



Empfehlungen zum Bau von  
Sohlgleiten in Schleswig-Holstein

Herausgeber:

Landesamt für Natur und Umwelt  
des Landes Schleswig-Holstein  
Hamburger Chaussee 25  
24220 Flintbek  
Tel.: 0 43 47 / 704-0  
www.lanu-sh.de

Ansprechpartner:

Dr. Matthias Brunke, Tel.: 0 43 47 / 704-473  
Dr. Thomas Hirschhäuser, Tel.: 0 43 47 / 704-486

Titelfotos (Fotoautor):

Oben: Das Flussneunauge - eine der relevanten  
Zielarten, die in durchgängigen Fließgewässern ihre  
Laichgebiete erreichen kann (Frank Hecker)  
Unten links: ein Absturz, der von wandernden Arten,  
wie Flussneunauge und Schnäpel, nicht überwunden  
werden kann; Unten rechts: Beispiel einer gut  
gelungenen Sohlgleite in geschütteter Bauweise

Fotos: wenn nicht anders angegeben,  
Fotoautor Dr. M. Brunke

Layout und Druck:

Brandt Offset, Gleschendorf

Juli 2005

ISBN: 3-937937-00-5

Schriftenreihe: LANU SH – Gewässer; D 21

Zitiervorschlag:

Brunke, M., Hirschhäuser, T. (2005):  
Empfehlungen zum Bau von Sohlgleiten in  
Schleswig-Holstein. Landesamt für Natur  
und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein.

Diese Broschüre wurde auf  
Recyclingpapier hergestellt.

Diese Druckschrift wird im Rahmen der  
Öffentlichkeitsarbeit der schleswig-  
holsteinischen Landesregierung heraus-  
gegeben. Sie darf weder von Parteien  
noch von Personen, die Wahlwerbung  
oder Wahlhilfe betreiben, im Wahl-  
kampf zum Zwecke der Wahlwerbung  
verwendet werden. Auch ohne zeit-  
lichen Bezug zu einer bevorstehenden  
Wahl darf die Druckschrift nicht in einer  
Weise verwendet werden, die als Partei-  
nahme der Landesregierung zu Gunsten  
einzelner Gruppen verstanden werden  
könnte. Den Parteien ist es gestattet,  
die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer  
eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Landesregierung im Internet:

[www.landesregierung.schleswig-holstein.de](http://www.landesregierung.schleswig-holstein.de)

# Inhalt

Vorwort .....	5
Symbolverzeichnis .....	7
<b>A</b> Biologische Anforderungen an Sohlgleiten .....	8
A.1   Die Motivation: Herstellung der longitudinalen Durchgängigkeit für wirbellose Wassertiere und Fische .....	8
A.2   Zielarten für die Bemessung .....	14
A.3   Kritische Faktoren bei Sohlgleiten aus biologischer Sicht .....	14
A.4   Empfehlungen zu hydrologischen und morphologischen Grenzwerten aus faunistischer Sicht.....	17
A.5   Empfehlungen für die Bauweise .....	18
A.6   Schematische Darstellung einer Sohlgleite .....	22
<b>B</b> Hydrologische Bemessungsparameter für Schleswig-Holstein.....	25
B.1   Abflusspenden.....	25
B.1.1   Mittlere Niedrigwasserspende (MNq) .....	27
B.1.2   Mittelwasserspende (Mq) .....	28
B.1.3   Abflusspende $330q$ .....	28
B.2   Mittlere Fließgeschwindigkeiten $v_m$ .....	28
B.3   Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Fließquerschnitts .....	29
B.4   Natürliche Gewässerbreite nach Regimetheorie.....	31
<b>C</b> Hydraulische Bemessung von Sohlgleiten.....	32
C.1   Geschüttete Bauweise .....	32
C.1.1   Bemessung von Störsteinen .....	32
C.1.2   Umsetzung der Bemessung von Störsteinen für die Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse .....	34
C.1.3   Nachweis der Stabilität des Sohlsubstrats .....	36
C.1.4   Umsetzung der gestalterischen Vorgaben.....	37
C.2   Riegelbauweise .....	39
C.2.1   Bemessung der Lückenbreiten .....	39
C.2.2   Umsetzung der Bemessung der Lückenbreiten für die Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse .....	40
C.2.3   Nachweis der Stabilität des Sohlsubstrats .....	42
<b>D</b> Erfolgskontrollen.....	43
D.1   Biologische Erfolgskontrollen .....	43
D.2   Hydraulische Erfolgskontrollen .....	43

E	Zusammenfassung .....	44
E.1	Anforderungen an die Funktion und Bauweise von Sohlgleiten.....	44
E.2	Sohlgleiten in geschütteter Bauweise.....	44
E.3	Sohlgleiten in Riegelbauweise.....	45
	Zitierte Literatur .....	46

# Vorwort

## Durchgängigkeit in Fließgewässern und die EG-Wasserrahmenrichtlinie

Die Herstellung der Durchgängigkeit wird von der EG-Wasserrahmenrichtlinie gefordert und ist ein wesentlicher Schritt, die Gewässer in einen guten Zustand zu überführen. Die hohe Anzahl an Absturzbauwerken, insbesondere im Östlichen Hügelland und der Geest (Abbildung 1), hat einen flächendeckenden Effekt auf die Durchgängigkeit der Gewässer in Schleswig-Holstein (HIRSCHHAUSER 2003).

Absturzbauwerke fragmentieren Fließgewässer in ihrem Lauf von der Quelle zur Mündung, da schon kleinere Abstürze als Wanderhindernisse wirken können (OVIDO & PHILIPPARD 2002, JUNGWIRTH et al. 2003). Ganz allgemein bedroht die Fragmentierung von Fließgewässern die aquatische Biodiversität (ZWICK 1992, WARD 1998). Der Ersatz von Absturzbauwerken durch Sohlgleiten stellt einen Lösungsweg dar, die Durchgängigkeit

von Fließgewässern wiederherzustellen (HÜTTE 2000, BRUNKE 2003).

Die Funktion von Sohlgleiten liegt so grundsätzlich in der Herstellung der Durchwanderbarkeit des Gewässers in beide Fließrichtungen für alle Wassertiere. Die morphologischen und hydraulischen Gegebenheiten in den Sohlgleiten müssen daher den Anforderungen der Fauna gerecht werden.

## Inhalte der Empfehlungen

Die Empfehlung konzentriert sich auf die naturwissenschaftlichen Anforderungen und technische Gestaltung von Sohlgleiten. Ausgehend von den hydromorphologischen Ansprüchen der aquatischen Fauna und den hydrologischen und landschaftlichen Gegebenheiten in Schleswig-Holstein werden die Parameter formuliert, die beim Bau von Sohlgleiten beachtet werden müssen.

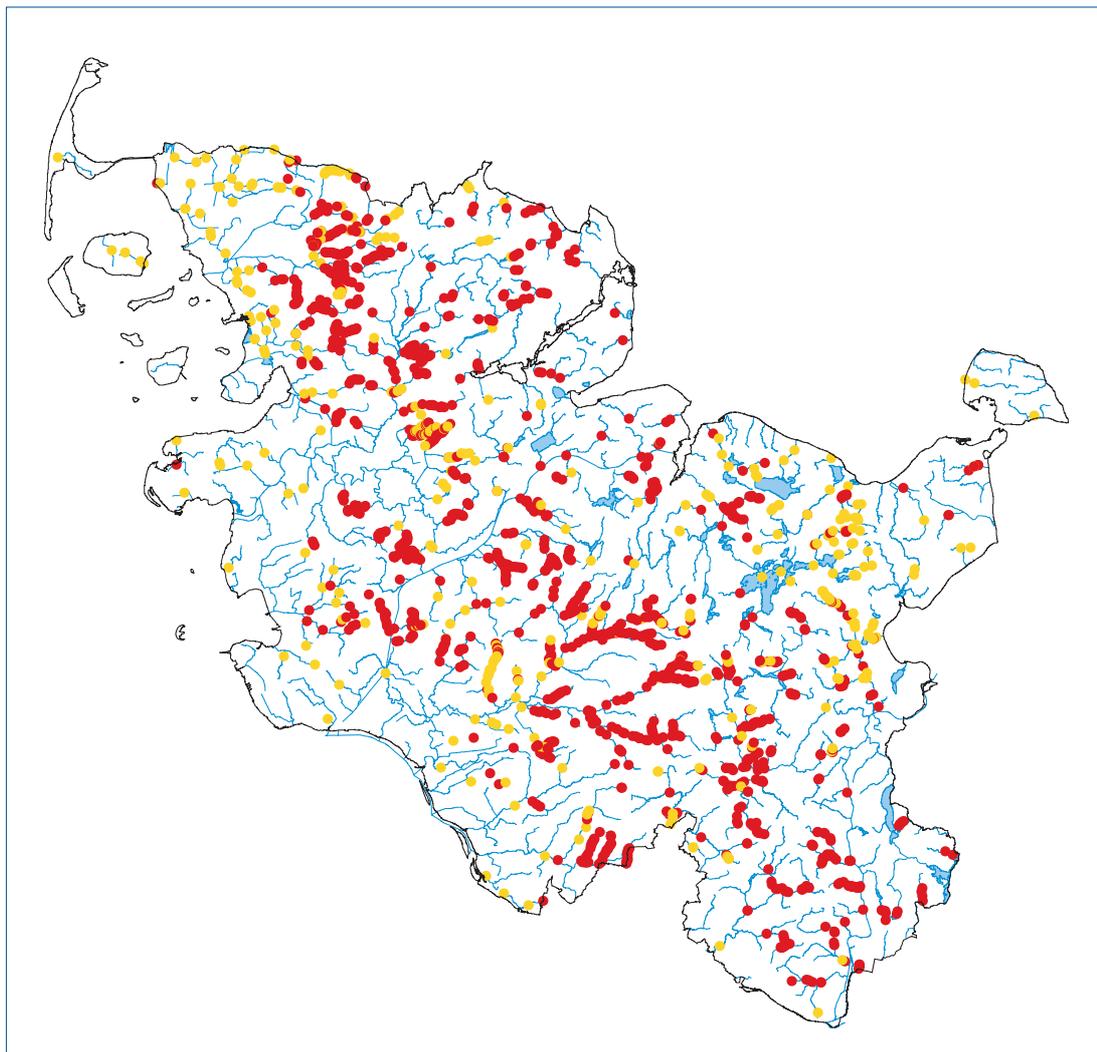


Abbildung 1:  
Lage von Sohlenbauwerken (rot) und Stauanlagen (gelb) in Schleswig-Holstein

Abhängig von Einzugsgebietsgröße und Naturraum werden planungstechnische Empfehlungen für das Gefälle, die einzuhaltende mittlere Fließgeschwindigkeit, Mindestwassertiefen, Höhen von Bodenschwellen und der darüber stehenden Wassersäule, der Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser, Abmessungen von Störsteinen sowie der zulässigen Störsteinfläche in einem Querschnitt gegeben.

