgenommen und ausgewertet, die den theoretischen Ansatz von PASCHE (1984) bestätigen.

Das für das Trennflächenverfahren zugrunde gelegte logarithmische Fließgesetz hat seinen Ursprung in der Rohrhydraulik. Es wird dabei von einer logarithmischen Verteilung der Fließgeschwindigkeit über die Fließtiefe bei rauen Oberflächen entsprechend Abb. 3.7 ausgegangen. Geschwindigkeitsmessungen an der Sohle eines Gewässers und nahe der Oberfläche weisen jedoch eine abweichende Geschwindigkeitsverteilung auf. Die in Abb. 3.7 aufgeführte äquivalente Sandrauheit  $k_s$  bzw. das charakteristische Rauheitsmaß für raue Sohlen  $y_c$  legen jene Höhe fest, in der die tatsächliche Geschwindigkeitsverteilung von der logarithmischen Verteilung abweicht und die Verteilung der Turbulenzintensitäten bzw. der turbulenten Schubspannungen ein Maximum zeigt (STEPHAN, 2002). Die äquivalente Sandrauheit nach NIKURADSE (1933) setzt sich also zusammen aus einer geometrischen Rauheitshöhe  $k_g$  der Rauheitselemente und einem Formanteil, der vom Verband der Rauheitselemente, sprich der Rauheitsdichte, abhängt. Je nach Verhältnis des Längsabstandes der Elemente zu ihrer absoluten geometrischen Rauheitshöhe  $k_g$  ergeben sich unterschiedliche Strömungsverhältnisse (MORRIS, 1955, DITTRICH, 1998, STEPHAN, 2002).

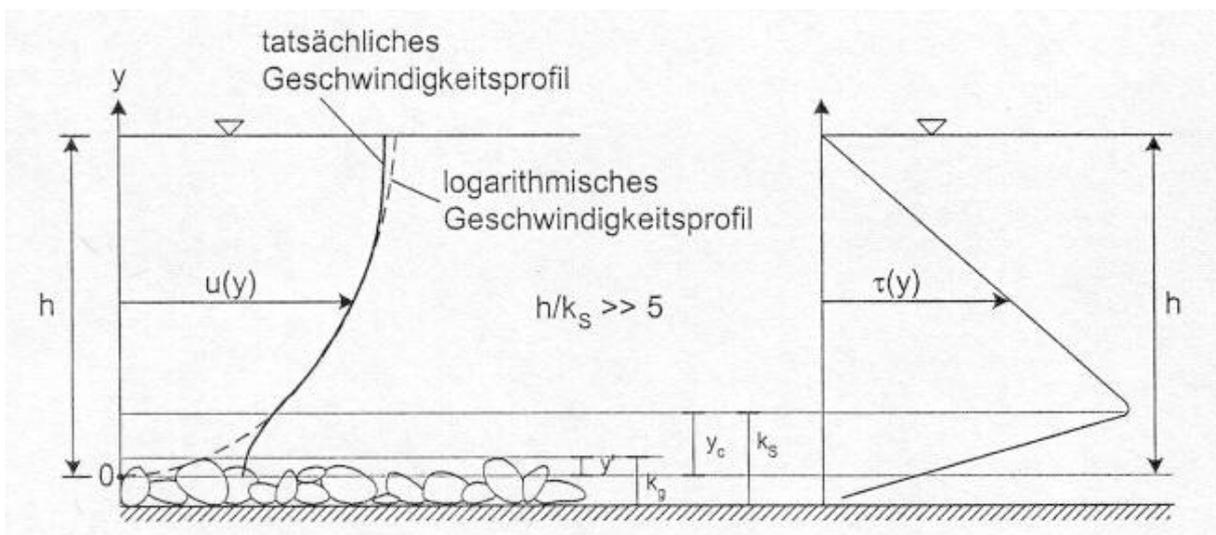


Abb. 3.7 Vertikale Geschwindigkeits- und turbulente Schubspannungsverteilung für Gewässersohlen großer relativer Überdeckung (STEPHAN, 2002 nach Ditt- rich, 1998)

Da die theoretisch messbaren Größen zur Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit  $k_s$  in der Natur vielen Unregelmäßigkeiten unterworfen sind, ist dessen exakte Bestimmung für ein naturnahes Fließgewässer unter einem vertretbaren Arbeitsaufwand nicht möglich. Für die Praxis müssen deshalb in der nächsten Zeit Ansätze gefunden werden, die die Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit erleichtern.

Für die Wahl des geeigneten Berechnungsverfahrens und der Erfassung der entsprechenden Eingangparameter sowie zur Beurteilung ihrer Signifikanz entwickelte LEHMANN (2004) eine neue Methodik. Diese soll es dem Anwender in der Praxis ermöglichen, Vegetationsentwicklungen an naturnahen Fließgewässern zu simulieren und sofort die Auswirkungen auf das Strömungsverhalten, die Abflusskapazität und die Wasserspiegellagen mit guter Genauigkeit zu berechnen.

### **3.2 SERC-FCF-FORSCHUNGSPROGRAMM**

Etwa zeitgleich mit Abschluss des DFG-Schwerpunktprogramms „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“ (1986) wurde vom britischen Science and Engineering Research Council (SERC) ein Forschungsprogramm mit ähnlicher Zielstellung eingerichtet. In einer großmaßstäblichen Versuchsrinne (Flood-Channel-Facility, FCF) im wasserbaulichen Versuchslabor Hydraulic Research Ltd. (HR) in Wallingford wurden bis 1994 begleitet von Wissenschaftlern verschiedener britischer Universitäten die komplexen Interaktionsvorgänge zwischen Vorland- und Hauptgerinneströmung und deren Auswirkungen auf den Durchfluss untersucht. Einen Überblick über die Versuchsreihe gibt Abb. 3.8. Eine Beschreibung der Versuchseinrichtung und nähere Informationen zu den Versuchsreihen können u. a. KNIGHT (1992) und SCHUMACHER (1995) entnommen werden.

In der Versuchsphase B (Abb. 3.8) simulieren die Serien 07, 09 und 11 Baumbewuchs auf dem Vorland. Die aus der Untersuchung von SCHUMACHER (1995) entnommene Abb. 3.9 zeigt das Verhältnis von Abfluss und Wassertiefe der Serien 02, 04 und 07 im Vergleich. Die Serien 02 und 07 haben einen gegliederten Querschnitt mit Hauptquerschnitt und Vorland mit den gleichen Gerinneabmessungen. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Anordnung von Bewuchs auf dem Vorland in der Serie 07. Durch den Bewuchseinfluss steigt der Wasserspiegel bei gleichem Durchfluss nach Überschreitung des bordvollen Abflusses in der Serie 07 stärker an. So beträgt zum Beispiel bei einer Wassertiefe von  $h_F = 0,28$  m der Durchfluss im Versuch mit Bewuchs nur 45 % des Durchflusses im Versuch ohne Bewuchs.

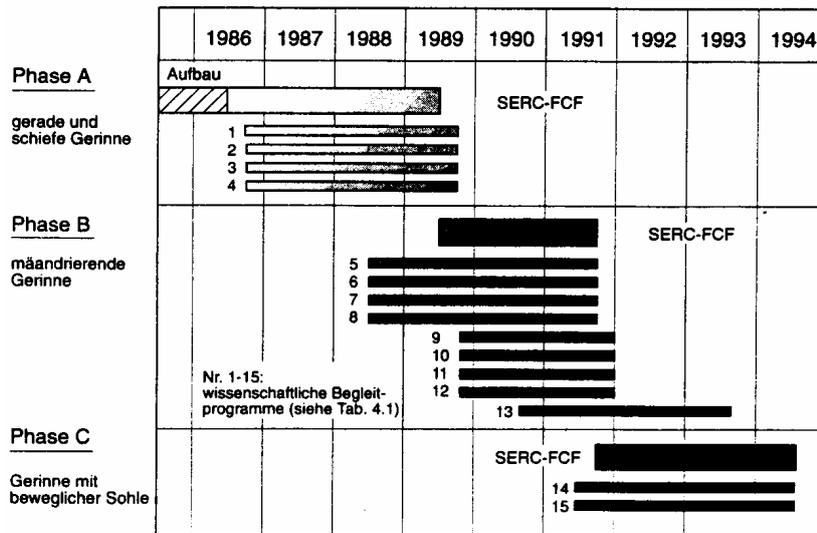


Abb. 3.8 Übersicht über den zeitlichen Verlauf des SERC-FCF-Versuchsprogramms (SCHUMACHER, 1995)

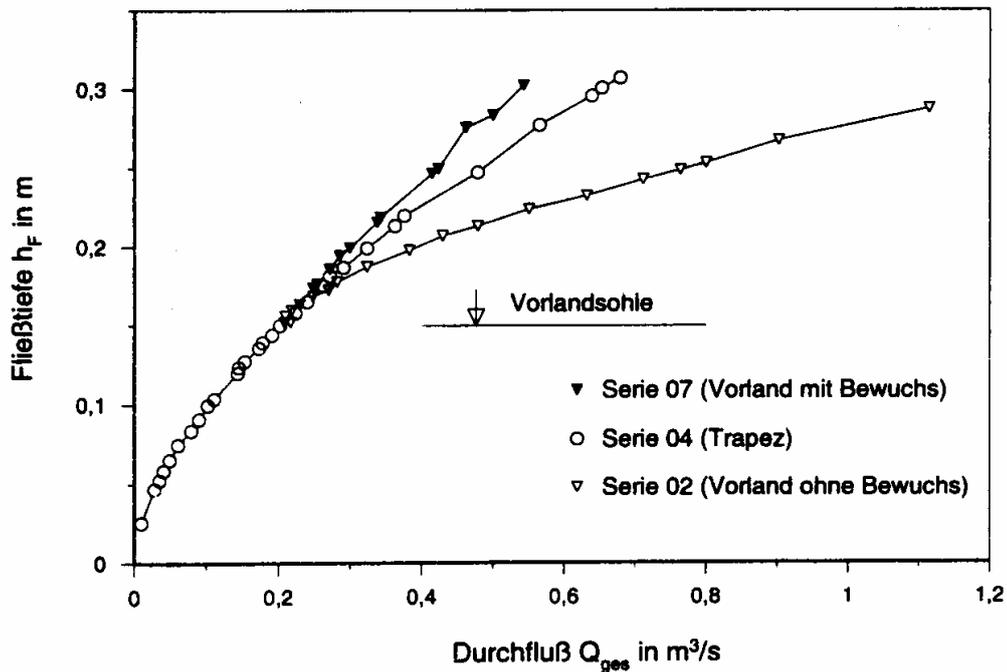


Abb. 3.9 Abflusskurven der Versuchsserien 04 (Trapezquerschnitt), 02 (Vorland ohne Bewuchs) und 07 (Vorland mit Bewuchs) (SCHUMACHER, 1995)

In der Serie 04 handelt es sich um ein Trapezprofil ohne Vorland. Die Sohlenbreite und Böschungsneigung der Hauptgerinne der Serien 02 und 07 entsprechen den Abmessungen des Trapezprofils der Serie 04. Dabei beträgt die Querschnittsfläche

beim maximal untersuchten Wasserstand von  $h_F = 0,3$  m bei der Serie 07 mehr als das Doppelte der Serie 04 ( $A_{04} / A_{07} = 1 / 2,3$ ). Dennoch geht der Abfluss bei dem mit Bewuchs bestandenen Vorland um nahezu 20 % zurück ( $Q_{ges,04} / Q_{ges,07} = 1 / 0,82$ ). Besteht also die Forderung nach gleicher hydraulischer Leistungsfähigkeit, so muss dieses Ergebnis mit Blick auf den dafür benötigten Flächenbedarf bereits zu Beginn der Planung einer naturnahen Fließgewässergestaltung berücksichtigt werden (SCHUMACHER, 1995).

Eine weitere Analyse der Versuchsergebnisse ist dem folgenden Kapitel zu entnehmen.

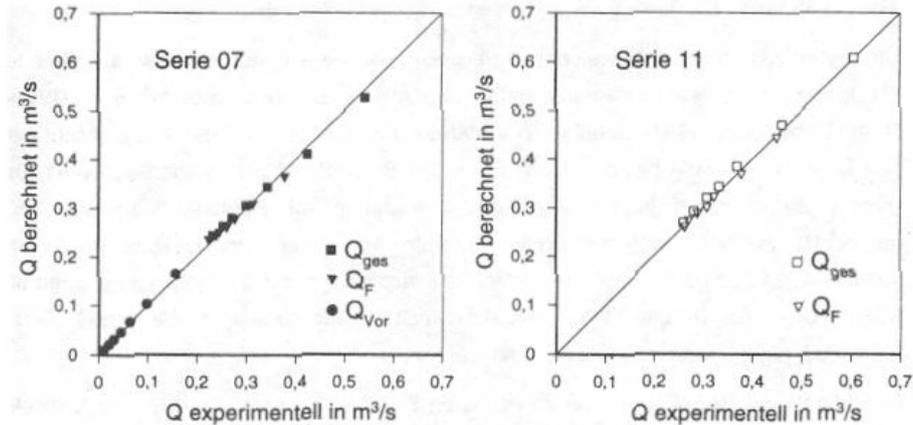
### 3.3 VERGLEICHENDE ANALYSE VON SCHUMACHER (1995)

SCHUMACHER (1995) vergleicht die Ergebnisse des in Kapitel 3.2 kurz vorgestellten SERC-FCF-Forschungsprogramms mit den im Schwerpunktprogramm „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“ entwickelten Berechnungsverfahren von PASCHE und MERTENS (ROUVÉ, 1987, DVWK, 1991).

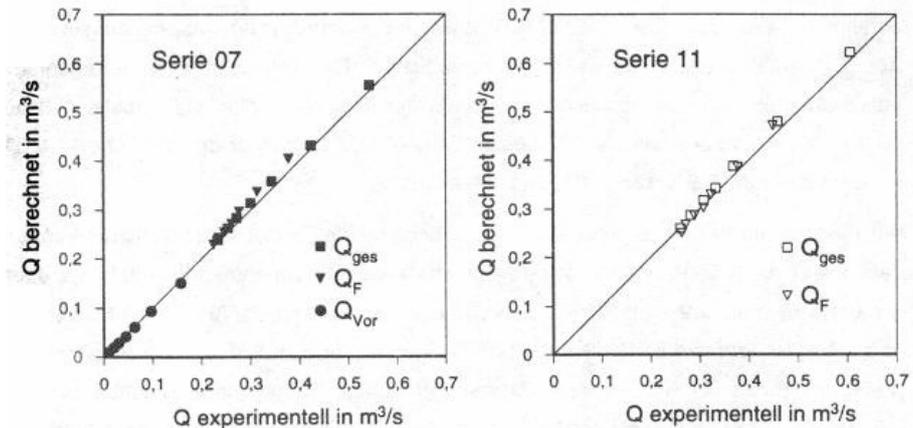
Es zeigt sich, dass der Gesamtdurchfluss sowohl bei dem Berechnungsverfahren nach MERTENS als auch nach PASCHE gut getroffen wird (Abb. 3.10 und Abb. 3.11). Bei Aufteilung des Abflusses in Vorlandabfluss ( $Q_{Vor}$ ) und Hauptquerschnittsabfluss ( $Q_F$ ) ist bei dem Verfahren nach MERTENS eine tendenzielle Überschätzung des Abflusses im Hauptquerschnitt mit Zunahme der Fließtiefe zu erkennen. Bei dem Verfahren nach PASCHE ergeben sich bessere Übereinstimmungen des berechneten Abflusses im Hauptquerschnitt mit dem experimentell ermittelten. Die berechneten Werte liegen jedoch, im Gegensatz zu den berechneten Werten nach dem Verfahren von MERTENS, eher unter den modellierten.

Weiterhin vergleicht SCHUMACHER (1995) die im Modell ermittelten Trennflächenwiderstandsbeiwerte und Sohlenwiderstandsbeiwerte im Hauptgerinne mit den Ansätzen in den Berechnungsverfahren und führt eine Analyse der turbulenztheoretischen Annahmen durch. Dabei stimmen weder die oben genannten Verfahren von PASCHE und MERTENS noch das Verfahren nach NUDING (1991) mit der aus den Versuchen ermittelten Verteilung der Scheinschubspannung überein. Aus dieser wird die Widerstandsbeziehung auf Grundlage des Wirbelviskositätsansatzes abgeleitet.

Als Fazit der Ergebnisse seiner vergleichenden Analyse empfiehlt SCHUMACHER (1995) das im DVWK-MERKBLATT 220 (1991) enthaltene Verfahren von PASCHE zur Durchflussberechnung naturnah gestalteter Fließgewässer. Er erweitert zudem den Anwendungsbereich aufgrund der SERC-FCF-Modellversuche auf Breiten- / Tiefenverhältnisse von  $40 < b_F/h_{Vor} < 120$  ( $b_F$  = Breite des Hauptgerinnes,  $h_{Vor}$  = Vorlandfließtiefe).



**Abb. 3.10** Vergleich der experimentellen und der nach dem Verfahren von PASCHE berechneten Durchflüsse für die Versuchsserien 07 und 11 (SCHUMACHER, 1995)



**Abb. 3.11** Vergleich der experimentellen und der nach dem Verfahren von MERTENS berechneten Durchflüsse für die Versuchsserien 07 und 11 (SCHUMACHER, 1995)

### 3.4 VERGLEICH HYDRAULISCHER METHODEN ZUR BESTIMMUNG VON RETENTIONSPOTENZIALEN NATURNAHER MAßNAHMEN

BAUER (2004) führt zahlreiche Vergleichsberechnungen und -simulationen durch, um zu zeigen, welche hydrologischen Methoden bei der Bestimmung des Retentionspotenzials naturnaher Maßnahmen im Gewässer und der Aue anzuwenden sind. Er vergleicht dabei das Berechnungsverfahren nach Manning-Strickler mit dem Verfahren nach dem Allgemeinen Fließgesetz im Zusammenhang mit dem Bewuchsansatz von PASCHE, welches in Kapitel 3.1 vorgestellt wird. Wie schon SCHUMACHER (1995) kommt er zu dem Schluss, dass das Verfahren nach dem Allgemeinen Fließgesetz

mit dem Bewuchsansatz von PASCHE die genaueren Ergebnisse liefert, wenn Bewuchs bei der Abflussberechnung berücksichtigt werden muss. Allerdings räumt er ein, dass es bis dato nur wenige Angaben über die anzusetzenden äquivalenten Sandrauheiten sowie Bewuchsparameter gibt, die für die Berechnung nach PASCHE benötigt werden. Bei den Rauheitsbeiwerten nach Manning-Strickler hingegen gibt es zahlreiche Erfahrungswerte. Hierin sieht er einen großen Vorteil für das Berechnungsverfahren nach Manning-Strickler.

Weiterhin vergleicht er ein- und zweidimensionale Simulationsverfahren. Er räumt den zweidimensionalen Modellen eine besondere Eignung bei der Simulation von Maßnahmen in größeren Talräumen wie etwa Deichrückverlegungen ein. Diese können aufgrund der detaillierteren Erfassung der Strömungsverhältnisse genauere Aussagen zu Wasserständen, Fließgeschwindigkeiten und Überflutungsdauern machen. Allerdings treten hier oftmals Probleme beim Übergang vom bordvollen zum ausufernden Zustand auf. Als weiterer Nachteil der zweidimensionalen Modelle sieht BAUER (2004), dass Bewuchseinflüsse lediglich über die Sohlrauheit berücksichtigt werden. Wandrauheiten, wie in dem Verfahren nach PASCHE, werden nicht berücksichtigt. Turbulenzeinflüsse werden über die Wirbelviskosität abgebildet. Diese müssen in den Modellen jedoch, laut BAUER (2004), oftmals über das physikalisch begründete Maß hinaus festgelegt werden, um eine gewisse Stabilität bei der Modellsimulation zu gewährleisten. Die Rauheitswerte müssen in diesem Fall entsprechend angepasst werden. Das größte Problem bei den zweidimensionalen Modellen ist die Datengrundlage. Die genaue Auflösung im Modell kann nur so gut sein, wie es die aufgemessenen Daten erlauben. BAUER (2004) weist darauf hin, dass vor allem für den Gewässerverlauf selbst noch immer eine terrestrische Vermessung trotz einer verbesserten Fernerkundung nötig ist.

Die Datengrundlage ist ebenfalls ein Problem bei der hydrodynamischen Berechnung der Wellenverformung. Auch hier treten die oben genannten Stabilitätsprobleme bei den zweidimensionalen Modellen auf.

In den Flussgebietsmodellen, welche auf hydrologischen Verfahren basieren, werden lineare Speicheransätze für die Ermittlung der Wellenverformung herangezogen. Das Linearspeicherverfahren ist das einfachste. Hierbei wird angenommen, dass die Speicherkonstante vom jeweiligen Abfluss unabhängig ist.

$$S = K \cdot Q_a$$

mit:  $S$      Speichereinhalt einer Gewässerstrecke [ $\text{m}^3$ ]  
       $K$      Speicherkonstante [min]  
       $Q_a$     Abfluss aus einem Gewässerabschnitt [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Weiterhin sind das Kalinin-Miljukov- sowie das Muskingum-Verfahren sehr bekannt, die einen erweiterten linearen Speicheransatz beinhalten. Diese können jedoch nicht angewendet werden, wenn Rückstaueffekte zu erwarten sind.

BAUER (2004) empfiehlt das Speicherverfahren nach Puls. Hierbei wird eine hydraulisch berechnete Bestimmungsgleichung (Speicherkenmlinie) verwendet, bei der die Speicherkonstante in Abhängigkeit des Abflusses variiert. Dafür ist eine genaue Bestimmung des Speicherinhalts bei einem bestimmten Wasserstand erforderlich. Hier sieht BAUER (2004) große Probleme bei der Anwendung von Wasserspiegellagenprogrammen, die zwar den besseren Bewuchsansatz implementiert haben, aber nicht in der Lage sind, verschiedene Fließlängen im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland zu berücksichtigen. Dies ist jedoch bei mäandrierenden Gewässern ein nicht zu vernachlässigender Faktor bei der Bestimmung des Retentionsvolumens. Auf diese Problematik wies bereits MARENBACH (2002) hin. Die Behauptung von BAUER (2004), dass in dem Wasserspiegellagenprogramm WASPTOOLS die verschiedenen Fließlängen nicht berücksichtigt werden können, ist jedoch falsch. In jedem Querprofil können verschiedenen Bereichen, wie dem Hauptquerschnitt und dem Vorland, verschiedene Fließlängen in WASPTOOLS zugeordnet werden (Anlage 2).

Neben dem Vergleich der verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Retentionspotenzials führt BAUER (2004) Beispielberechnungen für naturnahe Maßnahmen an Mittelgebirgsbächen durch. Dafür stellt er ein modifiziertes Verfahren zur Bestimmung der Rauheitsbeiwerte unter Verwendung der Strukturgütekartierung vor, welches in der Simulation von Entwicklungszielen seiner untersuchten Gewässer berücksichtigt wird. Daneben liegt sein Schwerpunkt in der Simulation von Deichrückverlegungen und Modifikationen dergleichen sowie der Anlage von Vorlandwällen zur Erhöhung des Retentionspotenzials. Vorlandwälle sind quer zur Hauptfließrichtung des Gewässers angeordnete kleine Wälle und behindern den Abfluss auf dem Vorland.

Seine untersuchten Maßnahmen an Deichen und ihre Wirkung auf den Wellenablauf können der Abb. 3.13 entnommen werden. Die größten Reduzierungen des Abflussscheitels werden durch abschnittsweise Absenkungen der Deichhöhe erreicht. Dies entspricht einem Polder im Seitenschluss. Nachteil dieser Variante ist, dass die Flächen im „Polder“ nicht regelmäßig überflutet werden, sondern nur bei Hochwasserereignissen einer höheren Jährlichkeit. Zur Entwicklung und Erhaltung von Auwäldern hinter den Deichen wären jedoch jährliche Überflutungen wünschenswert. Hierzu müssten entsprechende Steuerorgane vorgesehen werden, wie zum Beispiel Fluttore, die bei kleinen Hochwasserereignissen geöffnet werden.

In der Abb. 3.12 sind von BAUER (2004) am Beispiel des Gewässers Schwülme Rückhaltevolumina für verschiedene Szenarien gegenüber dem Abfluss aufgetragen.

Es wird deutlich, dass gerade bei ausgebauten Gewässern Vorlandwälle bei entsprechender Auslegung das Retentionsvolumen bei größeren Hochwasserereignissen erhöhen. Sie erreichen in diesem Fall jedoch nur ein maximales Retentionsvolumen, welches dem Ist-Zustand entspricht.

Die bezüglich des Retentionsvolumens mindernde Wirkung eines Deichbaus wird ebenfalls in der Abb. 3.12 deutlich.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe von BAUER (2004), in denen er Auwaldsituationen an Mittelgebirgsbächen nachstellt, sind in der Tab. 3.1 aufgeführt. Für die Lahn bei Niederweimar und die Schwülme simulierte er Situationen mit und ohne Auwald. Beim Essebach entspricht der Ist-Zustand bereits einem Auwald. Eine Vergleichsberechnung ohne Auwald führte BAUER nicht durch. Am simulierten Abschnitt der Lahn ergibt sich eine prozentuale Erhöhung des Retentionsvolumens im bordvollen Zustand um etwas über 10 %, verursacht durch einen Auwaldsaum von 100 m. Im HQ100 Zustand nimmt das Retentionsvolumen um 30 % zu. An der Schwülme ermittelte BAUER eine Erhöhung des Retentionsvolumens von 7 % im bordvollen Zustand und 9 % im HQ100 Zustand bei einem Auwaldsaum von 50 m gegenüber dem gleichen Zustand ohne Bewuchs.

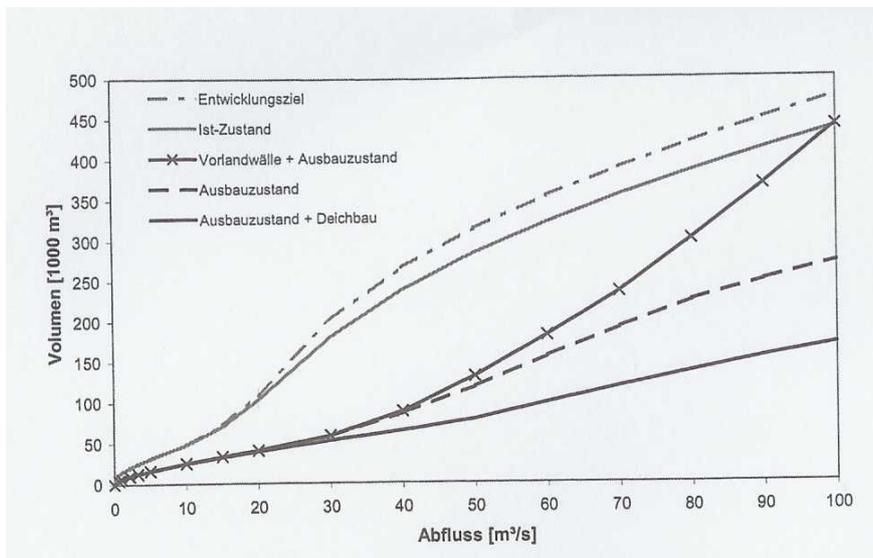
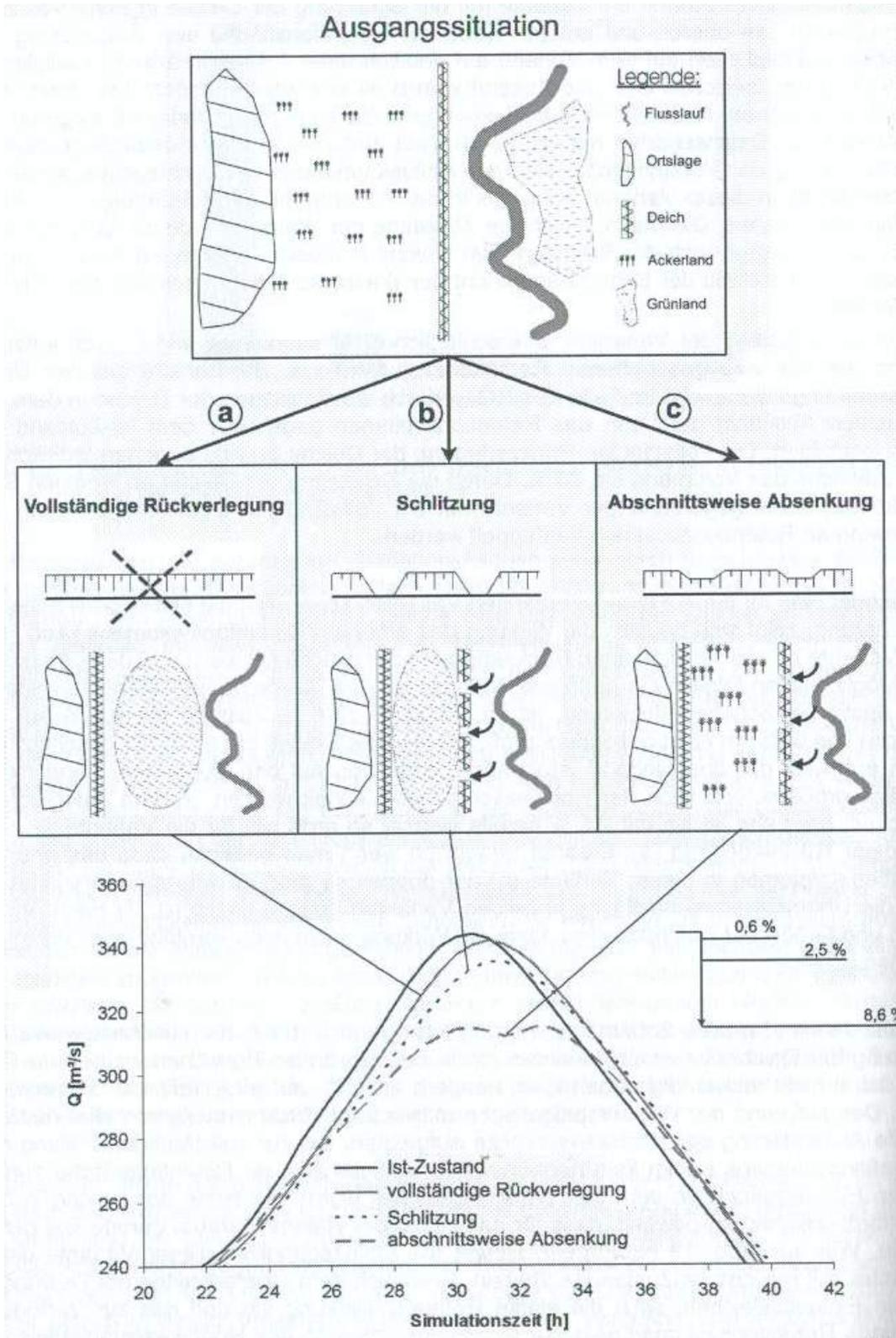


Abb. 3.12 Rückhaltevolumina verschiedener Szenarien im Fallbeispiel Schwülme (BAUER, 2004)

**Hinweise zu Abb. 3.13:** Unter „Schlitzung“ werden von BAUER Deichöffnungen verstanden, die Breiten von mehreren 100 m betragen können.

In der unteren Grafik werden lediglich die Spitzen der Hochwasserwellen gezeigt. Aus der Zeichnung geht nicht hervor, wie das in der Spitze zurückgehaltene Volumen im ablaufenden Ast der Hochwasserwelle wieder abgegeben wird.



**Abb. 3.13 Maßnahmen an Deichen und ihre Wirkung auf den Wellenablauf (BAUER, 2004)**

Tab. 3.1 Von BAUER (2004) ermittelte Retentionsvolumina an Mittelgebirgsbächen

	Retentionsvolumen - bordvoller Zustand [m <sup>3</sup> / km]	Retentionsvolumen - HQ100 Zustand [m <sup>3</sup> / km]
<b>Lahn bei Niederweimar</b> (Deichrückverlegung und Auwald) Einzugsgebietsgröße: 1.800 km <sup>2</sup> Auwaldbreite: 100 m Abschnittslänge: 14,25 km      bordvoller Abfluss: 140 – 170 m <sup>3</sup> /s Gefälle: 0,7 ‰      HQ100 Abfluss: 350 m <sup>3</sup> /s		
ohne Auwald	154.000 – 190.000	350.000
mit Auwald	175.000 – 210.000	450.000
Prozentuale Erhöhung [%]	11 - 14	30
<b>Schwülme</b> (Deichrückverlegung und Auwald) Einzugsgebietsgröße: 281 km <sup>2</sup> Auwaldbreite: 50 m Abschnittslänge: 2,8 km      bordvoller Abfluss: 20 – 50 m <sup>3</sup> /s Gefälle: 2,3 ‰      HQ100 Abfluss: 98 m <sup>3</sup> /s		
ohne Auwald	36.000 – 90.000	150.000
mit Auwald	36.000 – 96.000	164.000
Prozentuale Erhöhung [%]	7	9
<b>Essebach</b> (Erlenbestand im Ist-Zustand) Einzugsgebietsgröße: 5 km <sup>2</sup> bordvoller Abfluss: 2 – 5 m <sup>3</sup> /s Abschnittslänge: 5 km      HQ100 Abfluss: 13,2 m <sup>3</sup> /s Gefälle: 3 ‰		
mit Auwald	800 – 2.000	4.000

### 3.5 ART DES BEWUCHSES UND ABSTAND DER BEWUCHSELEMENTE

Nachdem erste Berechnungsalgorithmen für starren Bewuchs an naturnahen Gewässern aufgestellt waren (Kapitel 3.1), wurden weitere Untersuchungen vorgenommen, um zu beleuchten, inwieweit die Berechnungsverfahren auf die vielseitigen Bewuchsvarianten in der Natur anzuwenden sind. Dabei wird sowohl nach weiteren Einflussgrößen und deren Quantifizierung gesucht, vor allem hinsichtlich flexibler Bewuchselemente, als auch nach Variationen der Bewuchsanordnung mit Einflusscharakter. Hilfreich ist dabei eine verbesserte Messtechnik, mit der Turbulenzstrukturen besser sichtbar gemacht werden können.

In den folgenden Kapiteln sind einige dieser Untersuchungen der vergangenen Jahre aufgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Anordnung der Bewuchselemente keine bedeutende Rolle spielt (BECKER, 1999, JÄRVELÄ, 2002). Sehr viel entscheidender hierbei ist die Dichte des Bewuchses (GERSTGRASER, 2000, JÄRVELÄ, 2002, STEPHAN, 2002). Dabei ist auch die Größe der angeströmten Fläche wichtig (OPLATKA, 1998, STEPHAN, 2002).

STEPHAN (2002) analysierte in ihrer Arbeit die Rauheitseinflüsse submerser aquatischer Vegetation auf die Strömung. Diese Art der Vegetation spielt in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle und wird deshalb im Folgenden nicht näher erläutert. Die Arbeit von STEPHAN (2002) umfasst neben der Beschreibung und Analyse ihrer Modellversuche ein umfangreiches Literaturstudium zur Bestimmung des Fließwiderstandes.

### **3.5.1 Untersuchung von Becker zum Einfluss kurzer Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluss**

BECKER (1999) untersucht den Einfluss von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluss in Flüssen mit gegliedertem Querschnitt. Der Einfluss von kurzen Gehölzstreifen, die im Doppeltrapezgerinne nicht bis an das Ufer angrenzen und dadurch im Hochwasser allseits umströmt werden, war bei den früheren Autoren nicht untersucht worden, so dass sie dieses Thema zum Gegenstand ihrer Untersuchungen macht.

Sie befasst sich in erster Linie mit der Stauhöhe, die durch den Bewuchs verursacht wird, das heißt mit der Wasserspiegelanhebung oberstrom des gehölzbestandenen Abschnitts. Ihrer Meinung nach liegen die Ursachen der Wasserspiegelanhebung in den sogenannten kontinuierlichen Energiehöhenverlusten, die als Reibungswerte aufgefasst werden und die von der Oberflächenbeschaffenheit der Bewuchssäume abhängen. Weiterhin seien örtliche Verluste, die durch bewuchsbedingte Querschnittsänderungen des Gerinnes entstehen, auch eine Ursache der Wasserspiegelanhebung.

Sie betrachtet die Bewuchsstreifen -ähnlich wie beim Pfeilerstau- als kompakte Einbauten. Die klassischen Verfahren des Pfeilerstaus (z.B. REHBOCK) konnten jedoch nicht ohne Modifikation angewendet werden. Des Weiteren existierten bis dato keine Erfahrungswerte über Widerstandsbeiwerte  $c_W$  oder Verlustbeiwerte  $\zeta_{V,ges}$  solcher Gehölzstreifen.

BECKER (1999) wertete ihre Versuche hinsichtlich der Stauhöhe aus, ermittelte, soweit es anhand ihrer Versuchsergebnisse möglich war, Beiwerte, die bei Abflussbe-

rechnungen mit Einstau verwendet werden, und nahm eine Überprüfung bisheriger Verfahren mit ihren neuen Labormesswerten vor.

Die Ergebnisse der Versuchsauswertung werden im Folgenden kurz aufgelistet:

- Die Stauhöhe steigt mit zunehmendem Verbauungsgrad in Form einer Polynomfunktion an. Ab  $\alpha \geq 0,24$  verläuft die Kurve proportional zu  $\alpha$ . Mit  $\alpha = f/F$  ( $\alpha$  = Verbauungsgrad,  $f$  = benetzte Fläche von Einbauten im Fließquerschnitt,  $F$  = Fließquerschnitt ohne Einbauten).
- Die Lage der Gehölzstreifen im Querschnitt hat bis zu einem Verbauungsgrad von  $\alpha \cong 0,35$  keinen bedeutenden Einfluss auf die Stauhöhe, ebenso die Anordnung der Gehölzstreifen als Verband oder als frei stehende Reihe.
- Die Stauhöhe steigt proportional zur Länge der Gehölzstreifen an. Dabei ist bei kurzen Gehölzstreifen der örtliche Energiehöhenverlust signifikant. Bei Zunahme der Länge des Gehölzstreifens erhöht sich der Einfluss der Oberflächenrauheit.
- Die Stauhöhe nimmt mit zunehmendem Verzweigungsgrad zu.

### 3.5.2 Untersuchungsgerinne Wien

Im Jahre 1996 wurde von der Stadt Wien eine ingenieurbioologische Versuchstrecke im Wienfluss mit einer Gesamtanlage von 170 m für Naturversuche errichtet. Mit Hilfe dieser Versuchstrecke sollen Themen wie der Einfluss der Vegetation auf das Abflussverhalten, sowie das Versagen von ingenieurbioologischen Bauweisen in Naturversuchen behandelt werden. Unter anderem wurde dort eine Untersuchung von GERSTGRASER (2000) durchgeführt, dessen Augenmerk auf der Stabilität von Ufersicherungen lag.

Von GERSTGRASER (2000) konnten aufgrund seiner Untersuchungen bezüglich der Fließgeschwindigkeiten folgende Aussagen getroffen werden:

- Wenn junge elastische Pflanzen überströmt werden, so legen sie sich ab einer bestimmten Wassertiefe schützend über die Böschung, wodurch die Fließgeschwindigkeiten an der Böschungsoberfläche verringert werden. Die Höhe der Geschwindigkeitsreduktion hängt in erster Linie vom Alter und der Dichte des Bewuchses ab.
- Am unmittelbaren Übergang des Bewuchses zum Hauptgerinne kommt es aufgrund der großen Geschwindigkeitsunterschiede zu starken Queraustauschbewegungen (Interaktionen). Diese Interaktionen führen auch zu einer Geschwindigkeitsreduktion im Hauptgerinne.

- Messungen der bodennahen Geschwindigkeiten zeigten, dass am unbewachsenen Ufer die bodennahe Geschwindigkeit mit dem Wasserstand bis zu einem bestimmten Bereich linear zunimmt. An bewachsenen Ufern nimmt die bodennahe Geschwindigkeit bei kleinen Wasserständen ebenfalls linear zu, doch schon relativ bald bleibt die bodennahe Geschwindigkeit trotz steigendem Wasserstand konstant bzw. verringert sich sogar kurzfristig.

Die von GERSTGRASER (2000) festgestellte Verringerung der Fließgeschwindigkeit tritt auf bei einer Wassertiefe, in der der Bewuchs durch zusätzliche Turbulenzen die Fließgeschwindigkeit stark beeinflusst.

### 3.5.3 Untersuchung über das Verhalten von Weiden in der Strömung von Oplatka

OPLATKA (1998) führte in der Schweiz sehr aufwendige Versuche durch, um das Verhalten der Weiden in der Strömung besser analysieren zu können. Seine Untersuchungen liefern wichtige Hinweise über die Belastbarkeit von Weiden bei der Überflutung.

Er führte die Untersuchungen in einem 140 m langen, 4 m breiten und 1,9 m tiefen Schleppkanal durch, in dem bis zu 4,5 m hohe Weiden mit einer Geschwindigkeit von bis zu 4,0 m/s durchströmt wurden.

Weiden, die bei Überflutung nicht untergetaucht sind, verhalten sich ähnlich wie starre Zylinder. Die Strömungskraft kann daher nach dem Newton'schen Widerstandsgesetz errechnet werden:

$$S_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_D \cdot A \cdot v^2$$

mit  $S_W$  Strömungskraft, Beanspruchung der Pflanze [kN]

$\rho$  Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

$c_D$  Widerstandskoeffizient [-]

$A$  angeströmte Fläche eines Objektes [m<sup>2</sup>]

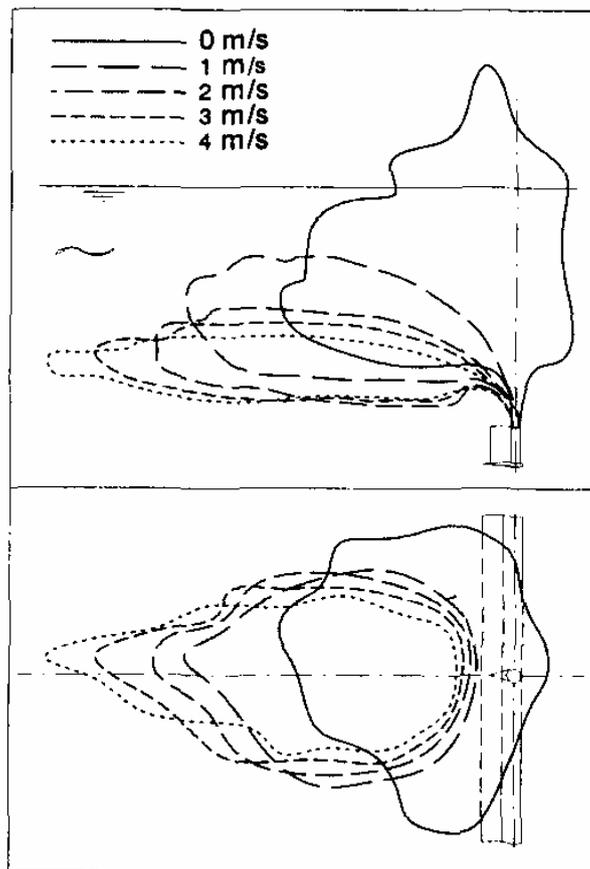
$v$  Fließgeschwindigkeit [m/s]

Die Staudruckkraft nimmt in diesem Fall etwa mit dem Quadrat der Fließgeschwindigkeit zu. Außerdem treten bei nicht untergetauchten Weiden kleinere Strömungskräfte auf als bei ganz untergetauchten und zwar aufgrund der geringeren Angriffsfläche. Bei ganz untergetauchten Weiden nimmt die Strömungskraft aufgrund der Flächenkontraktion nicht mehr mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu, sondern linear. Dabei wird unter Kontraktion die Verkleinerung der angeströmten Fläche der Pflanzen mit zunehmender Fließgeschwindigkeit verstanden. Denn die Pflanzen

versuchen mit zunehmender Geschwindigkeit der Strömung eine geringere Angriffsfläche zu bieten, in dem sie sich umlegen und ihre Breite schmaler wird (Abb. 3.14).

Es konnte festgestellt werden, dass bei einer Geschwindigkeitszunahme von bereits 0 auf 1 m/s die Höhe bzw. Breite um 40 – 60 % ihrer ursprünglichen Form zurückgeht. Die Fläche reduziert sich dabei auf ein Viertel bis ein Fünftel ihrer ursprünglichen Fläche. Ab einer Geschwindigkeit von 4 m/s reduziert sie sich sogar auf 5 % ihrer ursprünglichen Fläche.

Weiterhin konnte OPLATKA bei einer Fließgeschwindigkeit von 4 m/s eine maximale Strömungskraft auf die Weide von 1,2 kN messen. Ab dieser Geschwindigkeit verändert sich die angeströmte Fläche der Pflanze kaum noch, so dass die Strömungskraft nun mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ansteigt. Er weist aber darauf hin, dass solch hohe Geschwindigkeiten an den Ufern und Vorländern der Flüsse äußerst selten vorkommen.



**Abb. 3.14** *Verformung einer Weide in Auf- und Grundriss bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (OPLATKA, 1998)*

### 3.5.4 Untersuchung zu Fließwiderständen von flexiblen und steifen Bewuchselementen von Järvelä

JÄRVELÄ (2002) führte im Wasserbaulabor der University of Technology in Helsinki mehrere Versuchsreihen (Tab. 3.2) bezüglich des Abflusswiderstandes, verursacht durch Bewuchs, durch. Dabei wurden natürliche Gräser, Seggen und Weiden in einem 50 m langen Strömungsgerinne verschiedenen Wasserständen und Durchflüssen ausgesetzt. Die Teststrecke betrug 6 m.

Insgesamt wurden 350 verschiedene Kombinationen mit durchströmtem und überströmtem Bewuchs getestet. Die Ergebnisse zeigen starke Variationen des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit der Wassertiefe, der Fließgeschwindigkeit, der Reynolds-Zahl und der Vegetationsdichte. Einen Auszug aus der Arbeit von Järvelä (2002) zeigen die Abb. 3.15 und Abb. 3.16 in Zusammenhang mit Tab. 3.2.

Zusammenfassend wurden von JÄRVELÄ (2002) folgende Punkte abgeleitet:

- Bei Gras war der Widerstandsbeiwert am stärksten von der relativen Rauheit abhängig.
- Bei Weiden und der Kombination von Seggen und Gras hängt er vor allem von der Fließgeschwindigkeit ab.
- Bei Weiden ohne Blätter und weiterer Bodenbedeckung war der Widerstandsbeiwert am stärksten von der Wassertiefe abhängig. Es zeigte sich ein linearer Anstieg mit der Wassertiefe unabhängig von der Fließgeschwindigkeit.
- Blätter auf Weiden schienen den Widerstandsbeiwert zu verdoppeln bzw. sogar zu verdreifachen.
- Unterschiedliche Abstände zwischen den blattlosen Weiden zeigten keinen Effekt auf den Widerstandsbeiwert.

Der Widerstandsbeiwert wurde dabei nach folgender Formel ermittelt:

$$f = \frac{h_v}{l} \cdot \frac{8 \cdot g \cdot h}{v^2}$$

mit:  $f$  Widerstandsbeiwert nach DARCY-WEISBACH

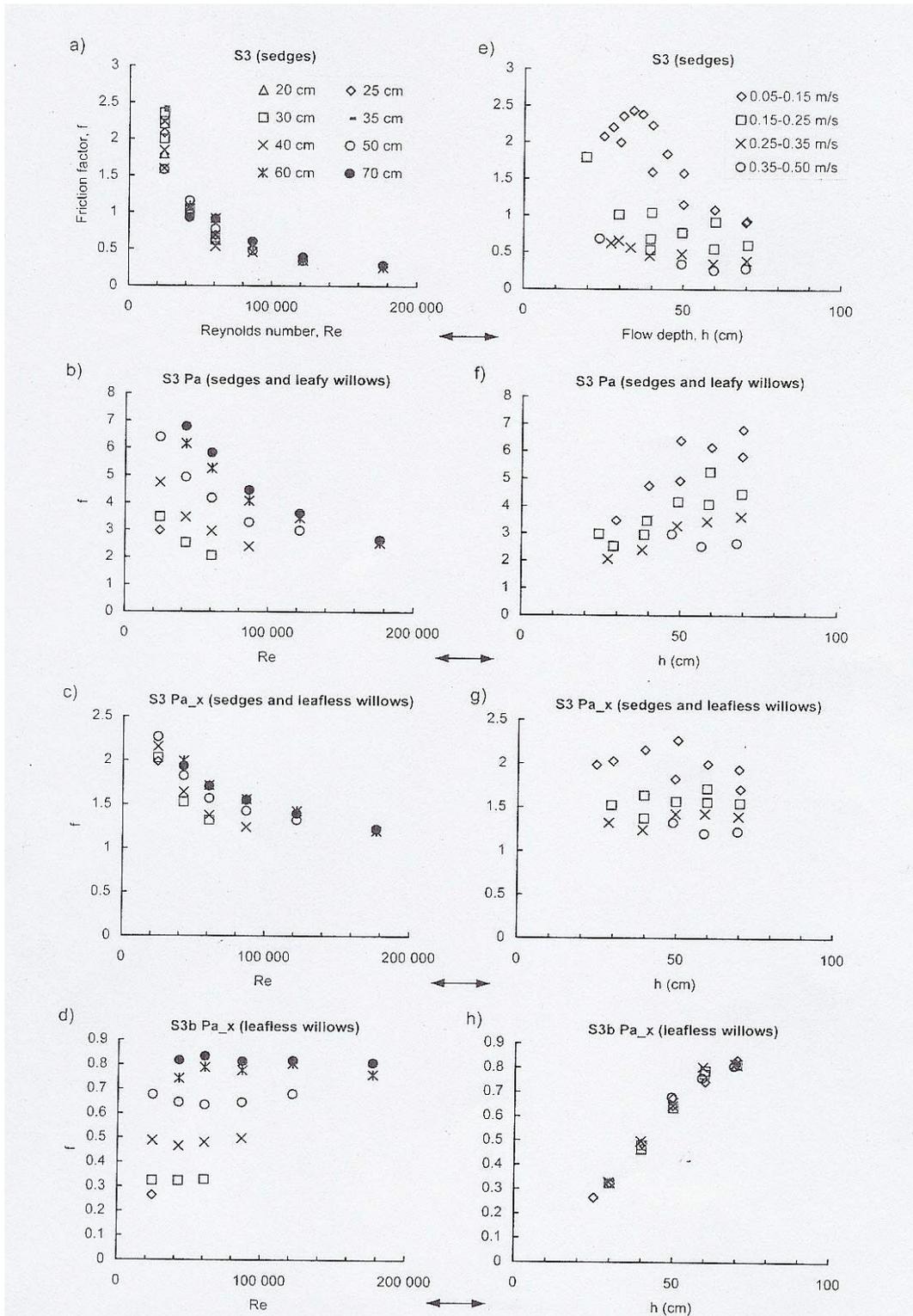
$h_v$  Verlusthöhe [m]

$l$  Streckenabschnitt im Kanal [m]

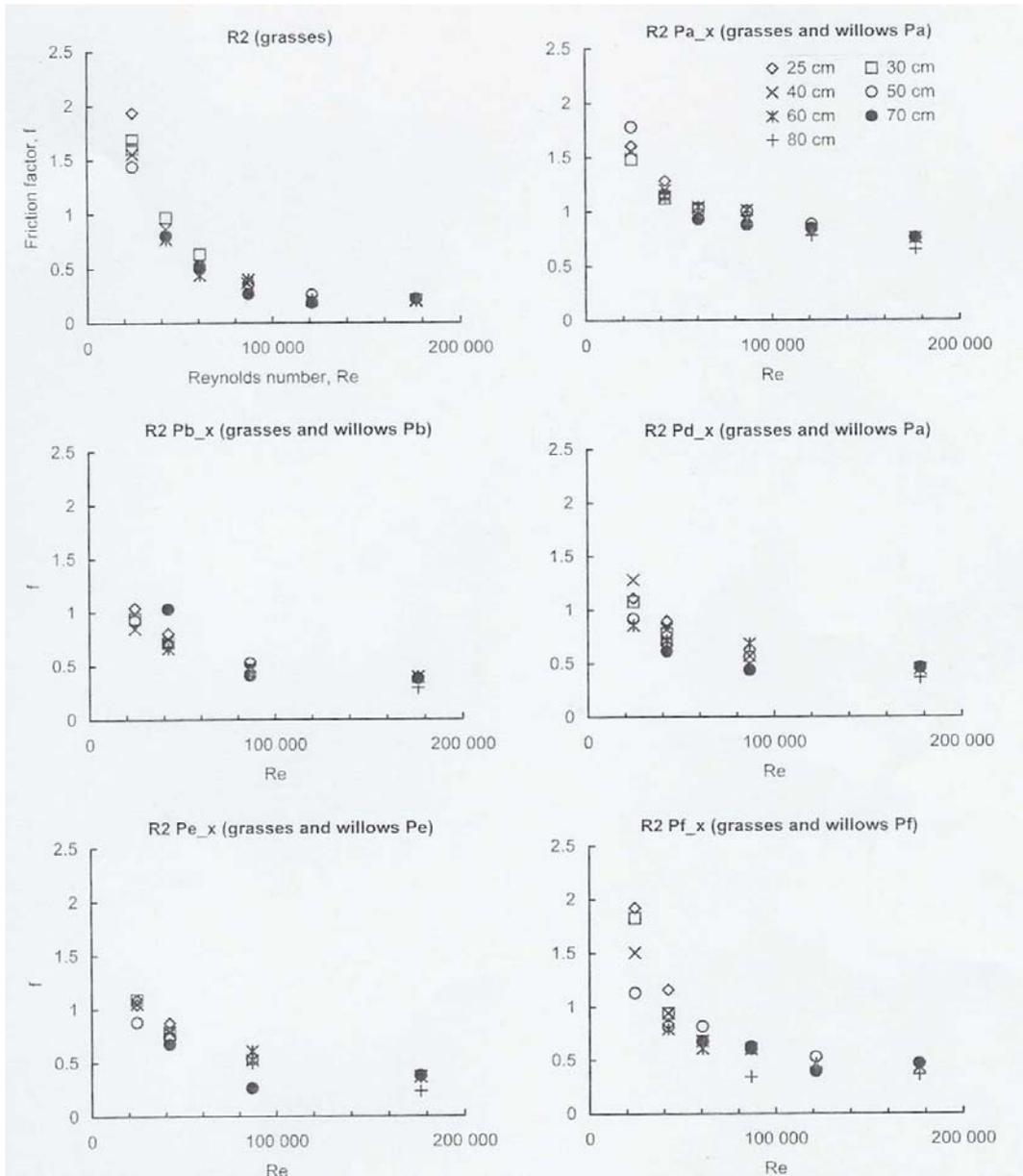
$g$  Fallbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$h$  Wassertiefe [m]

$v$  Fließgeschwindigkeit [m/s]



**Abb. 3.15** Widerstandsbeiwerte (friction factor,  $f$ ) aufgetragen gegenüber der Reynolds-Zahl (Reynolds number,  $Re$ ) und der Wassertiefe (flow depth,  $h$ ) für die Versuchsreihe S3 aus der Untersuchung von JÄRVELÄ (2002) - Erklärung der Versuchsreihenbezeichnung in Tab. 3.2



**Abb. 3.16** Widerstandsbeiwerte (friction factor,  $f$ ) aufgetragen gegenüber der Reynolds-Zahl (Reynolds number,  $Re$ ) und der Wassertiefe (flow depth,  $h$ ) für die Versuchsreihe R2 aus der Untersuchung von JÄRVELÄ (2002) - Erklärung der Versuchsreihenbezeichnung in Tab. 3.2

**Tab. 3.2 Zusammenfassung der Versuchsreihen von JÄRVELÄ (2002)**

Versuchsreihe	Beschreibung	Q-h Kom.	Bereich von $f$	Bereich von $Re$ ( $=vh/\nu$ )	Bereich von $I_E$
S3	Seggen ( <i>Carex acuta</i> )	32	0,26-2,43	24.200-177.000	0,0001-0,0059
S3Pa	Seggen mit belaubten Weiden ( <i>Salix sp.</i> )	23	2,07-6,78	24.200-177.000	0,0009-0,0127
S3Pa_x	Seggen mit unbelaubten Weiden	23	1,21-2,27	24.200-177.000	0,0003-0,0063
S3b_Pa_x	Unbelaubte Weiden	23	0,26-0,83	24.200-177.000	0,0001-0,0036
S3Pf	Seggen mit belaubten Weiden	23	1,27-4,29	24.200-177.000	0,0005-0,0069
S3Pf_x	Seggen mit unbelaubten Weiden	23	0,67-1,75	24.200-177.000	0,0002-0,004
S3b_Pf_x	Unbelaubte Weiden	23	0,12-0,38	24.200-177.000	0,0001-0,0016
R2	Gräser (gemischt und natürlich gewachsen)	23	0,18-1,93	24.400-176.700	0,0001-0,0033
R2Pa_x	Gräser mit unbelaubten Weiden	26	0,65-1,78	24.400-176.700	0,0003-0,0065
R2Pb_x	Gräser mit unbelaubten Weiden	18	0,29-1,04	24.500-176.400	0,0001-0,0037
R2Pd_x	Gräser mit unbelaubten Weiden	18	0,36-1,28	24.300-177.900	0,0001-0,0042
R2Pe_x	Gräser mit unbelaubten Weiden	18	0,23-1,09	24.500-176.700	0,0001-0,004
R2Pf_x	Gräser mit unbelaubten Weiden	26	0,34-1,92	24.300-176.700	0,0002-0,0056
R2b_Pa_x	Unbelaubte Weiden	26	0,24-0,57	24.200-177.000	0,0001-0,0022
R2b_Pf_x	Unbelaubte Weiden	25	0,13-0,31	24.200-177.000	0,0001-0,0012

Anmerkung: S3\* und R2\* gehören jeweils zu einer Versuchsgruppe von sieben bis acht Reihen

### 3.6 ZUSAMMENFASSUNG „BEWUCHSEINFLUSS“

Der im DFG-Schwerpunktprogramm „Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“ auf turbulenztheoretischen Ansätzen entwickelte Berechnungsansatz von PASCHE (1984) wurde im Rahmen des SERC-FCF-Forschungsprogramms durch weitere Versuchsreihen in einer großmaßstäblichen Versuchsrinne bestätigt. Dies geht aus der vergleichenden Analyse von SCHUMACHER (1995) hervor. Der Berechnungsansatz von PASCHE mit dem so genannten Trennflächenverfahren ist Bestandteil des Wasserspiegellagenprogrammes WASPTOOLS, welches für die Auswertung der Gewässerparameter im Untersuchungsgebiet (Kapitel 7) und für die Simulationen (Kapitel 8) herangezogen wird.

Im Kapitel 8 werden mehrere Bewuchsvarianten berücksichtigt. Neben Auwaldbeständen, die das gesamte Vorland entlang des Gewässers bedecken, soll eine Variante mit Bewuchsstreifen, die entlang des Ufers als Randstreifen und vereinzelt auf dem Vorland vorkommen, betrachtet werden. Den Untersuchungen von BECKER (1999) kann entnommen werden, dass die Lage und Anordnung dieser Streifen bei einem Verbauungsgrad bis 0,35 keinen bedeutenden Einfluss auf die Stauhöhe hat.

Da in dieser Untersuchung ausgewachsene Auwaldbestände betrachtet werden, die mit starren Bewuchselementen nachgebildet werden können, entspricht dieses weitestgehend den Versuchsbedingungen, die zur Herleitung des Berechnungsansatzes von PASCHE (1984) geführt haben. Von RICKERT (1986) wurde dieser Ansatz zudem durch Messungen in der Natur bestätigt.

Untersuchungen mit flexiblem Bewuchs (OPLATKA, 1998, GERSTGRASER, 2000, JÄRVELÄ, 2002, STEPHAN, 2002, SCHNAUDER, 2004) haben gezeigt, dass die angeströmte Fläche sich ändert und der Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Wassertiefe, der Fließgeschwindigkeit, der Reynolds-Zahl und der Vegetationsdichte stark variiert. Die in den Laboruntersuchungen erkannten Abhängigkeiten konnten bisher jedoch noch nicht in ein entsprechendes Modellierungsprogramm integriert werden. Dies ist auf die Komplexität der Strömungsvorgänge und der gegenseitigen Beeinflussung der vielen mitwirkenden Parameter zurückzuführen.

Der Arbeit von BAUER (2004), die nahezu parallel zu dieser Arbeit entstanden ist, kann entnommen werden, dass zweidimensionale Modellierungen bei der Wirkungsabschätzung von weiträumigen Renaturierungsmaßnahmen entlang von Fließgewässern auf den Abfluss zurzeit noch keine genaueren Ergebnisse als eindimensionale Modellierungen liefern. Voraussetzung für eine gute eindimensionale Modellierung naturnaher Fließgewässer, die einen Windungsgrad aufweisen, ist jedoch die Beachtung verschiedener Fließlängen.



## 4 WASSERSPIEGELLAGENBERECHNUNG

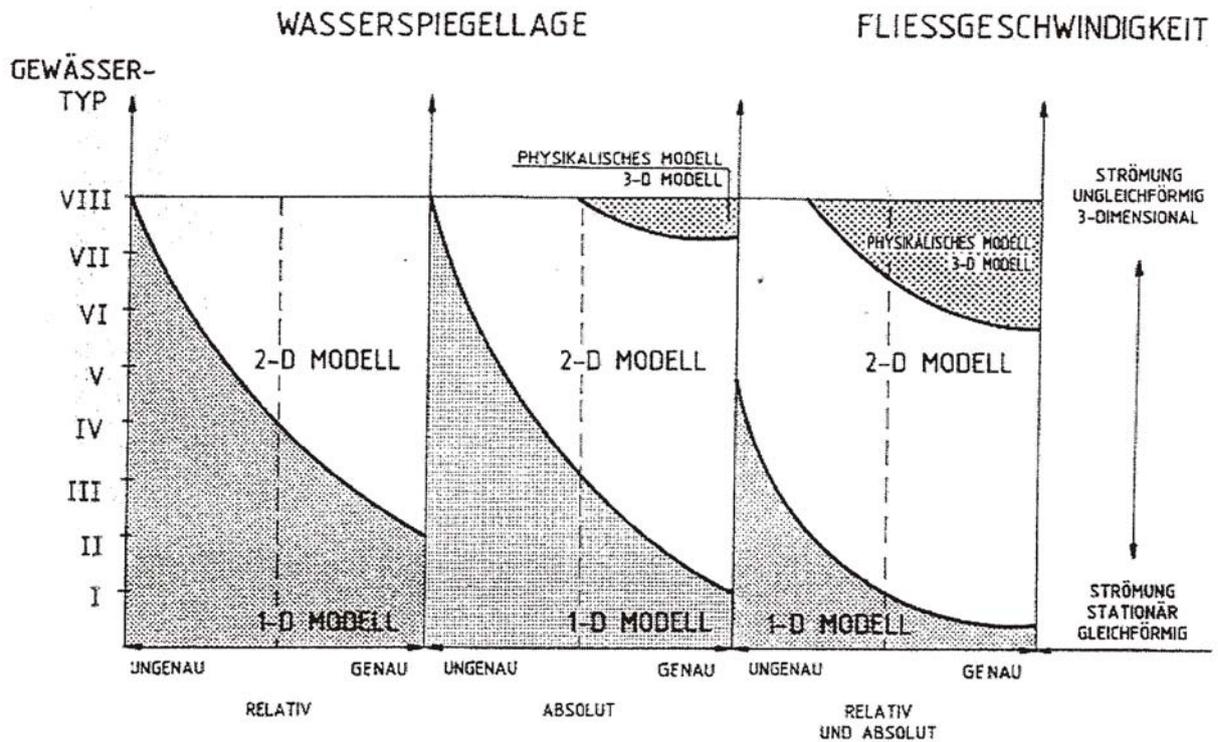
### 4.1 ANWENDUNGSBEREICH

Der Trend, Gewässer naturnah zu gestalten, kam in der Mitte der 70iger Jahre auf und ist inzwischen als Vorgabe fest in der EG-WRRL und damit in den Wasserhaushaltsgesetzen der Länder etabliert. Durch die naturnahe Erhaltung bzw. Gestaltung der Fließgewässer ergaben sich neue Anforderungen an die Fließgewässerhydraulik. In den damit verbundenen Forschungsaktivitäten (Kapitel 3.1 ff.) wurden den neuen Anforderungen entsprechende Ansätze für eindimensionale Wasserspiegellagenmodelle gefunden.

Eindimensionale Wasserspiegellagenmodelle können bei der hydraulischen Berechnung die Ungleichförmigkeit der Gewässergeometrie und des Sohlgefälles sowie die über den Querschnitt variierende Sohl- und Bewuchsrauhheit berücksichtigen. Somit lassen sich die bei naturnahen Gewässern auftretenden komplexen Strömungs- und Rauheitsstrukturen mit den neueren Ansätzen nachbilden (DVWK, 1991, BWK, 1999, BWK, 2000). Unter Annahme stationär-gleichförmiger Abflussverhältnisse und Ansatz konstanter Rauheitsstrukturen im Querprofil, wie dies zum Beispiel bei der Formel nach Manning-Strickler der Fall ist, ist dieses nur eingeschränkt möglich.

Bei der zweidimensionalen tiefengemittelten Modellierung werden Strömungen quer zur Fließrichtung berücksichtigt. Sie ist bei ausreichender Datengrundlage der eindimensionalen Modellierung vorzuziehen, vor allem wenn Querströmungen eine wichtige Rolle spielen. Dreidimensionale Modelle, die auch die vertikale Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigen, werden für Untersuchungen im Nahbereich eingesetzt. Anwendungsbeispiele sind Sedimenttransportuntersuchungen und Untersuchungen im Nahbereich von Pfeilern, Buhnen und Mauern.

In der Abb. 4.1 wird eine Abgrenzung der 1-, 2- und 3-dimensionalen Strömungsmodelle in Abhängigkeit des Gewässertyps vorgenommen. Aus Abb. 4.1 geht hervor, dass die Ermittlung der Wasserspiegel mit eindimensionalen Modellen in den Bereich der ungleichförmigen Strömung hinein verwertbare Ergebnisse liefern.



Typ	Linienführung	Profil	geometrische Varianz in Fließrichtung	Rückströmungs- u. Retentionsbereiche	Strömungsverzweigung, -vereinigung	Bauwerke in u. am Gewässer	Strömungsverhältnisse
I	gestreckt	kompakt	gering	nein	nein/ja	nein/ja	stationär gleichförmig
II	gestreckt	gegliedert	gering	nein	nein	nein	
III	mäandrierend	kompakt	gering	nein	nein/ja	nein/ja	
IV	gestreckt	gegliedert	mittel-hoch	nein	nein/ja	nein/ja	
V	mäandrierend	gegliedert	gering	nein	nein	nein	ungleichförmig
VI	gestreckt	gegliedert	mittel-hoch	ja	nein/ja	nein/ja	
VII	mäandrierend	gegliedert	gering	nein	ja	ja	
VIII	mäandrierend	gegliedert	mittel-hoch	nein/ja	nein/ja	nein/ja	3-d

Abb. 4.1 **Abgrenzung zwischen 1-, 2- und 3-dimensionalen Strömungsmodellen bzw. physikalischen Modellen (BWK, 2000)**

## 4.2 MATHEMATISCHES VERFAHREN

In der Berechnung der Spiegellinie wird davon ausgegangen, dass sich in Fließgewässern die in Wirklichkeit mehrdimensionalen Strömungsvorgänge in guter Näherung auf ein 1-dimensionales Problem vereinfachen lassen. Somit werden die Fließgeschwindigkeit und der Wasserspiegel über den Gewässerquerschnitt als nahezu konstant bzw. horizontal angesehen, so dass sie durch eine mittlere Fließgeschwindigkeit und einen horizontalen Wasserspiegel genügend genau charakterisiert werden (BWK, 1999, BWK, 2000).

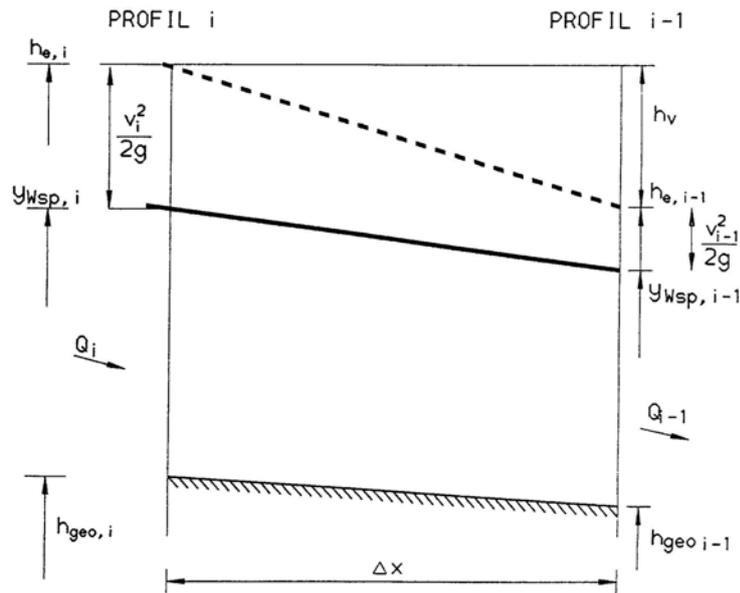
Bei gegliederten Gerinnen und Querprofilen mit Bereichen unterschiedlicher Rauheit ist eine entsprechende Einteilung in Teilbereiche nötig (Abb. 3.5). Für jeden Bereich ergeben sich unterschiedliche Widerstandsbeiwerte, die sich aus dem Widerstand der Sohle, dem Widerstand des Gehölzsaums (raue Wand), Austauschvorgängen zwischen den Querschnittsteilen (Interaktion) und Gerinnekrümmungen zusammensetzen und überlagern. Hinzu kommen Widerstände durch Geschiebe- und Schwebstofffrachten, die schwer zu quantifizieren sind. Da die Widerstandsbeiwerte abhängig von der Einflussfläche sind, die zu Beginn der Berechnung nicht bekannt ist, handelt es sich bei der Überlagerung der Widerstände und der damit verbundenen Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegel um einen iterativen Prozess.

Die Grundgleichung zur Wasserspiegellinienberechnung (Abb. 4.2) lautet:

$$y_{Wsp,i} = y_{Wsp,i-1} + \beta \cdot \left( \alpha \frac{v_{i-1}^2}{2g} - \alpha \frac{v_i^2}{2g} \right) + \frac{1}{2} \cdot x \cdot (I_{E,i-1} + I_{E,i})$$

mit:

$y_{Wsp,i}$	Wasserstand an der Stelle i [m]
$x$	Fließlänge zwischen Stelle i und Stelle i -1 [m]
$v_i^2 / 2g$	Geschwindigkeitshöhe an der Stelle i [m]
$I_{E,i}$	Energieliniengefälle an der Stelle i [-]
$\beta$	Beiwert, der eine plötzliche Querschnittserweiterung berücksichtigt ( $A_{i-1} > A_i \Rightarrow \beta = 2/(1+A_{i-1}/A_i)$ , sonst: $\beta = 1$ )
$\alpha$	Korrekturbeiwert für Geschwindigkeitshöhe (nach NAUDASCHER)
$g$	Fallbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )



**Abb. 4.2 Schematischer Flussquerschnitt**

Für die Iteration werden als Eingangswerte ein Anfangswasserspiegel [mNN], ein Anfangsenergieliniengefälle [-] und ein konstanter Abfluss  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] benötigt. Das Anfangsenergieliniengefälle kann näherungsweise aus der Sohlneigung abgeleitet werden. Für die aufwendige Berechnung der Spiegellinien stehen heutzutage Programme zur Verfügung. Diesen dient das Anfangsenergieliniengefälle lediglich als Startwert für die programminterne Iteration.

Für die Ermittlung der einzelnen Werte der Spiegelliniengleichung können unterschiedliche Fließformeln herangezogen werden. Bei regelmäßigen Querschnitten ohne Bewuchs im Abflussquerschnitt können mit der empirischen Formel von Manning-Strickler hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden:

$$v = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2}$$

- |          |  |
|----------|--|
| $v$      | mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]            |
| $k_{St}$ | Stricklerbeiwert [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] |
| $r_{hy}$ | hydraulischer Radius [m]                       |
| $I_E$    | Energieliniengefälle [-]                       |

Bei naturnahen Gerinnen mit unregelmäßigen Querschnitten und Bewuchs im Abflussquerschnitt empfiehlt es sich das Allgemeine Fließgesetz anzuwenden, da zur Berücksichtigung des Bewuchseinflusses explizite Widerstandsbeiwerte für starren

Bewuchs und Trennflächen ermittelt werden (Kapitel 3.1). Das Allgemeine Fließgesetz lautet:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E}$$

mit:

v	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
$\lambda$	Gesamtwiderstandsbeiwert [-]
g	Fallbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$r_{hy}$	hydraulischer Radius [m]
$I_E$	Energieliniengefälle [-]

Der Gesamtwiderstandsbeiwert  $\lambda$  im Allgemeinen Fließgesetz hängt von der Reynoldszahl, die das Verhältnis von Fließgeschwindigkeit zur kinematischen Zähigkeit wiedergibt, der Sohlrauheit, die sich im  $k_s$ -Wert wieder findet im Verhältnis zum hydraulischen Radius sowie der Querschnittsform und Rauheitsstruktur ab. Der Bewuchs wird in der Rauheitsstruktur berücksichtigt. Zusammengefasst ergibt sich:

$$\lambda = f(\text{Re}; k_s/r_{hy}; \text{Querschnittsform}; \text{Rauheitsstruktur}).$$

Die Einflüsse des Bewuchses auf den Strömungsvorgang können durch den Widerstandsbeiwert insbesondere durch Anwendung des Trennflächenverfahren, welches in Kapitel 3.1 beschrieben wird, in guter Näherung erfasst werden.

Für die Einflüsse auf die Strömung in einem Fließgewässer durch einen mäandrierenden Gewässerverlauf wurden bisher noch keine zufrieden stellenden allgemeinen Vereinfachungen für 1-dimensionale Modelle gefunden. Wenn es für die Aufgabenstellung von entscheidender Bedeutung ist, die Strömungsverhältnisse in einem mäandrierenden Gewässer zu kennen, sollte ein 2-dimensionales Modell angewandt werden.

Bei der naturnahen Gewässerentwicklung vor allem im ländlichen Raum wird zumeist gefordert, dass sich das Gewässer frei entwickeln darf. Hierdurch ist eine genaue Vorhersage des sich einstellenden Gewässerverlaufes nicht möglich. Dies legitimiert eine grobe Abschätzung des Einflusses der Mäandrierung durch ein 1-dimensionales Modell.

Um den Einfluss der Mäandrierung in einem 1-dimensionalen Modell zu erfassen, wird empfohlen den Rauheits- bzw. Widerstandsbeiwert zu erhöhen (BWK, 2000). Diese müssen bei Berücksichtigung von naturnahen Rauheitsstrukturen (Totholz,

Wurzelflächen, Bänken, Kolken usw.) im Vergleich zu ausgebauten Gewässern erhöht werden und dürften den Einfluss durch die Mäandrierung übertreffen. Zurzeit gibt es für den Anwender kaum Anhaltswerte für anzusetzende Rauheits- bzw. Widerstandsbeiwerte, die durch Naturmessungen erhoben wurden. Ein Beispiel hierfür ist eine Erhebung des Bundesamtes für Wasser und Geologie in der Schweiz, die an ausgesuchten Fließgewässern den Rauheitsbeiwert nach Strickler bestimmt haben (BWG, 2001).

Von entscheidender Bedeutung bei Berücksichtigung der Mäandrierung in einem 1-dimensionalen Modell ist die Verlängerung des Fließweges und die damit zusammenhängende Reduzierung des Sohlgefälles gegenüber eines geraden Gewässerverlaufs. Kommt es im Hochwasserfall bei entsprechenden Wassertiefen auf dem Vorland zu einem Vorlandabfluss so ist zu berücksichtigen, dass der Fließweg zwischen den Profilen im Hauptquerschnitt in einem mäandrierendem Verlauf in der Regel länger ist als auf dem Vorland, wenn hier der Abfluss dem Talgefälle folgt (MARENBACH, 2002, BAUER, 2004).

Hinweise zur Programmanwendung befinden sich im Anhang (Anlage 2)

## **5 BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES**

Das Untersuchungsgebiet liegt im Norden Deutschlands, in Niedersachsen, und ist Teil des Wesereinzugsgebietes. Dabei wird ein Verlauf vom südniedersächsischen Bergland bis zur Einmündung der Aller in die Weser betrachtet. Es werden die Bever vom Quellgebiet bis zur Mündung, die Ilme von der Bewermündung bis zur Mündung in die Leine, die Leine von der Ilmemündung bis zur Mündung in die Aller und die Aller von der Leinemündung bis zur Mündung in die Weser untersucht (Abb. 5.1 bis Abb. 5.4).

### **5.1 CHARAKTERISTISCHE MERKMALE**

Im Folgenden werden die charakteristischen Merkmale wie geographische Lage, Geomorphologie und Klima des Untersuchungsgebietes wiedergegeben. Anschließend wird auf das Leitbild, den Ist-Zustand sowie auf die aus den Defiziten abgeleiteten Veränderungen am Gewässer bezüglich Bewuchs und Laufform eingegangen.

#### **5.1.1 Geographische Lage**

Das Quellgewässer ist die Bever, die im Weser-Leine-Bergland westlich der Stadt Einbeck gelegen ist. Die Bever hat ihre Quelle im Elfes Gebirge und fließt überwiegend in Richtung Süden (Abb. 5.2). Sie fließt entlang der Ortschaften Portenhagen und Lüthorst, vorbei an der Ortschaft Deitersen und mündet schließlich in der Ortschaft Markoldendorf in die Ilme. Die Bever hat drei Nebenbäche. Oberhalb von Lüthorst mündet aus nordöstlicher Richtung der Reißbach in die Bever. Südlich von Deitersen fließt zunächst die Bremke, welche am Amtsberge im Westen entspringt, in die Bever. Etwas weiter unterhalb hat der größte Nebenbach, der Allerbach, aus nordwestlicher Richtung kommend seine Mündung. Das Einzugsgebiet wird im Norden durch den Elfes und im Westen durch den Amtsberg begrenzt und hat eine Fläche von ca. 42 km<sup>2</sup>. Diese Fläche wird von der Bever mit einer Länge von ca. 12 km entwässert.

Die Ilme hat ihre Quelle im Solling. Dieses Gebirge liegt im Südwesten des Einzugsgebietes (Abb. 5.1 und Abb. 5.2). Im Süden befindet sich der Gebirgszug Ahlsberg, im Norden das Elfesgebirge und im Osten das Hube Gebirge. Der Ilme fließen im Oberlauf mehrere Waldbäche aus südlicher und westlicher Richtung zu. Die Ilme selbst hat im Oberlauf einen nordwestlichen Verlauf bis zur Stadt Dassel. Von Dassel bis zur Mündung in die Leine verläuft die Ilme vorwiegend in östlicher Richtung. Nach Einmündung der Bever von Norden im Mittellauf der Ilme münden aus Süden die Dieße und Rotte, aus Norden das Krumme Wasser und ebenfalls aus Süden die

Rebbe in die Ilme. Die Ilme hat eine Gesamtlängelänge von ca. 33 km und entwässert mit ihren Nebengewässern ein Gebiet von ca. 390 km<sup>2</sup>. Bis zur Einmündung der Bever umfasst das Einzugsgebiet ca. 150 km<sup>2</sup>. Die Fließlänge von der Bewermündung bis zur Mündung der Ilme in die Leine beträgt ca. 13 km.

Die Leine entspringt auf der Wasserscheide zwischen Weser und Elbe in der Senke zwischen Dün und Ohmgebirge in Leinefelde in Thüringen. Sie fließt zunächst in westlicher Richtung bis zur niedersächsischen Grenze und fließt ab dort recht kontinuierlich in Richtung Norden bis zur Mündung in die Aller (Abb. 5.1).

Dabei fließt sie durch die Stadt Göttingen, vorbei an Northeim, wo sie das größte Nebengewässer, die Rhume, aufnimmt. Sie durchfließt in der Nähe der Stadt Einbeck das Rückhaltebecken Salzderhelden; dort beginnt unterhalb nach Einmündung der Ilme das Untersuchungsgebiet. Im weiteren Verlauf fließt sie vorbei an Kreienzen, durch die Stadt Alfeld, vorbei an Elze und schließlich durch Hannover sowie Neustadt und mündet bei Schwarmstedt in die Aller (Abb. 5.3 und Abb. 5.4).

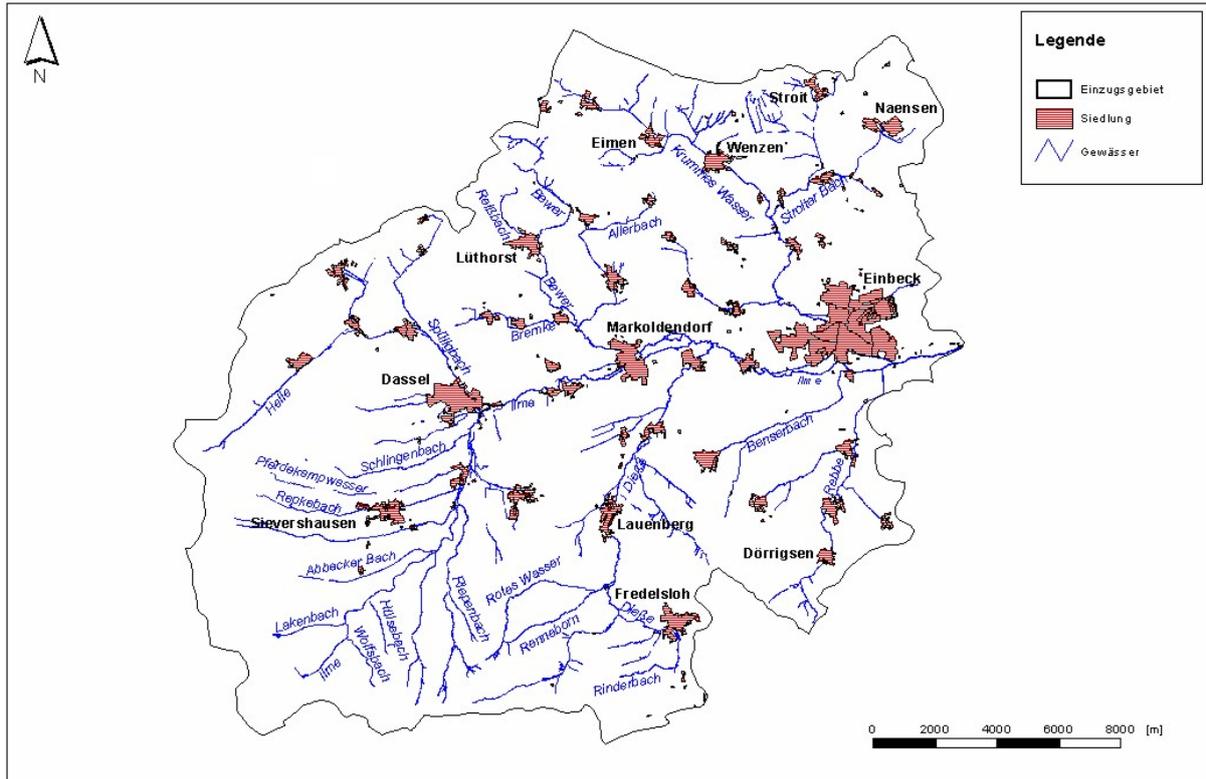
Das Gesamteinzugsgebiet der Leine umfasst ca. 6.500 km<sup>2</sup>, welches von der Leine auf einer Länge von ca. 270 km entwässert wird. Nach Einmündung der Ilme in die Leine fließen folgende größere Gewässer der Leine zu, die im Abflussspendenlängsschnitt (NLÖ, 2003) aufgeführt sind (Anlage 7): Saale (westlich,  $A_E = 200 \text{ km}^2$ ), Innerste (östlich,  $A_E = 1.280 \text{ km}^2$ ), Westaue (westlich,  $A_E = 690 \text{ km}^2$ ) und Auter (östlich,  $A_E = 130 \text{ km}^2$ ). Das Einzugsgebiet der Leine vor Einmündung der Ilme beträgt insgesamt ca. 2.200 km<sup>2</sup>.

Das sich in Nord-Südrichtung erstreckende Leineinzugsgebiet wird im Osten durch den Harz und im Westen durch das Leine-Weserbergland begrenzt. Im Süden wird es durch die Höhenzüge des Naturparks Werratal begrenzt und nach Norden öffnet es sich zur norddeutschen Tiefebene.

Die Aller entspringt im nördlichen Harzvorland bei Seehausen in Sachsen-Anhalt. Sie durchquert einen Teil der Magdeburger Börde und des Drömlings. Bei Oebisfelde tritt sie in das Weser-Aller-Urstromtal ein, von wo aus sie einem nordwestlichen Verlauf folgt (Abb. 5.1 und Abb. 5.4). Das Einzugsgebiet der Aller umfasst ca. 15.800 km<sup>2</sup>. Es wird im Süd-Osten durch den Harz begrenzt. Die Wasserscheide zum direkten Einzugsgebiet der Weser verläuft durch das Weser-Leinebergland, wobei die Leine ein Teileinzugsgebiet der Aller und die Aller selbst wiederum ein Teileinzugsgebiet der Weser ist. Nach Norden hin öffnet sich das Einzugsgebiet der Aller zur Norddeutschen Tiefebene.



Abb. 5.1 **Übersicht Wesereinzugsgebiet mit den Nebengewässern Aller und Leine (FGG-Weser, 2005)**



**Abb. 5.2 Übersicht Einzugsgebiet Bover und Ilme**

Die Gesamtlängelänge der Aller beträgt ca. 263 km. Das größte Nebengewässer der Aller nach der Leine ist die Oker, welche ihre Quelle im Harz hat. Bis zur Einmündung der Leine beträgt das Einzugsgebiet der Aller ca. 7.400 km<sup>2</sup>, nach Einmündung der Leine ca. 13.900 km<sup>2</sup> und danach nimmt es lediglich noch um 1.900 km<sup>2</sup> zu. Die Aller passiert auf ihrem Weg zur Weser die Städte Wolfsburg, Gifhorn, fließt an Müden vorbei, durch Celle, vorbei an Winsen, Wietze und Schwarmstedt und fließt schließlich kurz vor der Mündung in die Weser durch Verden.

Die schiffbare Länge der Aller beträgt 117 km und beginnt bei Celle. Von Celle bis Verden ist die Aller in die Wasserstraßenklasse II und von Verden bis zur Mündung in die Klasse III eingestuft. Zwischen Celle und der Leinemündung wurden von 1908 bis 1916 vier Staustufen in Verbindung mit Schleusen gebaut. Unterhalb der Leinemündung reichte die Wasserführung zunächst aus, um mit kleineren Maßnahmen, wie dem Bau von Buhnen, eine für die Schifffahrt ausreichende Mindestwassertiefe zu gewährleisten. Mit dem Bau des Mittellandkanals verlor die Aller für die Schifffahrt an Bedeutung.

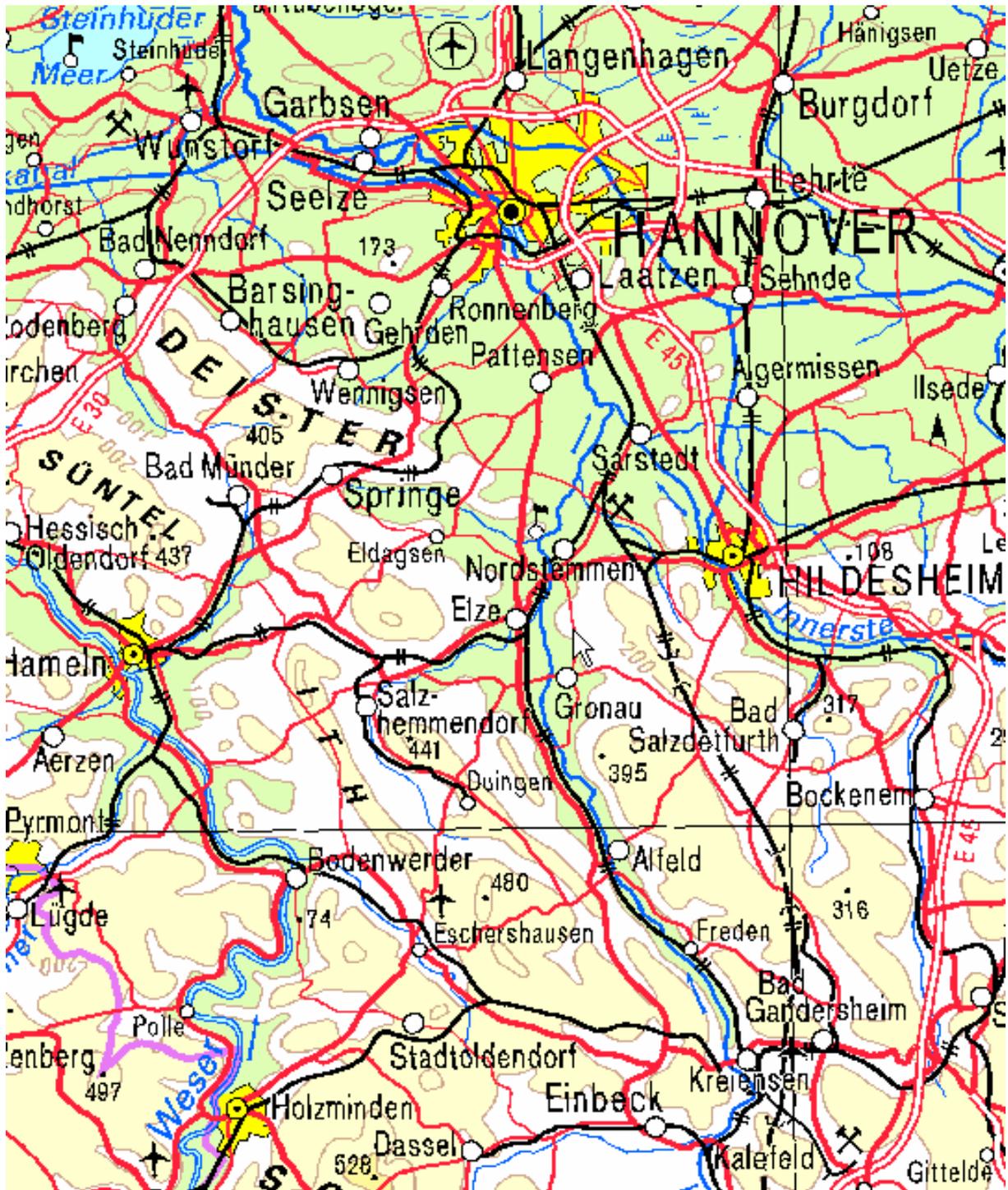


Abb. 5.3 Übersicht des Untersuchungsabschnittes Leine südlich der Stadt Hannover (TOP50, LGN)

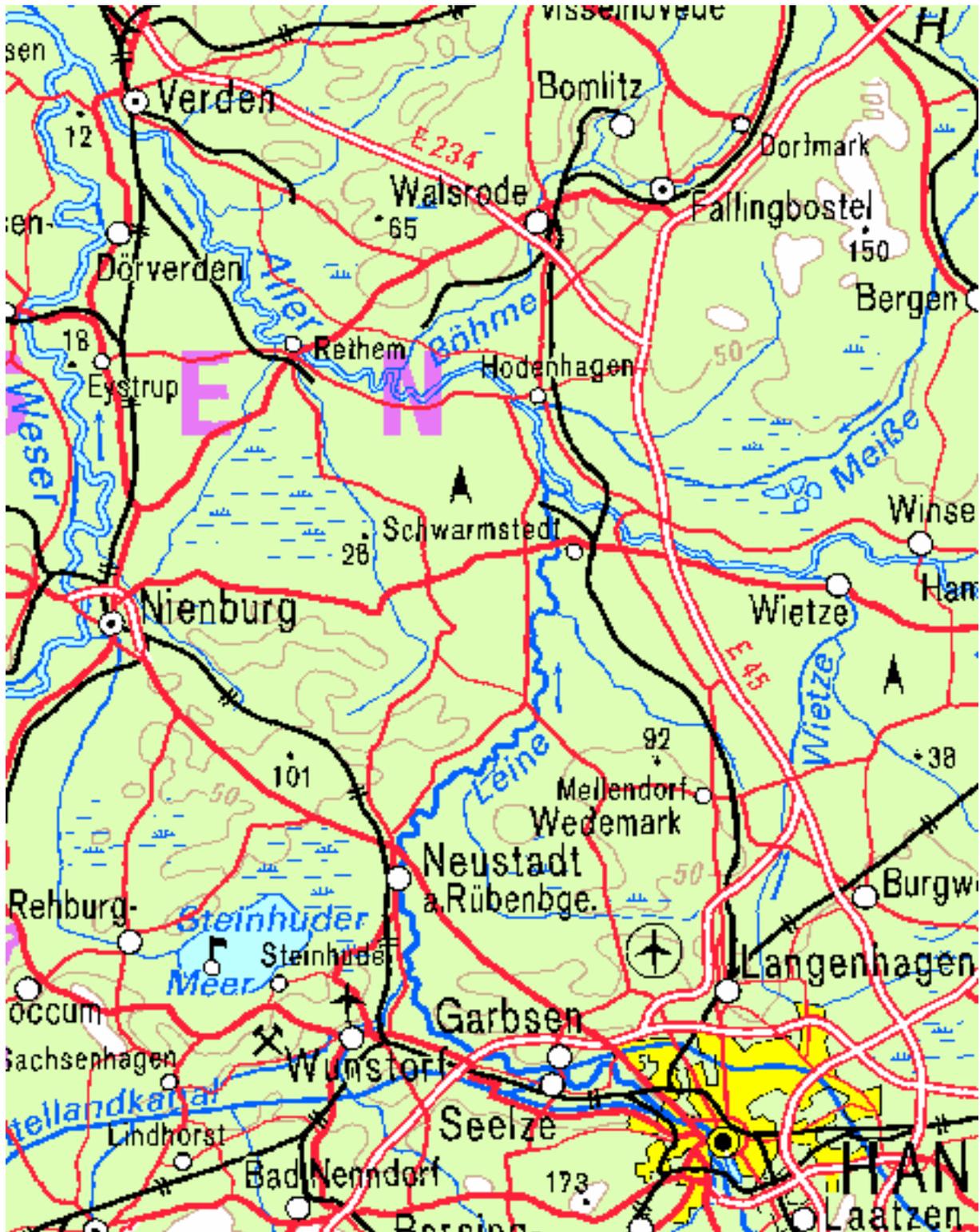


Abb. 5.4 Übersicht der Untersuchungsabschnitte Leine nördlich der Stadt Hannover und Aller (TOP 50, LGN)

### 5.1.2 Klima

Das Klima im Untersuchungsgebiet ist kühl gemäßigt und in erster Linie durch atlantische, im südlichen Bereich zum Teil jedoch auch durch kontinentale Einflüsse, geprägt. In der Norddeutschen Tiefebene ist der atlantische Einfluss klimabestimmend. Dieser Einfluss erstreckt sich südlich ins Leinetal hinein. Das Einzugsgebiet der Ilme und somit der Bever befindet sich am Übergang zum kontinentalen Einflussbereich, wobei der atlantische Einfluss überwiegt.