### **Die Ziele der Empfehlungen**

Die vorliegenden Empfehlungen des Landesamtes für Natur und Umwelt sollen die Umsetzung von Maßnahmen in der Praxis unterstützen. Die Entwicklung der Empfehlungen wurde von einem Arbeitskreis 'Sohlgleiten' mit Vertretern aus Behörden und Planungsbüros begleitet. Der Entwurf der Empfehlungen wurde zudem in mehreren Tagungen und Workshops einer breiten Fachöffentlichkeit vorgestellt. Im Rahmen dieses Prozesses konnten wertvolle Anregungen und Stellungnahmen in die Empfehlungen eingearbeitet werden.

Bei der Herstellung der Durchgängigkeit muss es das Ziel sein, dass Großteile der Populationen von Fischen sowie der nicht-fliegenden wirbellosen Tieren die Sohlgleiten auch überwinden können. Die vorliegenden Empfehlungen sind nach dieser Vorgabe ausgelegt und sollen dieses Ziel für die Gewässer von Schleswig-Holstein sicherstellen. In diesem Sinne sind die hier aufgeführten Bemessungsparameter zu beachten. Bei der konkreten Planung von Sohlgleiten sind die speziellen Verhältnisse und Randbedingungen zu berücksichtigen. Dabei kann von den hier vorliegenden generellen Empfehlungen aus fachlichen, rechtlichen und wirtschaftlichen Gründen abgewichen werden.

### **Die Empfehlungen in der Praxis**

Im Vorfeld zur Planung von Sohlgleiten sind verschiedene fachliche Fragen zu klären, um zu prüfen, ob ein solche Maßnahme sinnvoll ist. Im Einzelfall ist zunächst zu prüfen, ob ein vorhandenes Querbauwerk mit vertretbarem Aufwand ersatzlos entfernt werden kann oder das Gewässer mit einer Laufverlängerung restauriert werden kann und eigendynamische Prozesse zugelassen werden können.

Es ist auch zu klären, welche Qualität die Gewässerstruktur insbesondere in den bachaufwärts gelegenen Abschnitten und zufließenden Gewässern hat. Diese Gewässerberei-

che sollten als Lebensraum zukünftig geeignet sein und auch Laichplätze für Fische anbieten. Es ist auch zu prüfen, ob alternative Lösungen möglich sind, bei denen ein Wanderhindernis entfernt, aber nicht durch ein neues Bauwerk ersetzt wird. Dies kann beispielsweise in kleinen Oberläufen sehr kostengünstig verwirklicht werden (LAUNHARDT & MUTZ 2003).

Im Detail muss bei Abweichungen von den Empfehlungen geprüft werden, inwieweit veränderte Parameter und Werte die ökologische Effizienz einer geplanten Sohlgleite beeinträchtigen, um über den Sinn einer möglichen Anlage zu entscheiden. Bei deutlichen Abweichungen sollte die jährliche mittlere Abflussganglinie des Fließgewässers herangezogen werden, um zu beurteilen, an wie vielen Tagen im Jahr für welche Zielarten eine Durchwanderbarkeit voraussichtlich nicht gegeben ist. Grundlage hierfür sind die ingenieurtechnischen Berechnungen der in der vorliegenden Empfehlung genannten relevanten Parameter. Die Planungen von Einzelvorhaben und insbesondere die Tolerierung von Abweichungen von den Empfehlungen sollten im Vorwege zwischen den zuständigen Behörden und dem Planer abgestimmt werden.

Die Empfehlungen werden weiterentwickelt, sobald aus realisierten Projekten genügend Erfahrungen mit der Planung, der fachrechtlichen, verwaltungstechnischen und bautechnischen Umsetzung sowie der Evaluierung der ökologischen Effizienz vorliegen.

### **Danksagung**

Die Entwicklung der vorliegenden Empfehlungen wurde von einem Arbeitskreis bestehend aus Dr. Hans Otto Boysen (AIR Kiel, Abt. Fischerei), Ulrike Conrad (StUA Schleswig), Werner Meier (StUA Kiel), Wolfgang Nolte (d+p danekamp und partner), Dr. Kurt Soeffing (Stadt Bad Oldesloe), Friedhelm Voss (LANU) und Doris Wolf (StUA Itzehoe) unterstützt. Wir danken herzlich den Mitgliedern des Arbeitskreises für ihre engagierte und konstruktive Mitarbeit. Weiterhin wirkten in unterschiedlicher Weise folgende Kollegen und Interessierte an der inhaltlichen Fertigstellung der Empfehlungen mit, ihnen sei herzlich gedankt (in alphabetischer Reihenfolge): Uwe Ahrens (LANU), Dr. Roland Lemcke (AIR Kiel, Abt. Fischerei), Dr. Johannes Oelerich (LANU), Stefan Greuner-Pönicke (BBS), Stefan Reese (Ingenieurbüro Klütz & Kollegen Itzehoe GmbH), Siegfried Spratte (LSFV), Sven Wollesen (Ingenieurbüro Wollesen), Dr. Karin Wolter (LANU).

# Symbolverzeichnis

A	Profilquerschnitt [m <sup>2</sup> ]
A <sub>E0</sub>	Oberirdisches Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]
A <sub>s</sub>	angeströmte Fläche der Störsteine [m <sup>2</sup> ]
a <sub>x</sub>	mittlerer Abstand der Störsteine in Fließrichtung [m]
a <sub>y</sub>	mittlerer Abstand der Störsteine quer zur Fließrichtung [m]
b	Gewässerbreite [m]
b <sub>Q</sub>	Gewässerbreite bei Abfluss Q [m]
b <sub>reg</sub>	Gewässerbreite nach Regimetheorie [m]
b <sub>s</sub>	Durchflussbreiten in Lücken [m]
c <sub>w</sub>	Formwiderstandsbeiwert [-]
d <sub>i</sub>	Korndurchmesser bei i% Siebdurchgang
d <sub>krit</sub>	minimaler Korndurchmesser [m]
d <sub>m</sub>	mittlerer Korndurchmesser des Sohlsedimentes [m]
d <sub>s</sub>	mittlerer Durchmesser der Störsteine [m]
EZG	Einzugsgebiet
g	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
h	Wassertiefe [m]
h <sub>Absturz</sub>	Absturzhöhe [m]
h <sub>Kolk</sub>	Kolktiefe [m]
h <sub>Q</sub>	Wassertiefe beim Abfluss Q
HQ	Hochwasserabfluss [m <sup>3</sup> /s]
h <sub>ü</sub>	Überfallhöhe [m]
HQ <sub>1</sub>	einjähriger Hochwasserabfluss [m <sup>3</sup> /s]
I	Gefälle [-]
k <sub>s</sub>	äquivalente Sandrauheit [m]
l <sub>u</sub>	benetzter Umfang [m]
MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss [m <sup>3</sup> /s]
MNQ	mittlerer Niedrigwasserabfluss [m <sup>3</sup> /s]
MQ	Mittelwasserabfluss [m <sup>3</sup> /s]
<u>330</u> Q	Abfluss, der an 330 Tagen im Jahr unterschritten wird [m <sup>3</sup> /s]
q <sub>vorh</sub>	vorhandener spezifischer Abfluss [m <sup>3</sup> /(m*s)]
q <sub>zul</sub>	zulässiger spezifischer Abfluss [m <sup>3</sup> /(m*s)]
r <sub>hy</sub>	hydraulischer Radius [m]
v <sub>m</sub>	mittlere Geschwindigkeit [m/s]
v <sub>max</sub>	maximale Geschwindigkeit [m/s]
Δh	Wasserspiegeldifferenz [m]
λ <sub>ges</sub>	Gesamtwiderstandsbeiwert [-]
λ <sub>0</sub>	Widerstandsbeiwert der Sohle [-]
λ <sub>s</sub>	Widerstandsbeiwert der Störsteine [-]
μ	Überfallbeiwert [-]
ρ <sub>s</sub>	Dichte der Steine [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>w</sub>	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
σ	Abminderungsbeiwert [-]

# A Biologische Anforderungen an Sohlgleiten

## A.1 Die Motivation: Herstellung der longitudinalen Durchgängigkeit für wirbellose Wassertiere und Fische

Wanderungen von Fischen finden über lange Distanzen (makroskalig) zwischen dem Einzugsgebiet des Binnengewässers und dem Meer sowie über mittlere Distanzen (mesoskalig) zwischen Abschnitten innerhalb eines Gewässersystems statt (Abbildung A1).

Anadrome Langdistanzwanderfische (Flussneunauge, Meerneunauge, Stör, Meerforelle, Lachs, Schnäpel (Foto 1)) wandern zur Laichablage aus dem Meer in die Fließgewässer ein und danach wieder in die Küstenmeere. Katadrome Wanderfische (Flunder, Aal (Foto 2)) wandern ins Meer zur Laichablage. Die Wanderzeiten unterscheiden sich zwischen den Arten und Lebensstadien (Tabelle A1). Potamodrome Fische wechseln ihre Standorte innerhalb des Gewässersystems, u. a. um verschiedene Habitate aufzusuchen (wie Laichhabitate, Winterhabitate, Nahrungshabitate) oder um Besiedlungsdichten auszugleichen (SCHLOSSER & ANGERMEIER 1995). Nahezu alle einheimischen Fischarten, die Fließgewässer bewohnen, zählen zur potamodromen Gruppe und führen artspezifisch mehr oder weniger ausgedehnte Wanderungen durch (WAGNER & LEMCKE 2003).

Die wirbellosen Wassertiere (Makrozoobenthos) zeigen zumeist eine substratspezifische Besiedlung (BRUNKE et al. 2002), d.h. es werden je nach Art ganz bestimmte Sohl- und Sedimentstrukturen bevorzugt. Dennoch befinden sie sich in einer ständigen Umverteilung durch die Drift (Transport von Tieren mit der fließenden Welle) und durch Wanderungen bzw. Schwimmbewegungen entlang der Sohle. Die Ursachen für die Ortsveränderungen liegen in Fluchtreaktionen, in der Nahrungssuche, dem Aufsuchen neuer Habitate, der Regulation der Besiedlungsdichte, der Verpuppung und dem Schlüpfen. Die Ortsveränderungen des Makrozoobenthos sind wichtig für die Ausbreitung und Stabilität der Populationen (HILDREW & TOWNSEND 1994).

Insgesamt betrachtet sind Wandermöglichkeiten für das Vorkommen von allen aquatischen Tierarten wichtig (Box 1), so dass die Durchgängigkeit auch für alle zu gewährleisten ist (BRUNKE 2003). Für ihre Wanderungen nutzen die Tiere je nach Art das Freiwasser, die Sohle und auch das Lückensystem unter der Sohle (BRUNKE & GONSER 1997, REUSCH et al. 1995).

Die Funktion von Sohlgleiten besteht so grundsätzlich darin, die longitudinale Durch-

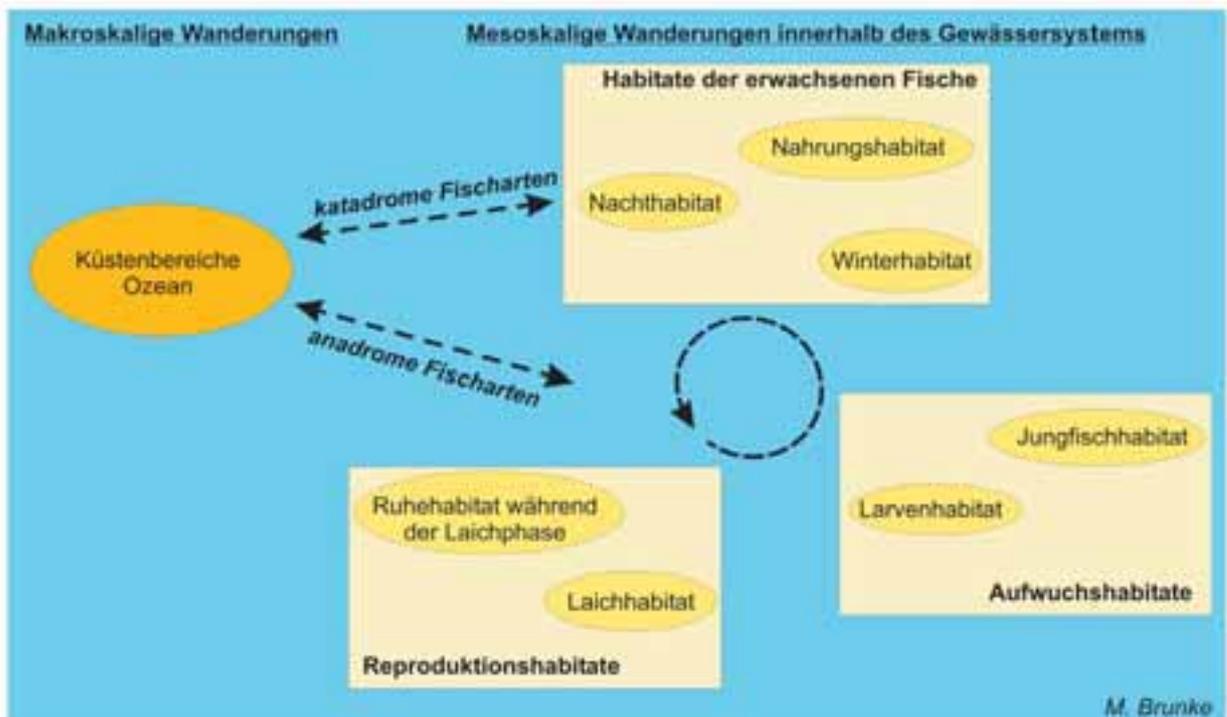


Abbildung A1: Schematische Darstellung der Wanderungen von Fischen während ihres Lebenszyklus zwischen ihren verschiedenen Habitaten.



Foto 1: Der anadrome Schnäpel laicht von November bis Dezember über schnell überströmten kiesigen Sohlstrukturen in den Mittelläufen von Fließgewässern. Die Fischlarven schlüpfen im Februar und halten sich bis zum Mai in ruhigen Überschwemmungsgebieten des Fließgewässers auf. Sie erreichen dabei eine Größe von etwa 4 cm und wandern dann ins Meer ab. Als erwachsene Tiere wandern sie im Herbst in das Fließgewässer zur Laichablage auf. (Foto: F. Hecker)



Foto 2: In seinem komplexen Lebenszyklus durchwandert der katadrome Aal die verschiedensten Gewässer. Als "Blankaal" verlässt er als geschlechtsreifes Tier die Fließgewässer und Seen und schwimmt zur Fortpflanzung in den Atlantik (Sargasso See). Die Larven werden mit den Meeresströmungen an die Küstenbereiche verfrachtet, wandeln sich dort in die so genannten "Glasale" um, wandern danach die Fließgewässer hoch („Steigaal“) und leben für 4 bis 10 Jahre im Süßwasser ("Gelbaal"). (Foto: F. Hecker)

Tabelle A1. Wander- und Laichzeiten von anadromen und katadromen Wanderfischarten nach SPRATTE & HARTMANN (1998), MAITLAND (2000), HARTMANN (2002) und BÖTTGER (2003). Anadrom: zur Laichablage vom Meer in den Oberlauf der Fließgewässer wandernd. Katadrom: zur Laichablage vom Oberlauf der Fließgewässer ins Meer wandernd.

Art	Wanderverhalten	Wanderzeiten	Laichzeiten
Flussneunauge	anadrom	September bis November (Aufstieg) Juli bis September (Abstieg)	März bis Mai
Meerneunauge	anadrom	März bis Juni	Mai bis Juli
Gemeiner Stör	anadrom	April bis Juni	Juni bis August
Finte	anadrom	April	Juni bis Juli
Maifisch	anadrom	zeitiges Frühjahr	Mai bis Juni
Meerforelle	anadrom	Aufstieg: August bis November Smoltabstieg: April-Mai	November bis März
Lachs	anadrom	Aufstieg: August bis November Smoltabstieg: April-Mai	November bis Januar
Schnäpel	anadrom	Herbst	November bis Dezember
Stint	anadrom	Februar/März	März/April
Aal	katadrom	Blankaalabwanderung: August bis November; Glasaalaufstieg: Frühjahr	Frühjahr bis Frühsommer
Flunder	katadrom	Winter (Laichwanderung/Abwanderung) und Sommer (Aufstieg)	Januar bis April

gängigkeit für alle Wassertiere herzustellen. Sohlgleiten ersetzen künstliche Wanderhindernisse, wie Abstürze und Wehre (Foto 3a, b, c), an Orten, an denen andere, raumgreifende Maßnahmen nicht umsetzbar sind. Unter bestimmten Umständen kann es auch sinnvoll sein, Sohlgleiten als Ersatzhabitats zu konstruieren, so zum Beispiel als Laichgebiete für kieslaichende Fische zwischen aneinander folgenden, gestauten Flussabschnitten.

Bei einer Priorisierung von Vorhaben verdienen die geschützten Fischarten der Roten Liste des Landes Schleswig-Holstein eine besondere Beachtung (NEUMANN 2002). So führt die

‘Referenzliste der Gefährdungsursachen’ von Tieren und Pflanzen der Empfehlungen der Bund-Länder-Arbeitskreise des Bundesamtes für Naturschutz (BfN Bonn) Staustufen und Querbauwerke für Meldungen nach der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) der EG an. In dem Kontext weist deswegen auch die ‘Referenzliste der Erhaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen’ des Bundesamtes auf die Entfernung von Barrieren und Querbauwerken bei Maßnahmen an Gewässern hin. Aus naturschutzrechtlicher Sicht jedoch ergeben sich planerisch eine Reihe von Aspekten, die bei der Anlage von Sohlgleiten berücksichtigt werden müssen (Box 2).

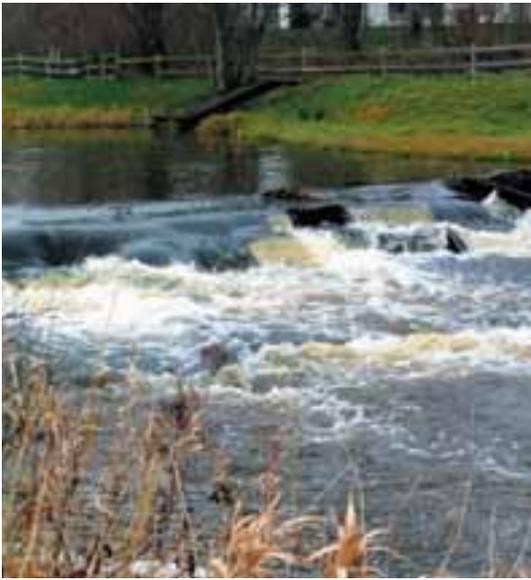


Foto 3a: Querbauwerke unterbrechen die longitudinale Durchgängigkeit der Gewässer für viele Fischarten und wirbellose Tierarten aufgrund starker Turbulenzen und Wasserspiegeldifferenzen sowie einer Unterbrechung der Sedimentschicht.



Foto 3b: Dasselbe massive Querbauwerk wie bei Foto 3a stellt ein Wanderhindernis für das Flussneunauge sowie für alle Fischarten, außer den Lachsartigen (Salmoniden) dar.

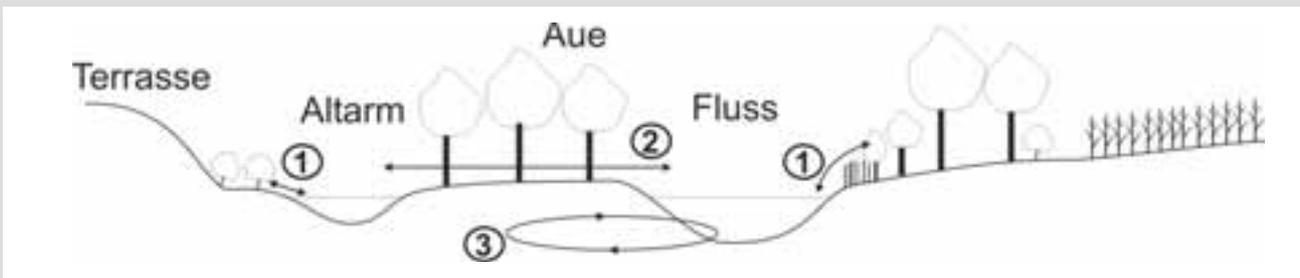


Foto 3c: Verschiedene Arten von Querbauwerken sind auch in kleineren Fließgewässern angelegt und unterbrechen die longitudinale Durchgängigkeit.

Die Durchgängigkeit von Fließgewässern ist auf drei räumlichen Ebenen zu betrachten: **longitudinal** innerhalb eines Gewässers und seinen Zuflüssen, **lateral** zwischen dem Gewässer und dem Ufer sowie den Auen (Abbildung 1) und **vertikal** zwischen dem Oberflächenwasser und dem anliegenden Grundwasser (Abbildung 2).

Ein prominenter Aspekt der **longitudinalen Durchgängigkeit** sind die Wanderungen von Fischen. Diese Wanderungen werden ausgeführt, um Standorte mit guten Laich- und Nahrungsbedingungen zu erreichen, aber auch um ruhige Orte für den Winteraufenthalt aufzusuchen. Für die Bestände fast aller heimischen Fischarten sind diese Wanderungen von sehr großer Wichtigkeit. Wanderungsbarrieren, wie zum Beispiel Wehre, können das Erreichen der Laichstandorte verhindern und damit auch die Vermehrung der betroffenen Fische unterdrücken. Fließgewässer werden auch als Korridore in der Landschaft von Vögeln und Säugetieren, zum Beispiel dem Fischotter, genutzt. Die longitudinale Durchgängigkeit umfasst aber noch weitere Aspekte der Fließgewässer. Hierzu gehört natürlich auch der Wasser- und Sedimenttransport, der auf verschiedenste Art durch Bauwerke sowie die Wasser- und Landnutzung verändert werden kann.

Die **laterale Durchgängigkeit** ist ebenfalls durch verschiedene Aspekte gekennzeichnet (WARD et al. 1998). Viele Insekten verbringen den ersten Teil ihres Lebenszyklus im Wasser. Nach dem Schlüpfen schwärmen sie als erwachsene Tiere zur Partnerfindung in die Umgebung des Gewässers aus und orientieren sich dabei je nach Art an verschiedenen Formen der Ufer- und Auenv egetation. Hydrologisch wird diese Durchgängigkeit durch Überschwemmungen charakterisiert, wenn der Fluss sich in seinem Hochwasserbett befindet. Auch diese Zeiten werden von Fischen genutzt, so laichen Hechte insbesondere auf den überschwemmten Uferbereichen ab. Ein weiteres Beispiel liefert die Quappe (Foto 4), deren Larven auf der überschwemmten Aue und in den Auengewässern leben (BUNZEL-DRÜKE et al. 2004).