Einen Überblick der Niederschlagsituation kann einem Werk über „Abflussdaten des Aller – Leine – Oker – Gebietes (Hauptzahlen und Hochwasserdaten)“, herausgegeben vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter Mitarbeit von BILLIB (1973), entnommen werden. In diesem Werk wurden über 200 Messstellen des Deutschen Wetterdienstes auf ihre mittleren jährlichen Niederschläge für den Zeitraum von 1890 bis 1971 ausgewertet und entsprechende Isohyetenkarten erstellt. Die niederschlagsärmsten Gebiete liegen in dieser Region im Allerurstromtal und den südlich gelegenen Börden mit einem mittleren jährlichen Niederschlag von 600 mm bis 650 mm. In den nördlich gelegenen Gebieten erhöht sich der mittlere Niederschlag auf 700 mm. Nach Süden in Richtung Weser-Leinebergland und Harz nehmen die Niederschläge stärker zu. Im Weser-Leinebergland werden im Allgemeinen mittlere Jahresniederschläge um 800 mm erreicht, die in größeren Höhen bis auf 900 mm oder in Einzelfällen sogar auf 1.000 mm ansteigen können. Im Harz werden mittlere Niederschläge bis zu 1.500 mm erreicht. Im Raum Göttingen nehmen diese Niederschläge dann wieder ab und liegen bei 650 mm.

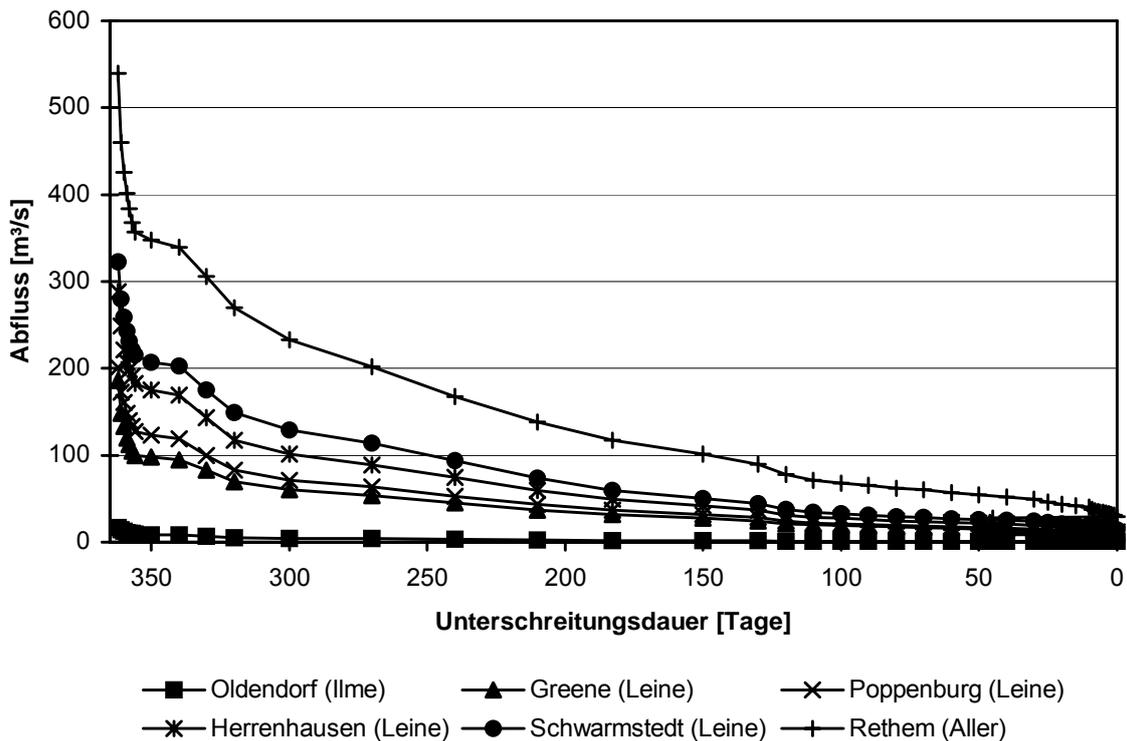
### 5.1.3 Abflüsse

Von Abflussdauerlinien kann abgelesen werden, an wie vielen Tagen im Jahr im Mittel ein bestimmter Abfluss über- oder unterschritten wird. In der Abb. 5.5 sind die mittleren Werte der unterschrittenen Abflüsse aus dem Gewässerkundlichen Jahrbuch von 1999 (NLÖ, 2001c) für die entlang der untersuchten Gewässerstrecke gelegenen Pegelstationen aufgeführt.

Mit Hilfe der Abflussdauerlinie, der Abflusskurve und der Geschiebetransportkurve ist es möglich, die Geschiebemenge zu ermitteln (LANGE ET AL., 1989). Die Bestimmung der Geschiebetransportkurve geschieht unter Anwendung einer der zahlreichen empirischen Geschiebetransportformeln (zum Beispiel: MEYER-PETER UND MÜLLER (1948), ENGELUND UND HANSEN (1967) und ZANKE (1990)). Die mit diesen Formeln erzielten Ergebnisse weichen meist stark voneinander ab. Eine auf alle Gewässertypen passende Formel wurde bisher nicht gefunden, weshalb die jeweiligen Anwendungsgrenzen beachtet werden müssen.

Bereits die Messung der Transportrate ist mit erheblichen Unschärfen verbunden (ZANKE, 2002). Grund dafür ist der schubweise Transport auch bei stationärer Strömung, die Beeinflussung von Transportkörpern (Riffel und Dünen) auf die Messung und der Einfluss der Sedimentfalle selbst auf den Transportvorgang. Eine Punktmessung mit einer Sedimentfalle an einem Gewässer ist zudem nicht repräsentativ für das gesamte Gewässer, da die Transportrate vom Tal zum Kamm zunimmt.

Messungen zur Transportrate liegen im Untersuchungsgebiet nicht vor.



**Abb. 5.5** *Abflussdauerlinien an den Pegelstationen entlang der untersuchten Gewässer (nach NLÖ, 2001c)*

Eine Übersicht der Hochwasserbemessungswerte für die Fließgewässer in Niedersachsen wurde 2003 vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie (NLÖ, 2003) herausgegeben. Dabei wurde von einem Regionalisierungsansatz ausgegangen, in dem Niedersachsen in 32 hydrologische Landschaften und gebietsübergreifende Gewässer wie Leine und Aller eingeteilt wird. Gewässer, die zur gleichen hydrologischen Landschaft gehören, haben hiernach ähnliche Flächeneigenschaften und die punktförmig vorliegenden Pegelmessungen ähneln weitgehend einander. So werden in dem Werk landschaftstypische Kurven aufgeführt, die den Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsgröße und Abflussspende in  $l/(s \text{ km}^2)$  wiedergeben.

In der folgenden Tab. 5.1 sind die vom NLÖ (2003) herausgegebenen Hochwasserabflussspenden für ein 100jähriges Ereignis den ermittelten Werten der in Kapitel 5.1.2 genannten Untersuchung von BILLIB (1973) gegenübergestellt.

Die für ein HQ100 ermittelten Werte, welche in Tab. 5.1 aufgelistet sind, weichen erheblich voneinander ab. Es ist ein gutes Beispiel dafür, wie abhängig die Ermittlung der Abflussspende einer bestimmten Jährlichkeit vom gewählten Zeitraum und der Methode ist. Gesicherte Aussagen können erst nach einem sehr viel längeren Beobachtungszeitraum als der gesuchten Jährlichkeit gemacht werden.

**Tab. 5.1 Hochwasserabflussspenden im Untersuchungsgebiet**

Pegel	Untersuchung BILLIB (1973)		Untersuchung NLÖ (2003)	
	Beobachtungszeitraum	HQ100 [l/(s km <sup>2</sup> )]	Beobachtungszeitraum	HQ100 [l/(s km <sup>2</sup> )]
(Mark-) Oldendorf (Ilme)	1962 - 1971	400	1962 - 2002	280
Greene (Leine)	1948 - 1971	340	1946 - 2002	222
Poppenburg (Leine)	1952 - 1971	300	1946 - 2002	207
Herrenhausen (Leine)	1940 - 1971	210	1946 - 2002	173
Rethem (Aller)	1930 - 1970	140	1946 - 2002	93

**Tab. 5.2 Hochwasserabflussspenden in den Winter- und Sommermonaten (BILLIB, 1973)**

Pegel	Beobachtungszeitraum	MHq Wi [l/(s km <sup>2</sup> )]	MHq So [l/(s km <sup>2</sup> )]
(Mark-) Oldendorf (Ilme)	1962 - 1971	119,0	67,0
Greene (Leine)	1948 - 1971	64,9	26,7
Poppenburg (Leine)	1952 - 1971	39,8	28,6
Herrenhausen (Leine)	1940 - 1971	49,7	22,2
Rethem (Aller)	1930 - 1970	31,0	13,0

In der Untersuchung von BILLIB (1973) wurde weiterhin zwischen Winter- und Sommerabflussspenden unterschieden. Zur Verdeutlichung der Abflusscharakteristik in den Winter- und Sommermonaten sind die entsprechenden Werte der mittleren

Hochwasserabflussspenden (MHq) der im Untersuchungsgebiet liegenden Pegel in der Tab. 5.2 aufgeführt.

Aus Tab. 5.2 geht hervor, dass im Untersuchungsgebiet die Winterhochwässer überwiegen. Die mittlere Hochwasserspende ist dabei in etwa doppelt so hoch wie in den Sommermonaten.

#### **5.1.4 Boden / Morphologie**

Niedersachsen ist in mehrere Naturräume gegliedert (Abb. 5.6). Die Gewässerverläufe der Bever und Ilme liegen im Weser-Leinebergland. Der betrachtete Verlauf der Leine liegt zum Teil ebenfalls im Weser-Leinebergland und geht bei Gronau über in das Tiefland. Dabei wird zunächst bis Hannover die Bördelandschaft durchflossen, an die sich das Weser-Aller-Flachland anschließt. Der betrachtete Flussabschnitt der Aller liegt im Weser-Aller-Flachland.

Die Gewässer des Berglandes sind geprägt durch ihre Talformen (Abb. 5.7). Die Bever weist im Quellbereich als talmorphologischen Subtypus den ‚Kerbtalbach‘ auf, im weiteren Verlauf wird dieser dann zum ‚Muldentalbach‘ und schließlich zum ‚Sohlen-Auentalbach‘ (SCHMIDTKE, 2002).

Aufschlüsse über die Bodenverhältnisse geben die Karten zur Hydrogeologie, Geologie und Bodenkunde des Niedersächsischen Umweltministeriums (GEOSUM, 2004). So ist der geologischen Übersicht zu entnehmen, dass die Bever in einem Gebiet mit unterem Buntsandstein (Sandstein, Schluffstein, Tonstein) entspringt und bis Portenhagen einen Bereich des mittleren Buntsandsteins durchfließt. Von Portenhagen bis Lüthorst folgt dann eine Keuper-Region (ungegliedert), und ab Lüthorst bis zur Mündung bei Markoldendorf fließt sie durch Flussablagerungen aus Auelehm und -sand (Ton, Schluff, Sand). Diese sind sodann maßgebend im weiteren betrachteten Verlauf der Gewässer bis zur Mündung der Aller.

Vorliegende Bohrprofile der Beweraue und dazugehörige Körnungskurven bestätigen den starken Schluffgehalt in den oberen Bodenschichten (0,50 – 1,20 m) im Bereich zwischen Lüthorst und Deitersen (SCHNACK, 1993). Der dann anstehende Sand ist immer noch stark schluffig, und in zwei Bohrprofilen folgt ab einer Tiefe von 1,60 m bzw. 1,85 m eine tonige Schluffschicht.

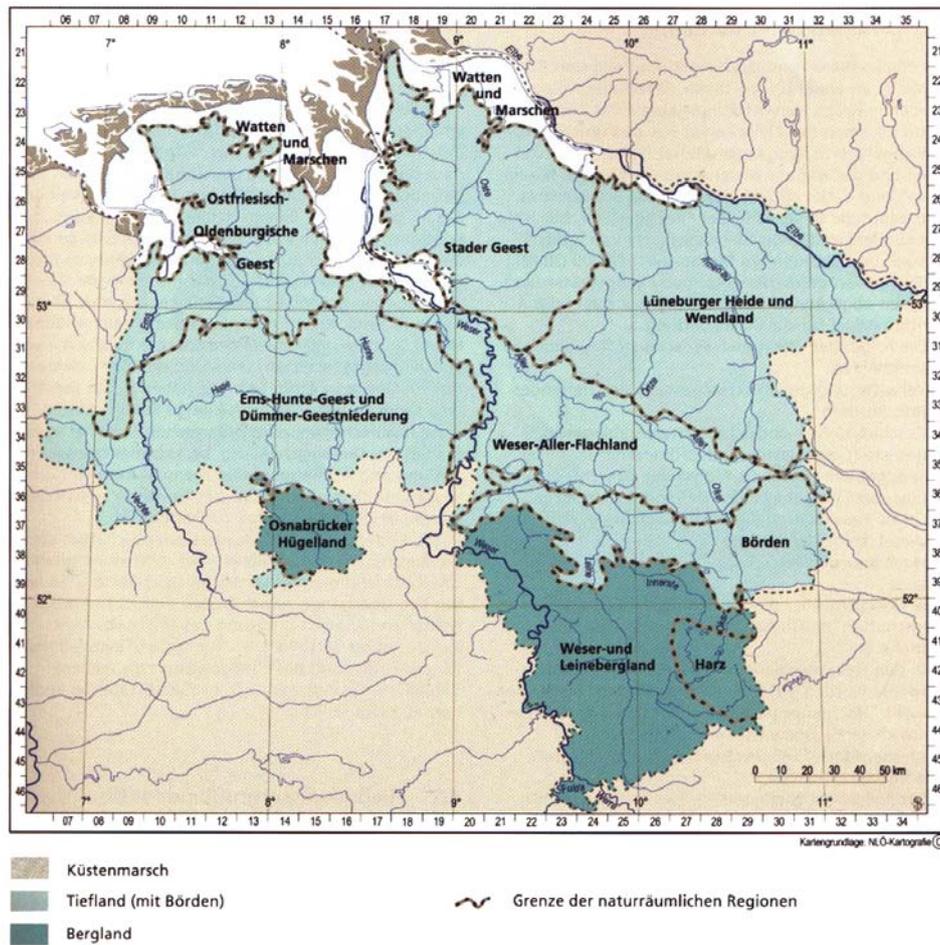


Abb. 5.6 *Naturräumliche Gliederung Niedersachsens und Fließgewässergroßlandschaften (RASPER, 2001)*

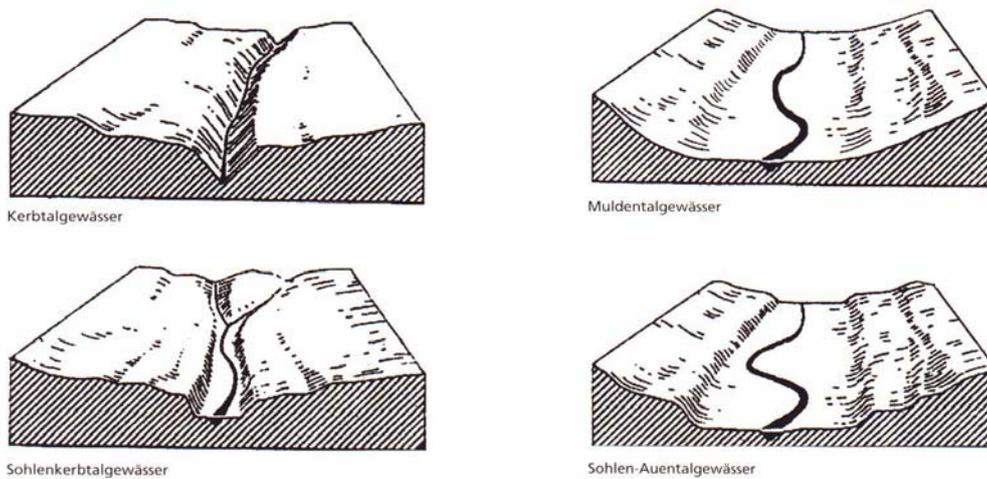
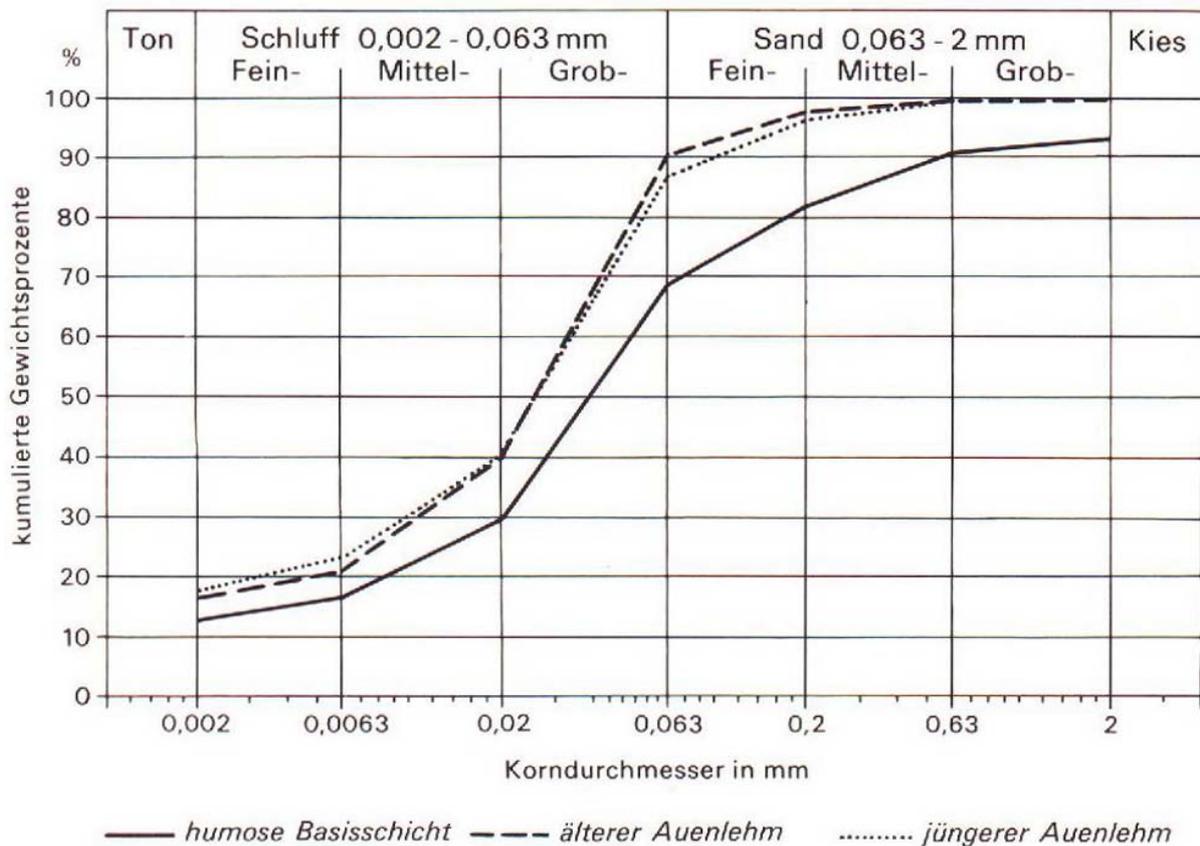


Abb. 5.7 *Fließgewässertypen im betrachteten Bergland (RASPER, 2001)*

Diese Bodenzusammensetzung findet sich auch an der Böschung der Bever wieder. So wurde bei einer Probenahme im Rahmen einer Studienarbeit zur Scherfestigkeit (BECKER, 1995) im mittleren Böschungsbereich der Bever stark toniger Schluff und im unteren Bereich sandiger Schluff vorgefunden.



**Abb. 5.8 Korngrößensummenkurven der holozänen fluvialen Sedimente im unteren Ilmetal (ROTHER, 1989)**

Der betrachtete Flussabschnitt der Ilme gehört zu den Sohlen-Auentalgewässern (Abb. 5.7). ROTHER (1989) nahm für seine Untersuchung zur holozänen fluvialen Morphodynamik im Ilmetal und an der Nordostabflachung des Sollings mehrere Bodenquerprofile der Ilmeaue auf. Die folgenden Angaben über den Aufbau der Aueböden an der Ilme stammen in erster Linie aus dieser Untersuchung. Demnach befinden sich im gesamten Unterlauf der Ilme flächenhaft verbreitete Schotter-schichten. Darauf ausgebildet ist nahezu flächenhaft eine humose Basisschicht. Diese weist nach Einmündung der Bever eine Dicke von etwa 1 m und an der Mündung der Ilme 2 bis 3 m auf. Darüber befindet sich eine ältere Auelehmschicht, die ebenfalls flächenhaft vorhanden ist. Diese Schicht fehlt lediglich an Stellen, an denen diese durch Verlagerungen des Flusses ausgeräumt wurde. Die älteren Auelehme werden entlang der Ilme teilweise durch jüngere Auelehme überlagert. Im Mündungsbereich

liegt dieser dann flächenhaft vor. Die Korngrößensummenkurven der holozänen fluvialen Sedimente im unteren Ilmetal ist in Abb. 5.8 aufgeführt. Abb. 5.9 zeigt beispielhaft dazu ein Bodenquerprofil aus der Arbeit von ROTHER (1989).

Von der Ilmemündung bis Gronau an der Leine sind spätpleistozäne und holozäne Schotter stets von Auelehmen, Schwemmlössen bzw. Lössen oder Hangablagerungen überdeckt. Die Gesamtmächtigkeit der Leineschotter kann dabei stark variieren und die Schichtdicke liegt zwischen 5 m und 7 m. Zwischen den einzelnen Auelehmedecken wurden keine weiteren Schotterablagerungen beobachtet. Demzufolge sind die Schotter seit Ablagerung des Auelehms nur noch im eigentlichen Gerinnebett erodiert, transportiert und abgelagert worden. Die Schotter sind an der Leine oftmals von Sanden flächenhaft überdeckt. Dabei wird zwischen humusarmen und humosen, holzführenden Sanden unterschieden. Die humusarmen Sande der Leine erreichen eine Ablagerungsmächtigkeit zwischen 20 cm und 250 cm. Sowohl die humusarmen als auch die humosen Sande zeichnen sich durch grobsandige Mittelsande aus.

Die Sande und Schotter werden teilweise durch Schwemmlöss überlagert. Vor allem am Talrand und im Schwimmfächerbereich der Nebenflüsse sind Schwemmlössablagerungen zu finden. Der Schwemmlöss zeichnet sich durch einen tonigen Schluff aus, der teilweise einen größeren Sandanteil führt (Abb. 5.12) (PRETZSCH, 1994).

Abb. 5.10 zeigt beispielhaft ein Bohrquerprofil aus der Arbeit von PRETZSCH (1994) und in der Abb. 5.11 sind die in der gleichen Studie ermittelten Korngrößensummenkurven aufgeführt.

Korngrößenanalysen an der Böschung der Leine unterhalb des von PRETZSCH (1994) untersuchten Bereichs bei Burg- und Nordstemmen wiesen im oberen Böschungsbereich sandigen Schluff und im unteren Bereich stark tonigen Schluff auf (STOSCHEK, 1996). Weiter unterhalb bei Letter (nahe Hannover) ergaben die Bodenproben an der Böschung stark schluffige Sande.

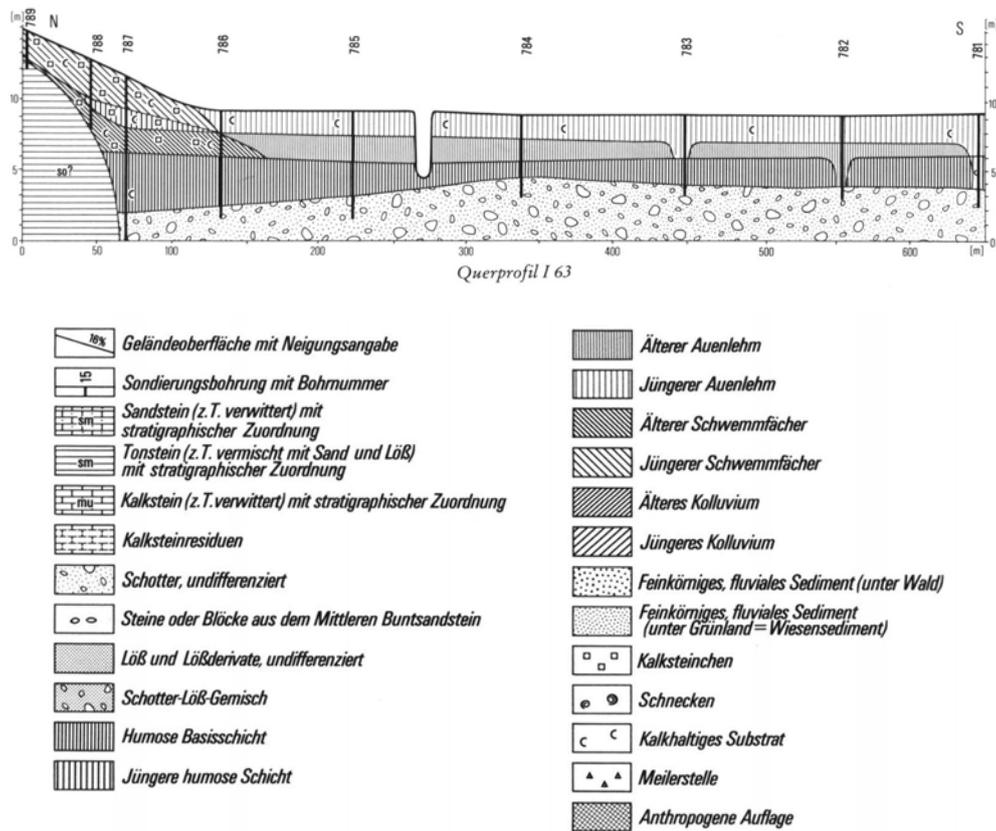


Abb. 5.9 Bodenquerprofil im Mündungsbereich der Ilme (ROTHER, 1989)

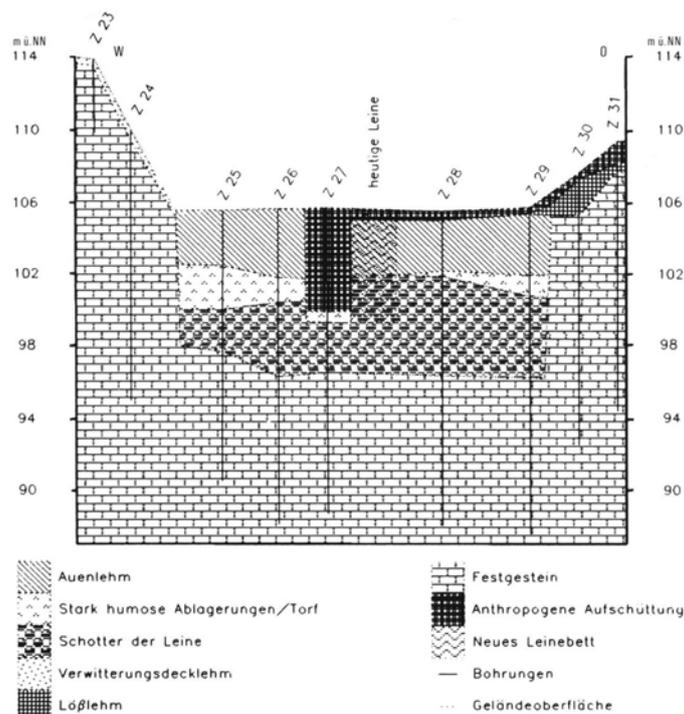


Abb. 5.10 Bohrquerprofil an der Leine (PRETZSCH, 1994)

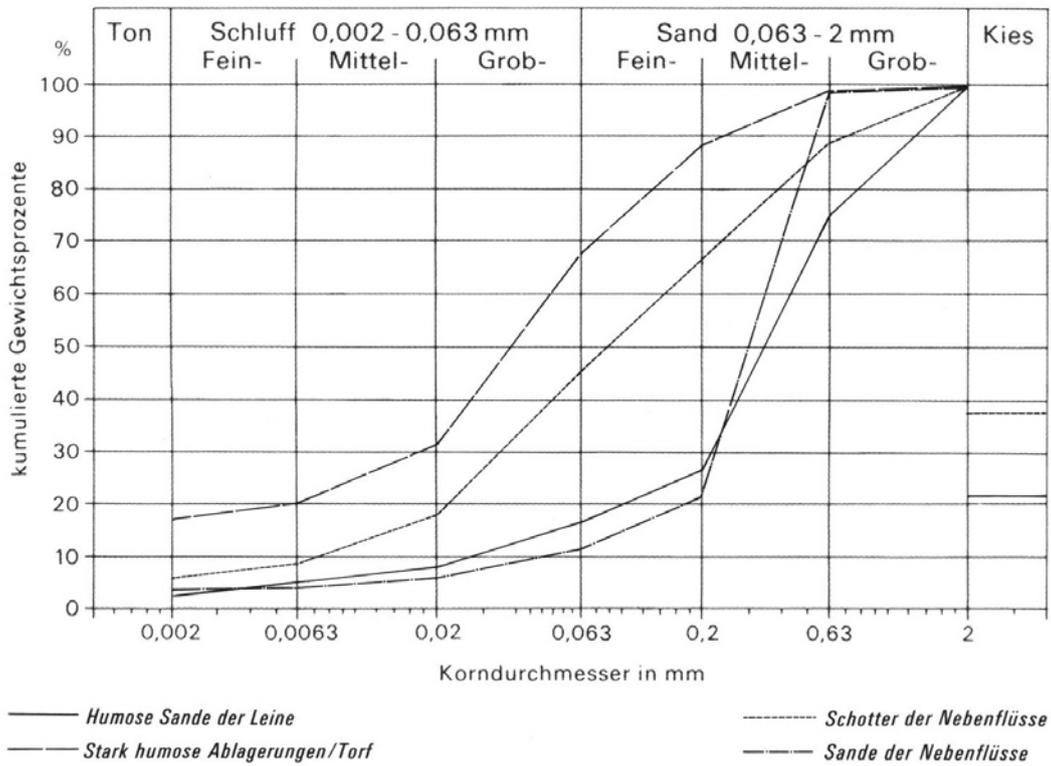


Abb. 5.11 **Korngrößensummenkurven der Schotter und Sande an der Leine (PRETZSCH, 1994)**

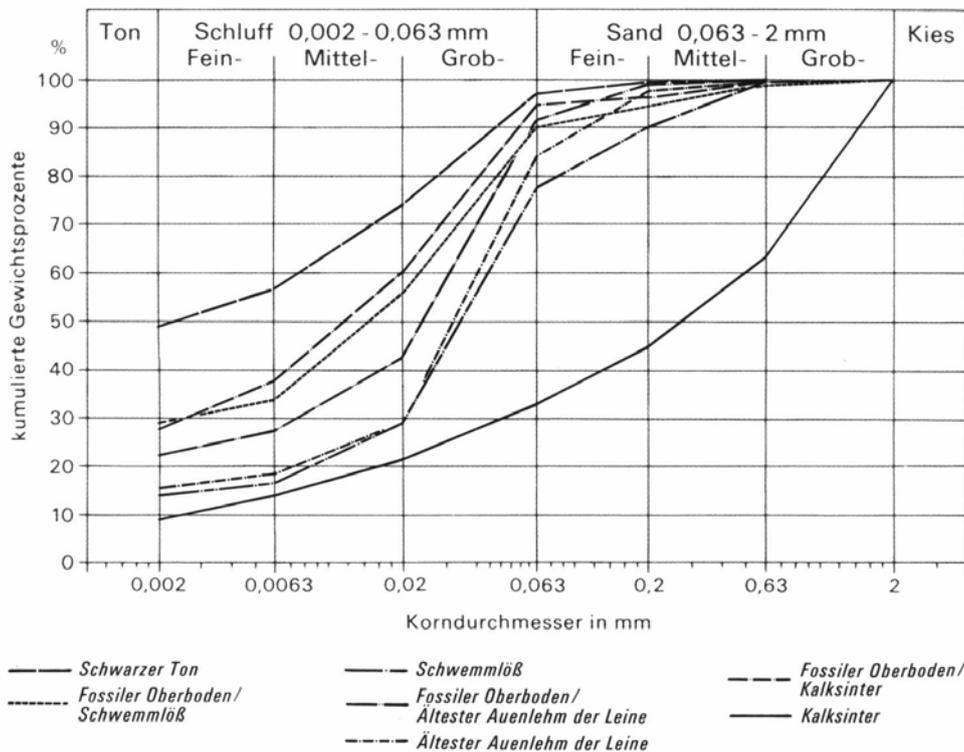
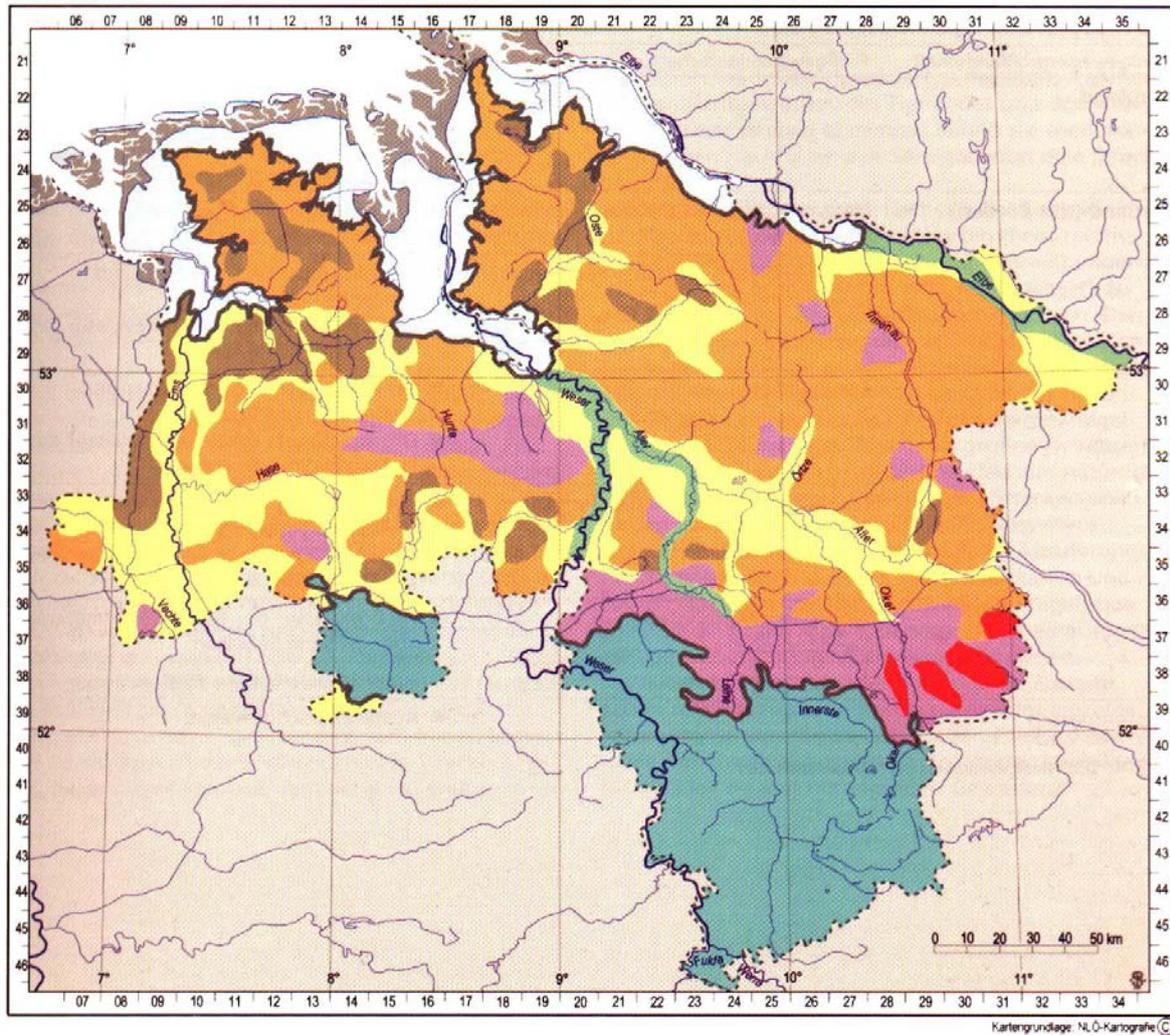


Abb. 5.12 **Unterschiedliche Korngrößensummenkurven an der Leine (PRETZSCH, 1994)**

Die Fließgewässerlandschaft Tiefland (mit Börden) ist im Wesentlichen durch eiszeitliche Ablagerungen geprägt, Verwitterungsgesteine des Festgesteins kommen nur kleinräumig vor (RASPER, 2001). Im Bereich der Börden durchfließt die Leine Löss- und Tongebiete des Tieflandes. Bei Eintritt der Leine in das Weser-Aller-Flachland herrschen große Feinmaterialauen in Sandgebieten vor. Dies setzt sich über die Aller bis zur Weser fort (Abb. 5.13).



- Tiefland (mit Börden)
- Verwitterungsgebiete des Tieflandes (mit Börden)
- Geschiebelehm- und Schmelzwasserablagerungsgebiete
- Sandgebiete
- Löss- und Tongebiete des Tieflandes (mit Börden)
- Große Feinmaterialauen in Sandgebieten
- Hochmoorgebiete
- Küstenmarsch
- Bergland

**Abb. 5.13 Fließgewässerlandschaften im niedersächsischen Tiefland (mit Börden) (RASPER, 2001)**

## 5.2 LEITBILD / GEWÄSSERSCHUTZZIEL

1989 wurde das Konzept des Niedersächsischen Fließgewässerschutzsystems erstmals veröffentlicht. Folgende Hauptziele werden mit dem Fließgewässerschutzsystem verfolgt (DAHL ET AL., 1989):

- Repräsentation sämtlicher in der betreffenden Region vorkommenden Fließgewässertypen
- Sicherung des unter naturnahen Bedingungen gegebenen Spektrums an Arten und Lebensgemeinschaften in und an Fließgewässern
- Bildung eines durchgängigen Netzes naturnaher Fließgewässer, zwischen denen der erforderliche biotische Austausch möglich ist
- Vorhalten von ökologisch weitgehend intakten Zellen innerhalb des Fließgewässernetzes der betreffenden Region, von denen eine Neubesiedlung anderer Bäche und Flüsse ausgehen kann, sobald sich die Lebensbedingungen dort verbessert haben

Bei der Auswahl von Gewässern, die besondere Beachtung in diesem Konzept finden sollen, werden die verschiedenen Gewässertypen, die Vernetzung der Fließgewässer und ihre Besiedlungsgeschichte berücksichtigt (RASPER ET AL., 1991).

Darin haben die Bever als Nebengewässer und die Ilme als Hauptgewässer „1. Priorität“. Sie wurden aus der naturräumlichen Region ausgewählt, weil sie repräsentativ für den Naturraum sind und gute Voraussetzungen für eine Renaturierung aufweisen. Die Anforderungen an die Hauptgewässer „1. Priorität“ sind besonders hoch (DAHL ET AL., 1989):

- Erhalt bzw. Wiederherstellung der unter naturnahen Bedingungen zu erwartenden Wasserqualität, das bedeutet: Anhebung der Gewässergüteklasse auf II bzw. I - II (bis I) je nach „naturnaher“ Gewässergüteklasse
- Vermeidung von (unnatürlichen) Belastungen der Wasserqualität, z. B. mit Chlorid, Schwermetallen und Abwärme
- Erhalt bzw. Wiederherstellung einer naturnahen Gewässerbettstruktur (naturnahe Längs- und Querprofile)
- Erhalt bzw. weitgehende Wiederherstellung einer naturnahen Aue (naturnahe Überschwemmungsgebiete in Bezug auf Größe und Nutzung)

Die Leine und Aller sind in diesem Konzept als Verbindungsgewässer gekennzeichnet. Diese erschließen mehrere naturräumliche Regionen. Durch sie soll die Durchgängigkeit vom Meer bis zu den Quellläufen sowie die Verbindung aller nachgeordneten Fließgewässer miteinander hergestellt werden (NLÖ, 1995). An Verbindungsgewässern werden folgende Anforderungen gestellt (DAHL ET AL., 1989):

- Verbesserung der Wasserqualität auf Gewässergüteklasse II, max. II – III in den Unterläufen
- Reduzierung von (unnatürlichen) Belastungen, z. B. durch Chlorid, Schwermetalle und Abwärme auf ein zu definierendes ökosystemverträgliches Maß
- Wiederherstellung der Durchgängigkeit für wandernde Arten durch sukzessiven Abbau oder entsprechenden Umbau von Querverbauungen (Wehre, Sohlabstürze, etc.)
- Erhalt aller noch vorhandenen naturnahen Gewässerabschnitte einschließlich naturnaher Auebereiche
- wo immer möglich, Verbesserung der Biotopqualität von Fließgewässer und Aue
- Berücksichtigung ihrer ökologischen Funktionen bei allen Nutzungsaktivitäten in und an den Gewässern

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie fordert die Erreichung bzw. Erhaltung eines „guten Zustands“ der Gewässer. Bis zum Ende des Jahres 2004 wurde die Bestandsaufnahme abgeschlossen. Nun sollen Strategien und Maßnahmenkonzepte entwickelt werden, um den guten Zustand der Gewässer zu erreichen bzw. zu erhalten. Das Konzept des Fließgewässerschutzsystems wird dabei mit seinen an die Naturregionen angepassten Ansätzen in Niedersachsen aufgegriffen und entsprechend angepasst.

Für die kleinen bis mittelgroßen Gewässer (1 m bis 5 m bzw. 5 m bis 10 m Breite) wurde, in Abstimmung mit dem Detailverfahren zur Strukturgütekartierung (NLÖ, 2001a), eine morphologische Typisierung zur Festlegung des Leitbildes in Niedersachsen vorgenommen. So gibt es Referenzgewässer für die Bever und Ilme (Tab. 5.3). Für große Gewässer (>10 m Breite) ist das Leitbild jeweils spezifisch festzulegen (RASPER, 2001).

Die Bever als typischer Mittelgebirgsbach des Weser-Leineberglandes entwickelt sich vom Kerbtalbach im Quellbereich über einen Muldentalbach zum Sohlen-Auentalbach im Unterlauf. Die Ilme ist im Unterlauf ebenfalls den Sohlen-Auentalgewässern zuzuordnen. Die Tab. 5.4 gibt einen Überblick über die Ausprägung der morphologischen Parameter der zuvor genannten Subtypen, die im Untersuchungsgebiet vorkommen.

**Tab. 5.3 Referenzgewässer für die untersuchten Abschnitte der Bever und Ilme  
(nach RASPER (2001))**

<b>Gewässer (Abschnitt)</b>	<b>Referenzgewässer</b>
Bever (Quellbäche)	Blutbach (Weser-Leinebergland)
Bever (Oberlauf)	Schlochterbach (Osnabrücker Hügelland) Kalte Beuster (Süd-niedersachsen)
Bever (Mittel- und Unterlauf)	Nette (Süd-niedersachsen)
Ilme (Unterlauf)	Düte (Osnabrücker Hügelland) Nette (Süd-niedersachsen)

Zur Einschätzung des natürlichen Zustands der größeren Gewässer (Aller und Leine) können historische Karten, die oftmals militärischen Zwecken dienen, herangezogen werden. Vor allem der Gewässerverlauf mit seinen Mäandern und Krümmungen ist auf diesen gut zu erkennen. Die Genauigkeit der Karten sollte dabei jedoch kritisch beleuchtet werden.

So gibt es eine Sammlung historischer Karten im Hauptstaatsarchiv in Hannover. Die ältesten dort einsehbaren Karten stammen aus den Jahren 1750 bis 1790. Weiterhin liegen historische Karten beim Landesbetrieb ‚Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen‘ (LGN) vor. Das der LGN vorliegende Kartenwerk zeigt eine Aufnahme Nordwestdeutschlands zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Veranlasst wurde die Aufnahme vom preußischen Generalmajor Von Lecoq, nach dem die Karten benannt wurden. Das LGN hält zudem die aktuellen Karten Niedersachsens in digitaler Form vor (M 1:5.000 bzw. M 1:25.000).

Aus den historischen Karten wurde der Windungsgrad der zu untersuchenden Gewässerabschnitte ermittelt. Er ist der Tab. 5.5 zu entnehmen. Die Formel zur Ermittlung des Windungsgrades nach SCHERLE (1999) (abweichend von MANGELSDORF ET AL., 1980, Kapitel 2.1.1) lautet:

$$W = I_F / I_T$$

mit:  $W$  Windungsgrad [-]

$I_F$  Flusslänge [km]

$I_T$  Tallänge [km]

Es ergeben sich Windungsgrade von 1,27 bis 1,95. Die Laufformen reichen von unregelmäßig geschwungen bis gewunden. Während die Einstufung in „gewunden“ und „unregelmäßig geschwungen“ nur in einigen Abschnitten heute und im 18. Jahrhundert voneinander abweichen, so ist doch zu erkennen, dass der Windungsgrad in den letzten zwei Jahrhunderten mit einer Ausnahme in allen Abschnitten reduziert wurde.

**Tab. 5.4 Ausprägung morphologischer Parameter der Leitbilder im Untersuchungsgebiet (nach RASPER, 2001)**

\* Die Angaben „viele, mehrere, ...“ beziehen sich jeweils auf die 100 m Abschnitte der Detailkartierung (nach NLÖa, 2001)

Parameter	Ausprägung		
	Kerbtalbach	Muldentalbach	Sohlen-Auentalgewässer
Laufentwicklung	gestreckt bis geschwungen, abhängig vom Talverlauf	mäandrierend bis stark geschwungen	mäandrierend, Schotterfluss: stark geschwungen
	keine	vereinzelt schwach	keine bis häufig schwach
Längsprofil	viele Ufer-, Krümmungs- und Inselbänke	viele Ufer-, Krümmungs- und Inselbänke	kleine Gewässer: viele Ufer-, Krümmungs- und Inselbänke mittelgroße Gewässer: mehrere bis viele Ufer-, Krümmungs- und Inselbänke
	viele: Treibholzsammlung, Sturzbaum, Laufverengung	viele: Treibholzsammlung, Sturzbaum, Laufverengung	kleine Gewässer: viele Strukturen; mittelgroße Gewässer: mehrere bis viele Strukturen: Treibholzsammlung, Sturzbaum, Inselbänke, Laufverengung
Querprofil	viele	viele: flache Bänke und tiefe Furten	kleine Gewässer: viele, mittelgroße Gewässer: mehrere bis viele: flache Bänke und Furten
	sehr groß	sehr groß	sehr groß
Querprofil	groß bis sehr groß	sehr groß	groß bis sehr groß
	vielfältiges Naturprofil, unmittelbar in die Talhänge übergehend	vielfältiges Naturprofil mit Prall- und Gleitferrn	vielfältiges Naturprofil, Prall- und Gleitferrn ausgeprägt
Sohlenstruktur	flach bis sehr flach (1:6 bis > 1:10)	flach bis mäßig tief (1:4 bis 1:10), bei Gewässern mit tonigem Untergrund auch tief (1:3 bis 1:4)	mäßig tief bis flach (1:4 bis 1:10); im Löss auch tief (1:3 bis 1:4), Schotterfluss: sehr flach (> 1:10)
	keine bis schwach	keine bis schwach	keine bis schwach
Sohlenstruktur	keine bis mäßig aufgrund der Talform	sehr groß bis mäßig	groß bis mäßig
	Steine, Schotter, Kies	Schotter, Kies, Löss / Lehm	Sand, Löss/Lehm, Kies; teilweise Schotter
Sohlenstruktur	Sand, Schlamm, Lehm, Fels	Steine, Ton, Sand, Schlamm	Steine, Schlamm
	sehr groß	sehr groß	sehr groß
Uferstruktur	viele: Rauschfläche, Schnelle, Stillwasserpool, durchströmter Pool, Kehrwasser, Flachwasser, Tiefrinne, Kolk, Totholz	viele: Rauschfläche, Schnelle, Stillwasserpool, durchströmter Pool, Kehrwasser, Flachwasser, Tiefrinne, Kolk, Totholz, Wurzelfläche	viele: Stillwasserpool, durchströmter Pool, Kehrwasser, Flachwasser, Kolk Tiefrinne, Totholz, Wurzelfläche
	Sohle stabil, Umlagerung bei Hochwasser	Sohle stabil, Umlagerung bei Hochwasser	Sohle stabil, Umlagerung bei Hochwasser
Uferstruktur	Gehölze des angrenzenden bodenständigen Waldes	Gehölze des angrenzenden bodenständigen Waldes	Gehölze des angrenzenden bodenständigen Waldes
	viele: Ufersporm (Blöcke), Prallbaum, Sturzbaum, Holzansammlung, Unterstand	viele: Prallbaum, Baumumlauf, Unterstand, Sturzbaum, Holzansammlung, Steilufer	viele: Prallbaum, Baumumlauf, Unterstand, Sturzbaum, Holzansammlung, Steilufer (v. a. im Löss)
Gewässerumfeld	bodenständiger Wald	bodenständiger Wald, teilweise Flufrinnen	bodenständiger Wald, teilweise Flufrinnen und Altarme
	- keine Aue -	regelmäßig bei höherem Hochwasser	regelmäßig bei höherem Hochwasser, längere Überflutungsdauer

Tab. 5.5 **Laufformeinstufung (nach SCHERLE (1999))**

Ab-schnitt	Fließ-gewässer	18. Jahrhundert				Heute			
		I <sub>F</sub>	I <sub>T</sub>	W	Laufform	I <sub>F</sub>	I <sub>T</sub>	W	Laufform
1	Bewer	15,0	9,0	1,67	gewunden	10,5	8,5	1,24	unregelmäßig ge-schwungen
2	Ilme	13,5	10,0	1,35	unregelmäßig ge-schwungen	14,0	11,0	1,27	unregelmäßig ge-schwungen
3	Leine	20,5	14,5	1,41	unregelmäßig ge-schwungen	18,5	16,0	1,16	unregelmäßig ge-schwungen
4	Leine	24,0	16,0	1,50	unregelmäßig ge-schwungen	19,0	16,0	1,19	unregelmäßig ge-schwungen
5	Leine	20,0	13,0	1,54	gewunden	14,0	12,0	1,17	unregelmäßig ge-schwungen
6	Leine	20,0	14,0	1,43	unregelmäßig ge-schwungen	21,0	16,0	1,31	unregelmäßig ge-schwungen
7	Leine	19,0	15,0	1,27	unregelmäßig ge-schwungen	19,0	15,0	1,27	unregelmäßig ge-schwungen
8	Leine	135,5	69,5	1,95	gewunden	93,5	58,0	1,61	gewunden
9	Aller	82,0	52,0	1,58	gewunden	63,5	44,0	1,44	unregelmäßig ge-schwungen

I<sub>F</sub>: Flusslänge in km; I<sub>T</sub>: Tallänge in km; W: Windungsgrad (W = I<sub>F</sub> / I<sub>T</sub>)

## 5.3 IST-ZUSTAND

### 5.3.1 Gewässerverlauf

Der Windungsgrad des heutigen Gewässerverlaufs ist aus den aktuellen Karten ermittelt worden. Die Einstufung der Lauform weicht kaum von der Einstufung mittels der Karten aus dem 18. Jahrhundert ab. Die Windungsgrade fallen jedoch geringer aus und reichen von 1,16 bis 1,61 (Tab. 5.5). Beim direkten Vergleich der aktuellen und historischen Karten fällt auf, dass vor allem im 18. Jahrhundert noch stark ausgeprägte Mäanderbögen heutzutage fehlen, wie die Abb. 5.14 verdeutlicht.

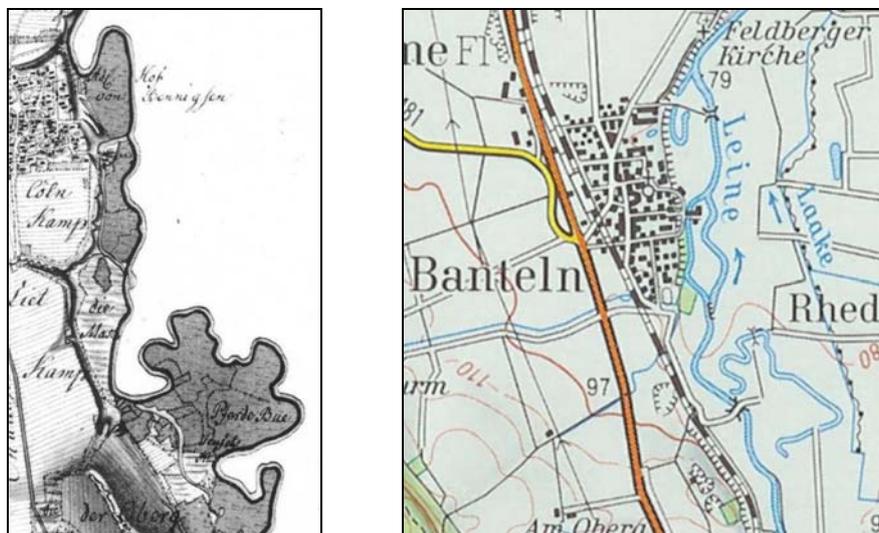


Abb. 5.14 *Leineverlauf östlich von Banteln (links: 1780; rechts: heute)*

Nördlich von Hannover sind mehrere Veränderungen auffällig, die auf Flussbegradigungsmaßnahmen zurückgeführt werden können. So gibt es im Vergleich weniger stark ausgeprägte Gewässerschleifen, die auch auf Durchbrüche von Mäanderschleifen hinweisen (Garbsen, Mariensee, Schwarmstedt), eine verschwundene Verzweigung (Garbsen) und eine geringere Ausprägung einer lang gezogenen Krümmung (Niedernstöcken).

An der Aller sind ebenfalls Veränderungen der Laufentwicklung festzustellen, die auf Flussbegradigungsmaßnahmen zurückgeführt werden können. So sind eine Verzweigung (Hülsen) und ein Altarm (Westen) verschwunden bzw. ein Teilstrom der Aller trocken gefallen und zu einem Altarm geworden (Verden). Ferner sind Ausprägungen von lang gezogenen Krümmungen heutzutage geringer (Eitze, Mündungsbe-  
reich).

Der Vergleich der historischen mit den aktuellen Karten der Gewässerverläufe vor allem von Leine und Aller zeigt einige Veränderungen, die auf Begradigungen zurückzuführen sind, der heutige Verlauf ist jedoch auf weiten Strecken dem damaligen Verlauf ähnlich. Es kann zwar davon ausgegangen werden, dass bereits zur Zeit der Erstellung der historischen Karten einige Maßnahmen zur Stabilisierung der Flussläufe vorgenommen wurden, diese aber bei den großen Flüssen und Strömen keinen allzu großen Einfluss auf deren Verlauf hatten.

### **5.3.2 Gewässergüte**

Der Gewässergütebericht 2000 des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (NLÖ, 2001b) gibt Aufschluss darüber, wie die Gewässer aufgrund der Wasserqualität und ihrer Gewässerstrukturgüte einzustufen sind.

Das Quellgebiet der Bever, welches im Wald liegt, wird dabei als gering belastet (Güteklasse I – II) eingestuft. Nach Erreichen der Siedlungsgebiete an der Bever ist sie der Güteklasse II (mäßig belastet) zugeordnet. Im weiteren Verlauf der Ilme und Leine wird diese Gewässergüteklasse weitgehend bis Hannover beibehalten. Unterhalb Hannovers wird die Leine in die Güteklasse III (stark verschmutzt) eingestuft. Hier wurden nach Starkniederschlagsereignissen im Großraum Hannover mehrere massive Fischsterben beobachtet. Dem hohen Abwasseranteil am Abfluss entsprechend, fanden sich erhöhte Gehalte an Phosphor und Stickstoff (NLÖ, 2001b). Nach Zufluss mehrerer kleiner Nebengewässer und der Westaue verbessert sich die Gewässergüte etwas auf II – III (kritisch belastet). Im weiteren Verlauf der Leine und der Aller ändert sich die Gewässergüteklasse dann nicht mehr und bleibt bei II – III.

### **5.3.3 Gewässerstrukturgüte**

Besonders ausgewiesen im Gewässergütebericht 2000 des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie ist die Gewässerstrukturgüte. Sie bewertet die ökologische Funktion der Gewässer anhand des potenziell natürlichen Gewässerzustandes. Der Begriff „Gewässerstruktur“ beinhaltet alle hydraulisch, gewässermorphologisch und hydrobiologisch wirksamen Faktoren, soweit sie für die ökologischen Funktionen des Gewässers und der Aue von Bedeutung sind (LAWA, 2000). Anzustreben ist die Gewässerstrukturgüteklasse 2 (gering verändert).

Die Gewässerstrukturgüte sieht im Bereich des Untersuchungsgebietes bei Weitem nicht so gut aus, wie die zuvor erläuterte Gewässergüte es vermuten lässt. Bereits die Bever weist Bereiche auf, die lediglich der Strukturgüteklasse 5 (stark veränderte Gewässerabschnitte) bzw. 4 (deutlich veränderte Gewässerabschnitte) zuzuordnen sind. Im besten Falle konnte die Strukturgüteklasse 3 (mäßig veränderte Gewässerabschnitte) vergeben werden. Die Ilme im Bereich der Stadt Einbeck konnte nur in

die Klasse 6 (sehr stark veränderte Gewässerabschnitte) oder sogar der Klasse 7 (vollständig veränderte Gewässerabschnitte) eingestuft werden. Die beste Einstufung im betrachteten Bereich der Ilme lag in der Klasse 3.

Nach Einmündung der Ilme in die Leine bis zur Einmündung der Gande weist die Leine Strukturgüteklasse 2 (gering veränderte Gewässerabschnitte) bis 3 auf. Im weiteren Verlauf der Leine bis Hannover wurde sie vorwiegend in die Güteklassen 3 bis 5 eingestuft. Nur in einigen Bereichen musste die Strukturgüteklasse 6 vergeben werden. In der Stadt Hannover liegt die Strukturgüte bei 6 und 7. Unterhalb Hannovers hat die Leine überwiegend die Strukturgüteklasse 4. Einzelne Teilstücke konnten der Klasse 3 bzw. 5 und 6 zugeordnet werden.

Die Aller von der Leinemündung bis zur Weser ist auf weiten Strecken der Strukturgüteklasse 5 zugeordnet. Teilweise mussten die schlechteren Klassen 6 und 7 vergeben werden. An wenigen kurzen Teilstücken am betrachteten Allerabschnitt konnte jedoch auch die Klasse 4 vergeben werden.

## **5.4 ENTWICKLUNGSZIELE**

Die bei Renaturierungsmaßnahmen anzustrebenden Entwicklungsziele werden zu meist durch eine Veränderung der Bewuchssituation entlang des Gewässers einschließlich der Aue sowie einer Anpassung des Gewässerverlaufs an seine ursprüngliche Form erreicht. In diesem Kapitel werden nun Änderungen bezüglich des Bewuchses und Gewässerverlaufes aufgrund der zuvor genannten Leitbilder und Gewässerschutzziele für die zu untersuchenden Gewässer definiert. Diese gehen sodann in die Simulationsvarianten des Kapitels 8 ein.

### **Gehölzbewuchs**

Bezüglich des Bewuchses sind mehrere Entwicklungsstufen denkbar. Als höchst entwickeltste Form, welche die längste Zeit zur Entwicklung benötigt, kann ein klassischer Auwald angesehen werden. Dieser soll aus bodenständigen Bäumen bestehen. In den Auen des Untersuchungsgebietes kommt hierfür vornehmlich die Erle (Schwarzerle) in Betracht. Diese erreicht Höhen von 20 bis 30 m, einen Stammdurchmesser von bis zu 50 cm, wächst geradlinig und weist kaum Verästelungen am unteren Stamm auf. Ein typischer Auwald ist in der Abb. 5.15 und Abb. 5.17 zu sehen.

Auen wird eine besondere Bedeutung bei der Biotopvernetzung zugesprochen. Besonderen Ausdruck findet dies in der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie). Hier heißt es im Artikel 10 der Richtlinie, dass „... Landschaftselemente, die aufgrund

ihrer linearen, fortlaufenden Struktur (z. B. Flüsse mit ihren Ufern oder herkömmlichen Feldrainen) oder ihrer Vernetzungsstruktur (z. B. Teiche oder Gehölze) für ihre Wanderung, die geographische Verbreitung und den genetischen Austausch wildlebender Arten wesentlich sind“.

Aus diesem Ansatz heraus ist eine extensiv genutzte Aue mit einem mit buschigem Gehölz bewachsenen Uferstreifen, sowie Bewuchsbeständen als Inseln auf dem Vorland ein erstrebenswerter Zustand. Die Abb. 5.16 zeigt, wie Bewuchs entlang eines Gewässers aussehen kann.

Wird die Aue sich selbst überlassen, entwickeln sich recht schnell verbuschende Bereiche. Die Weiden gehören hierbei zu den ersten Pionieren. Weiden weisen eine ungewöhnliche Artenvielfalt auf. Sie kommen als mächtige Bäume des Auwaldes und als Sträucher verschiedener Größe vor. So wie die oben erwähnte Erle, kommt die Weide mit Schwankungen des Wasserspiegels gut zurecht.

Als weiterer möglicher Bewuchszustand nach einer Renaturierung wird deshalb ein völlig mit Bewuchs besetztes Vorland ähnlich der Abb. 5.17 betrachtet. Dabei besteht das Unterholz aus dünnen Ästen mit geringem Abstand zueinander.



Abb. 5.15 *lichter Auwald (NLÖ, 2001a)*



**Abb. 5.16** *Uferbewuchs*



**Abb. 5.17** *Unterholz einer Aue (RASPER, 2001)*

## Gewässerverlauf

Typisch für die zu untersuchenden Gewässer ist ein unregelmäßig geschwungener bis gewundener Verlauf (Kapitel 5.2).

Der Windungsgrad für die Gewässer Bever, Ilme, Leine und Aller konnte historischen Karten aus dem 18. Jahrhundert entnommen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der damalige Windungsgrad vom Menschen weitgehend unbeeinflusst war. Die ersten vereinzelt Korrekturen erfolgten an der Weser ab etwa 1840. Ende des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts wurde dann die systematische Regulierung der Weser für die Schifffahrt vorgenommen. Es folgten weitere Ausbaumaßnahmen auch an den kleineren Gewässern wie der Aller und Leine.

Die Tab. 5.6 gibt einen Überblick der aus den historischen Karten ermittelten Windungsgrade der zu untersuchenden Gewässer. Dem gegenüber gestellt sind die heutigen Windungsgrade. Die Ermittlung des Windungsgrades erfolgte nach der Formel von MANGELSDORF ET AL. (1980) (Kapitel 2.1.1).

Die in Tab. 5.6 aufgeführten Windungsgrade sind Grundlage der Simulationen der Varianten 5 und 6, welche im Kapitel 8 behandelt werden.

**Tab. 5.6** *Windungsgrade der zu untersuchenden Gewässer ermittelt aus historischen und aktuellen Karten*

Gewässer	Abschnitt	Windungsgrad (1780) [%]	Windungsgrad (heute) [%]
Bever	Mittel- und Unterlauf	67*	24
Ilme	Bewerzufluss bis zur Mündung	35	27
Leine	Ilmezufluss bis Freden	41	16
	Freden bis Brüggen	50	19
	Brüggen bis Burgstemmen	54	17
	Burgstemmen bis Gleidingen	43	31
	Gleidingen bis Hannover Leineschloss	27	27
	Hannover Leineschloss bis Mündung	95	61
Aller	Leinezufluss bis Mündung	58	44

\* Durch den großen Maßstab der vorliegenden historischen Karte konnte lediglich eine grobe Abschätzung vorgenommen werden.

## **6 AUSWERTUNG VON STUDIEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET**

Dieses Kapitel umfasst Untersuchungen und ihre Ergebnisse, die im betrachteten Untersuchungsgebiet vorgenommen wurden und für die Ableitung von „Grundsätzen“ zur Berücksichtigung bei Renaturierungsmaßnahmen bezüglich des Hochwasserschutzes relevant sind.

### **6.1 UNTERSUCHUNGEN ZU NATURNAHEN MAßNAHMEN IM LEINEEINZUGSGEBIET**

Mitte der 90iger Jahre wurden am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover eine Reihe von Untersuchungen zu naturnahen Maßnahmen im Leineeinzugsgebiet durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die „Verbesserung der naturraumtypischen Fließgewässer- und Auenentwicklung im Leineeinzugsgebiet“ unter den damaligen herrschenden und in der Zukunft zu erwartenden bzw. zu planenden Randbedingungen (LECHER ET AL., 1996a, LECHER, 1997, LECHER ET AL. 1997). Die für diese Arbeit relevanten Ergebnisse der Mitte der 90iger Jahre durchgeführten Untersuchungen werden im Folgenden zusammengefasst wiedergegeben.

#### **6.1.1 Untersuchungsabschnitt Elze bis Sarstedt**

Der Untersuchungsabschnitt Elze bis Sarstedt liegt an der Leine südlich von Hannover zwischen den benannten Orten Elze und Sarstedt (Abb. 5.3). In diesem Abschnitt wurden mehrere Systemzustände bezüglich Bewuchs entlang der Ufer der Leine untersucht. Die Tab. 6.1 gibt einen Überblick der untersuchten Systemzustände. Der so genannte Systemzustand S0 spiegelt den Ist-Zustand zur Zeit der Untersuchung wider. Die Systemzustände S1 bis S3 berücksichtigen Gehölze auf der Böschung. Die weiteren betrachteten Systemzustände S4 bis S6 zeigen Varianten von 15 m breiten Gewässerrandstreifen mit 10 m Gehölzsaum.

Bei den Zuständen mit Ufergehölz, bei denen der freie Abflussquerschnitt durch seitlichen Bewuchs verengt ist, wurde die Abnahme des bordvollen Abflusses bestimmt. Als Folge eines abnehmenden bordvollen Abflusses kommt es zu häufigeren Ausuferungen. Die Systemzustände S4 bis S6 sollten zeigen, inwieweit es zu Wasserstandserhöhungen im Hochwasserfall kommt. Dabei wurde ein Hochwasser mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von ca. 35 Jahren angesetzt.

Tab. 6.1 **Überblick der untersuchten Systemzustände an der Leine zwischen Elze und Sarstedt (LECHER ET AL., 1997)**

Kurzbezeichnung	Beschreibung des Zustandes	Abfluss		
		MQ	Q <sub>b</sub>	HQ
S0	Vorhandener Zustand (Ist-Zustand)	X	X	X
S1	Gehölze auf linker Böschung		X	
S2	Gehölze auf rechter Böschung		X	
S3	Gehölze auf linker und rechter Böschung		X	
S4	15 m Gewässerrandstreifen mit 10 m breitem Gehölzsaum auf der linken Seite			X
S5	15 m Gewässerrandstreifen mit 10 m breitem Gehölzsaum auf der rechten Seite			X
S6	15 m Gewässerrandstreifen mit 10 m breitem Gehölzsaum auf beiden Seiten			X

Die Untersuchungsstrecke an der Leine wurde in 10 Abschnitte unterteilt, wobei der Abschnitt 1 später aus der Untersuchung heraus fiel. Die Lage der Untersuchungsabschnitte kann der Anlage 3 entnommen werden. Dabei handelt es sich bei den Gewässerabschnitten IV und V um ausgebaute Gewässerstrecken.

Für die Systemzustände S0 bis S3 ergeben sich die in der folgenden Tab. 6.2 aufgeführten bordvollen Abflüsse. Im Systemzustand S1 (linksseitiger Böschungsbewuchs) werden in fast allen Gewässerabschnitten die bordvollen Abflüsse zwischen 3 % und 10 % im Vergleich zum Ist-Zustand (S0) reduziert. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt VII. Hier reduziert sich der bordvolle Abfluss um 25 %. Beim rechtsseitigen Böschungsbewuchs (Systemzustand S2) verringern sich die bordvollen Abflüsse allgemein um 5 % bis 17 % und im Abschnitt VII um 26 %. Bei beidseitigem Uferbewuchs (Systemzustand S3) verkleinern sich die bordvollen Abflüsse um 7 % bis 30 %. Im Abschnitt VII ergibt sich eine Abminderung um 42 %. Die stärkeren Reduzierungen beim bordvollen Abfluss im Abschnitt VII ergeben sich durch relativ flache Böschungsneigungen.

Tab. 6.2 **Änderung des bordvollen Abflussvermögens in den Gewässerabschnitten 2 bis 10 (LECHER ET AL., 1997)**

Untersuchungsbe- reich	Gewässer- abschnitt	$Q_{\text{bordvoll}}$ [m <sup>3</sup> /s] S0	$Q_{\text{bordvoll}}$ [m <sup>3</sup> /s] S1	$Q_{\text{bordvoll}}$ [m <sup>3</sup> /s] S2	$Q_{\text{bordvoll}}$ [m <sup>3</sup> /s] S3
1	II	90	81	83	67
	III	145	138	121	102
	IV	129	119	121	102
2	V	135	128*	128*	120*
	VI	130	126	112	101
	VII	114	86	84	66
	VIII	93	88	87	81
	IX	70	65	65	58
	X	69	65	65	64

\* Trennfläche an der Mittelwasserlinie, sonst Trennfläche ca. 1,0 bis 1,5 m von der Mittelwasserlinie entfernt

Zur Ermittlung von Wasserstandsdifferenzen der Systemzustände S1 bis S3 gegenüber dem Ist-Zustand (S0) wurden die in den Systemzuständen S1 bis S3 ermittelten bordvollen Abflüsse ebenfalls im Ist-Zustand simuliert. Es ergaben sich die in Tab. 6.3 aufgeführten maximalen Wasserstandsdifferenzen.

Mit linksseitigem Uferbewuchs (Systemzustand S1) ist eine maximale Wasserstandsdifferenz von 40 cm im Abschnitt III zu verzeichnen. Mit rechtsseitigem Uferbewuchs stellt sich in diesem Abschnitt eine maximale Differenz von 64 cm ein, welche ebenfalls die höchste der untersuchten Abschnitte ist. Im Systemzustand S3 mit beidseitigem Uferbewuchs wird eine Maximaldifferenz von 66 cm im Abschnitt VII erreicht. Generell sind die höchsten Wasserstandsanhörungen in den Abschnitten II, III, IV und VII zu verzeichnen.

In den zuvor genannten Abschnitten sind die Uferböschungen verhältnismäßig flach. Daraus kann gefolgert werden, dass der Einfluss von Böschungsbewuchs bei flachen Böschungen größer ist als bei steilen.

Tab. 6.3 *Maximale Wasserstandsdifferenzen der Systemzustände S1 bis S3 zum Ist-Zustand S0 in den Untersuchungsabschnitten (LECHER ET AL., 1997)*

Untersuchungs- bereich	Gewässer- abschnitt	S1 – S0		S2 – S0		S3 – S0	
		Q	Δh	Q	Δh	Q	Δh
		[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]
1	II	81	34	83	36	67	51
	III	138	<b>40</b>	121	<b>64</b>	102	65
	IV	119	14	119	13	114	60
2	V	128	8	128	8	120	17
	VI	126	13	112	32	101	48
	VII	86	34	84	56	66	<b>66</b>
	VIII	88	13	87	15	81	24
	IX	65	17	65	15	58	34
	X	65	10	65	24	64	42

In Tab. 6.4 werden die maximalen Wasserstandsdifferenzen der Systemzustände S4 bis S6 gegenüber dem Ist-Zustand S0 aufgelistet. Der angenommene Hochwasserabfluss entspricht in etwa einem HQ35.

Es ist auffällig, dass zusätzliche Gewässerrandstreifen mit Gehölzbewuchs kaum Erhöhungen des Wasserstandes hervorrufen. Dafür werden unterschiedliche Gründe genannt. In den Abschnitten IV und V liegen breite Ausbauquerschnitte vor, dessen Hauptabflussbereich das Hochwasser nahezu unbeeinflusst neben den Gewässerrandstreifen abführt. In den Bereichen VII und VIII sind kaum Veränderungen wahrzunehmen, da bereits im Ist-Zustand in vielen gewässernahen Bereichen Gehölzbewuchs vorhanden ist.

Die relativ geringen Wasserstandsdifferenzen in den Abschnitten II und III werden auf vergleichsweise schmale Hauptquerschnitte zurückgeführt. Die Gehölzsäume verringern dabei die Fließgeschwindigkeit im abflusswirksamen Bereich des Hochwassers und führen so zu leichten Wasserstandsanhebungen. Hier liegt die Maximaldifferenz bei 14 cm bei beidseitigen Uferrandstreifen (Systemzustand S6). Die größten Wasserstandsunterschiede wurden am Ende des Abschnittes IX bzw. am

Beginn des Abschnittes X registriert. Hier liegt die Maximaldifferenz bei 21 cm für den Systemzustand S6 (beidseitiger Uferrandstreifen).

Tab. 6.4 *Maximale Wasserstandsdifferenzen der Systemzustände S4 bis S6 zum Ist-Zustand S0 in den Untersuchungsabschnitten*

Untersuchungsbereich	Gewässerabschnitt	S4 – S0		S5 – S0		S6 – S0	
		Q	Δh	Q	Δh	Q	Δh
		[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]
1	II	220	7	220	10	220	14
	III	300	<b>10</b>	300	<b>10</b>	300	10
	IV	200	0	200	0	200	0
2	V	208	0	208	0	208	2
	VI	130	1	130	0	130	0
	VII	205	0	205	0	205	0
	VIII	205	0	205	0	205	0
	IX	205	0	205	4	205	<b>21</b>
	X	205	0	205	9	205	<b>21</b>

### 6.1.2 Untersuchungsabschnitt Bewer

Für die Bewer wurden 1996 am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau an der Universität Hannover „Hydraulische Untersuchungen zur Ermittlung von naturnahen Maßnahmen im Bereich des gesetzlich festgestellten Überschwemmungsgebietes der Bewer und des Gewässers Bewer“ durchgeführt (LECHER ET AL., 1996a). Es wurden drei Abschnitte mit unterschiedlichen Fragestellungen untersucht. Im Folgenden wird die für diese Arbeit relevante Teiluntersuchung kurz vorgestellt.

Der Untersuchungsabschnitt liegt zwischen den Ortschaften Lüthorst und Deitersen (Abb. 5.2). Es wurden neben dem Ist-Zustand zwei Bewuchsalternativen simuliert. Die Alternative 1 repräsentiert einen Bepflanzungszustand, während die Alternative 2 einen Entwicklungszustand, der sich bei freier Sukzession ergeben würde, widerspiegelt.

Es wurden Uferrandstreifen simuliert, die in der Alternative 1 einen Gehölzbewuchs mit einem mittleren Stabdurchmesser von 0,1 m und in der Alternative 2 von 0,3 m aufweisen. Der mittlere Abstand sowohl in Fließrichtung als auch quer zur Fließrichtung betrug in beiden Alternativen 1 m.

Unter anderem wurde eine Auswertung vorgenommen, inwiefern der Wasserspiegel sich durch den Bewuchseinfluss hebt. Dabei wurde der im Ist-Zustand ermittelte bordvolle Abfluss in den Alternativen angesetzt. Zudem wurde ermittelt, um wie viel sich der bordvolle Abfluss in den Alternativen verringert. Die Ergebnisse dazu sind in der folgenden Tab. 6.5 zusammengefasst.

**Tab. 6.5 Ergebnisse zum bordvollen Abfluss aus der hydraulischen Untersuchung an der Bever (aus LECHER ET AL., 1996a)**

<b>Gewässer- abschnitt</b>	<b>Zustand</b>	<b>Bordvoller Abfluss</b>	<b>Wasserspiegel- differenz (Qb = Ist Zustand)</b>
		[m <sup>3</sup> /s]	[cm]
1	Ist-Zustand	5	-
1	Startpflanzung	4	15
1	Sukzession	4	15
2	Ist-Zustand	4	-
2	Startpflanzung	3,5	20
2	Sukzession	3,5	20

Der bordvolle Abfluss verringert sich von 5 m<sup>3</sup>/s im Ist-Zustand um 1,0 m<sup>3</sup>/s bis 1,5 m<sup>3</sup>/s in den Alternativen. Dadurch kann es, verursacht durch den Uferbewuchs, zu häufigeren Überschwemmungen kommen. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Wasserspiegel in den Alternativen beim gleichen bordvollen Abfluss wie im Ist-Zustand um 15 cm bis 20 cm höher liegt.

Die Ergebnisse an der Bever decken sich mit den Untersuchungsergebnissen an der Leine zwischen Elze und Sarstedt. In den Untersuchungen, die im Kapitel 8 vorgestellt werden, wird der Aspekt der Reduzierung des bordvollen Abflusses ebenfalls mit aufgenommen.

## **7 GEWÄSSERENTWICKLUNG**

### **7.1 EINLEITUNG**

Die Ausbildung des Gewässerprofils ist neben der Laufform und der Bewuchsanordnung entlang des Gewässers bei Renaturierungsmaßnahmen eine wichtige Fragestellung. Werden Vorprofilierungen als Maßnahme angedacht, so sollte die Profilform der natürlichen Form möglichst nahe kommen. Bei einer freien Gewässerentwicklung sollte abgeschätzt werden, welche Profilformen sich einstellen, um Planungen zum Beispiel in der Freizeitnutzung darauf abstimmen zu können.

Um die Regime-Theorie (Kapitel 2.2.3), welche ursprünglich dem Bau von Kanälen mit möglichst geringem Unterhaltungsaufwand diene, auf natürliche Gewässer anwenden zu können, wurden die Grundgleichungen erweitert (LEOPOLD U. MADDOCK, 1953, KELLERHALS, 1967, BLENCH, 1969). Hierdurch können Anhaltswerte für eine naturnahe Entwicklung der Gewässer gewonnen werden. Eine an die Regime-Theorie angelehnte Auswertung der Gewässerprofile im Untersuchungsgebiet wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Weiterhin bieten Klassifizierungen (Kapitel 2.1.2) von Gewässern Möglichkeiten, die natürliche Gestalt eines Gewässers einzuschätzen. An den hier zu untersuchenden Gewässern wird die Klassifizierung nach ROSGEN (1996), welche eine sehr differenzierte Typologie unter Einbeziehung des Sohlmaterials aufweist, vorgenommen.

Die Form und Größe der Gewässerprofile sind neben dem Gefälle entscheidend für den Abfluss, der im Gerinne, dem Hauptquerschnitt im Profil, ohne Ausuferungen abgeführt werden kann. So gibt es zum Beispiel auch naturgemäß hydraulisch günstige Querschnitte und eingetiefe Gewässer, bei denen Ausuferungen nur bei sehr seltenen Hochwasserereignissen vorkommen. Die Ausprägung der Vorländer weist auf ihre Inanspruchnahme bei Hochwasserereignissen hin.

### **7.2 AUSWERTUNGSMETHODE**

Um die Entwicklung der Gewässer mit ihren Auen von der Beverquelle bis zur Mündung der Aller in die Weser zu untersuchen, werden repräsentative Querprofile mit einem mittleren Abstand von einem Kilometer ausgewählt (Anlage 4 und 5). Ob ein Querprofil als „charakteristisch“ eingestuft werden kann, zeigt erst der Vergleich mit mehreren Profilen. Querprofile in stark anthropogen veränderten Gewässerabschnitten fließen nicht in die Untersuchung ein. Ganz auszuschließen sind anthropogene Einflüsse entlang der Gewässer mit ausgewählten Profilen jedoch nicht. Insge-

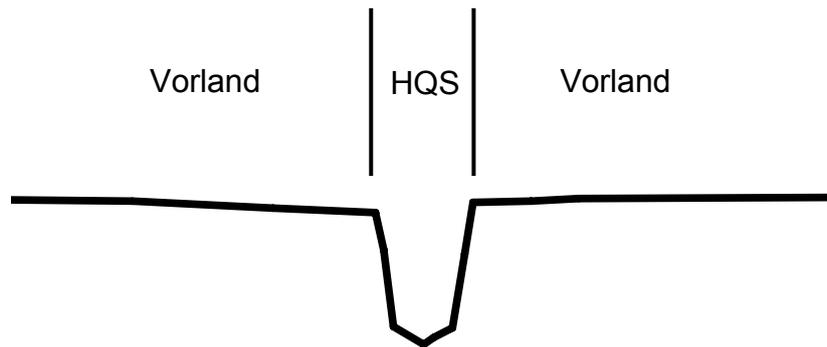
samt werden 183 Querprofile untersucht (Bewer 10, Ilme 12, Leine oberhalb Hannover 70, Leine unterhalb Hannover 65 und Aller 26).

Nach Auswahl der Querprofile ist es nötig einige der Profile zu erweitern, da nicht alle Profile bis zum Rand der Aue aufgemessen wurden. Das Vorland der Gewässer ist für diese Untersuchung jedoch von entscheidender Bedeutung. Die Verlängerung geschieht unter Zuhilfenahme des Digitalen Geländemodells (DGM), sofern vorhanden, oder unter Berücksichtigung der Höhenlinien der Deutschen Grundkarte.

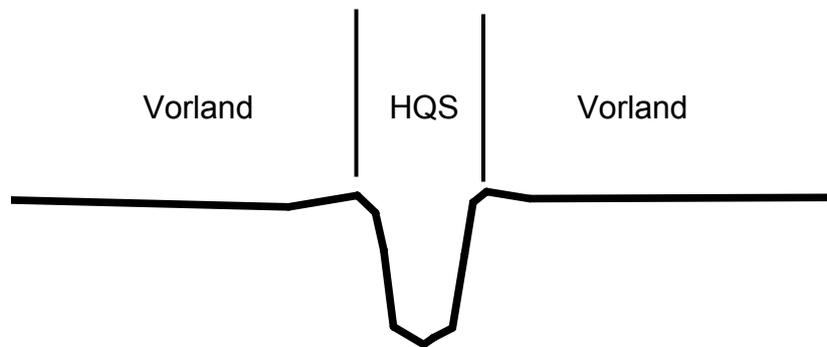
Für die Ermittlung der geometrischen Größen (Abb. 7.4) wurde als Hilfsmittel das Wasserspiegellagenprogramm WASPTOOLS (siehe Kapitel 4 und Anlage 2) verwendet. Mit dem Programm ist es möglich, sich charakteristische Merkmale wie Breite des Wasserspiegels, maximale Wassertiefe, etc. bei Berechnung der Abfluss ( $Q$ ) / Wasserstand ( $h$ ) -Beziehung ausgeben zu lassen. Jedes Profil wird hierbei für sich betrachtet. Eine Simulation über einen Abschnitt findet nicht statt.

Bei der Aufbereitung der Querprofile für die  $Q/h$ -Beziehung mit dem Programm muss die Gliederung des Querschnitts in Vorland und Hauptquerschnitt besonders sorgfältig erfolgen und sollte zur besseren Vergleichbarkeit von ein und derselben Person durchgeführt werden, da die Einteilung stark von subjektiven Eindrücken abhängt. Für die Profile im Untersuchungsgebiet gelten folgende Regeln bezüglich der Einteilung in Hauptquerschnitt und Vorland, die durch die Abb. 7.1 bis Abb. 7.3 verdeutlicht werden:

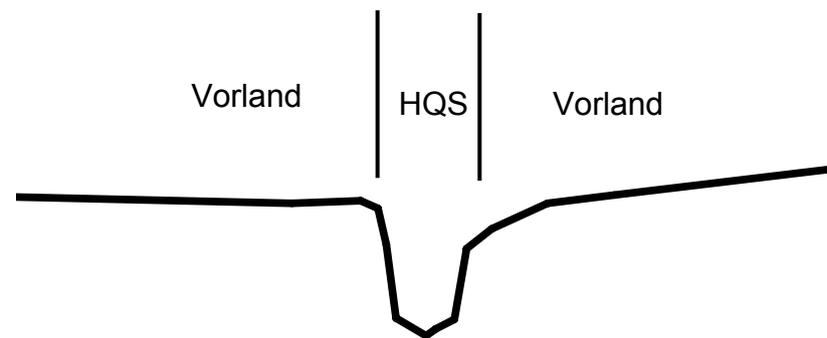
1. Bei einer markanten Gewässerböschung und angrenzendem flachen Vorland ist der Knickpunkt als Begrenzung zu wählen.
2. Bei vorhandener Uferrehne, ist der höchste Punkt als Rand des Hauptquerschnitts zu wählen.
3. Bei einem fließenden Übergang vom Gewässer ins Vorland sind die bei benachbarten Profilen anzutreffenden Breiten und Tiefen anzusetzen.



**Abb. 7.1** *Einteilung eines Querprofils in Hauptquerschnitt und Vorland bei einem Gewässerquerschnitt mit markanter Böschung (Skizze)*



**Abb. 7.2** *Einteilung eines Querprofils in Hauptquerschnitt und Vorland bei einem Gewässerquerschnitt mit Uferrehne (Skizze)*



**Abb. 7.3** *Einteilung eines Querprofils in Hauptquerschnitt und Vorland bei einem Gewässerquerschnitt mit fließendem Übergang (Skizze)*

Weiterhin wird eine Einteilung in Böschungs- und Sohlbereiche vorgenommen (siehe Anlage 2). Für die Ermittlung der geomorphologischen Charakteristika wird auf eine weitere Aufteilung in Bereiche mit und ohne Bewuchs zunächst verzichtet. Bereiche mit Bewuchs werden bei der Simulation von Teilabschnitten in verschiedenen Varianten berücksichtigt (Kapitel 8).

Für die Aufstellung der Q/h-Beziehung mit Hilfe von WASPTOOLS werden zudem Rauheitsbeiwerte je nach Berechnungsgrundlage sowie ein Energieliniengefälle benötigt. Das Energieliniengefälle kann bei offenen Gewässern mit strömendem Abfluss näherungsweise dem mittlerem Sohlgefälle gleichgesetzt werden.

Bei Wahl des Berechnungsansatzes nach MANNING-STRICKLER sind entsprechende Rauheitsbeiwerte ( $k_{St}$ ) anzugeben und bei der Berechnung nach dem Allgemeinem Fließgesetz die in die Gleichung eingehenden äquivalenten Sandrauheiten ( $k_S$ ). In dieser Untersuchung wird das Allgemeine Fließgesetz vorgezogen, da Bewuchseinflüsse mit diesem Ansatz besser erfasst werden können (Kapitel 2). Die Rauheitsansätze sind früheren Untersuchungen zur „Ableitung naturnaher Maßnahmen im Leineinzugsgebiet“ am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau sowie einer „Gewässerkundlichen Sonderuntersuchung über die Hochwasserabläufe im unteren Allertal von Hademsdorf bis Verden“ des INGENIEURDIENSTES NORD entnommen (IDN, 1984, LECHER ET AL., 1996a, LECHER ET AL., 1997, LECHER, 1997, LECHER ET. AL., 2000).

**Tab. 7.1 Zusammenfassung der äquivalenten Sandrauheiten ( $k_S$ ) an den Untersuchungsgewässern**

<b>Bereich</b>	<b>Bewer</b>	<b>Ilme</b>	<b>Leine Mittellauf</b>	<b>Leine Unterlauf</b>	<b>Aller</b>
HQS-Sohle	0,3	0,2	0,08	0,05	0,1
HQS-Böschung	0,4	0,3	0,15	0,15	0,2
Vorland-Sohle	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7
Vorland-Böschung	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7

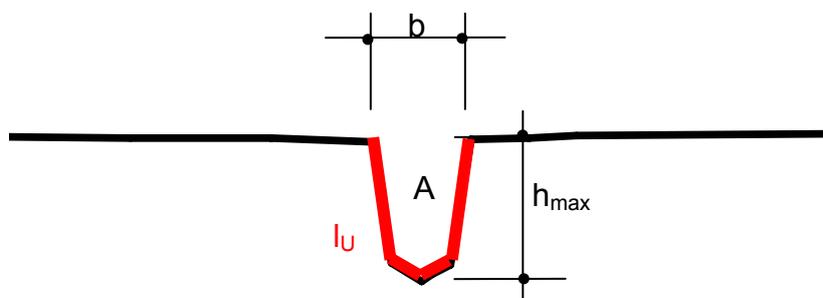
In dieser Untersuchung werden vier Abflusssituationen betrachtet. Der bordvolle Abfluss ist recht eindeutig zu bestimmen. Es ist der Abfluss bei dem es gerade nicht zu Ausuferungen kommt. In der Regel wird er für einen Gewässerabschnitt ermittelt. Hier, bei Betrachtung der Einzelprofile, wird für jedes einzelne Querprofil der bordvolle Abfluss bestimmt. Der bordvolle Abfluss wird gerne zur Klassifizierung eines Fließ-

gewässers herangezogen. Dadurch ergibt sich für die vorliegende Untersuchung die Möglichkeit, die hier betrachteten Gewässer mit früheren Arbeiten zu vergleichen.

Weiterhin wird ein leicht ausufernder Zustand nachgebildet, der in dieser Untersuchung mit einem Wasserstand von 5 cm über bordvollem Wasserstand definiert ist. Der bordvolle und leicht ausufernde Zustand sind nicht direkt mit einer bestimmten Jährlichkeit verbunden.

Die beiden weiteren betrachteten Zustände spiegeln Hochwässer mit einem Wiederkehrintervall von 10 und 100 Jahren wider (HQ10 und HQ100). Dabei ist nicht der Wasserstand entscheidend, sondern der Abfluss. Aus vorliegenden Abflussspendenlängsschnitten (NLÖ, 2003) ist es möglich, in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße die Abflüsse bei einem HQ100 zu ermitteln (Anlage 6 - 8). Das HQ10 kann mittels eines gebietsspezifischen Faktors entsprechend extrapoliert werden. Die Abflussspendenlängsschnitte des NLÖ gelten nur für Einzugsgebiete größer als 20 km<sup>2</sup>. Für kleinere Gebiete müssen sinnvolle Abschätzungen vorgenommen werden.

Für jeden dieser Zustände werden an jedem Profil die Wasserspiegelbreite ( $b$ ) an der Oberfläche, die maximale Wassertiefe ( $h_{\max}$ ) vom Tiefstpunkt an der Sohle bis zur Wasseroberfläche, die durchflossene Fläche ( $A$ ), der benetzte Umfang ( $l_U$ ) sowie der daraus resultierende hydraulische Radius ermittelt (Abb. 7.4). Die Ermittlung dieser geometrischen Größen erfolgt getrennt für das rechte und linke Vorland sowie für den Hauptquerschnitt.



**Abb. 7.4** *In der Untersuchung der Gewässerentwicklung ermittelte geometrische Größen*

### **7.3 ENTWICKLUNG DER GEOMETRISCHEN GRÖßEN**

Für die Bewer werden die Abhängigkeiten der oben genannten geometrischen Größen von der Einzugsgebietsgröße, dem Abfluss und der Geländeneigung zunächst einzeln vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Abhängigkeiten

der geometrischen Größen an Ilme, Leine und Aller. Diese werden miteinander und mit Größen aus der Literatur verglichen, um die im Untersuchungsgebiet liegenden Gewässer einzustufen.

Im Untersuchungsgebiet liegen verschiedene Böden vor (Kapitel 5.1.4). Die Ermittlung der Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Bodenzusammensetzung wird unter Einbeziehung aller untersuchten Gewässer vorgenommen.

Ein Vergleich der vier Untersuchungszustände zeigt, inwiefern sich die ermittelten Parameter bei steigendem Abfluss verändern.

### 7.3.1 Gewässerparameter an der Bever

An der Bever liegen auf einer Strecke von 10 km Gewässerprofile vor. Die ermittelten geometrischen Größen der Querschnitte im Abstand von ca. 1 km sind in den folgenden Grafiken (Abb. 7.5 bis Abb. 7.15) in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße, dem Abfluss sowie dem Gefälle aufgeführt. Ausreißer an der Bever, die aus der Datenmenge entfernt werden mussten, sind in erster Linie auf Gewässerverlegungen zurückzuführen.

Abb. 7.5 zeigt für die vier untersuchten Zustände den Abfluss in Abhängigkeit zur Einzugsgebietsgröße. Im bordvollen und leicht ausuferndem Zustand (5 cm über bordvoll) ist er abhängig vom Wasserstand. Mit Zunahme der Einzugsgebietsfläche vergrößert sich der bordvolle Abfluss wie folgt:

$$Q_b = 0,097 \cdot A_E^{1,360} \quad (\text{Bestimmtheitsmaß}^5: R^2 = 0,84)$$

Die Abflüsse im leicht ausufernden Zustand liegen etwas über dem bordvollen Abfluss. Auffällig in Abb. 7.5 ist, dass die ermittelten Abflüsse des HQ10 an einigen Profilen geringer als im bordvollen Zustand ausfallen, wie zum Beispiel bei dem Profil bei einer Einzugsgebietsgröße von etwa 17 km<sup>2</sup>.