Box 1 - Abbildung 1: Laterale Durchgängigkeit: schematischer Querschnitt durch ein Fließgewässer mit seinem Ufer und Aue sowie einem verbundenen Altarm. Die Pfeile symbolisieren die Wanderungen von Tieren und den hydrologischen Austausch: 1. Wanderungen zwischen dem Gewässer und seinem Ufer; 2. Wanderungen zwischen dem Gewässer und seinen Auen und Auengewässern; 3. Austausch mit dem seitlichen Grundwasser.

Die **vertikale Durchgängigkeit** findet für das menschliche Auge verborgen statt, trotzdem ist sie für den ökologischen Zustand eines Fließgewässers sehr wichtig. Das Vorkommen sehr vieler Kleintiere in einem Gewässer hängt davon ab, ob sie tief in die Sedimente der Sohle einwandern können. Dies gilt ebenso für die Entwicklung des Laichs und der Larven von Forellen, die diese Phase ihres Lebens tief in den Bachsedimenten verbringen. Die vertikale Durchgängigkeit wird durch eine exzessive Anhäufung von Feinsedimenten verhindert, durch die das Bachbett verstopft wird (BRUNKE 2001). Dies unterbindet die Nachlieferung von Sauerstoff, auf den die Tiere angewiesen sind.



Box 1 - Abbildung 2: Vertikale Durchgängigkeit: schematischer Querschnitt durch ein Fließgewässer mit den Bachsedimenten. Die Pfeile symbolisieren den Austausch zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser in den Bachsedimenten.

Naturnahe Fließgewässer sind in einem hohen Maße mit ihrer Umgebung verbunden, so dass der gute ökologische Zustand erheblich von der Unversehrtheit der Durchgängigkeit in allen drei räumlichen Dimensionen bestimmt wird (AMOROS et al. 1987). Neben diesen drei räumlichen Dimensionen ist auch noch die zeitliche Dimension zu betrachten (WARD 1989). Insbesondere durch tägliche, saisonale und jährliche Schwankungen des Abflusses unterliegen Fließgewässerökosysteme einer hohen zeitlichen Variabilität in der Hydro- und Morphodynamik. Die aquatische Fauna und Flora ist an die gewässertypischen dynamischen Lebensraumbedingungen angepasst und benötigt sogar solche Regime. Die Eigendynamik der Fließgewässer (**Prozesse**) schafft diverse Habitatstrukturen (**Formen**), die sich in dem wechselnden Mosaik an Sohlsubstraten und variablen Breiten- und Tiefenverhältnissen und in einer bewegten Laufentwicklung widerspiegeln.



Foto 4: Die potamodrome Quappe benötigt vernetzte Lebensräume (Ober-, Mittel- und Unterlauf, Auengewässer, Seen), um ihren Lebenszyklus zu vollziehen. (Foto: F. Hecker)

Box 2: Hinweise zu naturschutzrechtlichen Aspekten bei der Anlage von Sohlgleiten

#### **Natura 2000 (Flora-Fauna-Habitat (FFH) -Richtlinie, EU-Vogelschutzrichtlinie)**

Soweit eine Sohlgleite innerhalb eines oder in unmittelbarer Nähe zu einem Natura 2000 Gebiet nach FFH-Richtlinie oder Vogelschutzrichtlinie geplant wird und dabei eine erhebliche Beeinträchtigung maßgeblicher Gebietsbestandteile (Lebensraumtypen und Arten gem. Anhänge I und II der FFH-Richtlinie und Anhang I der Vogelschutzrichtlinie) nicht ohne weiteres ausgeschlossen werden kann, ist zunächst in Form einer Abschätzung (Vorprüfung) zu klären, ob mit der Maßnahme erhebliche Beeinträchtigungen des Gebietes in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen möglich sind. Sofern im Rahmen dieses Prüfschrittes erhebliche Beeinträchtigungen nicht ausgeschlossen werden können, hat eine FFH Verträglichkeitsprüfung zu erfolgen. Die FFH-Richtlinie listet im Anhang II u. a. Fischarten von „gemeinschaftlichem Interesse“ auf, für deren Erhaltung besondere Schutzgebiete ausgewiesen werden müssen. Die für Schleswig-Holstein modifizierte Liste führt hier Bachneunauge, Flussneunauge, Meerneunauge, Stör, Maifisch, Finte, Lachs, Nordseeschnäpel, Rapfen, Bitterling, Schlammpeitzger, Steinbeißer und Groppe auf. Diese Arten sind vorrangig zu fördern und zu schützen.

Hier können Sohlgleiten hilfreich sein, wobei dann ggf. eine FFH Verträglichkeitsprüfung entbehrlich sein kann. Dies muss im Einzelfall mit der für das Gebietsmanagement zuständigen Naturschutzbehörde abgestimmt werden.

### Naturschutzgebiet

Viele Naturschutzgebiete sind gleichzeitig für das Netz „Natura 2000“ gemeldet. Unabhängig davon ist beim Bau einer Sohlgleite innerhalb eines Naturschutzgebietes die Verordnung des jeweiligen Naturschutzgebietes zu beachten.

### Eingriffsregelung

Wenn durch den Bau einer Sohlgleite die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigt werden, stellt dies einen Eingriff in Natur und Landschaft gemäß §§ 7 – 9 Landesnaturschutzgesetz (LNatSchG) dar. Die Maßnahme bedarf in dem Fall einer Genehmigung durch die zuständige Naturschutzbehörde. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf die geschützten Biotope gemäß § 15 a LNatSchG hingewiesen. Falls im §15a LNatSchG aufgeführte Biotope durch den Bau einer Sohlgleite beeinträchtigt werden, ist eine Ausnahmegenehmigung der unteren Naturschutzbehörde erforderlich. Auf „streng geschützte Arten“ gem. § 10 Abs. 2 Nr. 11 Bundesnaturschutzgesetz, deren Beeinträchtigung einen Tatbestand für die Eingriffsregelung erfüllt, ist zu achten. Die fortgeltenden Artenschutzbestimmungen nach § 42 ff BNatSchG für die Brut-, Nist-, Wohn- und Zufluchtstätten geschützter Arten sind ebenfalls zu beachten.



Foto 5: Die Elritze ist eine strömungsliebende Kleinfischart, die in morphologisch intakten, sommerkalten Bächen und kleinen Flüssen lebt.  
(Foto: F. Hecker)

### A.2 Zielarten für die Bemessung

Für die Erstellung von Bemessungsparametern werden die Ansprüche von Langdistanzwanderfischarten (s. o.), Kleinfischarten (wie Elritze (Foto 5), Bachschmerle, Schlammpeitzger, Steinbeißer, Groppe, Gründling) und beim Makrozoobenthos (Foto 6) insbesondere Arten mit nicht-flugfähigen Lebensstadien (z. B. Wasserschnecken (Foto 7), Bachflohkrebse) herangezogen. Das Spektrum dieser Gruppen soll sicherstellen, dass entsprechend der abgeleiteten Bemessungsparameter für alle Tierarten hinreichende Bedingungen innerhalb einer Sohlgleite herrschen, die eine Passage für den Großteil jeder Population ermöglichen.

Unter den lokalen Bedingungen können bei der konkreten Planung von Sohlgleiten nach einer genauen fischbiologischen und gewässertypologischen Prüfung auch einzelne oder spezielle Zielarten formuliert werden. Würde beispielsweise der Stör bei einer geplanten Wiedereinbürgerung als Zielart formuliert, so wären dessen spezifische Ansprüche an Wassertiefen und durchschwimmbare Breiten zu berücksichtigen.

### A.3 Kritische Faktoren bei Sohlgleiten aus biologischer Sicht

In Sohlgleiten und ober- sowie unterstrom der Gleite müssen Umweltbedingungen vorherrschen, die es den Tieren ermöglichen, diesen Gewässerabschnitt zu passieren. Diese Umweltbedingungen werden im Wesentlichen durch die Hydrologie, Hydraulik und Morphologie innerhalb sowie direkt ober- und unter-

strom der Sohlgleite charakterisiert (Abbildung A.2).

(1) Die Fließgeschwindigkeit des Wassers ist für die meisten Arten in Fließgewässern ein ganz entscheidender Umweltfaktor, so dass man vereinfacht in strömungsliebende, -meidende und -indifferente Arten unterscheiden kann. Die wirbellosen Tiere und auch ein Großteil der Fische halten sich in der Nähe bzw. auf der Sohle auf, so dass aus ökologischer Sicht die sohlennahe Fließgeschwindigkeit von größter Bedeutung ist. Diese lässt sich jedoch schlecht bei wasserbaulichen Planungen berechnen, so dass hier die mittlere Fließgeschwindigkeit herangezogen werden muss. Die mittlere Fließgeschwindigkeit wird deswegen als eine entscheidende Planungsgröße betrachtet. Sie stellt die über den Fließquerschnitt gemittelte Geschwindigkeit dar. Es wird dabei davon ausgegangen, dass eine Bandbreite verschiedener Fließgeschwindigkeiten im Querschnitt vorkommt, die den Ansprüchen von sowohl strömungsliebenden als auch strömungsmeidenden Arten entgegenkommt (siehe B.3).

Neben der mittleren Fließgeschwindigkeit sind auch deren Schwankungen bedeutsam für die Tiere, da so variable hydrodynamische Kräfte auf die Körper ausgeübt werden, die belastend sind. Fallhöhen bzw. Absturzhöhen bei Sprüngen im Sohlgefälle verursachen stärkere hydrodynamische Kräfte und Turbulenzen (zeitlich variable Strömungen in drei Dimensionen, Foto 8 und 9). Starke Turbulenzen wirken sich auch erschwerend auf die Orientierung der Fische aus und erfordern bei der Bewegung einen hohen Energieverbrauch.

Aus diesen Gründen sind strömungsberuhigte Bereiche - charakterisiert durch geringe Turbulenzen und eine geringe mittlere Fließgeschwindigkeit ( $v_m < 0,3 \text{ m/s}$ ) - wichtig für Fische, da sie sich an diesen Stellen von anstrengenden Bewegungen erholen können. Die Schwimmleistungen von Fischen sind daher sehr bedeutend für die Bemessung von Sohlgleiten.

Bei der kritischen Schwimmggeschwindigkeit von Fischen handelt es sich um die höchste Strömungsgeschwindigkeit, gegen die ein Fisch eine gewisse Zeit anschwimmen kann, ehe er abgetrieben wird. Diese Geschwindigkeit kann ein Fisch nur sehr kurze Zeit, höchstens 20 Sekunden beibehalten, im Allgemeinen jedoch nur zwischen 5 und 15 Sekunden (BLAKE 1983, in WINTER & VAN DENSEN 2001). Sie dient normalerweise der Flucht oder dem Beutefang; der Stoffwechsel ist dabei im Wesentlichen anaerob, so dass danach eine Erholungsphase benötigt wird. Bei wiederhol-



Foto 6: Die Larve der Köcherfliege *Cheumatopsyche lepidula* (Trichoptera; Insecta) ist ein Beispiel für wirbellose Tiere (Makrozoobenthos) in Fließgewässern und besiedelt dort strömende Abschnitte mit lagestabilem Substrat insbesondere in kiesgeprägten Flüssen. Sie kann in den Bereichen von Sohlgleiten vorkommen wie z.B. in der Trave.