Abb. 7.6 zeigt für die Bever die Abhängigkeit der bordvollen Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsfläche. Es ist ein deutlicher Trend bei der Zunahme der Ge-

---

<sup>5</sup> Bestimmtheitsmaß  $R^2 = \frac{\sum (y_i' - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$ , mit  $y_i'$  = Prognosewert (f(x)),

$y_i$  = Beobachtungswert,  $\bar{y} = \sum (y_i) / n$ ,  $n$  = Anzahl der Beobachtungen

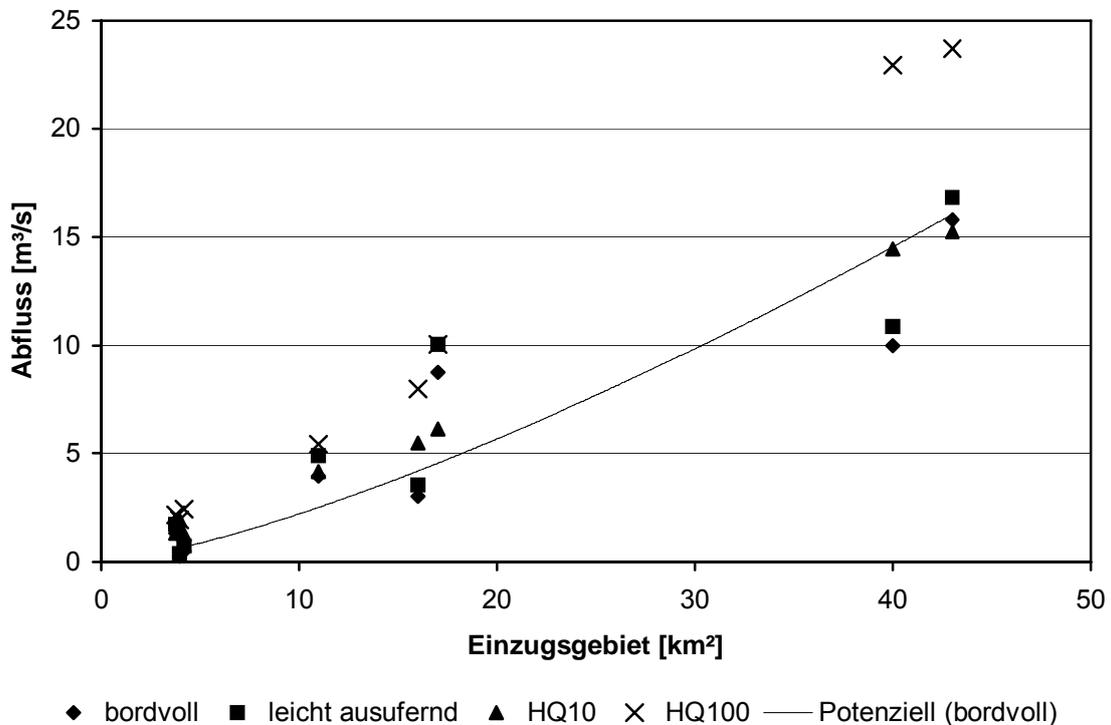
wässerbreite mit der Einzugsgebietsgröße zu erkennen. Für den Anstieg ergibt sich die Gleichung:

$$b = 1,19 \cdot A^{0,514} \quad (R^2 = 0,84)$$

Die Abhängigkeit der maximalen und mittleren Wassertiefe im Verhältnis zur Einzugsgebietsgröße im bordvollen Zustand ist in Abb. 7.7 wiedergegeben. Hierfür ergeben sich folgende Gleichungen:

$$h_m = 0,095 \cdot A_E^{0,620} \quad (R^2 = 0,88)$$

$$h_{\max} = 0,161 \cdot A_E^{0,603} \quad (R^2 = 0,96)$$



**Abb. 7.5** *Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Bever*

Das Breiten- / Tiefenverhältnis kann sowohl mit der mittleren Wassertiefe als auch mit der maximalen Wassertiefe gebildet werden. Dabei ergeben sich erhebliche Unterschiede, welche in der Abb. 7.8 deutlich werden. Bei Ermittlung des Breiten- / Tiefenverhältnisses mit der mittleren Wassertiefe ergibt sich eine wesentlich höhere Verhältniszahl als mit der maximalen Wassertiefe. Es zeigt sich jedoch bei beiden eine Abnahme des Breiten- / Tiefenverhältnisses mit der Zunahme der Einzugsgebietsgröße. Das heißt, dass die Gewässerbreite der Bever im Verhältnis zur Gewäs-

sertiefe geringer bzw. die Tiefe im Verhältnis zur Breite stärker zunimmt. Für das Breiten- / Tiefenverhältnis mit der mittleren Wassertiefe ergibt sich:

$$b/h_m = 10,69 - 0,050 \cdot A_E \quad (R^2 = 0,15)$$

Für das Verhältnis mit der maximalen Wassertiefe ergibt sich:

$$b/h_{\max} = 6,50 - 0,027 \cdot A_E \quad (R^2 = 0,12)$$

In der Abb. 7.9 ist das Breiten- / Tiefenverhältnis in Abhängigkeit des Gefälles an der Bever gegenübergestellt. Mit abnehmendem Gefälle, also in Richtung Mündung, nimmt die Gewässertiefe im Verhältnis zur Gewässerbreite stärker zu:

$$b/h_m = 6,845 + 0,120 \cdot I \quad (R^2 = 0,53)$$

$$b/h_{\max} = 4,536 + 0,112 \cdot I \quad (R^2 = 0,34)$$

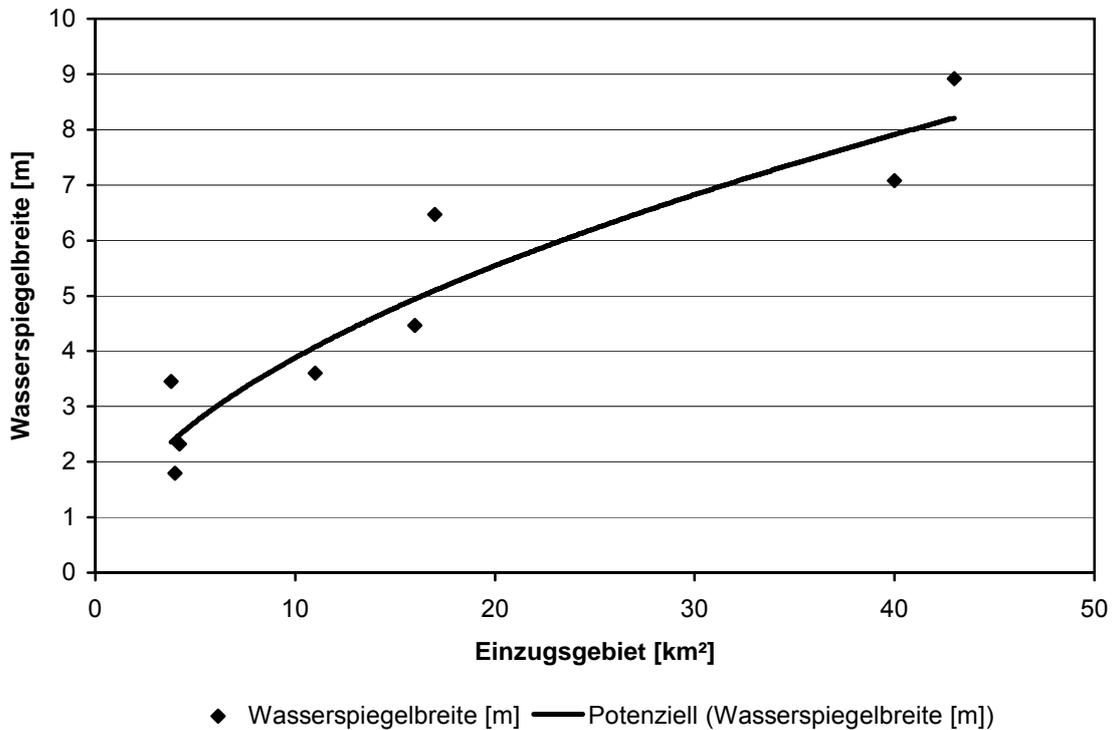
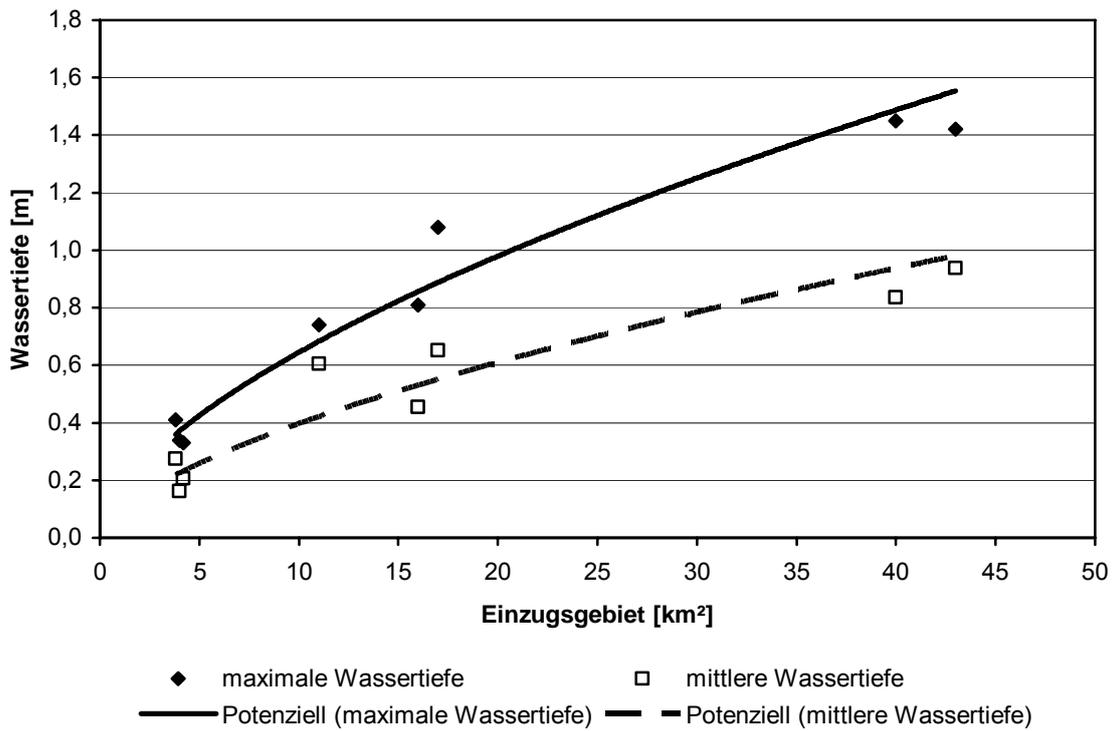
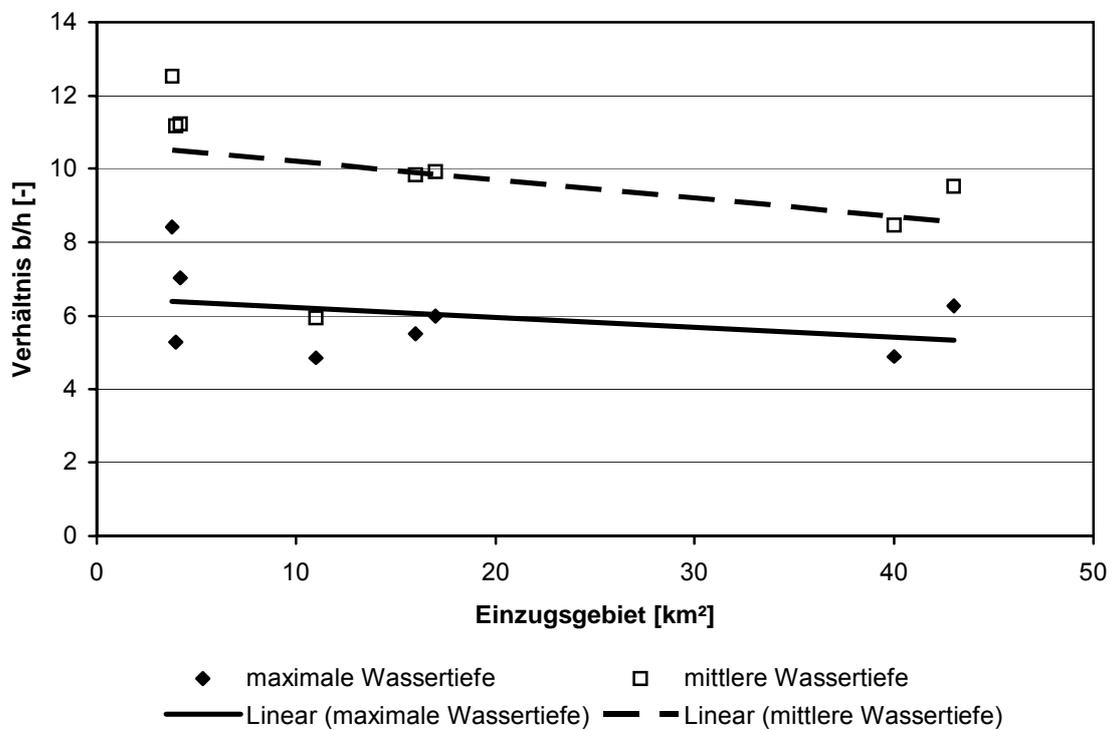


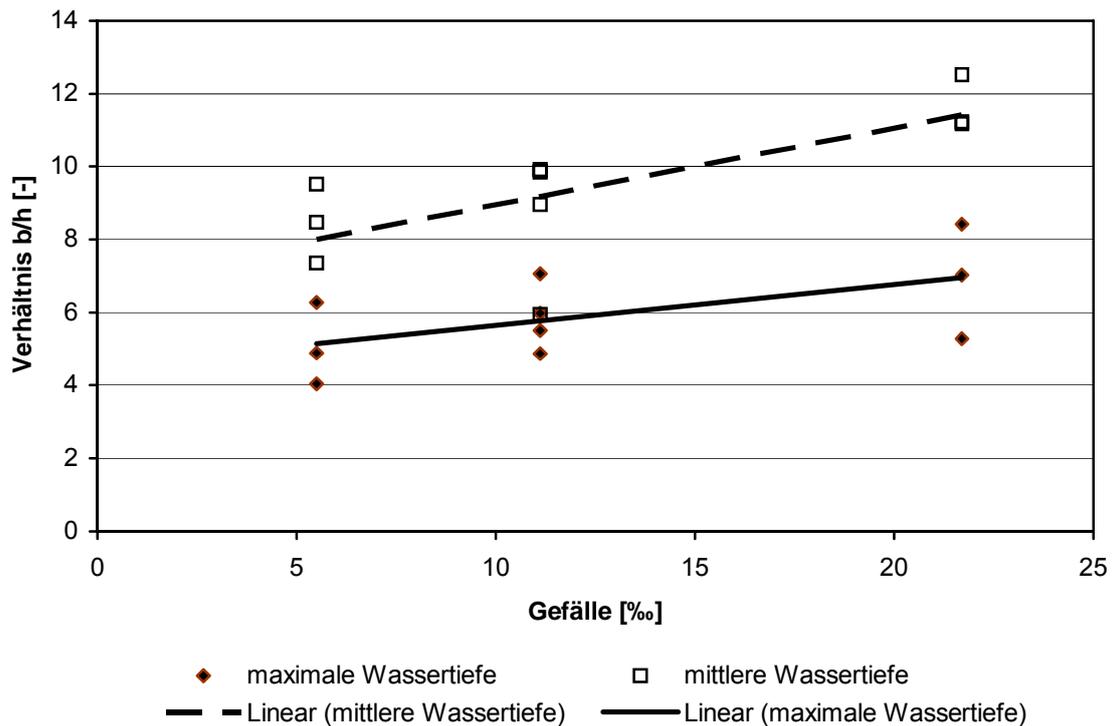
Abb. 7.6 **Abhängigkeit der bordvollen Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsfläche an der Bever**



**Abb. 7.7** *Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsfläche an der Bewer im bordvollen Zustand*



**Abb. 7.8** *Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsfläche an der Bewer im bordvollen Zustand*



**Abb. 7.9** *Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle an der Bewer im bordvollen Zustand*

Der hydraulische Radius ist der Koeffizient aus der durchflossenen Fläche und dem benetzten Umfang. Bei gleich großer durchflossener Fläche und gleichen Rauheitsbedingungen ist der hydraulische Radius und damit der Abfluss umso größer je kleiner der benetzte Umfang ist.

Der hydraulische Radius ist in den Abb. 7.10 und Abb. 7.11 in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße und des Abflusses für die Bewer aufgeführt. Es zeigt sich eine eindeutige Steigerung des hydraulischen Radius mit größer werdendem Einzugsgebiet und steigendem Abfluss. Für die Bewer ergeben sich folgende Beziehungen:

$$r_{hy} = 0,088 \cdot A_E^{0,612} \quad (R^2 = 0,89)$$

und

$$r_{hy} = 0,255 \cdot Q^{0,435} \quad (R^2 = 0,99)$$

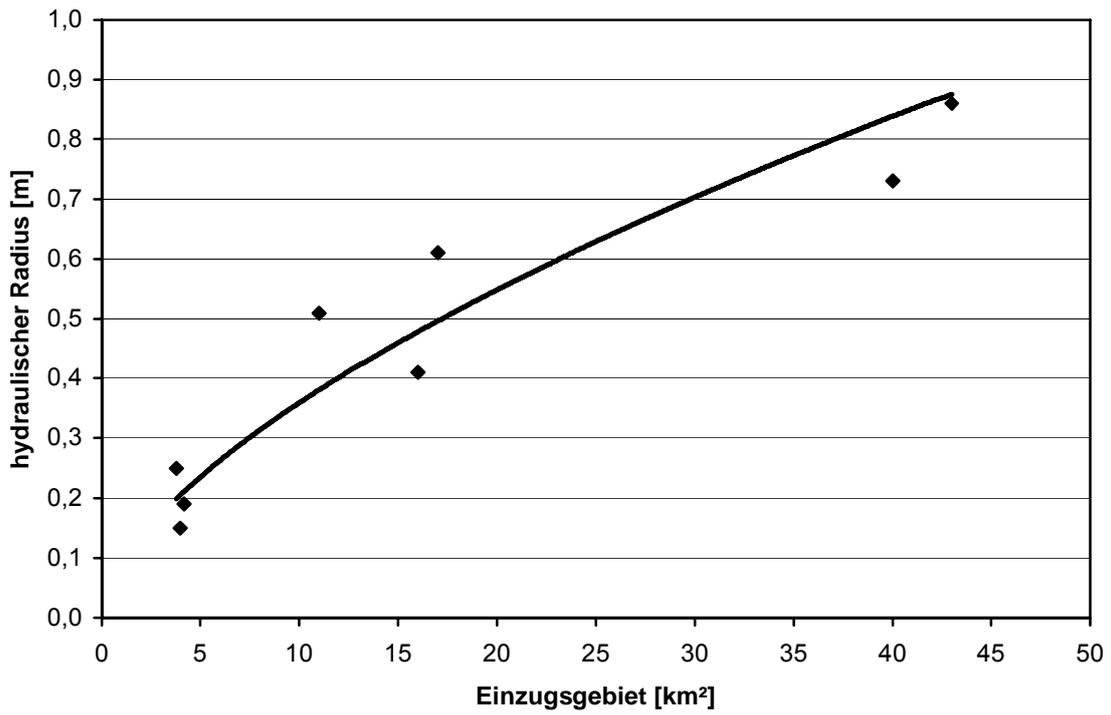


Abb. 7.10 *Abhängigkeit des hydraulischen Radius von der Einzugsgebietsfläche an der Bewer (bordvoller Zustand)*

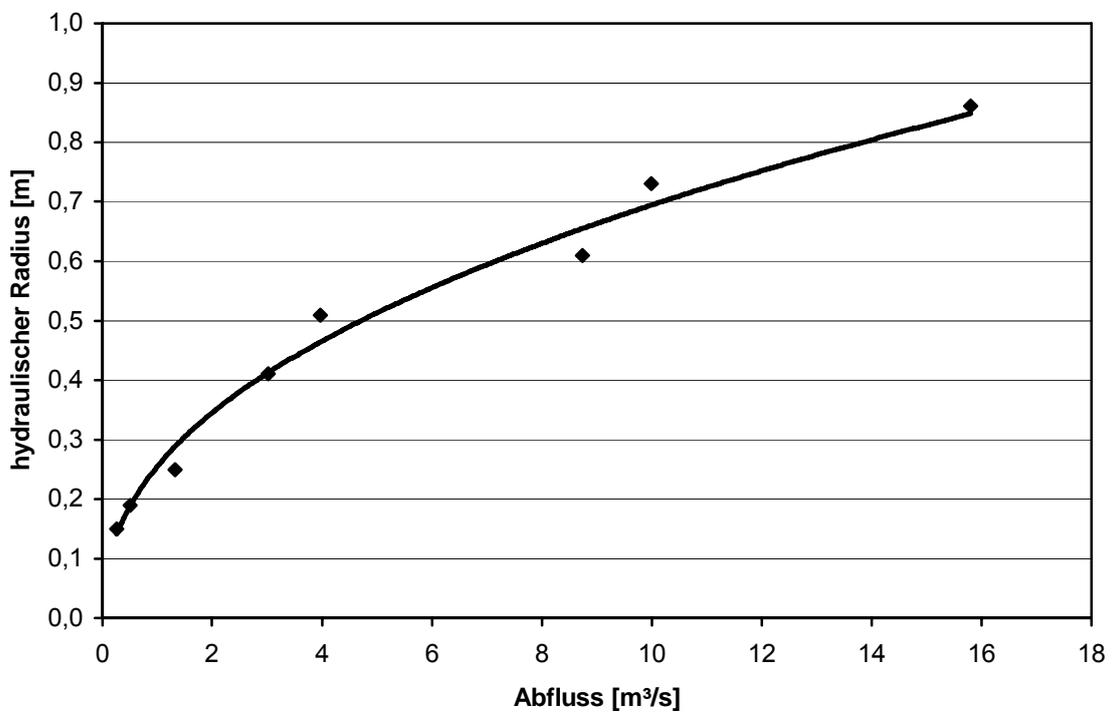
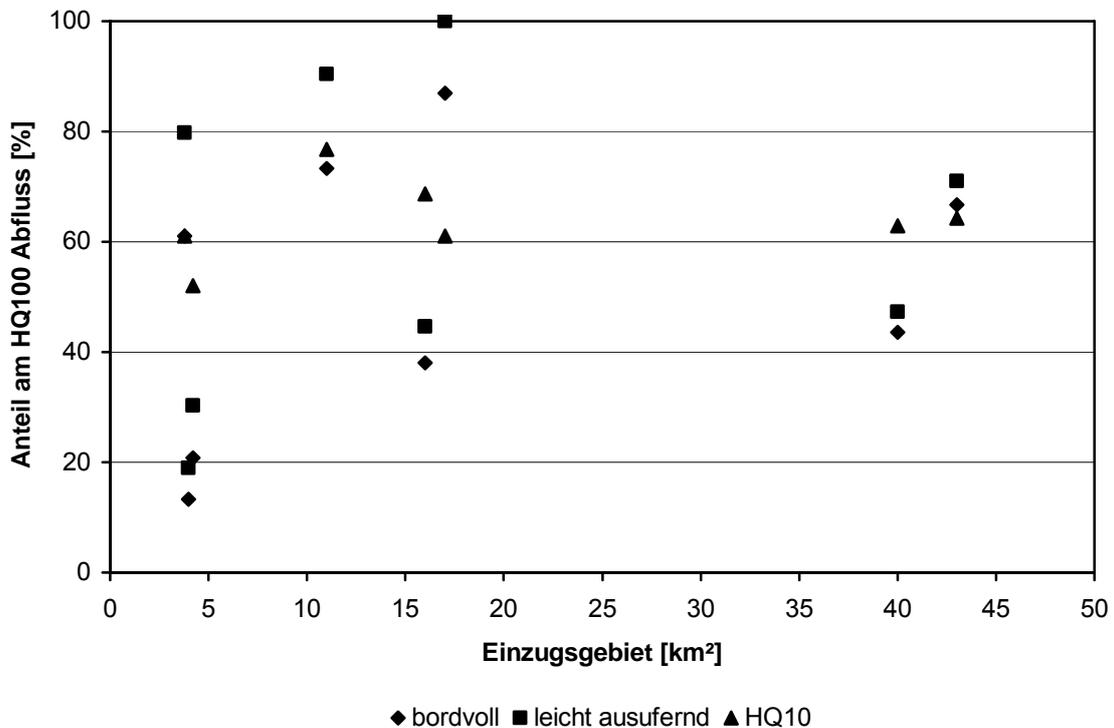


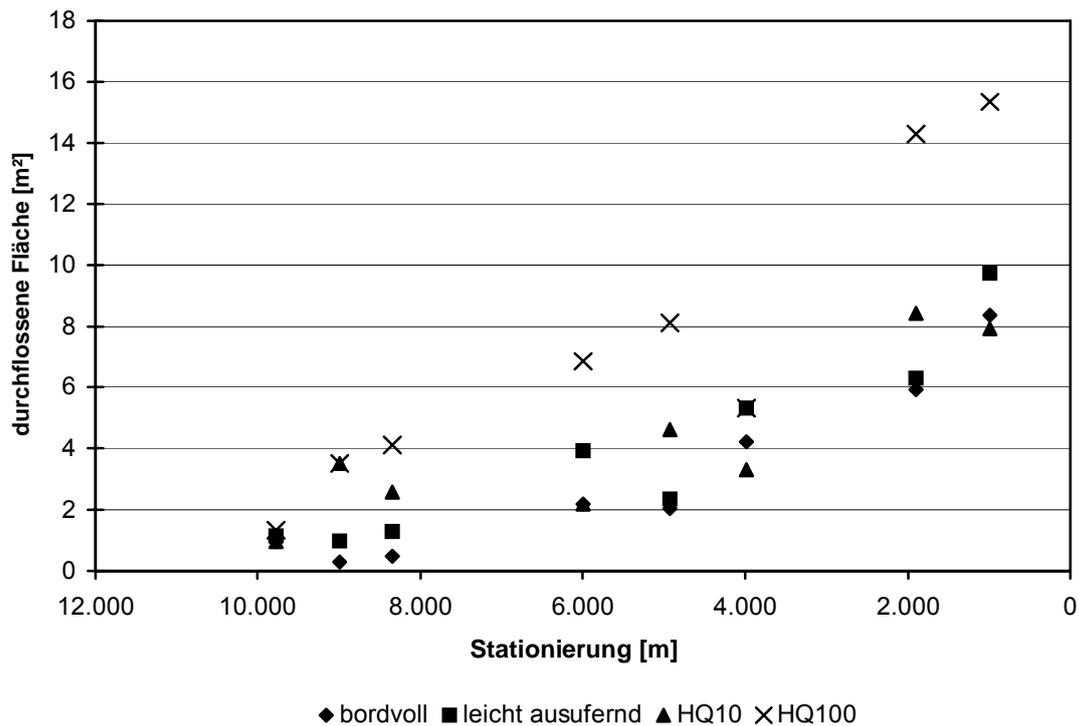
Abb. 7.11 *Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss an der Bewer (bordvoller Zustand)*

Die Abb. 7.12 zeigt den prozentualen Anteil am HQ100 Abfluss der untersuchten Zustände in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße. In der Grafik liegt der HQ100 Abfluss bei 100 %. Während der HQ10 Abfluss annähernd konstant bei etwa 60 % des HQ100 Abflusses liegt, schwanken die Anteile des bordvollen und leicht ausufernden Zustandes sehr.

Abb. 7.13 beinhaltet die durchflossene Querschnittsfläche entlang der Bewer. Deutlich ist die Zunahme der durchflossenen Fläche in Richtung Mündung. Dabei fällt eine relativ kleine durchflossene Fläche bei km 4 im HQ100 Zustand auf. Hierbei handelt es sich um ein Profil mit sehr kompaktem Hauptquerschnitt, der durch einen großen hydraulischen Radius gekennzeichnet ist. In diesem Fall kann der Abfluss im HQ100 Zustand nahezu komplett im Hauptquerschnitt abgeführt werden.



**Abb. 7.12** *Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche an der Bewer (Abfluss des HQ100 = 100 %)*



**Abb. 7.13** *Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen entlang der Bever*

In Abb. 7.14 ist die Wassertiefe, gemittelt über die gesamte Profilbreite einschließlich Vorland, entlang der Bever bei den vier untersuchten Zuständen aufgetragen. Die mittlere Wassertiefe liegt zwischen 0,1 m und 1,0 m. Sobald bei steigendem Abfluss die Vorländer überschwemmt werden, nimmt die Breite und somit die durchflossene Fläche des Gewässers stark zu. Die Gewässertiefe in den Vorländern ist dabei verhältnismäßig gering. Aufgrund dieser geringen Tiefen fällt dann die über Vorland und Hauptquerschnitt gemittelte Wassertiefe entsprechend klein aus.

Die Entwicklung des benetzten Umfangs entlang der Bever bei den vier untersuchten Zuständen ist in Abb. 7.15 grafisch aufgeführt. Im bordvollen Zustand nimmt der benetzte Umfang von der Quelle zur Mündung hin kontinuierlich zu. An der Mündung beträgt er im bordvollen Zustand etwa 10 m und bachauf nach etwa 10 km nur noch 2 bis 3 m. Kommt es zu Ausuferungen, wie im leicht ausufernden Zustand bzw. wie in der Regel beim HQ100, so gibt es eine weite Streuung des benetzten Umfangs. Dabei werden Umfänge von 40 m, in einem Fall sogar fast 80 m erreicht.

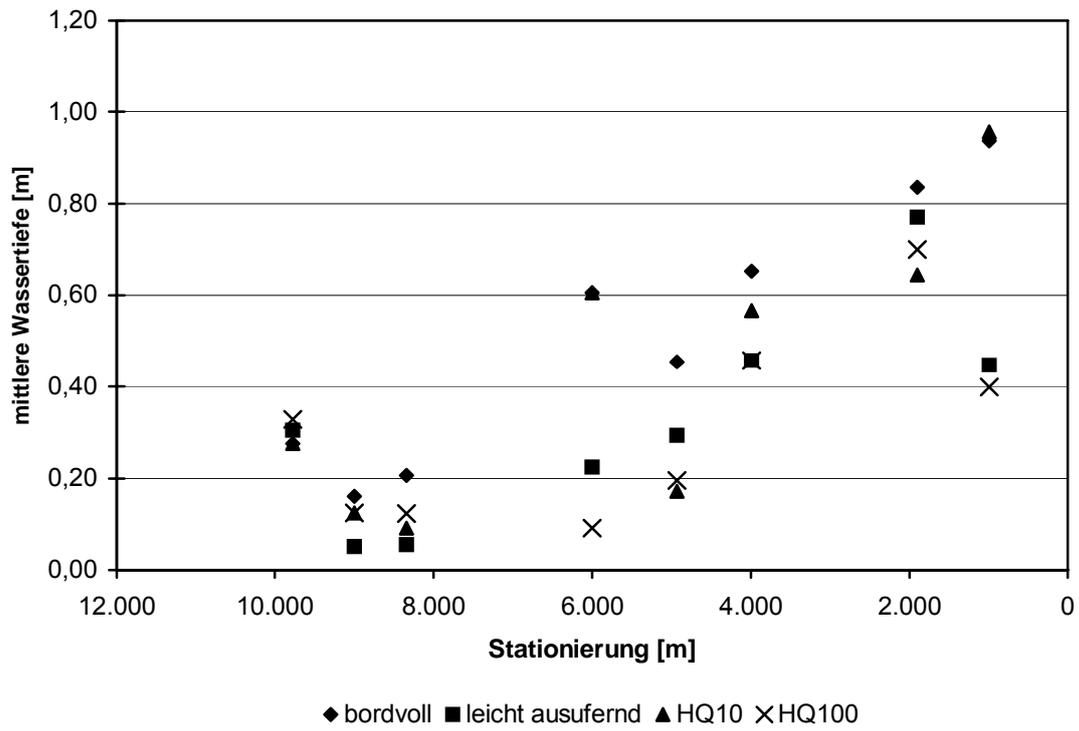


Abb. 7.14 *Mittlere Wassertiefe bei verschiedenen Zuständen an der Bewer*

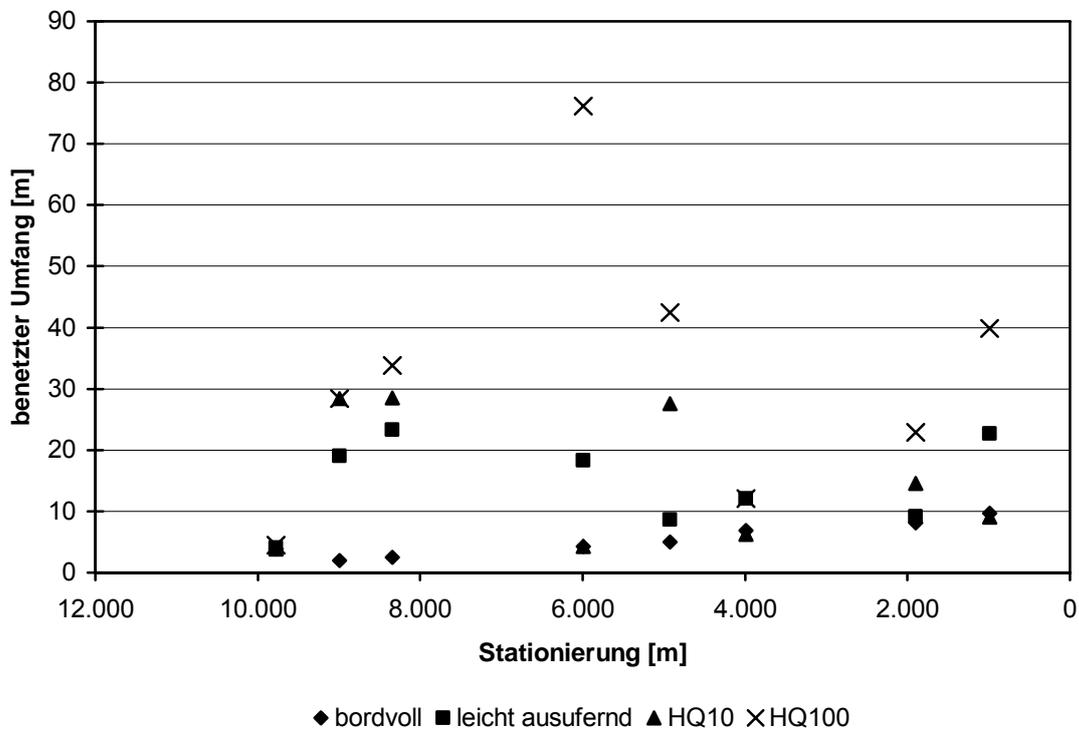


Abb. 7.15 *Benetzter Umfang bei verschiedenen Zuständen an der Bewer*

STORCHENEGGER (1983) leitete in seiner Arbeit über 'Orts- und ereignisbeschreibende Parameter für Niederschlag-Abfluss-Modelle' Zusammenhänge zwischen Gerinne- und Gebietskennwerten im nordalpinen Flyschgebiet ab. Dabei bezieht er das Verhältnis des Einzugsgebietes zur mittleren Größe seiner Quelleinzugsgebiete mit ein. So erhält er für die Gewässerbreite folgende Gleichung:

$$b_b = 1,34 \cdot b_{bQ} \cdot \left( \frac{A_E}{A_{EQ}} \right)^{0,43}$$

mit:  $b_b$  Flussbreite als mittlerer Abstand zwischen den Vegetationssäumen [m]

$b_{bQ}$  mittlere Flussbreite der Quellbäche bei der Mündung in den Gewässerlauf höherer Ordnung [m]

$A_E$  Einzugsgebietsgröße [km<sup>2</sup>]

$A_{EQ}$  mittlere Einzugsgebietsgröße der Quellbäche [km<sup>2</sup>]

Dieser Ansatz auf das Bewereinzugsgebiet übertragen liefert näherungsweise folgende Gleichung, die auf abgeschätzten Größen der Quellbäche basiert:

$$b_b = 1,49 \cdot b_{bQ} \cdot \left( \frac{A_E}{A_{EQ}} \right)^{0,68}$$

Zur Überprüfung der Formel müsste ein Aufmaß der entsprechenden Quellbäche vorgenommen werden. Zudem sollte festgestellt werden, inwieweit sich Maßstabeffekte bemerkbar machen. Denn je kleiner der Maßstab ist, desto mehr Bäche werden detailliert betrachtet und desto kleiner werden die einzelnen Teileinzugsgebiete.

Die am Mittelgebirgsbach Bever ermittelten Faktoren liegen jedoch in der gleichen Größenordnung wie die von STORCHENEGGER (1983) ermittelten Werte im nordalpinen Flyschgebiet. Inwieweit eine allgemeine Übertragbarkeit der Gebietseigenschaften möglich ist, müssten weitere Untersuchungen zeigen.

Da an den weiteren untersuchten Gewässern Ilme, Leine und Aller nicht das gesamte Einzugsgebiet betrachtet wird, wird in dieser Arbeit der Ansatz von STORCHENEGGER hier nicht weiter verfolgt.

Weitere Vergleiche mit Ergebnissen aus anderen Einzugsgebieten folgen in Kapitel 7.5.

### 7.3.2 Gewässerparameter an Ilme, Leine und Aller

Für die Gewässer Ilme, Leine und Aller wird die Entwicklung der geometrischen Größen zusammengefasst beschrieben. In der Tab. 7.2 sind die Beziehungen im Überblick aufgeführt. Die dazugehörigen Grafen befinden sich in den Anlagen 9 - 41.

Der bordvolle Abfluss an der Ilme beträgt nach Einmündung der Bever etwa 13 m<sup>3</sup>/s und nimmt bis zur Mündung in die Leine auf 50 m<sup>3</sup>/s zu. In der Leine beträgt der bordvolle Abfluss an dieser Stelle etwa 130 m<sup>3</sup>/s. An der Mündung in die Aller liegt er dann bei 200 m<sup>3</sup>/s. Der bordvolle Abfluss des betrachteten Allerabschnittes beträgt im Mittel 210 m<sup>3</sup>/s.

Bereits bei der Beziehung zwischen bordvollem Abfluss und Einzugsgebietsgröße machen sich starke Schwankungen von Profil zu Profil bemerkbar. Dieses spiegelt sich in einem niedrigen Korrelationskoeffizienten wider (Tab. 7.2). Starke Abweichungen sind die Regel. Dieses zeigt sich ebenfalls in den Beziehungen, die bezüglich der Breite und Tiefe und des damit verbundenen hydraulischen Radius aufgestellt werden.

Der Korrelationskoeffizient für die Beziehung zwischen maximaler Wassertiefe und Einzugsgebietsgröße an der Aller ist so gering, dass auf die Angabe der Beziehungsgleichung in der Tab. 7.2 verzichtet wird.

**Tab. 7.2 Übersicht der ermittelten Zusammenhänge der Gewässerparameter an Ilme, Leine und Aller**

Beziehung	Ilme			Leine			Aller		
	a	c	R <sup>2</sup>	a	c	R <sup>2</sup>	a	c	R <sup>2</sup>
$Q_b = a A_E^c$	0,002	2,066	0,45	0,813	0,640	0,39	0,006	1,097	0,01
$b = a A_E^c$	0,013	1,260	0,62	0,147	0,662	0,50	-0,003	6,331	0,34
$h_m = a A_E^c$	0,001	1,283	0,78	1,568	0,083	0,01	10 <sup>-4</sup>	-3,92	0,39
$h_{max} = a A_E^c$	0,001	1,628	0,81	0,980	0,195	0,08	-	-	-
$b/h_m = a + c A_E$	13,43	-0,01	0,02	6,876	0,001	0,11	- 315	0,023	0,41
$b/h_{max} = a + c A_E$	10,00	-0,01	0,23	4,932	0,001	0,10	- 112	0,009	0,28
$b/h_m = a + c l$	10,55	1,050	0,16	13,755	-2,204	0,003	-19,2	270,2	0,09
$b/h_{max} = a + c l$	5,000	1,269	0,46	7,635	1,011	0,002	17,33	18,33	0,01
$r_{hy} = a A_E^c$	0,001	1,243	0,78	0,492	0,213	0,13	10 <sup>-16</sup>	-3,77	0,38
$r_{hy} = a Q^c$	0,328	0,411	0,80	0,403	0,385	0,43	0,660	0,247	0,19

Wie an der Bever ist bei der Ilme ein abnehmender Trend beim Breiten- / Tiefenverhältnis gegenüber der Einzugsgebietsfläche zu verzeichnen. An der Leine und Aller geht dieser Trend in die andere Richtung. Hier nimmt die Breite des Gewässers mit größer werdendem Einzugsgebiet stärker zu als die Tiefe.

Die übrigen Gewässerparameter weisen ähnliche Tendenzen wie an der Bever vorgestellt auf. Allerdings sind die Streubreiten sehr viel ausgeprägter.

## 7.4 BODENDATEN

An einigen untersuchten Querprofilen von der Bever bis zur Aller liegen Auswertungen von Bodenproben vor, welche Auskunft über den prozentualen Anteil der Kornfraktionen Ton, Schluff und Sand geben.

Allgemein ist auffällig, dass an der Bever, Ilme und Leine der Anteil an Schluff und Ton in den oberen Bodenbereichen zumeist bei über 90 % liegt. An der Gewässer-  
sohle und tiefer gelegenen Bodenschichten nimmt der Anteil an Kies stark zu. Die Aller ist durch einen Sandanteil von ca. 60 % geprägt.

Für die Gegenüberstellung des Breiten- / Tiefenverhältnisses im Untersuchungsgebiet zu den Schluff- und Ton-Anteilen wurden den Bodenproben die nächstgelegenen Querprofile zugeordnet. Das Ergebnis ist in Abb. 7.16 zu sehen.

Die Schluff- und Tonanteile sind entsprechend des Anteils des benetzten Umfangs  $I_{Gesamt}$  im bordvollen Zustand nach folgender Formel gewichtet:

$$M = \frac{(I_{Sohle} \cdot M_{Sohle} + I_{Böschung} \cdot M_{Böschung})}{I_{Gesamt}}$$

Zur Orientierung ist die Funktion von SCHUMM (1960) in das Diagramm eingetragen. Sie lautet:

$$b/h = 255 \cdot M^{-1,08}$$

mit:  $b/h$  Breiten- / Tiefenverhältnis [-]

$M$  Massenprozent Schluff und Ton [%]

Bei der Funktion von SCHUMM ist zu beachten, dass die Kornfraktionen für Ton und Schluff von ihm bis zu einer Korngröße von 0,074 mm eingestuft wurden. In Deutschland endet die Kornfraktion für Ton und Schluff bei 0,063 mm. Für eine grobe Orientierung ist diese Feinheit jedoch unerheblich, zumal bei der Festlegung des Breiten- / Tiefenverhältnisses eine große Spannbreite möglich ist.

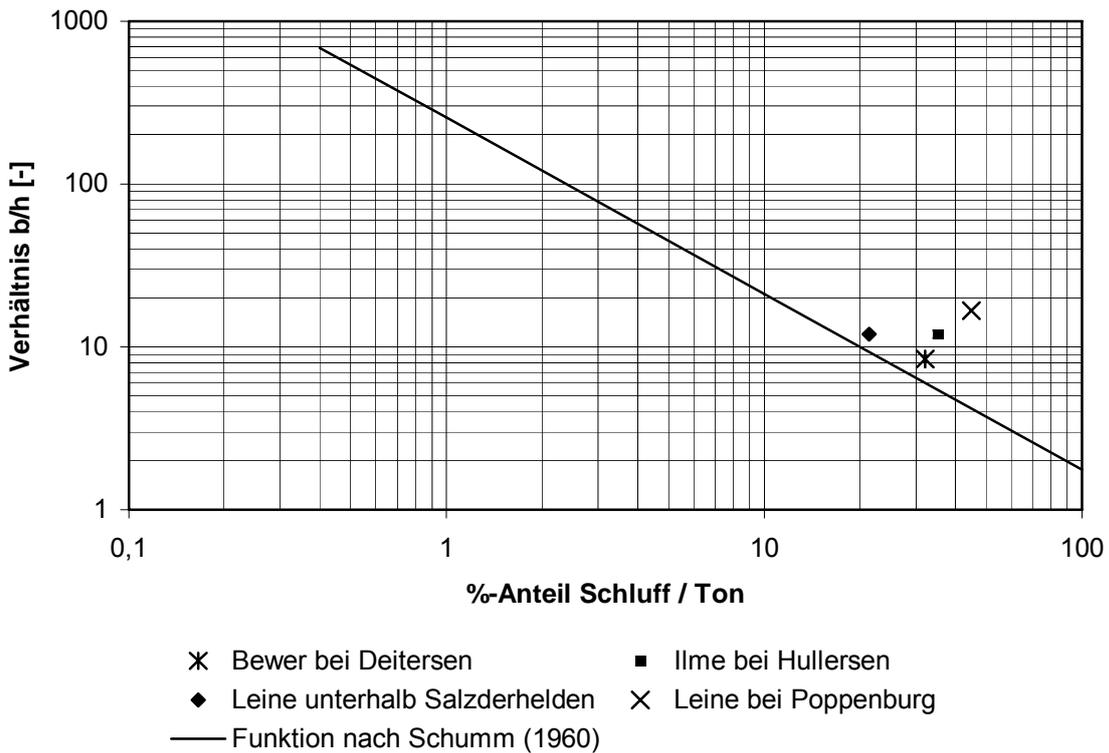


Abb. 7.16 *Breiten- / Tiefenverhältnis gegenüber dem Ton- und Schluffanteil*

Die im Untersuchungsgebiet ermittelten Wertepaare liegen oberhalb der Kurve von SCHUMM. Die vorliegenden Breiten- / Tiefenverhältnisse liegen dabei im unteren Bereich der von ihm untersucht wurde. Die stichprobenartige Auswertung zeigt, dass die Funktion von SCHUMM (1960) zur Orientierung bei Renaturierungsmaßnahmen herangezogen werden kann. Dabei sollte die natürliche Bandbreite der Gewässerquerschnitte nicht außer Acht gelassen werden (Kapitel 7.3).

## 7.5 ZUSAMMENFASSUNG UND GEGENÜBERSTELLUNG

In der Tab. 7.3 sind die ermittelten Faktoren und Exponenten, die den Zusammenhang zwischen bordvollem Abfluss und Einzugsgebietsgröße beschreiben, der vier untersuchten Fließgewässer gegenübergestellt. Es zeigt sich keine einheitliche Tendenz mit Zunahme der Einzugsgebietsgröße. Ein Vergleich der Werte mit Daten aus anderen Untersuchungen zusammengestellt von SCHERLE (1999) zeigt eine gute Übereinstimmung der Bewer mit zwei benachbarten Bächen des Buntsandstein-Odenwaldes und des Trienzbaches im gleichen Gebiet (Tab. 7.4). Diese wurden von HUMBORG (1995) untersucht. Die Einzugsgebietsgröße der Bewer und die der von HUMBORG untersuchten Gewässer mit guter Übereinstimmung sind identisch. Die

Einzugsgebietsdaten des Trienzbaches stimmen mit den Gebietsdaten der Bever recht gut überein. Der Trienzbach gehört zu den Muldentälchen, hat ein Gefälle von 1,2 %, einen Windungsgrad von 1,2 und am Gebietsauslass einen bordvollen Abfluss von 5,5 m³/s.

**Tab. 7.3 Bordvoller Abfluss in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße im Allereinzugsgebiet ( $Q_b = a \cdot A_E^c$ )**

Gewässer	Einzugsgebietsgröße [km²]	a	c	R
Bewer	4 - 43	0,100	1,36	0,92
Ilme	200 - 400	0,002	2,07	0,67
Leine	2.600 – 6.600	0,813	0,64	0,62
Aller	14.500 – 15.300	0,006	1,10	0,10

Die meisten Untersuchungen beschränken sich auf relativ kleine Einzugsgebiete, so dass es für die in dieser Untersuchung behandelten Gewässer mit großen Einzugsgebieten kaum Vergleichswerte gibt. Dennoch lassen sich für die Leine Gewässer mit ähnlichen Faktoren und Exponenten finden. So liegen die Werte an der Leine in der gleichen Größenordnung wie die Bäche des Buntsandstein-Odenwaldes (2 – 43 km²) und des Westerwaldes (1 – 97 km²).

Die Werte an der Ilme und Aller fallen mit einem sehr kleinen Faktor a aus dem Rahmen der sonst üblichen angegebenen Werte. Die Werte an der Ilme und Aller tendieren jedoch zum ermittelten Faktor a und Exponent c der in Tab. 7.4 genannten Gewässer in Mittel- und Ober-Belgien (4 – 1.600 km²).

Der Korrelationskoeffizient an der Aller ist sehr gering. Dies steht im Zusammenhang mit sehr unterschiedlichen Gerinneformen von Profil zu Profil. NADOLNY (1994) stellte bei ihrer Untersuchung mit Schwemmfächer- und Flachlandauebächen bereits fest, dass eindeutige Zuordnungen, wie sie in den Bergbächen vorzufinden sind, in diesen Gewässern nicht möglich sind. Es zeigen sich lediglich Streuungsbereiche.

In den Tab. 7.5 und Tab. 7.6 sind die Faktoren und Exponenten der Beziehungen zwischen Gewässerbreite und mittlerer Wassertiefe in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße aufgeführt und vergleichbaren Bächen der Bever und Leine bezüglich Abfluss und Einzugsgebietsgröße aus Tab. 7.4 gegenübergestellt.

Die Bever und der Trienzbach zeigen bei der Abhängigkeit der bordvollen Gewässerbreite von der Einzugsgebietsgröße ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Da die

Werte auch bei der mittleren Wassertiefe nicht allzu weit auseinander liegen, kann hier von vergleichbaren Bächen gesprochen werden.

**Tab. 7.4 Bordvoller Abfluss in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße nach Zusammenstellung von SCHERLE (1999) ( $Q_b = a \cdot A_E^c$ )**

Autor / Datengrundlage	Gewässerregion / Gewässer (Einzugsgebietsgrößen)	a	c	R
NADOLNY (1994)	Bäche der Oberrheinebene (7 – 120 km <sup>2</sup> )	2,81	0,11	0,26
FITTSCHEN (1995)	Bäche des Keuperberglandes (3 – 46 km <sup>2</sup> )	1,21	0,56	0,73
HUMBORG (1995)	Bäche des Buntsandstein-Odenwalds (2 – 43 km <sup>2</sup> )	0,45	0,64	0,79
	desgl. nur zwei benachbarte Bäche (4 – 43 km <sup>2</sup> )	0,11	1,13	0,96
	desgl. nur Trienzbach (4 – 31 km <sup>2</sup> )	0,12	1,11	0,94
	desgl. nur Seebach (2 – 31 km <sup>2</sup> )	0,25	0,76	0,99
Forschungsgr. Fließgewässer (1997, unveröffl.)	Gneis-Bäche des Schwarzwaldes (2 – 94 km <sup>2</sup> )	0,28	1,05	0,90
Datengr. JACOBI (1994)	Bäche des Westerwaldes (1 – 97 km <sup>2</sup> )	0,60	0,80	0,93
NIXON (1959 in Petit & Daxhelet 1989)	Gewässer in England und Wales (100 – 10.000 km <sup>2</sup> )	0,32	0,81	0,76
HEY (in Petit & Daxhelet 1989)	versch. Stationen eines Gewässers in Wales (4 – 3.000 km <sup>2</sup> )	1,55	0,77	-
div. Autoren (in PETIT & DAXHELET 1989)	(2 – 1.000 km <sup>2</sup> )	1,10	0,67	0,95
ANDREWS (1980 in PETIT & DAXHELET 1989)	Berggewässer in Arizona (3 – 10.000 km <sup>2</sup> )	0,20	0,80	-
PETIT & DAXHELET (1989)	Gew. in Mittel und Ober-Belgien (4 – 1.600 km <sup>2</sup> )	0,10	1,01	-
	desgl. nur Fluss „Vesdre“ allein (7 – 1.600 km <sup>2</sup> )	2,40	0,66	0,94

Die Übereinstimmung zwischen Abfluss und Einzugsgebietsgröße an der Leine mit den Gewässern im Odenwald und Westerwald (Tab. 7.4) scheint eher zufällig zu sein, da die Faktoren und Exponenten bei der Gewässerbite und –tiefe stark voneinander abweichen.

Bezüglich der Gewässerbite in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße zeigt sich an der Leine eine näherungsweise Übereinstimmung mit der von RÜDIGER (1972) ermittelten Funktion:

$$b = 0,96 \cdot A_E^{0,44}$$

RÜDIGER (1972) führte seine Untersuchungen an den Wasserstraßen der ehemaligen DDR (Deutsche Demokratische Republik) durch, die überwiegend durch eine flachere Umgebung fließen. Dies ist mit dem untersuchten Abschnitt an der Leine vergleichbar.

**Tab. 7.5 Bordvolle Gewässerbreite in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße**

$$(b = a \cdot A_E^c)$$

Gewässer	Einzugsgebietsgröße [km <sup>2</sup> ]	a	c	R
Bewer	4 - 43	1,19	0,51	0,92
Trienzbach	4 - 31	1,03	0,64	0,96
Leine	2.600 – 6.600	0,15	0,66	0,71
Buntsandstein-Odenwald	2 - 43	1,77	0,42	0,85
Westerwald	1 – 97	3,27	0,32	0,93

**Tab. 7.6 Mittlere Wassertiefe in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße ( $h_m = a \cdot A_E^c$ )**

Gewässer	Einzugsgebietsgröße [km <sup>2</sup> ]	a	c	R
Bewer	4 - 43	0,10	0,62	0,94
Trienzbach	4 - 31	0,23	0,24	0,72
Leine	2.600 – 6.600	1,57	0,08	0,10
Buntsandstein-Odenwald	2 - 43	0,18	0,27	0,56
Westerwald	1 – 97	0,16	0,39	0,92

Von der Bever bis zur Aller nimmt die bordvolle Breite stärker zu als die Wassertiefe. Während das Breiten- / Tiefenverhältnis im bordvollen Zustand ermittelt mit der mittleren Wassertiefe an der Bever zwischen 6 und 13 schwankt, erreicht es an der Ilme Werte zwischen 10 und 18, an der Leine zwischen 6 und 32 und an der Aller zwischen 20 und 60. Dabei ist zu beachten, dass diese Tendenz zur Erhöhung des Breiten- / Tiefenverhältnisses mit zunehmendem Einzugsgebiet nicht für jedes Gewässer gilt. So sind die Tendenzen an der Bever und Ilme in Richtung Mündung mit einer stärkeren Zunahme der Tiefe im Verhältnis zur Breite verbunden. Da an der Ilme lediglich ein Gewässerabschnitt im nahen Mündungsbereich betrachtet wurde, sollte diese hier festgestellte Tendenz jedoch nicht für die gesamte Ilme generalisiert werden.

In der Untersuchung hat sich gezeigt, dass die Variabilität der Gerinneprofile vor allem an der Leine und Aller natürlicherweise sehr groß ist. Dadurch können lediglich Anhaltswerte über die Breiten und Tiefen des anzustrebenden Hauptquerschnitts gegeben werden. Um einen Anhaltswert für Vorprofilierungen von Gerinnestrecken zu haben, sind die in dieser Arbeit ermittelten Größen jedoch anwendbar. Bei der (weiteren) freien Gewässerentwicklung und der zugehörigen Raumplanung sind die natürlichen Spannbreiten der Gewässerparameter zu beachten.

Ein Anhaltswert für die Breite und Tiefe bzw. ihrem Verhältnis zueinander kann für die Bewer anhand der Gleichungen im Kapitel 7.3.1 berechnet werden. Für die untersuchten Abschnitte an der Ilme, Leine und Aller befinden sich die entsprechenden Formeln in der Tab. 7.2. Die Streuung kann den dazugehörigen Grafiken im Kapitel 7.3.1 bzw. dem Anhang 2 entnommen werden.

Die ermittelte starke Streuung stärkt die Hypothese, dass es in der Natur sehr viele Variationen gibt und nicht alles genau definiert und vorauszuplanen ist. Wir sollten lernen damit umzugehen. Dies erfordert neue Herangehensweisen, die flexibel und dem Zufall aufgeschlossen sind.

## **7.6 KLASSIFIZIERUNG NACH ROSGEN**

Die in Kapitel 2.1.2 beschriebene Typisierung nach ROSGEN (1996) wird im Folgenden auf die hier untersuchten Gewässer angewendet. Die für die Typisierung benötigten Daten sind in der Tab. 7.7 zusammengefasst.

Die von ROSGEN vorgegebenen Einstufungen konnten in der Regel gut vorgenommen werden. Lediglich die Leine liegt aufgrund des Breiten- / Tiefenverhältnisses und des Windungsgrades zwischen den Typen E und C. Die anderen Gewässer konnten entweder der Klasse C oder E zugeordnet werden. Eine weitere Unterteilung wird aufgrund des Gefälles und des Bettmaterials vorgenommen. Die Bewer, Ilme und Leine werden aufgrund ihres lehmigen Bodenmaterials in die Klasse 6 und die Aller mit ihrem hohen Sandanteil in die Klasse 5 eingestuft.

Zu allen Typisierungsklassen hat *Rosgen* eine Beschreibung beigefügt. Für die hier ermittelten Gewässertypen wird im Anschluss an die Tab. 7.7 ein Auszug daraus aufgeführt.

Tab. 7.7 *Typisierung nach ROSGEN*

ROSGEN Parameter	Bewer	Ilme	Leine	Aller
Rate zur Ausuferungsmöglichkeit*	> 2,2	> 2,2	> 2,2	> 2,2
B / h <sub>m</sub> Verhältnis	< 12	ca. 12	ca. 12	>12
Windungsgrad (18. Jahrhundert)	>1,5	ca.1,4	>1,2 und >1,5	1,5
Gewässertyp I	<b>E</b>	<b>C</b>	<b>E / C</b>	<b>C</b>
Gefälle [-]	< 0,02	> 0,001	< 0,001	< 0,001
Bettmaterial	Lehm	Lehm	Lehm	Sand
Gewässertyp II	<b>E6</b>	<b>C6</b>	<b>E6 / C6c-</b>	<b>C5c-</b>

\* Entrenchment Ratio (Quotient aus Wasserspiegelbreite bei zweifachem maximalen bordvollen Wasserstand und bordvoller Gewässerbreite)

### Gewässertyp C5

Der Gewässertyp C5 ist ein mäandrierendes Fließgewässer mit Kolken und Bänken und einem stark ausgeprägten Überflutungsgebiet. Er kommt in breiten Tälern und Ebenen vor, die in Urzeiten entstanden sind. Ursache hierfür können glaziale Auswaschungen sein. Der C5 Typ ist durch ein geringes Sohlgefälle und relativ hohen Breiten- / Tiefenverhältnissen geprägt. Er legt ein sehr aktives Wanderungsverhalten zu Tage. Die Verlagerungstendenz wird bestimmt durch das Vorhandensein von bewachsenen Uferzonen. Die Sedimenttransportrate ist im Allgemeinen sehr hoch. Zudem ist er anfällig für Veränderungen sowohl in der Breite als auch in der Tiefe durch direkte Veränderungen am Gewässer, Abflussveränderungen und Veränderungen des Sedimenteintrages aus dem zugehörigen Einzugsgebiet.

### Gewässertyp C6

Die Landschaft für den Gewässertyp C6 sind breite Täler mit geringem Gefälle, Ebenen und Mündungsbereiche. Sie fließen durch alluviale Böden mit kohäsiven Ablagerungssedimenten. Sie können auch die Folge von weniger extremen glazialen Auswaschungen sein. Im Allgemeinen zeichnen sie sich durch ein geringes Sohlgefälle aus. Bei einem Gefälleverhältnis unter 0,001 wird das Gewässer in die Klasse C6c eingestuft. Das Ufermaterial besteht überwiegend aus Lehm und organischen Bestandteilen. Die Verlagerung des Gewässerbettes ist stark abhängig vom Uferbe-

wuchs. Der C6 Typ ist anfällig für Veränderungen sowohl in der Breite als auch in der Tiefe durch direkte Veränderungen am Gewässer, Abflussveränderungen und Veränderungen des Sedimenteintrages aus dem zugehörigen Einzugsgebiet.

### Gewässertyp E6

Der E6 Gewässertyp findet sich in einer Vielzahl von Landschaften wieder, die von Hochgebirgsebenen bis zu breiten alluvialen Tälern mit ausgebildeten Vorländern reichen. Das Gewässerbett und die Ufer sind recht stabil, so dass dieser Gewässertyp eine Bandbreite von Gefällen aufweisen kann. Dabei erhöht sich der Windungsgrad mit Zunahme des Gefälles. Die Uferbereiche sind im Allgemeinen bewachsen mit typischen Ufergewächsen. Aufgrund des Breiten- / Tiefenverhältnisses sind die E6 Gewässertypen hydraulisch sehr wirksam.

Obwohl von ROSGEN keine Gewässer in Europa untersucht wurden, treffen die Beschreibungen der Gewässertypen von ihm auf die untersuchten Gewässer im Allereinzugsgebiet sehr gut zu.

Bei der Einstufung nach ROSGEN bestätigt sich, dass Ilme, Leine und Aller zu Gewässern gehören, die stark durch ihr Einzugsgebiet und den Einträgen aus diesem geprägt werden. Landnutzungsänderungen sollten deshalb auch unter dem Gesichtspunkt des Gewässerschutzes betrachtet werden, denn die Menge des Sedimenteintrags ist ein entscheidender Faktor für die Gewässerentwicklung. Zur Bestimmung des potenziellen Bodenabtrags und der Abschätzung von Maßnahmenwirkungen können GIS gestützte Verfahren eine große Hilfe leisten (BERGHOLZ, 2003).

## 8 SIMULATION

Anhand einer Modellstudie sollen die Einflüsse von Gehölzbewuchs- und Laufveränderungen auf den Hochwasserabfluss verdeutlicht werden. Hierzu werden an den in Kapitel 6 und 7 untersuchten Gewässern abschnittsweise Wasserspiegellagensimulationen durchgeführt. Die Veränderungen in den Simulationsvarianten bezüglich der Wasserspiegellage und der mittleren Fließgeschwindigkeiten gegenüber dem Ausgangszustand sollen verdeutlichen, welche Veränderungen sich aufgrund einer geänderten Bewuchs- und Laufsituation ergeben können. Dabei werden auch Extremsituationen nachgebildet.

Nach einer Einführung in die Vorgehensweise, einschließlich einer Beschreibung der Varianten, wird zunächst der Ausgangszustand an den unterschiedlichen Untersuchungsabschnitten beschrieben und anschließend auf die Ergebnisse der Simulationsvarianten eingegangen. Im Anschluss werden die Auswirkungen der veränderten Situation auf einige Abflusswellen beispielhaft aufgezeigt und erläutert, inwiefern sich die veränderten Hochwassersituationen in den Beispielgebieten auswirken würden.

### 8.1 MODELLANFORDERUNGEN

Das Modell muss für die oben genannte Fragestellung in der Lage sein, verschiedene Bewuchssituationen hinreichend genau abzubilden. Dazu wurde das Wasserspiegellagenprogramm WASPTOOLS ausgewählt. Mit diesem ist es unter anderem möglich das Trennflächenverfahren von PASCHE (1984), welches vom DVWK (1991) für Berechnungen mit Bewuchseinfluss empfohlen wird (Kapitel 2), anzuwenden. Der Bewuchs wird hierbei durch mittlere Stammdurchmesser und Abstände in Fließrichtung sowie Querrichtung des Hauptgewässers charakterisiert (Anlage 2).

Die Entwicklung der natürlichen Lauform ist bei den betrachteten Gewässern mit einer Aktivierung der Mäandrierung verbunden. Dies bedeutet eine Verlängerung des Fließweges und somit einer Reduzierung des mittleren Gefälles im Hauptquerschnitt. Beides kann in das gewählte Wasserspiegellagenprogramm implementiert werden. Besondere Strömungseffekte in Flussmäandern, wie sie zum Beispiel in MEWES (2002) aufgeführt sind, werden dabei vernachlässigt.

## 8.2 VORGEHENSWEISE

Nach Auswahl der Abschnitte müssen die Geometrie-, Charakteristik- und Rauheitsdateien dem jeweiligen Untersuchungszustand angepasst werden. Die Geometriedateien enthalten Querprofilaten. Diese müssen gegebenenfalls ergänzt werden, um die Aue in ausreichender Breite bei Überschwemmungszuständen zu repräsentieren. In den Charakteristikdateien sind Informationen hinterlegt über die Einteilung des Querschnitts in Vorland und Hauptquerschnitt, Sohl- und Böschungsbereiche sowie Bereiche mit und ohne Bewuchs. Die Rauheitsdateien enthalten, wie der Name schon sagt, Angaben über die jeweilige Rauheit des in der Charakteristikdatei definierten Bereichs und für die Bewuchsbereiche die benötigten Stammdurchmesser und Abstände. Der Programmbeschreibung in der Anlage 2 können weitere Details entnommen werden.

Pro Abschnitt werden sechs Varianten untersucht. Tab. 8.1 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten, welche auf die in Kapitel 5.4 aufgrund des Leitbildes und Gewässerschutzziels abgeleiteten Bewuchs- und Verlaufszuständen basieren. Im Anschluss folgt eine detaillierte Beschreibung der Varianten. Unterschiede an den einzelnen Gewässern sind den jeweiligen Auswertungskapiteln zu entnehmen.

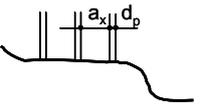
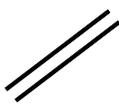
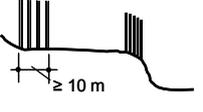
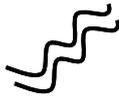
### **Variante 1**

Die Variante 1 entspricht dem Ist-Zustand der Profilaufnahme. Dies entspricht weitestgehend dem Zustand, wie er bei der Entstehung dieser Arbeit vorzufinden ist. Dabei bleiben etwaiger Einzelbewuchs und Bewuchsansammlungen unberücksichtigt. Die Konzentration liegt auf der geometrischen Form des Fließgewässers einschließlich seiner Aue. Da in der Vergangenheit viele Gewässer begradigt wurden, spiegelt sich dieses Bild auch in dem betrachteten Ist-Zustand der Variante 1 wider.

### **Variante 2**

In der Variante 2 wird eine Situation nachgestellt, in der vereinzelte Bäume einen Auwald bilden mit einem Stammdurchmesser von 0,5 m und einem durchschnittlichen Abstand von 3 m in Längs- und Querrichtung auf dem Vorland (Anlage 44, 53, 61 und 67). Der Hauptquerschnitt des Fließgewässers ist unverändert gegenüber der Variante 1 (Ist-Zustand).

Tab. 8.1 Variantenübersicht

Variante	Gehölzbewuchs		Gewässerverlauf
Variante 1 (Ausgangszustand)		kein Bewuchs	 Ist-Zustand (gerade)
Variante 2		Vorland: $d_p = 0,05 \text{ m}$ $a_x = 3,0 \text{ m}$ $a_z = 3,0 \text{ m}$	 Ist-Zustand (gerade)
Variante 3		Vorland:      Ufer: $d_p = 0,1 \text{ m}$ $d_p = 0,05 \text{ m}$ $a_x = 0,5 \text{ m}$ $a_x = 0,3 \text{ m}$ $a_z = 0,5 \text{ m}$ $a_z = 0,3 \text{ m}$	 Ist-Zustand (gerade)
Variante 4		Vorland:      Ufer: $d_p = 0,1 \text{ m}$ $d_p = 0,05 \text{ m}$ $a_x = 0,5 \text{ m}$ $a_x = 0,3 \text{ m}$ $a_z = 0,5 \text{ m}$ $a_z = 0,3 \text{ m}$	 Ist-Zustand (gerade)
Variante 5		kein Bewuchs	 Windungsgrad 1780
Variante 6		Vorland:      Ufer: $d_p = 0,1 \text{ m}$ $d_p = 0,05 \text{ m}$ $a_x = 0,5 \text{ m}$ $a_x = 0,3 \text{ m}$ $a_z = 0,5 \text{ m}$ $a_z = 0,3 \text{ m}$	 Windungsgrad 1780

### Variante 3

Das Charakteristische dieser Variante sind Bewuchsbereiche mit einer Breite von mindestens 10 m. Diese Bereiche werden überwiegend entlang des Hauptquerschnittes unregelmäßig die Uferseite wechselnd angeordnet. Dabei wird an diesen Stellen je nach Gewässer von einem 1 m oder breiterem Bewuchssaum im Bereich der Uferböschung ausgegangen. Vereinzelt Bewuchsbereiche werden zudem sporadisch etwas entfernt vom Hauptquerschnitt auf dem Vorland platziert. Die angenommenen Stammdurchmesser auf dem Vorland betragen dabei 0,1 m mit einem mittleren Abstand von 0,5 m. Im Hauptquerschnitt wird von dünneren Bewuchselementen ausgegangen und ein Stammdurchmesser von 0,05 m mit einem Abstand zueinander von 0,3 m angesetzt. Der Gewässerverlauf entspricht der Variante 1 (Anlage 45, 54, 62 und 68).

### Variante 4

In der Variante 4 wird von dichtem Bewuchs auf dem kompletten Vorland ausgegangen. Der mittlere Stammdurchmesser beträgt dabei 0,1 m und es wird ein mittlerer Abstand von 0,5 m in Längs- und Querrichtung angenommen. Am Ufer des Hauptquerschnitts wird abwechselnd ein Bewuchssaum von 1 m Breite wie in Variante 3 mit den gleichen Abmessungen angesetzt. Der Verlauf des Gewässers entspricht dem Verlauf des Ist-Zustandes entsprechend Variante 1 (Anlage 46, 55, 63 und 69).

### Variante 5

In Variante 5 wird kein Bewuchs angesetzt. Der Verlauf des Gewässers erhält eine Steigerung des Windungsgrades, der sich an dem aus historischen Karten ermittelten Windungsgrad orientiert (Kapitel 5). Der entsprechende Windungsgrad ist der Simulationsbeschreibung des jeweiligen Gewässers zu entnehmen. Die angesetzten Änderungen bezüglich Gefälle und Fließweg sind in Tab. 8.2 aufgeführt.

**Tab. 8.2** *Änderung des Mäandrierungsfaktors und der damit verbundenen Verlängerung des Talweges und der Reduzierung des Sohlgefälles im Hauptquerschnitt in den untersuchten Teilabschnitten*

<b>Gewässer</b>	<b>Bewer</b>	<b>Ilme</b>	<b>Leine</b>	<b>Aller</b>
<b>Windungsgrad Variante 1 [%]</b>	15	25	5	45
<b>Sohlgefälle Variante 1 [‰]</b>	9,40	2,90	0,50	0,20
<b>Windungsgrad Variante 5 und 6 [%]</b>	70	35	40	60
<b>Sohlgefälle Variante 5 und 6 [‰]</b>	6,40	2,10	0,40	0,18
<b>Verlängerung des Talweges [m]</b>	470	540	750	1.700

Der Mäandrierungsfaktor gibt das Verhältnis zwischen Lauflänge des Hauptgewässers und der entsprechenden Tallänge wieder. Durch die Erhöhung des Windungsgrades verlängert sich der Talweg des Hauptquerschnitts und das Sohlgefälle reduziert sich. Die Verlängerung erstreckt sich gleichmäßig über den Gewässerabschnitt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Varianten untereinander werden die Bezeichnungen der Querprofile, welche der Kilometrierung im Ausgangszustand entsprechen, beibehalten (Anlage 47, 56, 64 und 70).

### Variante 6

Die Variante 6 ist eine Kombination der Variante 4 mit dichtem Auwaldbewuchs und einem Mäandrierungszustand wie um 1780. Die Details können den Beschreibungen der Varianten 4 und 5 entnommen werden (Anlage 48, 57, 65 und 71).

## 8.3 BESCHREIBUNG DER SIMULATIONSABSCHNITTE

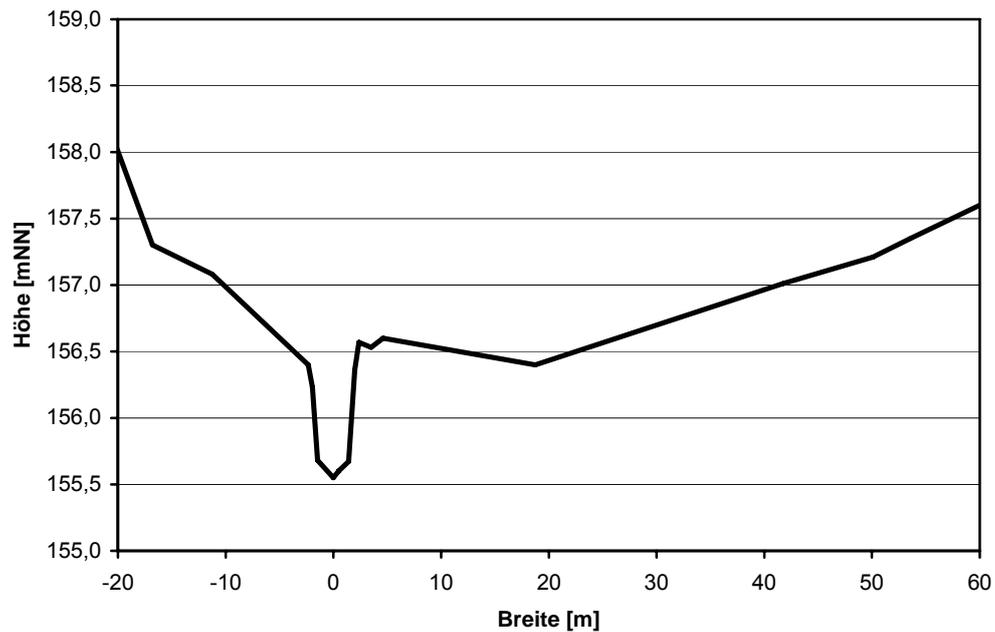
### 8.3.1 Simulationsabschnitt Bewer

Der ausgewählte Teilabschnitt an der Bewer liegt zwischen Lüthorst und Deitersen (Anlage 42). In dem 1 km langen Abschnitt liegen 22 Profile mit einem Abstand von ca. 50 m zueinander vor (Anlage 43). Ein charakteristischer Querschnitt dieses Abschnittes ist Abb. 8.1 zu entnehmen. Das mittlere Sohlgefälle im Hauptquerschnitt beträgt ca. 9 ‰ und die Hauptquerschnitte im betrachteten Abschnitt haben eine Breite von etwa 4 m und eine Tiefe von ca. 1 m.

Für die Abflüsse und Anfangswasserstände wurden die in der Tab. 8.3 aufgeführten Größen angenommen.

Tab. 8.3 *Eingangsgrößen für die Simulationsläufe an der Bewer*

Zustand	Abfluss Q [m <sup>3</sup> /s]	Anfangswasserspiegel (km 4,730) [mNN]
bordvoll	3,0	155,0
leicht ausufernd	4,8	155,3
HQ10	5,5	155,4
HQ100	9,0	155,5



**Abb. 8.1** *Charakteristisches Gewässerprofil der Bever (km 4,884)  
(überhöhte Darstellung)*

### 8.3.2 Simulationsabschnitt Ilme

Der betrachtete Gewässerabschnitt an der Ilme liegt zwischen Markoldendorf und Hullersen. Eine Besonderheit dieses Abschnittes ist der Zufluss der Dieße. Dieser muss bei den Simulationen mit einer Abflussänderung berücksichtigt werden. Die angesetzten Abflüsse der verschiedenen Zustände sind in Tab. 8.4 aufgeführt.

Dieser Abschnitt ist 1,6 km lang und es liegen 15 Profile mit einem mittleren Abstand von etwa 100 m vor (Anlage 51 und 52). Ein charakteristisches Gewässerprofil der Ilme in diesem Bereich ist der Abb. 8.2 zu entnehmen. Die mittlere Breite der Querschnitte beträgt 11 m und die mittlere Gewässertiefe 1,5 m. Das mittlere Gefälle beträgt oberhalb des Dießezuflusses 4 ‰ und unterhalb 2,5 ‰.

Tab. 8.4 **Eingangsgrößen für die Simulationsläufe am Ilmeabschnitt**  
(Abfluss Q vor / nach Dießezufluss)

Zustand	Abfluss Q [m³/s]	Anfangswasserspiegel (km 9,229) [mNN]
bordvoll	14 / 15	118,0
leicht ausufernd	26 / 27	118,3
HQ10	46 / 63	118,9
HQ100	75 / 98	119,4

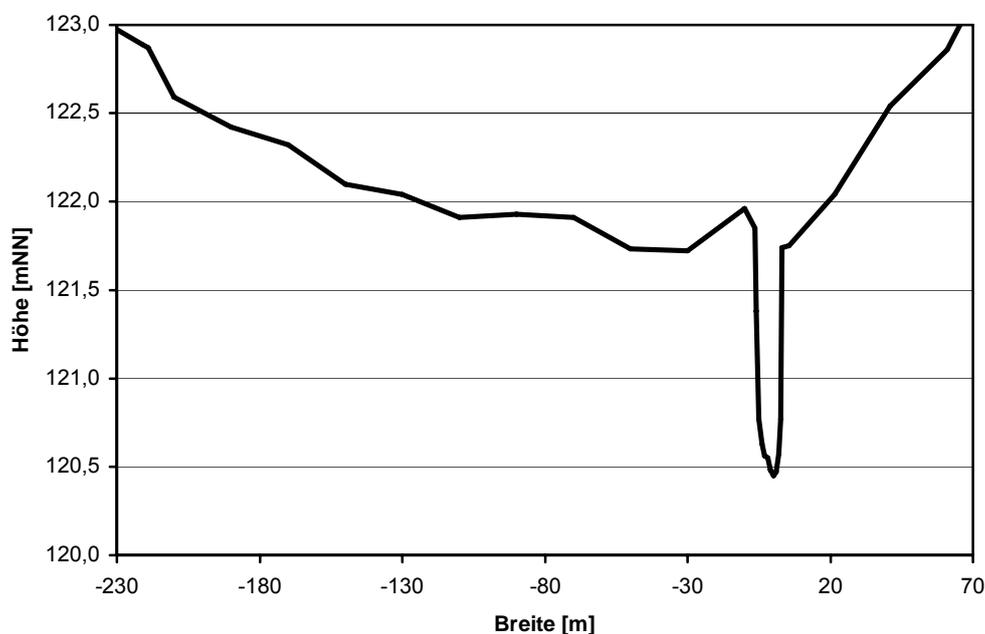


Abb. 8.2 **Charakteristisches Gewässerprofil im betrachteten Ilmeabschnitt**  
(km 10,563) (überhöhte Darstellung)

### 8.3.3 Simulationsabschnitt Leine

Im Bereich des betrachteten Leineabschnittes wurde für die Simulation ein ca. 3,5 km langer Abschnitt unterhalb der Ortschaft Greene ausgewählt. Für diesen Abschnitt liegen 11 Profile vor (Anlage 59 und 60). Es handelt sich hierbei um einen ausgebauten Gewässerabschnitt. Ein charakteristisches Querprofil dieses Abschnittes ist der Abb. 8.3 zu entnehmen. Die mittlere Breite des Hauptquerschnitts liegt bei 30 m und die mittlere Tiefe bei 5,5 m. Das mittlere Gefälle in diesem Abschnitt beträgt 0,6 ‰.

Für die Abflüsse und Anfangswasserstände werden die in der Tab. 8.5 aufgeführten Größen abgeleitet.

Tab. 8.5 *Eingangsgrößen für die Simulationsläufe am Leineabschnitt*

Zustand	Abfluss Q [m³/s]	Anfangswasserspiegel (km 171,264) [mNN]
bordvoll	210	98,5
leicht ausufernd	360	99,0
HQ10	286	98,7
HQ100	622	99,7

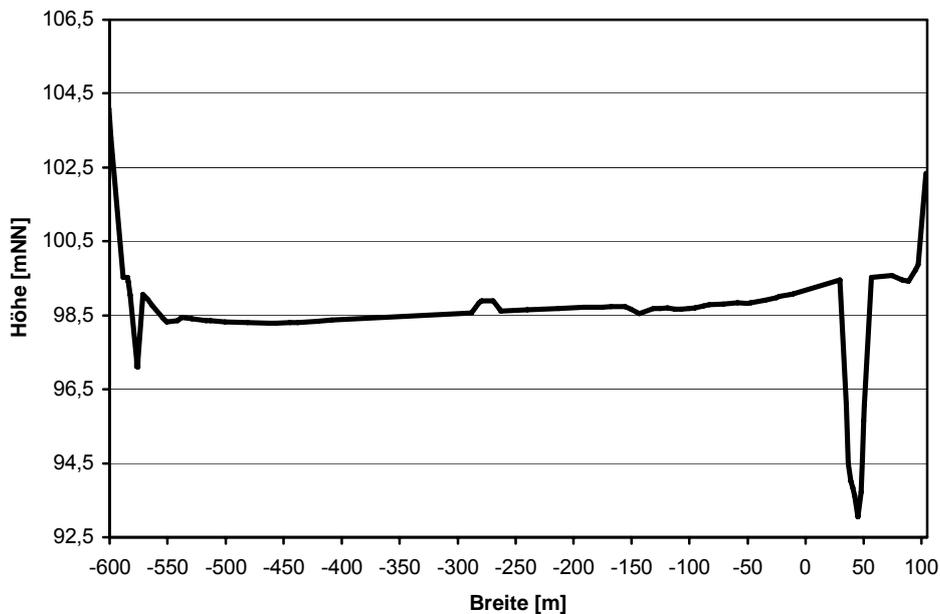


Abb. 8.3 *Typisches Gewässerprofil der Leine unterhalb der Ortschaft Greene (km 172,782) (überhöhte Darstellung)*

### 8.3.4 Simulationsabschnitt Aller

Der Simulationsabschnitt an der Aller liegt unterhalb der Leinemündung bei Rethem (Anlage 66) und ist 12 km lang. Für diesen Abschnitt liegen 9 Profile vor. Ein charakteristisches Gewässerprofil der Aller in diesem Abschnitt ist der Abb. 8.4 zu entnehmen. Die mittlere Breite des Hauptquerschnitts beträgt ca. 80 m und hat eine gemittelte maximale Tiefe von 4,5 m. Das mittlere Gefälle liegt bei 0,2 ‰.

Tab. 8.6 *Eingangsgrößen für die Simulationsläufe am Allerabschnitt*

Zustand	Abfluss Q [m <sup>3</sup> /s]	Anfangswasserspiegel (km 24,670) [mNN]
bordvoll	215	15,3
leicht ausufernd	230	15,4
HQ10	760	17,0
HQ100	1430	17,4

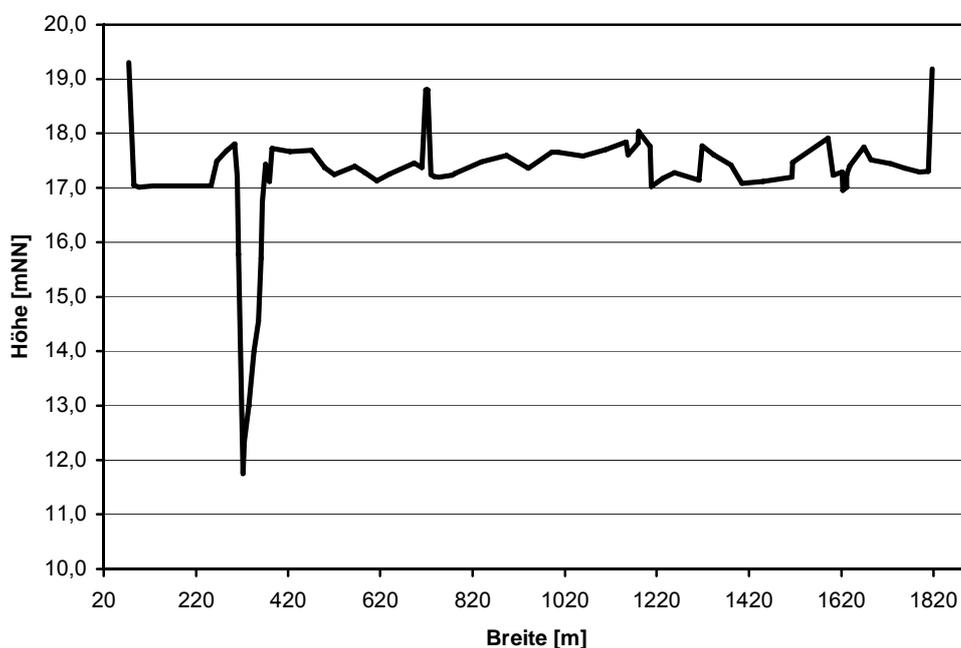


Abb. 8.4 *Typisches Gewässerprofil der Aller nach Einmündung der Leine (km 34,170) (überhöhte Darstellung)*

Die in den Simulationsläufen zugrunde gelegten Abflüsse und Anfangswasserstände der vier untersuchten Zustände sind in Tab. 8.6 aufgeführt. Die Abflüsse reichen von 215 m<sup>3</sup>/s im bordvollen Zustand bis zu 1.430 m<sup>3</sup>/s im HQ100 Zustand in diesem Abschnitt. Der Anfangswasserspiegel liegt dabei zwischen 15,3 und 17,4 mNN.

## 8.4 AUSGANGSZUSTAND (VARIANTE 1)

### 8.4.1 Ausgangszustand Bewer

Die Variante 1 spiegelt den Ausgangszustand wider. Die sich bei den untersuchten Varianten einstellenden Wasserstände sowie die Sohltiefstpunkte, die den Talweg kennzeichnen, und die Uferbegrenzungen sind Abb. 8.5 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass im oberen Verlauf des untersuchten Abschnittes das rechte und linke Ufer sehr hoch bzw. die Gewässersohle sehr tief liegt, so dass es in diesem Bereich zu keinen Überschwemmungen kommt. Sogar der HQ100 Abfluss von  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  kann im Hauptquerschnitt abgeführt werden.

Weiterhin sind in Abb. 8.5 die Differenzen der Wasserspiegellagen im leicht ausufernden, HQ10 und HQ100 Zustand gegenüber dem bordvollen Zustand aufgeführt. Die Wasserspiegeldifferenzen verdeutlichen, inwieweit sich die Wasserstände in den verschiedenen Zuständen unterscheiden. Die Wasserspiegeldifferenzen zum bordvollen Zustand betragen im leicht ausufernden Zustand etwa 11 bis 30 cm, im HQ10 Zustand 15 bis 40 cm und im HQ100 Zustand 26 bis 68 cm. Es erfolgt keine einheitliche Erhöhung des Wasserspiegels entlang des betrachteten Abschnittes. Im oberen Abschnitt ohne Ausuferungen steigt der Wasserspiegel mit steigendem Abfluss stärker an als in den Bereichen mit Ausuferungen, wie dies etwa bei Kilometer 5,100 der Fall ist. An der Differenzlinie des HQ100 ist dieses besonders deutlich zu erkennen.

Sonstige Schwankungen der Wasserspiegelhöhen an den einzelnen Profilen und somit bei den Wasserspiegeldifferenzen ergeben sich aus lokal unterschiedlichen Gefällesituationen und leichten Abweichungen bei der Querschnittsform. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass sich bei einem größeren Gefälle die Geschwindigkeit erhöht und damit der Wasserspiegel fällt. Zudem stellt sich bei einer Einengung des Querschnitts ein niedrigerer Wasserspiegel ein, da sich die Fließgeschwindigkeit hierdurch ebenfalls erhöht. Der sich an einer definierten Stelle einstellende Wasserspiegel muss bei strömendem Abfluss stets im Zusammenhang mit dem unterhalb liegenden Bereich gesehen werden, da sich Störungen im strömenden Abfluss, wie er sich zumeist bei den hier untersuchten Gewässern einstellt, entgegen der Fließrichtung auswirken. Dies gilt für schießenden Abfluss nicht. Hierbei wirken sich Störungen lediglich stromabwärts aus.

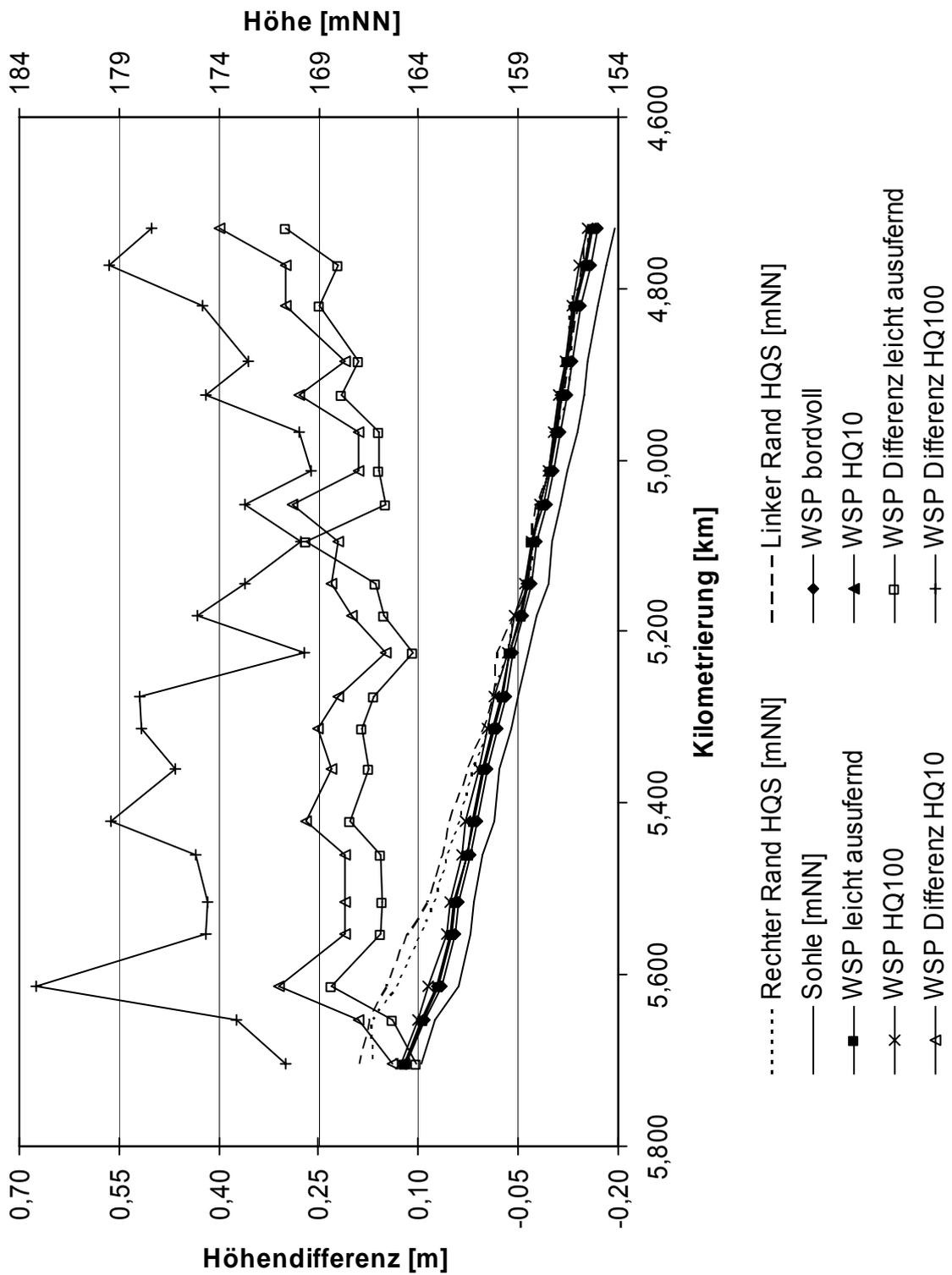
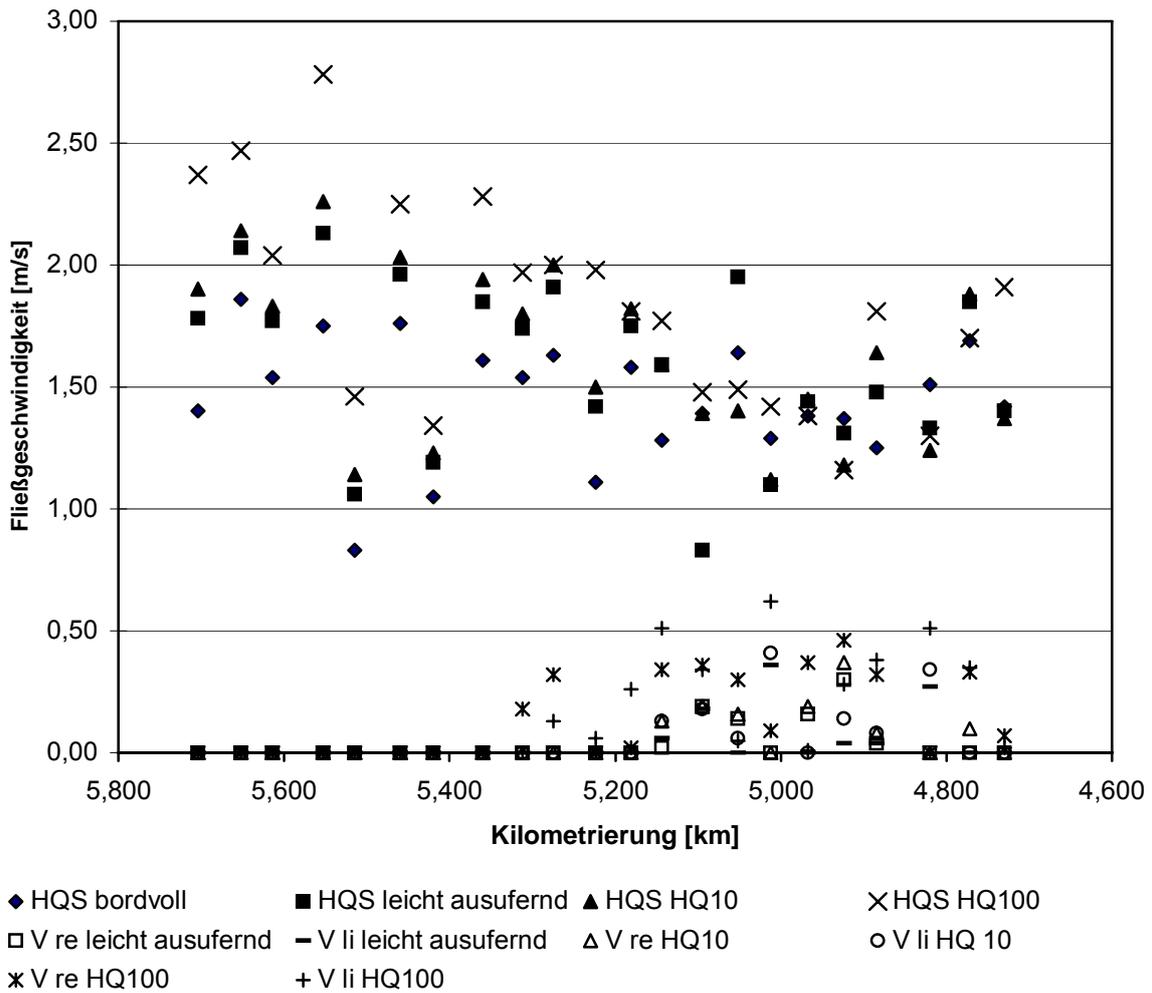


Abb. 8.5 *Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 an der Bewer*



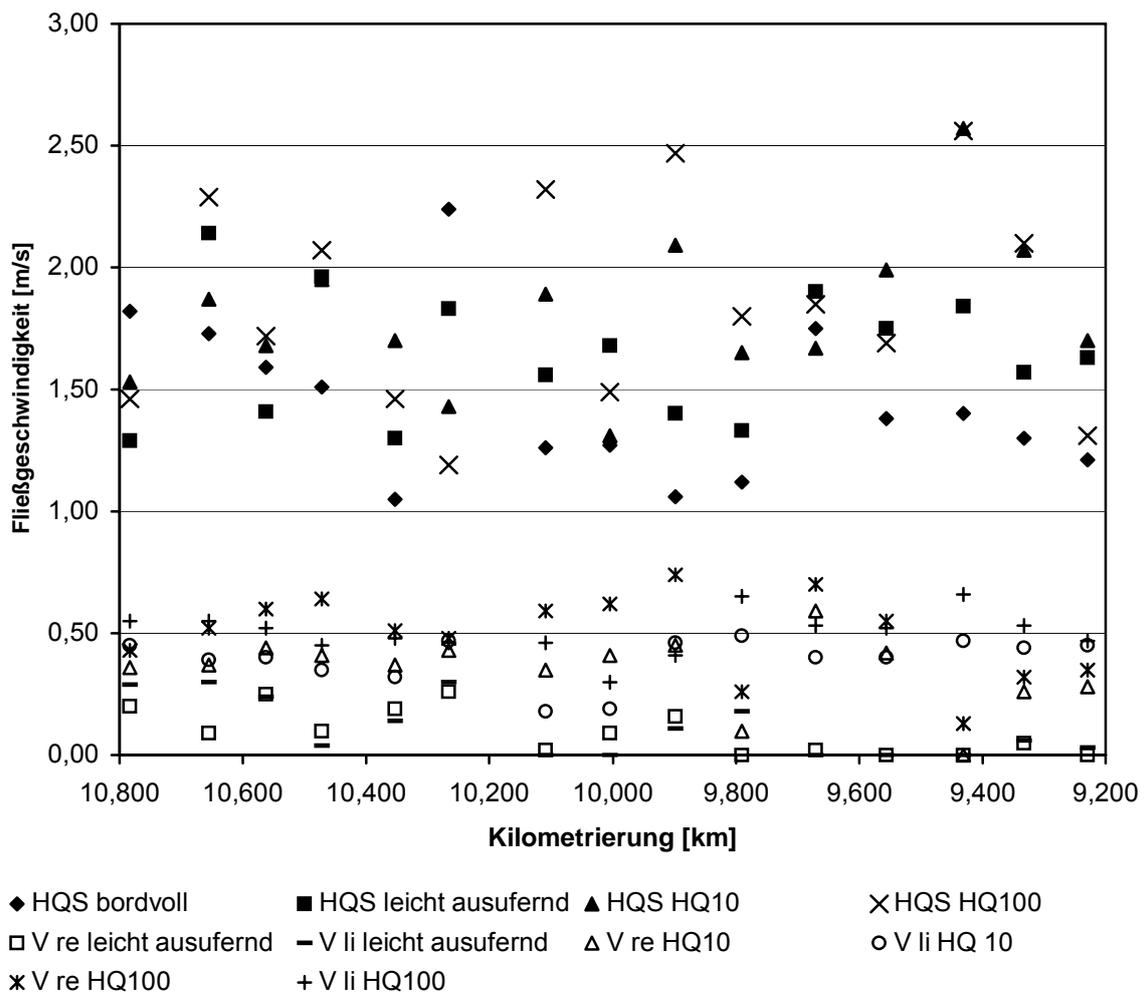
**Abb. 8.6** *Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 an der Bewer*

Die sich einstellenden mittleren Fließgeschwindigkeiten bei der Variante 1 können der Abb. 8.6 entnommen werden. Es stellen sich im bordvollen Zustand Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,7 und 1,8 m/s, im leicht ausufernden Zustand zwischen 0,7 und 2,2 m/s, im HQ10 Zustand zwischen 1,1 und 2,3 m/s und im HQ100 Zustand zwischen 1,3 und 2,8 m/s ein. Die Fließgeschwindigkeiten auf dem Vorland liegen zwischen 0 und 0,6 m/s.

### 8.4.2 Ausgangszustand Ilme

Abb. 8.8 zeigt den Längsschnitt des betrachteten Abschnittes. Der Zufluss der Dieße liegt bei km 10. Oberhalb des Zuflusses liegt das Gefälle im Mittel bei 4 ‰. Weiter unterhalb beträgt das mittlere Gefälle 2,5 ‰. Die Gefälleunterschiede wirken sich stark auf die Wasserspiegellagen aus, die ebenfalls der Abb. 8.8 entnommen werden können. Die Differenzen der Wasserspiegellagen bei den untersuchten Zuständen leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand fallen im Unterlauf mit geringerem Sohlgefälle entsprechend höher aus.

Die sich einstellenden mittleren Fließgeschwindigkeiten schwanken zwischen 1 m/s und 2,5 m/s (Abb. 8.7). Die starken Schwankungen können auf das unregelmäßige Sohlgefälle zurückgeführt werden. Die Geschwindigkeiten auf dem Vorland liegen maximal bei 0,7 m/s.



**Abb. 8.7 Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 an der Ilme**

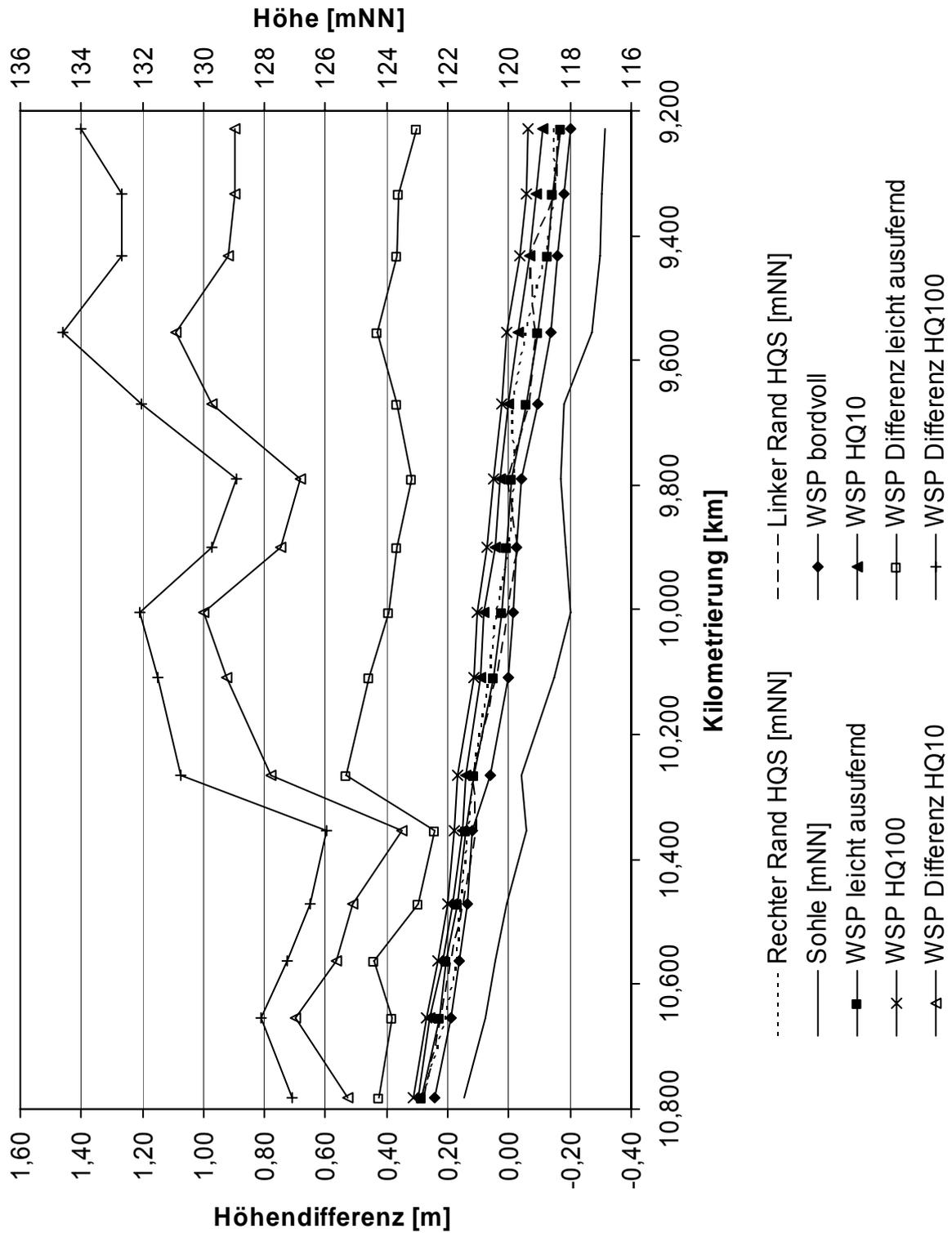
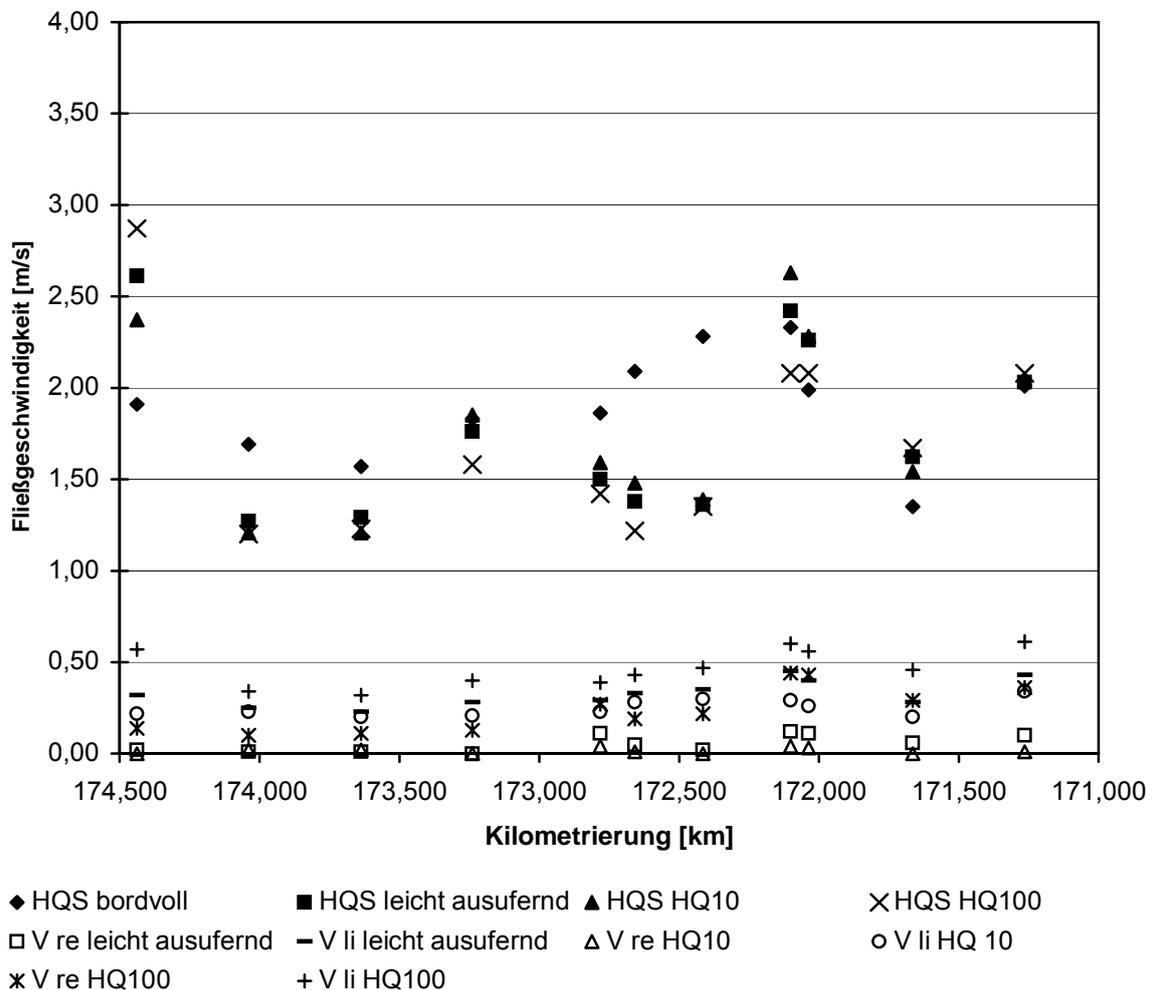


Abb. 8.8 *Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 an der Ilme*

### 8.4.3 Ausgangszustand Leine

Die Variante 1 beschreibt den Ausgangszustand am Leineabschnitt unterhalb der Ortschaft Greene ohne Bewuchseinflüsse und mit geradlinigem Verlauf.

Durch den Ausbau der Leine in diesem Abschnitt liegt der HQ10 Abfluss nur geringfügig über dem bordvollen Abfluss. Das bedeutet, dass kleinere Hochwässer im Hauptquerschnitt abgeführt werden können, ohne dass es zu Überschwemmungen kommt (Abb. 8.10). Die sich einstellenden Wasserstände beim HQ10 liegen maximal 38 cm über dem sich im bordvollen Zustand einstellenden Wasserstand. Die kleinste Differenz ergibt sich am obersten Profil mit nahezu 0 cm.



**Abb. 8.9** *Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 am Leineabschnitt*

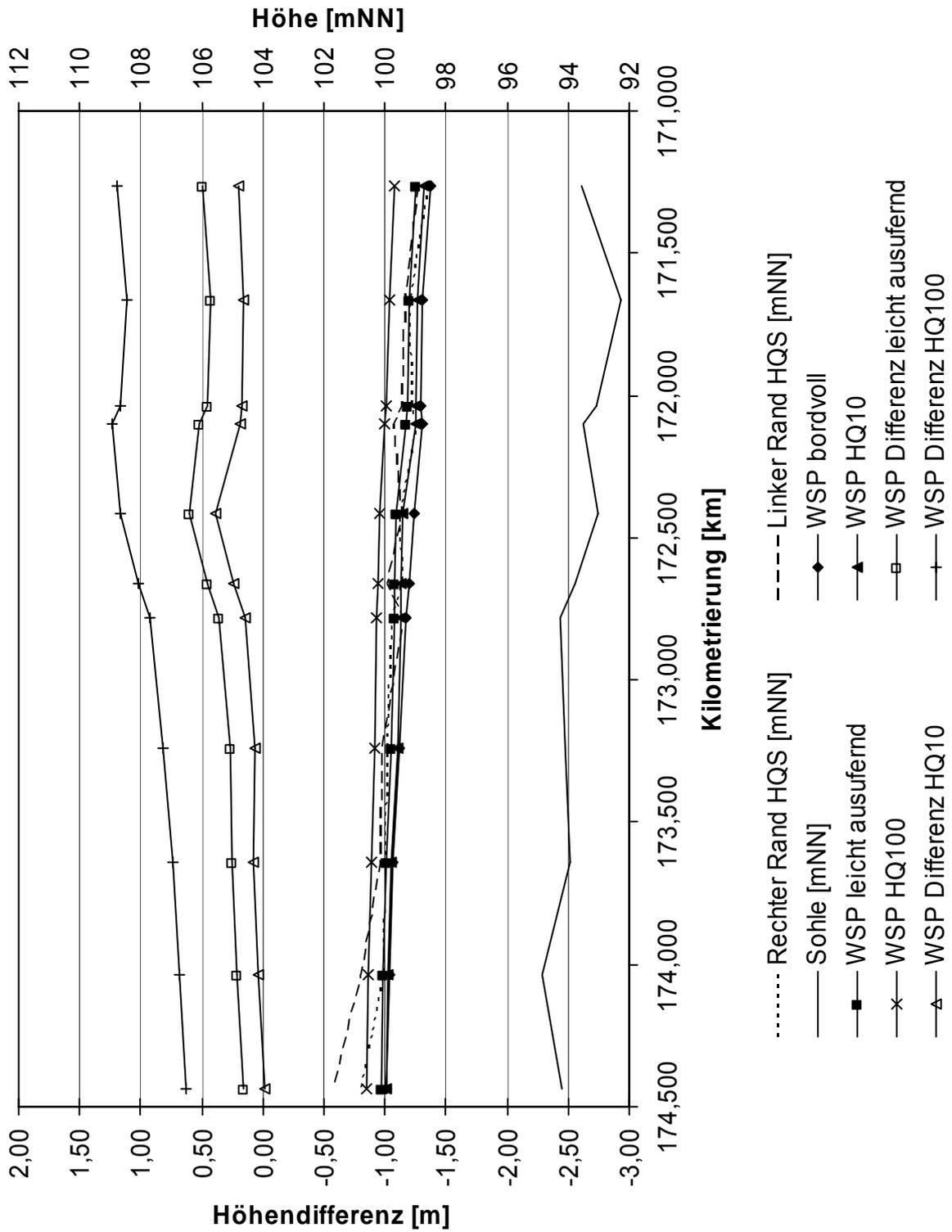


Abb. 8.10 *Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 am Leineabschnitt*

Der leicht ausufernde Zustand wurde mit einem Abfluss von  $360 \text{ m}^3/\text{s}$  und einem Anfangswasserspiegel von  $99,0 \text{ m}$  über NN angenommen. Für diesen Zustand ergibt sich ein maximaler Wasserspiegelanstieg gegenüber dem bordvollen Zustand von  $60 \text{ cm}$  und ein minimaler Anstieg von  $20 \text{ cm}$ . Für den HQ100 Zustand ergibt sich ein Anstieg von maximal  $1,25 \text{ m}$  und minimal  $60 \text{ cm}$ .

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt liegen im bordvollen Zustand zwischen  $1,40 \text{ m/s}$  und  $2,40 \text{ m/s}$  (Abb. 8.9). Die Geschwindigkeiten im Hauptquerschnitt der drei weiteren betrachteten Zustände liegen über der Geschwindigkeit im bordvollen Zustand, wenn es zu keinen starken Ausuferungen kommt. Finden jedoch erhebliche Ausuferungen aufgrund des gestiegenen Wasserstandes statt, so sinkt die Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt. Dies ist auf die Interaktionsvorgänge zwischen Hauptquerschnitt und Vorland zurückzuführen (Kapitel 2).

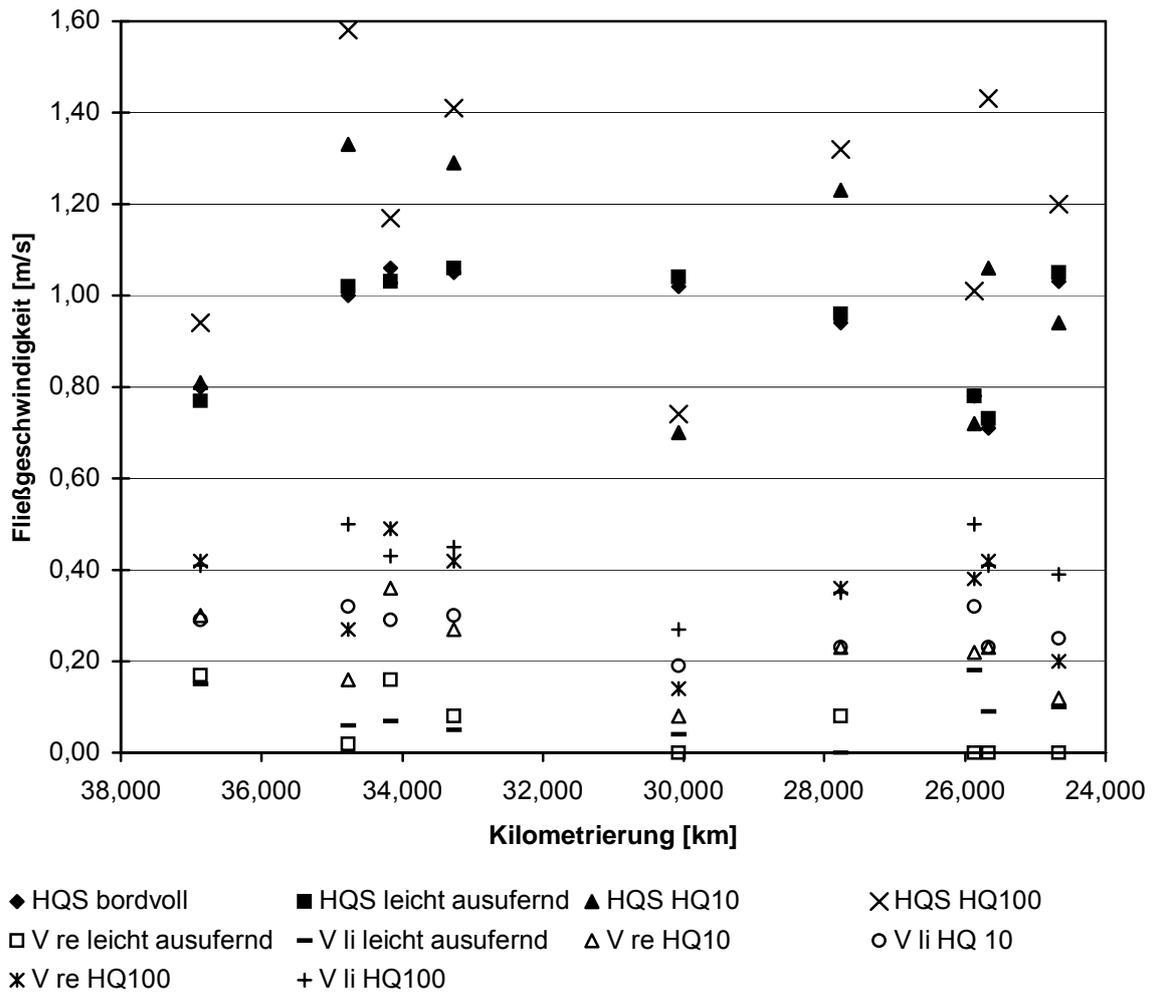
Die höchsten Fließgeschwindigkeiten auf dem Vorland werden im HQ100 Fall erreicht und betragen maximal  $0,6 \text{ m/s}$  (Abb. 8.9).

#### **8.4.4 Ausgangszustand Aller**

Der Längsschnitt des simulierten Abschnittes an der Aller ist der Abb. 8.12 zu entnehmen. Weiterhin sind die Wasserspiegellagen bei den vier untersuchten Zuständen sowie ihre Differenzen zum bordvollen Wasserspiegel aufgeführt.

Die Wasserspiegellagen der Zustände bordvoll und leicht ausufernd liegen dicht beisammen. Die Wasserspiegellage des HQ10 Zustandes liegt in etwa  $1,0 \text{ m}$  bis  $1,7 \text{ m}$  über der Wasserspiegellage des bordvollen Zustands. Im HQ100 Zustand stellt sich eine Wasserspiegellage ein, die in etwa  $1,5 \text{ m}$  bis  $2,1 \text{ m}$  höher als im bordvollen Zustand liegt.

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt liegen in den Zuständen bordvoll und leicht ausufernd zwischen  $0,7 \text{ m/s}$  und  $1,1 \text{ m/s}$  (Abb. 8.11). Die Spannweite erhöht sich auf  $0,7 \text{ m/s}$  bis  $1,3 \text{ m/s}$  im HQ10 Zustand und auf  $0,7 \text{ m/s}$  bis  $1,6 \text{ m/s}$  im HQ100 Zustand. Im Vorland stellen sich Fließgeschwindigkeiten bis zu  $0,5 \text{ m/s}$  ein.



**Abb. 8.11** *Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland bei der Variante 1 am Allerabschnitt*

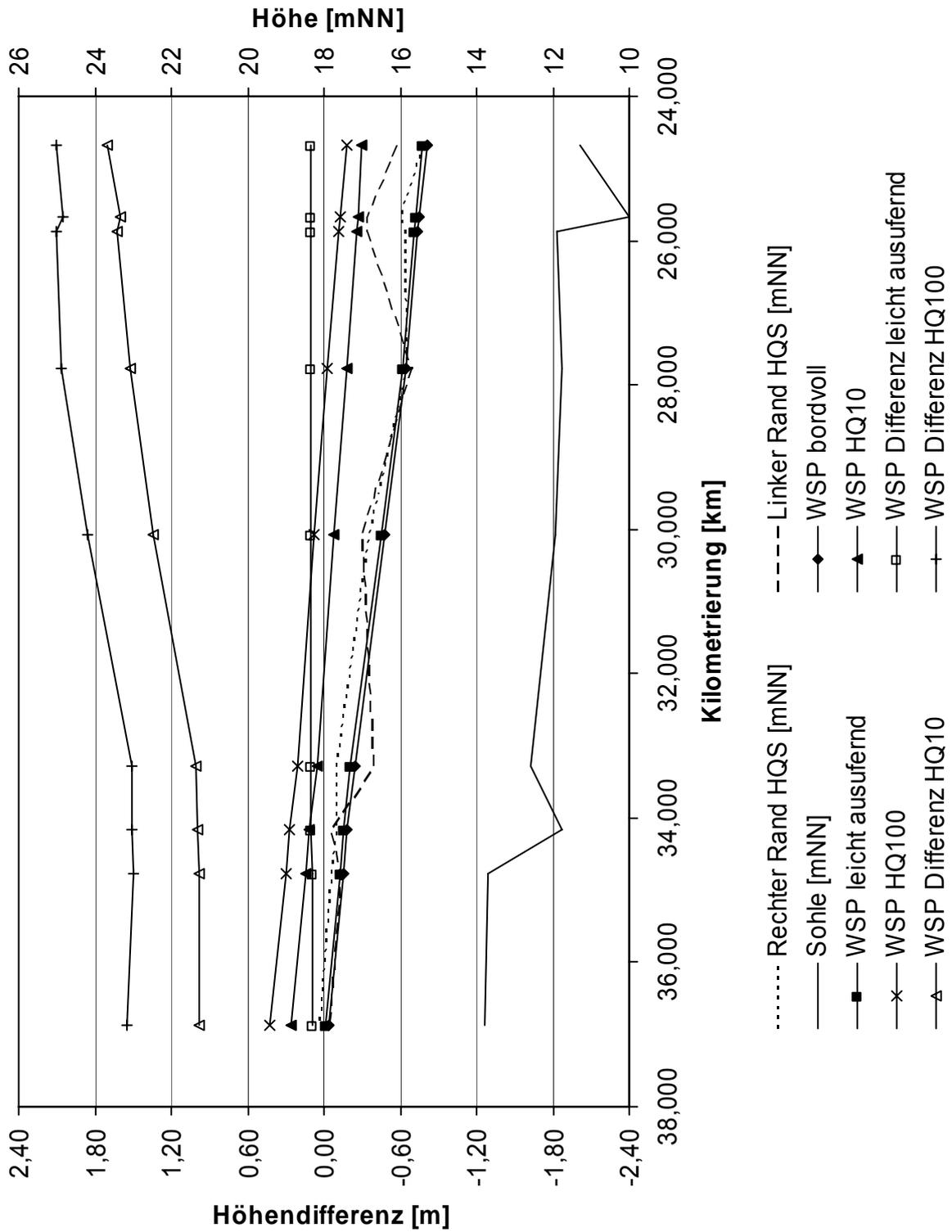


Abb. 8.12 *Wasserspiegellagen und Differenzen der Zustände leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 gegenüber dem bordvollen Zustand der Variante 1 am Alle-rabschnitt*

## 8.5 ÄNDERUNG DES BORDVOLLEN ABFLUSSES

Bei Änderung der Bewuchssituation im Hauptquerschnitt und einer Veränderung des Gefälles ändert sich der bordvolle Abfluss. Je stärker die Fließgeschwindigkeit durch ein reduziertes Gefälle bzw. eine erhöhte Rauheit durch Bewuchs herabgesetzt wird, desto höher steigt der Wasserspiegel und es kommt verstärkt zu Ausuferungen. Bei einer Einengung des Abflussquerschnittes durch Bewuchs kann sich die Fließgeschwindigkeit erhöhen und eine Reduzierung des Wasserstandes bewirken.

In der Tab. 8.7 sind die Veränderungen des bordvollen Zustandes bei den verschiedenen Varianten an den untersuchten Gewässerabschnitten zusammengestellt.

An der Bever macht sich der Einfluss durch Bewuchs relativ schwach bemerkbar. Bei der Annahme von Böschungsbewuchs abwechselnd rechts oder links an der Böschung (Variante 3 und 4) reduziert sich der bordvolle Abfluss lediglich um 3 %. Hierbei ist zu beachten, dass im oberen Bereich des Untersuchungsabschnitts die Bever verhältnismäßig tief ist.

Im Untersuchungsabschnitt der Bever in Kapitel 6.1.2 wurde für den dort untersuchten Abschnitt ein bordvoller Abfluss von 5 m<sup>3</sup>/s und beidseitiger Bewuchs angesetzt. Dabei ergaben sich Reduzierungen des bordvollen Abflusses von bis zu 30 %.

Der Windungsgrad der Bever ist laut historischer Karten sehr hoch und liegt bei nahezu 70 % (Kapitel 5). Nach entsprechender Verlängerung des begradigten Verlaufes, ergibt sich hierdurch eine Abnahme des bordvollen Abflusses um 13 % (Variante 5). Eine Kombination mit dichtem Auwald und hohem Windungsgrad (Variante 6) ergibt eine Reduzierung des bordvollen Abflusses um 17 %.

An der Ilme liegt die Reduzierung des bordvollen Abflusses in ähnlicher Größenordnung wie an der Bever. Die Variante mit dichtem Auwald (Variante 4) reduziert den bordvollen Abfluss um 7 %. Durch die Erhöhung des Windungsgrades von 25 % auf 35 % wird eine Reduzierung des bordvollen Abflusses von 14 % erzielt. In der Variante 6 mit dichtem Auwald und einem verlängertem Fließweg reduziert sich der bordvolle Abfluss um 21 %.

Für den simulierten Abschnitt an der Leine ergibt sich eine Reduzierung des bordvollen Abflusses um 14 % durch den Einfluss von Bewuchs und eine 10 %ige Reduzierung durch die Änderung des Gefälles. Eine Kombination aus beidem verringert den bordvollen Abfluss um 21 %. In diesem Abschnitt an der Leine sind die Böschungen relativ steil. Die Reduzierung von 14 % entspricht der Größenordnung für steile Böschungen, wie sie in der Untersuchung zwischen Elze und Sarstedt ermittelt wurde (Kapitel 6.1.1).

Tab. 8.7 *Änderung des bordvollen Abflusses in den verschiedenen Varianten (unter Beibehaltung der Querschnittsform)*

Variante	Q <sub>b</sub> = bordvoller Abfluss [m <sup>3</sup> /s] P = prozentualer Abfluss bezogen auf den Ausgangszustand					
	Bewer		Ilme		Leine	
	Q <sub>b</sub>	P	Q <sub>b</sub>	P	Q <sub>b</sub>	P
	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]
1	3,0	100	14 / 15	100	210	100
2	3,0	100	14 / 15	100	210	100
3	2,9	97	13 / 14	93	180	86
4	2,9	97	13 / 14	93	180	86
5	2,6	87	12 / 13	86	190	90
6	2,5	83	11 / 12	79	165	79

Bei den hier untersuchten Varianten konnte an der Aller keine Änderung des bordvollen Abflusses festgestellt werden. Dies steht im Zusammenhang mit der großen Gewässerbreite im untersuchten Abschnitt und der geringen Veränderung des Windungsgrades in den Varianten 5 und 6.

## 8.6 ÄNDERUNG DER WASSERSPIEGELLAGE UND DER FLIEßGESCHWINDIGKEIT

Zur besseren Vergleichbarkeit werden alle Varianten mit dem gleichen Anfangswasserspiegel und Abfluss wie in der Ausgangssituation (Variante 1) simuliert. Dabei ergeben sich die in Tab. 8.8 aufgeführten mittleren Wasserspiegeldifferenzen und die in Tab. 8.9 angegebenen mittleren Fließgeschwindigkeitsunterschiede.

Die höchsten Wasserspiegelanstiege sind in der Variante 6 (erhöhter Windungsgrad und dichter Auwald auf dem Vorland) zu verzeichnen. Die größten Fließgeschwindigkeitserhöhungen im Hauptquerschnitt ergeben sich in der Variante 4 (dichter Auwald auf dem Vorland) und die größten Reduzierungen in der Variante 5 (erhöhter Windungsgrad) (Tab. 8.9). Diese heben sich in der Variante 6 zum Teil auf.

Durch die Gefällereduzierung bei einem verlängerten Gewässerverlauf verringert sich die Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt des Gewässers. Beim Bewuchs ist

eine Reduzierung oder Erhöhung der Fließgeschwindigkeit davon abhängig, ob der Einfluss der Turbulenzen, die durch den Bewuchs entstehen, höher ist und die Geschwindigkeit reduzieren oder ob die Einschnürung des durchflossenen Querschnitts durch den Bewuchs so stark ist, dass es zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit kommt.

An der Bever kommt es durch Geschwindigkeitserhöhungen bei der Variante 2 im leicht ausufernden und HQ10 Zustand, bei der Variante 3 im leicht ausufernden Zustand und bei der Variante 4 im HQ100 Zustand zu einer Wasserspiegelsenkung. Die untersuchten Bewuchszustände sorgten für keine signifikanten Erhöhungen des Wasserspiegels. Durch die Erhöhung des Windungsgrades und der damit verbundenen Verlängerung des Fließweges und der Gefällereduzierung ergibt sich ein Anstieg des Wasserspiegels von bis zu 8 cm bei einer Fließgeschwindigkeitsabnahme von bis zu 0,2 m/s.

An der Ilme ergibt sich bei den Bewuchsvarianten 2 bis 4 im leicht ausufernden Zustand ebenfalls eine leichte Wasserspiegelabsenkung. Im HQ100 Zustand kommt es jedoch zu einer Anhebung des Wasserspiegels von bis zu 19 cm bei dichtem Auwaldbewuchs. Die Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt der Ilme erhöht sich dabei um 0,3 m/s. Durch den erhöhten Windungsgrad ergibt sich ein Wasserspiegelanstieg von 5 cm bis 7 cm bei einer Reduzierung der Fließgeschwindigkeit um ca. 0,2 m/s. In der kombinierten Variante 6 liegt der Wasserspiegel um bis zu 35 cm höher als im Ausgangszustand.

An der Leine ergeben sich infolge der untersuchten Bewuchszustände hohe Wasserspiegelanstiege. Die höchste Anhebung im Vergleich zum Ausgangszustand ist bei der Variante 4 (dichter Auwald) im HQ100 Zustand mit 1,2 m zu verzeichnen. Die Fließgeschwindigkeit erhöht sich dabei um 0,4 m/s. Bezüglich der Fließgeschwindigkeiten ist bei der Leinevariante 3 (Bewuchsbereiche) eine Reduzierung von bis zu 0,2 m/s im Hauptquerschnitt auffällig. Der Einfluss der Turbulenz, verursacht durch den Bewuchs entlang des Leineufers, macht sich hier besonders bemerkbar.

Durch die Verlängerung des Fließweges (Variante 5) werden Fließgeschwindigkeitsreduzierungen im Vergleich zum Ausgangszustand in gleicher Größenordnung wie in der Variante 3 erzielt. Entsprechend ergibt sich ein gleich großer leichter Wasserspiegelanstieg. Lediglich im bordvollen Zustand liegt der Wasserspiegelanstieg mit über 30 cm in der Variante 3 durch den Einfluss von Uferbewuchs sehr viel höher. Der höchste Wasserspiegelanstieg ist an der Leine bei Variante 6 im HQ100 Zustand mit 1,4 m zu verzeichnen.

Tab. 8.8 *Mittlere Wasserspiegeldifferenz [cm] zur Variante 1 (Ausgangszustand)  
(Randbedingung: Abfluss und Anfangswasserspiegel in allen Varianten  
gleich Variante 1)*

Zustand	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6
<b>Bewer</b>					
bordvoll	0	0	0	7	7
leicht ausufernd	-3	-3	0	5	6
HQ10	-3	0	0	3	7
HQ100	0	0	-2	5	8
<b>Ilme</b>					
bordvoll	0	0	0	7	7
leicht ausufernd	-2	-1	-1	6	5
HQ10	0	1	8	6	19
HQ100	3	2	19	5	35
<b>Leine</b>					
bordvoll	0	33	33	17	51
leicht ausufernd	14	8	55	6	70
HQ10	8	8	34	8	49
HQ100	35	5	119	8	139
<b>Aller</b>					
bordvoll	0	3	0	10	10
leicht ausufernd	0	0	2	5	8
HQ10	17	0	50	2	58
HQ100	47	1	115	2	128

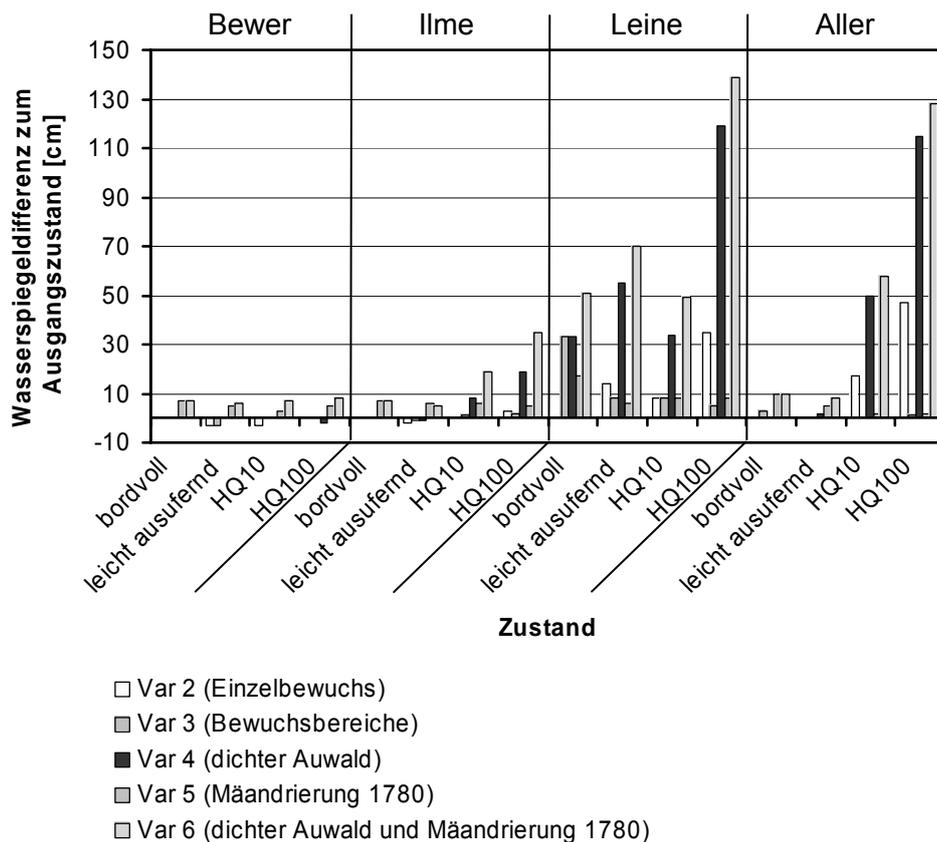
Tab. 8.9 *Mittlere Fließgeschwindigkeitsdifferenz [m/s] zur Variante 1 (Ausgangszustand) im Hauptquerschnitt (Randbedingung: Abfluss und Anfangwasserspiegel in allen Varianten gleich Variante 1)*

Zustand	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6
<b>Bewer</b>					
bordvoll	0,00	0,01	0,02	-0,18	-0,16
leicht ausufernd	0,13	0,13	0,04	-0,14	-0,14
HQ10	0,14	0,01	0,05	-0,07	-0,15
HQ100	0,03	0,01	0,14	-0,20	-0,14
<b>Ilme</b>					
bordvoll	0,00	0,01	0,00	-0,11	-0,11
leicht ausufernd	0,07	0,04	0,07	-0,12	-0,02
HQ10	0,16	0,05	0,20	-0,19	-0,02
HQ100	0,21	0,05	0,31	-0,18	0,05
<b>Leine</b>					
bordvoll	0,00	-0,07	-0,07	-0,08	-0,14
leicht ausufernd	0,03	-0,21	0,10	-0,17	0,02
HQ10	0,00	-0,17	0,05	-0,16	-0,04
HQ100	0,21	-0,16	0,44	-0,16	0,36
<b>Aller</b>					
bordvoll	0,00	0,05	0,01	0,02	0,02
leicht ausufernd	0,01	0,00	0,03	-0,04	0,00
HQ10	0,16	0,01	0,40	-0,02	0,36
HQ100	0,35	-0,01	0,76	-0,04	0,71

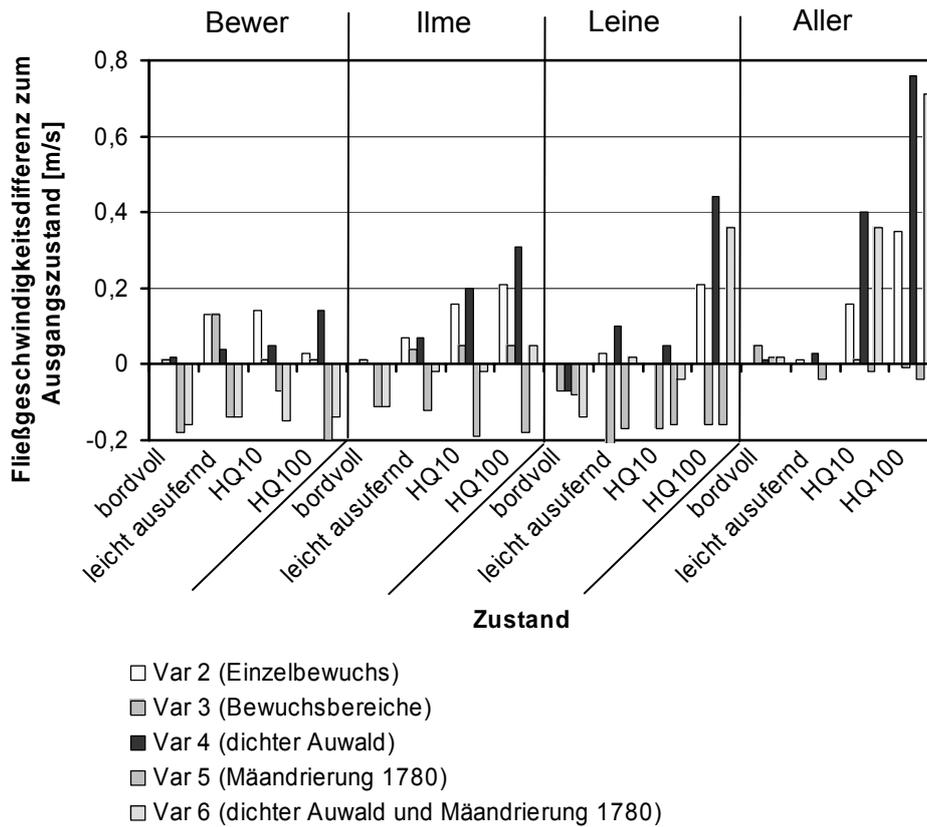
An der Aller ergibt sich ein maximaler Wasserspiegelanstieg von 1,3 m ebenfalls bei Variante 6 (dichter Auwad und erhöhter Windungsgrad) im HQ100 Zustand. Im bordvollen und leicht ausufernden Zustand sind lediglich geringe Wasserspiegelerhöhungen und Geschwindigkeitsänderungen gegenüber dem Ausgangszustand festzustellen. Nur im bordvollen Zustand macht sich die leichte Erhöhung des Windungsgrades

mit einer Anhebung des Wasserspiegels um 10 cm bemerkbar. Durch Uferbewuchs und einzelne Bewuchsbereiche auf dem Vorland ergibt sich kaum eine Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand. Durch Auwald auf dem Vorland wird im Hochwasserfall jedoch ein erheblicher Anstieg des Wasserspiegels verursacht. Bei dichtem Auwald (Variante 4) kann dies eine Erhöhung von bis zu 1,2 m im HQ100 Zustand ausmachen. Die Geschwindigkeit im Hauptquerschnitt erhöht sich hierbei beachtlich um 0,8 m/s.

In der Abb. 8.13 sind die Wasserspiegeldifferenzen zum Ausgangszustand der einzelnen Zustände von Bewer, Ilme, Leine und Aller gegenübergestellt. Auffällig ist, dass Wasserspiegelerhöhungen durch Auwald (Varianten 2, 4 und 6) bei Hochwasser an der Leine und Aller sehr viel stärker ausfallen als an den kleineren Gewässern Bewer und Ilme. Dies steht in Zusammenhang mit den weiten Vorländern der Leine und Aller, die bei Hochwässern seltener Jährlichkeit in Anspruch genommen werden.



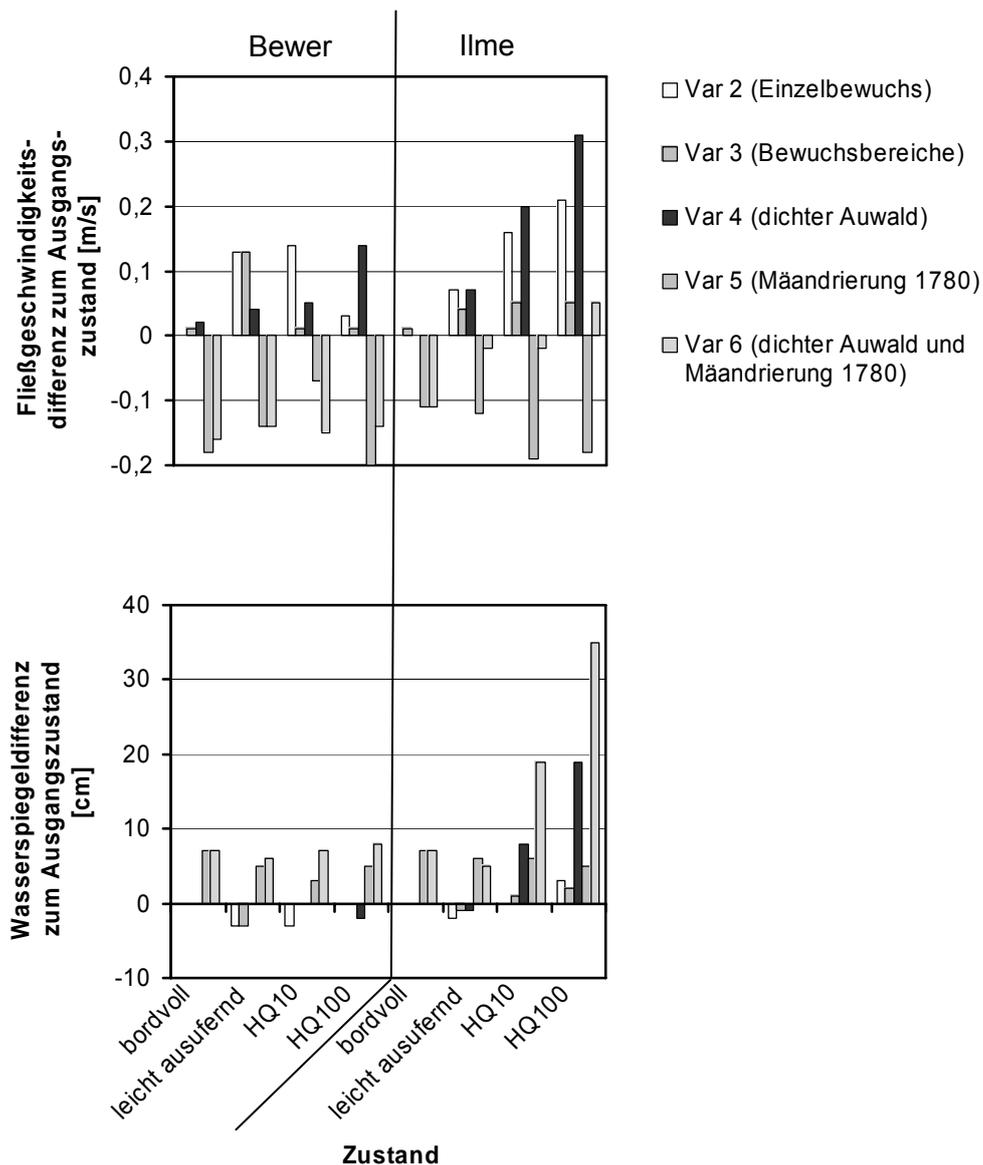
**Abb. 8.13 Vergleich der Wasserspiegeldifferenzen zum Ausgangszustand an Bewer, Ilme, Leine und Aller**



**Abb. 8.14** *Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt im Vergleich zum Ausgangszustand*

Der Vergleich der Fließgeschwindigkeitsdifferenzen in den Varianten zum Ausgangszustand in der Abb. 8.14 zeigt eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit bis zu 0,2 m/s bei allen Gewässern außer der Aller bei einem erhöhten Windungsgrad. Der Windungsgrad an der Aller erhöhte sich nur leicht, wodurch die geringe Fließgeschwindigkeitsreduzierung zu erklären ist.

Die größten Fließgeschwindigkeitserhöhungen im Hauptquerschnitt sind in der Variante 4 mit dichtem Auwald bei Hochwasser zu verzeichnen. Es kommt hierbei zur Konzentration des Abflusses im Hauptquerschnitt, wodurch sich die Fließgeschwindigkeit erhöht.

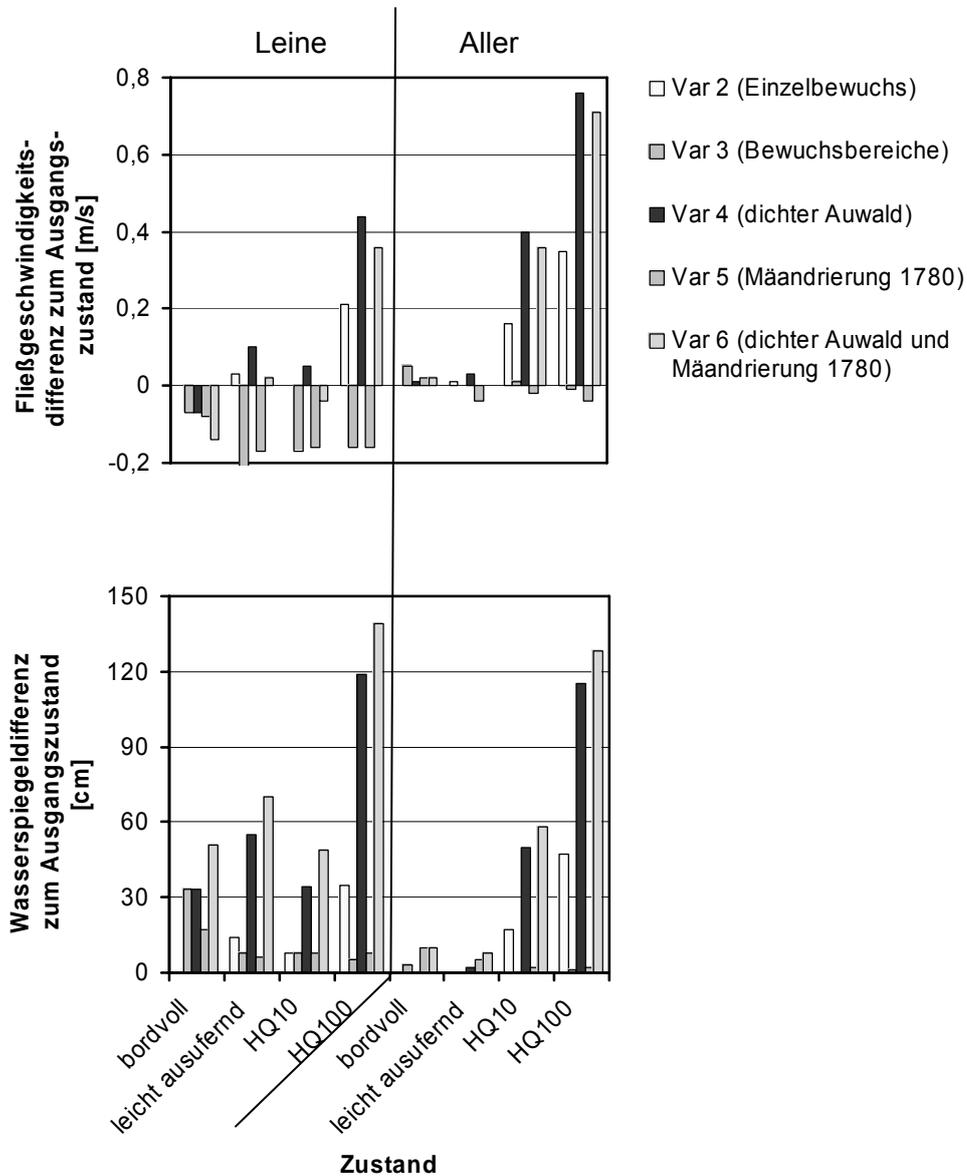


**Abb. 8.15 Gegenüberstellung der Änderung der Wasserspiegellage und der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt an Biber und Ilme**

Die Abb. 8.15 zeigt die Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt und der Wasserspiegeldifferenzen von Biber und Ilme für die betrachteten Zustände. Während durch den Bewuchseinfluss in erster Linie die Fließgeschwindigkeit an der Biber und Ilme erhöht wird, wird sie durch die Erhöhung des Windungsgrades reduziert. An der Biber sind bezüglich des Wasserstandes bei den Bewuchsvarianten kaum Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand festzustellen. In den verschiedenen Szenarien stellen sich vornehmlich verschiedene Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt ein.

Der Abschnitt an der Ilme reagiert im leicht ausufernden Zustand ähnlich. Auch hier erhöhen sich zunächst bei den Szenarien mit Bewuchs lediglich die Fließgeschwin-

digkeiten. Mit steigendem Abfluss, also beim HQ10 und HQ100, ändert sich dieses jedoch und neben den Fließgeschwindigkeiten erhöhen sich auch die Wasserstände.



**Abb. 8.16 Gegenüberstellung der Änderung der Wasserspiegellage und der mittleren Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt an Leine und Aller**

Die Abb. 8.16, in der die Fließgeschwindigkeits- und Wasserspiegeldifferenz zum Ausgangszustand an den betrachteten Gewässerabschnitten der Leine und Aller aufgeführt sind, unterscheidet sich von der entsprechenden Grafik an der Bever und Ilme (Abb. 8.15). Durch den Ausbauzustand am betrachteten Leineabschnitt ist der Abfluss im leicht ausufernden Zustand höher als beim HQ10 Zustand und entspricht etwa einer Jährlichkeit eines HQ20.

Bezüglich des Bewuchses ergibt sich an der Leine in der Variante 3 mit Uferbewuchs und vereinzelt Bewuchsbereichen auf dem Vorland eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit im Hauptquerschnitt bei höheren Abflüssen. Die Wasserspiegelerhöhungen fallen dabei gering aus.

An der Aller macht sich der Bewuchseinfluss lediglich in den Varianten mit vollbesetztem Vorland bemerkbar. Hier wird deutlich, dass die Dichte des Bewuchses einen entscheidenden Einfluss hat. Während in der Variante 2 von einem mittleren Stammdurchmesser von 0,5 m und einem mittleren Abstand von 3 m ausgegangen wird, beträgt der Stammdurchmesser 0,1 m und der mittlere Abstand der Bewuchselemente zueinander 0,5 m in den Varianten 4 und 6 mit dichtem Auwald. Im HQ100 Zustand ergibt sich bei dichtem Auwald ein doppelt so hoher Wasserspiegel- sowie Fließgeschwindigkeitsanstieg.

In der Tab. 8.10 ist das Verhältnis des Abflusses im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland aufgetragen. Gegenübergestellt ist dabei die Verhältniszahl im Ausgangszustand und in der Variante 6 mit dichtem Auwald und einem erhöhten Windungsgrad. Es wird deutlich, dass je größer das untersuchte Gewässer ist, desto höher ist bei Hochwasser der Anteil des Vorlandabflusses am Gesamtabfluss. Umso stärker können sich dann Einflüsse durch Bewuchs auf dem Vorland auf den Gesamtabfluss auswirken, wie die oben genannten Beispiele verdeutlichen.

**Tab. 8.10** *Verhältnis des Abflusses im Hauptquerschnitt zum Vorlandabfluss in den Varianten 1 und 6 für den HQ100 Zustand*

	<b>Bewer</b>	<b>Ilme</b>	<b>Leine</b>	<b>Aller</b>
<b>Variante 1</b>	5,7	1,1	0,6	0,5
<b>Variante 6</b>	5,1	1,6	1,2	2,1

So korreliert die starke Zunahme der Geschwindigkeit im Hauptquerschnitt an der Leine und Aller bei dichtem Bewuchs auf dem Vorland mit der Konzentration des Abflusses im Hauptquerschnitt, wie der Tab. 8.10 zu entnehmen ist. Während sich der Abfluss im Hauptquerschnitt an der Bewer bei der Variante 6 (dichter Auwald und erhöhter Windungsgrad) gegenüber dem Ausgangszustand reduziert, erhöht er sich an der Ilme leicht. An der Leine kommt es zu einer Verdopplung des Abflussanteils im Hauptquerschnitt und an der Aller sogar zu einer Vervierfachung.

## 8.7 ÄNDERUNG DES RETENTIONSOLUMENS

Durch Änderungen der Wasserspiegellage und der Fließgeschwindigkeiten in den untersuchten Varianten gegenüber dem Ausgangszustand verändert sich auch das Wasservolumen, welches sich im entsprechenden Zustand im Gewässer und auf dem Vorland befindet. Dieses wird im Folgenden als „Retentionsvolumen“ bezeichnet und hat Auswirkungen auf die Verformung einer Hochwasserwelle (Kapitel 1.3). Hierauf wird im folgenden Kapitel 8.8 näher eingegangen. Zunächst einmal soll ein Überblick gegeben werden, wie viel Retentionsvolumen sich im Hauptquerschnitt und auf dem Vorland pro km der untersuchten Gewässer befindet und wie sich dieses durch die betrachteten Varianten verändert.

Dazu ist das Retentionsvolumen im Hauptquerschnitt in der Tab. 8.11 und auf dem Vorland in Tab. 8.12 zusammengestellt. Tab. 8.13 gibt einen Überblick über die prozentuale Erhöhung des Gesamtretentionsvolumens von Hauptquerschnitt und Vorland bei den einzelnen Varianten gegenüber dem Ausgangszustand.

Beim Vergleich der Retentionsvolumina im Hauptquerschnitt (Tab. 8.11) kommen die unterschiedlichen Größen der untersuchten Gewässer, insbesondere der untersuchten Gewässerabschnitte, deutlich zum Vorschein. So liegt das Volumen im Hauptquerschnitt pro km an der Bever je Variante zwischen 2.000 m<sup>3</sup> und 8.000 m<sup>3</sup>, an der Ilme zwischen 15.000 m<sup>3</sup> und 69.000 m<sup>3</sup>, an der Leine zwischen 112.000 m<sup>3</sup> und 252.000 m<sup>3</sup> sowie an der Aller zwischen 473.000 m<sup>3</sup> und 1.327.000 m<sup>3</sup>.

Beim Vorlandvolumen (Tab. 8.12) sind die Unterschiede noch größer. Am untersuchten Beverabschnitt liegt es pro km je Variante zwischen 1.000 m<sup>3</sup> und 6.000 m<sup>3</sup>, an der Ilme zwischen 8.000 m<sup>3</sup> und 208.000 m<sup>3</sup>, an der Leine zwischen 488.000 m<sup>3</sup> und 2.273.000 m<sup>3</sup> sowie an der Aller zwischen 255.000 m<sup>3</sup> und 12.055.000 m<sup>3</sup>.

In der Abb. 8.17 werden diese Unterschiede deutlich. Die Unterschiede in den einzelnen Szenarien fallen hierbei kaum auf. Erhöhungen sind jedoch in den Szenarien mit Auwald festzustellen. Dies steht in Zusammenhang mit den in Kapitel 8.6 gezeigten Wasserspiegelanstiegen.

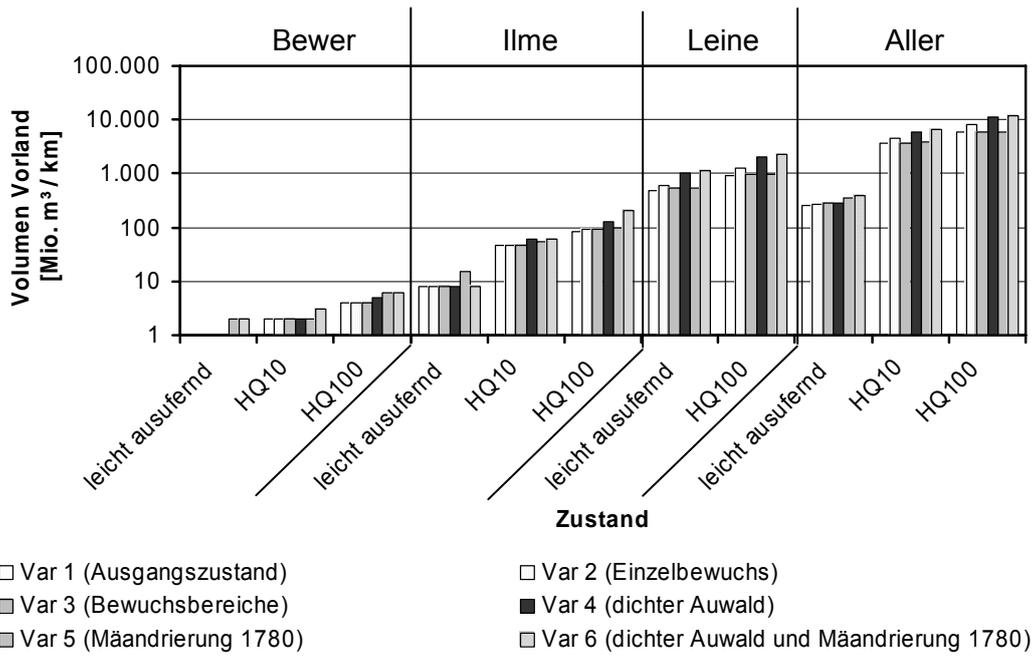
In Abb. 8.18 ist der Anteil des Vorlandvolumens am Gesamtvolumen, welches sich im Simulationsabschnitt befindet, aufgeführt. Während an der Bever lediglich bis zu 40% des Abflusses über das Vorland abgeführt wird, sind es an der Leine und Aller im HQ100 Fall zwischen 80 und 90%. Dies macht deutlich, warum der Einfluss eines erhöhten Windungsgrades bei größeren Hochwässern an Gewässern mit in Anspruch genommenen Auen kaum einen Einfluss hat.

Tab. 8.11 „Retentionsvolumen“ [1000 m<sup>3</sup>/km] im Hauptquerschnitt im Untersuchungsabschnitt

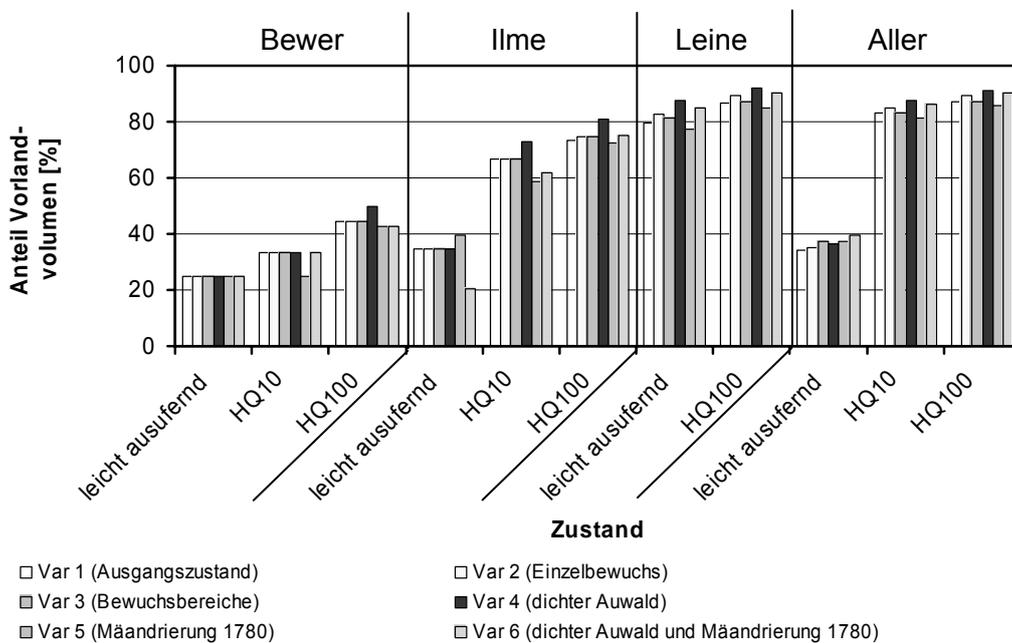
Zustand	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6
<b>Bewer</b>						
bordvoll	2	2	2	2	4	4
leicht ausufernd	3	3	3	3	6	6
HQ10	4	4	4	4	6	6
HQ100	5	5	5	5	8	8
<b>Ilme</b>						
bordvoll	15	15	15	15	18	18
leicht ausufernd	15	15	15	15	23	31
HQ10	23	23	23	23	38	38
HQ100	31	31	31	31	38	69
<b>Leine</b>						
bordvoll	112	112	124	124	145	179
leicht ausufernd	124	127	124	142	155	200
HQ10	118	118	118	127	127	182
HQ100	142	152	142	179	176	252
<b>Aller</b>						
bordvoll	473	473	491	473	564	564
leicht ausufernd	491	509	491	509	582	582
HQ10	764	800	764	873	873	1.018
HQ100	873	982	873	1.127	1.000	1.327

Tab. 8.12 *Retentionsvolumen [1000 m<sup>3</sup>/km] auf dem Vorland im Untersuchungsabschnitt*

Zustand	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6
<b>Bewer</b>						
leicht ausufernd	1	1	1	1	2	2
HQ10	2	2	2	2	2	3
HQ100	4	4	4	5	6	6
<b>Ilme</b>						
leicht ausufernd	8	8	8	8	15	8
HQ10	46	46	46	62	54	62
HQ100	85	92	92	131	100	208
<b>Leine</b>						
leicht ausufernd	488	603	542	997	527	1.130
HQ10	(≈ bordvoll)					
HQ100	918	1.258	961	2.094	988	2.273
<b>Aller</b>						
leicht ausufernd	255	273	291	291	345	382
HQ10	3.727	4.509	3.727	6.036	3.800	6.436
HQ100	5.945	8.182	5.964	11.418	6.018	12.055



**Abb. 8.17 Volumens auf dem Vorland bei verschiedenen Varianten und verschiedenen Zuständen**



**Abb. 8.18 Anteil des Vorlandvolumens am Gesamtvolumen im Querschnitt**

Bei Hochrechnung der ermittelten Gesamtvolumina auf die Gesamtlänge der in dieser Untersuchung betrachteten Gewässer ergeben sich grob geschätzt im Ausgangszustand für den bordvollen Zustand 52 Mio. m<sup>3</sup> und für den HQ100 Zustand 645 Mio. m<sup>3</sup> Retentionsvolumen.

Die in der Tab. 8.13 aufgeführten prozentualen Erhöhungen des Gesamtreentionsvolumens gegenüber dem Ausgangszustand verdeutlichen die starke Zunahme des Retentionsvolumens vor allem bei dichtem Bewuchs auf dem Vorland und einer Erhöhung des Windungsgrades. Eine Erhöhung des Retentionsvolumens ist mit einer Anhebung des Wasserspiegels verbunden (Tab. 8.8). Die Zunahme des Volumens ist dabei abhängig von der Querschnittsgeometrie. Je enger die Aue ist, desto geringer fällt die Zunahme des Retentionsvolumens aus.

An der Bever macht sich die Wasserspiegelabsenkung im leicht ausufernden Zustand bei den Varianten 2 und 3 (Kapitel 8.6) ebenfalls in einer Reduzierung des Gesamtreentionsvolumens bemerkbar. Die größten Erhöhungen werden in den Varianten 5 und 6 erzielt. Durch den Einfluss von Bewuchs und einer verstärkten Mäandrierung wird ein maximaler prozentualer Anstieg von 68 % im leicht ausufernden Zustand erreicht.

An der Ilme machen sich die geringen mittleren Wasserspiegeldifferenzen (Tab. 8.8) nicht in einer bemerkenswerten Veränderung des Gesamtreentionsvolumens bemerkbar. Durch eine Erhöhung des Windungsgrades wird im leicht ausufernden Zustand eine Vergrößerung des Retentionsvolumens von bis zu 67 % und durch die Kombination von erhöhter Mäandrierung und dichtem Bewuchs auf dem Vorland (Variante 6) ein Erhöhung des Retentionsvolumens von bis zu 140 % im HQ100 Zustand erlangt.

In gleicher Größenordnung vergrößert sich das Retentionsvolumen an der Leine bei Variante 6 im HQ100 Zustand. Der Einfluss von Bewuchs auf dem Vorland und am Ufer macht sich hier stärker bemerkbar als an der Bever und Ilme. So beträgt die prozentuale Erhöhung in der Variante 2 (lichter Auwald) bis zu 33 %, bis zu 11 % in der Variante 3 (Uferrandstreifen mit Bewuchs und einzelne Bewuchsbestände auf dem Vorland) und bis zu 114 % in der Variante 4 (dichter Auwald).

An der Aller ist der Einfluss des Bewuchses auf die Erhöhung des Gesamtreentionsvolumens geringer als an der Leine. Nur durch den Einfluss von Bewuchs wird in der Variante 4 mit dichtem Auwald eine Erhöhung von 84 % im HQ100 Zustand erreicht. Dieses erhöht sich bis auf 96 % durch den zusätzlichen Einfluss einer verstärkten Mäandrierung in der Variante 6.

Auffällig ist an allen Gewässern, dass durch eine Erhöhung des Windungsgrades vor allem im bordvollen und leicht ausufernden Zustand das Gesamtreentionsvolumen

vergrößert wird. In den Zuständen HQ10 und HQ100 verliert dieses an Bedeutung durch die starke Zunahme des Anteils des Vorlandabflusses am Gesamtabfluss.

**Tab. 8.13** *Prozentuale Erhöhung des Gesamtreentionsvolumens gegenüber dem Ausgangszustand*

Zustand	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6
<b>Bewer</b>					
bordvoll	0	0	0	48	67
leicht ausufernd	-13	-10	3	53	68
HQ10	2	2	4	41	61
HQ100	0	5	4	47	58
<b>Ilme</b>					
bordvoll	0	0	0	50	50
leicht ausufernd	0	0	0	67	67
HQ10	0	0	22	33	44
HQ100	7	7	40	20	140
<b>Leine</b>					
bordvoll	0	11	11	30	60
leicht ausufernd	19	9	86	11	117
HQ10	12	10	63	14	101
HQ100	33	4	114	10	138
<b>Aller</b>					
bordvoll	0	4	0	19	19
leicht ausufernd	5	5	7	24	29
HQ10	18	0	54	4	66
HQ100	34	0	84	3	96

## 8.8 AUSWIRKUNGEN DER RETENTION AUF HOCHWASSERWELLEN

Zur Ermittlung der Auswirkungen der Retention auf die Hochwasserwellen können in dieser Untersuchung die bekannten hydrologischen Verfahren wie das Muskingum- und das Kalinin-Miljukov-Verfahren nicht angewendet werden. Für das Muskingum-Verfahren sind beobachtete Zu- und Abflussganglinien notwendig (GUTKNECHT, 2001). Diese liegen lediglich an beobachteten Pegeln vor, die meist relativ weit voneinander entfernt sind und selten einen charakteristischen Abschnitt eingrenzen. Stattdessen fließen viele Nebengewässer zwischen den beiden Pegelstationen dem betrachteten Gewässer zu, wie es auch in dieser Untersuchung der Fall ist. Das Kalinin-Miljukov-Verfahren ist nicht auf beobachtete Abflusswellen angewiesen, kann jedoch nicht angewendet werden, wenn erhebliche abflussbeeinflussende Rückstau-effekte auftreten (DVWK, 1999).

Die Auswirkungen der Retention auf verschiedene Hochwasserwellen an den betrachteten Abschnitten kann jedoch bei bekannter Abfluss-Volumenbeziehung mit folgender Gleichung ermittelt werden:

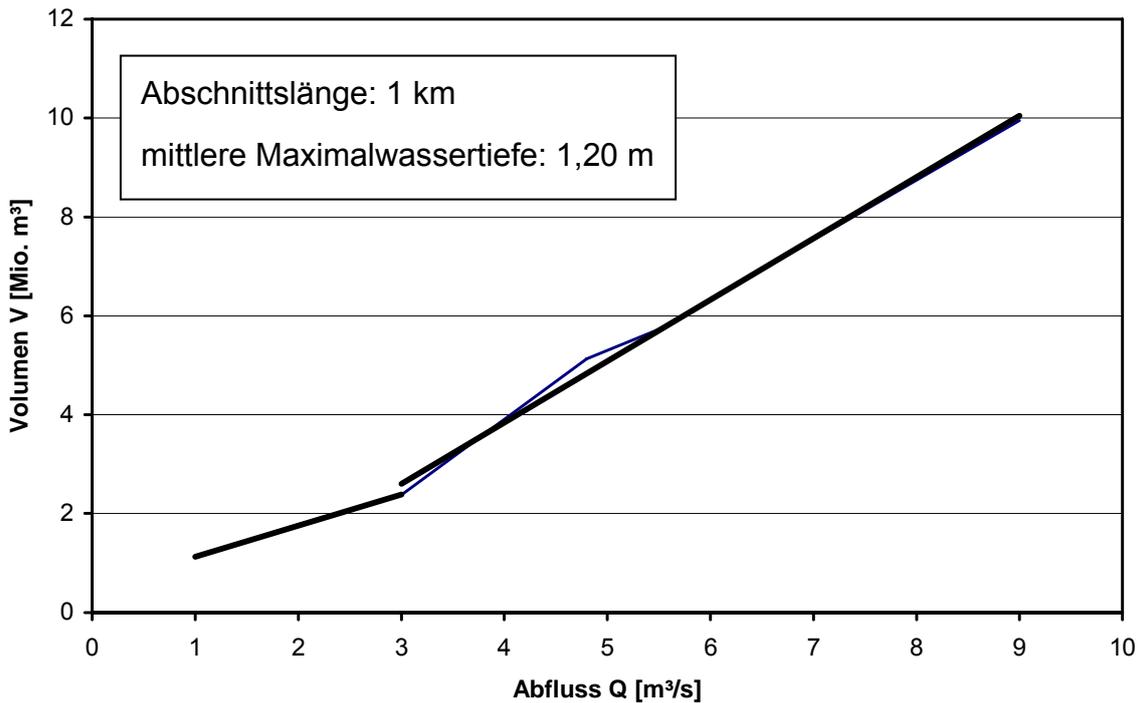
$$Q_{a,i} = Q_{z,i} - \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t}$$

mit:  $Q_{a,i}$  Abfluss des Gewässerabschnittes im Zeitschritt i

$Q_{z,i}$  Zufluss zum Gewässerabschnitt im Zeitschritt i

$V_i$  Speichervolumen im Gewässerabschnitt im Zeitschritt i

Durch die in dieser Untersuchung durchgeführten Wasserspiegellagenberechnungen konnte in den betrachteten Abschnitten einem bestimmten Durchfluss ein bestimmtes Wasservolumen zugeordnet werden. Anhand dieser Wertepaare können Funktionen für alle dazwischen liegenden Abflüsse aufgestellt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Funktion beim Übergang vom bordvollen zum ausufernden Zustand einen Knick aufweist (Abb. 8.19). Deshalb wird hier jeweils eine Funktion bis zum bordvollen Abfluss aufgestellt und eine Funktion bei Beanspruchung des Vorlandes. Je Variante ergeben sich unterschiedliche Funktionen.



**Abb. 8.19 Beispiel einer Abfluss-Volumenbeziehung an der Bewer (Variante 6)**

Die ermittelten Funktionen werden auf gegebene Hochwasserwellen angewendet. Jedem Zufluss in den Gewässerabschnitt wird dabei ein entsprechender Abfluss aus dem Gewässerabschnitt zum selben Zeitpunkt zugeordnet. Die so ermittelte Abflusswelle zeigt eine Verformung, die durch die Retentionswirkung im betrachteten Abschnitt hervorgerufen wird. Diese Verformung kann je nach Hochwasserwelle sehr unterschiedlich sein, wie die folgenden Beispiele an der Leine verdeutlichen (Abb. 8.20 und Abb. 8.21). Während bei der recht spitzen Welle im Juni 1981 mit relativ kurzer Anlaufzeit eine deutliche Reduktion des Spitzenabflusses bewirkt wird (Abb. 8.20), ist beim Ereignis im März 1981 mit fülliger Abflusskurve keine beachtenswerte Reduzierung des Spitzenabflusses zu verzeichnen (Abb. 8.21).

Weitere vorliegende Hochwasserwellen sind in ihrer Form und Größe zwischen den hier untersuchten Wellen einzureihen, so dass bei ihnen von Reduzierungen des Spitzenabflusses in einer Größenordnung auszugehen ist, die zwischen den beiden vorgestellten Wellen liegen.

Die folgende Auflistung enthält noch einmal die oben beschriebenen 6 Arbeitsschritte zur Ermittlung der Abflusswelle im Überblick:

1. Wasserspiegellagenberechnung mehrerer Zustände (zum Beispiel: Mittelwasserabfluss, bordvoller Abfluss sowie HQ10- und HQ100 Abfluss)
2. Ermittlung des Wasservolumens je Zustand
3. Aufstellung der Abfluss-Volumenbeziehung (grafisch) und Ermittlung der zugehörigen Funktionen
4. Aufteilung der zu untersuchenden Zuflusswelle  $Q_z$  in  $i$  Zeitschritte
5. Ermittlung des zur Zuflusswelle  $Q_{z,i}$  zugehörigen Speichervolumens  $V_i$  anhand der Abfluss-Volumenfunktion
6. Berechnung des Abflusses  $Q_{a,i}$  nach oben aufgeführter Gleichung

In den Anlagen 72 bis 83 sind für die Ereignisse März 1981 und Juni 1981 an der Leine für alle weiteren Varianten die Abflusswellen aufgeführt. Weiterhin sind in den Anlagen 84 bis 91 für die Ilme die Abflusswellen der Ereignisse im Dezember 1981 und 1988, jeweils für die Varianten 1, 4, 5 und 6 und in den Anlagen 92 bis 95 die Abflusswellen an der Bever für ein übertragenes Ereignis im Dezember 1988 ebenfalls für die Varianten 1, 4, 5 und 6 abgebildet. Für die Aller lagen keine Daten zu Hochwasserabflusswellen vor.

Die sich ergebenden Reduzierungen des Spitzenabflusses bei den beispielhaft betrachteten Ereignissen und Varianten an Leine, Ilme und Bever sind den folgenden Tabellen zu entnehmen (Tab. 8.14 bis Tab. 8.16). Es zeigt sich, dass eine deutliche Reduzierung des Spitzenabflusses durch das Anlegen eines Auwaldes bzw. das Wiederanlegen von Mäanderbögen an den untersuchten Gewässerabschnitten nicht erreicht wird. Die größte Reduzierung ergibt sich an der Leine beim untersuchten Hochwasserereignis im Juni 1981 mit der Variante 4. Hier konnte der Spitzenabfluss um 7,2 % gesenkt werden (Tab. 8.14). Gleichzeitig erfolgt eine Erhöhung des Wasserstandes um 1 m im Vergleich zum Wasserstand des entsprechenden Abflusses in der Ausgangsvariante. Die höchsten Wasserstände werden in der Variante 6 erreicht, jedoch nicht die maximale Reduzierung des Spitzenabflusses. Dieses Beispiel zeigt, dass durch das Anlegen von Auwald nicht zwangsläufig eine Reduzierung des Spitzenabflusses erfolgt, die dem Hochwasserschutz dienlich wäre. Stattdessen erhöht sich die Gefahr durch steigende Wasserstände.

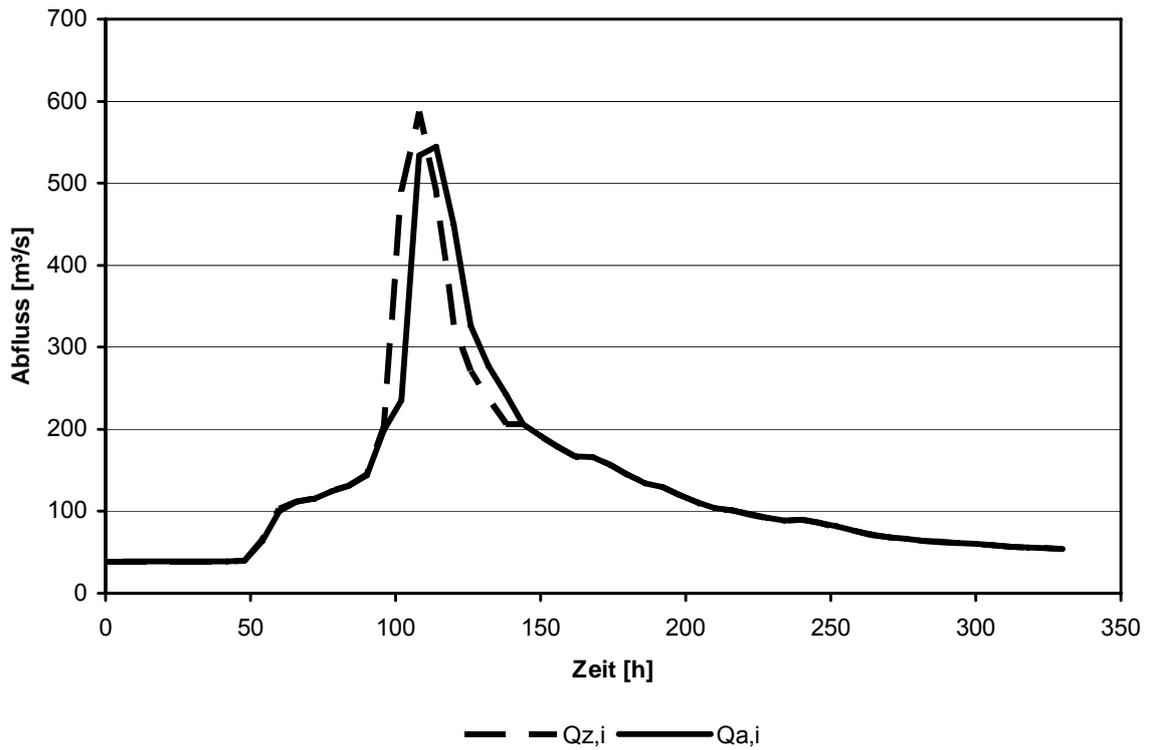


Abb. 8.20 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 4)

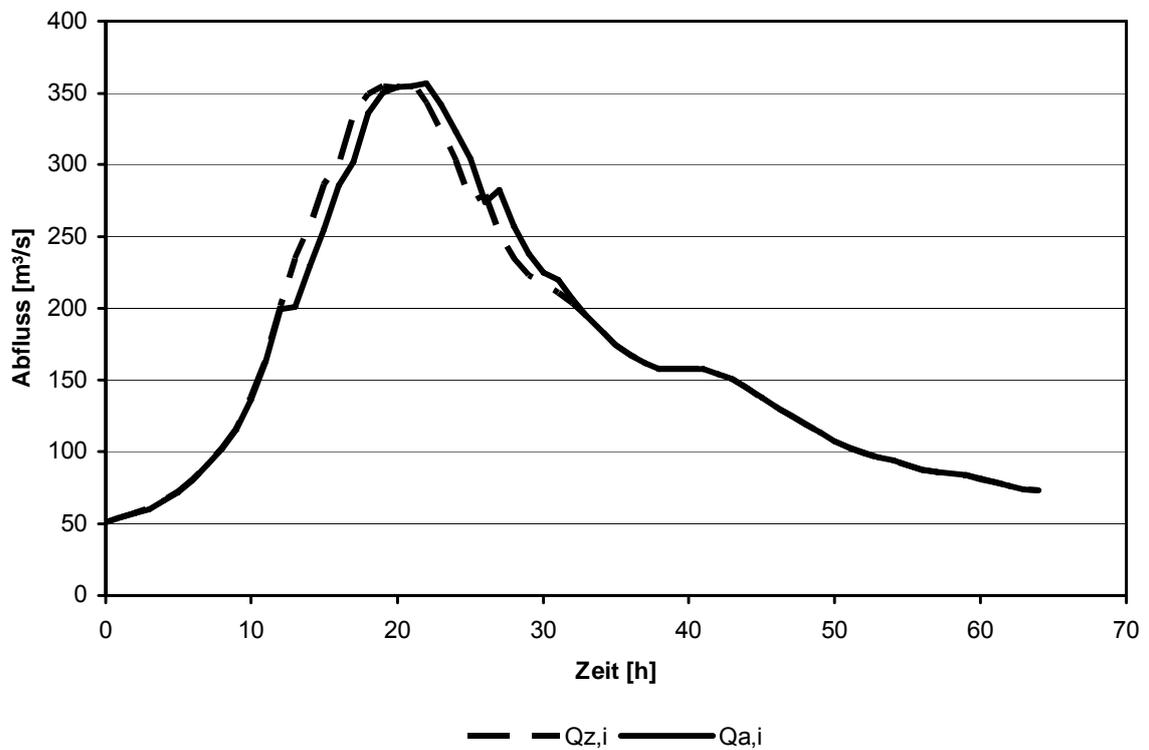


Abb. 8.21 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 4)

**Tab. 8.14 Spitzenabflüsse der auslaufenden Wellen aus dem Untersuchungsabschnitt Leine**

Variante	Ereignis März 1981			Ereignis Juni 1981		
	Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 359 m <sup>3</sup> /s Abflussvolumen = 232 Mio. m <sup>3</sup>			Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 587 m <sup>3</sup> /s Abflussvolumen = 156 Mio. m <sup>3</sup>		
	Spitzenabfluss	max. Wassertiefe	Abnahme Spitzenabfluss	Spitzenabfluss	max. Wassertiefe	Abnahme Spitzenabfluss
	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[%]
1	355	5,9	1,1	564	6,4	3,9
2	356	6,0	0,8	555	6,6	5,5
3	357	6,0	0,5	563	6,4	4,1
4	357	6,4	0,5	545	7,3	7,2
5	357	6,0	0,5	562	6,4	4,3
6	358	6,6	0,3	549	7,5	6,5

**Tab. 8.15 Spitzenabflüsse der auslaufenden Wellen aus dem Untersuchungsabschnitt Ilme**

Variante	Ereignis Dezember 1981			Ereignis Dezember 1988		
	Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 22,9 m <sup>3</sup> /s Abflussvolumen = 8,3 Mio. m <sup>3</sup>			Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 29,8 m <sup>3</sup> /s Abflussvolumen = 9,6 Mio. m <sup>3</sup>		
	Spitzenabfluss	max. Wassertiefe	Abnahme Spitzenabfluss	Spitzenabfluss	max. Wassertiefe	Abnahme Spitzenabfluss
	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[%]
1	22,8	1,6	0,4	29,0	1,7	2,7
4	22,7	1,6	0,9	28,6	1,7	4,0
5	22,8	1,6	0,4	28,7	1,8	3,7
6	22,7	1,7	0,9	28,7	2,0	3,7

Tab. 8.16 **Spitzenabflüsse der auslaufenden Welle im Untersuchungsabschnitt Bewer**

<b>Ereignis Dezember 1988</b>			
Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 9,9 m <sup>3</sup> /s Abflussvolumen = 2,0 Mio. m <sup>3</sup>			
Variante	Spitzenabfluss	max. Wassertiefe	Abnahme Spitzenabfluss
	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[%]
1	9,6	1,2	3,0
4	9,6	1,2	3,0
5	9,5	1,2	4,0
6	9,5	1,3	4,0

Die geringe Reduzierung des Spitzenabflusses, vor allem bei den fülligen Hochwasserwellen, ist mit der frühzeitigen Füllung des Retentionsraumes zu erklären. Sobald der Wasserstand über bordvoll ansteigt, fängt der Retentionsraum auf dem Vorland an sich zu füllen. Beim Durchfließen des Hochwasserscheitels ist dieser Raum bereits gefüllt und es kommt zu keiner nennenswerten Reduzierung des Hochwasserspitzenabflusses. Eine deutliche Reduzierung des Spitzenabflusses wird nur erzielt, wenn genügend Raum zum Zeitpunkt des Eintreffens der Hochwasserspitze zur Verfügung steht. Hier bieten Hochwasserrückhaltebecken und Polder einen großen Vorteil, wenn sie zum Rückhalt und zur gezielten Flutung genutzt werden.

In diesem Zusammenhang ist auch die momentan recht populäre Deichrückverlegung zum Zwecke des Hochwasserschutzes kritisch zu betrachten. Der so zusätzlich gewonnene Rückhalteraum wird in der Regel sehr früh gefüllt, so dass der Spitzenabfluss, wie in den oben aufgeführten Beispielen, kaum gesenkt wird. Eine Alternative dazu ist, eine zweite Deichlinie hinter dem schon bestehenden Deich anzulegen. Zwischen diesen beiden Deichlinien könnte dann ein bodenständiger Auwald angesiedelt werden, für dessen Erhalt regelmäßige Flutungen schon bei kleineren Hochwässern nötig sind. Ist jedoch mit einer besonders hohen Flut zu rechnen, so sollten diese Rückhalteräume erst zur Kappung der Hochwasserspitze genutzt werden.

Die freie Gewässerentwicklung ist mit solchen Maßnahmen etwas unterbunden. Die Entwicklung ist aber durch bereits bestehende Infrastrukturen entlang der Gewässer wie Straßen, Brücken, Siedlungen und weitere Nutzungen ohnehin eingeschränkt.

Ziel der Raum- und Landschaftsplanung entlang eines Fließgewässers sollte es daher sein, die natürliche Funktion eines Gewässers als Lebensraum für Flora und Fauna zu erhalten und dabei gleichzeitig die Bedürfnisse des Menschen, wozu der Schutz vor Hochwasser gehört, zu beachten.

## **8.9 AUSWIRKUNGEN IN DEN UNTERSUCHUNGSABSCHNITTEN**

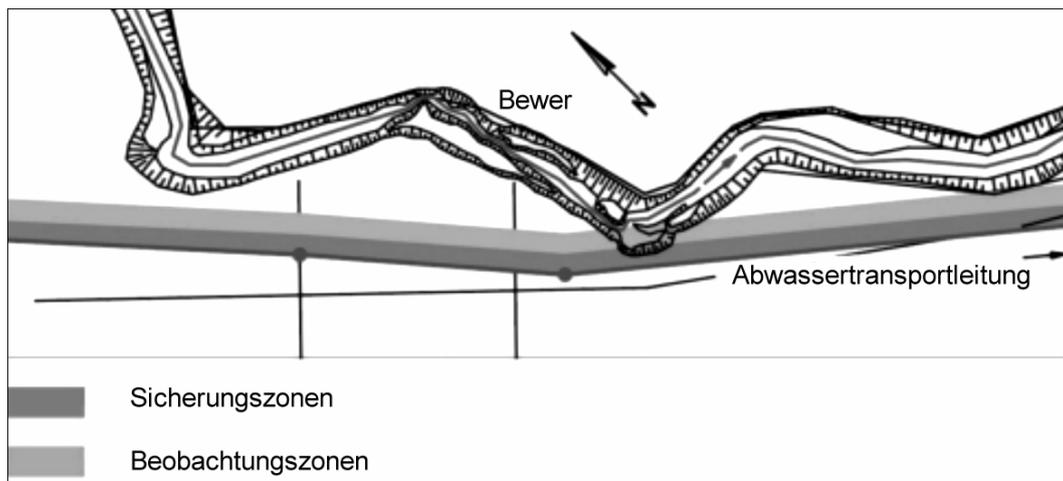
Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der Renaturierungsmaßnahmen in den betrachteten Abschnitten näher erläutert. Neben dem Einfluss auf den Hochwasserablauf wird an dieser Stelle auf die damit verbundenen Auswirkungen auf landwirtschaftliche Flächen und Siedlungen eingegangen.

### **8.9.1 Bewer**

Bei dem untersuchten Abschnitt an der Bewer handelt es sich im unteren Bereich um aufgekaufte Flächen (Anlage 42 und 50), auf denen eine freie Gewässerentwicklung und eine natürliche Sukzession entlang des Gewässers gewünscht werden. Die Bereitstellung von Korridoren, in denen sich das Gewässer frei entwickeln kann, steht beim dortigen Konzept zur naturnahen Gestaltung der Bewer im Vordergrund (LEINEVERBAND GÖTTINGEN, 2000). Diese Korridorflächen, in denen sich das Gewässer entsprechend seiner Eigendynamik entwickeln darf, werden durch Beobachtungs- und Sicherungszonen begrenzt (Abb. 8.22). Begrenzungen werden nötig, wenn Bebauungen, Verkehrsflächen, Ver- und Entsorgungsleitungen sowie weitere Nutzungsflächen durch die Gewässerentwicklung gefährdet sind. Die Beobachtungszone ist als Pufferzone gedacht und ermöglicht vorsorgliches Handeln vom Unterhaltungspflichtigen. Die Sicherungszone dient als Mindestabstand zwischen Schutzobjekt und Gewässerufer (SCHRÖDER ET AL., 2002).

Um die Unterhaltungskosten zu verringern, können Korridorflächen, die für die freie Gewässerentwicklung zur Verfügung stehen, verpachtet und extensiv als Grünland bewirtschaftet werden. Dabei ist zu beachten, dass das Interesse der Landwirte an schmalen Flurstücken nicht besonders hoch ist, so dass Pächter schwer zu finden sind.

Im oberen Bereich des untersuchten Abschnittes steht bisher lediglich ein ca. 10 m breiter Uferstreifen auf beiden Seiten der Bewer zur Verfügung, so dass hier keine freie Gewässerentwicklung zugelassen wird. Die an den Uferstreifen angrenzenden Flächen werden landwirtschaftlich intensiv genutzt.



**Abb. 8.22 Beobachtungs- und Sicherungszonen an einer Schmutzwasserleitung neben der Bewer (SCHRÖDER ET AL., 2002)**

Die Reduzierung des Gefälles durch eine Laufverlängerung (Mäandrierung) sorgt an der Bewer für eine Abnahme des bordvollen Abflusses. Im Zusammenhang mit einem Auwald, dessen Bewuchs bis ins Gewässer hineinragt, würde der bordvolle Abfluss um 17 % reduziert. Für einen Auwald und dessen Bildung sind häufigere Überschwemmungen positiv zu sehen, da regelmäßige Überschwemmungen zum Erhalt eines Auwaldes notwendig sind. In der Simulation ergaben sich Ausuferungen lediglich im unteren Bereich, der für die freie Gewässerentwicklung freigegeben ist. Somit ergeben sich für den landwirtschaftlich intensiv genutzten Bereich oberhalb keine negativen Auswirkungen durch häufigere Ausuferungen im unteren Bereich.

Beim Vorhandensein eines Auwaldes erhöht sich durch einen Aufstau des Wassers der Wasserspiegel. An der Bewer muss mit einer Anhebung von bis zu 8 cm gerechnet werden. Dadurch werden die in Anlage 49 markierten Flächen zusätzlich vom Hochwasser betroffen. Es handelt sich hierbei um eine Flächenzunahme von 0,6 ha.

Siedlungen befinden sich nicht in der näheren Umgebung, die durch mögliche höhere Wasserstände betroffen sein könnten. Das Niveau der Kreisstraße ist so hoch, dass mit einer Überschwemmung der Straße nicht zu rechnen ist.