Foto 7: Die Wasserschnecke *Bithynia tentaculata* kann in langsam fließenden Gewässerabschnitten vorkommen und ist zur Passage von Sohlgleiten auf strömungsberuhigte Bereiche angewiesen.



Foto 8: Starke Turbulenzen in dem Beckenbereich unterstrom eines durchgehenden Querriegels einer Sohlgleite in Riegelbauweise. Die Ursache liegt in einer hohen Wasserspiegeldifferenz und in dem Flaschenhalseffekt der Lücken zwischen Riegelblöcken. Die Turbulenzen verkleinern die Ruhebereiche in den Becken, erschweren die Orientierung von Fischen sowie die Passierbarkeit der Lücken.

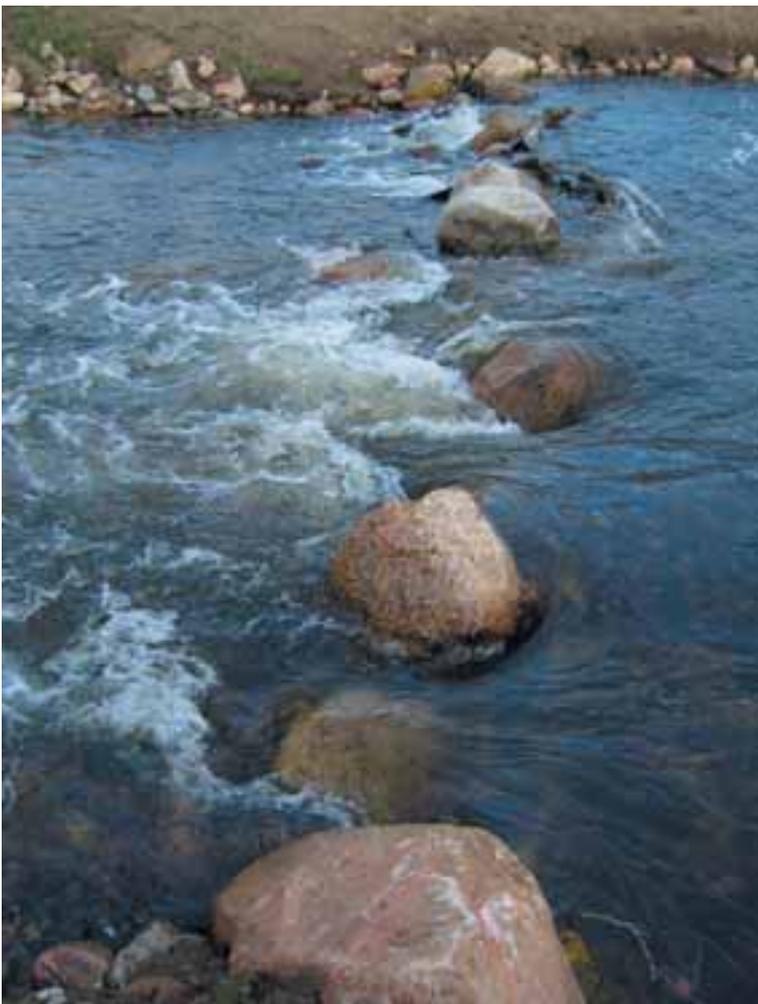


Foto 9: Durchgehender Riegel mit hoher Fließgeschwindigkeit ober- und unterstrom im gesamten Querschnitt, d.h. es fehlen strömungsberuhigte Bereiche, die auch zur Passage von weniger schwimmstarken Fischen genutzt werden können.

ten belastenden Schwimmphasen während des Aufstiegs zu Wanderzeiten kann bei unvollständiger Erholung eine zunehmende Erschöpfung des Fisches eintreten (GOWANS et al. 2003, QUINTELLA et al. 2004). In der Konsequenz reduziert sich der Anteil an Fischen, die ihr Laichgebiet erreichen, sukzessive mit den zu überwindenden Wanderhindernissen. Die kritische Schwimmgeschwindigkeit ist allerdings messtechnisch schwer zu erfassen und abhängig von der Schwimmleistung des Individuums (Kondition und Körpergröße), der Temperatur, dem Sauerstoffgehalt sowie der Wasserqualität. Für einige Fischarten liegen hierzu jedoch Messwerte vor (STAHLBERG & PECKMANN 1986, ZERRATH 1996, JENS et al. 1997, LEMCKE & WINKLER 1998, VORDERMEIER & BOHL 1999, ADAM et al. 2004), die als Anhaltspunkte für die Bemessung herangezogen werden können (Tabelle A.2).

#### Ein Rechenbeispiel zur Schwimmleistung:

Eine Elritze (Foto 5) – als strömungsliebende Fischart – bewältigt bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,8 m/s und einer individuellen kritischen Schwimmgeschwindigkeit von 0,9 m/s, die der Fisch beispielsweise über 10 Sekunden halten kann, eine Distanz von 1 m. Im Anschluss an eine solche Sprintleistung ist eine Ruhephase notwendig, da die Sprintleistung auf einem anaeroben Stoffwechsel basiert. Die Elritze kann demnach den Abschnitt nur überwinden, wenn er nicht länger als 1 m ist und sich im Anschluss ein strömungsberuhigter Bereich befindet. Die kritische Schwimmgeschwindigkeit ist bei vielen Fischarten niedriger als bei der strömungsliebenden Elritze (Tabelle A.2).

(2) Die Wassertiefen sind für wandernde Tiere aufgrund zweier verschiedener Aspekte wichtig. Zum einen besteht eine Beziehung zwischen Wassertiefe und Hydrodynamik, so dass bestimmte Wasserstände über Schwellen nicht unterschritten werden sollten, da sonst die Strömung zu hoch wird. Zum anderen übt der Wasserstand eine Schutzfunktion vor möglichen Feinden aus. Geringe Wasserstände verursachen daher Stresszustände, ein erhöhtes Fraßrisiko und können die Fortbewegung behindern. Aus diesen Gründen wird es bei den meisten Fließgewässern notwendig sein, in einer Sohlgleite beim mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) einen minimalen Wasserstand in einer Niedrigwasserrinne zu halten.

(3) Die Struktur der Sohle ist für bodenorientierte Fische und alle Arten des Makrozoobenthos wichtig. Die verschiedenen Sedimente beeinflussen die sohlennahe Fließgeschwindigkeit aufgrund ihrer Rauheit und sind selbst der Lebensraum für das Makrozoobenthos, das sowohl auf der Sohle als auch in dem Lü-

Tabelle A.2: Kritische Schwimmggeschwindigkeiten und nicht mehr überwindbare Absturzhöhen für einige Fischarten. Keine Daten verfügbar: '-'.

Fischart	Kritische Schwimmggeschwindigkeit [m/s]	Nicht mehr überwindbare Absturzhöhe [m]
Bachneunauge	-	-
Flussneunauge	1,2	0,15 – 0,2
Meerneunauge	-	0,2 – 0,25
Bachforelle	0,8 – 1,0	-
Groppe	0,2 - 0,34	0,1 - 0,15
Bachschmerle	0,22 - 0,61	0,1
Dreistacheliger Stichling	0,36	-
Moderlieschen	0,39	-
Ukelei	0,34 – 0,52	-
Gründling	0,55	-
Hasel	0,46 – 0,96	-
Hecht	0,19 – 0,47	-
Plötze	0,36 – 0,69	-
Karausche	0,26 – 0,48	-
Elritze	0,9	0,1 – 0,15
Schleie	0,19 – 0,62	-
Flussbarsch	0,5	-
Steinbeißer	0,26 – 0,42	-
Quappe	0,36 – 0,41	-
Aal	0,47 – 0,83	-

ckensystem der Sohle (Interstitial) lebt. Daher verdienen die verwendeten Kornfraktionen aus ökologischer Sicht eine besondere Beachtung, um auch eine Durchgängigkeit im Interstitial herzustellen.

**(4)** Die Anbindung der Gleite an oberstrom und unterstrom gelegene Abschnitte bezüglich des Sohlsubstrates, der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten ist für die Ausbreitung der Tiere und deren Nutzung des Fließgewässers als Lebensraum wichtig. Beispielsweise machen Stillwasserbedingungen und Ablagerungen von Feinsediment oberstrom der Gleite Aufwärtswanderungen von strömungsliebendem Makrozoobenthos sinnlos, da hier kein geeigneter Lebensraum vorhanden ist: Die Fließgeschwindigkeiten sind hier für strömungsliebendes Makrozoobenthos zu gering, die bevorzugten Korngrößen fehlen und die Durchgängigkeit im Lückensystem ist auch nicht vorhanden.

**(5)** Die charakteristischen Gegebenheiten des Naturraumes bzw. der Gewässerlandschaften (SOMMERHAUSER et al. 2001) sollten in die Planung einbezogen werden, da die Funktionsfähigkeit einer Sohlgleite zum einen auf die naturraumtypischen Arten abgestimmt werden muss und zum anderen auch in das Landschaftsbild passen sollte (Abbildung A.2). Für die gefällereichen Tieflandfließgewässer des Östlichen Hügellands und der Hohen Geest ist eine kiesig-steinige Sohle mit einem Wechsel zwischen flach überströmten und kurzen, tiefen Abschnitten charakteristisch. Für die gefällearmen Tieflandfließgewässer

der Niederen Geest und Niederungen ist eine sandig-kiesige Sohle mit organischen Anteilen charakteristisch; natürlicherweise finden sich hier stärker strömende Bereiche nur als Kehrströmung an Kolken sowie an Totholz- und Wurzelbarrieren. Gemäß dem naturnahen Leitbild für sand- und kiesgeprägte Fließgewässer können auch Findlinge im Gewässerbett vorkommen (s. Typensteckbriefe für die Fließgewässertypen 14, 15, 16, 17 und 19, POTTGIESER & SOMMERHAUSER 2004).

In den gefällestärkeren Bächen und Flüssen leben insbesondere strömungsliebende Arten, während die gefälleärmeren Bäche und Flüsse insbesondere von strömungsmeidenden und strömungsindifferenten Arten besiedelt werden (BRUNKE 2004). Die Toleranzen der typspezifischen Fauna gegenüber hydraulischen Belastungen sind so in den gefälleärmeren Fließgewässern im Allgemeinen geringer. Da die Durchgängigkeit für alle Arten auf der Ebene der Population (d.h. für den Großteil der Besiedlung) durch eine Sohlgleite gewährleistet werden soll, bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Gefälle von Sohlgleiten für diese Naturräume.