### 8.9.2 Ilme

Die Flächen entlang der Ilme werden zurzeit als Grünland landwirtschaftlich genutzt. Im Rahmen der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) ist der untersuchte Abschnitt der Ilme mit seiner Aue als schützenswert ausgewiesen. Die Ausweisung von Flächen entlang der Gewässer dient unter anderem der Biotopvernetzung.

Wie an der Bewer muss an der Ilme durch eine Verlängerung des Fließweges (Mäandrierung) und zusätzlichen Uferbewuchs mit häufigeren Ausuferungen gerechnet

werden. Aufgrund der im Gewässerkundlichen Jahrbuch von 1999 (NLÖ, 2001 c) verzeichneten mittleren Unterschreitungsabflüsse von 1962 bis 1999 würden sich dabei anstatt Ausuferungen an 2 Tagen im Jahr Ausuferungen an 5 Tagen pro Jahr im Mittel ergeben.

Durch einen erhöhten Windungsgrad an der Ilme würde sich der Wasserstand bei Hochwässern nur geringfügig erhöhen. Durch zusätzlichen Bewuchs steigt der Wasserstand jedoch beachtlich an (Kapitel 8.6). Bei Annahme eines dichten Auwaldes und einer verstärkten Mäandrierung wurde eine Erhöhung des Wasserspiegels bei einem HQ100 von 35 cm ermittelt. Hierdurch werden die in der Anlage 58 markierten zusätzlichen Flächen (circa 8 ha) von einer Überflutung betroffen. Die am Oberlauf gelegene Ortschaft Holtensen wäre aufgrund ihrer höheren Lage dadurch nicht direkt betroffen. Es könnte sich jedoch ein Rückstau im Zufluss der Dieße ergeben, der sich bis zur Ortschaft Holtensen auswirken könnte. Deshalb sollte bei Planung einer solchen Maßnahme geprüft werden, ob eine Hochwasserwelle aus dem Teileinzugsgebiet der Dieße vor der Welle aus dem oberhalb gelegenen Ilmeinzugsgebiet abläuft oder diese beiden Wellen zusammentreffen. Sollte letzteres zutreffen, müssen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Zum einen sollten innerhalb der Ortschaft mögliche betroffene Häuser mit Hochwasserschutzvorkehrungen versehen werden. Zudem sollte der Abfluss durch und hinter der Ortschaft möglichst ungehindert sein, um weitere Rückstauereffekte zu vermeiden. In einem Hochwasserschutzkonzept für das gesamte Einzugsgebiet der Ilme ist darauf zu achten, dass durch Rückhaltungen im Oberlauf der Dieße im Zusammenhang mit einer Rückhaltung an der Ilme, insbesondere direkt unterhalb der Ortschaft Holtensen, es zu keiner Konzentrierung des Abflusses am Zusammenfluss der Ilme und Dieße kommt. Dies wäre nicht nur für die Ortschaft Holtensen von Nachteil, sondern auch für die Ortschaft Hullersen und die Stadt Einbeck als Unterlieger an der Ilme.

### **8.9.3 Leine**

Beim untersuchten Teilabschnitt der Leine handelt es sich um einen ausgebauten Abschnitt. Der Gewässerverlauf ist geradlinig und durch einen Deich von der Aue getrennt. In der Simulation wurde dieser Deich entfernt. Die Aue wird zurzeit landwirtschaftlich genutzt.

Die nachgestellten Renaturierungsszenarien zeigen starke Auswirkungen auf die Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten (Kapitel 8.6). Durch den ausgebauten Querschnitt kommt es zurzeit nicht jährlich zu Ausuferungen. Durch die simulierte Reduzierung des bordvollen Abflusses infolge einer Laufverlängerung, die eine Reduzierung des Sohlgefälles mit sich bringt, und zusätzlichem Bewuchs entlang der Böschung, ist hierbei mit einer jährlichen Ausuferung von im Mittel einem Tag pro

Jahr zu rechnen. Dies geht aus dem Gewässerkundlichen Jahrbuch von 1999 (NLÖ, 2001 c) und der dort verzeichneten mittleren Unterschreitungsabflüsse von 1941 bis 1999 am Pegel Greene, der oberhalb des Untersuchungsabschnittes liegt, hervor.

Unter Annahme eines dichten Auwaldbestandes in diesem Abschnitt würde sich der Wasserspiegel um 1,20 m (ohne Mäandrierung) bis 1,40 m (mit Mäandrierung) höher als im jetzigen Ist-Zustand bei einem HQ100 von ca. 620 m<sup>3</sup>/s einstellen. Dieser hohe Anstieg des Wasserspiegels würde sich auf die umliegenden Ortschaften Bruchhof und Erzhausen sowie die oberhalb liegende Ortschaft Greene auswirken. Aus der Abb. 8.23 geht hervor, dass vergleichsweise wenige Flächen (circa 6 ha) zusätzlich durch einen höheren Wasserspiegel von 1,40 m im Vergleich zum Ist-Zustand betroffen wären. Der erhöhte Wasserspiegel erfordert jedoch entsprechende Schutzvorkehrungen. Für die betroffenen Ortschaften sollten deshalb lokale Deiche, wie sie in der Abb. 8.23 eingezeichnet sind, vorgesehen werden. Zudem müssen die Bürger auf die erhöhte Gefahr hingewiesen werden, damit sie sich auf die potenzielle Hochwassergefahr einstellen können (Hochwasserschutzanlagen vor Fenstern und Türen, angepasste Bauweise, Versicherungsschutz etc.).

Durch die Konzentrierung des Abflusses im Hauptquerschnitt bei einem dichten Auwald auf dem Vorland kann sich die Fließgeschwindigkeit um über 0,4 m/s erhöhen. Bei einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit erhöht sich die Schubspannung an der Sohle, die sich durch eine Erhöhung der Feststofftransportrate bemerkbar macht. Bei einer erhöhten Schubspannungsgeschwindigkeit muss mit verstärkter Tiefenerosion gerechnet werden.

Eine merkliche Reduktion des Hochwasserscheitels wird durch das Anlegen eines Auwaldes lediglich bei Wellen mit kurzer Anlaufzeit erreicht (Kapitel 8.7). Diese Wellen sind an der Leine jedoch eher selten. Wird der geringen Wirkung des Auwaldes auf die Reduzierung des Spitzenabflusses die erhöhte Hochwassergefahr durch einen gestiegenen Wasserspiegel gegenübergestellt, so wird ein Ungleichgewicht deutlich, das eine Auwaldanlegung in diesem Abschnitt der Leine nicht rechtfertigt.

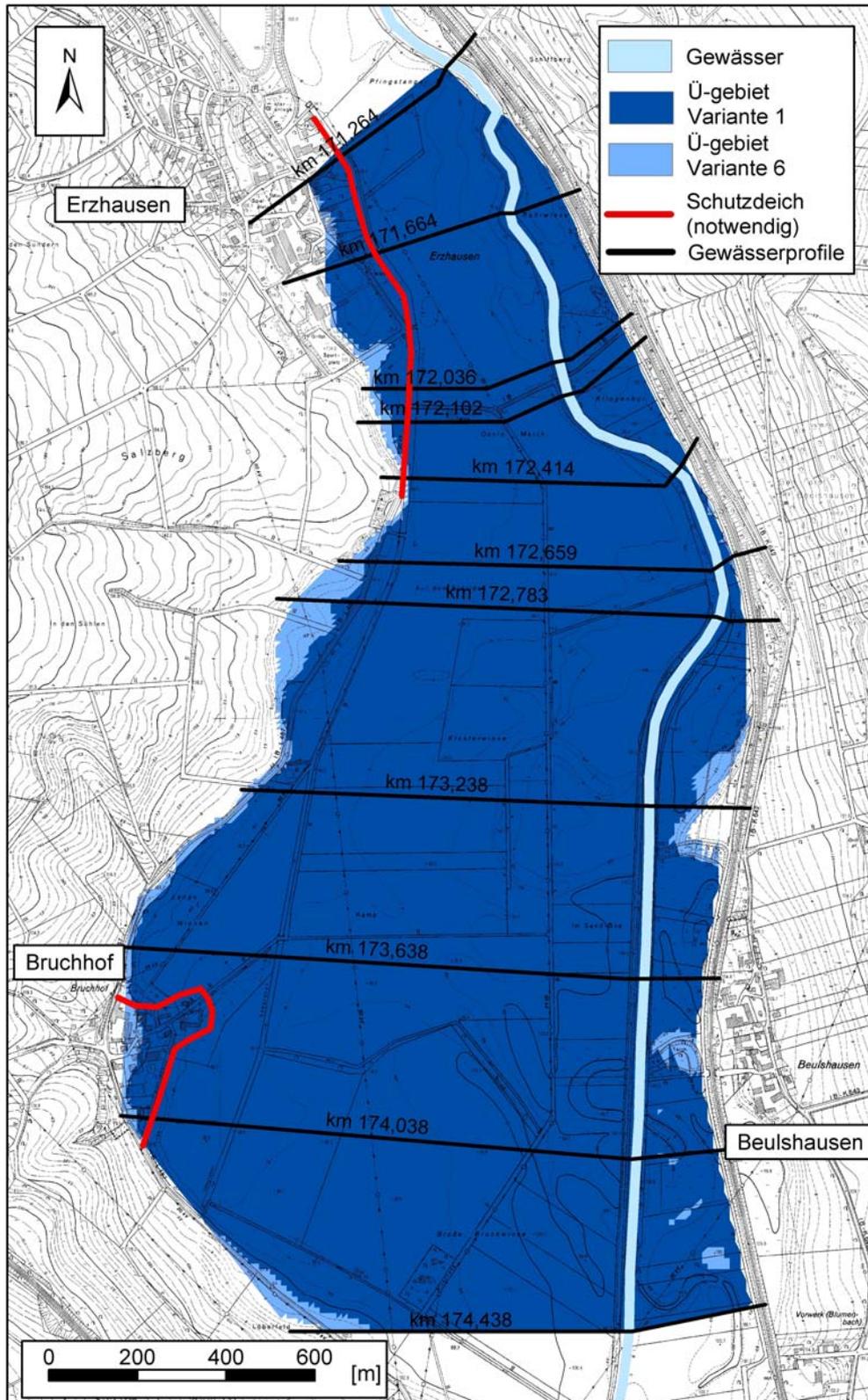


Abb. 8.23 Ausweitung der Überflutungsfläche bei einem Wasserspiegelanstieg von 1,40 m im Untersuchungsabschnitt Leine mit notwendigen Schutzdeichen

Um dem Naturschutz entgegen zu kommen und die Ziele der EG-Wasserrahmenrichtlinie zu erfüllen, kann jedoch aus Sicht des Hochwasserschutzes ein mäandrierender Gewässerverlauf und vereinzelte Bewuchsbereiche entlang des Ufers und auf dem Vorland zugelassen werden. Die Ausuferungen und Hochwasserstände nehmen hierdurch nur gering zu. Weiterhin können die Vorländer landwirtschaftlich genutzt werden. Eine extensive Grünlandbewirtschaftung ist hierbei aus Sicht des Gewässerschutzes zu bevorzugen.

#### **8.9.4 Aller**

Die Aller hat im untersuchten Abschnitt einen weitgehend naturnahen Verlauf. Der Windungsgrad um 1780 war lediglich geringfügig größer als heute (Tab. 5.6). Vorlandflächen werden überwiegend als Grünland landwirtschaftlich genutzt und Siedlungen entlang der Aller werden durch Deiche vor Hochwasser geschützt.

Eine Verringerung des bordvollen Abflusses durch Uferbewuchs und einer leicht verstärkten Mäandrierung konnte an der Aller nicht festgestellt werden. Dies zeigt, dass der Einfluss des Uferbewuchses auf den bordvollen Abfluss bei einem sehr breiten Gewässer (hier circa 80 m) geringer ist als bei kleineren Gewässern, wie der Bever, Ilme und Leine.

Einen großen Einfluss auf den Wasserstand hat jedoch die Ansiedlung von Bewuchs auf dem Vorland im Hochwasserfall. Im untersuchten HQ100 Zustand würde sich bereits bei einem angenommenen Einzelbewuchs mit einem mittleren Stammdurchmesser von 0,5 m und einem mittleren Abstand von 3 m eine Erhöhung des Wasserspiegels um 0,5 m ergeben. Bei einem dichten Auwald erhöht sich der Wasserstand um 1,2 m und in Kombination mit einer Erhöhung des Windungsgrades sogar um 1,3 m (Tab. 8.8). Um den Schutz der angrenzenden Siedlungen vor Hochwasser zu gewährleisten, müssten die Deiche entsprechend erhöht werden. Dies ist mit erheblichen Kosten verbunden.

Wird jedoch Bewuchs entlang des Ufers und vereinzelte Bewuchsbestände auf dem Vorland zugelassen, so ist nur mit geringen Erhöhungen des Wasserstandes auch im HQ100 Fall zu rechnen. In der Variante 3, die eine entsprechende Bewuchssituation abbildet, ergibt sich für den untersuchten Abschnitt ein Anstieg von 1 cm. Ebenso gering ist die Auswirkung auf den Wasserstand im HQ100 Zustand durch eine leichte Erhöhung des Windungsgrades. Hierbei ergibt sich ein Anstieg von 2 cm. Diese Variante hat den Vorteil, dass die Vorlandflächen weitestgehend weiterhin als Grünland landwirtschaftlich genutzt werden können. Sollte der Aller in diesem Bereich die Möglichkeit gegeben werden sich frei zu entwickeln, muss jedoch mit Verschiebungen des jetzigen Gewässerverlaufs gerechnet werden. Es wäre zu empfehlen, Korridore, wie an der Bever beschrieben, festzulegen, in der sich die Aller frei entwickeln

darf und Grenzen aufzuzeigen, ab wann diese Entwicklung durch Ufersicherungsmaßnahmen korrigiert werden muss. Wird dieser Korridor so angelegt, dass er weitestgehend der natürlichen Aue der Aller entspricht (unter Berücksichtigung von Siedlungen und allgemeinen Verkehrswegen), dann gibt es sehr viele Landbesitzer mit eigenen Interessen innerhalb dieses Korridors. Diese müssten sich bereit erklären, eine freie Gewässerentwicklung zuzulassen. Aufgrund der finanziellen Situation von Staat und Land wäre ein Aufkauf der notwendigen Grundstücke und die damit verbundenen Unterhaltungskosten, wie es an der Bever durch den Leineverband als Träger der Maßnahme geschehen ist, nicht denkbar. Hier müsste ein anderer Weg gefunden werden.

Die Fließgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt erhöhen sich in den Varianten mit Bewuchs auf dem gesamten Vorland erheblich. Durch die Konzentration des Abflusses im Hauptquerschnitt ergibt sich bei dichtem Auwald (Variante 4) im HQ100 Zustand eine maximale Erhöhung um 0,8 m/s (Tab. 8.9). Hierdurch würde der Feststofftransport erhöht werden. In den Varianten mit vereinzeltem Bewuchs auf dem Vorland und am Ufer (Variante 3) sowie durch eine leichte Erhöhung des Windungsgrades (Variante 5) würde sich die Fließgeschwindigkeit gegenüber dem Ausgangszustand kaum verändern.

## **8.10 ZUSAMMENFASSUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE**

Es werden mehrere Bewuchssituationen von einem mit Gehölz bewachsenen Uferstrandstreifen mit vereinzelten Bewuchsbeständen auf dem Vorland (Variante 3) über lichten Auwald (Variante 2) bis zu dichten Auwald (Variante 4) an einzelnen Abschnitten der untersuchten Gewässer (Bever, Ilme, Leine und Aller) simuliert. Ebenfalls betrachtet werden eine Erhöhung des Windungsgrades (Variante 5) und eine Kombination dergleichen mit dichtem Auwald (Variante 6). Dabei werden jeweils die Lastfälle bordvoll, leicht ausufernd, HQ10 und HQ100 angesetzt. Zu Vergleichszwecken dient der Ausgangszustand (Variante 1).

Durch die Änderung der Bewuchssituation im Hauptquerschnitt (Variante 2 bis 4 und 6) und einer Veränderung des Gefälles (Variante 5 und 6) ändert sich der bordvolle Abfluss. Die größten Reduzierungen sind in der Variante 6 zu verzeichnen. An der Bever ergibt sich eine Reduzierung um 17 % und an der Ilme und Leine um 21 % (Tab. 8.7). Hierdurch ist mit verstärkten Ausuferungen aufgrund der Renaturierungsmaßnahmen zu rechnen.

Bezüglich des Wasserstandes sind in den Renaturierungsvarianten im Vergleich zum Ausgangszustand starke Anhebungen zu verzeichnen. Am deutlichsten macht sich dieses in der kombinierten Variante 6 mit dichtem Auwald und einer Erhöhung des

Windungsgrades im HQ100 Zustand bemerkbar. An der Bever sind es 8 cm, an der Ilme 35 cm, an der Leine 1,4 m und an der Aller 1,3 m (Tab. 8.8).

Die größten Fließgeschwindigkeitserhöhungen treten in der Variante 4 beim HQ100 Zustand auf. Hier wird der Abfluss durch den dichten Auwald im Hauptquerschnitt konzentriert. Die Fließgeschwindigkeitserhöhungen betragen an der Bever 0,14 m/s, an der Ilme 0,31 m/s, an der Leine 0,44 m/s und an der Aller 0,76 m/s (Tab. 8.9).

Durch die Änderungen der Wasserspiegellagen und der mittleren Fließgeschwindigkeiten in den untersuchten Varianten gegenüber dem Ausgangszustand verändert sich auch das Wasservolumen, welches sich im entsprechenden Zustand im Gewässer und auf dem Vorland befindet. Da die größten Wasserspiegelanhebungen in der Variante 6 im HQ100 Zustand auftreten, sind hier ebenfalls die größten Erhöhungen des Retentionsvolumens zu verzeichnen. Es ergibt sich hierbei im Vergleich zum Ausgangszustand an der Bever eine Erhöhung um 58 %, an der Ilme um 125 %, an der Leine um 138 % und an der Aller um 96 % (Tab. 8.13).

Das mögliche Retentionsvolumen hat Auswirkungen auf die Verformung einer Hochwasserwelle. Die Reduzierung des Hochwasserscheitels hängt davon ab, ob der mögliche Retentionsraum in der Aue beim Durchfließen der Hochwasserspitze noch zur Verfügung steht oder ob dieser bereits durch den anlaufenden Ast der Welle gefüllt wurde. Deshalb werden schnell ansteigende Hochwasserwellen mit einer kurzen Gesamtdauer stärker durch einen Auwald in ihrem Spitzenabfluss reduziert als ohne Bewuchs. Dabei ist jedoch mit höheren Wasserständen zu rechnen. Beim Hochwasserereignis an der Leine im Juni 1981 wurde eine Erhöhung der maximalen Wassertiefe von 1 m errechnet (Tab. 8.14).

In den untersuchten Gewässern sind solch spitze Hochwasserwellen jedoch selten. Bei den üblichen fülligen Wellen wurde der mögliche Retentionsraum bereits beim Anlaufen der Welle gefüllt, so dass der Hochwasserscheitel nicht wesentlich gemindert wird.

Aus den Simulationsergebnissen ergeben sich die folgenden Ableitungen für Renaturierungsmaßnahmen an der Bever, Ilme, Leine und Aller. Die Merkmale der betrachteten Gewässerabschnitte können der Tab. 8.17 entnommen werden. Die in den Tab. 8.18 bis Tab. 8.21 aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf die in Tab. 8.17 genannten Gewässerabschnitte.

Tab. 8.17 **Merkmale der Untersuchungsabschnitte**

<b>Merkmal</b>	<b>Bewer</b>	<b>Ilme</b>	<b>Leine*</b>	<b>Aller</b>
Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]	11	200	2.820	15.000
Abschnittslänge [km]	1	1,6	3,5	14
Sohlgefälle Ausgangszustand [‰]	9	3,5	0,6	0,2
bordvolle Gewässerbreite [m]	4,0	11,0	30,0	80,0
bordvolle Gewässertiefe [m]	1,0	1,5	5,5	4,5
Mäandrierungsfaktor Ausgangszustand [%]	15	25	5	45
bordvoller Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	3	14	210	215
HQ100 Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	9	75	622	1.430

\* ausgebauter Gewässerabschnitt

- Bei durchgängigem Bewuchs auf den Böschungen eines Gewässers beginnt die Ausuferung bei einem kleineren Abfluss. Dadurch ist mit häufigeren kleinen Überschwemmungen zu rechnen. Kleinere Gewässer sind hiervon besonders betroffen, da der Anteil der von Bewuchs eingenommenen Fläche an der Gesamtfläche des Hauptquerschnitts relativ hoch ist. Es hat sich zudem gezeigt, dass der Einfluss von Böschungsbewuchs an flachen Böschungen größer ist als an steilen.

An der Bever reduziert sich der bordvolle Abfluss bei dichtem Auwald und einem erhöhten Windungsgrad gegenüber dem Ausgangszustand mit geradlinigem Verlauf ohne Bewuchs um 17 %. An der Ilme und Leine beträgt die Abnahme bei dieser Variante jeweils 21 % (Tab. 8.18). Bei den anderen Varianten ergeben sich entsprechend geringere Reduzierungen des bordvollen Abflusses (Tab. 8.7). An der Aller konnten aufgrund des geringen Einflusses des Uferbewuchses bei den sehr breiten Querschnitten am Allerunterlauf und einer relativ geringen Erhöhung des Windungsgrades keine Änderungen des bordvollen Abflusses festgestellt werden.

- Die Art und Dichte der Bewuchsanpflanzung ist entscheidend für die Aufstauhöhe im Hochwasserfall. Durch Rückstaueffekte können Gefährdungen für Siedlungen entstehen. Besonders hohe Wasserstände werden durch flächendeckenden dichten Auwald hervorgerufen.

In der Tab. 8.19 sind die ermittelten Wasserspiegeldifferenzen mit dichtem Auwaldbewuchs gegenüber dem Ausgangszustand aufgeführt. Dabei beschreibt die

Variante 4 einen Zustand mit dichtem Auwald ohne Änderung des Gewässerverlaufs. Hinter der Variante 5 steht die Erhöhung des Windungsgrades entsprechend den Karten von 1780. In der Variante 6 sind die Merkmale der Varianten 4 und 5 zusammengefasst (Tab. 5.6).

**Tab. 8.18 Reduzierung des bordvollen Abflusses durch dichten Auwald und einem erhöhten Windungsgrad an Bever, Ilme und Leine**

Variante	Q = bordvoller Abfluss [m³/s]					
	P = prozentualer Abfluss bezogen auf den Ausgangszustand					
	Bever		Ilme		Leine	
	Q	P	Q	P	Q	P
	[m³/s]	[%]	[m³/s]	[%]	[m³/s]	[%]
1*	3,0	100	14 / 15	100	210	100
6*	2,5	83	11 / 12	79	165	79

\* Variante 1: Ausgangszustand, Variante 6: dichter Auwald und erhöhter Windungsgrad

Auffällig in der Tab. 8.19 ist eine leichte Reduzierung des Wasserspiegels durch Auwaldbewuchs an der Bever. Dies ist auf eine Fließgeschwindigkeitserhöhung, die eine Senkung des Wasserspiegels verursacht, zurückzuführen. Die größten Wasserspiegelanstiege sind an der Leine und Aller mit ihren großen Vorländern, die in diesen Varianten vollständig mit Bewuchs versehen sind, zu verzeichnen. Die Erhöhung des Wasserspiegels durch einen erhöhten Windungsgrad, der einen verlängerten Fließweg und eine Reduzierung des Sohlgefälles im Hauptquerschnitt mit sich bringt, fällt im Vergleich durch die Erhöhung verursacht durch dichten Auwaldbewuchs recht gering aus. Bei getrennter Betrachtung der Varianten 4 und 5 können diese nicht einfach in ihrer Wirkung auf den Wasserspiegel aufsummiert werden. In der gemeinsamen Modellierung des Auwaldbewuchses und des erhöhten Windungsgrades ergeben sich nämlich höhere Wasserspiegeldifferenzen als bei einer einfachen Addition der Varianten 4 und 5 (Tab. 8.19). Die ermittelten Wasserspiegeldifferenzen weiterer Varianten und Zustände sind der Tab. 8.8 zu entnehmen.

**Tab. 8.19 Mittlere Wasserspiegeldifferenz durch dichten Auwald mit und ohne Erhöhung des Windungsgrades gegenüber dem Ausgangszustand (geradlinig ohne Bewuchs) für den HQ100 Zustand**

Variante	Wasserspiegeldifferenz [cm]			
	Bewer	Ilme	Leine	Aller
4*	-2	19	119	115
5*	5	5	8	2
6*	8	35	139	128

\* Variante 4: dichter Auwald, Variante 5: erhöhter Windungsgrad, Variante 6: dichter Auwald und erhöhter Windungsgrad

- Ob eine Hochwasserwelle in ihrer Spitze durch Renaturierungsmaßnahmen, insbesondere durch Auwälder, reduziert wird, hängt stark von der Form der Welle ab. Bei steilen Wellen mit einer kurzen Anlaufzeit kann eine deutliche Reduzierung des Spitzenabflusses erreicht werden. Abflusswellen mit langer Anlaufzeit und fülligem Volumen hingegen werden kaum abgeflacht. Die in den untersuchten Gewässern vorkommenden Hochwasserwellen weisen in der Regel einen flachen Anstieg auf, so dass sich der Retentionsraum allmählich nach Überschreiten des bordvollen Abflusses füllt. Beim Eintreffen der Hochwasserspitze ist dieser Raum dann bereits gefüllt und die Spitze erfährt keine merkliche Abflussreduzierung. Aus Sicht des Hochwasserschutzes sind deshalb Lösungen mit Poldern und Hochwasserrückhaltebecken, die gezielt zur Kappung der Hochwasserspitzen gesteuert werden können, vorzuziehen. Maßnahmen, die lediglich den Retentionsraum vergrößern, wie zum Beispiel Deichrückverlegungen, sind aus Sicht des Hochwasserschutzes keine geeigneten Maßnahmen.

In dieser Untersuchung konnte lediglich an der Leine beim Hochwasserereignis im Juni 1981 eine deutliche Reduzierung des Spitzenabflusses durch Auwaldbewuchs auf dem Vorland erzielt werden. Hierbei handelt es sich um eine relativ spitze Hochwasserwelle (Abb. 8.20). Die Abnahme des Spitzenabflusses beträgt 7,2 % gegenüber 3,9 % im Ausgangszustand (Tab. 8.20). Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass der Wasserspiegel dabei um 90 cm ansteigt. Weiterhin sind in der Tab. 8.20 Spitzenabflüsse auslaufender Wellen für vorliegende Hochwasserereignisse an Leine, Ilme und Bever für den Zustand mit dichtem Auwald (Variante 4) gegenüber dem Ausgangszustand (Variante 1) aufgeführt. Hierbei sind lediglich geringe Reduzierungen des Spitzenabflusses zu vermerken. Es handelt sich dabei um Hochwasserwellen mit flachem Anstieg (Abb. 8.21), die typisch für die untersuchten Gewässer sind.

Die Ergebnisse weiterer Varianten können den Tab. 8.14 bis Tab. 8.16 entnommen werden.

**Tab. 8.20 Vergleich der Spitzenabflüsse auslaufender Wellen aus dem jeweiligen Untersuchungsabschnitt**

<b>Gewässer</b>	<b>Spitzenabfluss</b>	<b>max. Wassertiefe</b>	<b>Abnahme Spitzenabfluss</b>	<b>Spitzenabfluss</b>	<b>max. Wassertiefe</b>	<b>Abnahme Spitzenabfluss</b>
Variante	[m³/s]	[m]	[%]	[m³/s]	[m]	[%]
<b>Leine</b>	<b>Ereignis März 1981</b> Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 359 m³/s Abflussvolumen = 232 Mio. m³			<b>Ereignis Juni 1981</b> Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 587 m³/s Abflussvolumen = 156 Mio. m³		
1*	355	5,9	1,1	564	6,4	3,9
4*	357	6,4	0,5	545	7,3	7,2
<b>Ilme</b>	<b>Ereignis Dezember 1981</b> Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 22,9 m³/s Abflussvolumen = 8,3 Mio. m³			<b>Ereignis Dezember 1988</b> Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 29,8 m³/s Abflussvolumen = 9,6 Mio. m³		
1*	22,8	1,6	0,4	29,0	1,7	2,7
4*	22,7	1,6	0,9	28,6	1,7	4,0
<b>Bewer</b>	<b>Ereignis Dezember 1988</b> Zulaufwelle: Spitzenabfluss = 9,9 m³/s Abflussvolumen = 2,0 Mio. m³			An der Aller lagen für die Untersuchung keine Hochwasserwellen vor.		
1*	9,6	1,2	3,0			
4*	9,6	1,2	3,0			

\* Variante 1: Ausgangszustand, Variante 4: dichter Auwald

- Durch die Ansiedlung von dichtem Bewuchs in der Aue konzentriert sich der Abfluss im Hauptquerschnitt, wodurch hier höhere Fließgeschwindigkeiten auftreten. Diese können verstärkte Erosionen an der Sohle und am Ufer auslösen. Eintie-

fungen des Gewässerbettes und Uferabbrüche können die Folgen sein. Diese Thematik ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

In der Tab. 8.21 sind die Fließgeschwindigkeitsdifferenzen gegenüber dem Ausgangszustand ohne Bewuchs aufgeführt. Die Differenzen reichen von 0,14 m/s an der Bever bis zu 0,76 m/s an der Aller.

**Tab. 8.21 Fließgeschwindigkeitserhöhungen durch dichten Auwaldbewuchs gegenüber dem Ausgangszustand**

Variante	Fließgeschwindigkeitsdifferenz [m/s]			
	Bever	Ilme	Leine	Aller
Variante 4*	0,14	0,31	0,44	0,76

\* Variante 4: dichter Auwald

Es hat sich bei den untersuchten Gewässern gezeigt, dass der Anteil des Vorlandabflusses mit der Größe des Gewässers im HQ100 Zustand zunimmt (Tab. 8.10). Dadurch wirken sich Bewuchseinflüsse auch auf dem Vorland entsprechend stärker auf den Abfluss im Hauptquerschnitt aus, wie durch die Fließgeschwindigkeitserhöhungen deutlich wird.

Die Ergebnisse der weiteren Varianten sind der Tab. 8.9 zu entnehmen.

## 9 AUSBLICK

Der Konflikt zwischen den Belangen des Hochwasserschutzes und Aspekten des Naturschutzes, die den Fließgewässern eine besondere Verbindungsfunktion von Biotopen zusprechen, wird in nächster Zeit wegen der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie immer wieder diskutiert werden. Die anstehenden Maßnahmenplanungen mit dem Ziel des guten ökologischen Zustands werden vielfach Veränderungen an den Gewässern mit entsprechenden Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss bewirken.

In diesem Zusammenhang ist auf die Problematik der Unterhaltungsverbände hinzuweisen, die einerseits einen ordnungsgemäßen Hochwasserabfluss gewährleisten müssen, andererseits aber die naturnahe Entwicklung an den Gewässern zu fördern haben. Bei der freien Gewässerentwicklung, bei der sich der Lauf des Gewässers und der Bewuchs am Ufer und auf dem Vorland frei entfalten dürfen, ist es nicht genau vorhersehbar, welche Zustände sich über Jahre und Jahrzehnte einstellen werden. Es handelt sich hierbei um einen ständigen Veränderungsprozess; einen Status Quo gibt es dabei nicht. Um jedoch einen ordnungsgemäßen Hochwasserabfluss gewährleisten zu können, muss die freie Gewässerentwicklung beobachtet werden und bei Bedarf eingeschritten werden.

Handlungsempfehlungen für Unterhaltungsmaßnahmen an Gewässern mit freier Entwicklung sollten die Möglichkeiten der sich einstellenden Zustände, insbesondere bezüglich des Gewässerverlaufs und des Bewuchses, mit entsprechenden Hinweisen zum Einfluss auf den Hochwasserabfluss beinhalten. Sicherlich können nicht alle möglichen Zustände betrachtet werden, so dass eine Auswahl getroffen werden muss, die zum einen Extremsituationen nachbildet, so dass potenzielle Gefahren erkannt werden, als auch Zustände, die klären, wann eingegriffen werden muss. Die Annahmen für verschiedene Zustände sollten potenzielle Möglichkeiten abdecken, werden in der Regel aber den genauen Zustand wie in der Natur mit genauen Standorten und Durchmessern von Gehölzbewuchs usw. nicht widerspiegeln. Dies ist für Handlungsempfehlungen für Unterhaltungsmaßnahmen jedoch auch nicht erforderlich. Relative Aussagen (zum Beispiel zum Zustand ohne Bewuchs) sind hierfür ausreichend.

Zur Ableitung von möglichen Entwicklungszuständen können Leitbilder, Referenzgewässer und Referenzabschnitte herangezogen werden. Wie sich das Gewässer jedoch im betrachteten Abschnitt genau entwickeln wird, geht hieraus nicht hervor. In Anlehnung an die Regimegleichung können geometrische Größen wie Breite und Tiefe des Gewässers abgeleitet werden, die als Anhaltswerte für sich möglicherweise einstellende Profile dienen. An den untersuchten Gewässerabschnitten zeigte sich

eine gute Korrelation der Gewässerparameter in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße und des Gefälles am Mittelgebirgsbach Bever. Alle weiteren Gewässer zeigten in den untersuchten Abschnitten große Streuungen. Diese sind jedoch typisch für Gewässer ihrer Klasse. Eine entsprechende Varianz der Querprofile sollte bei Renaturierungsmaßnahmen und Gewässerentwicklungskonzepten Berücksichtigung finden. Hier ist zu empfehlen eine freie Gewässerentwicklung zuzulassen und räumliche Grenzen zu definieren (zum Beispiel an Straßen und Brückenbauwerken), nach dessen Erreichen unterhaltend eingegriffen werden sollte. Weiterhin können Hinweise zur Laufentwicklung größerer Gewässer historischen Karten, sofern im entsprechenden Detaillierungsgrad vorhanden, entnommen werden.

Als Extremvariante werden in dieser Untersuchung ein Windungsgrad entsprechend historischer Karten aus dem Jahre 1780 und ein dichter Auwald angesetzt. In dieser Kombination sind, wie zu erwarten, die größten Veränderungen bezüglich des Hochwasserabflusses zu verzeichnen. Hierbei ergeben sich hohe Wasserstandserhöhungen, die zwar das Retentionsvolumen erhöhen, jedoch lediglich bei spitzen Hochwasserwellen eine deutliche Reduzierung des Hochwasserscheitels hervorrufen. Die typischen Hochwasserwellen der untersuchten Gewässer weisen allerdings eine füllige Form auf. Bei diesen füllt sich der Retentionsraum bereits beim anlaufenden Ast der Welle und die Hochwasserspitze wird nicht reduziert. Die Fließgeschwindigkeit nimmt in dieser Variante durch die Konzentration des Abflusses im Hauptquerschnitt zu, obwohl durch den erhöhten Windungsgrad das Gefälle reduziert wird. Die Ergebnisse der anderen Varianten weisen ähnliche Resultate auf. Die Auswirkungen sind meist jedoch geringer.

Der Windungsgrad eines Gewässers nimmt Einfluss auf das Sohlgefälle und somit auf die Abflusskapazität. Hierdurch wird die Ausuferungshäufigkeit bestimmt. Je mehr Abfluss bei hohen Hochwässern über das Vorland abgeführt wird und hier dem Talgefälle folgt, desto mehr nimmt der Einfluss des Windungsgrades ab.

Bezüglich des Bewuchses hat sich die Variante mit Bewuchs entlang des Ufers und vereinzelt Bewuchsbeständen auf dem Vorland als Kompromiss zwischen Hochwasserschutz- und Naturschutzbelangen herausgestellt. Die Auswirkungen auf die Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten im Hochwasserfall sind dabei aus Sicht des Hochwasserschutzes tolerierbar und eine Vernetzung von Biotopen entlang der Fließgewässer ist hierbei möglich.

## LITERATUR

- ACKERS, P., 1964: Experiments on small streams in alluvium. J. Hydr. Div., ASCE, Vol.90, No. HY4.
- BAUER, C., 2004: Bestimmung der Retentionspotenziale naturnaher Maßnahmen in Gewässer und Aue mit hydraulischen Methoden. Kasseler Wasserbau-Mitteilungen, Heft 16 / 2004.
- BAUER, H., J., 1985: Bewertung des ökologischen Zustandes eines Fließgewässers, LÖLF, Mitteilungen Nr. 10, Heft 3, S. 10 – 15.
- BECKER, K., 1999: Der Einfluss von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluß in Flüssen mit gegliedertem Querschnitt. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 202.
- BECKER, U., 1995: Scherfestigkeit eines auelehmartigen Bodens. Studienarbeit am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover (unveröffentlicht).
- BERGHOLZ, C., 2003: Study of Soil Erosion with GIS. International Symposium „25 Years of Assessment of Erosion“ 22 - 26 September 2003, Gent, Belgien.
- BILLIB, H., 1973: Abflussdaten des Aller – Leine - Oker – Gebietes (Hauptzahlen und Hochwasserdaten. Hrsg.: Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Hannover.
- BLENCH, T., 1957: Regime behaviour of canals and rivers. Butterworth, London, England.
- BLENCH, T., ERB, R., B., 1957: Regime analysis of laboratory data on bed load transport. La Houille Blanche, Vol. 2.
- BLENCH, T., 1969: Mobile-Bed Fluviology. University of Alberta Press, Edmonton, Canada.
- BRAY, D., I., 1982: Regime equations for gravel-bed rivers. In: Hey, R., D., Brathurst, J., C., Thorne, C., R., (Hrsg.): Gravel-Bed Rivers. John Wiley and Sons, USA.
- BRICE, J., C., 1983: Planform properties of meandering rivers. In: Elliott, C., M. (Ed.): River Meandering. Proceedings of the Conference Rivers 1983. American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- BROOKES, A., SHIELDS, F., D., 1996: River Channel Restoration. Guiding Principles for Sustainable Projects. John Wiley and Sons, Chichester, England.

BWG, 2001: Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des Bundesamtes für Wasser und Geologie, Serie Wasser, Nr.1, Bern.

BWK, 1999: Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern. Teil 1 – Stationäre Berechnung der Wasserspiegellinie unter besonderer Berücksichtigung von Bewuchs- und Bauwerkseinflüssen. Merkblatt 1/BWK, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V., Düsseldorf.

BWK, 2000: Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern. Grundlagen für stationäre, eindimensionale Wasserspiegellagenberechnungen. Berichte 1/2000, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V., Düsseldorf.

CHARLTON, F., G., 1975: Design of meandering alluvial channels. In: Science, technology and environmental management; edited by Hey, R. D. and Davies, T. D., Saxon House / Lexington Books.

CHOW, V. T., 1959: Open Channel Hydraulics. International Student Edition. McGraw-Hill Book, Tokyo.

DAHL, H.-J., HULLEN, M., HERR, W., TODESKINO, D., WIEGLIEB, G., 1989: Beiträge zum Fließgewässerschutz in Niedersachsen. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt – Fachbehörde für Naturschutz (Hrsg.): Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen, Heft 18, Hannover.

DA SILVA A., M., A., F., 1991: Alternate bars and related alluvial processes. M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Canada.

DIN 4047, 1993: Landwirtschaftlicher Wasserbau. Deutsches Institut für Normung.

DIN 4049, 1992: Hydrologie. Deutsches Institut für Normung.

DITTRICH, A., 1998: Wechselwirkung Morphologie / Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 198.

DVWK, 1991: Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. DVWK Merkblatt 220.

DVWK, 1996: Zur aktuellen Leitbilddiskussion. – DVWK-Nachrichten 148, Nov. 1996, Bonn.

DVWK, 1999: Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften 124, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.

EDGAR, D., E., 1983: The Role of Geomorphic Thresholds in Determining Alluvial Channel Morphology. In: Elliott, C., M. (Ed.): River Meandering. Proceedings of the Conference Rivers 1983. American Society of Civil Engineers, New York, USA.

ENGELUND, F., HANSEN, E., 1967: A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Technical Press, Kopenhagen.

FGG-WESER, 2005: Homepage der Flussgebietsgemeinschaft Weser. Bewirtschaftungsplan Flussgebietseinheit Weser – Bestandsaufnahme 2005.

[http://fgg-weser.de/wrrl/bericht\\_2005.html](http://fgg-weser.de/wrrl/bericht_2005.html)

FITTSCHEN, I., 1995: Die Querprofilform naturnaher Bergbäche im Keuper und vergleichende Betrachtungen mit Bergbächen im Buntsandstein-Odenwald. Vertieferarbeit im Fach Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.

FORSCHUNGSGRUPPE FLIEßGEWÄSSER, 1997: Fließgewässer, Ergebnisse interdisziplinärer Studien an naturnahen Fließgewässern und Auen in Baden-Württemberg mit Schwerpunkt Keuper und Grundgebirgs-Schwarzwald. unveröffentlicht.

GEOSUM, 2004: Geografisches Informationssystem Umwelt (GEOSUM) des Niedersächsischen Umweltministeriums (Karten zur Hydrogeologie, Geologie und Bodenkunde).

[http://www.mu.niedersachsen.de/GEOSUM/Karten/index\\_karten.htm](http://www.mu.niedersachsen.de/GEOSUM/Karten/index_karten.htm)

GERSTGRASER, C., 2000: Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern. Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen. Dissertation an der BOKU Wien, Nr. 52. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.

GHOSH, S., K., 1983: A study of regime theories for an alluvial meandering channel. Proc. Second Int. Symp. on River Sedimentation, Nanjing, China, Vol. 1, paper C11.

GLOVER, R., E., FLOREY, Q., L., 1951: Stable channel profiles. US. Bureau of Reclamation Hyd. Lab., Report Hyd-325.

GUTKNECHT, D., 2001: Ingenieurhydrologie. – In: Lecher, K., Lühr, H.-P., Zanke, U., C., E., (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, Parey Verlag, Berlin.

HAIDER, S., 1994: Der Beitrag von Vorlandüberflutungen zur Verformung von Hochwasserwellen, Dissertation, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

HEY, R., D., 1982: Design equations for mobile gravel-bed rivers. In: Hey, R., D., Brathurst, J., C., Thorne, C., R., (Hrsg.): Gravel-Bed Rivers. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.

HEY, R., D., THORNE, C., R., 1983: Hydraulic geometry of mobile gravel-bed rivers. Proc. Second Int. Symp. on River Sedimentation, Nanjing, China, Vol. 1, paper C11.

HUMBORG, H., G., 1995: Typologische und morphologische Untersuchungen an Bergbächen im Buntsandstein-Odenwald. Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 192.

HUNZINGER, L., M., 1998: Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 159.

IDN, 1984: Gewässerkundliche Sonderuntersuchungen über die Hochwasserabflüsse im unteren Allertal von Hademsdorf bis Verden. Ingenieur-Dienst Nord, Oyten, unveröffentlicht.

INGLIS, C., C., ALLEN, F., H., 1957: The regimen of the Thames Estuary as affected by currents, salinities and river flows. Proc. Instn. Civ. Engrs., Vol. 7.

JACOBI, M., 1994: Leitbilder für Renaturierungsvorhaben am Mittelgebirgsbach Gelbach / Westerwald. Diplomarbeit im Fach Geoökologie am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.

JÄRVELÄ, J., 2002: Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. Journal of Hydrology 269 (2002) 44 – 54.

JENSEN, A., 1998: Rehabilitation of the River Murry, Australia; Identifying Causes of Degradation and Options for Bringing the Environment into the management Equation. - In: Waal, L. C., Large, A. R. G., Wade, P. M., (Editors): Rehabilitation of Rivers – Principles and Implementation. Wiley, Chichester, England.

KELLERHALS, R., 1967: Stable channels with gravel-paved beds. Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, 93 (WW1), 63 – 84.

KLASZ, R., SCHLÖGL, R., SCHMALFUß, R., 2004: Uferrückbau an schiffbaren Flüssen – Konzepte für die Donau östlich von Wien. Mitteilung des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 100.

KNIGHT, D. W., 1992: SERC – Flood Channel Facility – Experimental Data Phase A. Hydraulics Research Ltd., Report SR 314.

L+N INGENIEURGEMEINSCHAFT, 2001: WaspTools. Programm zur Wasserspiegellagenberechnung mit dem Verfahren nach Manning-Strickler oder mit dem Allgemeinen Fließgesetz. Handbuch zum Programm.

LACEY, G., 1929: Stable channels in alluvium. Min. Proc. Instn. Civ. Engrs. Vol. 229.

LACEY, G., 1930: Stable channels in alluvium. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 29, 259 – 292.

LANGE, G., LECHER, K., 1989: Gewässerregelung / Gewässerpflege – Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern (2. Auflage). Parey, Hamburg und Berlin.

LAPTUREV, N., V., 1969: Computation of stable channel beds in weak, fine graded ground. Soviet Hydrology, Selected Papers, No. 3.

LAWA, 2000: Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland - Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer – Empfehlung. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.), Kulturbuch-Verlag GmbH, Berlin.

LECHER, K., GROß, P., RICKERT, K., 1996a: Gewässer Bewer - Hydraulische Untersuchungen zur Ermittlung von naturnahen Maßnahmen im Bereich des gesetzlich festgestellten Überschwemmungsgebietes der Bewer und des Gewässers Bewer. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, unveröffentlicht.

LECHER, K., RICKERT, K., GROß, P., 1996b: Hydraulische Zusatzuntersuchung zur Umsetzung naturnaher Maßnahmen und zur Abstimmung des Unterhaltungsrahmenplanes am Gewässer Saale / Riehe im Bereich der Stadt Elze und Berücksichtigung des Geschiebetriebes der Saale. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, unveröffentlicht.

LECHER, K., RICKERT, K., LANGE, C., 1997: Untersuchungen zur Ableitung naturnaher Maßnahmen im Leineinzugsgebiet – Untersuchungsabschnitt Elze bis Sarstedt. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, unveröffentlicht.

LECHER, K.: 1997: Untersuchungen zur Ableitung naturnaher Maßnahmen im Leineinzugsgebiet – Grundlagenbericht. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, unveröffentlicht.

LECHER, K., RICKERT, K., NICKEL, M., 2000: Hydraulische Untersuchung Leinetal – Untersuchungsabschnitt Salzderhelden bis Regierungsgrenze (Erzhausen). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, unveröffentlicht.

LEHMANN, B., BERNHARDT, H., H., NESTMANN, F., 2003: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Zwischenbericht zum BWPlus-Forschungsvorhaben BWC 21019.

LEHMANN, B., 2004: Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum – unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Karlsruhe (noch unveröffentlicht).

LEHMANN, B., SCHNEIDER, S., BERNHARDT, H., H., NESTMANN, F., 2004: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Zwischenbericht zum BWPlus-Forschungsvorhaben BWC 21019.

LEINEVERBAND GÖTTINGEN, 2000: Planung und Umsetzung von naturnahen Maßnahmen an Fließgewässern und Auen - Hinweise und Empfehlungen für den niedersächsischen Mittelgebirgsraum - Erfahrungen aus dem Modellvorhaben des Landes Niedersachsen "Naturnahe Gestaltung der Bewer". Leineverband Göttingen, Körperschaft des öffentlichen Rechts (Hrsg.), Göttingen.

LEOPOLD, L., B., MADDOCK, T. JR., 1953: The Hydraulic Geometry of Stream Channels and some Physiographic Implications. US Geological Survey Professional Paper 252, US Government Printing Office, San Francisco, USA.

LEOPOLD, L., B., MILLER, J., 1956: Ephemeral streams – hydraulic factors and their relation to the drainage net. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 282-A.

LEOPOLD, L., B., WOLMAN, M., G., 1957: River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. Geological Survey Professional Paper 282-B, Washington, USA.

LEOPOLD, L., B., BAGNOLD, R., A., WOLMAN, M., G., BRUSH, L., M., 1960: Flow resistance in sinuous or irregular channels. United States Geological Survey Prof. Paper 282-D, S. 111 – 134.

MANGELSDORF, J., SCHEUERMANN, K., 1980: Flußmorphologie – Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Oldenbourg Verlag, München.

MANIAK, U., 1993: Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure (3. Auflage). Springer-Verlag, Berlin.

MARENBACH, B., 2002: Der Beitrag naturnaher Retentionsmaßnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung. Bericht des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Nr. 13.

MEYER-PETER, E., MÜLLER, R., 1948: Formulas for Bed-Load Transport. IAHR, Stockholm.

MEWES, P., 2002: Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flusskurven. Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Darmstadt, Heft 126.

MORRIS, H., M., 1955: Flow in rough conduits. ASCE Transactions, Paper No. 2745, Vol. 120.

NADOLNY, I., 1994: Morphologie und Hydrologie naturnaher Flachlandbäche unter gewässermorphologischen Gesichtspunkten. Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 189.

- NASH, E., A., 1959: Discussion on a study of the bank-full discharge of rivers in England and Wales. Proc. Instn. Civ. Engrs., Vol. 14.
- NIKURADSE, J., 1933: Strömungsgesetze in rauen Rohren. Forschungsheft 361. Ausgabe B, Band 4.
- NIXON, M., 1959: A study of the bank-full discharge of rivers in England and Wales. Proc. Instn. Civ. Engrs., Vol. 12.
- NLÖ, 1995: Fließgewässerrenaturierung in der Praxis. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Eigenverlag, Hildesheim.
- NLÖ, 2001 a: Gewässerstrukturgütekartierung in Niedersachsen – Detailverfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Eigenverlag, Hildesheim.
- NLÖ, 2001 b: Gewässergütebericht 2000. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Eigenverlag, Hildesheim.
- NLÖ, 2001 c: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet – 1999. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Eigenverlag, Hildesheim.
- NLÖ, 2003: Hochwasserbemessungswerte für die Fließgewässer in Niedersachsen - Abflüsse in hydrologischen Landschaften über Regionalisierungsansätze. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Oberirdische Gewässer 18/2003, Eigenverlag, Hildesheim.
- NUDING, A., 1991: Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch. Mitteilung des Instituts für Wasserbau der TU Darmstadt, Nr. 35.
- OPLATKA, M., 1998: Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 156.
- OUMERACI, H., 2001: Küsteningenieurwesen. – In: Lecher, K., Lühr, H.-P., Zanke, U. (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft (8. Auflage), Parey, Berlin.
- PASCHE, E., 1984: Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematischen Erfassung. Diss. RWTH Aachen.
- PATT, H. 2001: Hochwasser-Handbuch. – Auswirkungen und Schutz. Springer-Verlag, Berlin.
- PATT, H., P., JÜRGING, P., KRAUS, W., 1998: Naturnaher Wasserbau – Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. Springer Verlag, Berlin.
- PETIT, F., DAXHELET, C., 1989: Determination du debit a pleins bords et de sa reduction dans differentes rivières de Moyenne et Haut Belgique. Bulletin de la Societe Geographique de Liege, 25: 69 – 84.

PRETZSCH, K., 1994: Spätpleistozäne und holozäne Ablagerungen als Indikatoren der fluvialen Morphodynamik im Bereich der mittleren Leine. Göttinger Geographische Abhandlungen, H. 99, Verlag Erich Goltze, Göttingen.

RASPER, M., 2001: Morphologische Fließgewässertypen in Niedersachsen – Leitbilder und Referenzgewässer. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (Hrsg.), Hildesheim.

RASPER, M., SELHEIM, P., STEINHARDT, B., 1991: Das Niedersächsische Fließgewässerschutzsystem – Grundlagen für ein Schutzprogramm – Einzugsgebiete von Oker, Aller und Leine. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt – Fachbehörde für Naturschutz (Hrsg.): Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen, Heft 25/2, Hannover.

RICKERT, K., 1986: Der Einfluss von Gehölzen auf die Lichtverhältnisse und das Abflussverhalten in Fließgewässern. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 61.

RICKERT, K., NICKEL, A., ALBRECHT, R., 1994: Dokumentation des Programmes WASPILA – Ein Programm zur Wasserspiegellagenberechnung. Universität Hannover und Ingenieurdienst Nord, Oyten.

ROSGEN, D., 1996: Applied River Morphology. Wildland Hydrology, Colorado, USA.

ROTHER, N., 1989: Holozäne fluviale Morphodynamik im Ilmetal und an der Nordostabflachung des Sollings (Süd-niedersachsen). Göttinger Geographische Abhandlungen, Heft 87. Goltze Verlag, Göttingen.

ROTTNER, J., 1959: A Formula for Bed-load Transportation. La Houille Blanc, No. 3.

ROUVÉ, G. (Hrsg.), 1987: Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau. DFG-Forschungsbericht, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.

RÜDIGER, A., 1972: Beitrag zur Querschnittsbemessung bei niedrigwasserregulierten schiffbaren Wasserläufen. Dissertation an der Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen des Wissenschaftsrates der Technischen Universität Dresden.

SCHERER, M., SCHERLE, J., 1994: Erhebung und Beschreibung ausgebauter Bäche in Baden-Württemberg, die sich in eigendynamischer Rückentwicklung in einen naturnäheren Zustand befinden, und Erarbeitung von Empfehlungen zur Wahl der Renaturierungsmethode. Abschlussbericht des gleichnamigen Projektes – Angewandte Ökologie – der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; unveröffentlicht.

SCHERLE, J. ET AL., 1995: Entwicklungskonzept für naturnahe Gewässerstrukturen der Wiese. Bericht des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.

he im Auftrag des Amtes für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Waldshut - Außenstelle Lörrach; unveröffentlicht.

SCHERLE, J., 1999: Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen – Grundlagen, Leitbilder, Planung . Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 199.

SCHMIDTKE, S., 2002: Morphologische Untersuchung am Mittelgebirgsbach Bever. Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, unveröffentlicht.

SCHNACK, W. 1993: Modellvorhaben naturnahe Gestaltung der Bever, Gemarkung Lüthorst / Deitersen, Dassel / Solling – Beurteilung der Bodenverhältnisse. Gutachten des Ingenieurbüros Schnack und Partner, Hannover.

SCHNAUDER, I., 2004: Strömungsstruktur und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 224.

SCHRÖDER, H., RICKERT, K., BLÜMEL, W., HEITKAMP, U., 2002: Naturnahe Gestaltung des Fließgewässers Bever – Ein Modellvorhaben des Landes Niedersachsen. Landnutzung und Landentwicklung 43, Heft 1/2002, S. 7 – 14.

SCHUMACHER, F., 1995: Zur Durchflussberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer. Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, Nr. 127.

SCHUMM, S., A., 1960: The Shape of alluvial Channels in relation to sediment type. Geological Surv., Prof. Paper 352-B.

SCHUMM, S., A., 1977: The Fluvial System. John Wiley Sons, Inc., New York, USA.

SHEN, H., W., LI, R., M., 1973: Analysis of Resistance over Staggered Roughness. ASCE, J. Hydraul. Div.

SHIELDS JR., F., D., 1996: Hydraulic and Hydrologic Stability. In: Brookes, A., Shields Jr., F., D. (Hrsg): River Channel Restoration – Guiding Principles for Sustainable Projects. Wiley, Chichester, England.

SIMON, D., B., ALBERTSON, M., L., 1960: Uniform water convergence channels in alluvial materials. J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 86, No. HY5.

SPECHT, F.-J., 2002: Einfluss von Gerinnebreite und Uferbewuchs auf die hydraulisch-sedimentologischen Verhältnisse naturnaher Fließgewässer. Mitteilung des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, Nr. 153.

STEPHAN, U., 2002: Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation. Wiener Mitteilungen des Instituts für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Wien, Band 180.

STORCHENEGGER, I., J., 1983: Orts- und ereignisbeschreibende Parameter für Niederschlag-Abfluss-Modelle. Dissertation Nr. 7479 der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

STOSCHEK, O., 1996: Stabilitätsuntersuchung von verschiedenen Böschungen an der Leine. Studienarbeit am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover (unveröffentlicht).

SUBRAMANYA, K., 1998: Engineering Hydrology (Second Edition). Tata McGraw-Hill, New Delhi, India.

TOMINAGA, A., NEZU, I., EZAKI, K., 1989: Experimental study on secondary currents in compound open-channel flows. Proceedings of the Technical Session A: Turbulence in Hydraulics, XXIII International Congress of the IAHR, Ottawa, P. A-15 – A-22.

TOMINAGA, A., NEZU, I., 1990: Turbulent structure in compound open-channel flows. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 1, P. 375 – 396.

WAAL, L. C., LARGE, A. R. G., WADE, P. M., 1998: Rehabilitation of Rivers – Principles and Implementation. Wiley, Chichester, England.

YALIN, M., S., 1992: River Mechanics. Pergamon Press, Oxford, England.

ZANKE, U., 1982: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, Berlin.

ZANKE, U., 1990: Der Beginn der Sedimentbewegung als Wahrscheinlichkeitsproblem. Wasser- und Boden, Heft 1.

ZANKE, U., 2002: Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer. Parey-Verlag, Berlin.

## **ANLAGEN**

**Anlage 1 Regimegleichungen im Überblick (nach YALIN, 1992)**

Literaturquelle	KornØ D <sub>50</sub> [mm]	Gewässerbett- breite b	Wassertiefe h	Gefälle I
LEOPOLD, ET AL., 1953	-	$\sim Q_{ma}^{0,45 \text{ bis } 0,56}$	$\sim Q_{ma}^{0,37 \text{ bis } 0,45}$	$\sim Q_{ma}^{(-0,19) \text{ bis } (-0,50)}$
LEOPOLD, ET AL., 1956	0,7 bis 5,0	$5,0Q_{uf}^{0,50}$	$0,10Q_{uf}^{0,28}$	$\sim Q_{uf}^{0,0667}$
NIXON, 1959	0,1 bis 0,6	$1,67Q_{bf}^{0,50}$	$0,55Q_{bf}^{0,33}$	$\sim Q_{bf}^{-0,1}$
NASH, 1959	Ton	$1,32Q_{bf}^{0,54}$	$0,93Q_{bf}^{0,27}$	$\sim Q_{bf}^{0,12}$
LACEY, 1929	0,1 bis 0,4	$2,67Q_d^{0,50}$	$0,47Q_d^{0,33}$	$0,00039f^{1,5}Q_d^{-0,11}$
LAPTUREV, 1964	-	$2,58Q_d^{0,50}$	$0,52Q_d^{0,33}$	$\sim Q_d^{0,10}$
ACKERS, 1964	0,16 & 0,34	$3,6Q_{\text{expt}}^{0,42}$	$0,28Q_{\text{expt}}^{0,43}$	keine gute Korrelation
BLENCH, 1957 Dünen, Sandbett	0,1 bis 0,6 0,3 bis 7,0	$\left[\frac{F_b}{F_s}\right]^{0,50} Q_{bf}^{0,5}$	$\left[\frac{F_s}{F_b^2}\right]^{-0,33} Q_{bf}^{0,33}$	$\beta_s Q_{bf}^{-0,167}$
BLENCH, 1957 keine Dünen, Kiesbett	> 7,0	$\left[\frac{F_b}{F_s}\right]^{-0,50} Q_{bf}^{0,5}$	$\left[\frac{F_s}{F_b D}\right]^{-0,20} Q_{bf}^{0,40}$	$\sim D^{6/5} Q_{bf}^{-0,40}$
SIMONS & AL- BERTSON, 1960	0,03 bis 0,8	$2,5Q_{bf}^{0,51}$	$R = 0,43Q_{bf}^{0,36}$	$0,00675Q_{bf}^{-0,40}$
BOSE, 1936 in ACKERS, 1964	-	$2,8Q_d^{0,50}$	$0,47Q_d^{0,33}$	$0,209D^{0,86}Q_d^{-0,21}$
INGLIS, 1957, 1949	$\approx 0,2$	$\sim Q^{0,50}$	$\sim Q^{0,33}$	$\sim Q^{-0,167}$
HEY, 1982	21,0 bis 190,0	$2,2Q_s^{-0,05}Q^{0,54}$	$0,161D^{-0,15}Q^{0,41}$	$0,68Q_s^{0,13}D^{0,97}Q^{-0,53}$
BRAY, 1982 Regression	19,0 bis 145,0	$2,08D^{-0,07}Q_2^{0,528}$	$0,256D^{-0,025}Q_2^{0,331}$	$0,0965D^{0,586}Q_2^{-0,334}$
BRAY, 1982 Grenzwert- methode	19,0 bis 145,0	$2,67Q_2^{0,50}$	$0,0585D^{-0,29}Q_2^{0,428}$	$0,968D^{1,285}Q_2^{-0,428}$
BRAY, 1982 KELLERHALS Methode	19,0 bis 145,0	$1,80Q_2^{0,50}$	$0,166D^{-0,12}Q_2^{0,40}$	$0,12D^{0,92}Q_2^{-0,40}$
BRAY, 1982 Dimensions- analytische Näherung	19,0 bis 145,0	$2,0D^{-0,24}Q_2^{0,496}$	$0,157D^{0,008}Q_2^{0,397}$	$0,259D^{0,937}Q_2^{-0,375}$
GLOVER & FLO- REY, 1951	-	$0,93D^{-0,15}Q^{0,46}$	$0,12D^{-0,15}Q^{0,46}$	$0,44D^{1,15}Q^{-0,46}$
GHOSH, 1983	> 6,0	$0,87D^{-0,15}Q^{0,46}$	$0,11D^{-0,15}Q^{0,46}$	$0,68D^{1,15}Q^{-0,46}$
HEY & THORNE, 1983	14,0 bis 176,0	$(2,3 \text{ bis } 4,3)Q_{bf}^{0,50}$	$(0,16 \text{ bis } 0,20) \times$ $\times Q_s^{-0,03}D^{-0,14}Q_{bf}^{0,39}$	$0,42Q_s^{0,17}D^{0,83}Q_{bf}^{-0,57}$

## **Anlage 2 Hinweise zur Anwendung des Wasserspiegellagenprogramms**

Für die Simulationen wurde das Programm „WASPILA“ bzw. „WaspTools“ verwendet. „WASPILA“ steht für Wassersspiegellagen-Programm, d.h. es berechnet die Höhe der Wasserstände im Simulationsabschnitt (RICKERT ET AL., 1994). Die Programm-entwicklung erfolgte im Zuge der Ergebnisse des DFG-Schwerpunktprogrammes (Kapitel 3.1). „WaspTools“ ist eine Weiterentwicklung des Programmes „WASPILA“ auf Windows-Basis (L+N INGENIEURGEMEINSCHAFT, 2001). Im Folgenden wird der Name „WaspTools“ stellvertretend für beide Programme verwendet.

Zur Berechnung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Gewählt wird das Verfahren nach PASCHE (Kapitel 3.1). Hierbei wird das Trennflächenverfahren angewendet, welches den Einfluss von Bewuchs gut nachbilden kann. In den Eingangsdateien können sowohl die Bewuchsbereiche als auch die Bewuchsparameter, wie Stamm-durchmesser und Abstand der Elemente zueinander, variiert werden. Insgesamt werden drei Eingangsdateien für jedes Querprofil benötigt:

Die GEOMETRI(e)-Dateien beinhalten Angaben zur Querschnittsgeometrie; neben den y-z-Koordinaten (Breite, Höhe) der Geländepunkte werden hierin auch der ab-flusswirksame Bereich und die Breite des Hauptquerschnitts festgelegt.

In den (Ch)KARAKTER-Dateien wird eine weitere Differenzierung vorgenommen. Die einzelnen Abschnitte der Profile werden je nach Lage (Vorland, Hauptquerschnitt), Geländeneigung (Sohle, Böschung) und Bewuchssituation (bewuchsfrei, bewachsen) unterteilt. Die Lage der Trennflächen zwischen Vorland und Hauptquerschnitt bzw. zwischen bewachsenen und bewuchsfreien Bereichen werden von dem Programm selbsttätig hinzugefügt.

Abschließend wird in den RAUHEIT(s)-Dateien festgelegt, welche Rauheiten und Bewuchsparameter den einzelnen Bereichen zugeordnet werden sollen.

Der Aufbau dieser drei ASCII - Dateien ist beispielhaft für das Profil 4 790 an der Bewer in Abb. A1 zusammengestellt.

Zunächst wird der Name des Fließgewässers genannt, dann folgt die Angabe der gewählten Alternative (hier: 0). Hierüber gibt es die Möglichkeit, die Profilgeometrie zu verändern, ohne die gesamten Daten neu eingeben zu müssen. Die Angabe der Variante (hier: 1) dient analog der Unterscheidung verschiedener Charakterisie-rungsdateien. In den Rauheitsdateien wird zusätzlich das gewählte Berechnungsver-fahren (hier: 4 für das Verfahren nach PASCHE) angegeben und in den Charakterda-teien steht die „2“ für die Berechnung nach dem Allgemeinen Fließgesetz. Die unter-einander stehenden Zahlen in der Charakterdatei geben Aufschluss über die Anzahl der unterschiedlichen Bereiche. Hier sind dies zwei Vorlandbereiche, 5 Hauptquer-

schnittsbereiche und 4 Trennflächen. Die Bedeutungen der in WASPTOOLS verwendeten Abkürzungen werden in der Tab. A1 erläutert.

GEOMETRI-Datei BEW04790.G0	KARAKTER-Datei BEW04790.K01	RAUHEIT-Datei BEW04790.014
Bewer Alt: 0 4790 1 13 3 11 -12.490 155.680 -7.220 155.650 -2.610 155.650 -1.650 155.300 -1.230 154.670 0.000 154.610 0.680 154.680 1.530 154.890 1.720 155.330 2.820 155.420 3.270 155.660 7.990 155.630 13.010 155.650	Bewer Alt: 0 Var: 1 Auft:2 2 5 4 4790 VSB -12.490 -2.610 THB -2.610 -2.610 HBB -2.610 -1.600 THT -1.600 -1.600 HBF -1.600 -1.230 HSF -1.230 0.000 HBF 0.000 1.720 THT 1.720 1.720 HBB 1.720 3.270 THB 3.270 3.270 VSB 3.270 13.010	Bewer Alt: 0 Var: 1 Verf:4 4790 0.600 0.100 1.000 1.000 0.400 0.100 1.000 1.000 0.400-1.000-1.000-1.000 0.300-1.000-1.000-1.000 0.400-1.000-1.000-1.000 0.400 0.100 1.000 1.000 0.600 0.100 1.000 1.000
↑                    ↑ y [m]                z [mNN]	↑            ↑            ↑ Bereich    von        bis        [m]	↑            ↑            ↑            ↑ k <sub>s</sub> d <sub>p</sub> a <sub>x</sub> a <sub>y</sub> [m]

Abb. A1 Beispielhafter Aufbau der WASPILA - Dateien (ASCII-Format)  
(SCHMIDTKE, 2002)

Jede der drei Dateien enthält zusätzlich zum Gewässernamen auch die Kilometrierung des Querprofils. Die waagerechte Zahlenreihe rechts neben der Angabe der Kilometrierung in der Geometriedatei gibt Aufschluss über den abflusswirksamen Bereich (hier von der ersten bis zur 13ten Zeile; gesamte Querschnittsbreite) und die Breite des Hauptquerschnitts (hier von Zeile drei bis Zeile 11).

Auch die Dateinamen geben Aufschluss über die Inhalte der entsprechenden Dateien: Zunächst werden die drei ersten Buchstaben des Fließgewässernamens genannt, dann folgt die Kilometrierung des Querprofils und in der Dateiendung steht „G“ für Geometrie und „K“ für Charakter. Die anschließende „0“ bezieht sich auf die Alternative, die „1“ auf die Variante und die „4“ der Rauheitsdatei auf das Berechnungsverfahren. Die Angaben in der Rauheitsdatei beziehen sich auf den jeweiligen Charakterisierungsbereich; die drei bewuchsfreien Bereiche des Hauptquerschnitts sind in der Rauheitsdatei mit einer „-1“ für die Bewuchsparameter versehen.

Zur Simulation von mäandrierenden Gewässern muss neben dem reduzierten Gefälle durch die Verlängerung des Fließweges im Hauptquerschnitt berücksichtigt werden, dass der Hauptquerschnitt und das Vorland, wenn es abflusswirksam ist, unterschiedliche Fließlängen aufweisen. Diese können in der Startdatei explizit angege-

ben werden. Die Berücksichtigung der verschiedenen Fließlängen findet entweder im Ansatz der Teilgeschwindigkeiten (Option A) oder bei der Ermittlung des Reibungsverlustes (Option B) statt (Abb. A2).

Tab. A1 Bedeutung der Abkürzungen im Programm WaspTools (Waspila)  
(nach RICKERT ET AL., 1994)

HSF	Hauptquerschnitt / Sohle / frei (d.h. ohne Bewuchs)
HSB	Hauptquerschnitt / Sohle / Bewuchs
HBF	Hauptquerschnitt / Böschung / frei
HBB	Hauptquerschnitt / Böschung / Bewuchs
VSF	Vorland / Sohle / frei
VSB	Vorland / Sohle / Bewuchs
VPF	Vorland / Böschung / frei
VBB	Vorland / Böschung / Bewuchs
THB	Trennfläche zwischen zwei Bewuchsbereichen
THT	Trennfläche zwischen einem bewuchsfreien und einem Bewuchsbereich
THF	Trennfläche zwischen zwei bewuchsfreien Bereichen
$k_s$ [m]	(messbare) äquivalente Sandrauheit
$d_p$ [m]	mittlerer Stabdurchmesser eines Bewuchselementes
$a_x$ [m]	Abstand der Bewuchselemente untereinander in Fließrichtung
$a_y$ [m]	Abstand der Bewuchselemente untereinander quer zur Fließrichtung

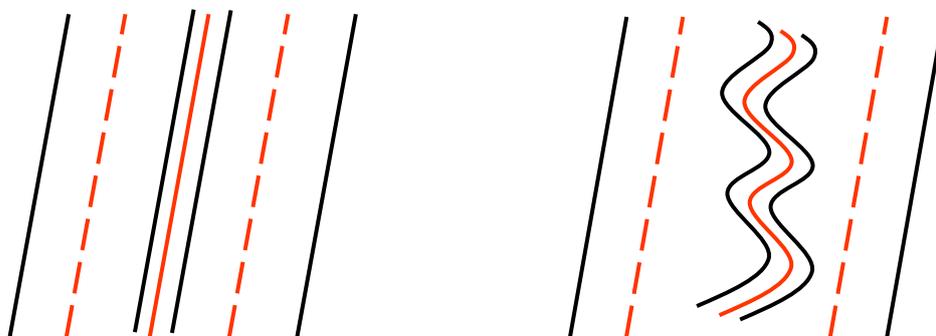


Abb. A2 Unterschiedliche Fließlängen im Hauptquerschnitt und abflusswirksamen Vorland

**Anlage 3 Abschnittseinteilung der „Untersuchung zur Ableitung naturnaher Maßnahmen im Leineinzugsgebiet“ zwischen Elze und Sarstedt (LECHER ET AL., 1997)**

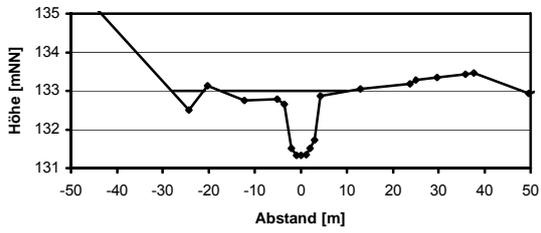
Be- reich	Gewässer- abschnitt	Station [km]	Ortsbeschreibung
1	II	71,030	Einmündung der Saale
		71,750	Pegel Poppenburg
		73,169	Straßenbrücke Burgstemmen + Flutbrücke (73,160 - 73,169)
		73,169	Straßenbrücke Burgstemmen + Flutbrücke
		74,146	Eisenbahnbrücke Elze-Nordstemmen (74,130 -74,146)
1	III	74,146	Eisenbahnbrücke Elze-Nordstemmen
		74,416	Hölzerne Brücke (74,411 - 74,416)
		74,416	Hölzerne Brücke
		75,729	Einmündung Haller
1	IV (Ausbau 2)	0,625	Einmündung Haller
		-0,009	Marienburgbrücke (0,000 - -0,009)
2	V (Ausbau 1)	0,000	Marienburgbrücke
		4,441	Wehr bei Schulenburg (4,440 - 4,441) + Abzweigung Mühlenleine
2	VI	81,379	Wehr bei Schulenburg + Abzweigung Mühlenleine
		82,124	Einmündung der Mühlenleine
		82,185	Kalenberger Leinebrücke (82,179 - 82,185)
2	VII	82,185	Kalenberger Leinebrücke
		83,610	Einmündung Rössingbach
2	VIII	83,610	Einmündung Rössingbach
		84,726	Brücke bei Jeinsen (84,721 - 84,726)
2	IX	84,726	Brücke bei Jeinsen
		87,517	Brücke bei Schliekum (87,513 - 87,517)
2	X	87,517	Brücke bei Schliekum
		90,120	Straßenbrücke bei Ruthe (90,110 - 90,120)
		90,300	ca. Einmündung Innerste

**Anlage 4 Verzeichnis der Bezugsquellen der Profile**

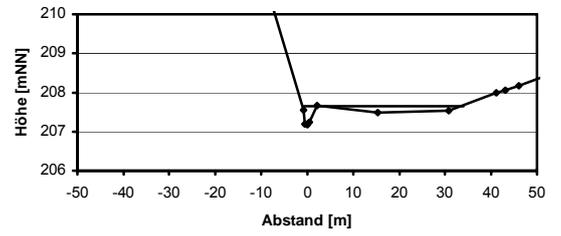
<b>Profile</b>	<b>Bezugsquelle</b>
Bewerprofile	Leineverband Göttingen
Ilmeprofile	Leineverband Göttingen
Leineprofile Mittellauf (ab km 126,679)	Leineverband Göttingen
Leineprofile Unterlauf	Bezirksregierung Hannover
Allerprofile	IDN Ingenieur-Dienst-Nord

### Anlage 5 Gewässerprofile

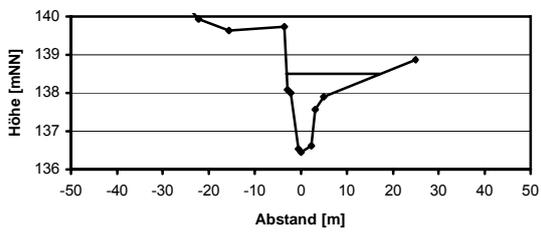
**Bewerprofil km 0,987**



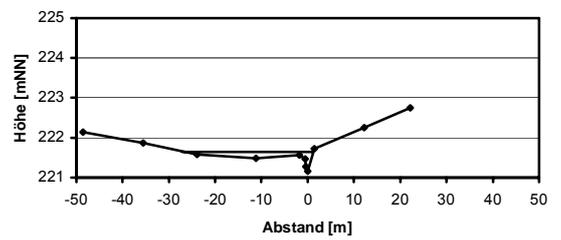
**Bewerprofil km 8,346**



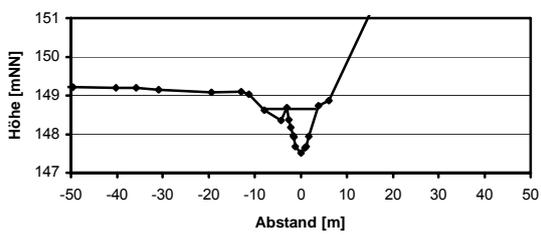
**Bewerprofil km 1,899**



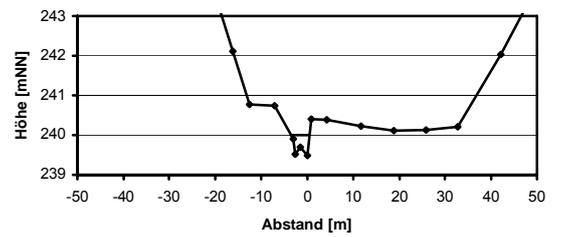
**Bewerprofil km 8,996**



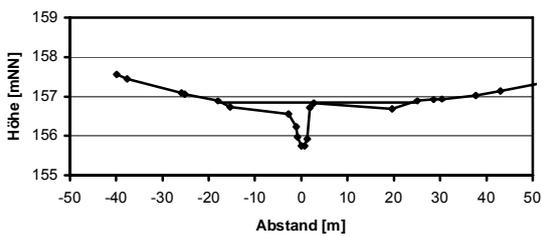
**Bewerprofil km 3,989**



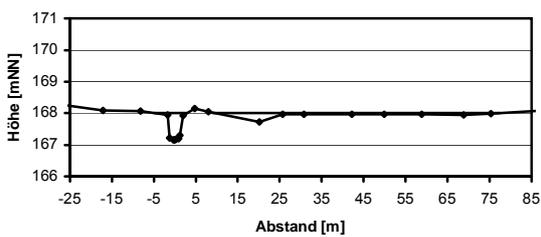
**Bewerprofil km 9,773**



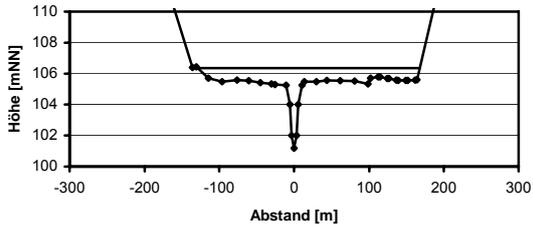
**Bewerprofil km 4,924**



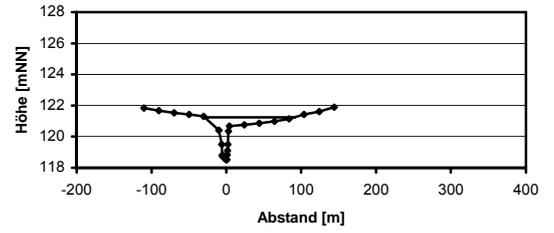
**Bewerprofil km 5,993**



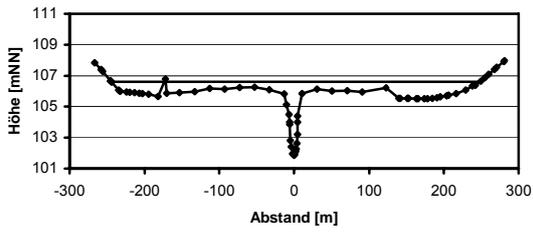
**Ilmeprofil km 1,056**



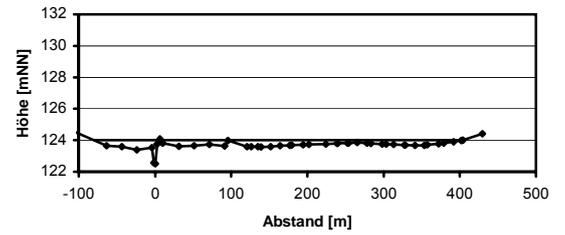
**Ilmeprofil km 10,109**



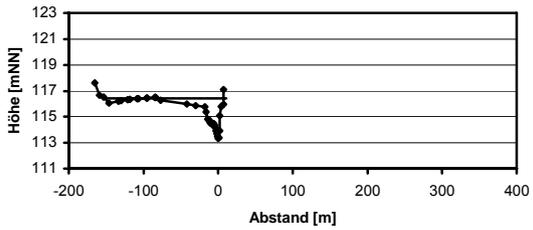
**Ilmeprofil km 2,060**



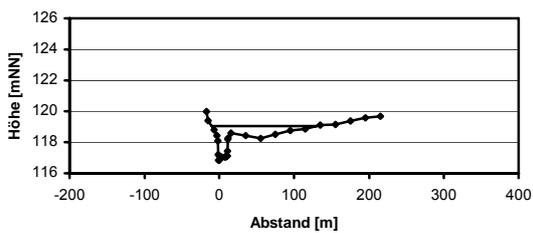
**Ilmeprofil km 11,060**



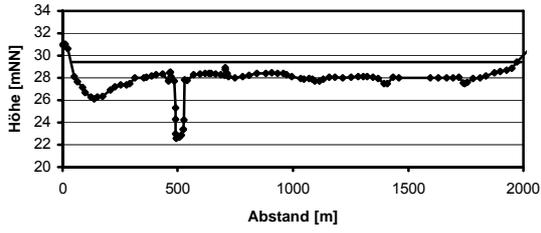
**Ilmeprofil km 8,100**



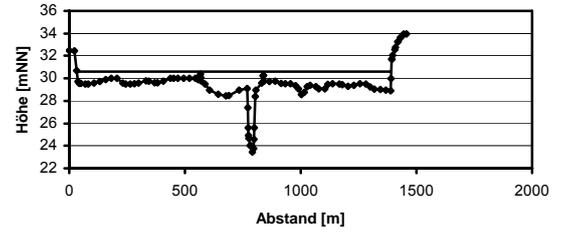
**Ilmeprofil km 9,229**



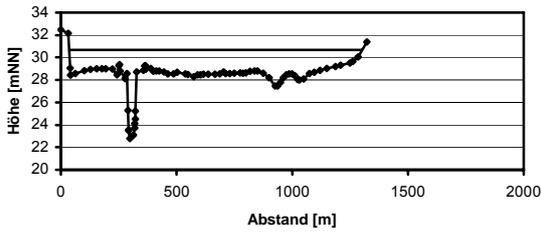
Leineprofil km 16,098



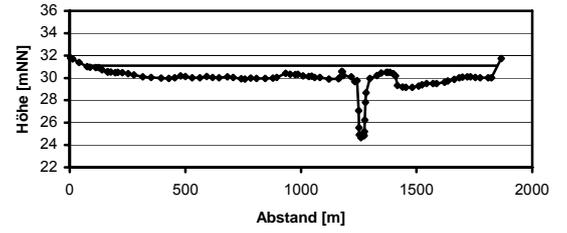
Leineprofil km 21,952



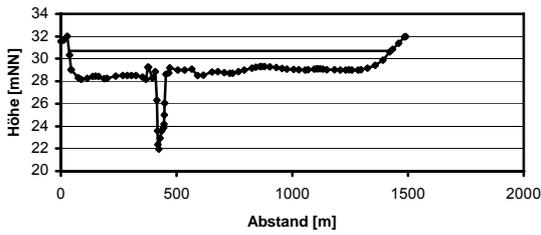
Leineprofil km 18,144



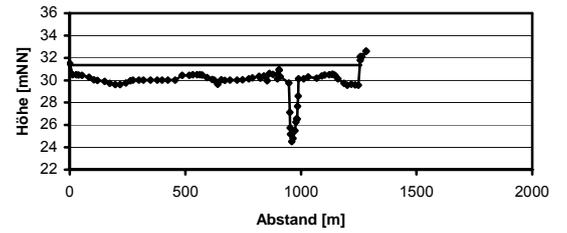
Leineprofil km 23,940



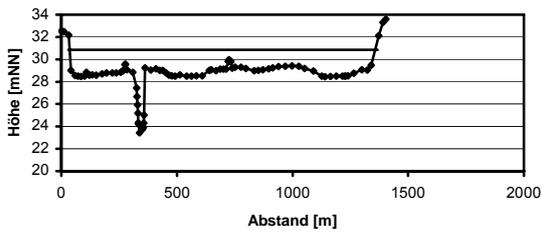
Leineprofil km 19,098



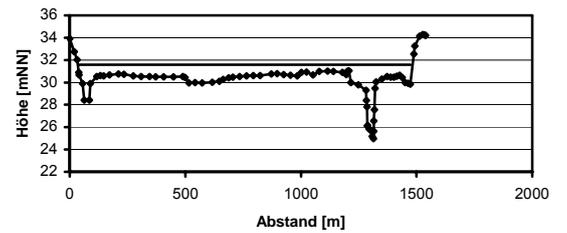
Leineprofil km 24,818



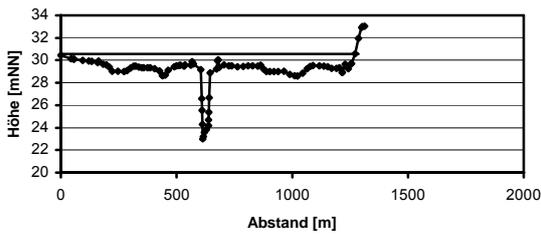
Leineprofil km 19,896



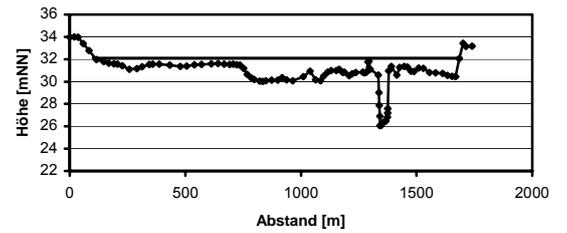
Leineprofil km 25,820



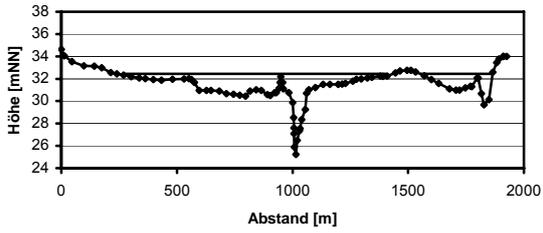
Leineprofil km 21,188



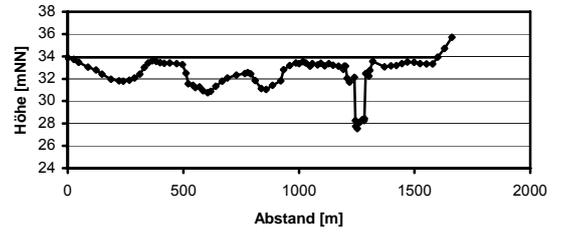
Leineprofil km 28,067



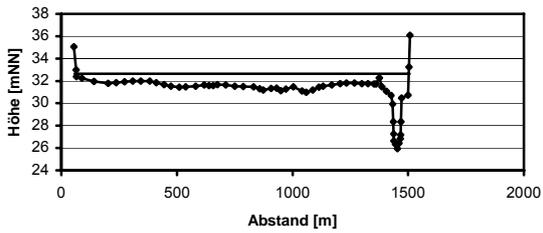
Leineprofil km 28,863



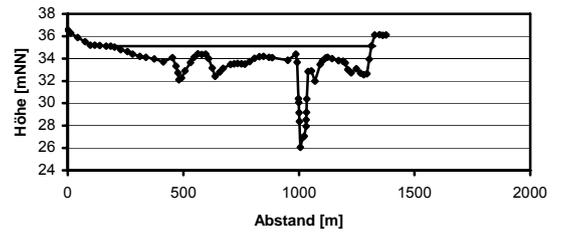
Leineprofil km 33,896



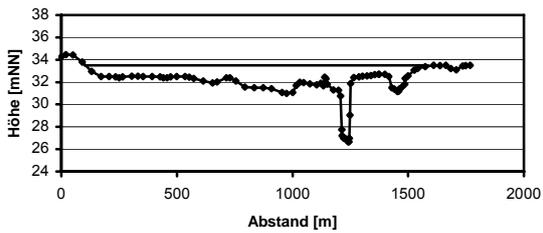
Leineprofil km 29,993



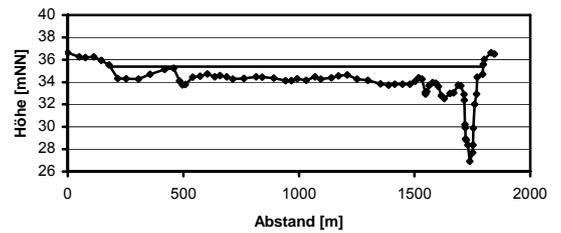
Leineprofil km 35,086



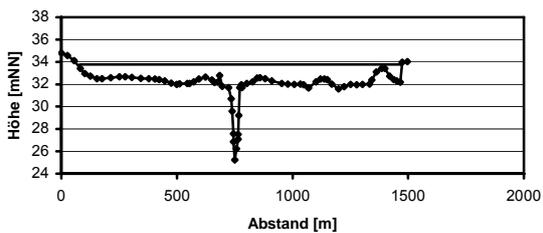
Leineprofil km 31,020



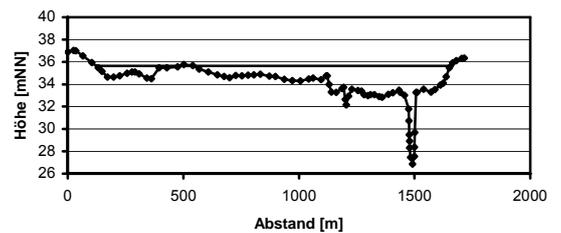
Leineprofil km 35,806



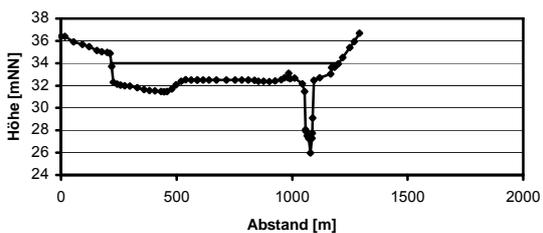
Leineprofil km 31,938



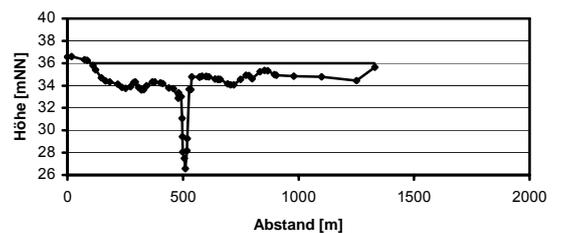
Leineprofil km 36,578



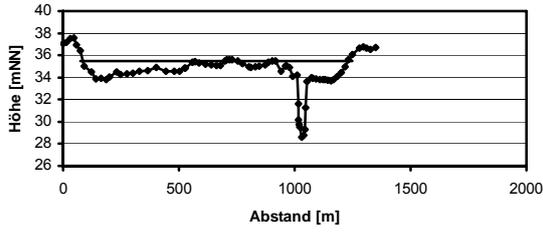
Leineprofil km 33,127



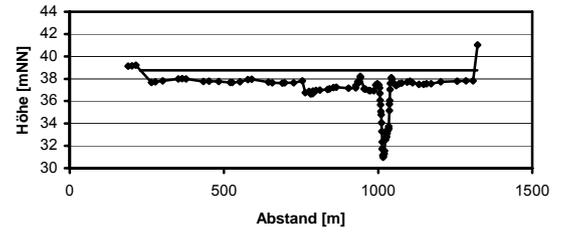
Leineprofil km 38,910



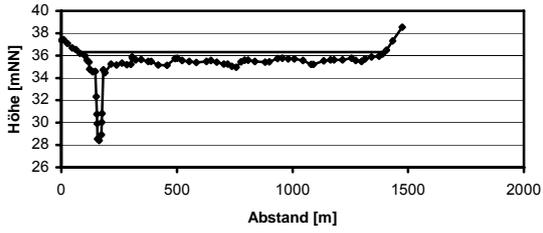
Leineprofil km 41,074



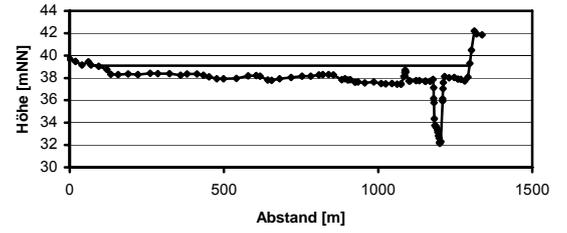
Leineprofil km 50,943



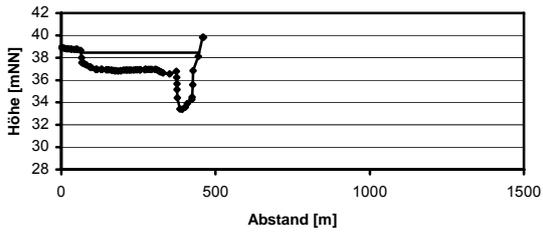
Leineprofil km 42,415



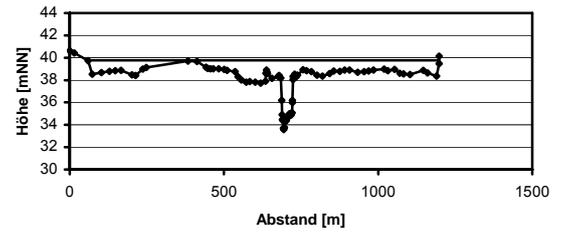
Leineprofil km 51,962



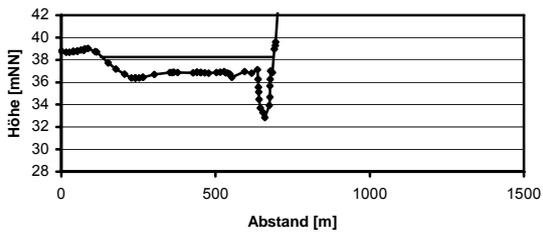
Leineprofil km 47,036



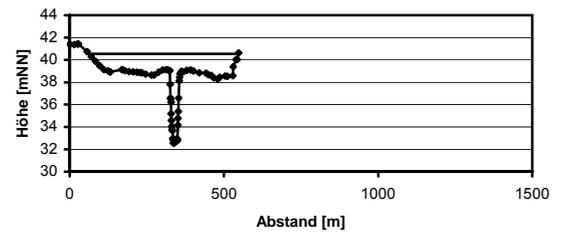
Leineprofil km 53,403



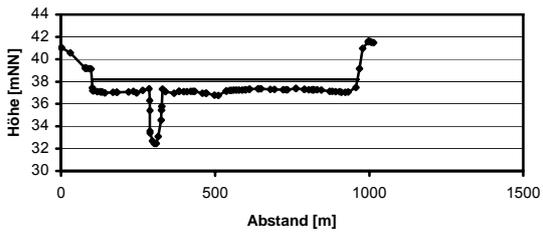
Leineprofil km 47,677



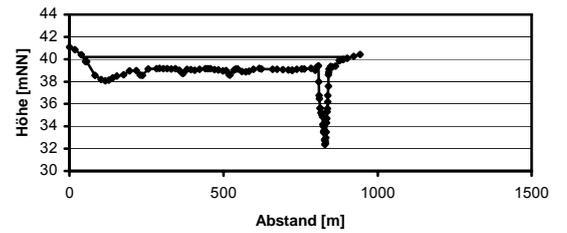
Leineprofil km 55,155



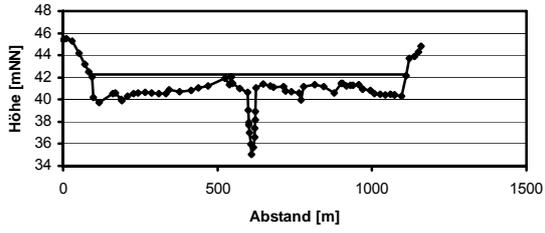
Leineprofil km 48,371



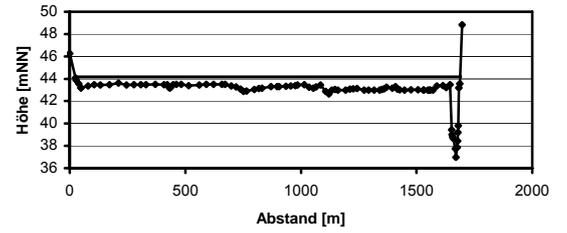
Leineprofil km 55,824



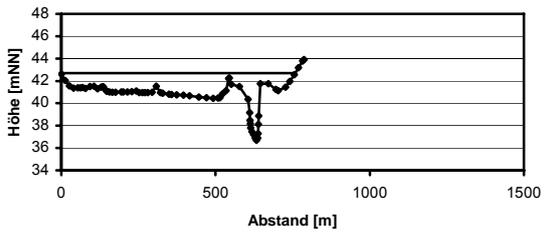
Leineprofil km 62,894



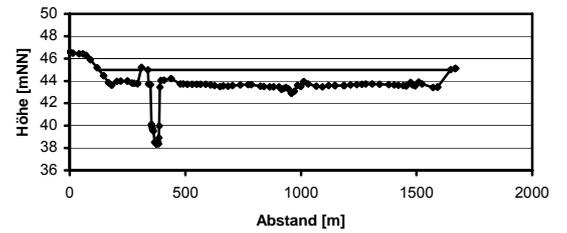
Leineprofil km 68,992



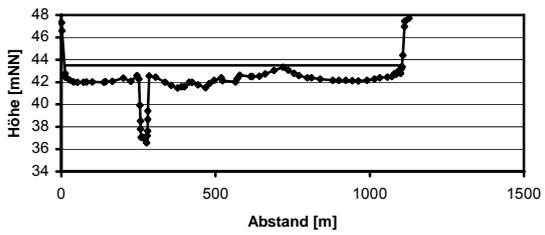
Leineprofil km 63,719



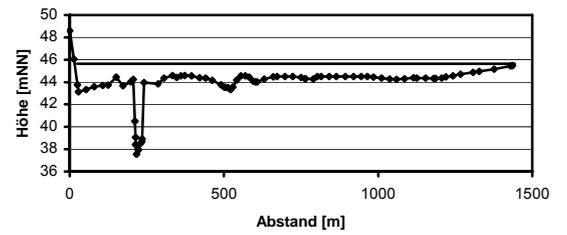
Leineprofil km 71,153



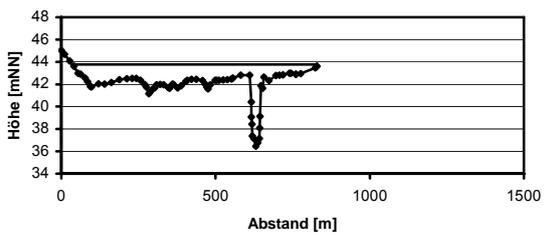
Leineprofil km 66,199



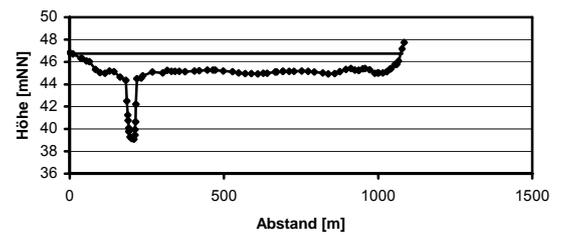
Leineprofil km 72,299



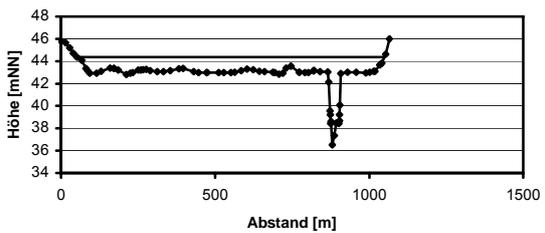
Leineprofil km 66,952



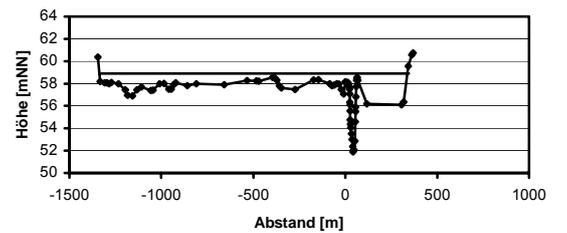
Leineprofil km 73,908



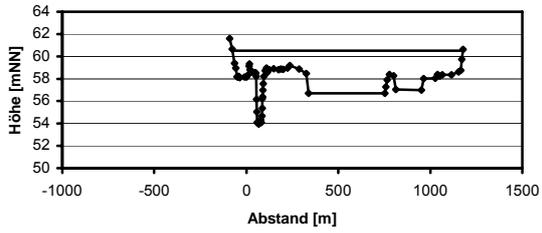
Leineprofil km 67,849



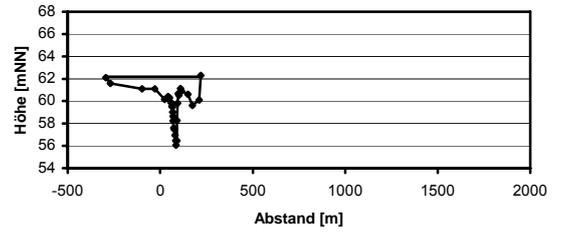
Leineprofil km 107,441



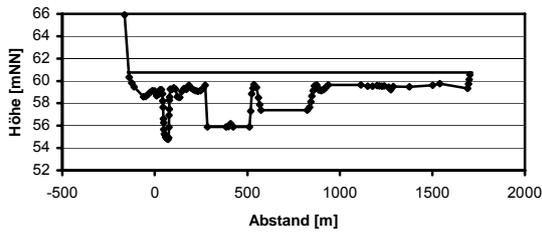
Leineprofil km 108,432



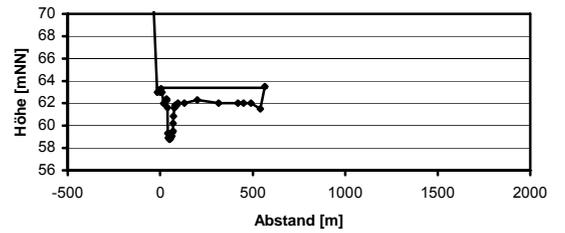
Leineprofil km 114,058



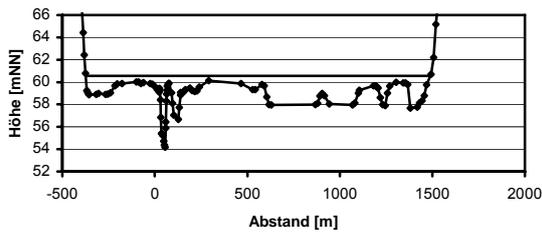
Leineprofil km 110,311



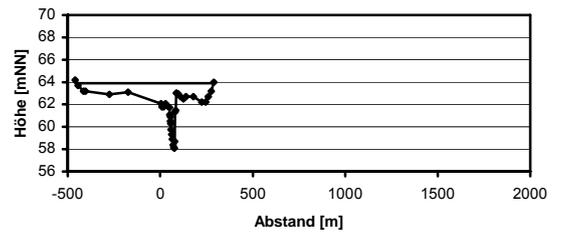
Leineprofil km 117,258



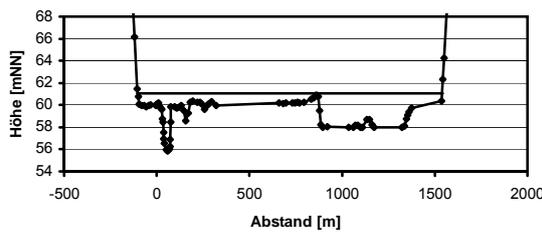
Leineprofil km 111,278



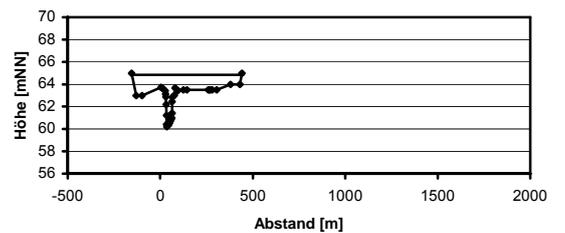
Leineprofil km 117,958



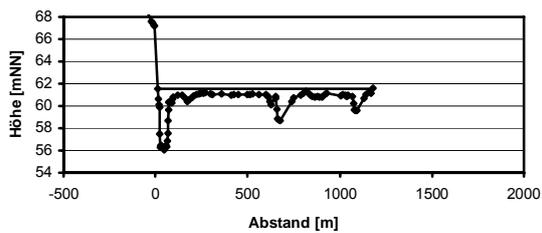
Leineprofil km 111,908



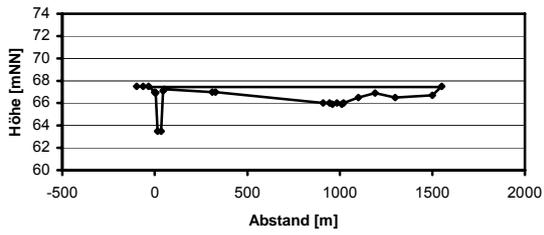
Leineprofil km 119,858



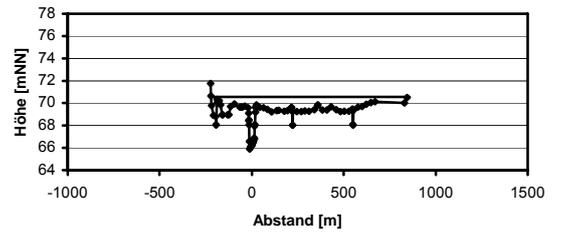
Leineprofil km 112,763



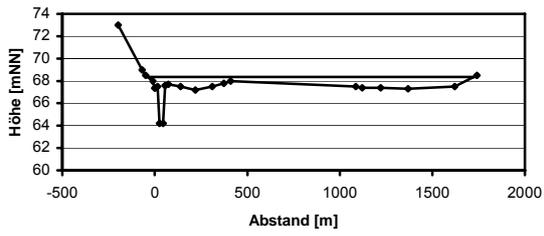
Leineprofil km 122,017



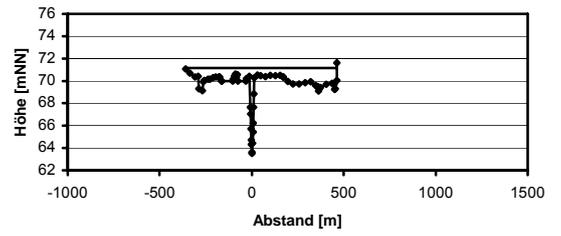
Leineprofil km 126,679



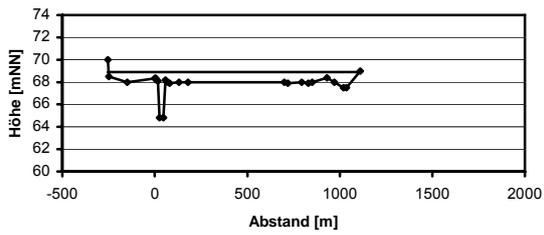
Leineprofil km 122,998



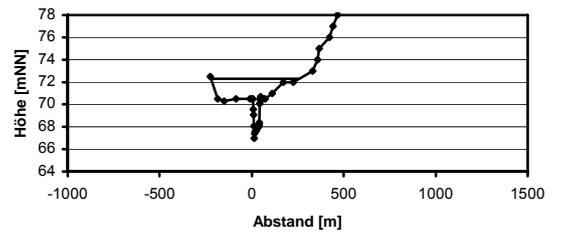
Leineprofil km 127,884



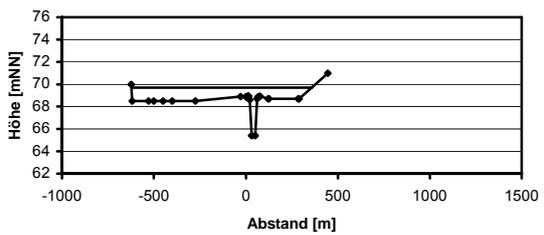
Leineprofil km 124,112



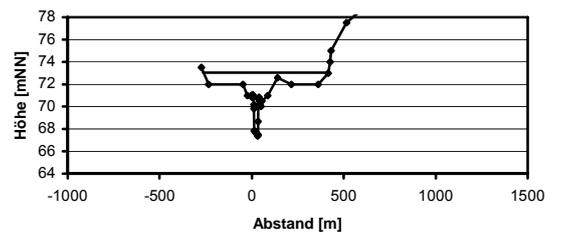
Leineprofil km 128,828



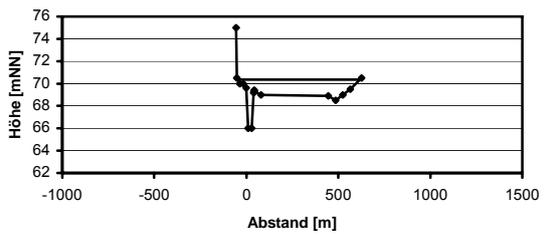
Leineprofil km 125,008



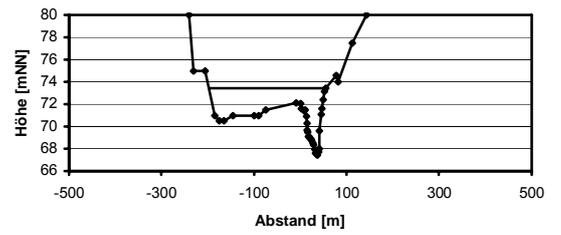
Leineprofil km 129,928



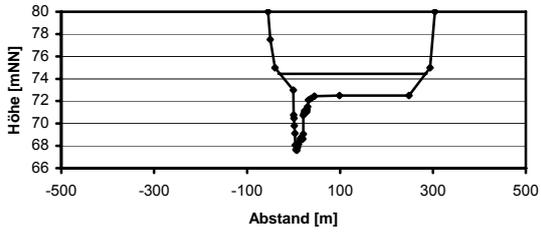
Leineprofil km 126,033



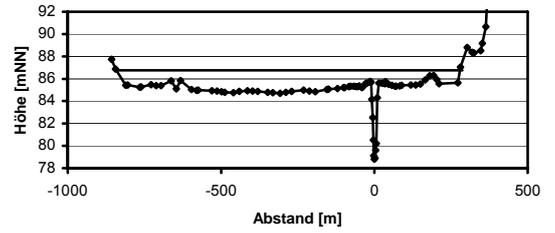
Leineprofil km 130,928



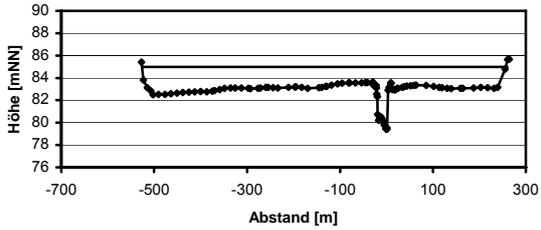
Leineprofil km 131,528



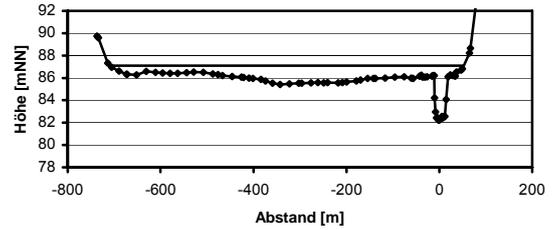
Leineprofil km 149,876



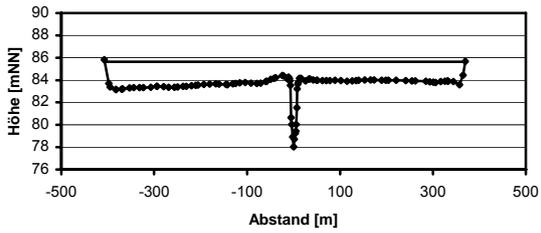
Leineprofil km 145,876



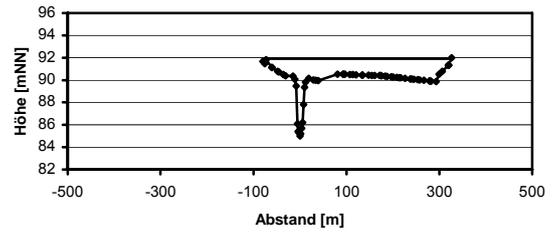
Leineprofil km 150,876



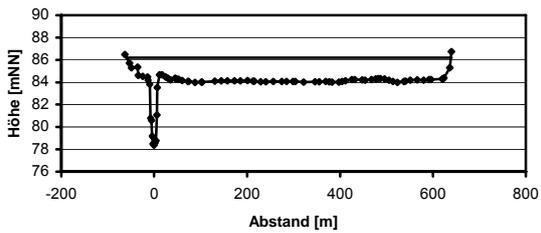
Leineprofil km 146,876



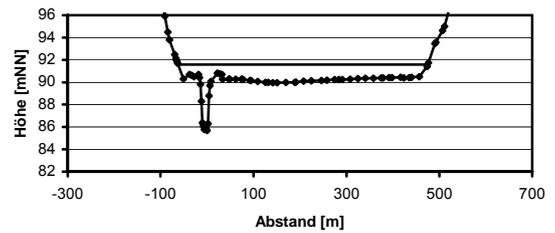
Leineprofil km 157,049



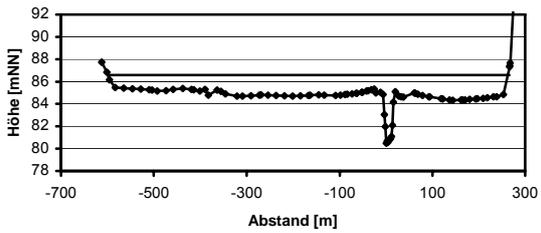
Leineprofil km 147,876



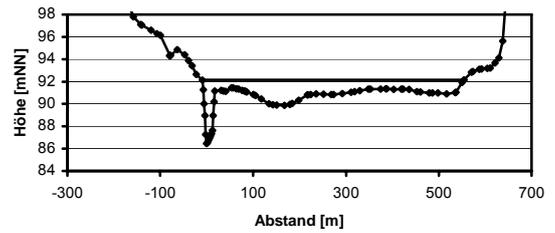
Leineprofil km 157,969



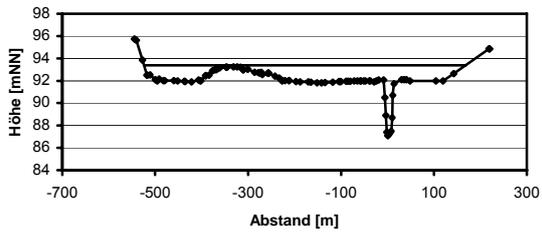
Leineprofil km 148,876



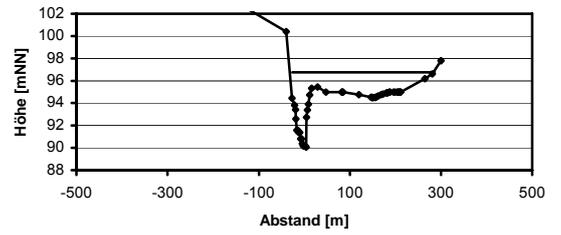
Leineprofil km 158,769



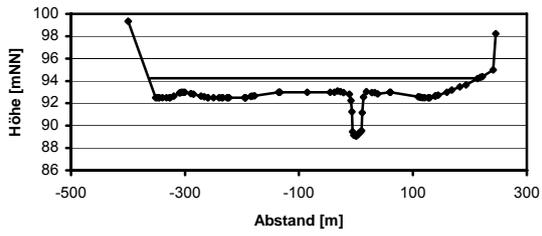
**Leineprofil km 159,544**



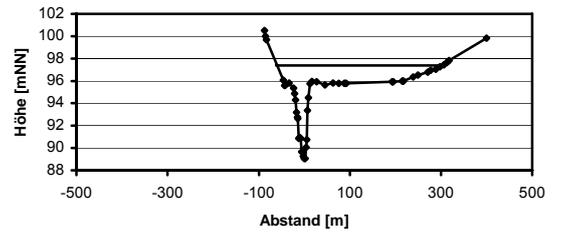
**Leineprofil km 164,904**



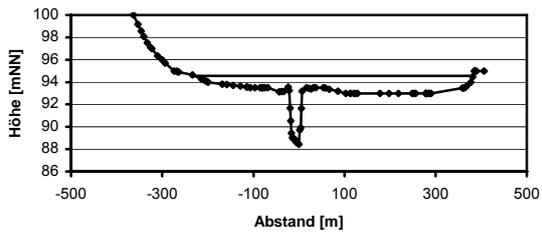
**Leineprofil km 160,704**



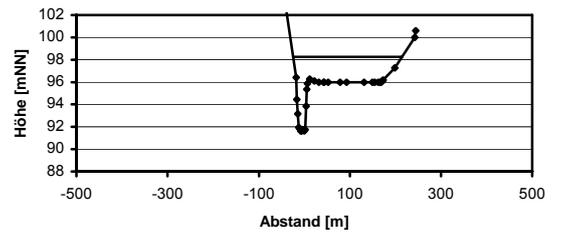
**Leineprofil km 165,704**



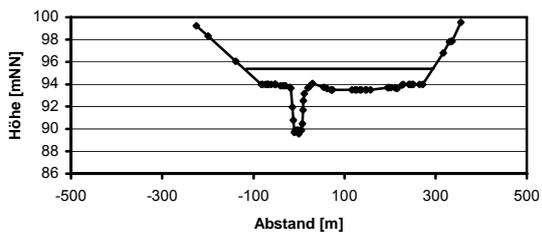
**Leineprofil km 161,704**



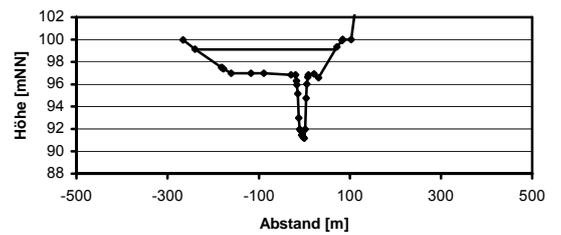
**Leineprofil km 166,904**



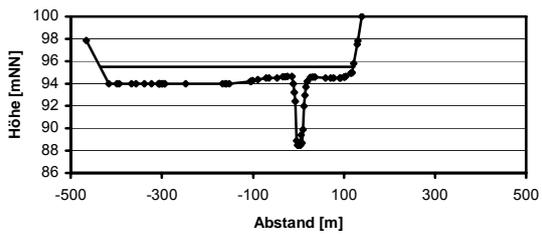
**Leineprofil km 162,704**



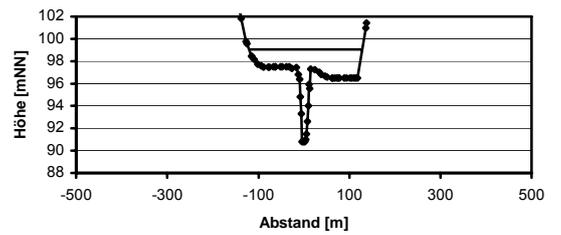
**Leineprofil km 167,904**



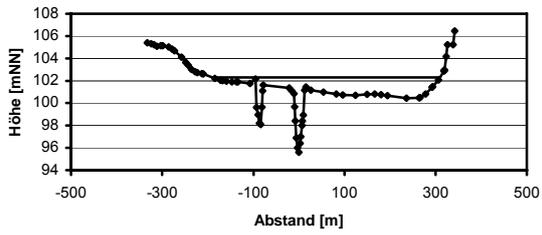
**Leineprofil km 163,704**



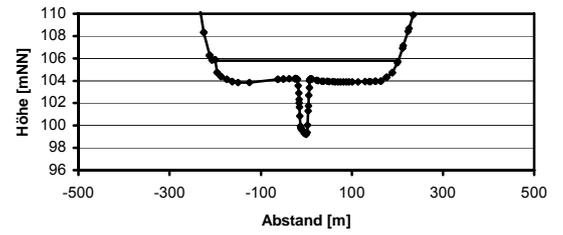
**Leineprofil km 168,704**



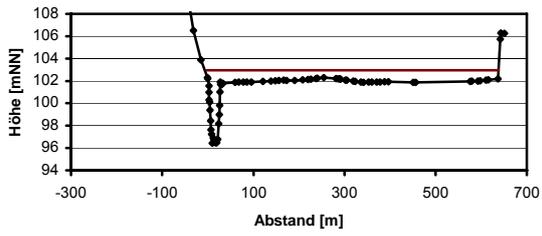
Leineprofil km 175,335



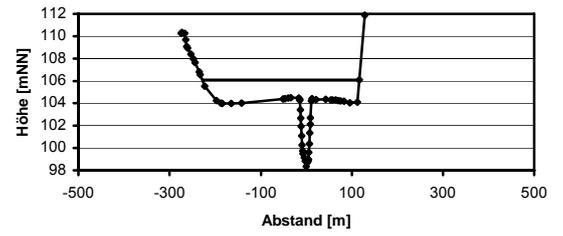
Leineprofil km 181,377



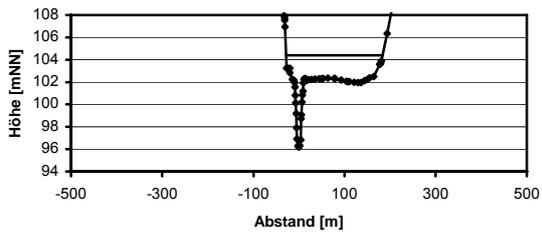
Leineprofil km 176,424



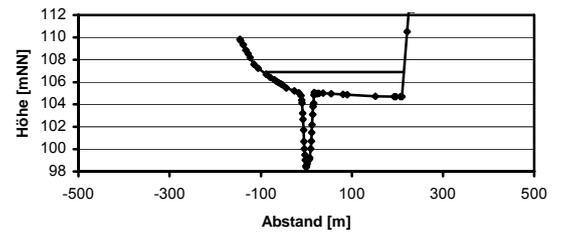
Leineprofil km 182,343



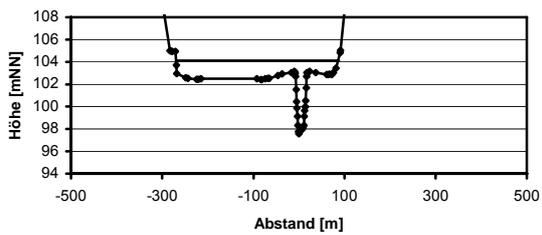
Leineprofil km 177,416



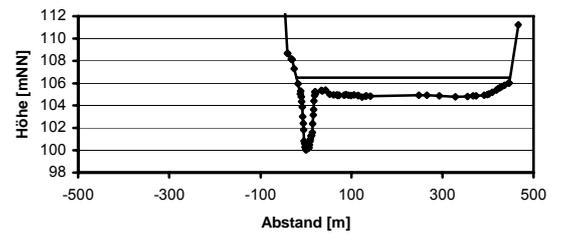
Leineprofil km 183,259



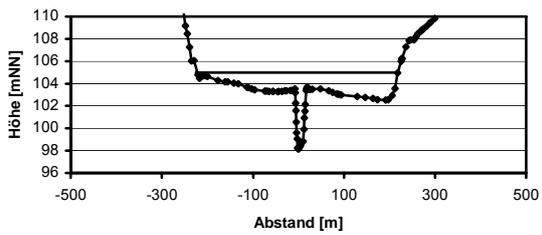
Leineprofil km 179,216



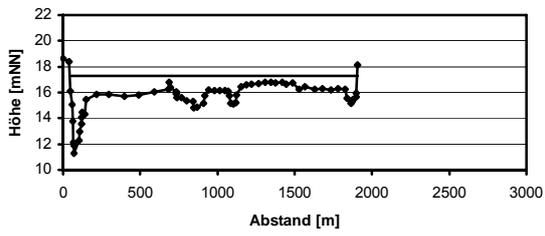
Leineprofil km 184,356



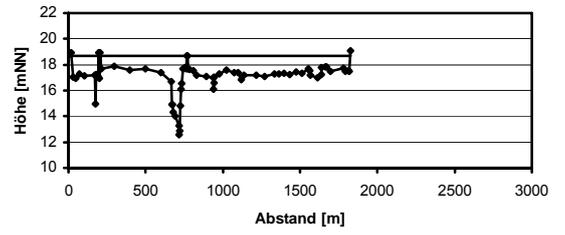
Leineprofil km 180,534



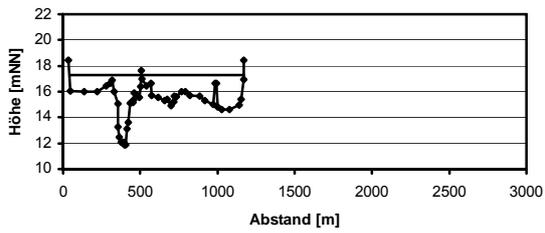
Allerprofil km 24,670



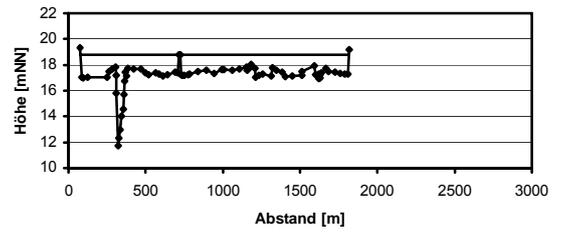
Allerprofil km 33,270



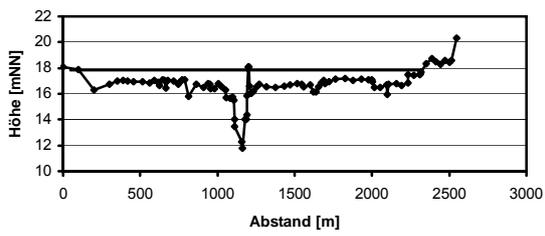
Allerprofil km 25,870



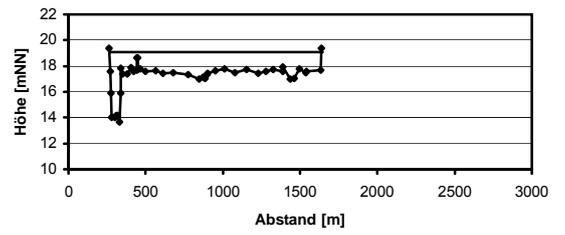
Allerprofil km 34,170



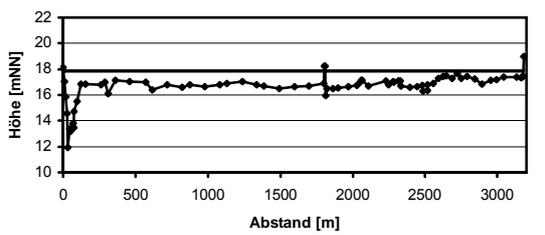
Allerprofil km 27,770



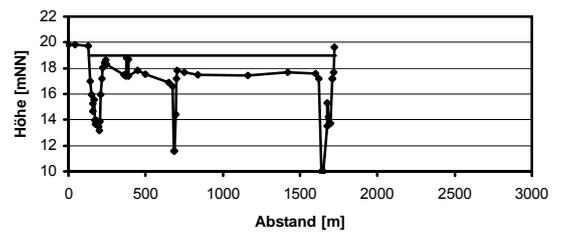
Allerprofil km 34,770



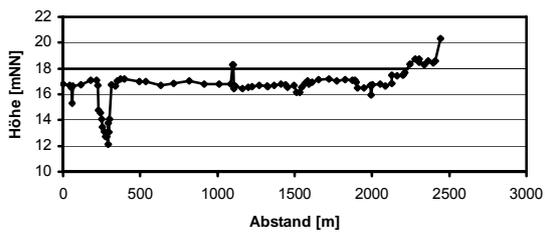
Allerprofil km 30,070



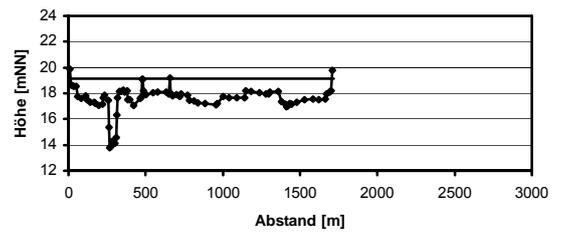
Allerprofil km 35,270



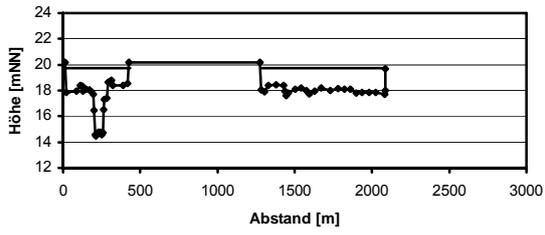
Allerprofil km 31,470



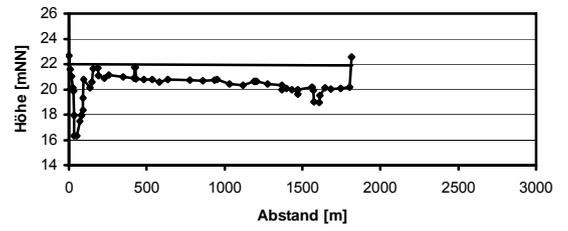
Allerprofil km 36,870



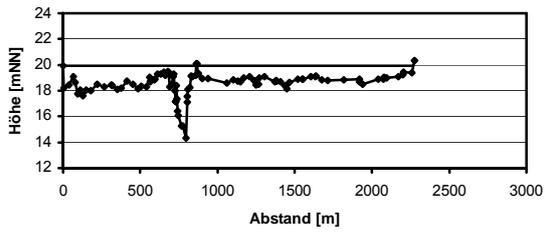
Allerprofil km 37,970



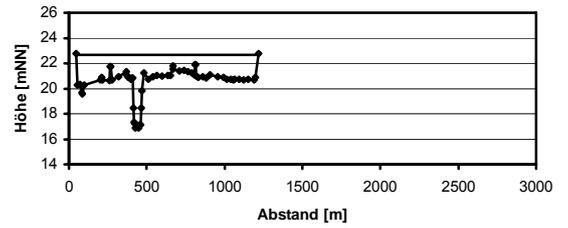
Allerprofil km 50,770



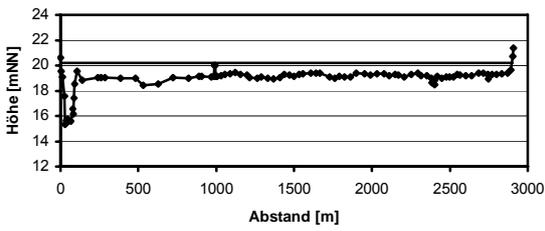
Allerprofil km 40,370



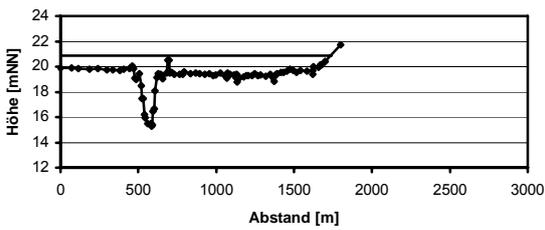
Allerprofil km 51,870



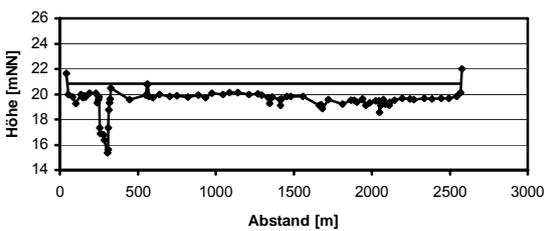
Allerprofil km 42,270



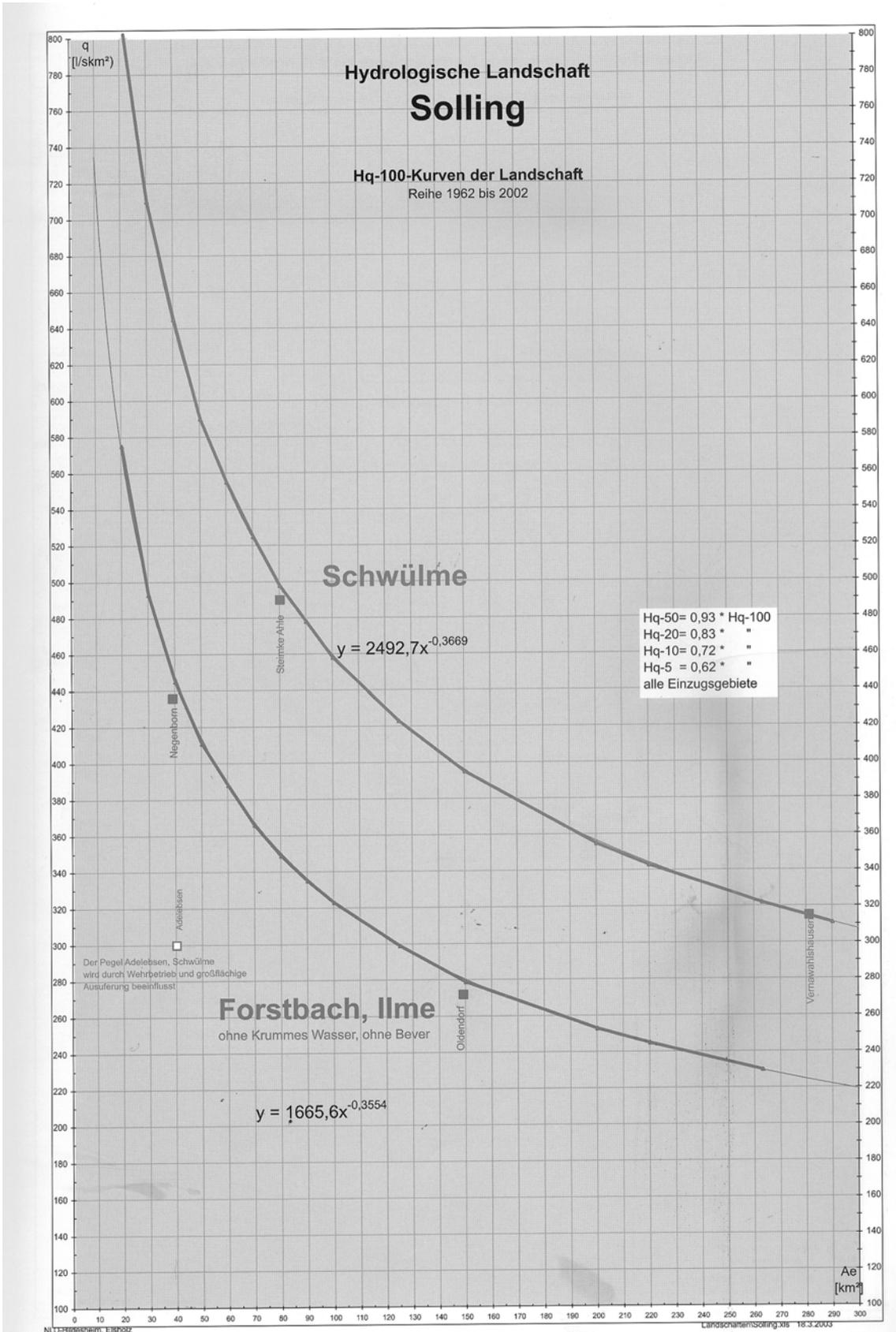
Allerprofil km 44,270



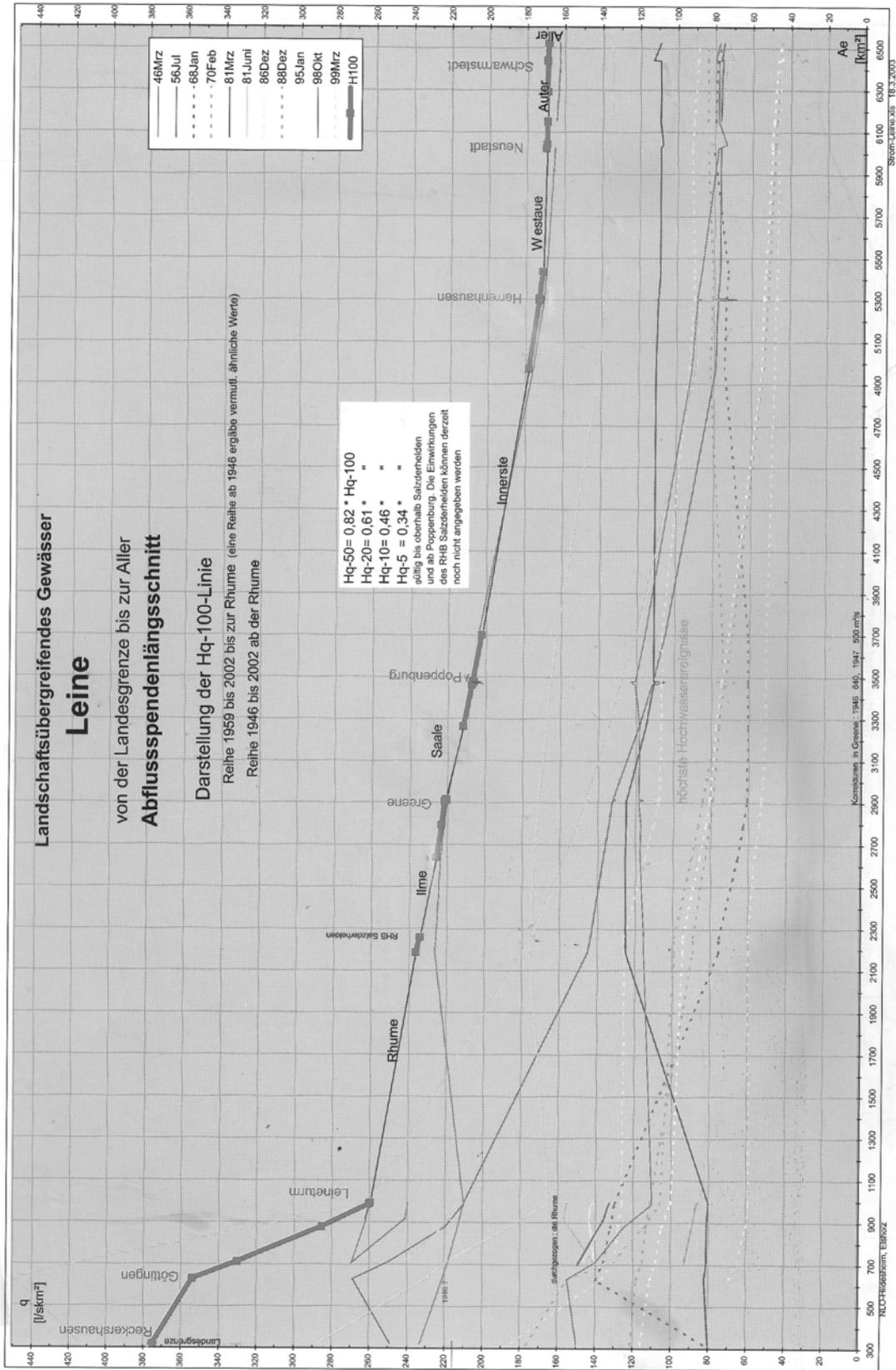
Allerprofil km 45,970



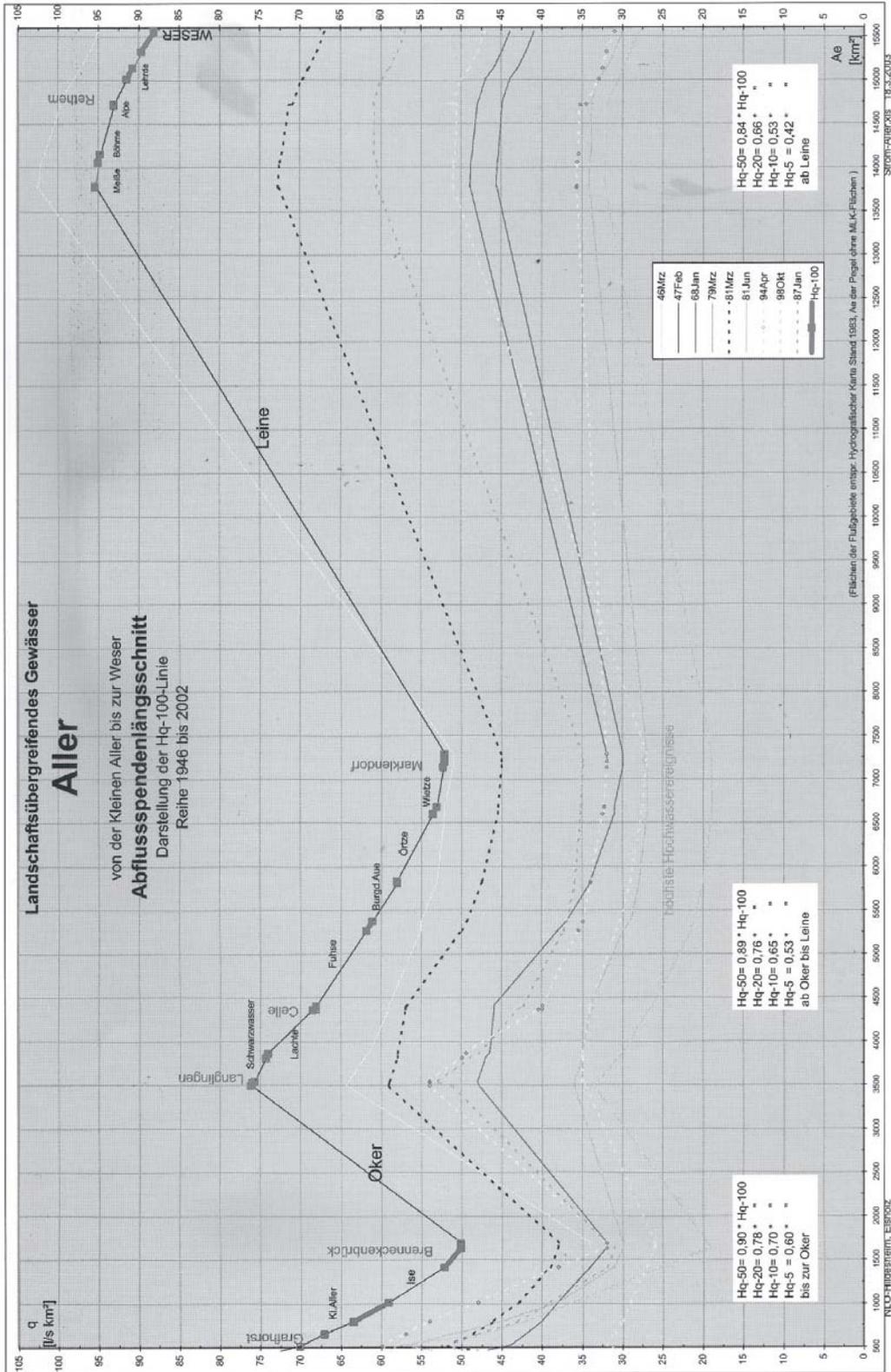
**Anlage 6 Abflussspendenlängsschnitt der hydrologischen Landschaft „Solling“ (NLÖ, 2003)**



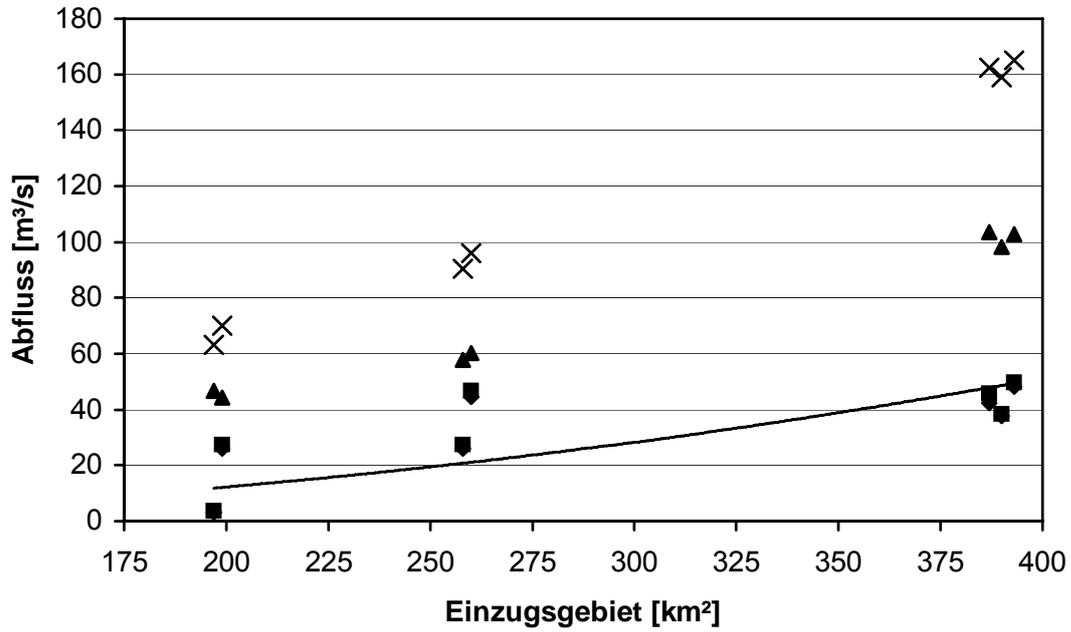
Anlage 7 Abflussspendenlängsschnitt des landschaftsübergreifenden Gewässers „Leine“ (NLÖ, 2003)



**Anlage 8 Abflussspendenlängsschnitt des landschaftsübergreifenden Gewässers „Aller“ (NLÖ, 2003)**

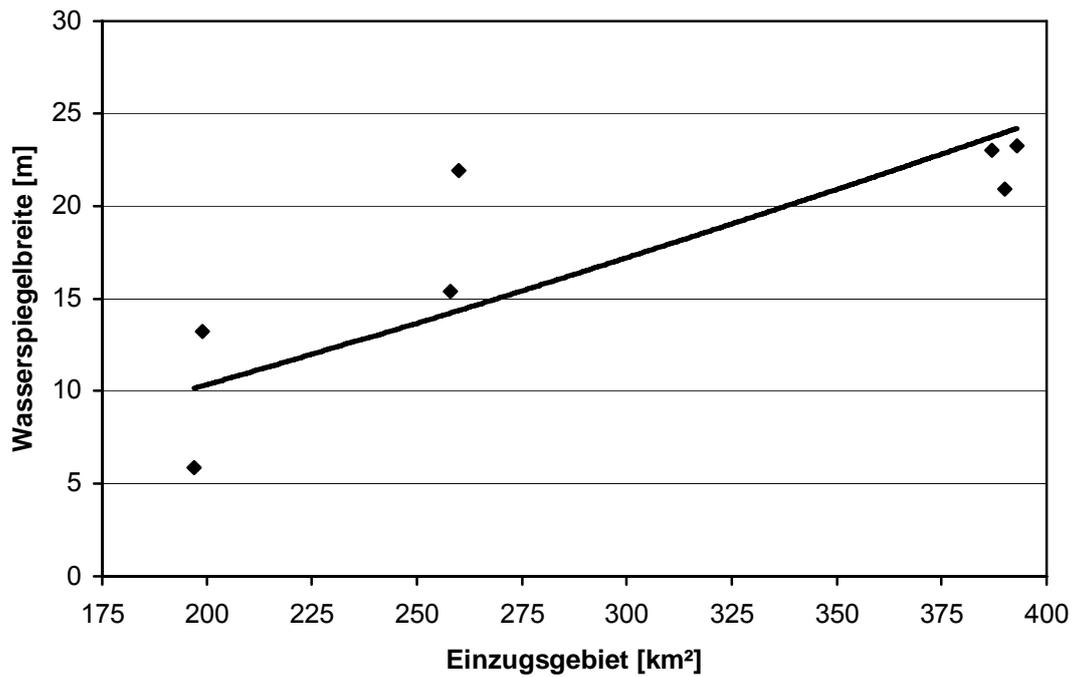


**Anlage 9** *Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Ilme*

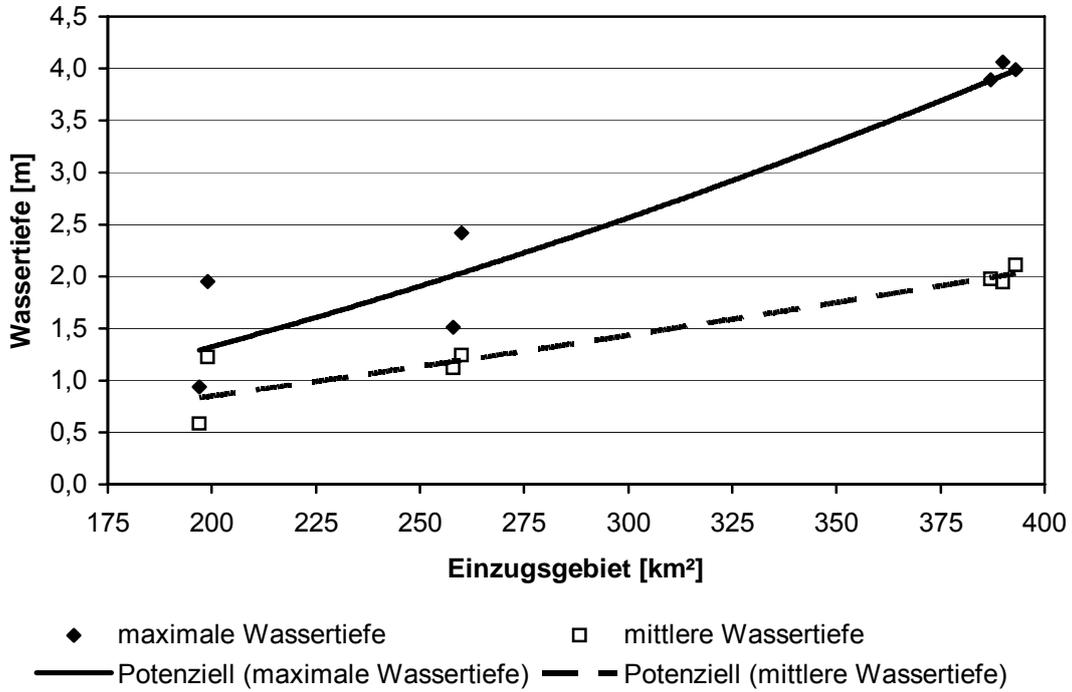


◆ bordvoll ■ leicht ausufernd ▲ HQ10 × HQ100 — Potenziell (bordvoll)

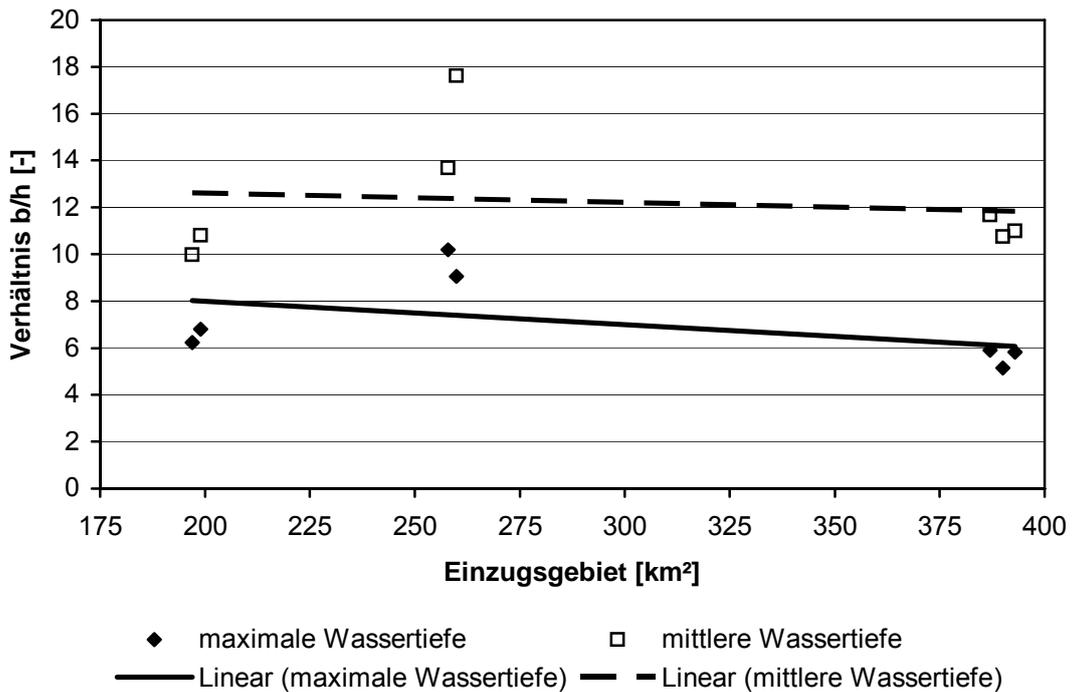
**Anlage 10** *Abhängigkeit der bordvollen Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme*



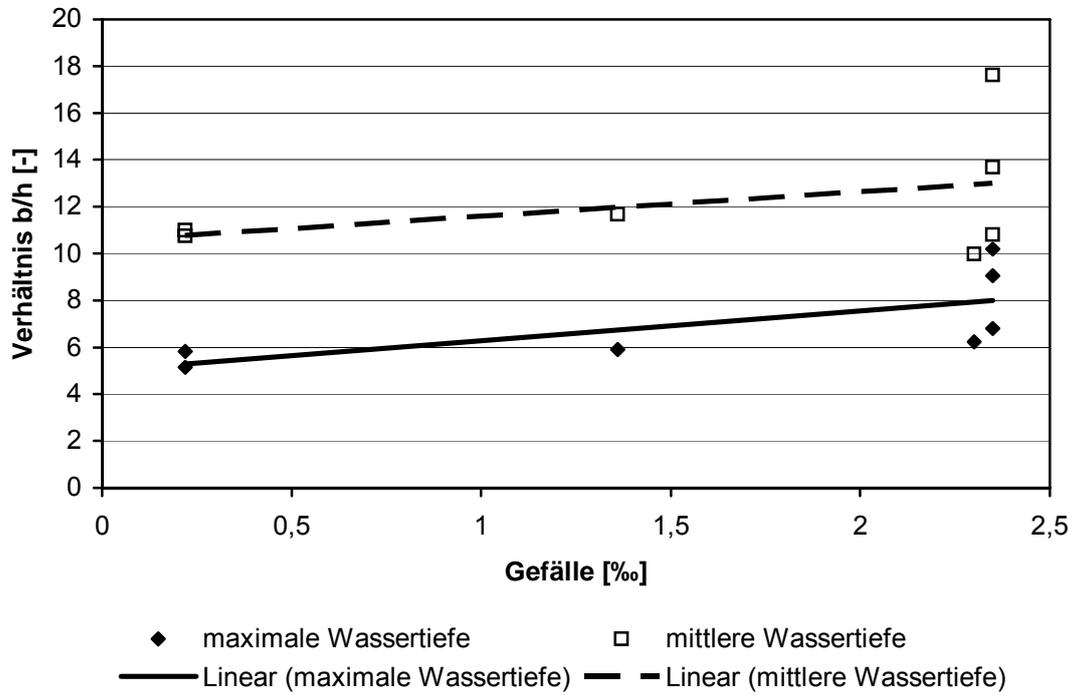
**Anlage 11** Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme im bordvollen Zustand



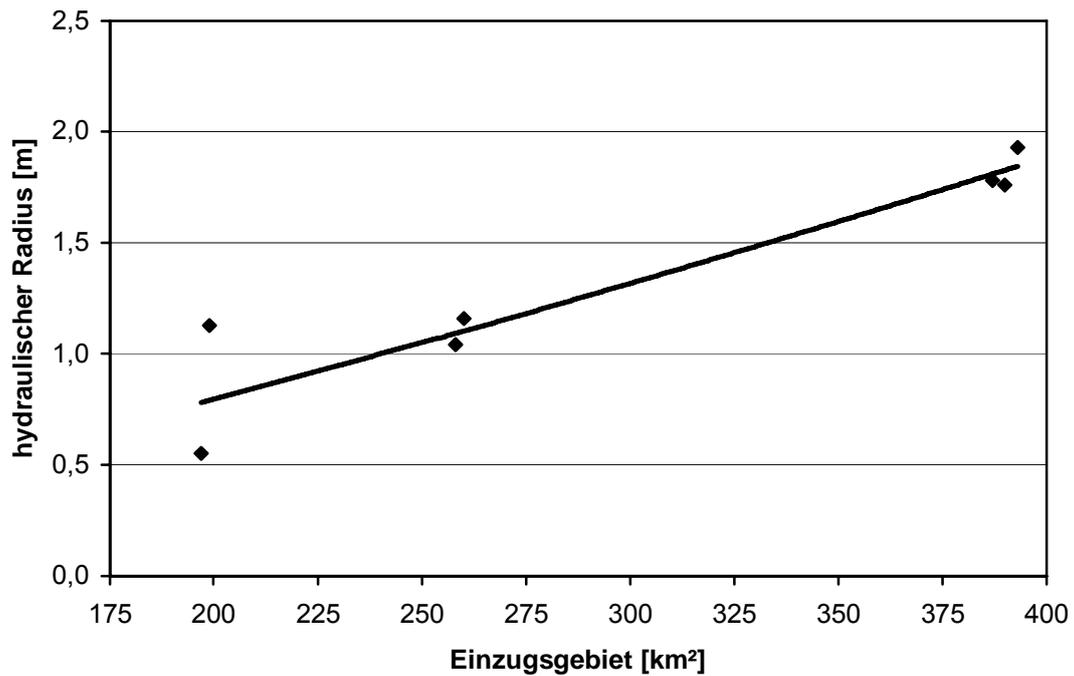
**Anlage 12** Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme im bordvollen Zustand



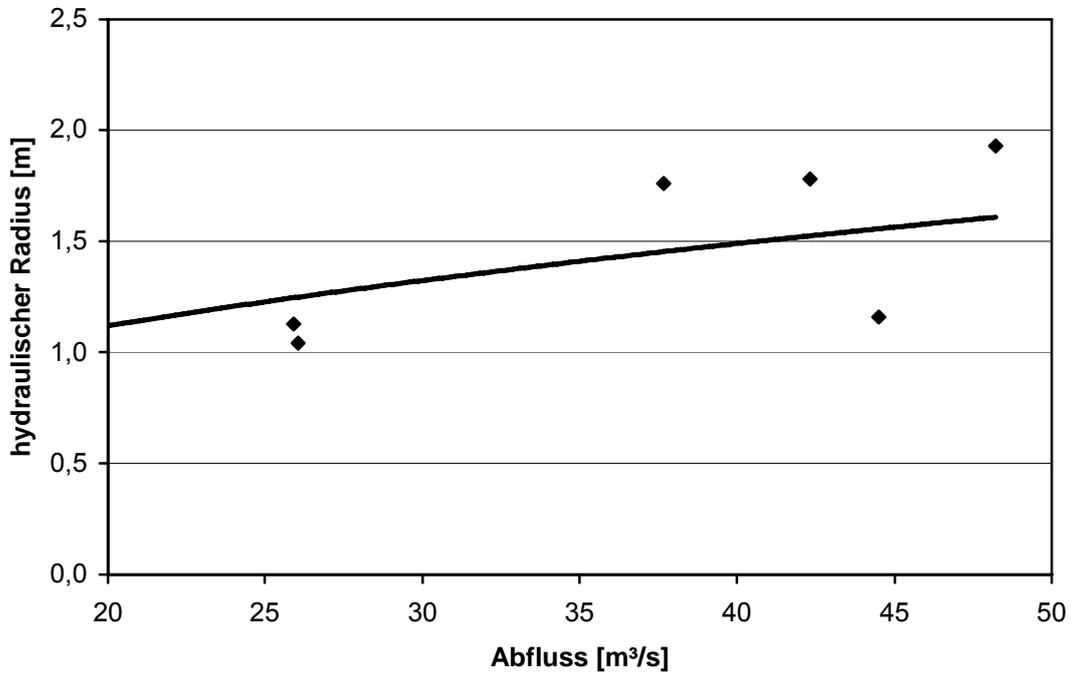
**Anlage 13** Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle an der Ilme im bordvollen Zustand



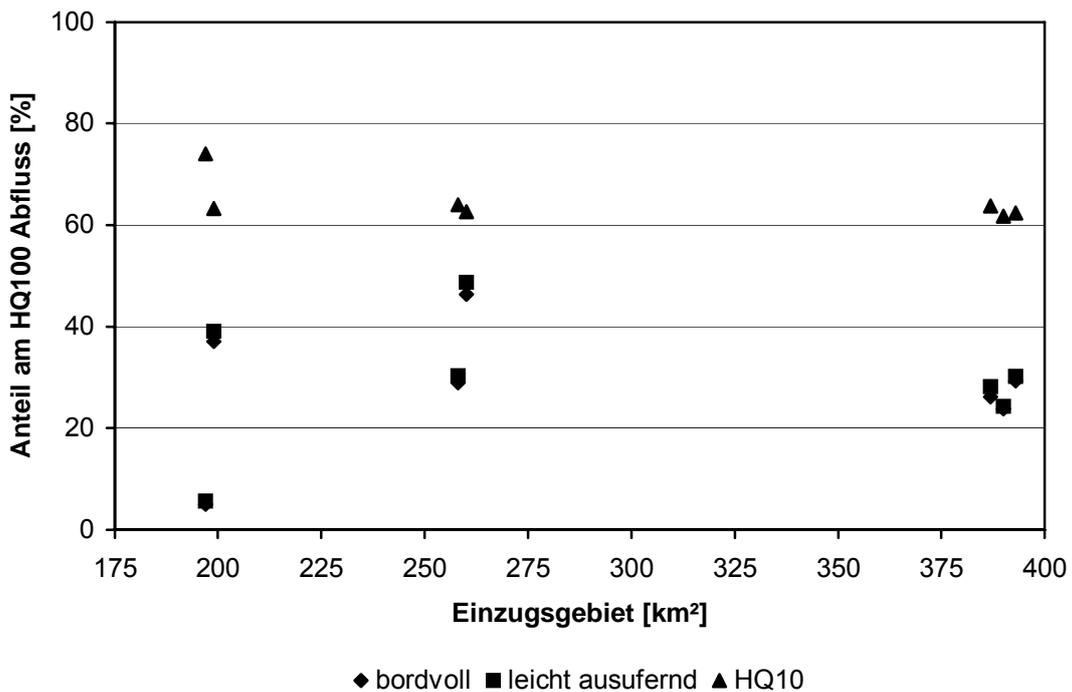
**Anlage 14** Abhängigkeit des hydraulischen Radius von der Einzugsgebietsfläche an der Ilme (bordvoller Zustand)



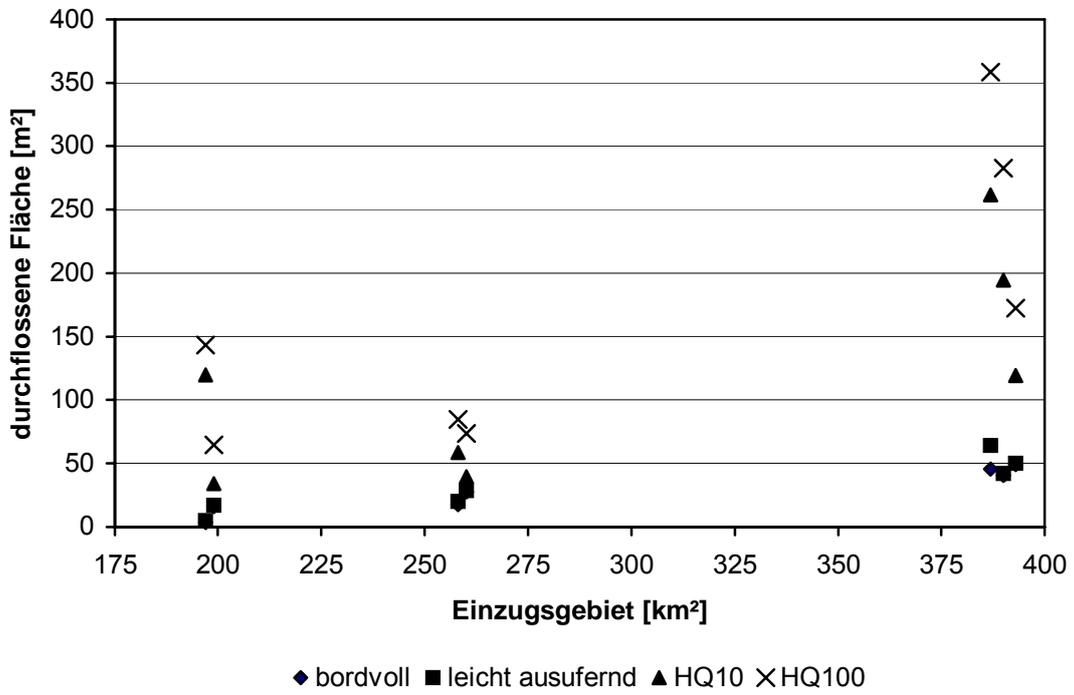
**Anlage 15** Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss an der Ilme (bordvoller Zustand)



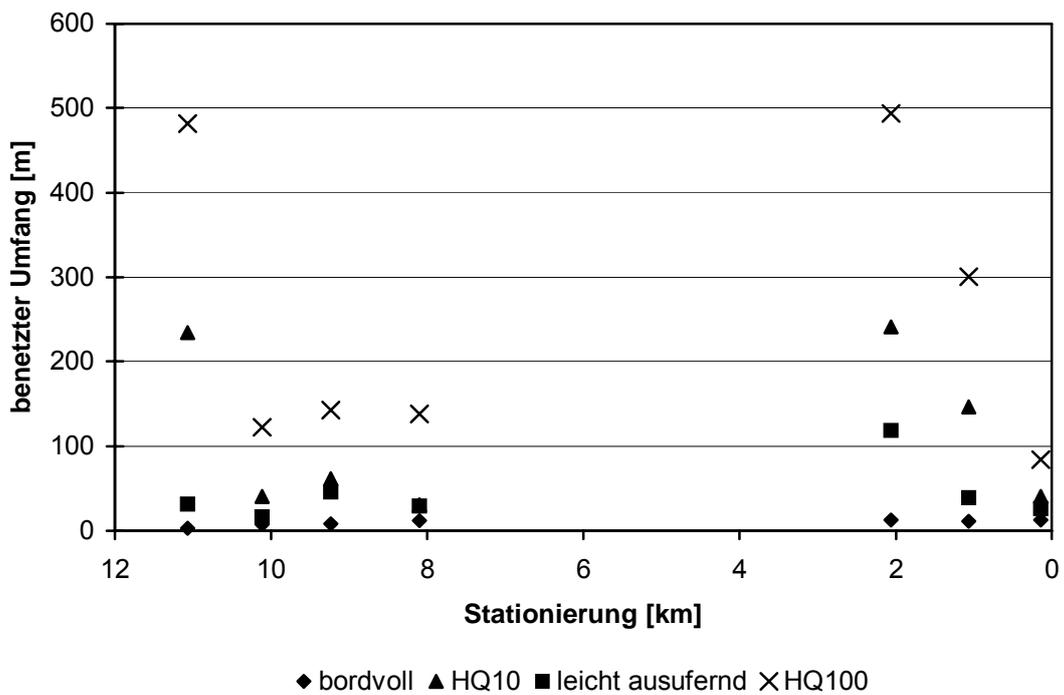
**Anlage 16** Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche an der Ilme (Abfluss des HQ100 = 100 %)



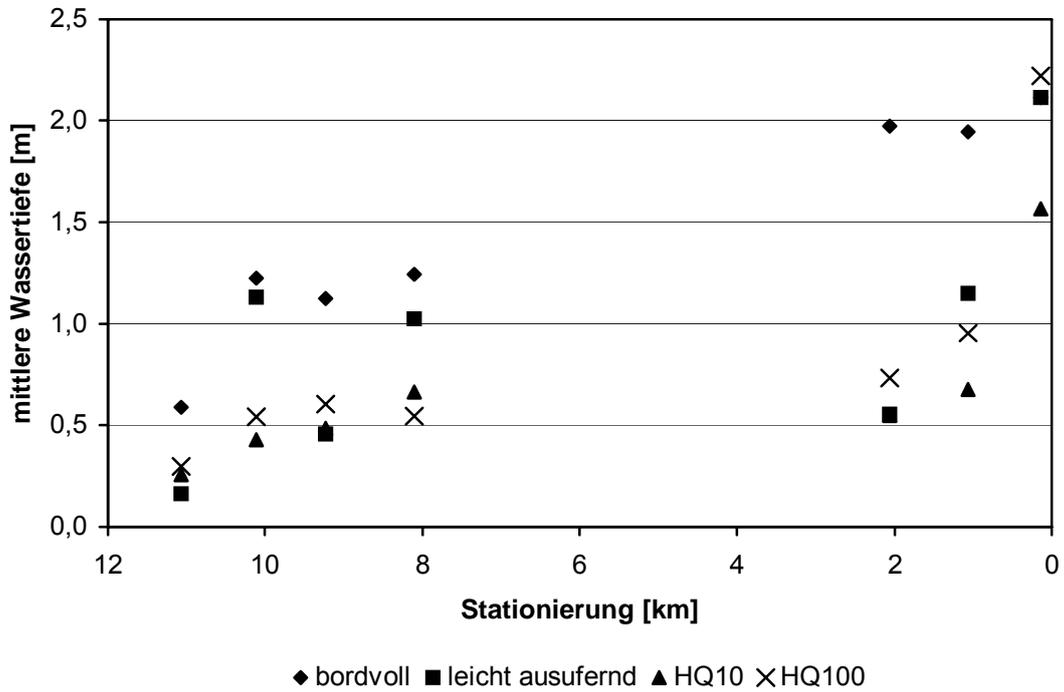
**Anlage 17 Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen gegenüber der Einzugsgebietsfläche an der Ilme**



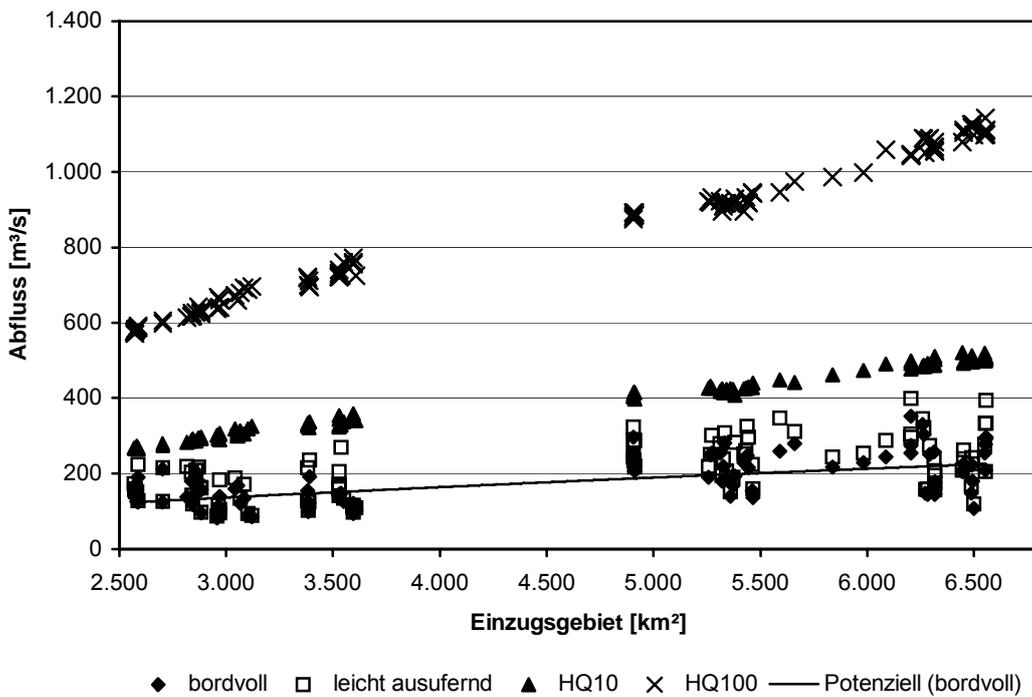
**Anlage 18 Benetzter Umfang entlang der Ilme bei verschiedenen Zuständen**



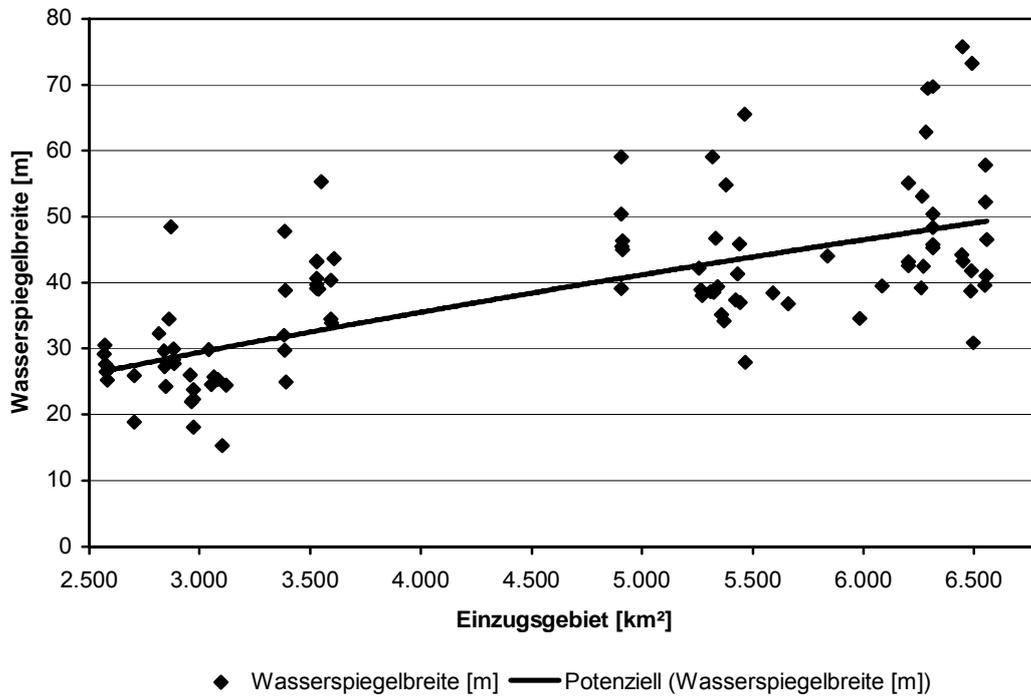
Anlage 19 Mittlere Wassertiefen bei verschiedenen Zuständen entlang der Ilme



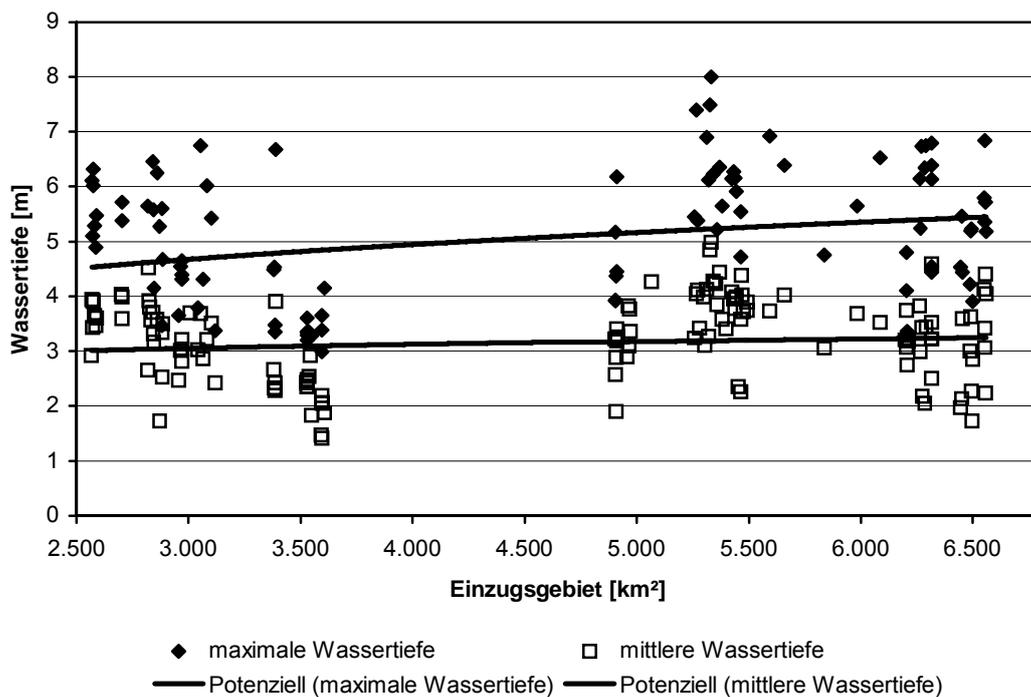
Anlage 20 Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Leine



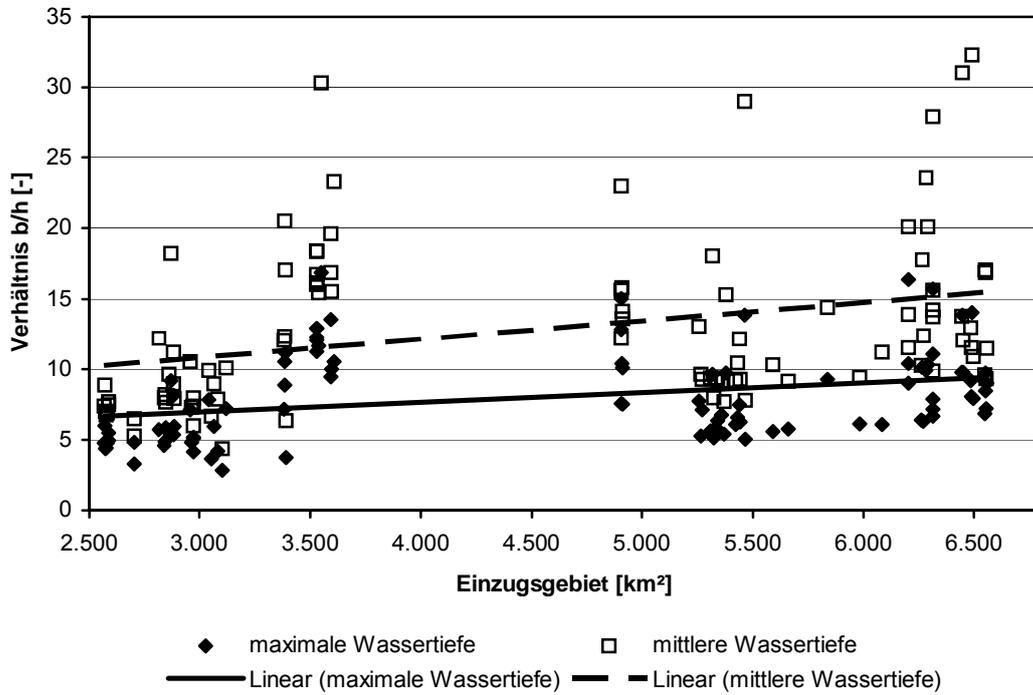
**Anlage 21** Abhängigkeit der Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsgröße der Leine im bordvollen Zustand



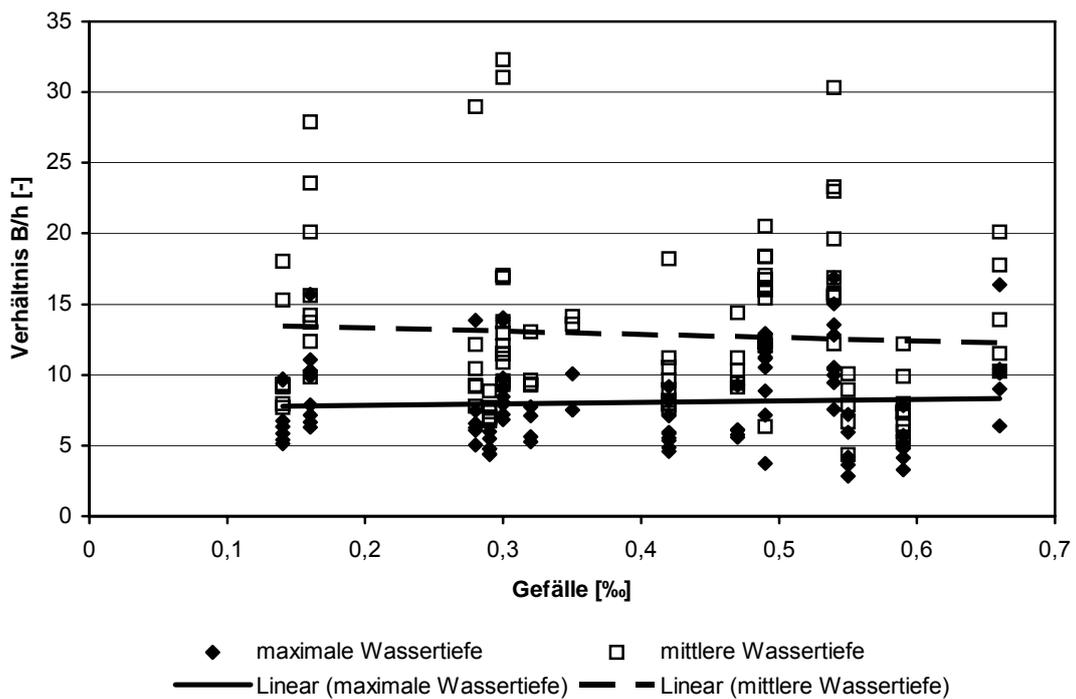
**Anlage 22** Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsfläche an der Leine im bordvollen Zustand



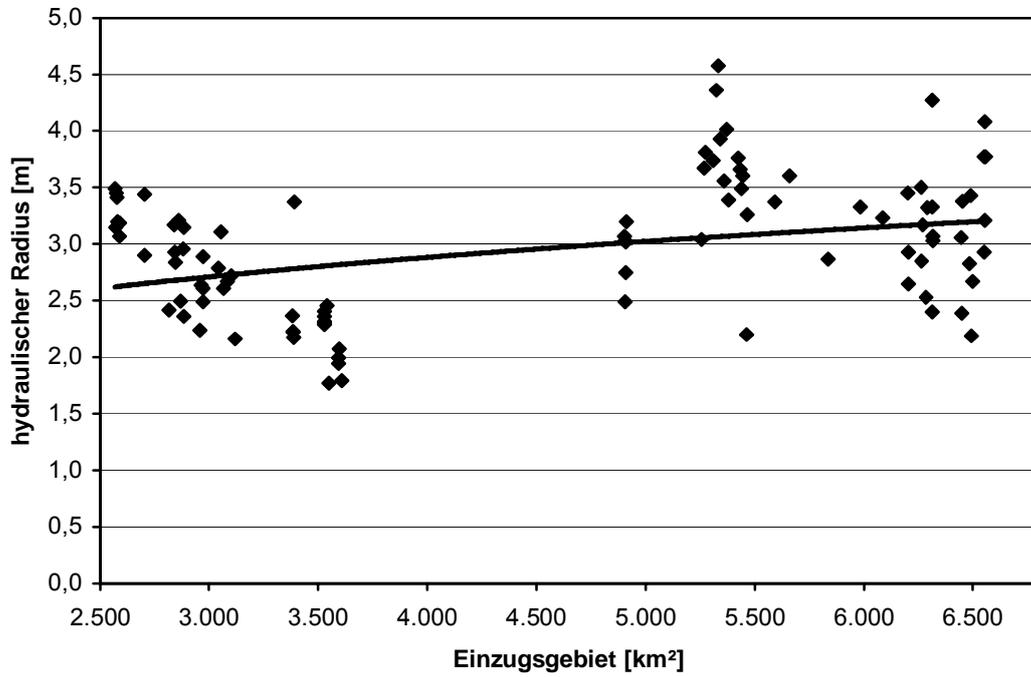
**Anlage 23 Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsgröße der Leine im bordvollen Zustand**



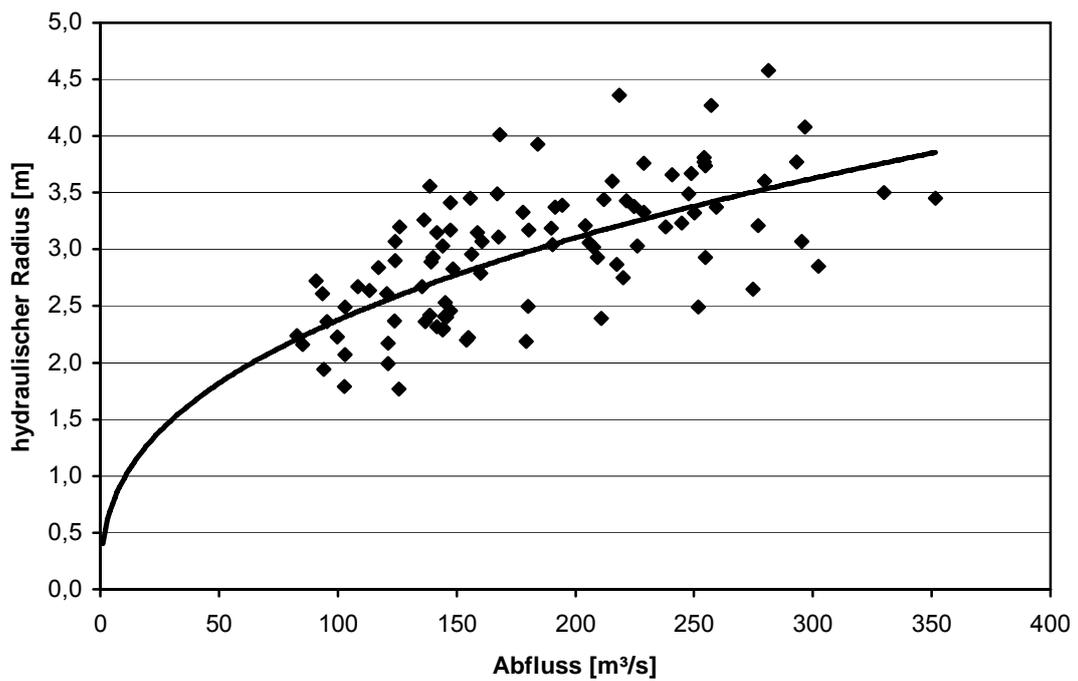
**Anlage 24 Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle der Leine im bordvollen Zustand**



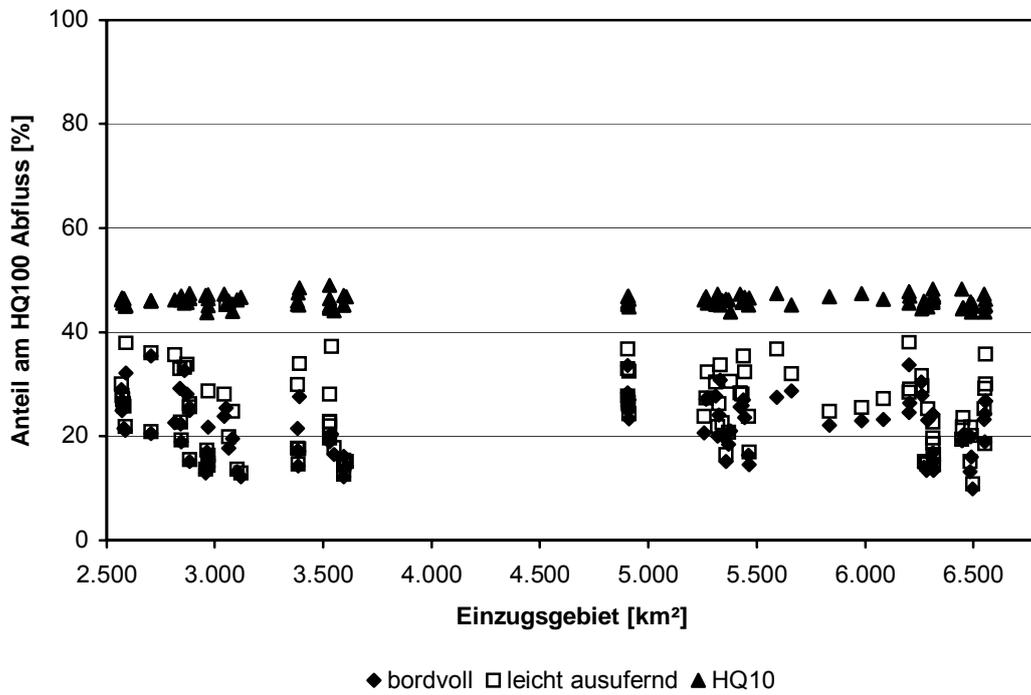
**Anlage 25** *Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Einzugsgebiet der Leine im bordvollen Zustand*



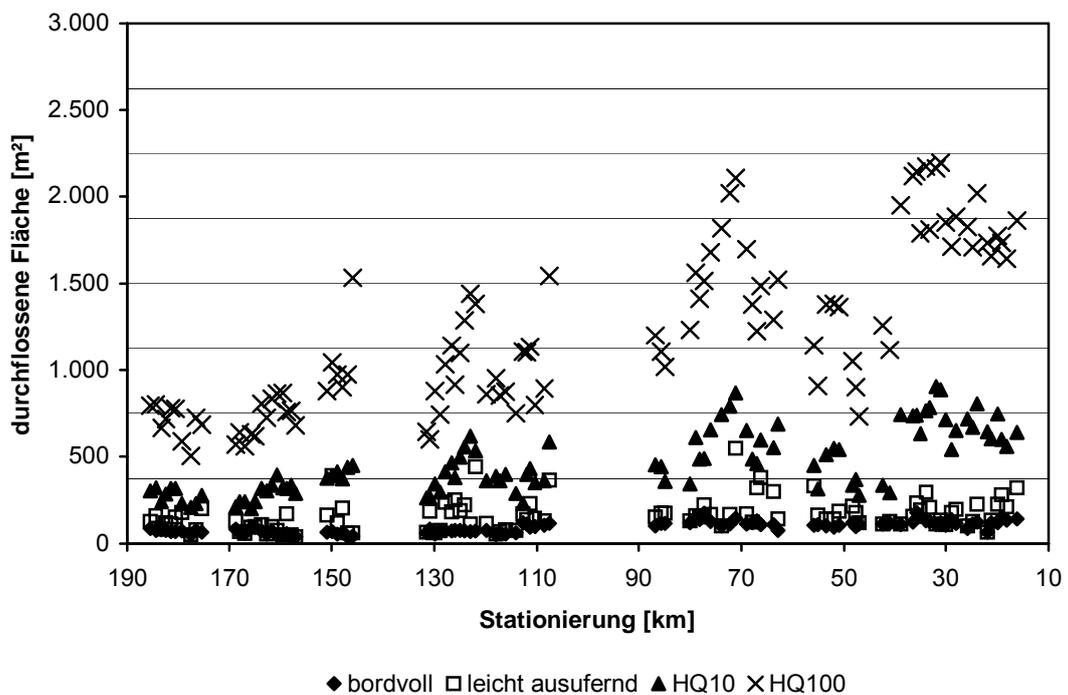
**Anlage 26** *Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss der Leine im bordvollen Zustand*