#### A.4 Empfehlungen zu hydrologischen und morphologischen Grenzwerten aus faunistischer Sicht

- Die mittlere Fließgeschwindigkeit auf einer Sohlgleite sollte für Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet kleiner als 100 km<sup>2</sup>

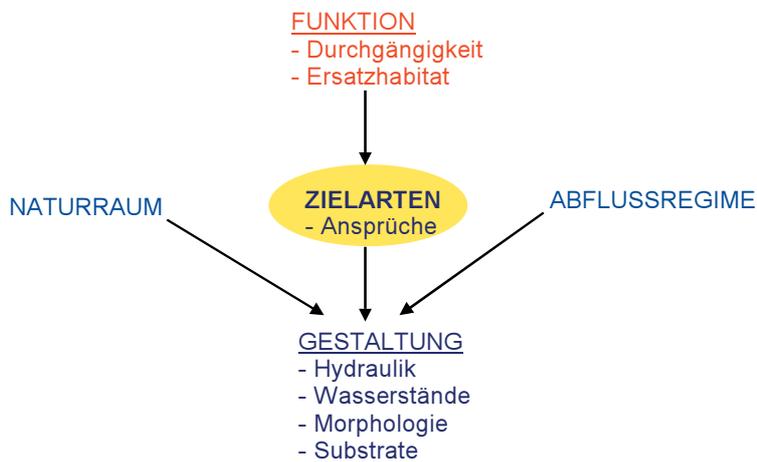


Abbildung A.2: Die gestalterisch einzuhaltenden Parameter einer Sohlgleite werden über die ökologischen Ansprüche der Zielarten sowie über die Physiographie des Naturraumes und das Abflussregime des Gewässers hergeleitet.

bis 0,5 m/s und für Einzugsgebiete größer als 100 km<sup>2</sup> bis 0,7 m/s betragen (gültig für MNQ bis 330Q) (s. B.3).

Die höhere zulässige mittlere Fließgeschwindigkeit bei großen Fließgewässern ergibt sich aus einer vergrößerten Querschnittsfläche, womit wegen der Heterogenität der Strömungsverhältnisse auch hier hinreichend große Bereiche mit geringen Fließgeschwindigkeiten für strömungsmeidende Arten vorhanden sind, obschon natürlicherweise höhere Geschwindigkeiten im Stromstrich möglich sind (s. B.3).

Da bedeutende Fischwanderungen bei höheren Abflüssen stattfinden, muss eine Durchwanderbarkeit auch bei Abflüssen gegeben sein, die größer als MQ sind. Bei größeren Hochwässern ist allerdings die Aufwärtswanderung von Fischen natürlicherweise sehr eingeschränkt. Daher bestehen bei Abflüssen, die größer als 330Q sind (also im langjährigen Mittel an 35 Tagen im Jahr), keine Anforderungen an die in der Sohlgleite zulässigen Fließgeschwindigkeiten.

Bei der Riegelbauweise ist schießender Abfluss in den Lücken bei Abflüssen kleiner als 330Q unbedingt zu vermeiden. Schießender Abfluss ist auch bei Sohlgleiten in geschütteter Bauweise unbedingt zu vermeiden. Dies ist aber aufgrund der aufgestellten Forderungen implizit gegeben.

- Die Mindestwassertiefe bei mittlerem Niedrigwasserabfluss sollte bei EZG kleiner als 100 km<sup>2</sup> zwischen 10 bis 20 cm

liegen. Die Mindestwassertiefe sollte bei EZG von 100 bis 200 km<sup>2</sup> zwischen 20 und 30 cm und bei EZG größer als 200 km<sup>2</sup> zwischen 30 bis 40 cm liegen, da hier größere Wanderfischarten, wie z.B. die Meerforelle, die Gleiten passieren können.

- Die maximale Höhe von Bodenschwellen sollte 10 cm betragen und der Mindestwasserstand über Bodenschwellen sollte bei MNQ zwischen 10 bis 20 cm liegen. Die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser sollte bei Schwellen für Abflüsse zwischen MNQ und 330Q maximal 10 bis 15 cm betragen.

Durch diese Anforderungen soll auch der Aufstieg von Fischarten, die nicht springen, ermöglicht werden, da so die lokalen Strömungen im Bereich der Schwelle nicht zu hoch werden.

- Die Sohlgleite soll mit einer durchgehenden Stein- und Kieslage mit einer Schichtdicke von mindestens 30 bis 50 cm ausgebildet sein. Die Stein- und Kieslage besteht aus unsortiertem Naturmaterial mit einem  $d_m$  in der Größenordnung von 8 – 10 mm. Entscheidend für die Durchgängigkeit ist die Verwendung unsortierten Kornmaterials mit Korngrößen von 2 bis 300 mm. Der angegebene mittlere Korndurchmesser sollte nicht unterschritten werden, so dass sowohl die Durchgängigkeit im Interstitial als auch die Standsicherheit der Gleite gewährleistet wird (s. C.1.3 und C.1.4). Das Kornmaterial sollte wegen der Verletzungsgefahr für Fische nicht scharfkantig und wegen der Lagestabilität nicht zu gleichförmig sein.
- Als Unterbau sollte ein mineralischer Filter gewählt werden. Auf den Einbau von künstlichen Baustoffen sowie undurchlässigen Geotextilien im Unterbau ist nach Möglichkeit zu verzichten. Falls der Einbau eines Wasserbauvlieses unter begründeten wasserbaulichen Erfordernissen notwendig sein sollte, ist eine Stärke von maximal 250 g/m<sup>2</sup> ausreichend.
- Bei geschütteten Bauweisen sollte der Anteil der Grundfläche der Störsteine in der Sohlgleite nicht zu groß sein. Empfohlen wird eine Steinfläche innerhalb Gleite von weniger als 20%. Eine höhere Störsteinfläche erhöht die Wahrscheinlichkeit von überhöhten Fließgeschwindigkeiten zwischen benachbarten Störsteinen beim Niedrig- bis Mittelwasserabfluss.

#### A.5 Empfehlungen für die Bauweise

Die geschüttete Bauweise aus mehrlagiger

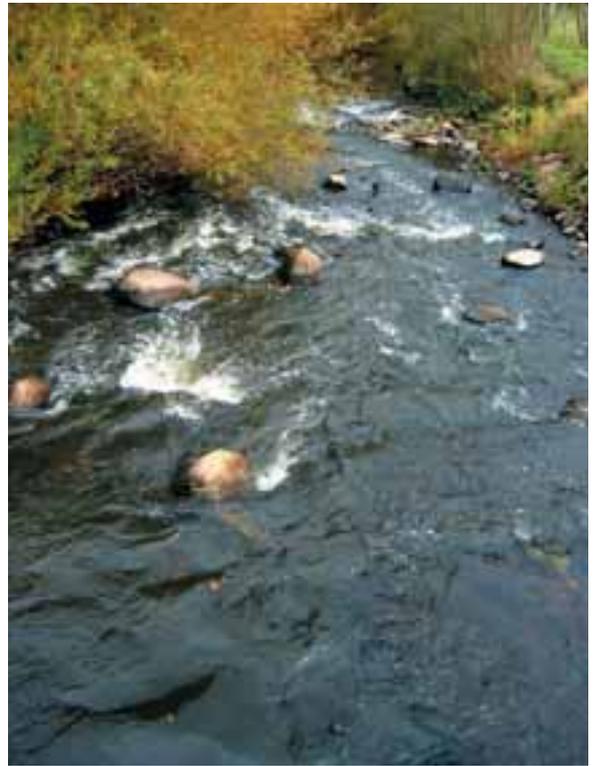
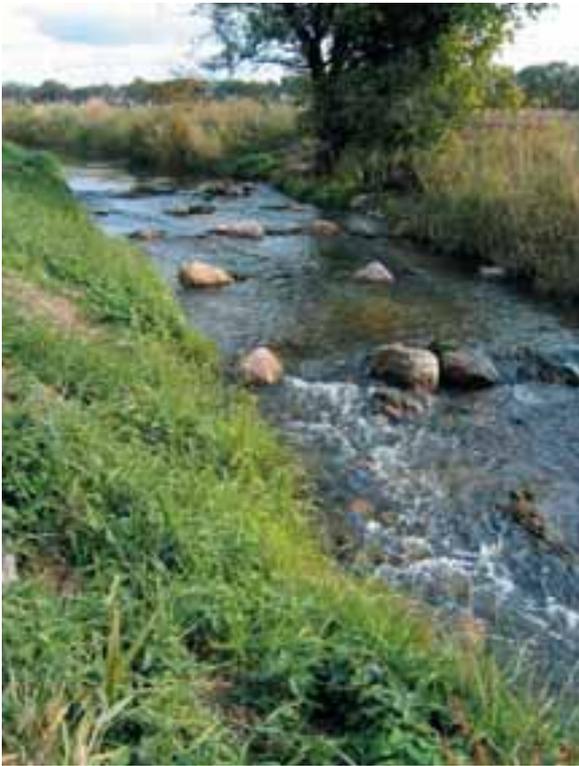


Foto 10: Zwei Beispiele für geschüttete Sohlgleiten mit einem heterogenen Strömungsmuster, jedoch ohne konkretes Niedrigwasserprofil.

Steinschüttung ist aufgrund der biologischen Anforderungen grundsätzlich einer Riegelbauweise vorzuziehen. Geschüttete Gleiten imitieren Rauschen, Schnellen oder Furte, die als morphologische Strukturen auch in unseren Gewässern entstehen. Hierbei bilden sich über die Sohlrauheit heterogene Strömungsmuster mit Zonen geringer und hoher Fließgeschwindigkeit aus (Foto 10). Durch die Profilierung und Störsteine entstehen verschiedene Wassertiefen auch bei Niedrigwasser auf der geschütteten Gleite. Die Riegelbauweise dagegen imitiert morphologisch Kaskaden, die nur in gebirgigen Gewässern natürlicherweise durch unregelmäßig abgelagerte Blöcke entstehen. Bei der Riegelbauweise entstehen jedoch eher regelmäßige Block/Kolk-Abfolgen mit diskreten Zonen hoher und geringer Strömung sowie geringer und großer Wassertiefe. Bei der Überströmung von Riegeln können sehr ungünstige starke Turbulenzen entstehen und die Fließgeschwindigkeit in den Spalten ist in der Regel sehr hoch, so dass hier Flaschenhalseffekte für die wandernden Tiere auftreten. Zudem können die Spalten durch Materialtransport im Gewässer verstopfen. Durch die tief in das Sediment eingelegten Riegelsteine wird die Durchwanderbarkeit im Sediment herabgesetzt. Bei unsachgemäßer Ausfertigung können durch die Riegel auch neue Barrieren entstehen.

Die Anlage geschütteter Sohlgleiten ist in der Regel baulich weniger aufwändig und zudem einfacher umzugestalten als die von Sohlglei-

ten aus Riegeln, so dass sowohl nachträgliche Verbesserungen möglich sind als auch landschaftsplanerisch auch zukünftig mehr Freiräume bestehen. Prinzipiell sind auch Kombinationen verschiedener Bauvarianten in einer Gleite möglich, wenn es die örtlichen Bedingungen erfordern und die hier formulierten Empfehlungen berücksichtigt werden.

Die Unterschiedlichkeit der Naturräume in Schleswig-Holstein (s. SOMMERHAUSER et. al. 2001) fließt auch in die Wahl der Bauweise ein. Zwischen den Naturräumen variieren die natürlichen Gefälle der Fließgewässer. Dadurch unterscheiden sich auch viele für die Fauna und Flora wesentliche hydromorphologische Bedingungen. Das führt dazu, dass sich die aquatischen Lebensgemeinschaften ganz allgemein zwischen den gefällereichen und gefällearmen Gewässern unterscheiden. So dominieren die nicht-strömungsliebenden Arten in den Lebensgemeinschaften gefällearmen Gewässern. Bei der Bauweise von Sohlgleiten berücksichtigt die Formulierung eines geringeren Gefälles die typspezifische Lebensgemeinschaft besser als einzelne Grenzwerte, die primär auf spezifische Arten fokussieren (s. A.3).

Auf einer anderen Ebene der Betrachtung liegt die naturästhetische und landschaftsökologische Eingliederung in die umgebende Landschaft, was ebenfalls berücksichtigt werden muss.

- Die geschüttete (lockere) Bauweise mit geringem Gefälle (1:50 bis 1:100) sollte in den Naturräumen der Niederen Geest, Niederungen und Moorgebieten angewendet werden. Ein höheres Gefälle als 1:50 kann dann geplant werden, wenn es aus rechtlichen oder bautechnischen Gründen nicht möglich ist, ein geringeres Gefälle zu realisieren.
- Die geschüttete (lockere) Bauweise mit höherem Gefälle (1:30 bis 1:50) kann in den Naturräumen des Östlichen Hügellandes und der Hohen Geest angewendet werden.
- Die Riegelbauweise mit unregelmäßigen Riegeln (keine Schwellen) mit höherem Gefälle ( $\geq 1:30$ ) kann angewendet werden, falls aus rechtlichen oder bautechnischen Gründen geringere Gefälle oder eine geschüttete Bauweise nicht umsetzbar sind.
- Es sollten keine durchgehenden Querelemente im Sohlsediment errichtet werden.
- In der Regel ist es aufgrund der vergleichsweise geringen Fließgeschwindigkeiten nicht wasserbaulich erforderlich, den Gleitenfuß zu stabilisieren, um eine rückschreitende Erosion zu verhindern. In begründeten Fällen können zusätzliche Stützsteine und Pfahlreihen im Bereich der Nachbettsicherung bzw. am Gleitenfuß verwendet werden. Die Pfahlreihen sollten aus Holz bestehen und dürfen nicht durchgehend eingebaut werden, sondern sollten aus einzelnen, versetzt stehenden Reihen bestehen. Die Oberkanten der Pfahlreihen liegen mindestens 10 cm unterhalb der Geröllschicht.
- Die ober- und unterstrom gelegenen Abschnitte sollten hydromorphologisch an die Sohlgleite angebunden werden (Abbildung A.3):
  - Es sind Übergänge bezüglich Sediment und Strömung zu schaffen, d.h. es sollte zu keinen abrupten Wechseln zwischen Strömung und Sedimentzusammensetzung ober- und unterstrom der Sohlgleite kommen (Foto 11, 12). Eine langfristige Auflandung oberstrom ist zu vermeiden. Nach Möglichkeit ist die Gleitenkrone abzusenken, so dass das Strömungsmuster oberhalb in das der Gleite allmählich übergeht. Gegebenenfalls kann es sinn-

**Bei den Planungen von Sohlgleiten sollten folgende Gestaltungen beachtet werden:**

- Bei Fließgewässern mit hohen Abflussschwankungen und ausgeprägten Niedrigwasserphasen sollte ein Niedrigwasserprofil eingerichtet werden, um hier die Wasserstände während Trockenwetterphasen zu halten.
- Auf durchgehende Schwellen und Abstürze sollte verzichtet werden.

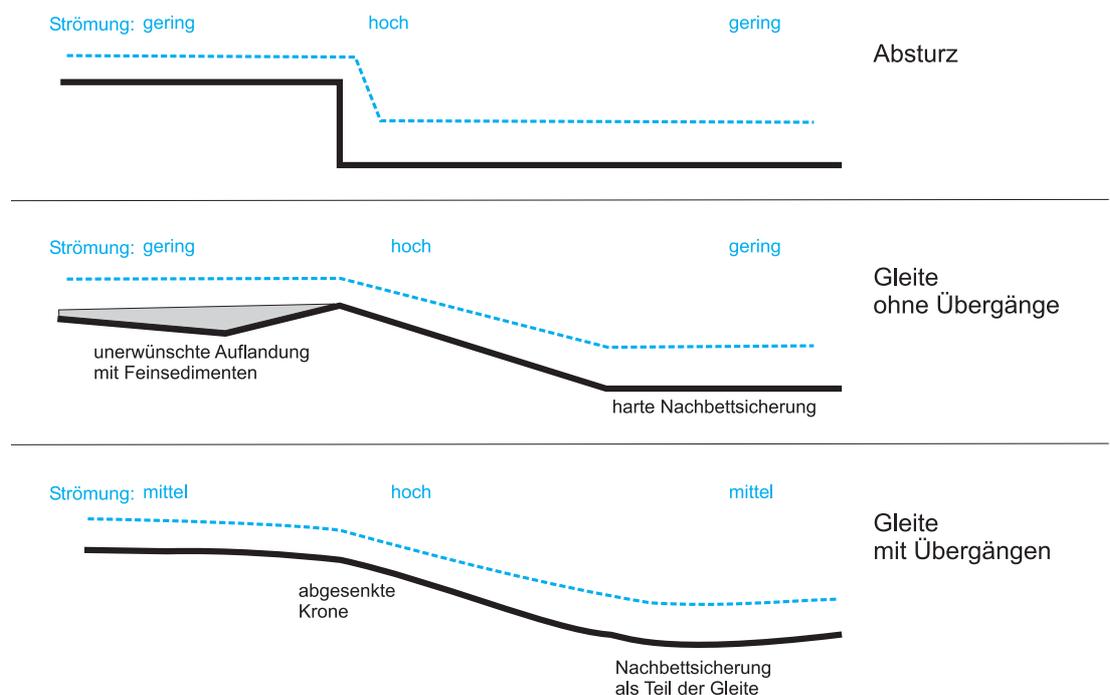


Abbildung A.3: Schematische Darstellung zur hydromorphologischen Anbindung oberstrom und unterstrom gelegener Abschnitte an einen Absturz sowie an einer Sohlgleite ohne und einer Sohlgleite mit kontinuierlichen Übergängen.



Foto 11: Ausschnitt aus einer Sohlgleite in Riegelbauweise, bei der kein Übergang zwischen dem rückgestauten Bereich oberstrom (mit Stillwasserbedingungen) und dem obersten, durchgehenden Querriegel besteht. Bei diesem Beispiel musste allerdings die Aufstauung aufgrund der örtlichen Rahmenbedingungen gehalten werden.



Foto 12: Eine geschüttete Gleite mit rückgestautem Abschnitt oberhalb und erheblicher Einengung des Gewässerbetts durch eine massive Befestigung der Ufer und extremen hydrodynamischen Bedingungen.

voll sein, die Anbindung der geplanten Gleite nach oberstrom und unterstrom mit Hilfe eines eindimensionalen Wasserspiegellagenprogramms nachzuweisen, um die Bedeutung veränderter Wasserstands-Abfluss Beziehungen zu beurteilen.

- Muss der Wasserstand oberstrom gehalten werden, so sollte der Abflussquerschnitt (MNQ, MQ) oberstrom reduziert werden, z.B. mit hochwasserneutralen, strömunglenkenden Bauwerken (vergleichbar mit Buhnen an größeren Fließgewässern). Dadurch soll oberstrom eine standorttypische Mindestfließgeschwindigkeit erhalten bleiben und eine Sedimentation von Feinmaterialien im gesamten Querschnitt verhindert werden.
- Die hydraulische Belastung unterstrom der Gleite ist zu reduzieren, so dass

keine Tosbecken geplant werden müssen. Zur Nachbettsicherung kann die Vorprofilierung eines naturnahen Kolkes bei erosionsgefährdeter Sohle erfolgen (s. C.1.4). Der Kolk sollte nicht überbreit angelegt werden. Die Länge bzw. Tiefe der Nachbettsicherung kann bis zum 7-fachen (Mindestlänge = 3 m) bzw. bis zu 1/3 der Gleitenhöhe betragen. Diese Werte orientieren sich derzeit an GEBLER (1991), der allerdings von einem höheren  $v_m$  ausgeht. Aufgrund der geringeren hydraulischen Bemessungsgrundlagen ( $l$ ,  $v_m$ ) in dieser Empfehlung sind gegebenenfalls auch geringere Dimensionierungen für eine Nachbettsicherung möglich (s. C.1.4). Die Schichtdicke und der Korndurchmesser der Nachbettsicherung entsprechen den Dimensionierungen der Sohlgleite.

- Bei längeren Sohlgleiten können Furt/Kolk-Sequenzen nachgeahmt und ein geschwungenes Niedrig- und Mittelwasserprofil angelegt werden. Es sollen dabei jedoch keine Sequenzen aus Becken und Engen konstruiert werden, die in den Engen eine Art Flaschenhalseffekt aufgrund eines sehr geringen Querschnitts, hohen Gefälles und hoher Fließgeschwindigkeit bewirken. Bei geschütteten Sohlgleiten können bei Niedrigwasser auch erhöhte Fließgeschwindigkeiten zwischen eng beieinander liegenden Störsteinen auftreten. Die Folgen eines Flaschenhalseffektes unterbleiben jedoch, da für wandernde Tiere eine Vielzahl an alternativen Wanderwegen existiert.
- Es sollten Zonen mit geringen Fließgeschwindigkeiten (mittlere Geschwindigkeit hier 0,2 bis 0,3 m/s für MNO und MQ) angelegt werden, die z.B. in den Randbereichen der Sohlgleite durchgehend vorhanden sein können (Abbildung A.4). Diese Wasserwechselzonen (Abbildung A.4) können während Niedrigwasserphasen trocken fallen; das flächige Trockenfallen der Gleite wird durch die abgestufte Ausbildung des Sohlmaterials verhindert, bei der ein Niedrigwasserprofil ausgebildet wird (vgl. Kapitel C.1.4). Können keine durchgehenden strömungsberuhigten Bereiche angelegt werden, so sind in aufeinander folgenden Abständen von höchstens 3 m und mit Beckenlängen von mindestens 3 m strömungsberuhigte Bereiche zu errichten.
- Sohlgleiten als Ersatzhabitate sollten mindestens eine Lauflänge von 100 m haben und bestehen aus unregelmäßigen Schüttungen. Die Gestaltung von Ersatzhabitaten orientiert sich an den gewässertypischen Leitbildern (siehe Typensteckbriefe, POTTGIESSER & SOMMERHÄUSER 2004, SOMMERHÄUSER & SCHUMACHER 2003) sowie den Habitatansprüchen der vorab zu definierenden Zielarten. Hierauf wird jedoch in der Empfehlung nicht weiter eingegangen.
- Aus wasserrechtlichen Gründen wird empfohlen, das Betreten von Sohlgleiten zu verbieten. Hierzu können Hinweistafeln verwendet werden.