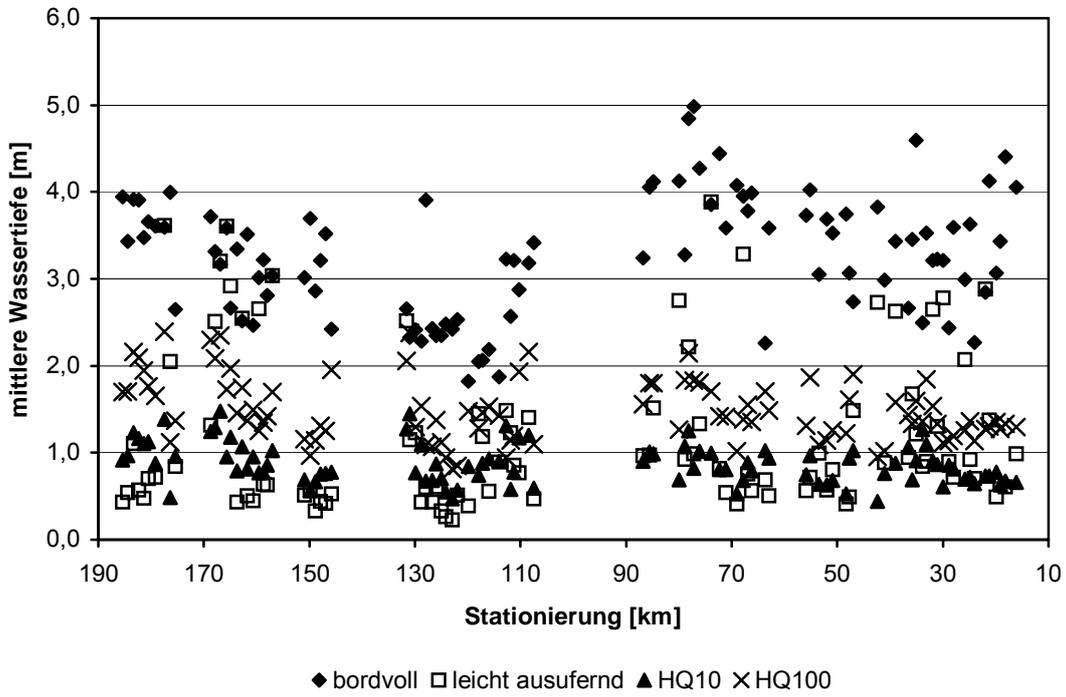
**Anlage 27** Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen entlang der Leine (Abfluss des HQ100 = 100 %)



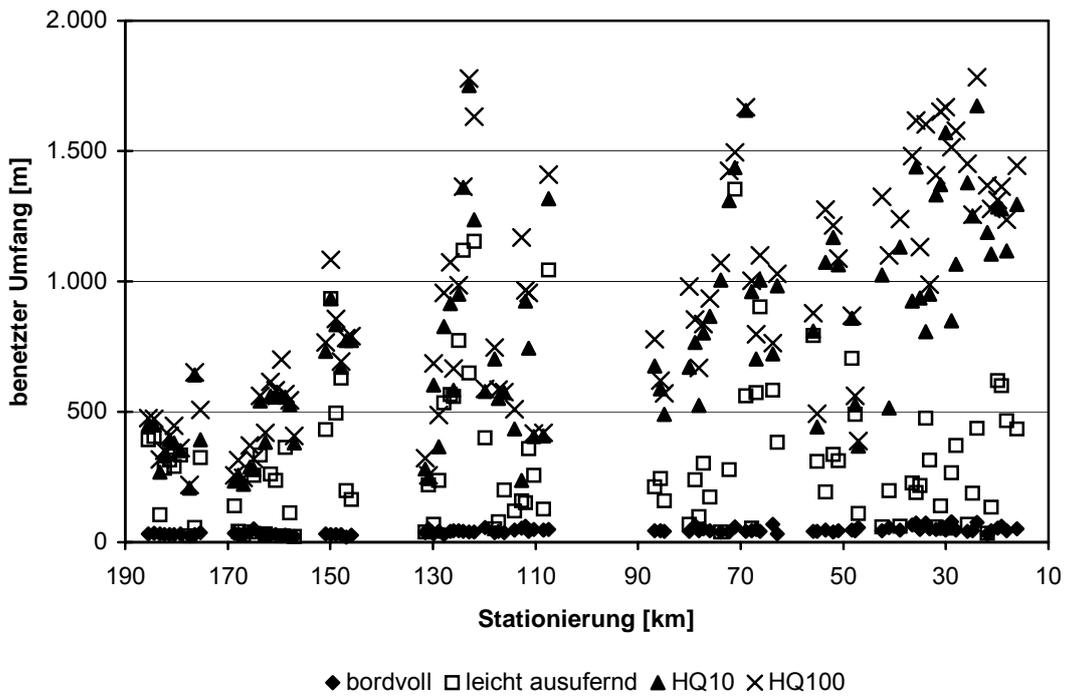
**Anlage 28** Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen entlang der Leine



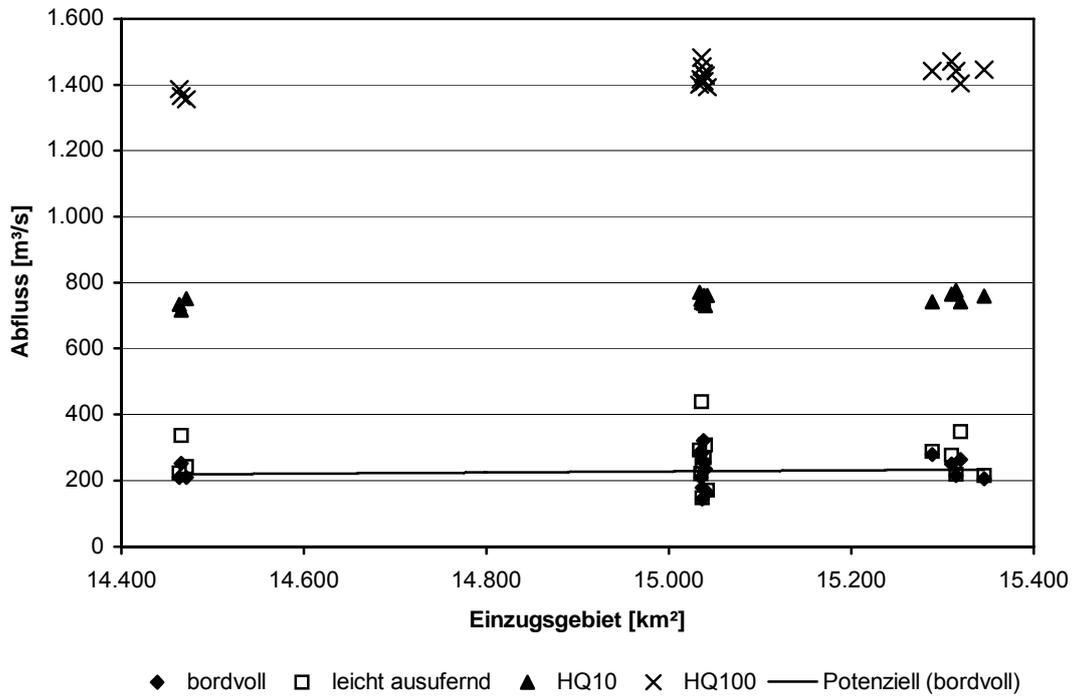
**Anlage 29 Mittlere Wassertiefen bei verschiedenen Zuständen entlang der Leine**



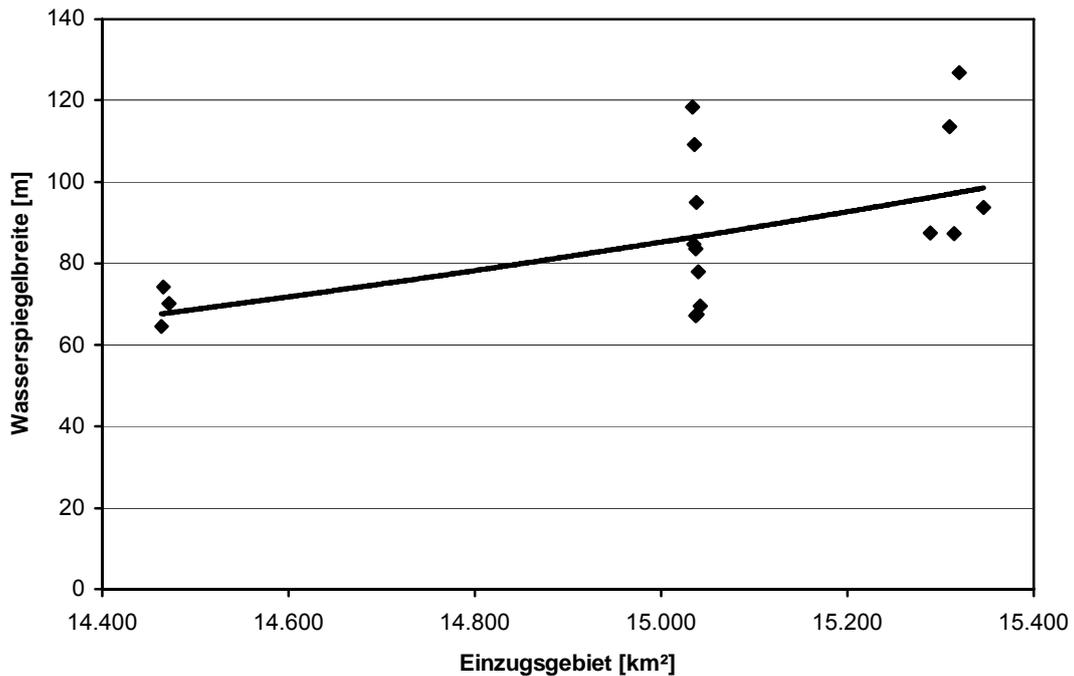
**Anlage 30 Benetzter Umfang entlang der Leine bei verschiedenen Zuständen**



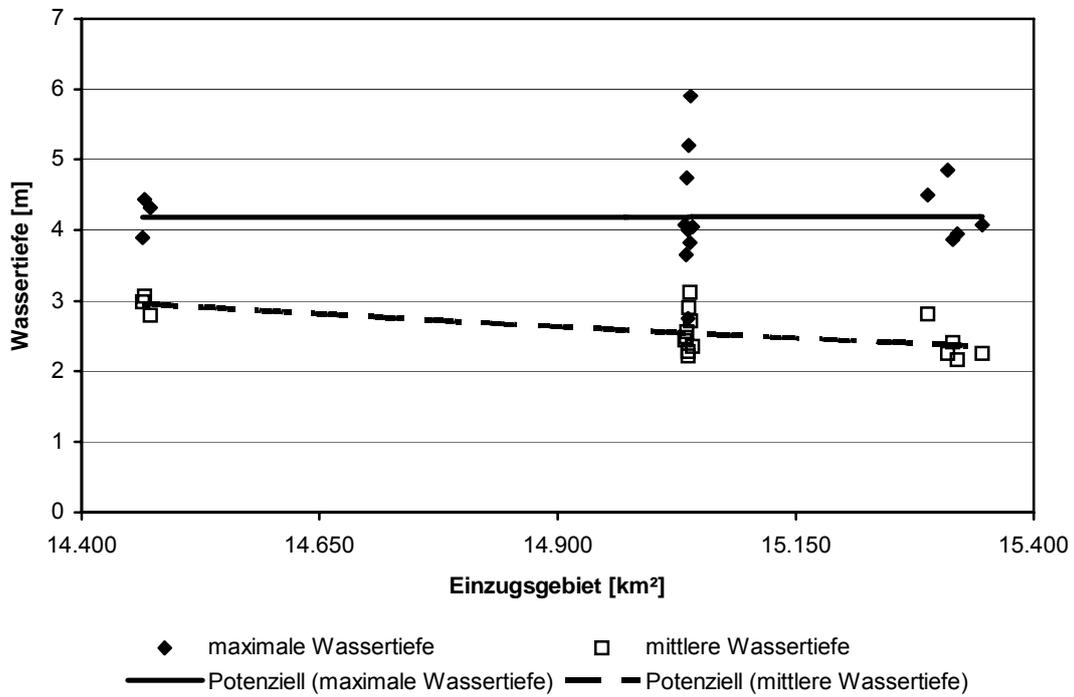
**Anlage 31** Abhängigkeit des Abflusses von der Einzugsgebietsgröße bei verschiedenen Zuständen an der Aller



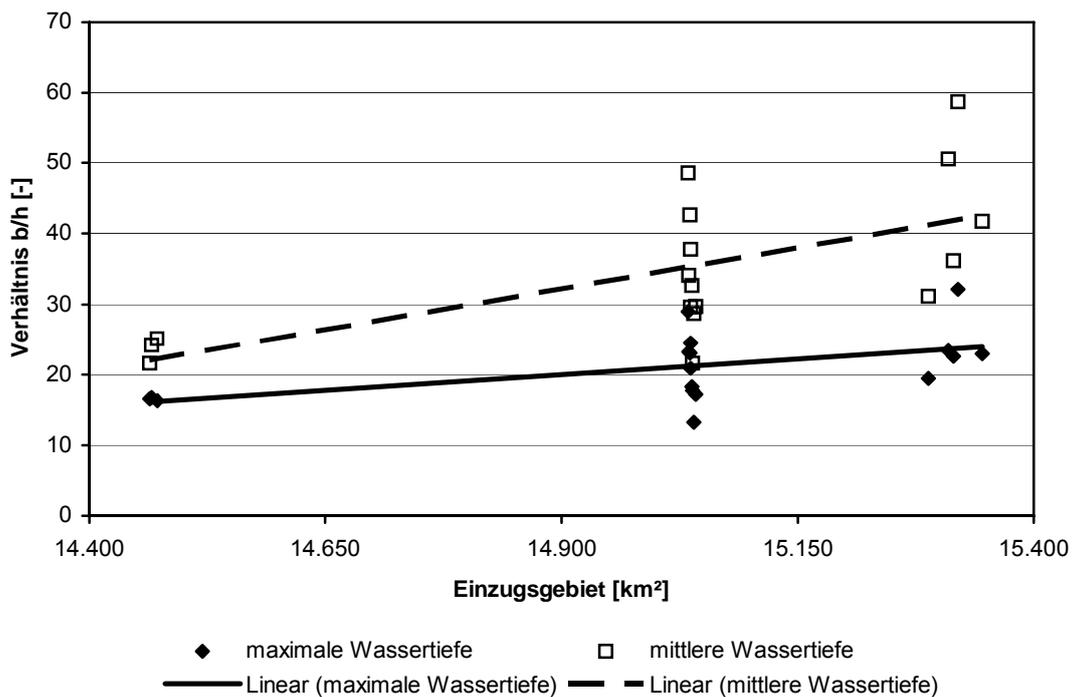
**Anlage 32** Abhängigkeit der Wasserspiegelbreite von der Einzugsgebietsgröße der Aller im bordvollen Zustand



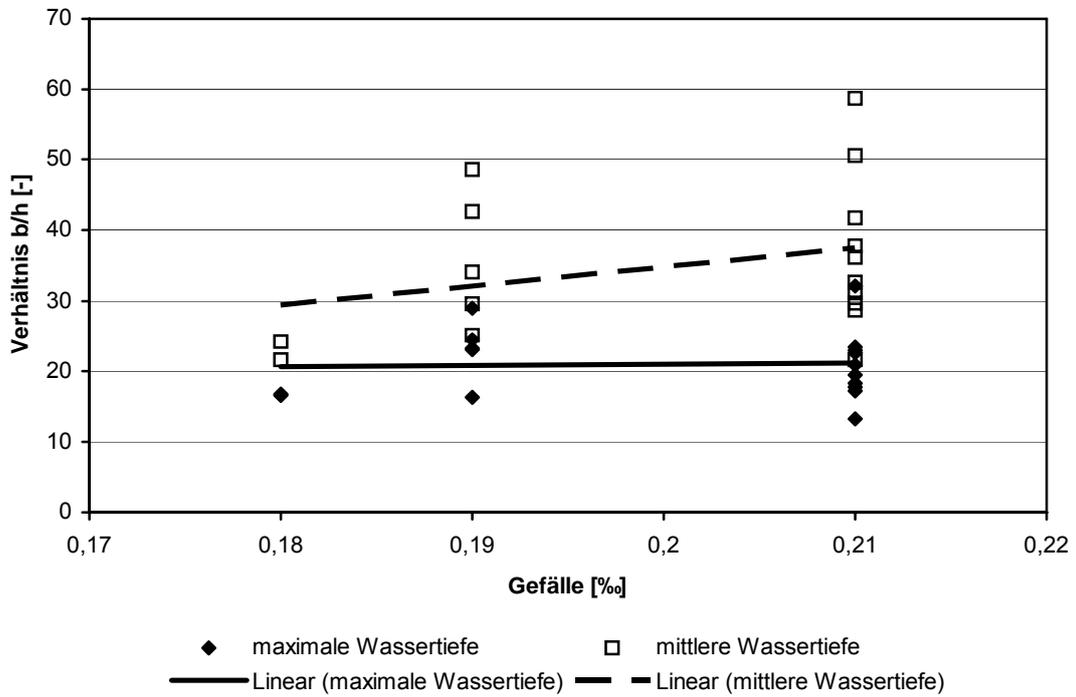
**Anlage 33 Abhängigkeit der Wassertiefe von der Einzugsgebietsgröße der Aller im bordvollen Zustand**



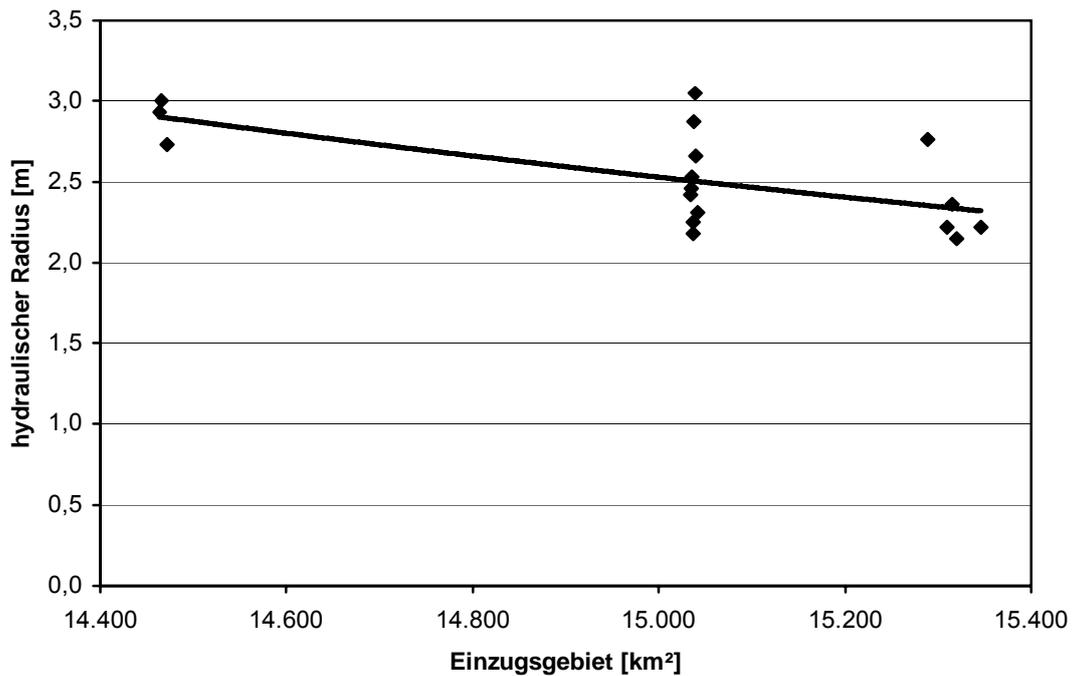
**Anlage 34 Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses von der Einzugsgebietsgröße der Aller im bordvollen Zustand**



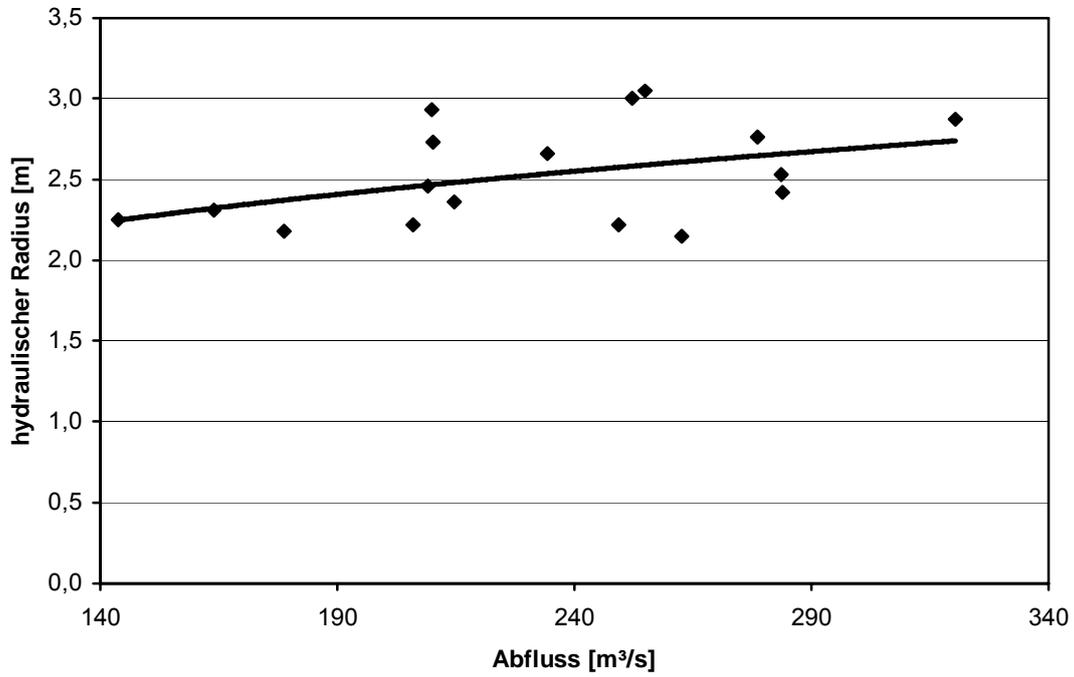
**Anlage 35 Abhängigkeit des Breiten- / Tiefenverhältnisses vom Gefälle der Aller im bordvollen Zustand**



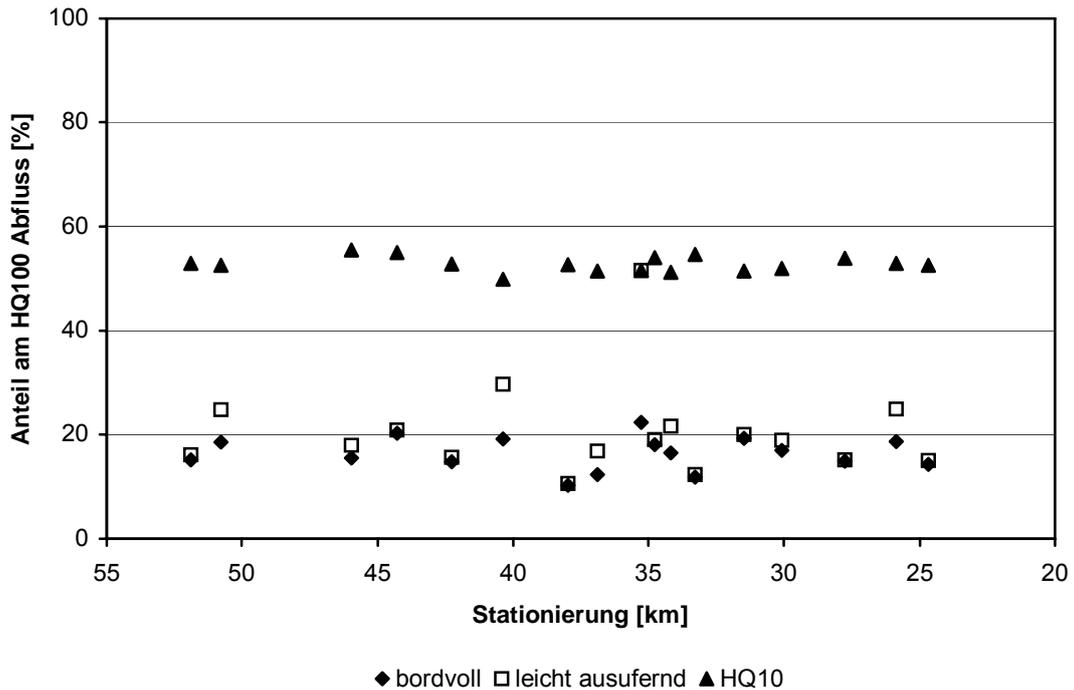
**Anlage 36 Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Einzugsgebiet der Aller im bordvollen Zustand**



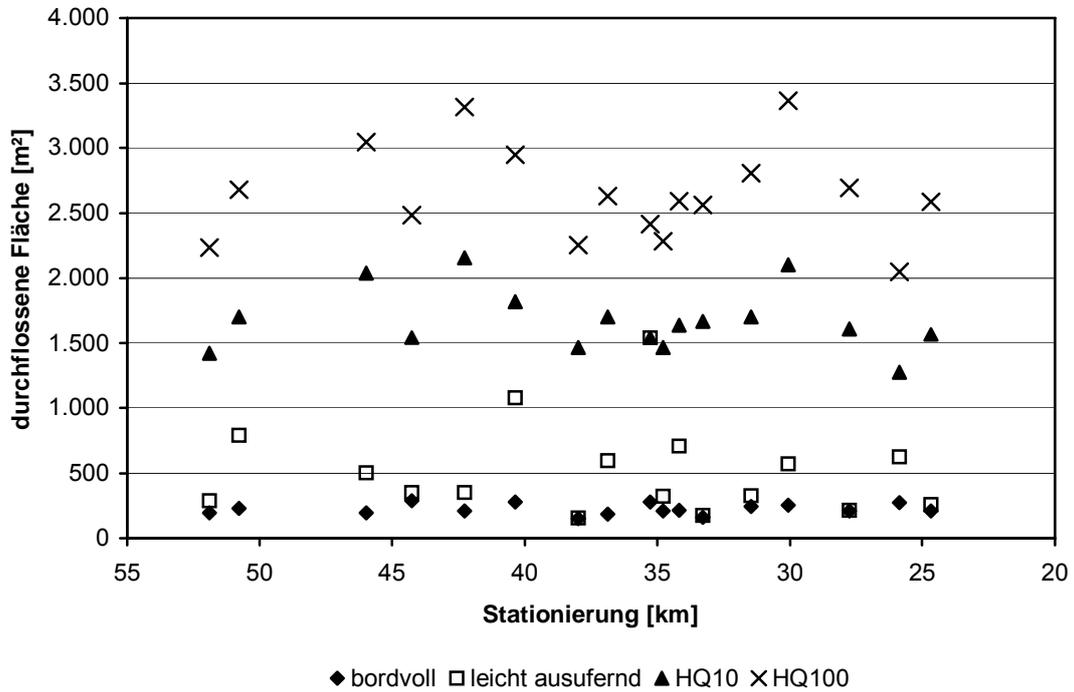
**Anlage 37** Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Abfluss der Aller im bordvollen Zustand



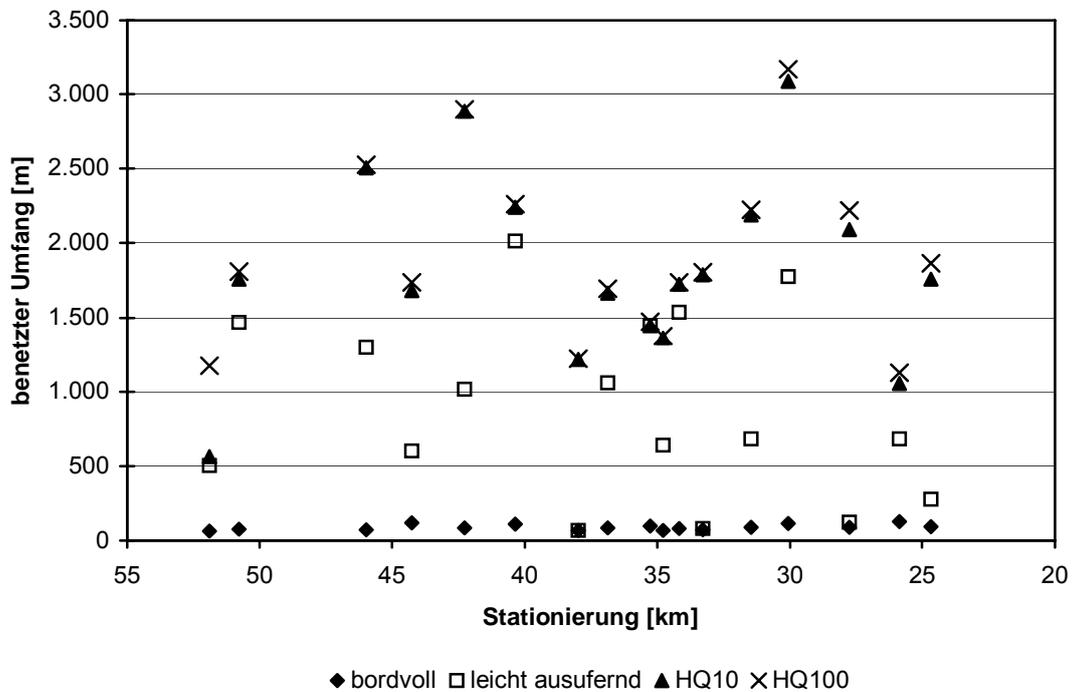
**Anlage 38** Prozentualer Anteil des Abflusses am HQ100 Abfluss bei verschiedenen Zuständen entlang der Aller (Abfluss des HQ100 = 100 %)



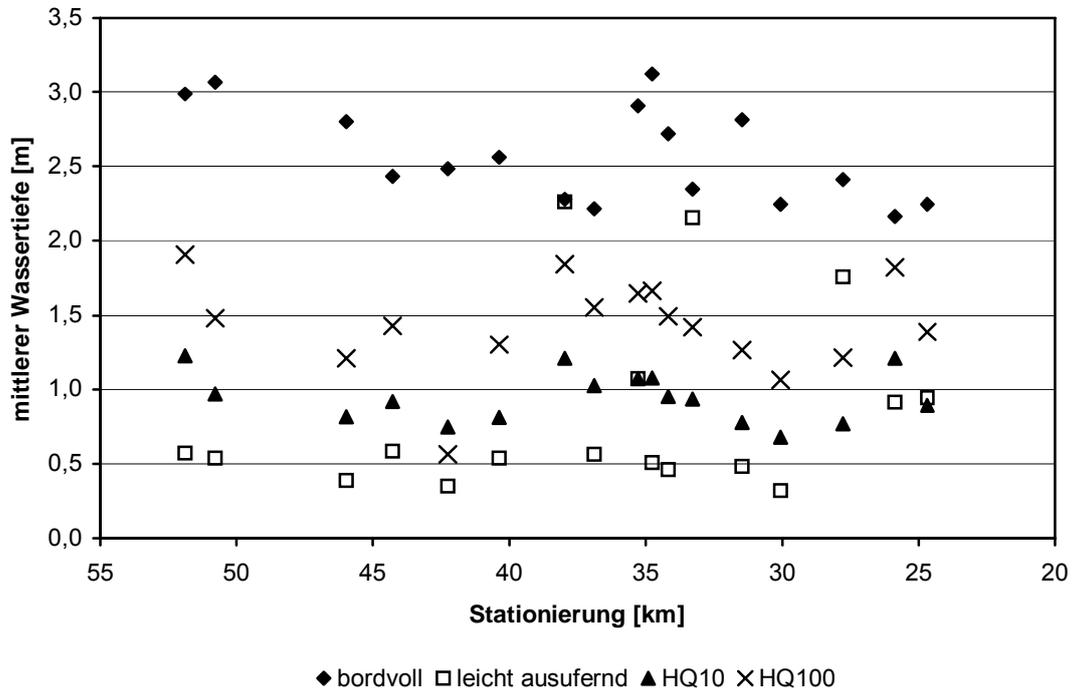
**Anlage 39 Durchflossene Fläche bei verschiedenen Zuständen entlang der Aller**



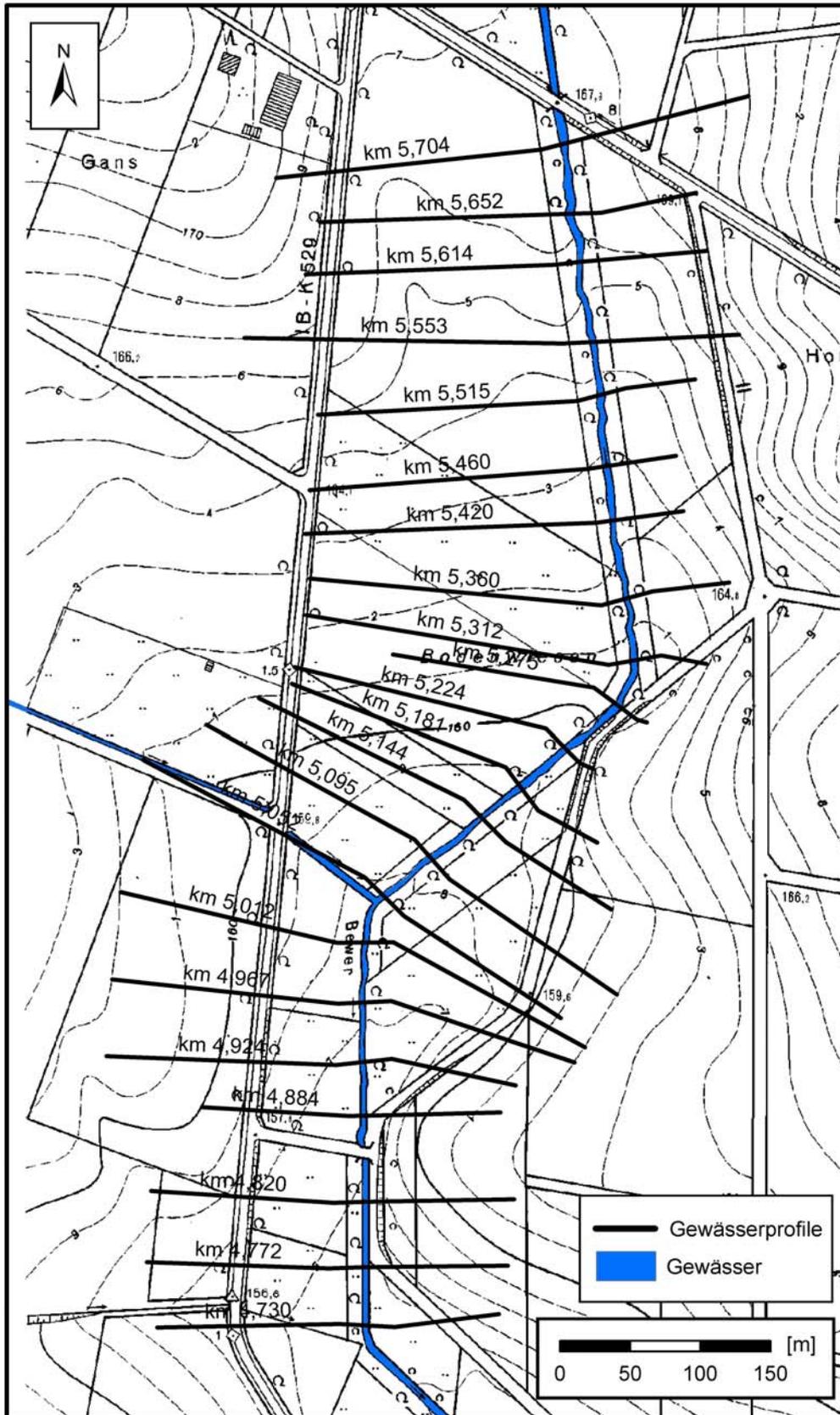
**Anlage 40 Benetzter Umfang entlang der Aller bei verschiedenen Zuständen**



**Anlage 41 Mittlere Wassertiefen bei verschiedenen Zuständen entlang der Aller**

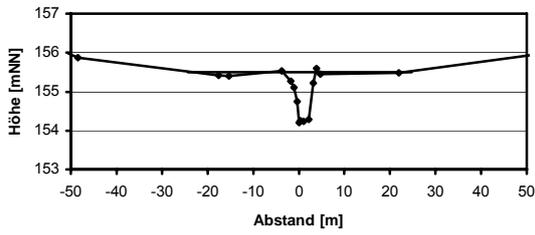


Anlage 42 Simulationsabschnitt Bewer

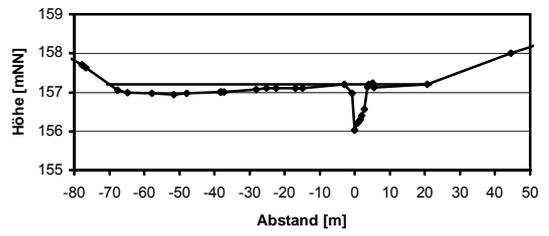


### Anlage 43 Bewerprofile (Simulation)

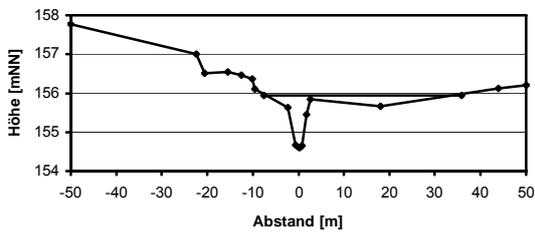
**Bewerprofil km 4,730**



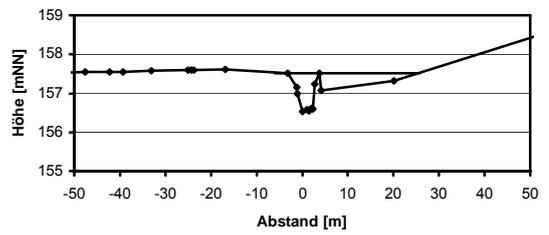
**Bewerprofil km 4,967**



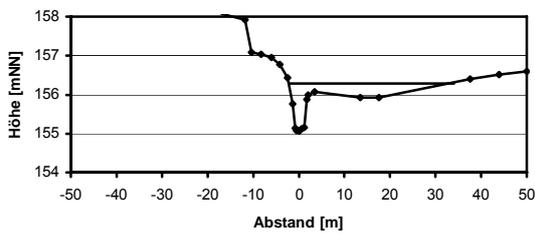
**Bewerprofil km 4,772**



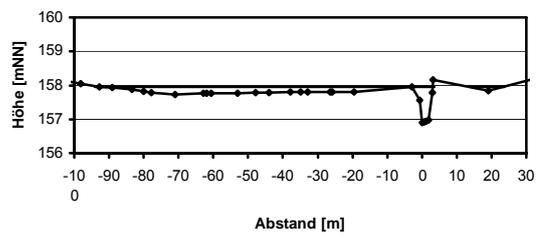
**Bewerprofil km 5,012**



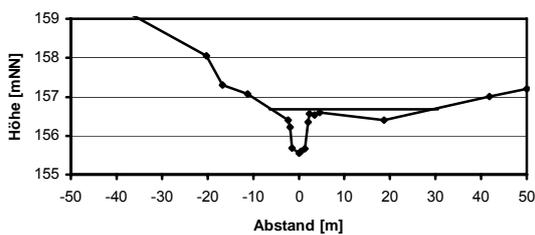
**Bewerprofil km 4,820**



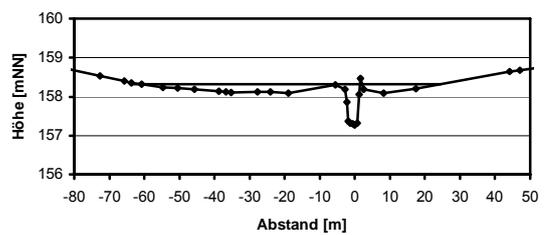
**Bewerprofil km 5,052**



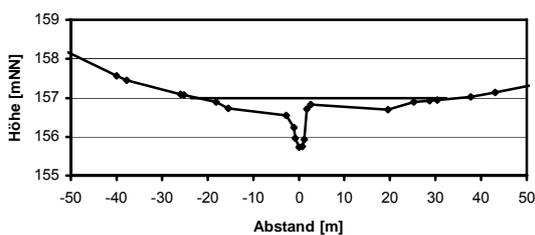
**Bewerprofil km 4,884**



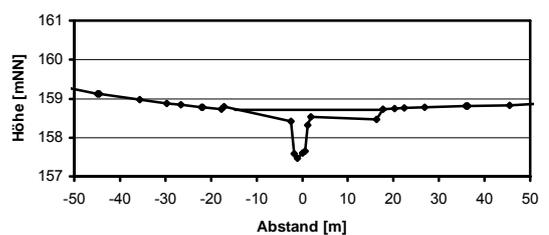
**Bewerprofil km 5,095**



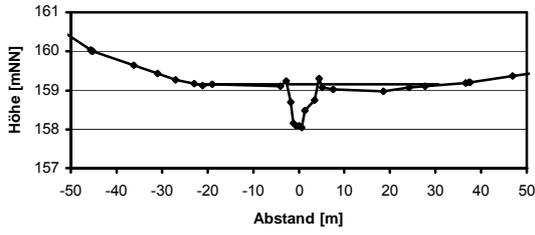
**Bewerprofil km 4,924**



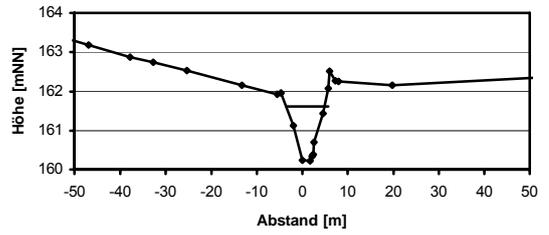
**Bewerprofil km 5,144**



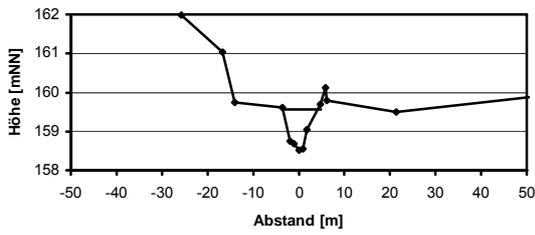
**Bewerprofil km 5,181**



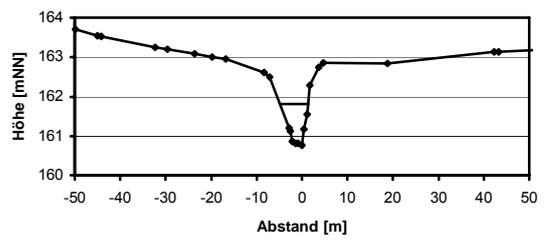
**Bewerprofil km 5,420**



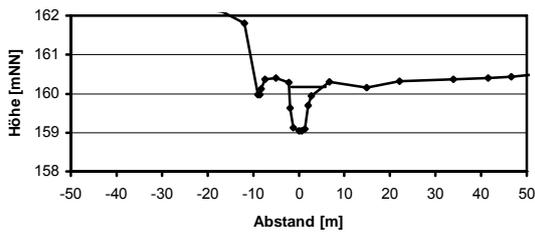
**Bewerprofil km 5,224**



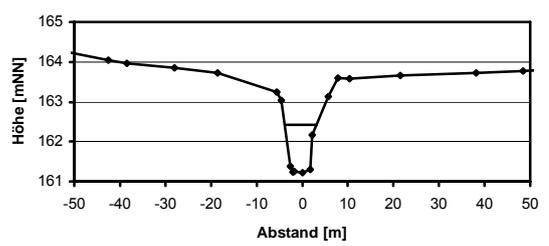
**Bewerprofil km 5,460**



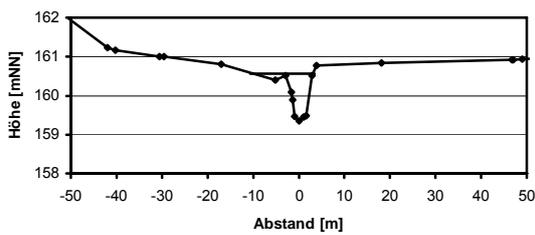
**Bewerprofil km 5,275**



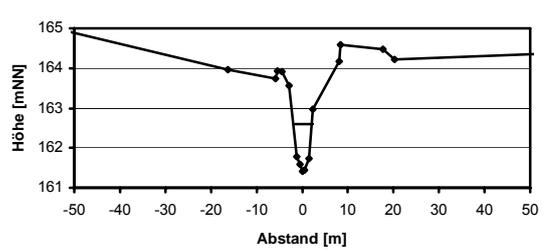
**Bewerprofil km 5,515**



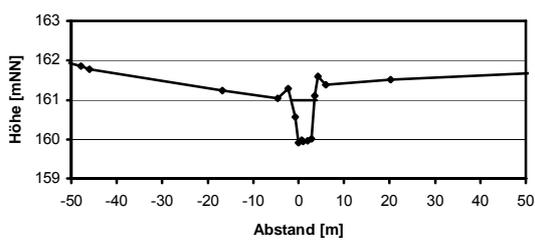
**Bewerprofil km 5,312**



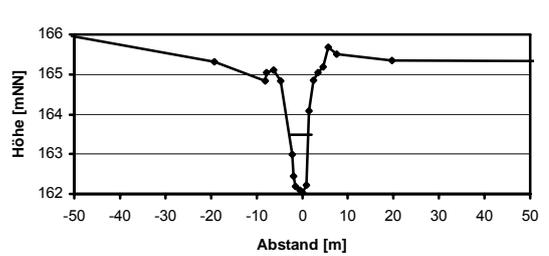
**Bewerprofil km 5,553**



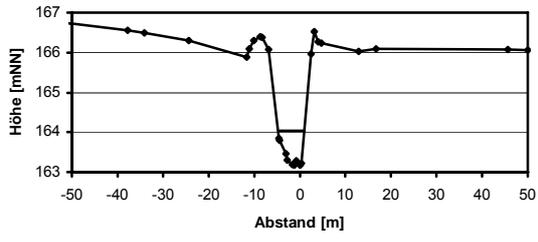
**Bewerprofil km 5,360**



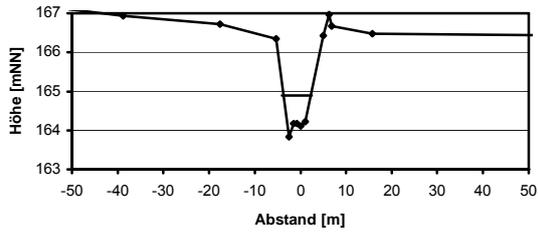
**Bewerprofil km 5,614**



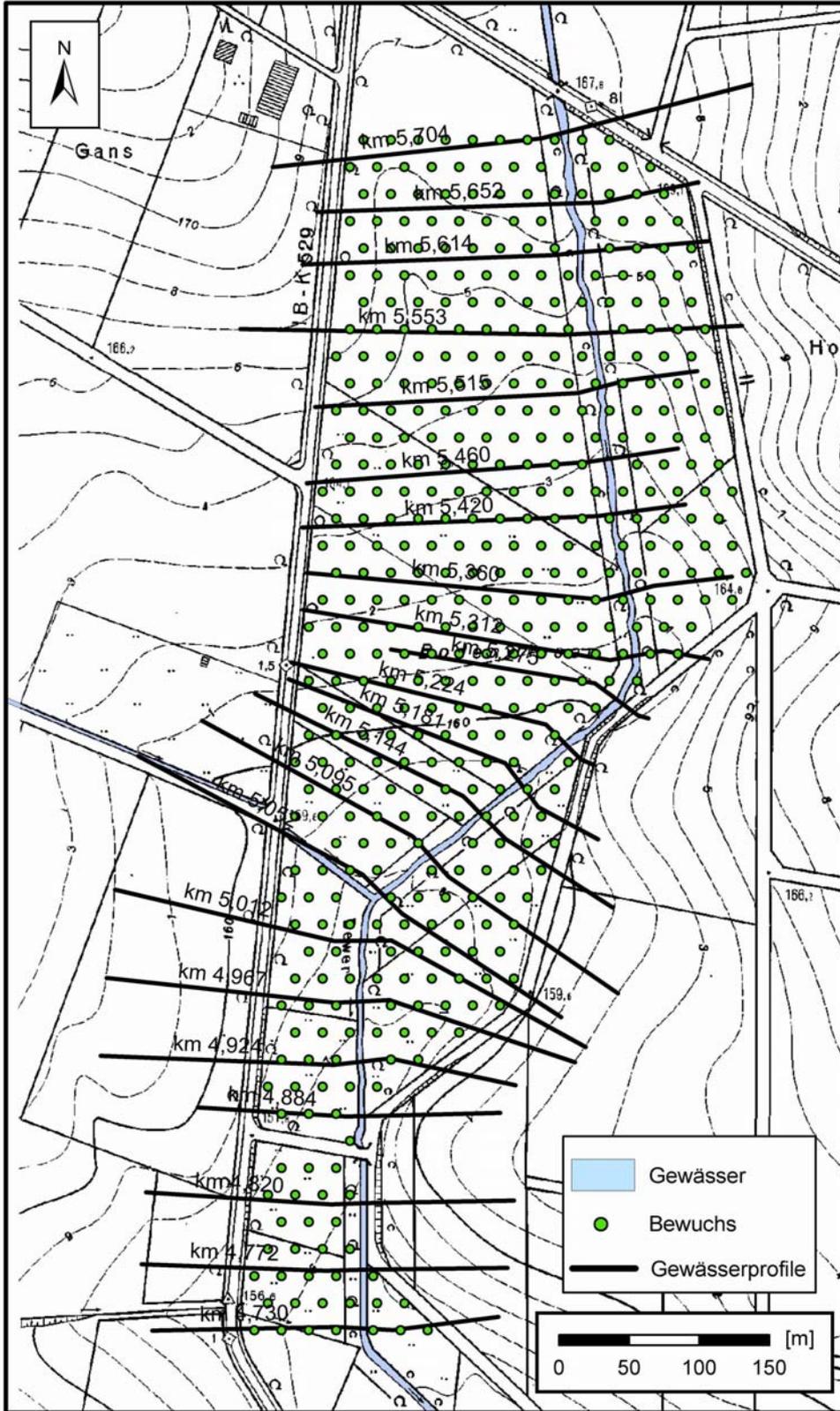
**Bewerprofil km 5,652**



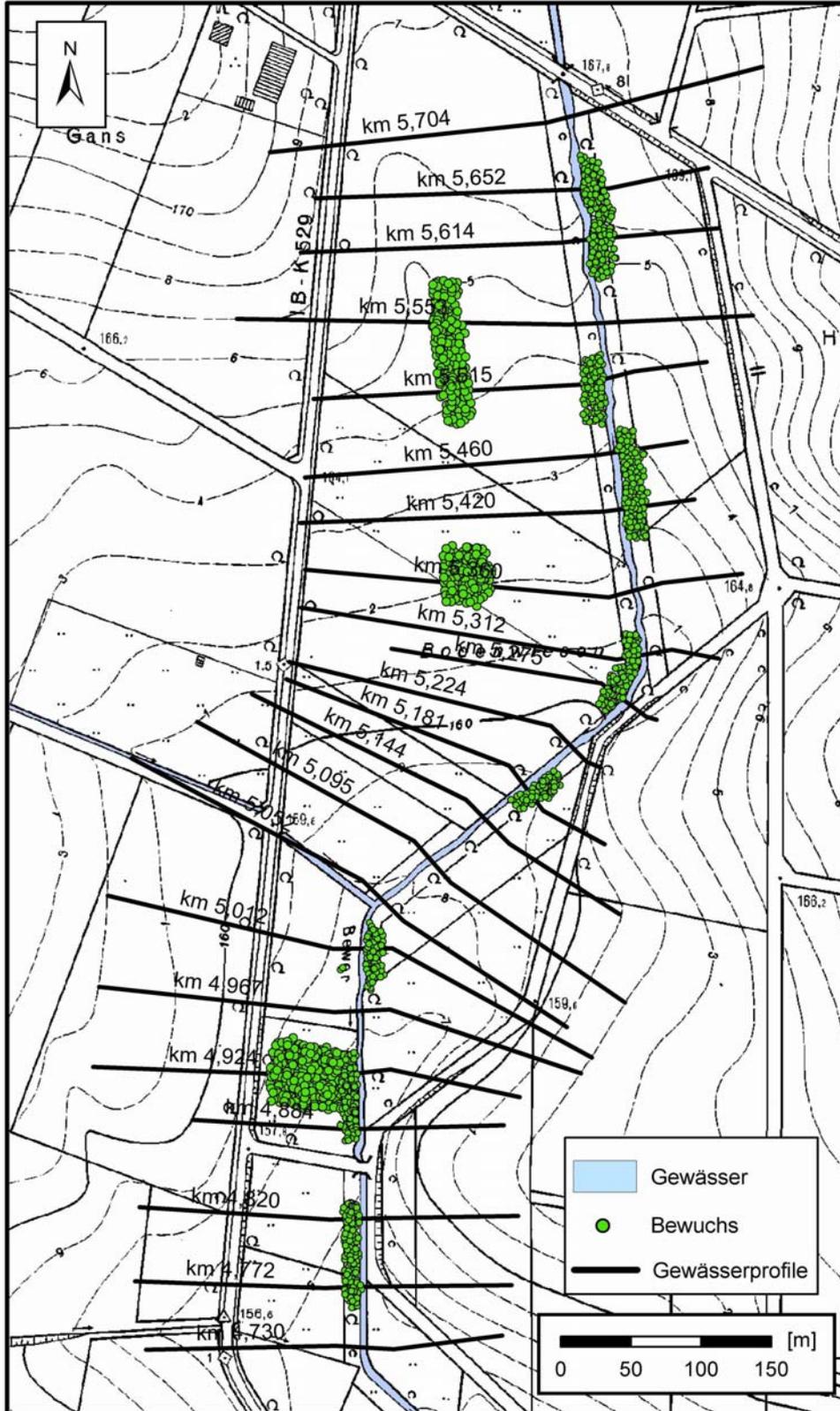
**Bewerprofil km 5,704**



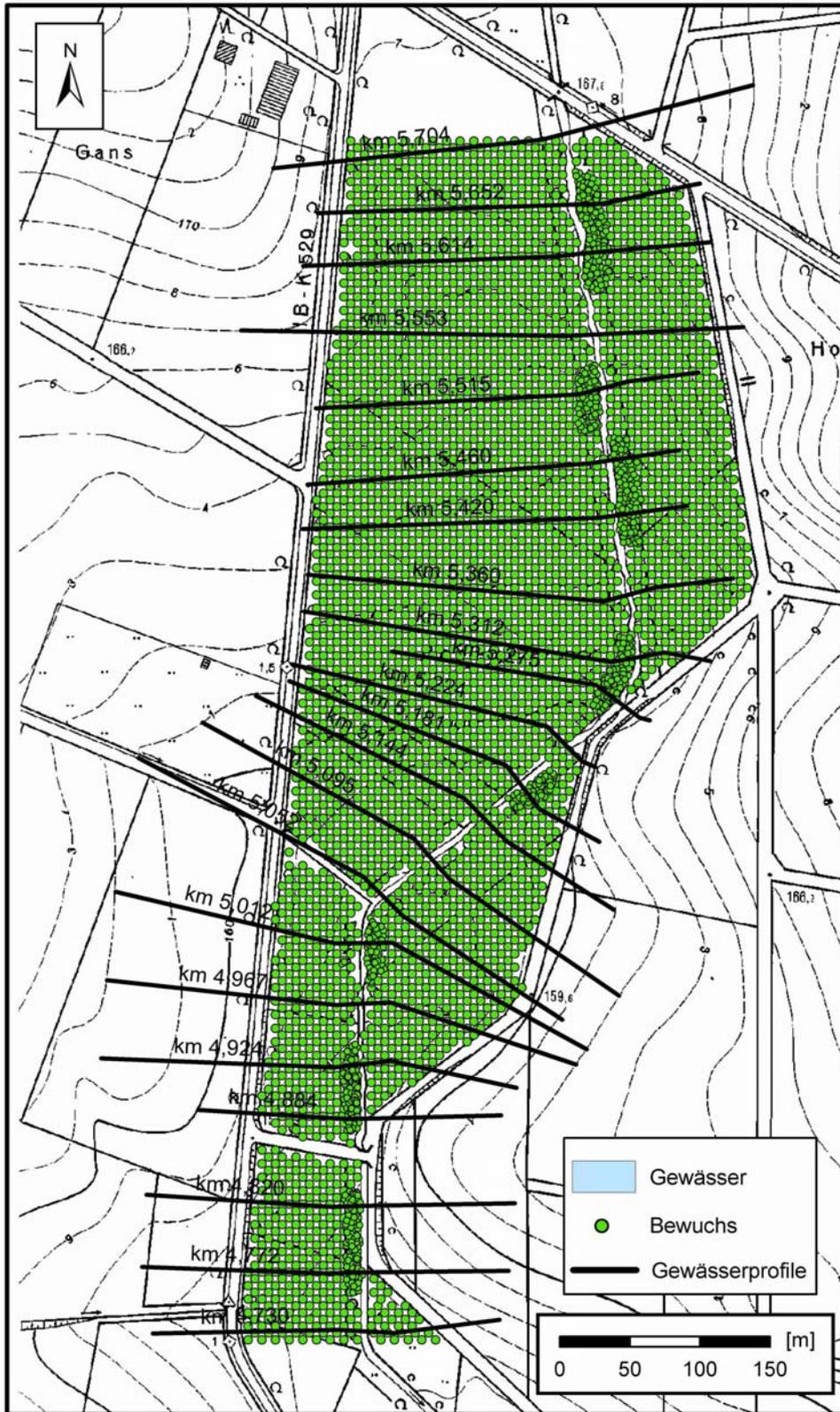
Anlage 44 Variante 2 (Einzelbewuchs) – Bewer



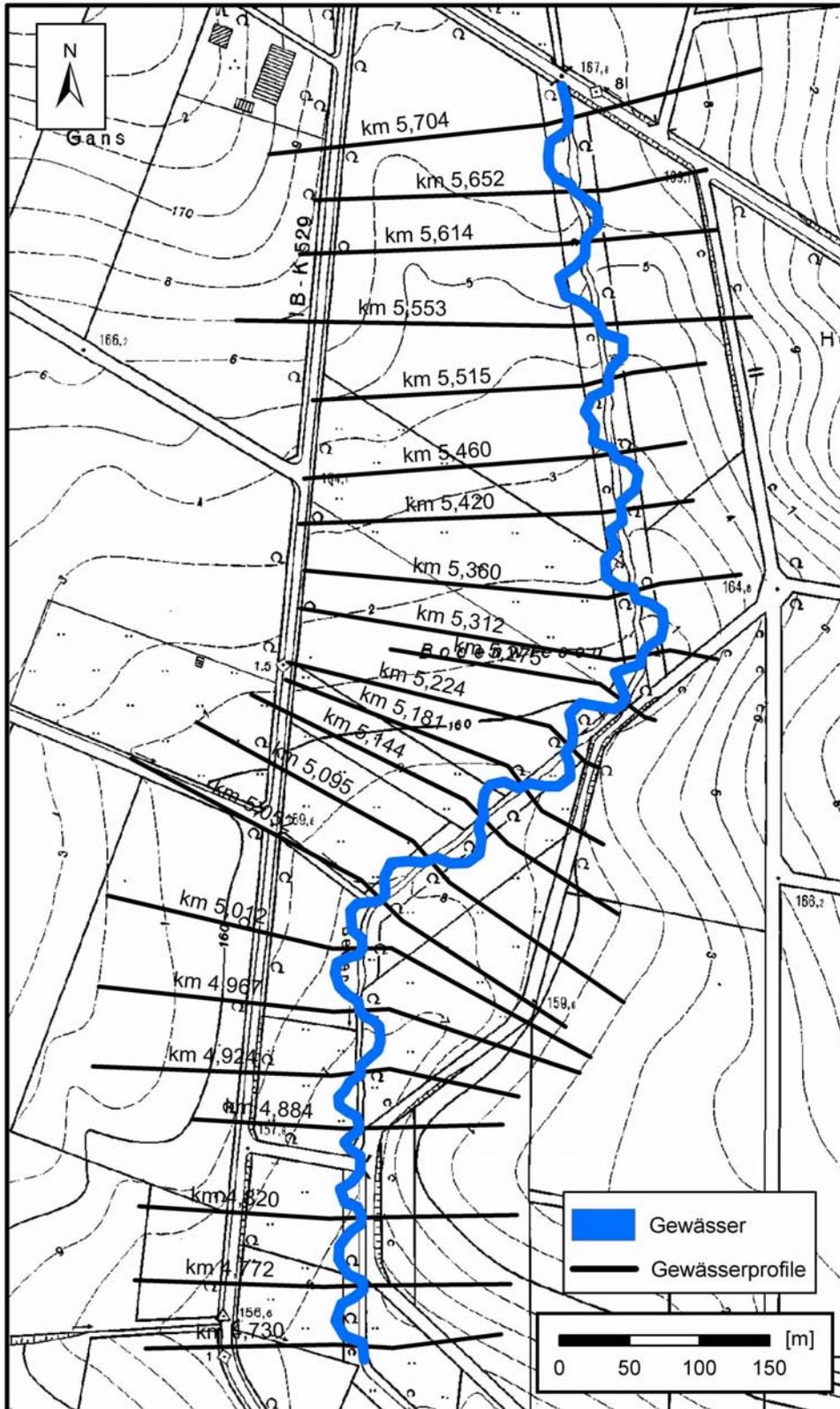
Anlage 45 Variante 3 (Bewuchsbereiche) – Bewer



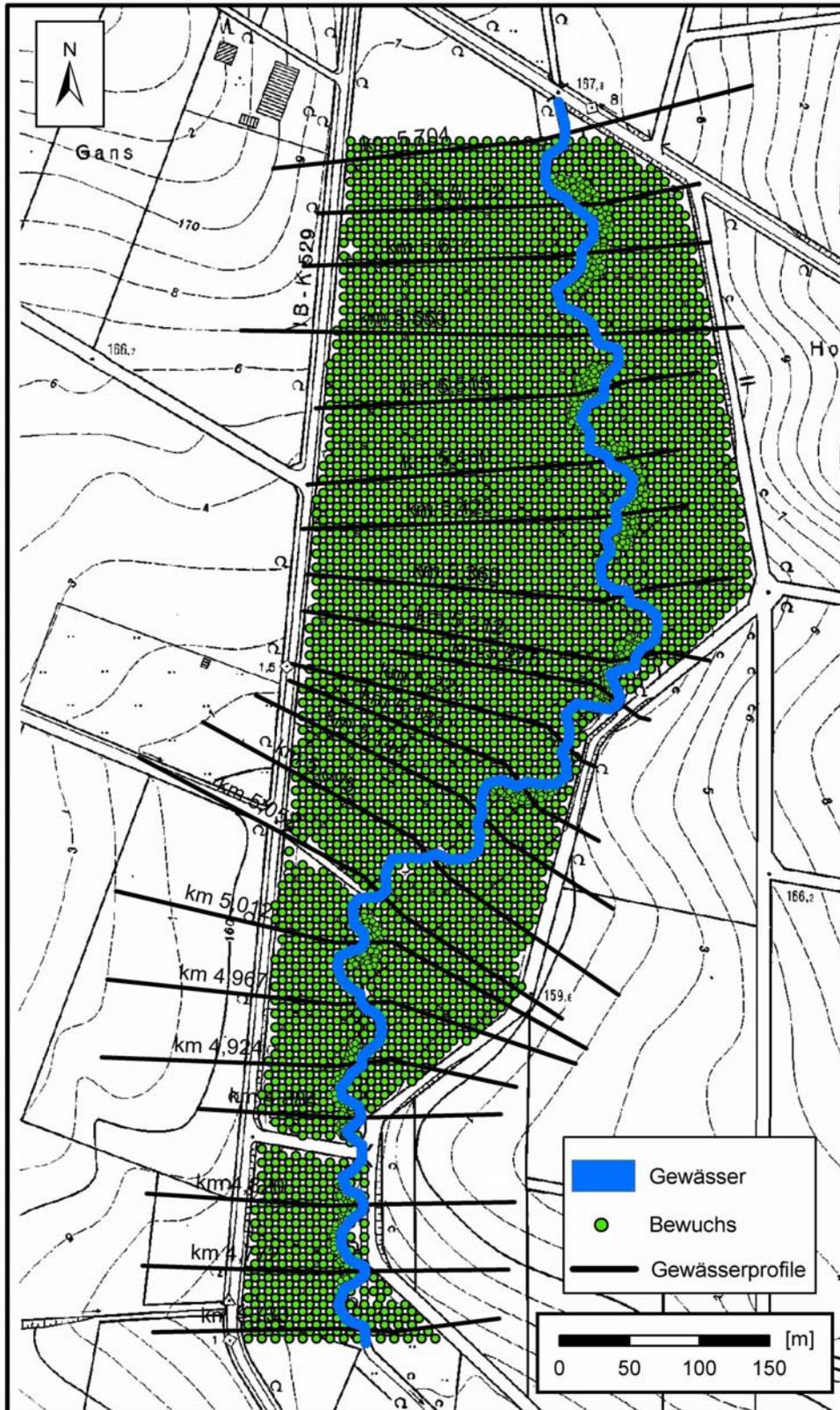
Anlage 46 Variante 4 (Dichter Auwald) – Bewer



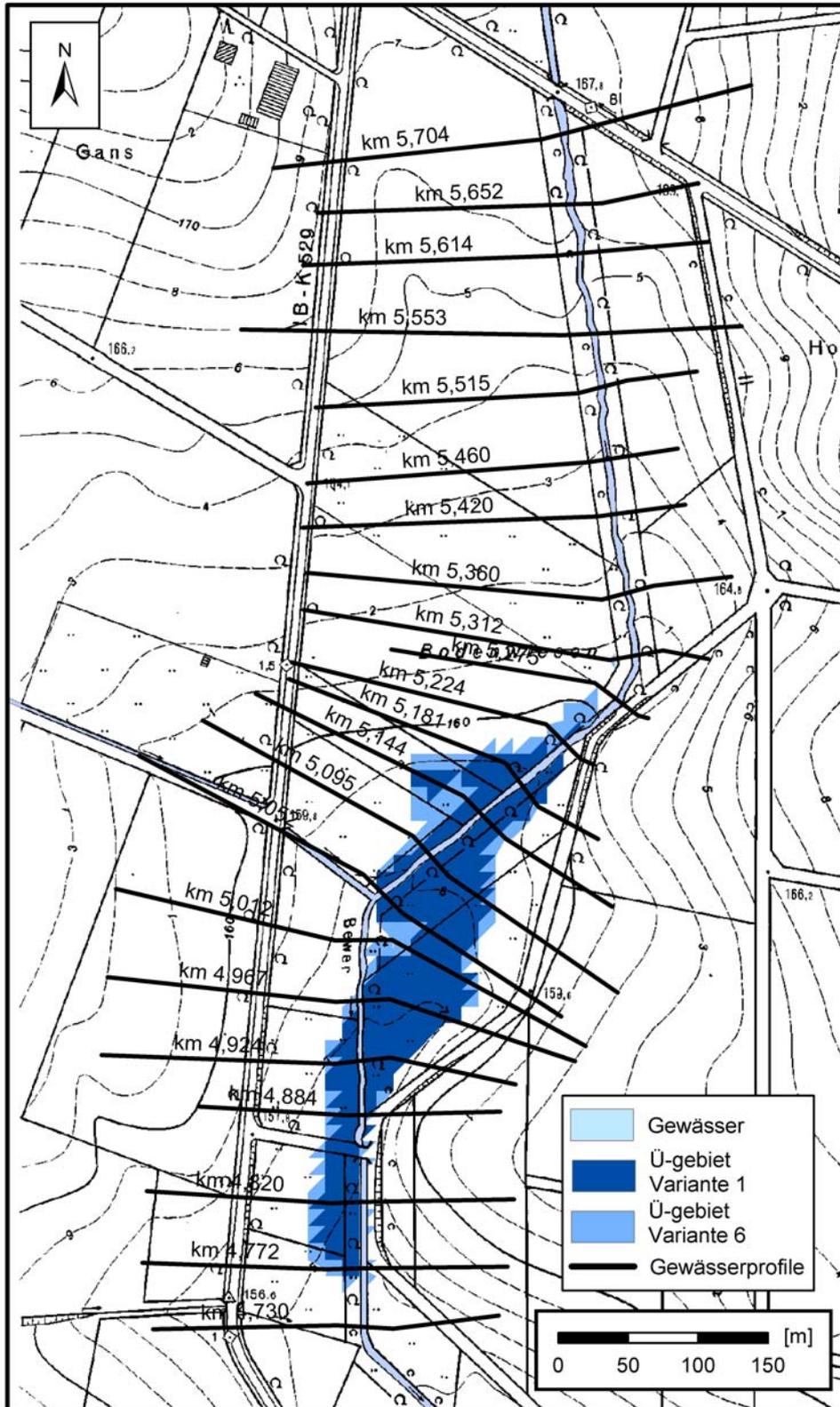
Anlage 47 Variante 5 (Windungsgrad 1780) – Bewer



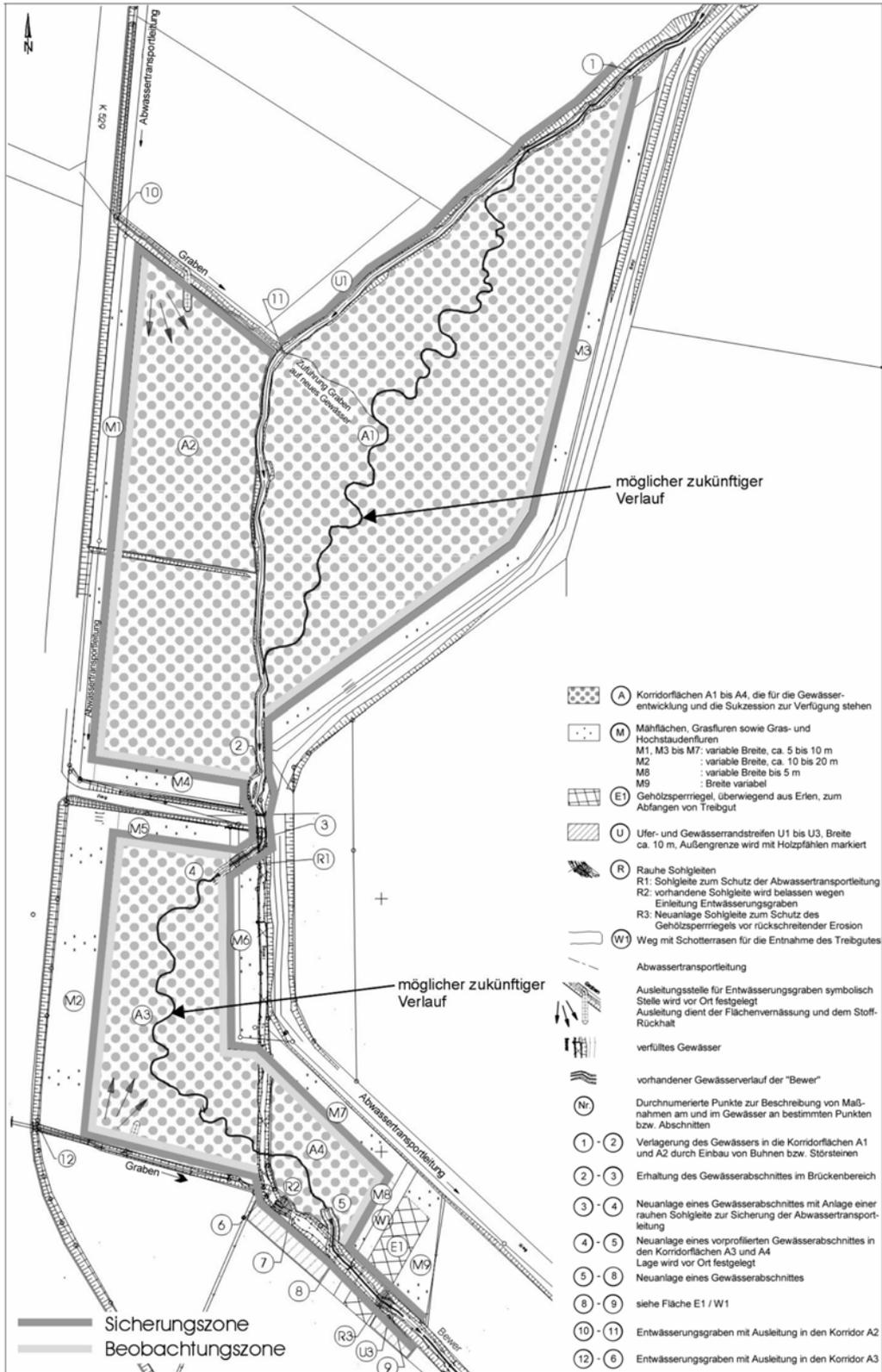
Anlage 48 Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) – Bewer



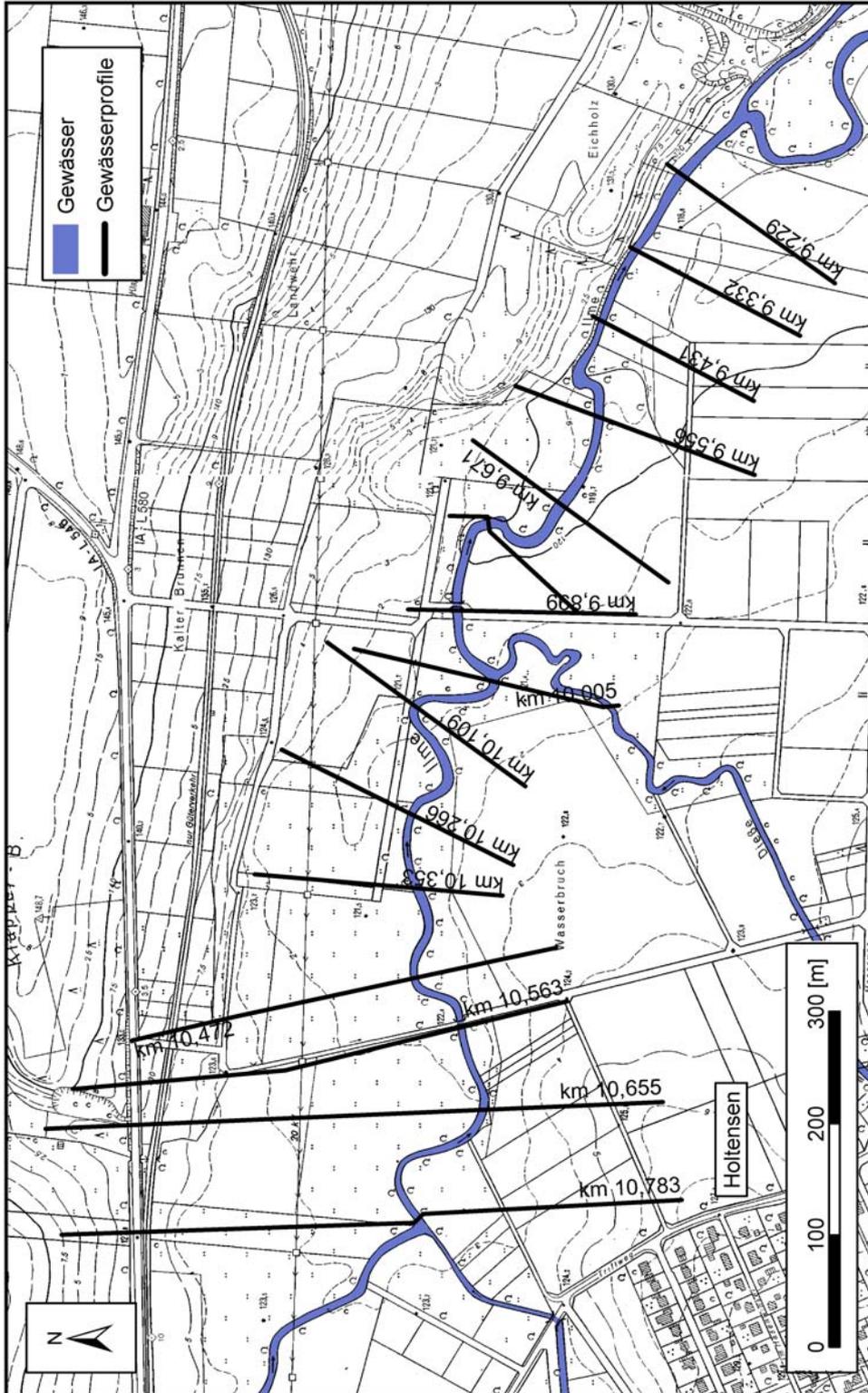
Anlage 49 Überschwemmungsgebiet Bewer (HQ100 Zustand)



**Anlage 50 Korridorflächen mit Sicherungs- und Beobachtungszonen an der Bewer im Abschnitt zwischen den Ortschaften Lüthorst und Deitersen (SCHRÖDER ET AL., 2002)**

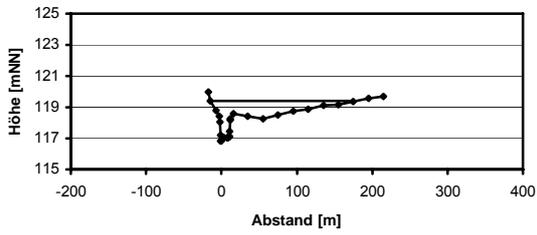


Anlage 51 Simulationsabschnitt Ilme

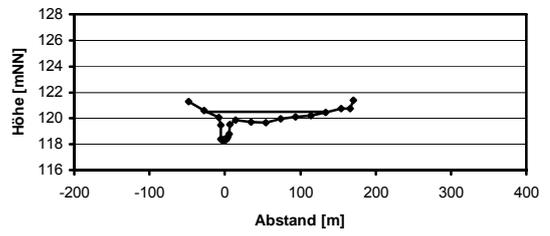


### Anlage 52 Ilmeprofile (Simulation)

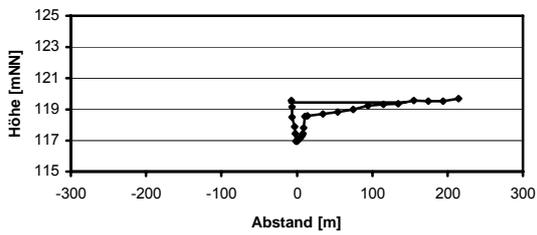
Ilmeprofil km 9,229



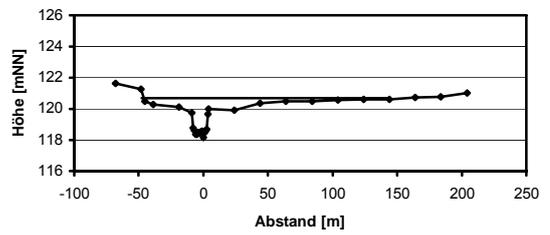
Ilmeprofil km 9,790



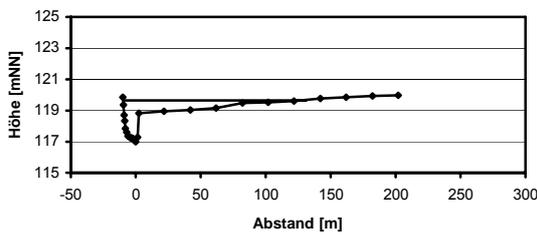
Ilmeprofil km 9,332



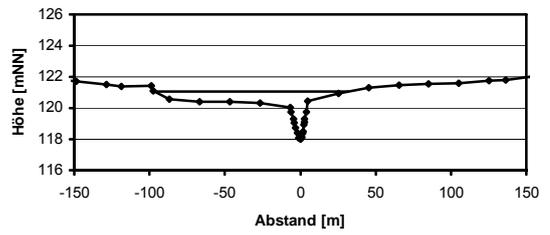
Ilmeprofil km 9,899



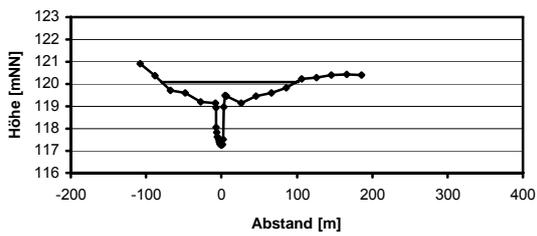
Ilmeprofil km 9,431



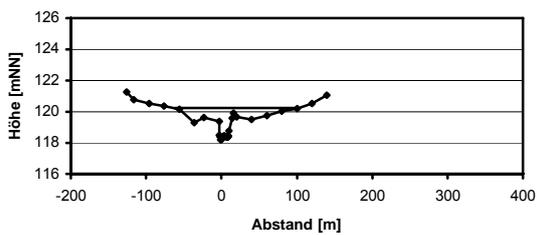
Ilmeprofil km 10,005



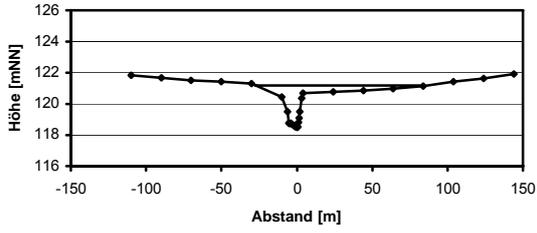
Ilmeprofil km 9,556



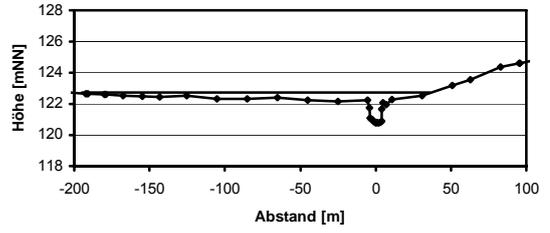
Ilmeprofil km 9,671



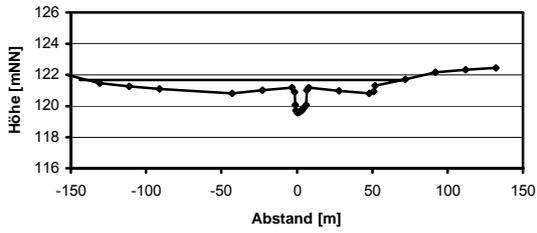
**Ilmeprofil km 10,109**



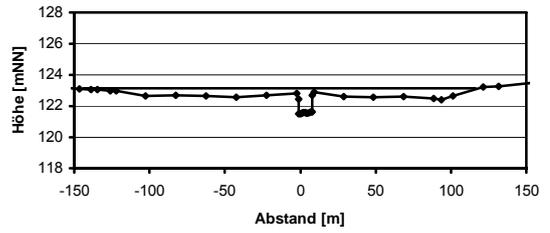
**Ilmeprofil km 10,655**



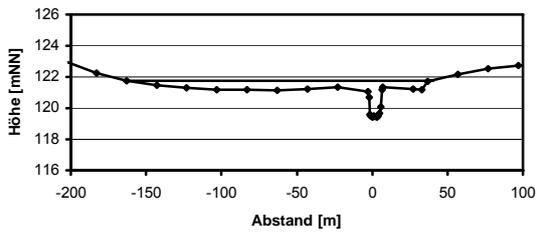
**Ilmeprofil km 10,266**



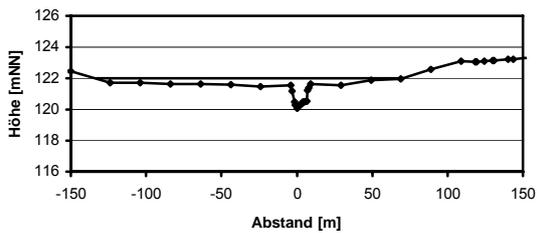
**Ilmeprofil km 10,783**



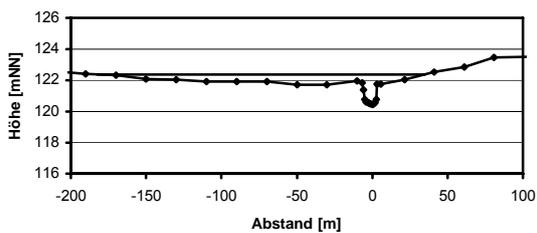
**Ilmeprofil km 10,353**



**Ilmeprofil km 10,472**



**Ilmeprofil km 10,563**



Anlage 53 Variante 2 (Einzelbewuchs) – Ilme



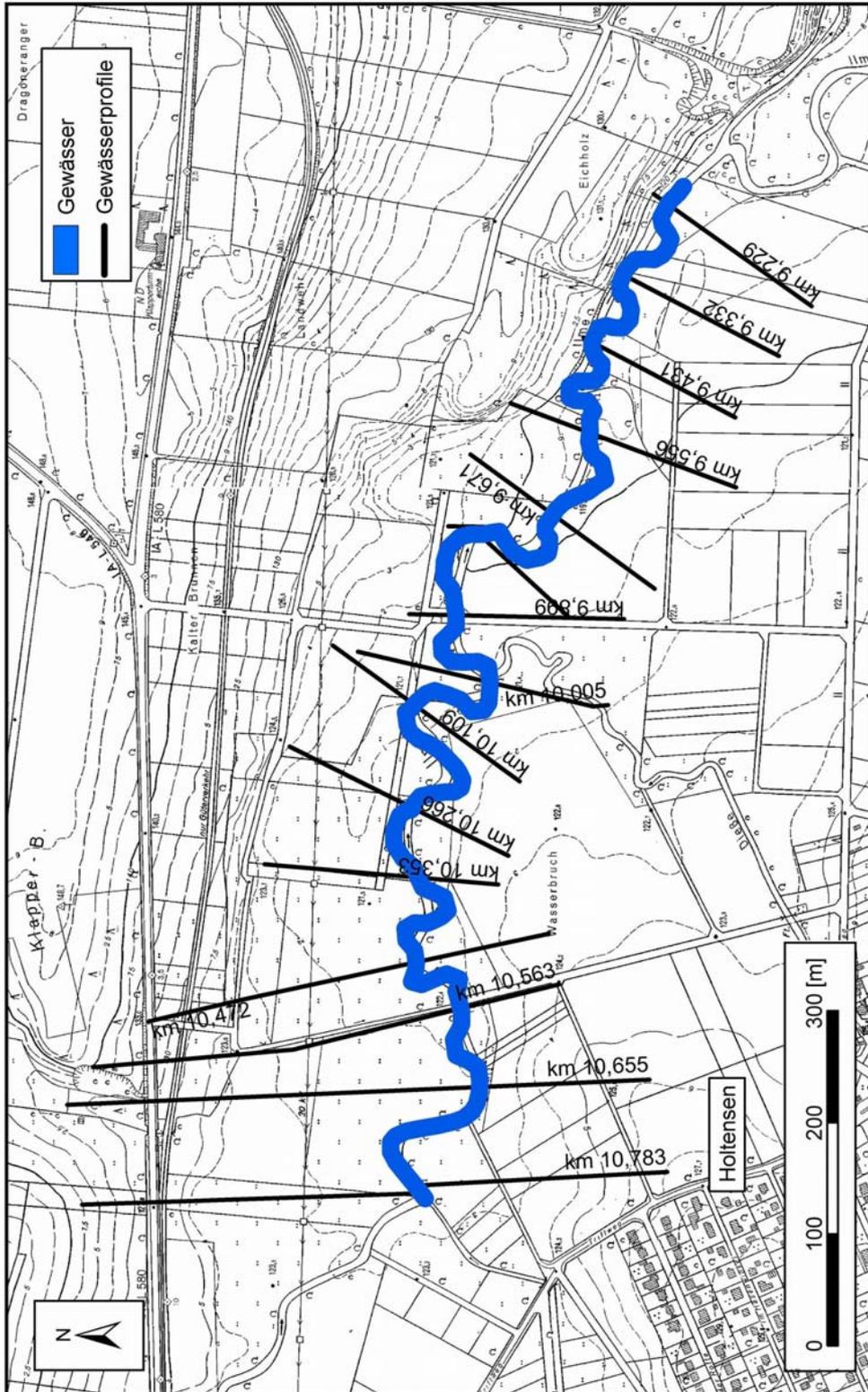
Anlage 54 Variante 3 (Bewuchsbereiche) – Ilme



Anlage 55 Variante 4 (Dichter Auwald) – Ilme



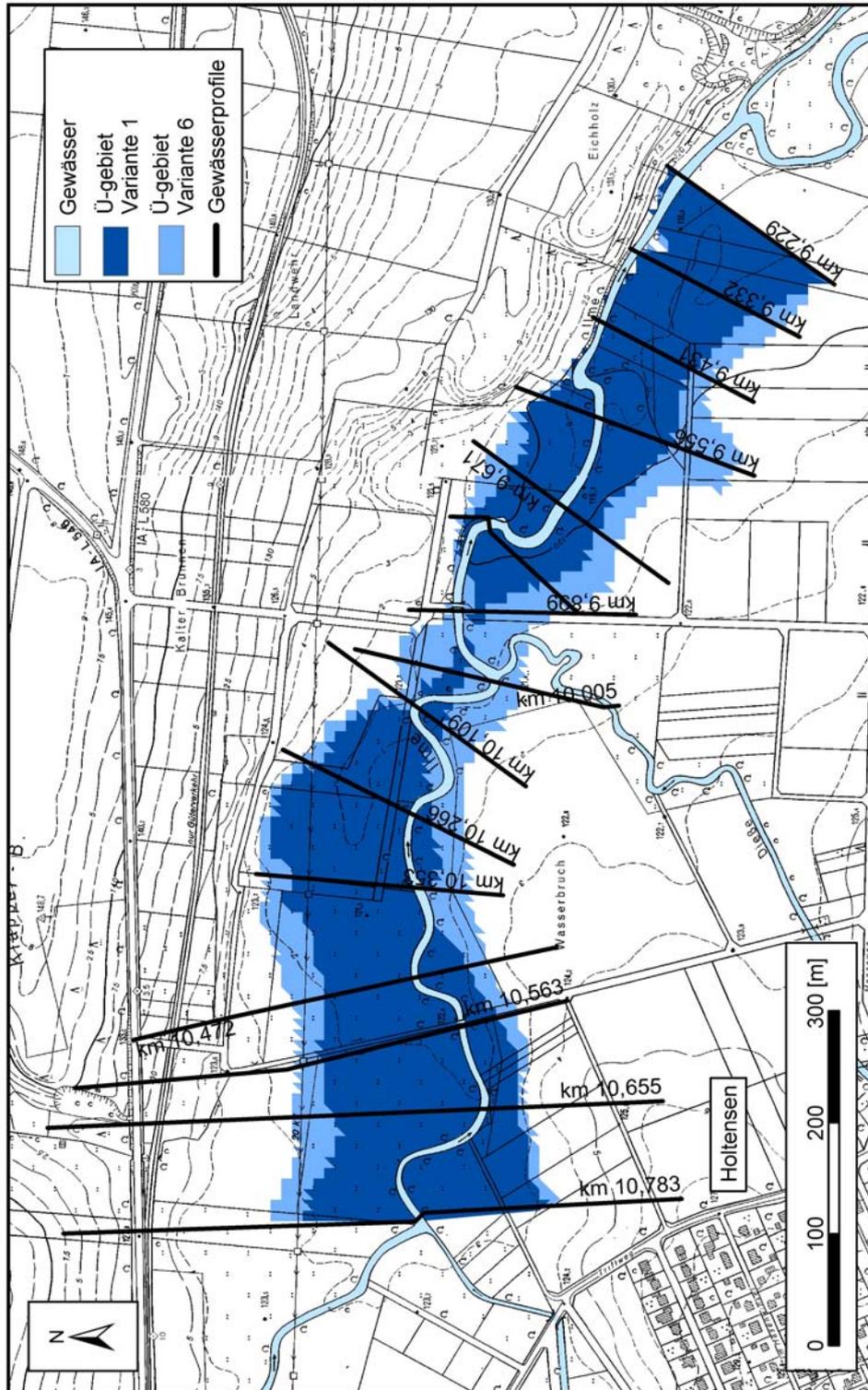
Anlage 56 Variante 5 (Windungsgrad 1780) – Ilme



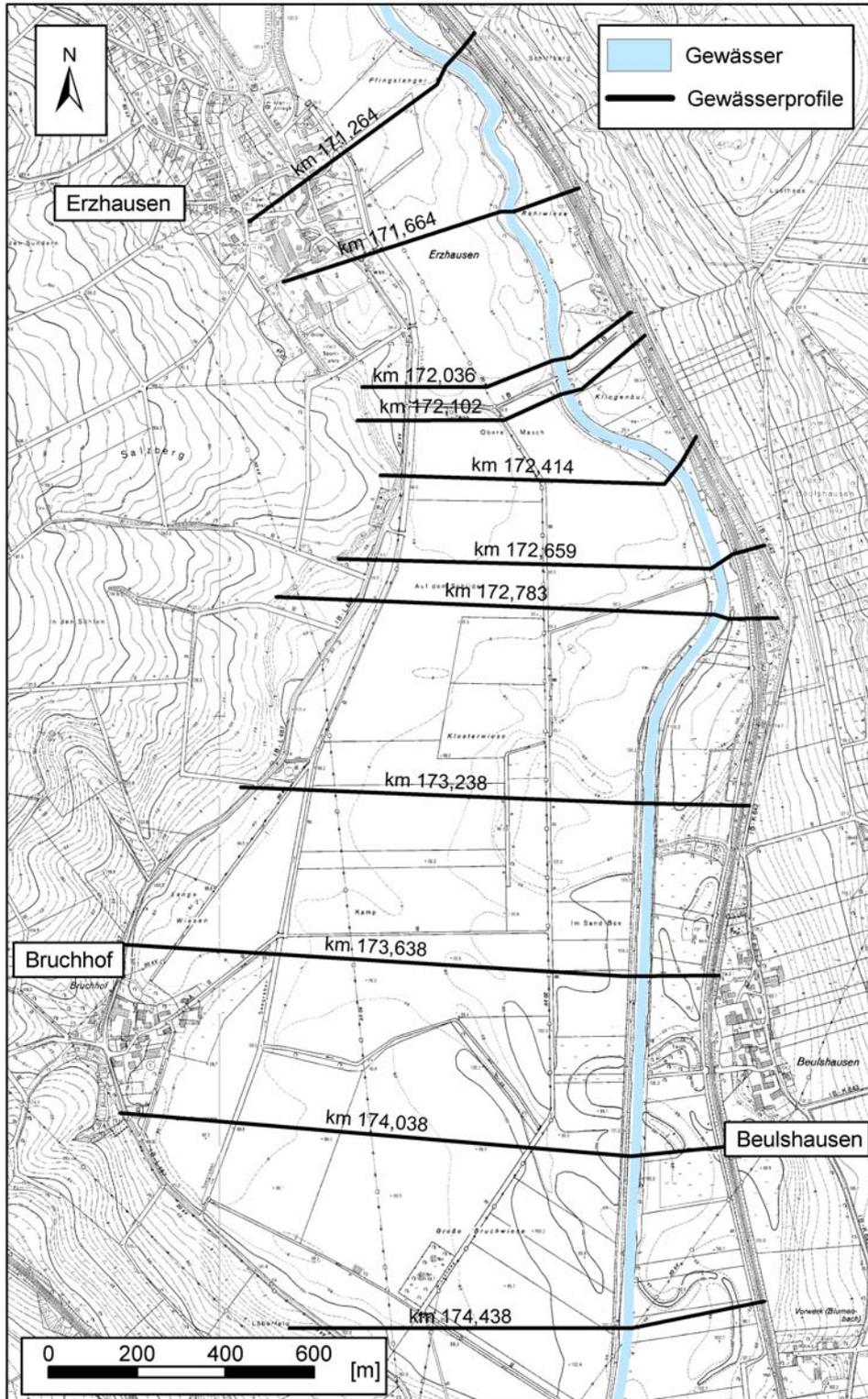
Anlage 57 Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) – Ilme



Anlage 58 Überschwemmungsgebiet Ilme (HQ100 Zustand)

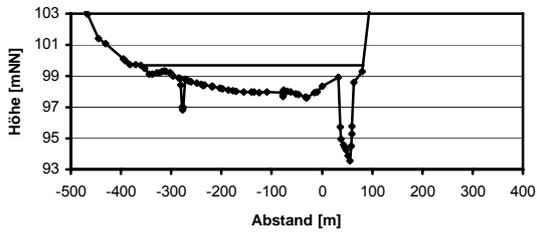


Anlage 59 Simulationsabschnitt Leine

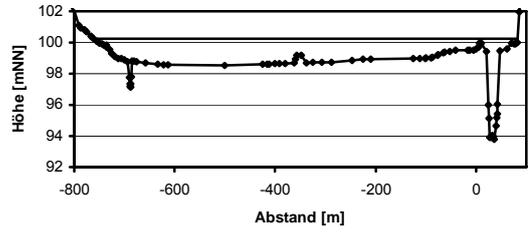


**Anlage 60 Leineprofile (Simulation)**

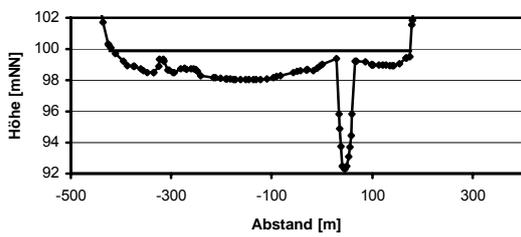
**Leineprofil km 171,264**



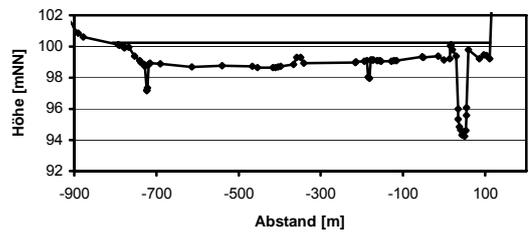
**Leineprofil km 172,659**



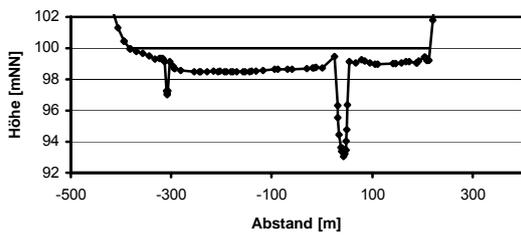
**Leineprofil km 171,664**



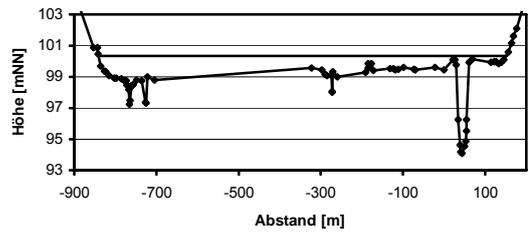
**Leineprofil km 172,783**



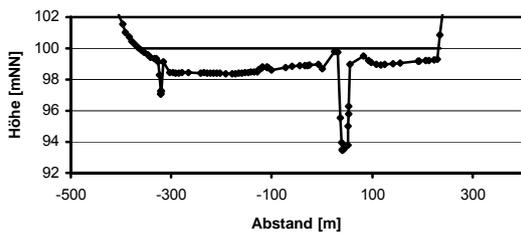
**Leineprofil km 172,036**



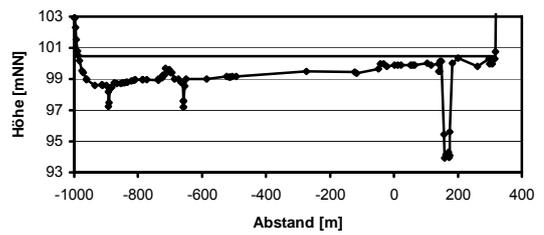
**Leineprofil km 173,238**



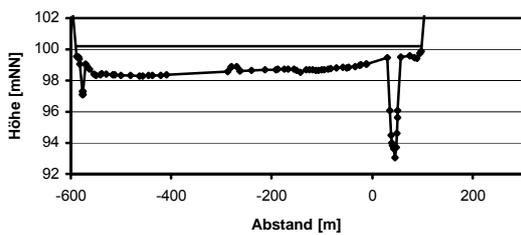
**Leineprofil km 172,102**



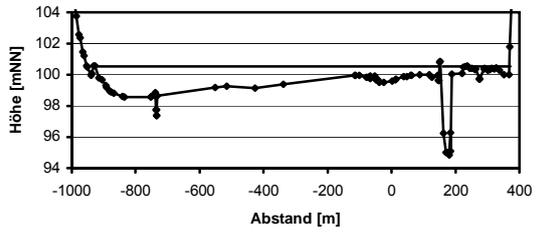
**Leineprofil km 173,638**



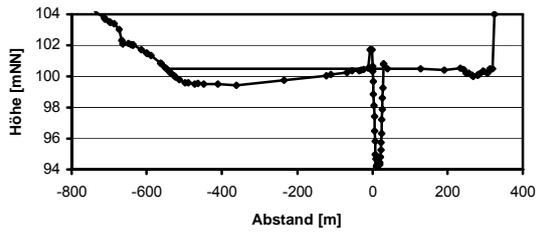
**Leineprofil km 172,414**



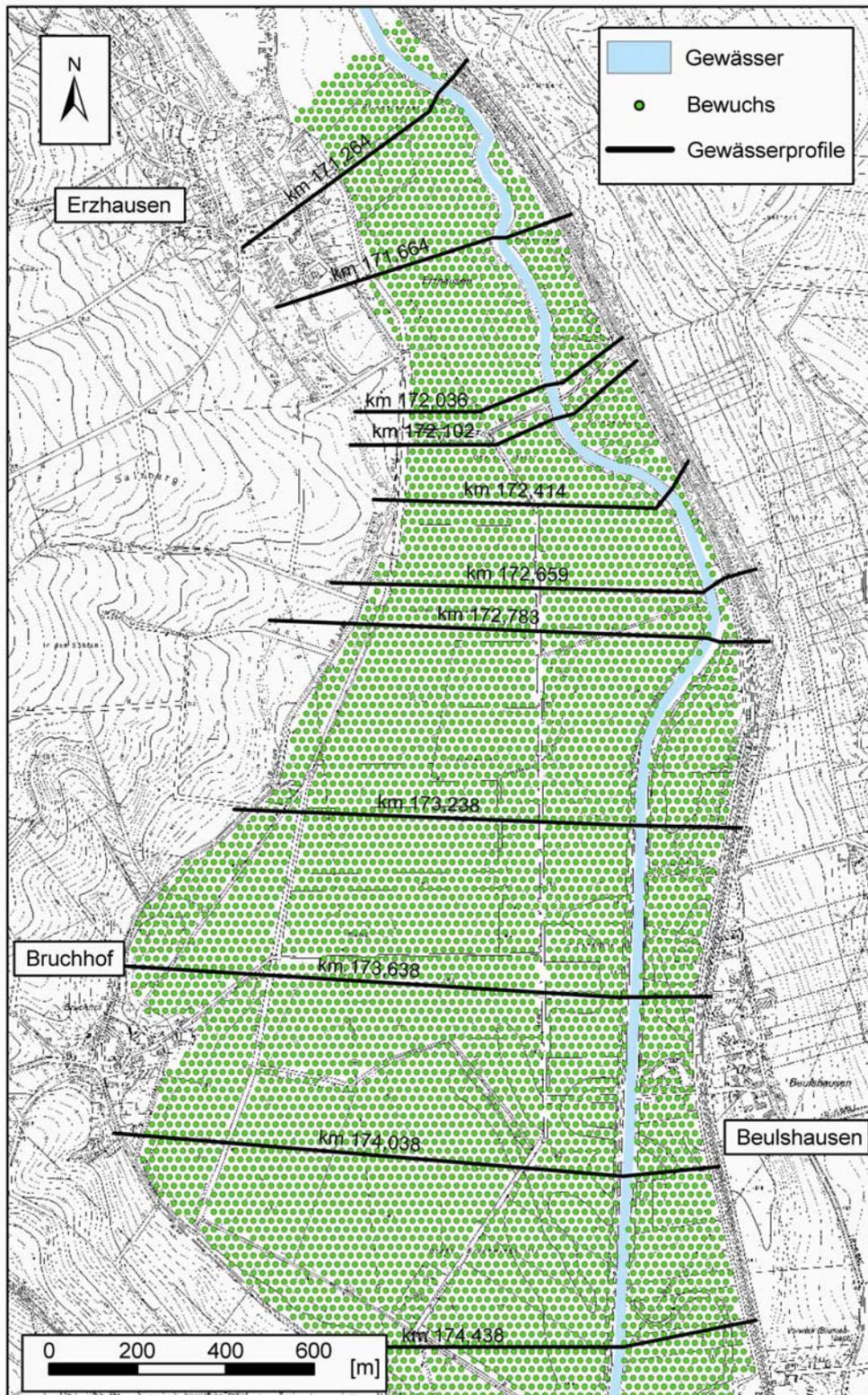
**Leineprofil km 174,038**



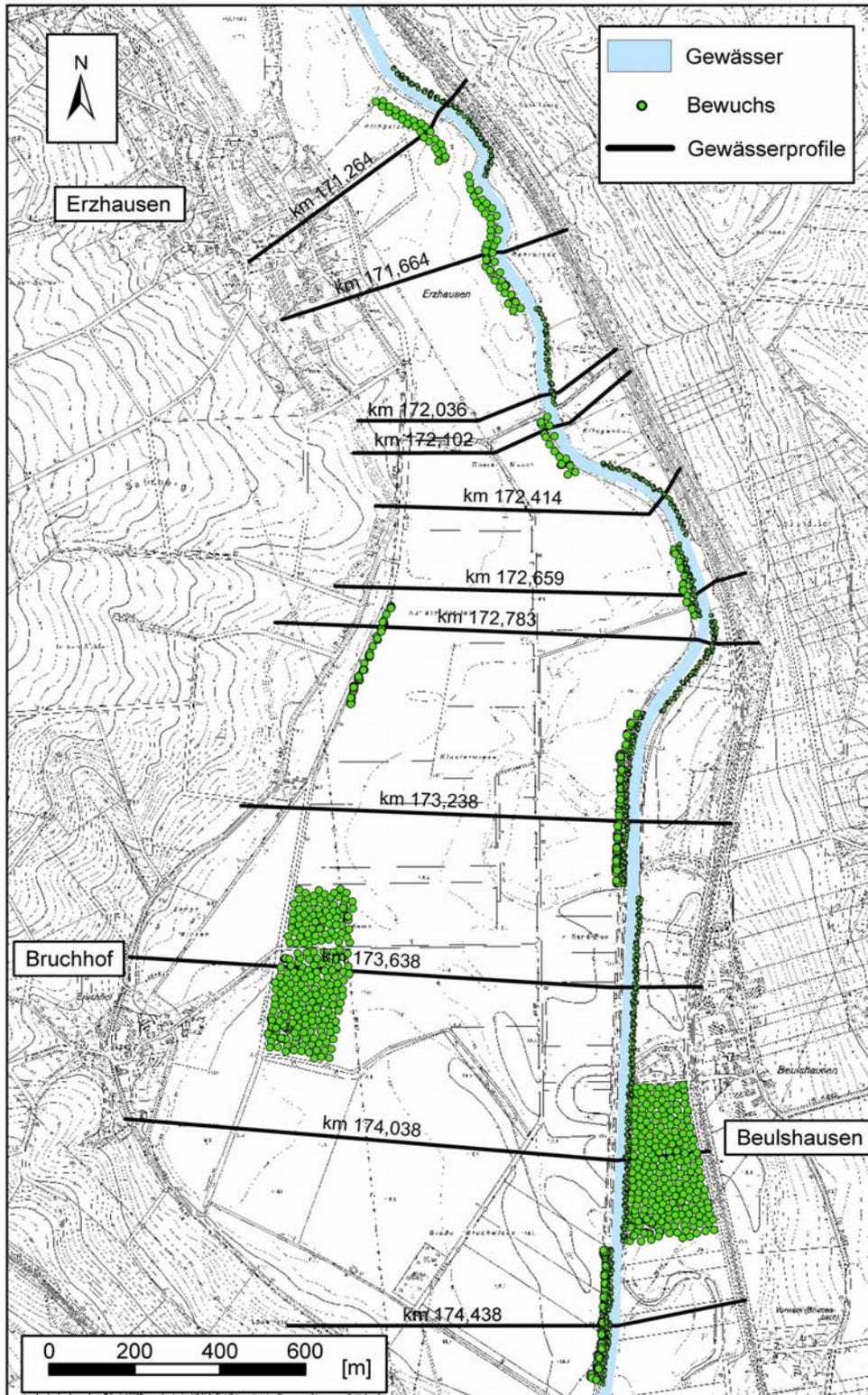
**Leineprofil km 174,438**



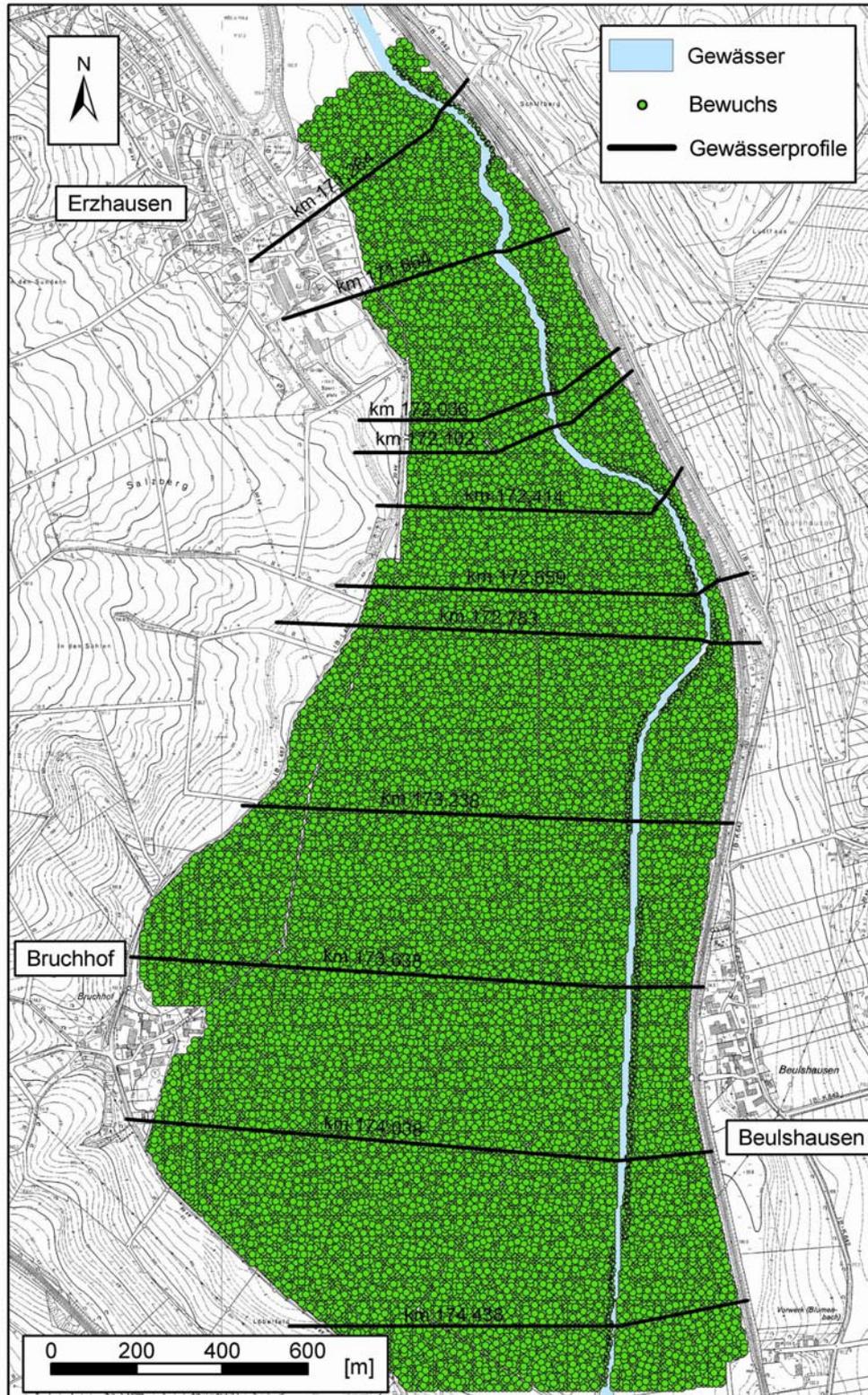
Anlage 61 Variante 2 (Einzelbewuchs) – Leine



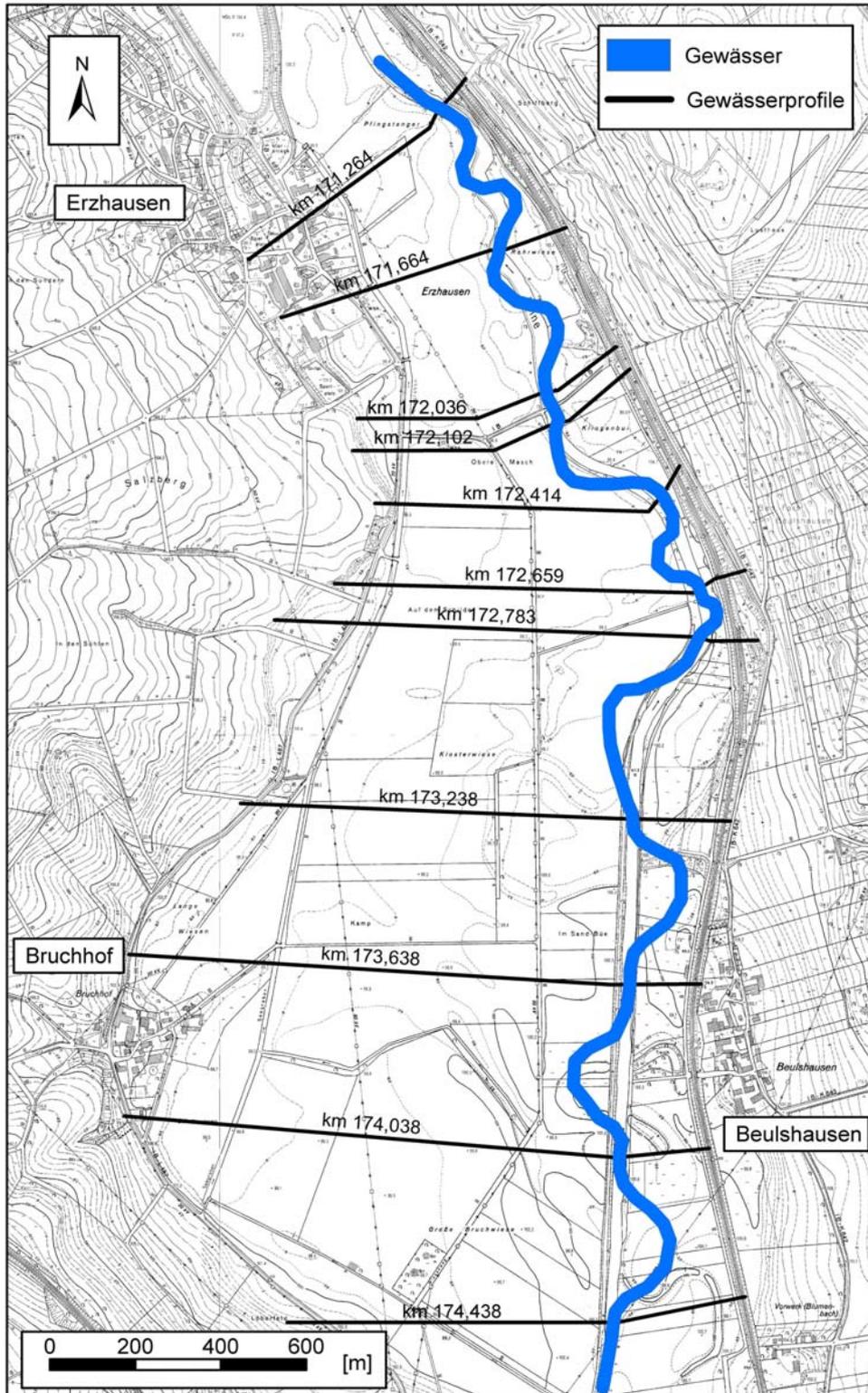
Anlage 62 Variante 3 (Bewuchsbereiche) – Leine



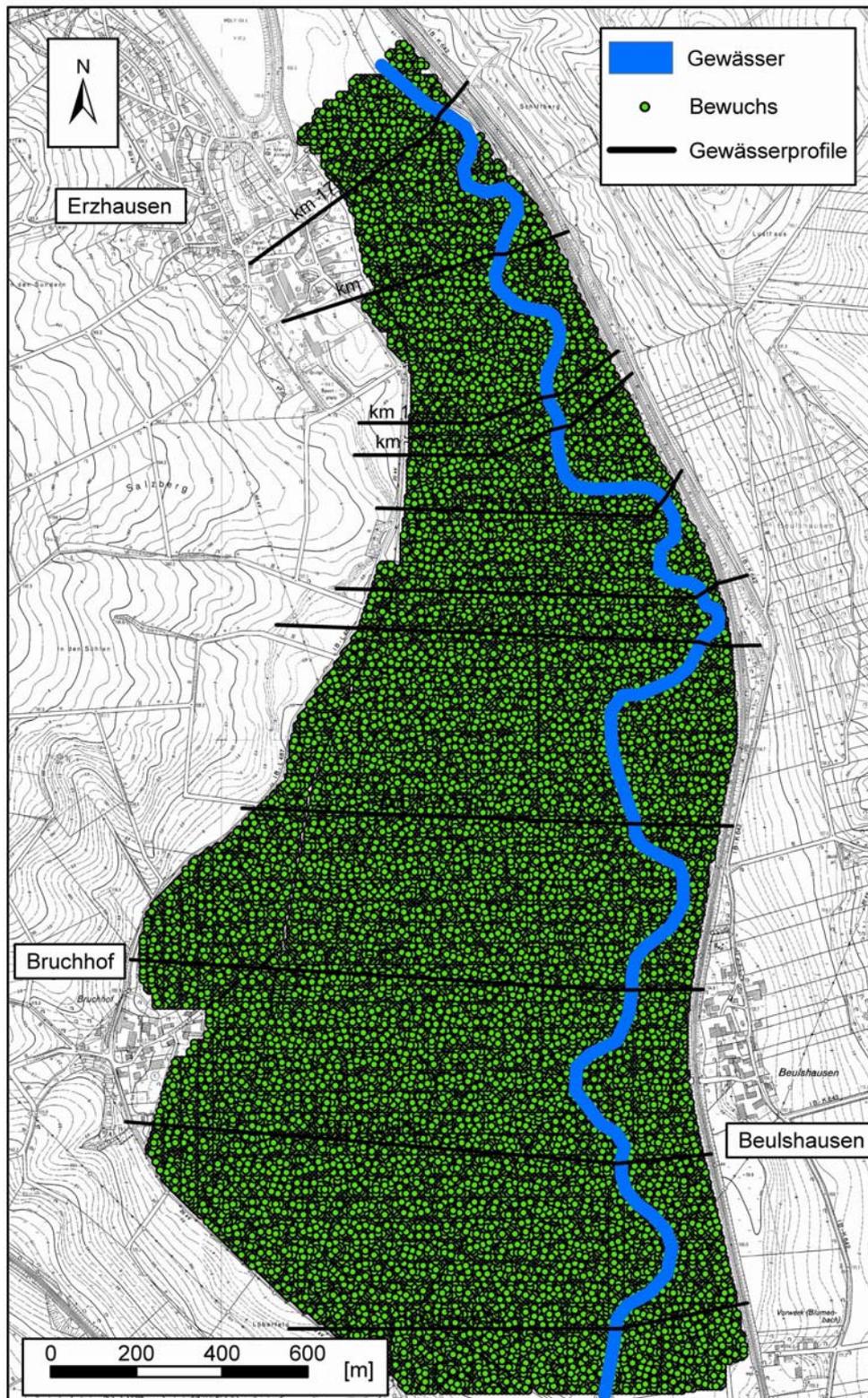
Anlage 63 Variante 4 (Dichter Auwald) – Leine



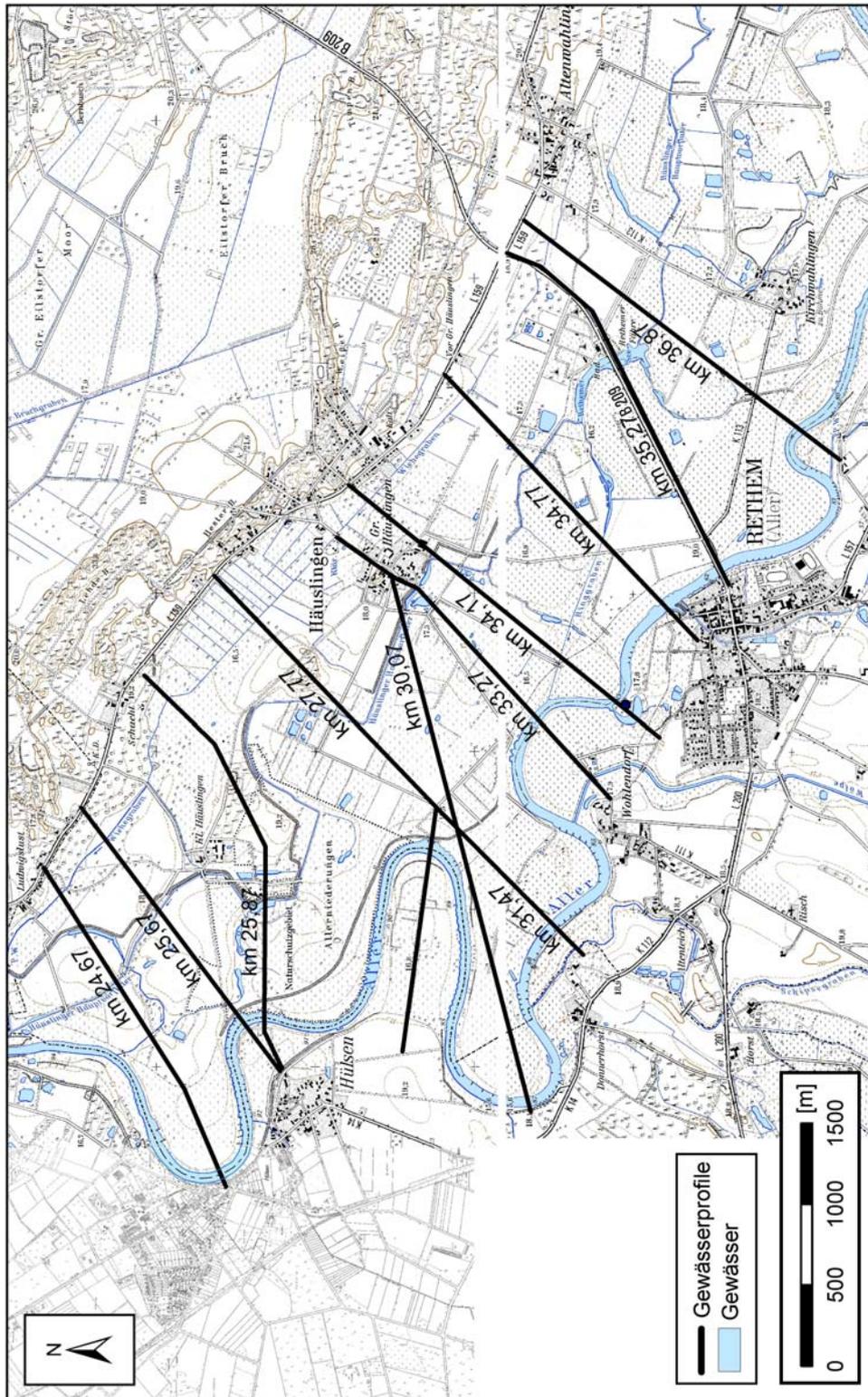
Anlage 64 Variante 5 (Windungsgrad 1780) – Leine



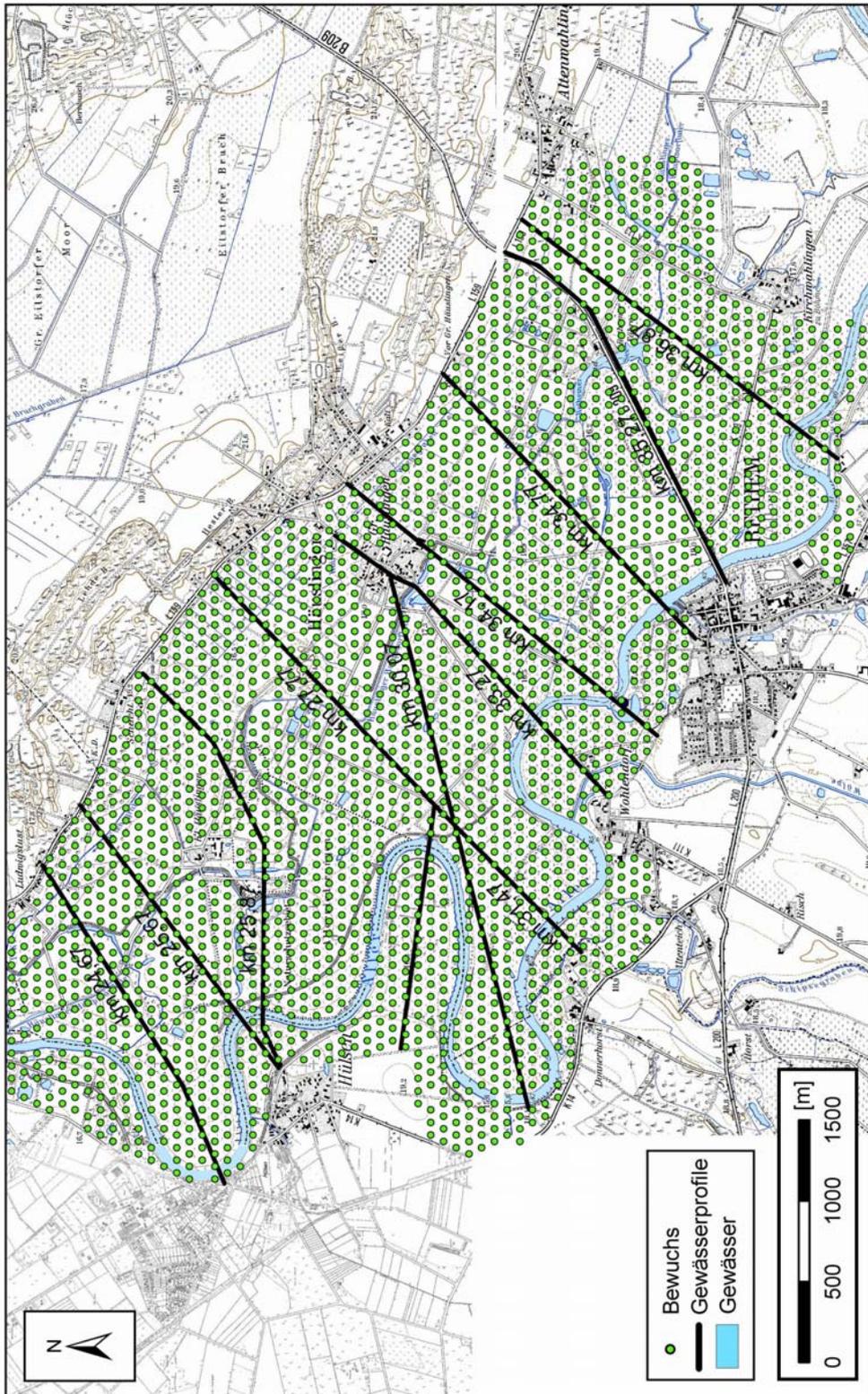
**Anlage 65 Variante 6 (Dichter Auwald und Windungsgrad 1780) – Leine**



Anlage 66 Simulationsabschnitt Aller (Profile in Anlage 5)



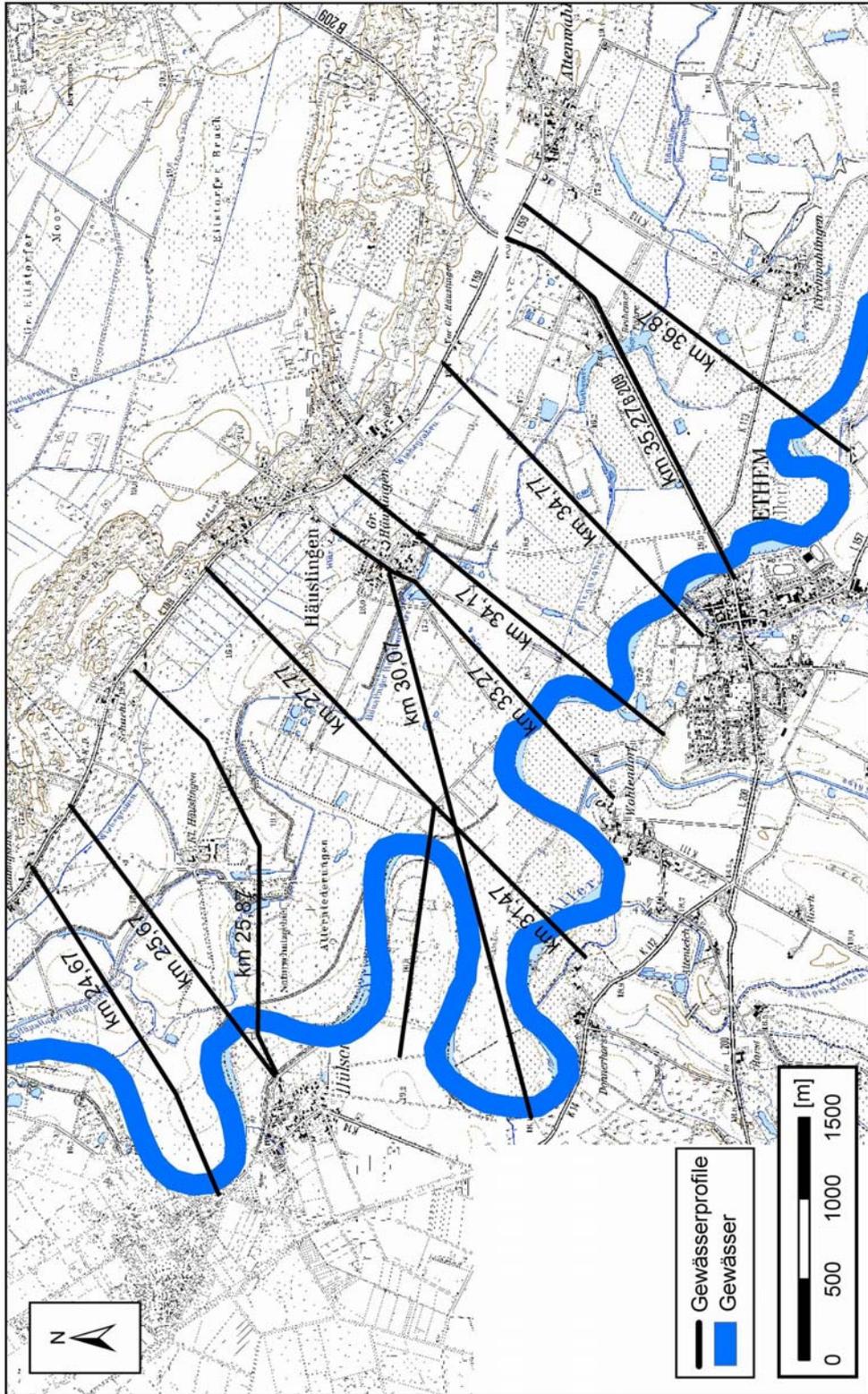
Anlage 67 Variante 2 (Einzelbewuchs) – Aller





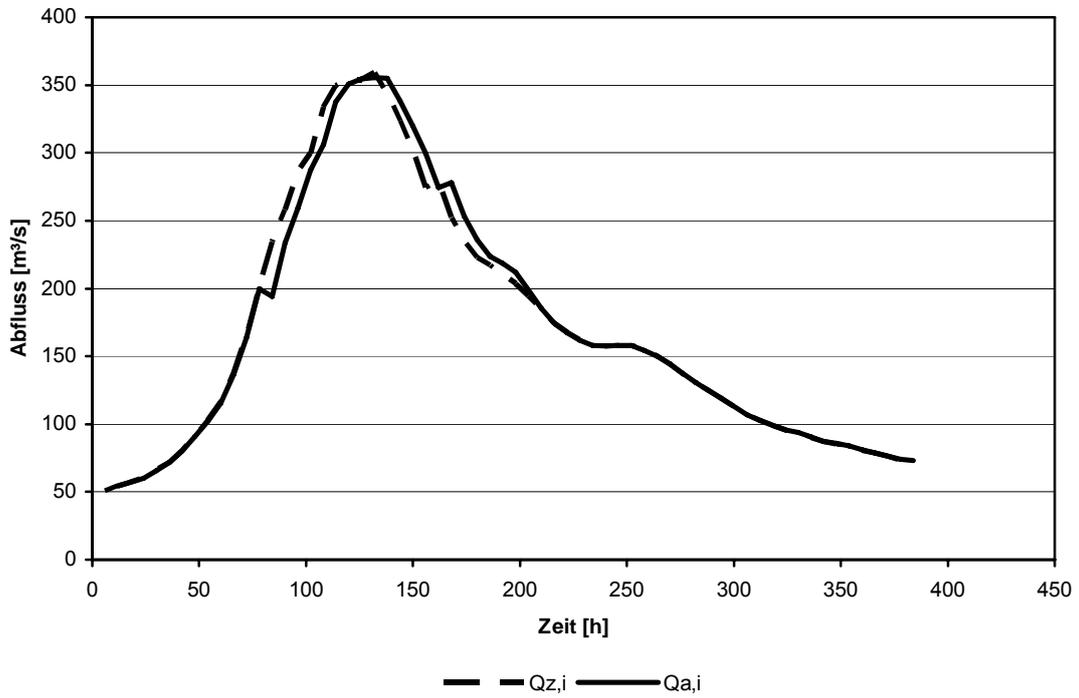


Anlage 70 Variante 5 (Windungsgrad 1780) – Aller

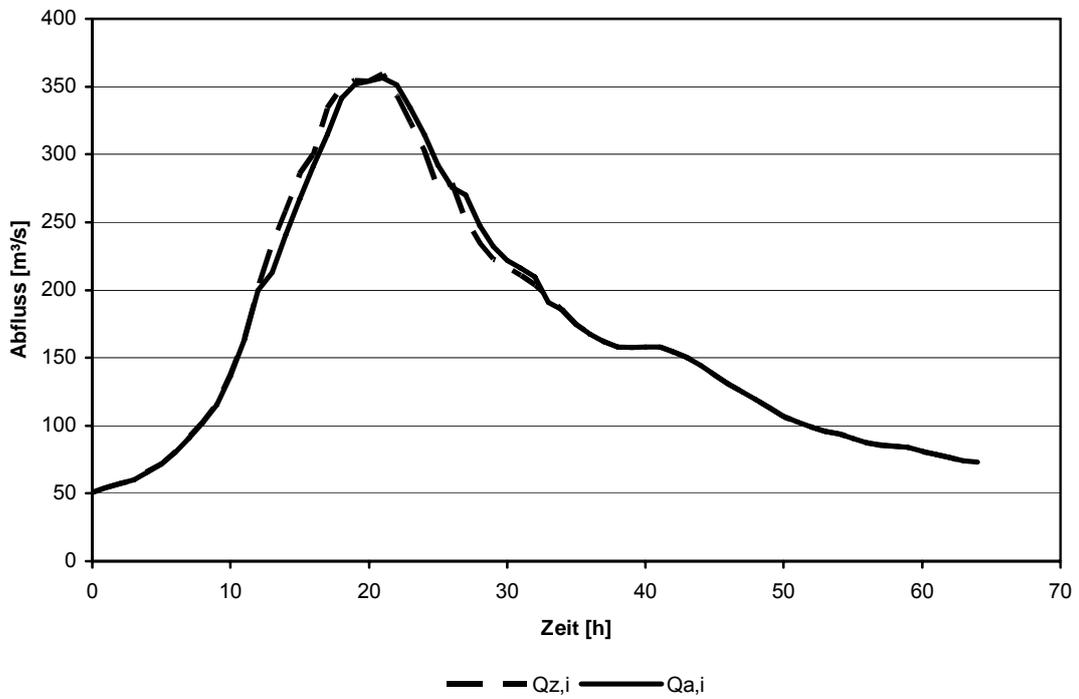




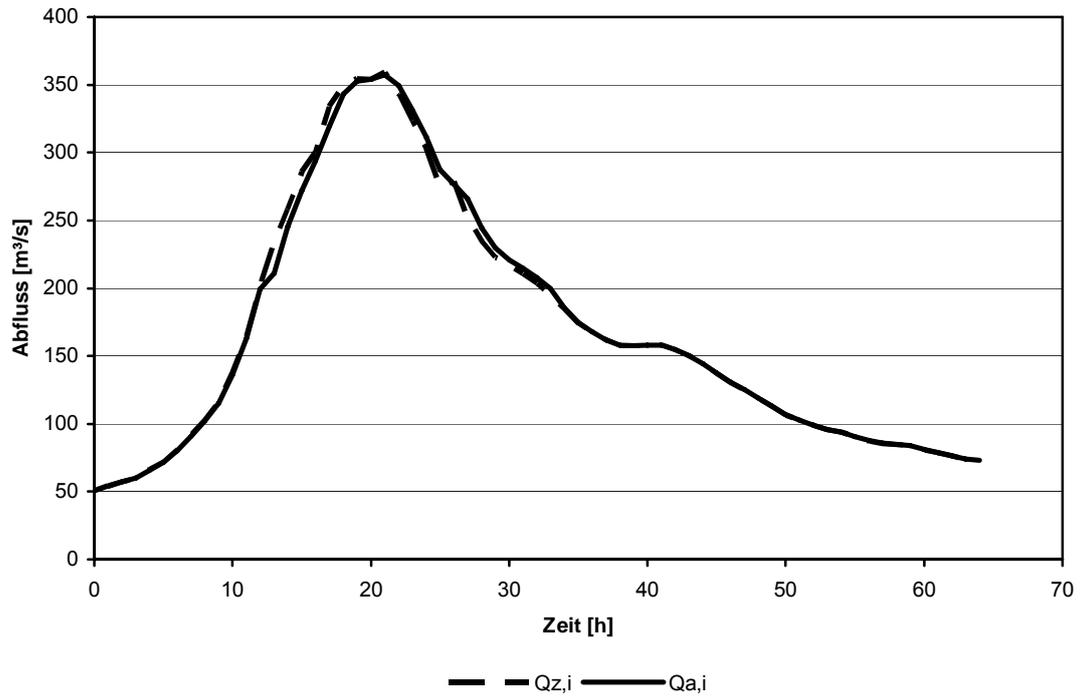
**Anlage 72 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 1)**



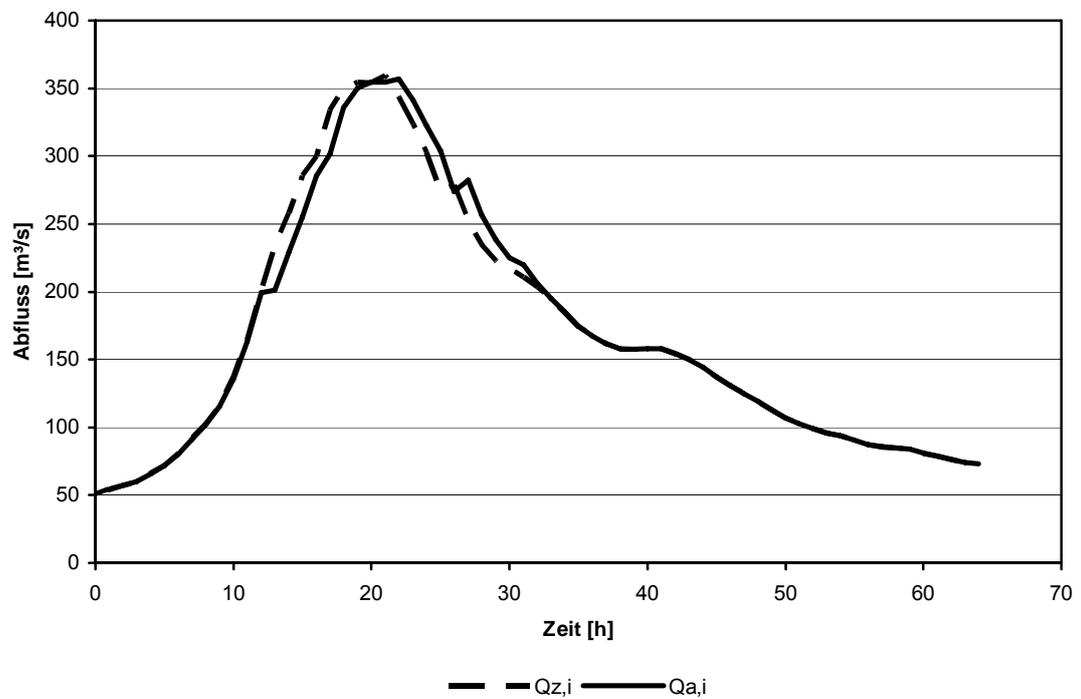
**Anlage 73 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 2)**



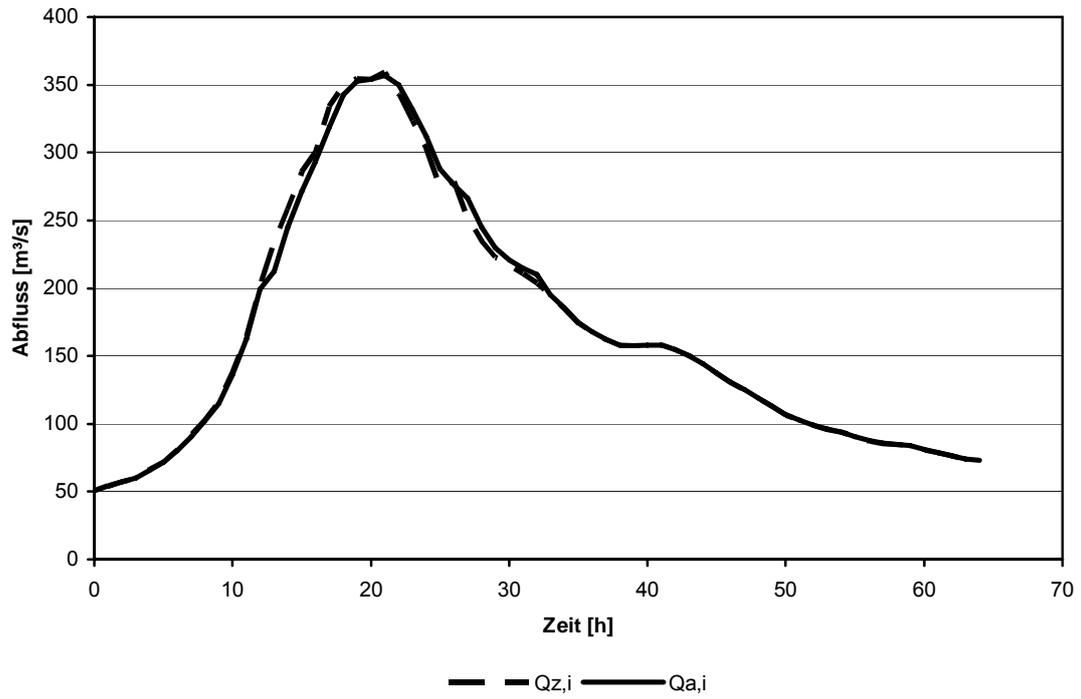
**Anlage 74 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 3)**



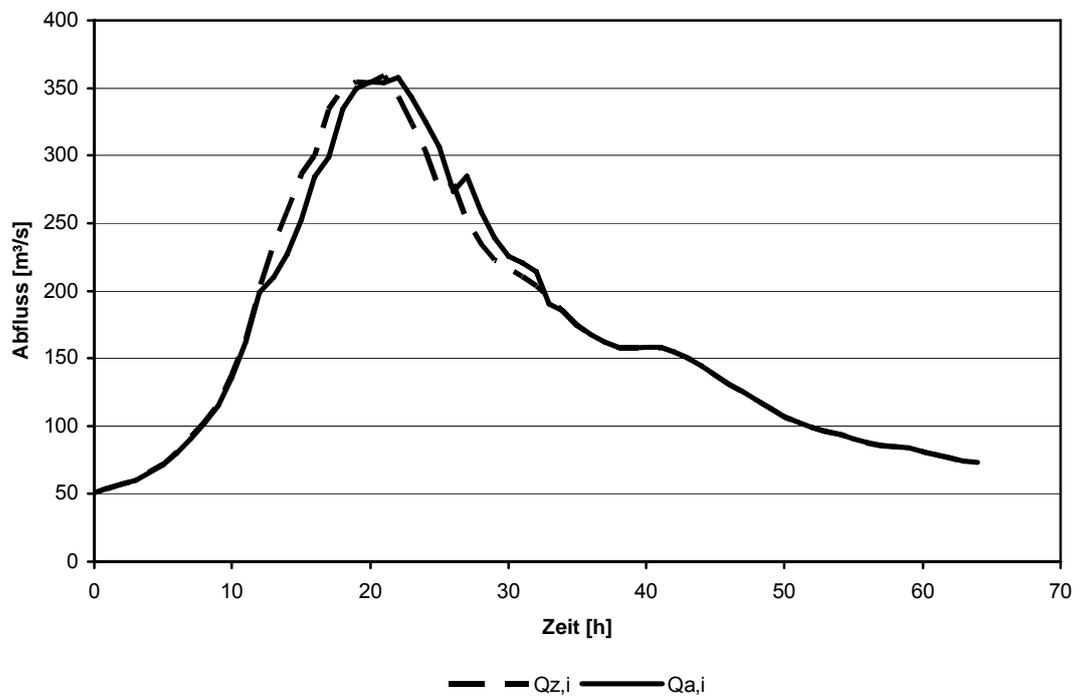
**Anlage 75 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 4)**



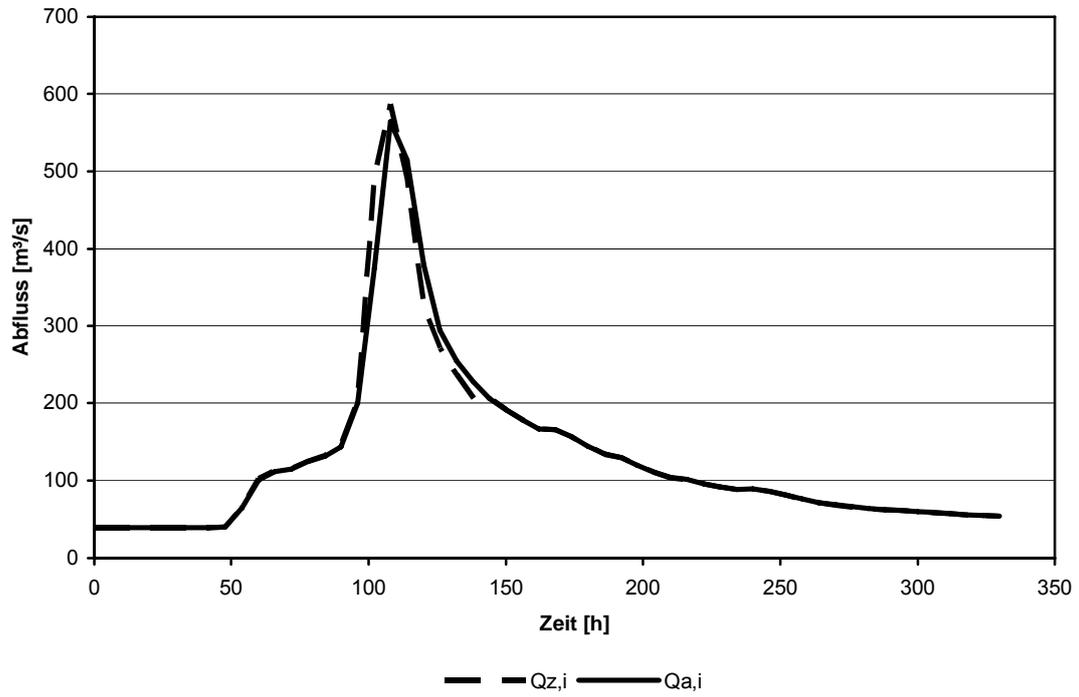
**Anlage 76 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 5)**



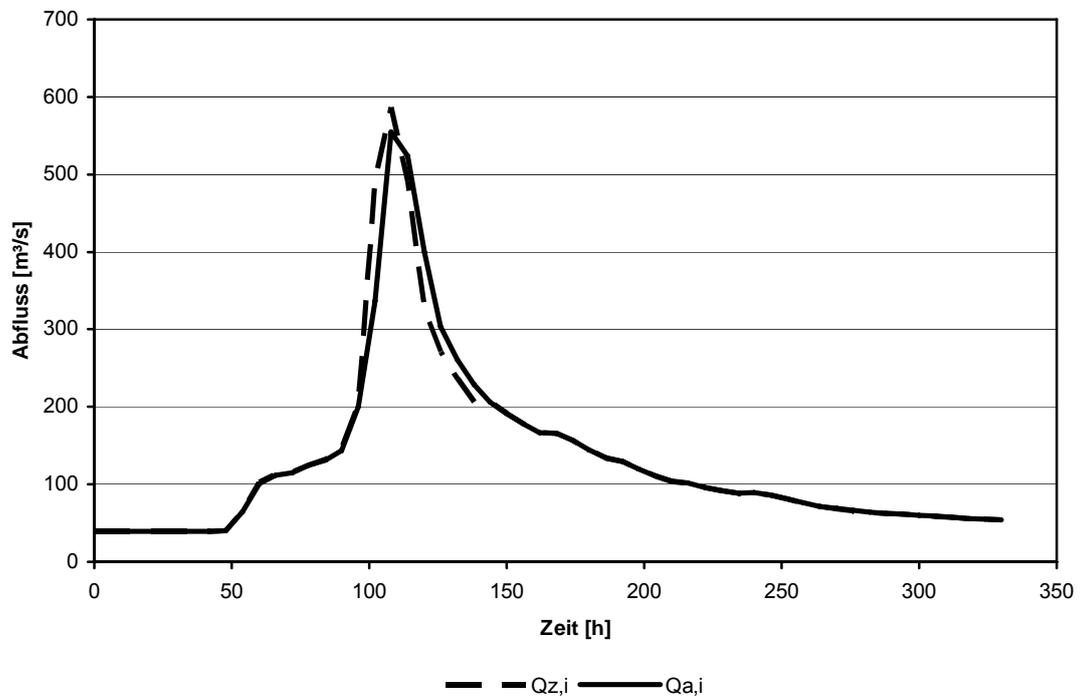
**Anlage 77 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis März 1981 / Variante 6)**



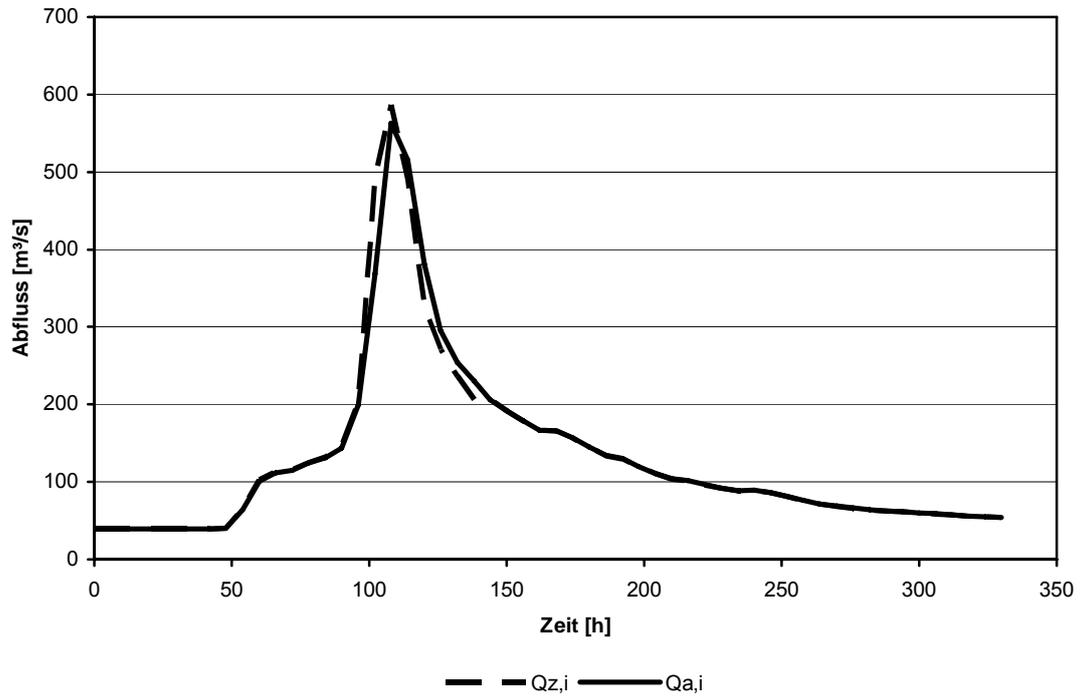
**Anlage 78 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 1)**



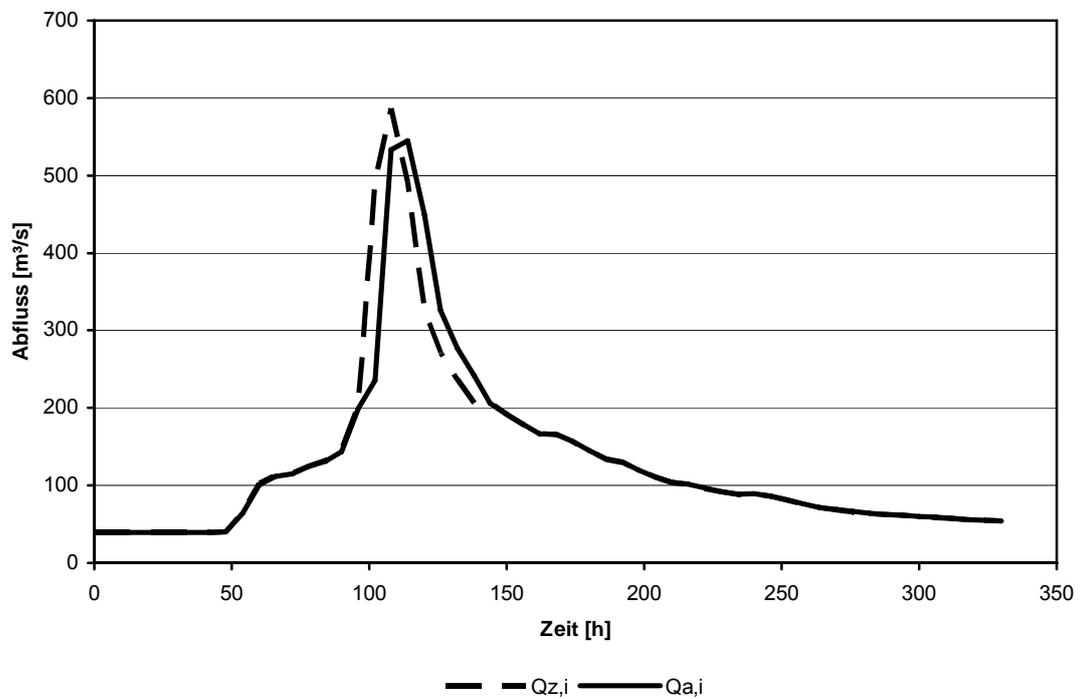
**Anlage 79 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 2)**



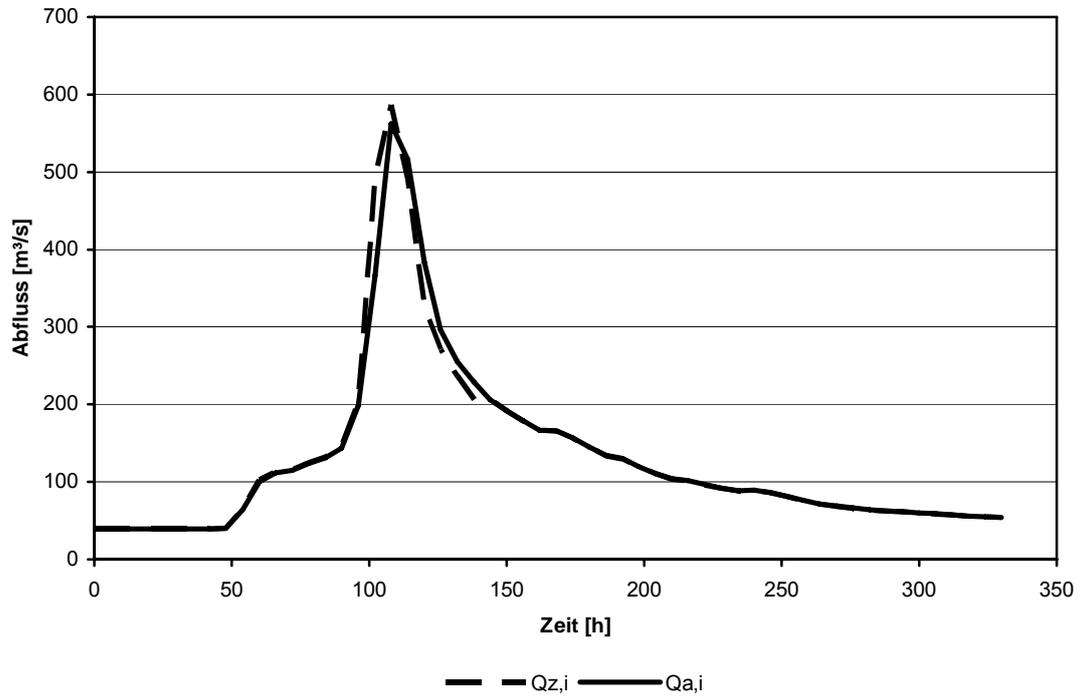
**Anlage 80 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 3)**



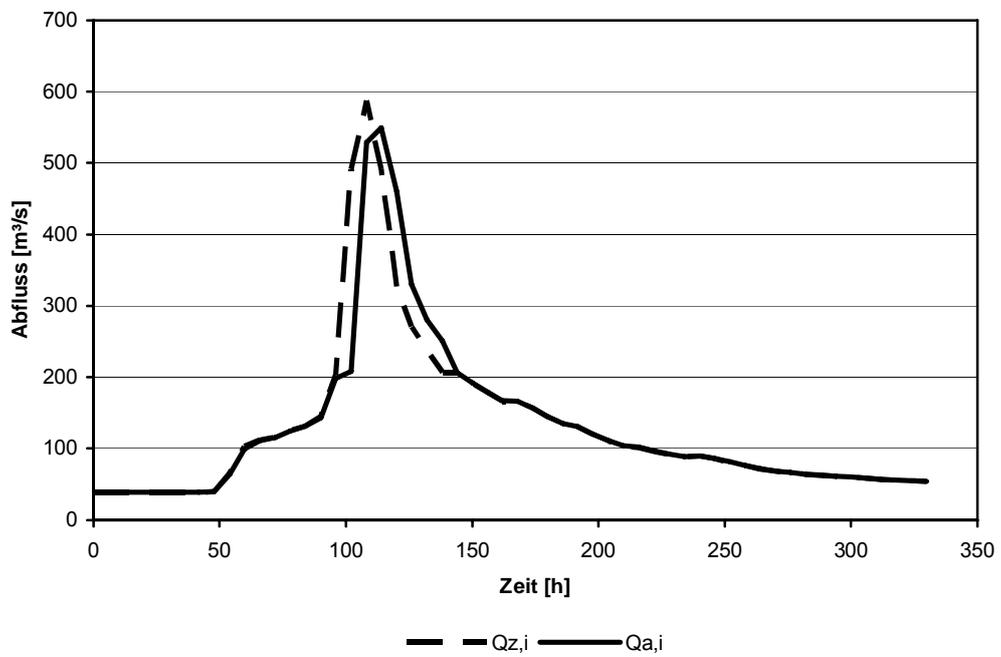
**Anlage 81 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 4)**



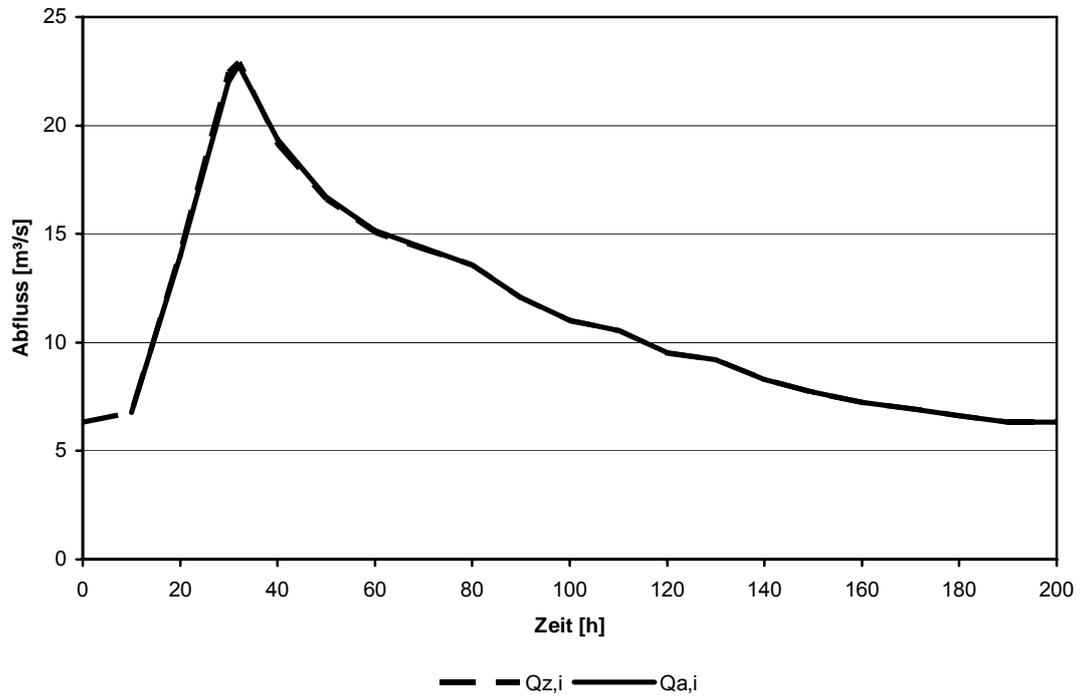
**Anlage 82 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 5)**



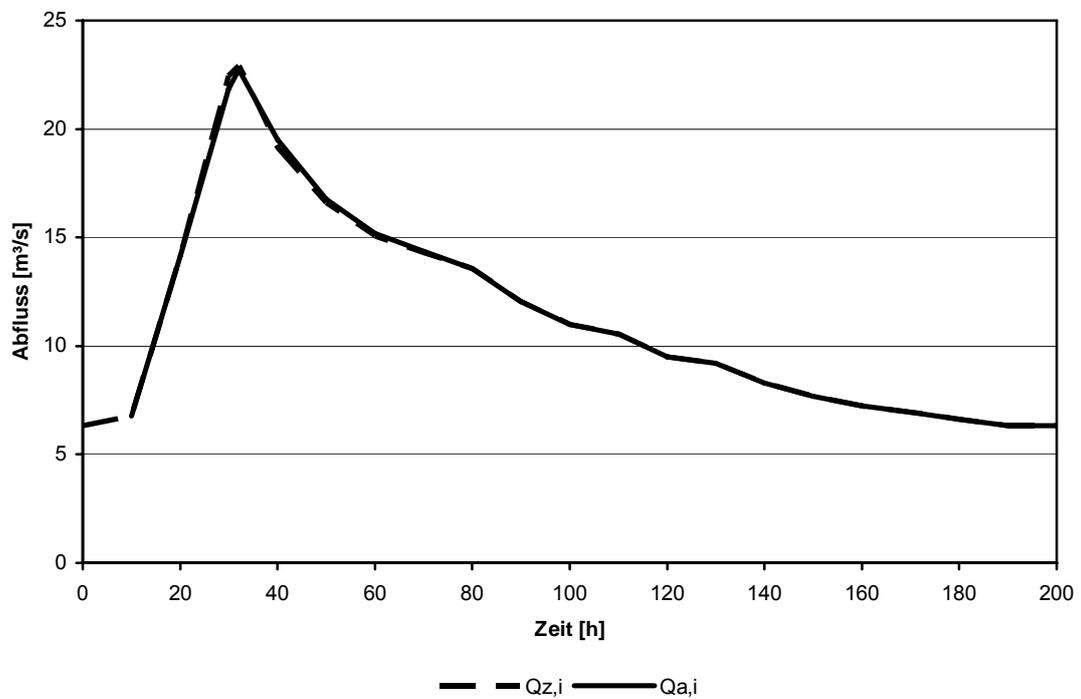
**Anlage 83 Retentionswirkung an der Leine (Ereignis Juni 1981 / Variante 6)**



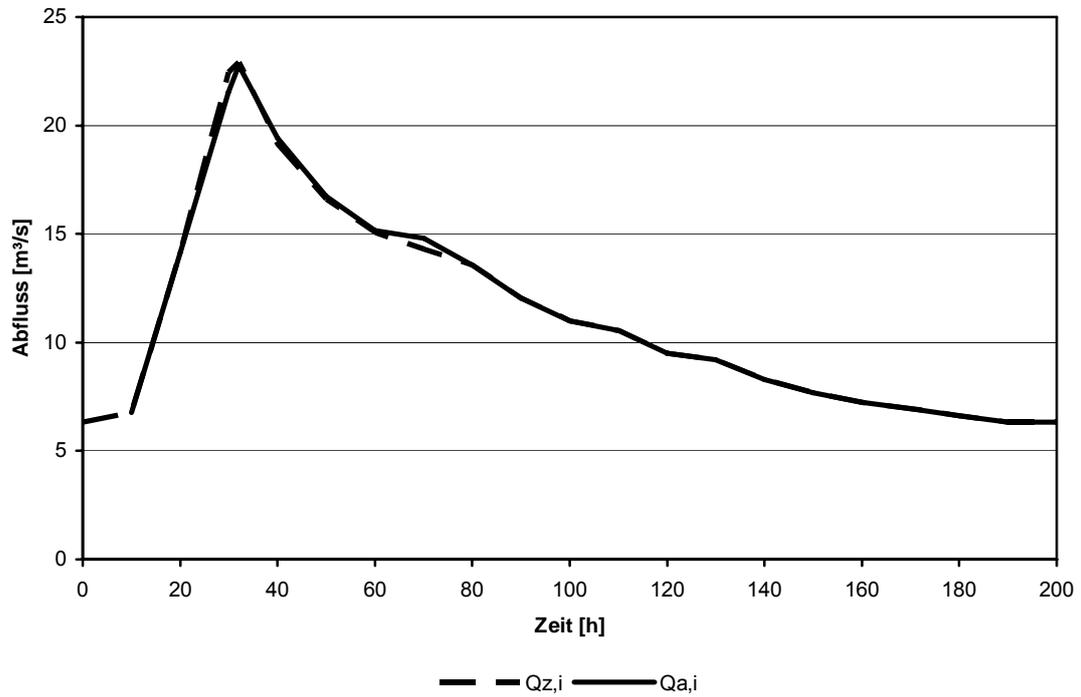
**Anlage 84 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 1)**



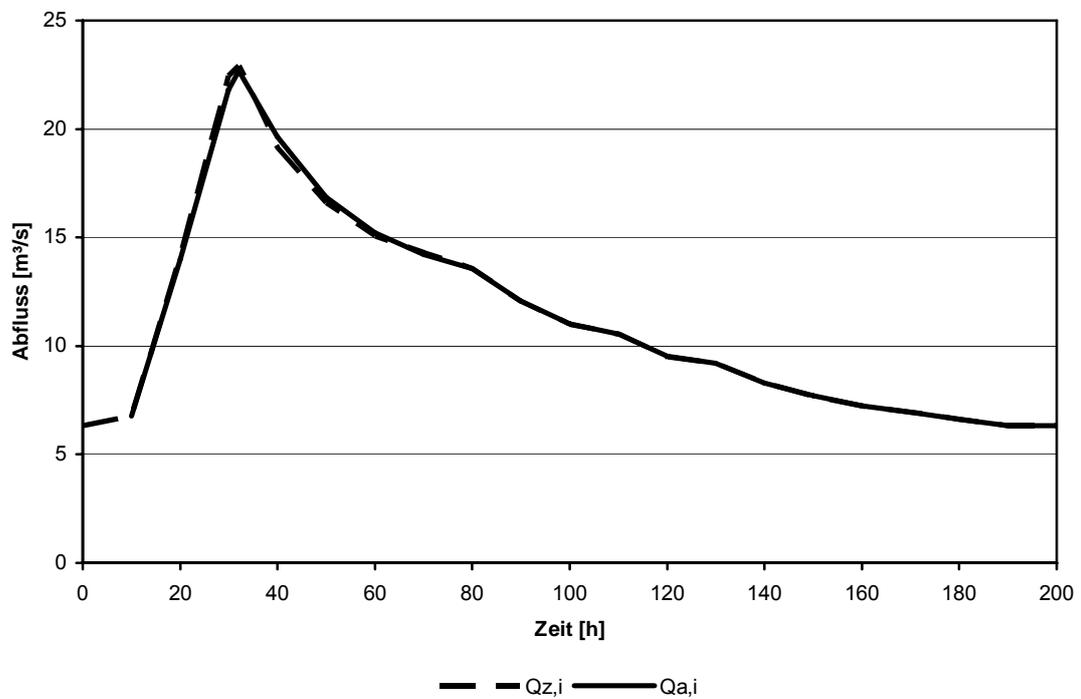
**Anlage 85 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 4)**



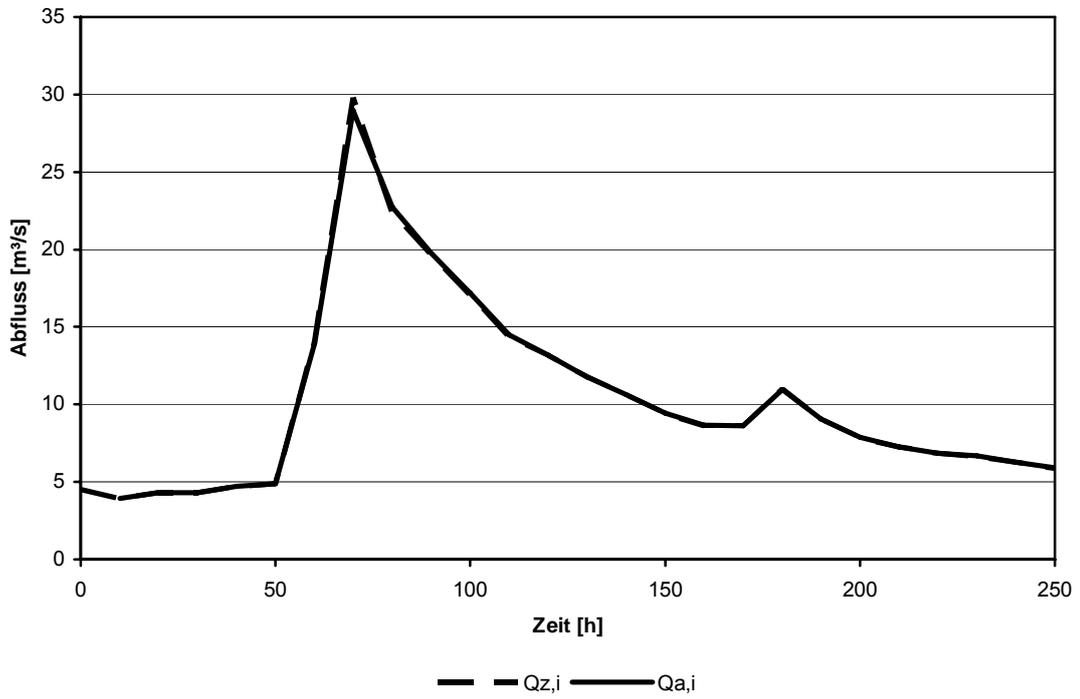
**Anlage 86 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 5)**



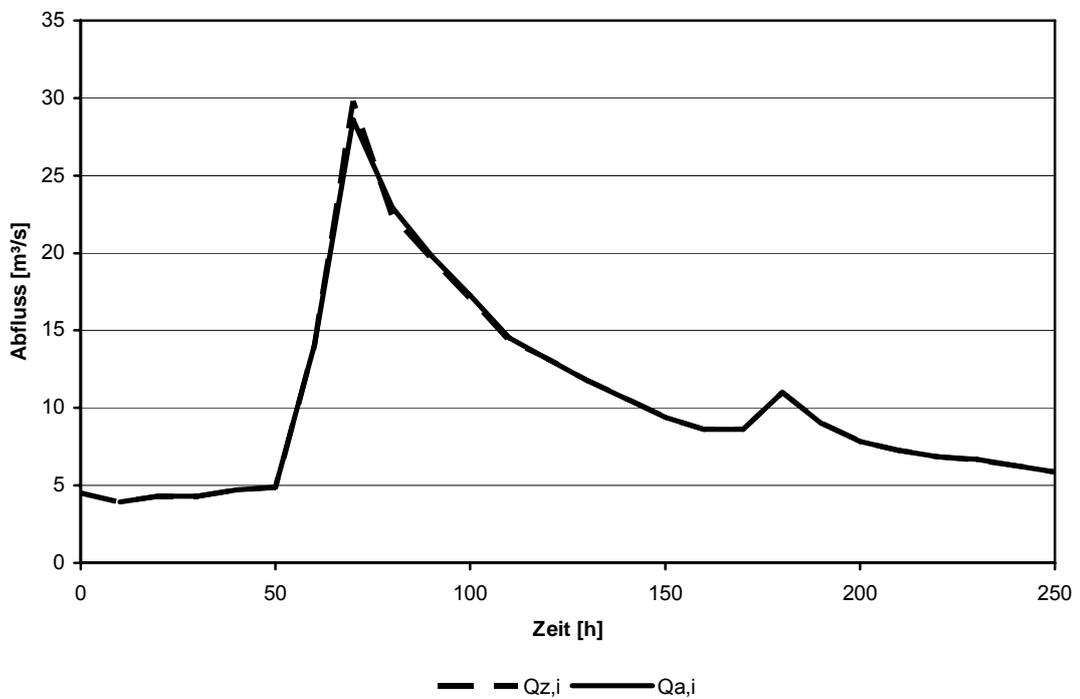
**Anlage 87 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1981 / Variante 6)**



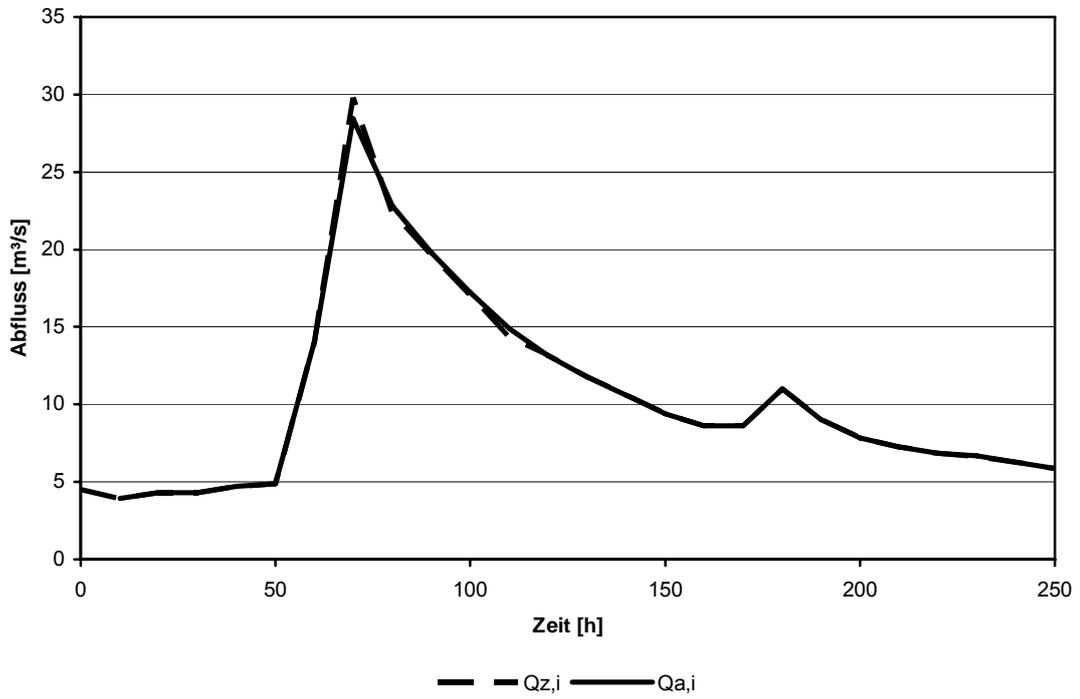
**Anlage 88 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 1)**



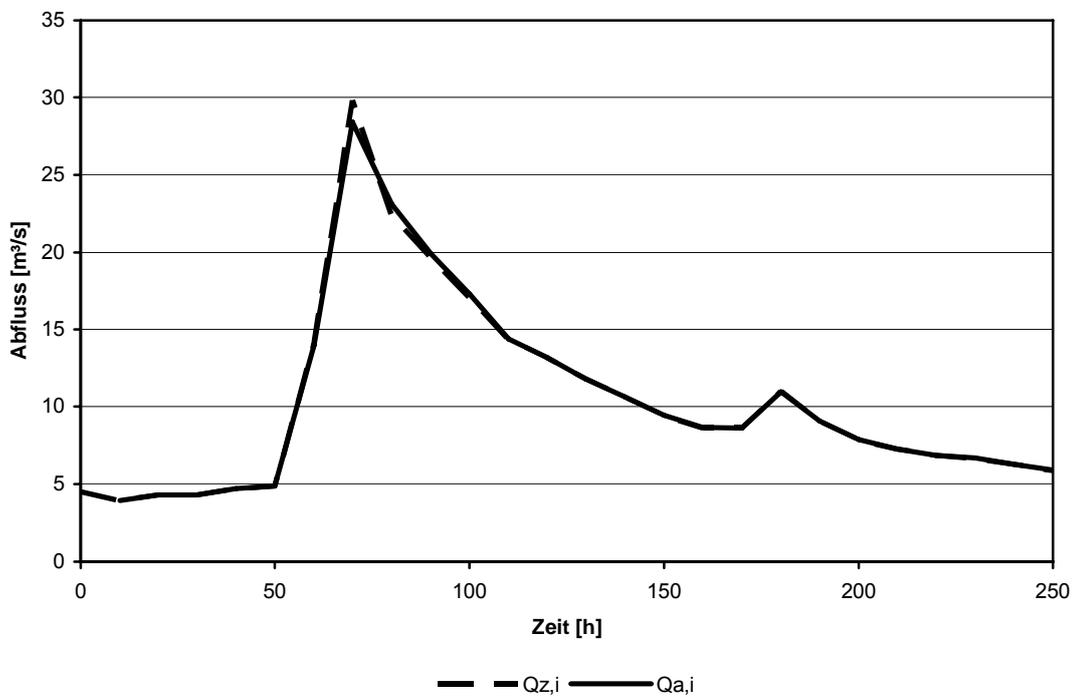
**Anlage 89 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 4)**



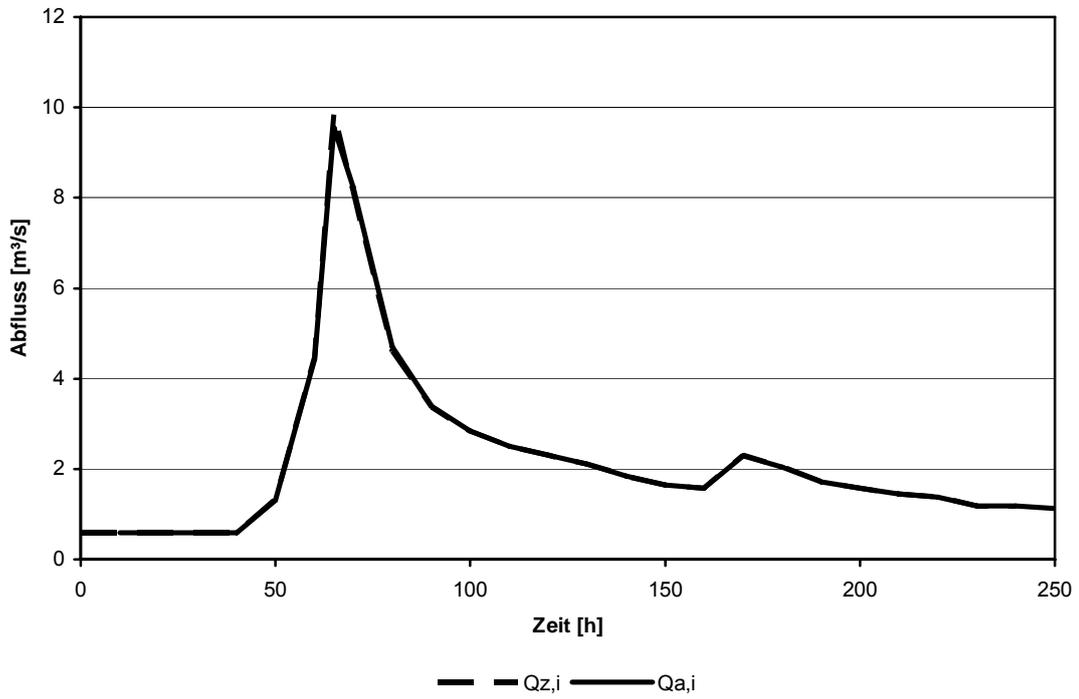
**Anlage 90 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 5)**



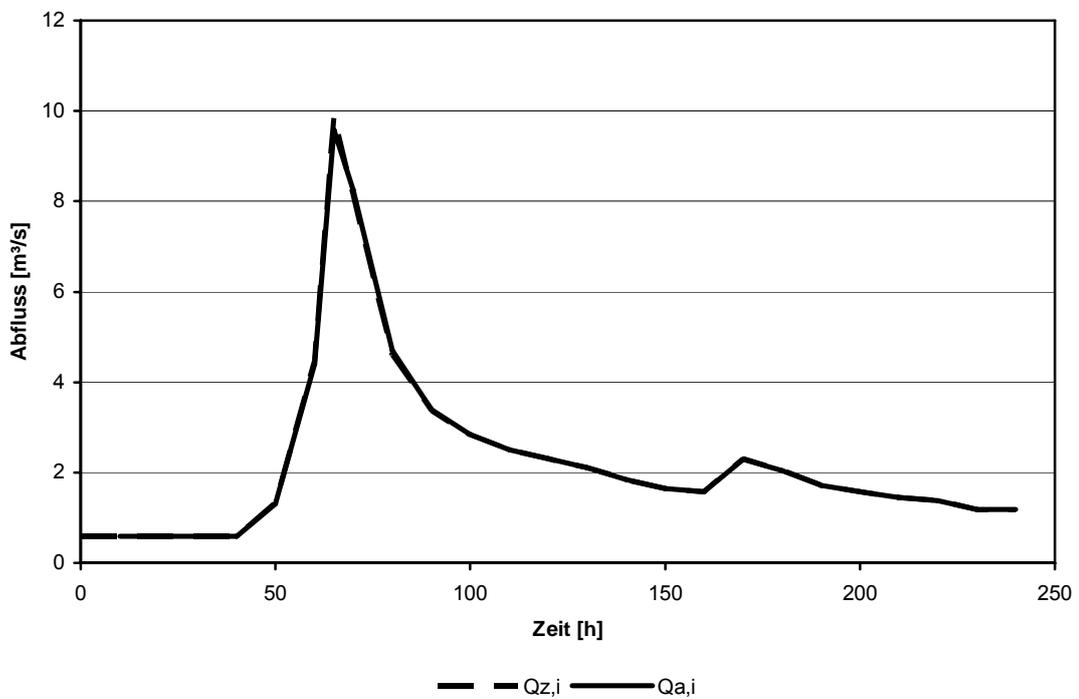
**Anlage 91 Retentionswirkung an der Ilme (Ereignis Dezember 1988 / Variante 6)**



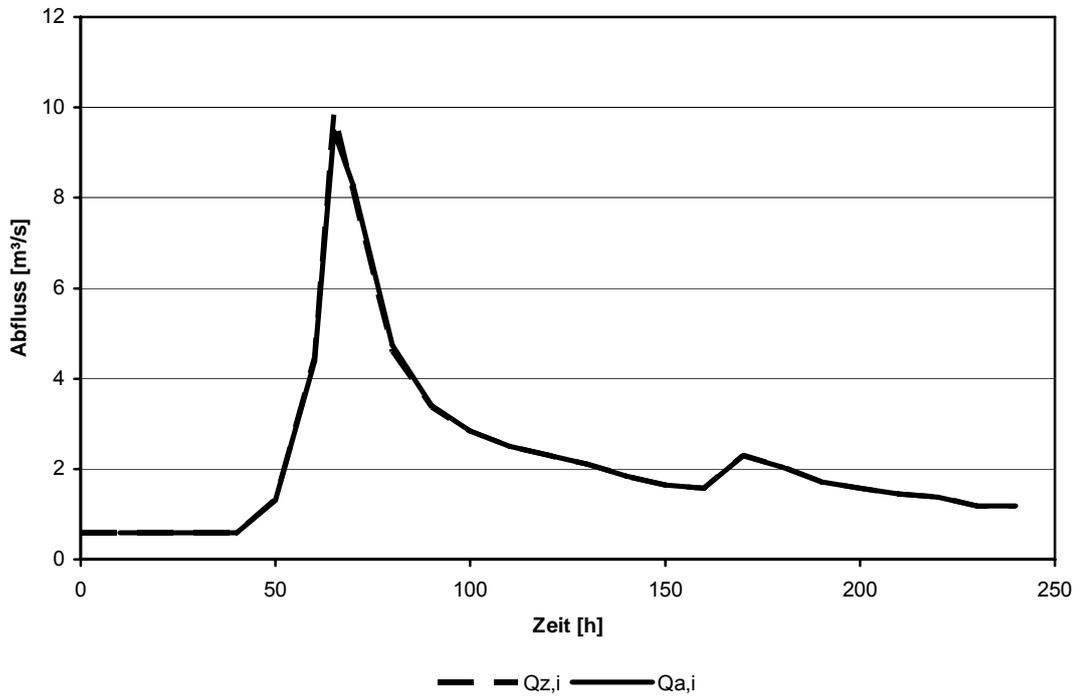
**Anlage 92 Retentionswirkung an der Bewer (Ereignis Dezember 1988 / Variante 1)**



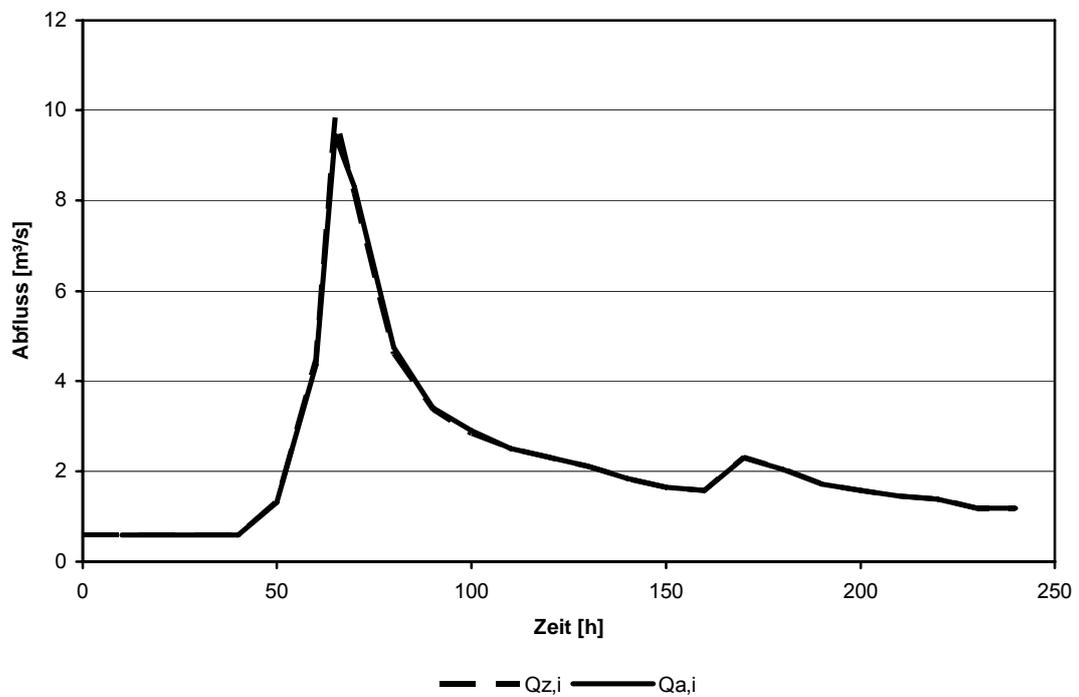
**Anlage 93 Retentionswirkung an der Bewer (Ereignis Dezember 1988 / Variante 4)**



**Anlage 94 Retentionswirkung an der Bewer (Ereignis Dezember 1988 / Variante 5)**



**Anlage 95 Retentionswirkung an der Bewer (Ereignis Dezember 1988 / Variante 6)**



## **Wissenschaftlicher Werdegang**

Name	Claudia Hellberg, geb. Bergholz
Geburtsdatum	17.10.1973
Geburtsort	Otterndorf
Familienstand	verheiratet seit 09.12.2005
Schulbildung	1980 – 1984 Grundschule Ihlienworth 1984 – 1986 Orientierungsstufe Otterndorf 1986 – 1993 Gymnasium Otterndorf
Ausbildung	1993 – 1995 Bauzeichnerin beim Wasser- und Schifffahrtsamt, Cuxhaven
Auslandsaufenthalt	1995 – 1996 Teilnahme am Parlamentarischen Patenschaftsprogramm des Deutschen Bundestages und Amerikanischen Kongresses (Collegebesuch und Arbeitserfahrung als Zeichnerin bei E-One, Ocala, Florida, USA)
Studium	1996 – 2002 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Hannover Diplomprüfung: 19.02.2002
Berufstätigkeit	15.03.2002 – 31.06.2006 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover (01.01.2004 – 31.10.2005: 50% Stelle) 01.01.2004 – 31.10.2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin beim Weiterbildenden Studium Wasser und Umwelt der Universität Hannover (50% Stelle)