#### **A.6 Schematische Darstellung einer Sohlgleite**

Aus den Empfehlungen aus biologischer Sicht ergeben sich verschiedene räumliche Zonen, die planerisch einbezogen werden sollten. Hierzu gehören die ober- und unterstrom gelegenen Abschnitte, strömungsberuhigte Bereiche innerhalb der Sohlgleite, das Niedrigwasserprofil, die Uferzone und die Sedimentschicht (Abbildung A.4 und A.5). Das Niedrig- und Mittelwasserprofil sollte sich an den Stromstrich anlehnen und kann daher im Längsverlauf geschwungen angelegt werden (Abbildung A.6, Foto 13). Im Mittelwasserprofil können die strömungsberuhigten Bereiche in den Randbereichen der Gleite angelegt werden (Abbildung A.4 und A.5). Dabei beträgt die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  in Bächen mit einem Einzugsgebiet kleiner als 100 km<sup>2</sup> im gesamten Querprofil 0,5 m/s. In den strömungsberuhigten Randbereichen darf die Fließgeschwindigkeit 0,5 m/s nicht überschreiten (Abbildung A.5).

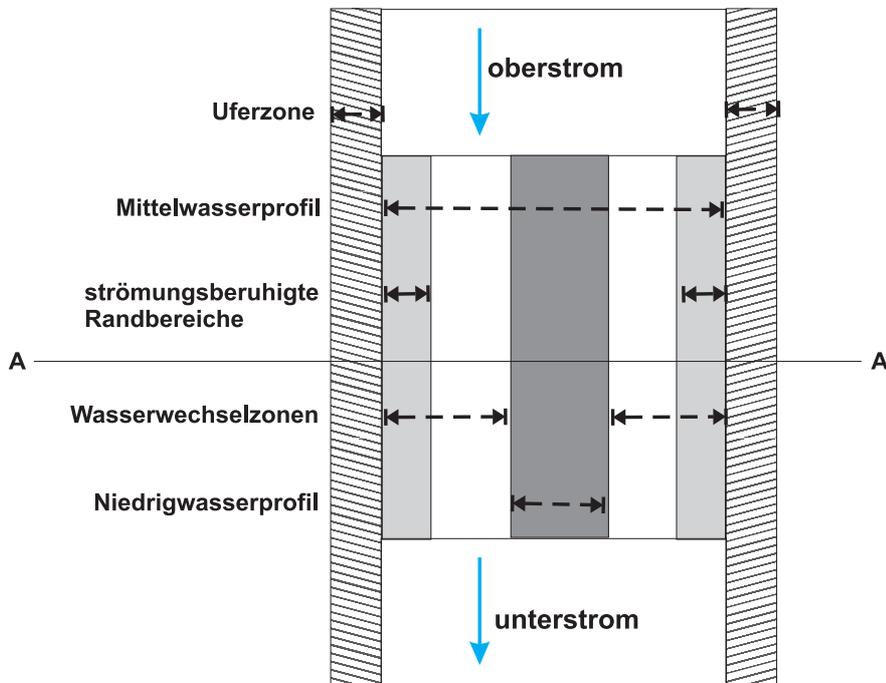


Abbildung A.4: Schematische Aufsicht auf eine geschüttete Sohlgleite mit räumlichen Zonen, die planerisch einbezogen werden sollten. Das Niedrig- und Mittelwasserprofil sollte sich an den Stromstrich anlehnen und braucht deshalb nicht, wie in dem Schema dargestellt, geradlinig durch die Sohlgleite zu verlaufen. A-A markiert einen Querschnitt, der in Abbildung A.5 dargestellt wird.

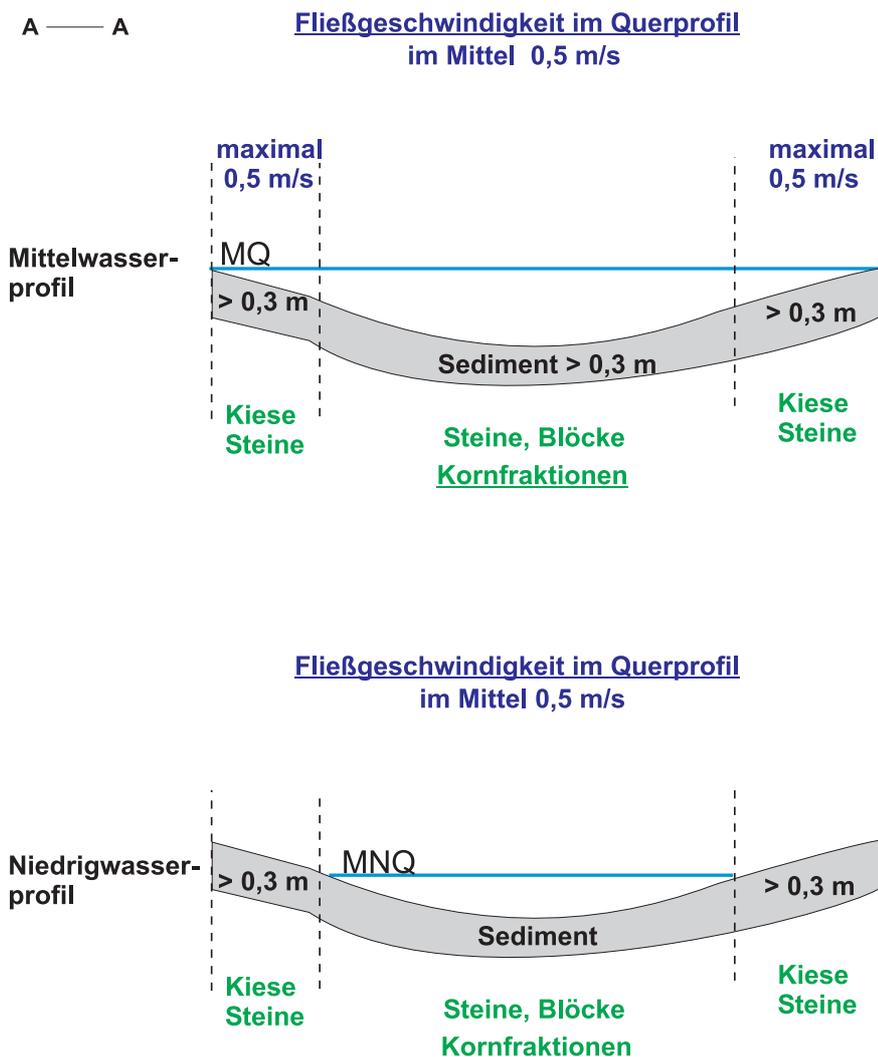


Abbildung A.5: Schematischer Querschnitt einer geschütteten Sohlgleite im Mittel- und Niedrigwasserprofil mit Angaben zu Fließgeschwindigkeiten und zum Sediment (Schichtdicke und Kornfraktionen) bei einem Einzugsgebiet kleiner als 100 km<sup>2</sup>.

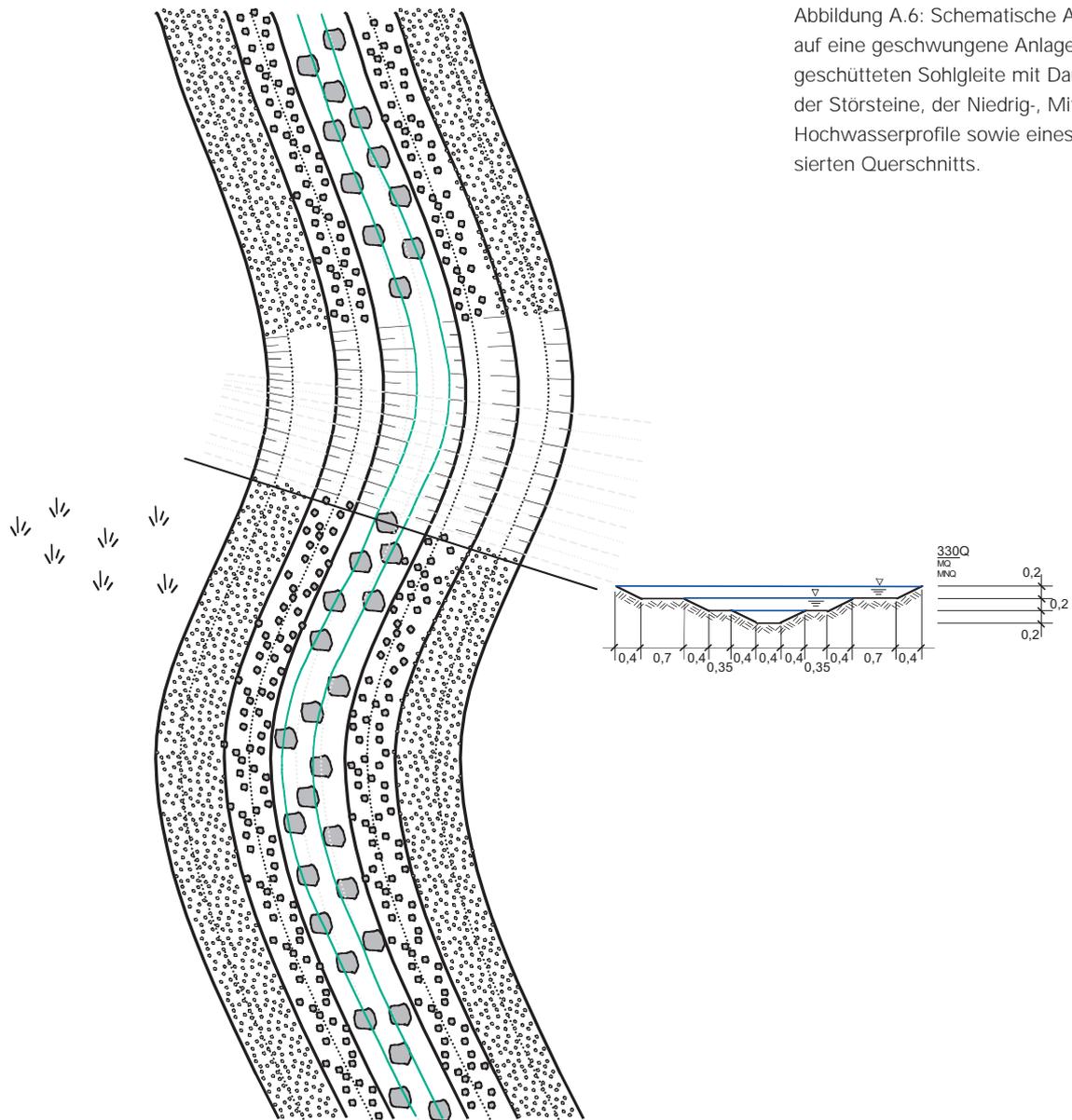


Foto 13. Bei längeren Sohgleiten bietet sich ein geschwungenes Mittelwasserprofil an, um naturnahe heterogene Strömungsbedingungen und hydromorphologische Strukturen zu schaffen (Gudenau in Silkeborg, Dänemark).

# B Hydrologische Bemessungsparameter für Schleswig-Holstein

Die Planung und Bemessung von Sohlgleiten in Schleswig-Holstein hat sich neben den biologischen Anforderungen an den natürlich vorhandenen hydrologischen Verhältnissen zu orientieren. Daher sollen im Folgenden die hydrologischen Gegebenheiten anhand der vorhandenen Abflussspenden, an Pegeln auftretenden Fließgeschwindigkeiten und typischen Geschwindigkeitsprofilen im Querschnitt dargelegt werden. Abschließend wird auf natürliche Gewässerbreiten eingegangen, an denen sich die Planung von Sohlgleiten orientieren sollte.

## B.1 Abflussspenden

Abflussspenden können dazu genutzt werden, die hydrologischen Verhältnisse unabhängig von der Einzugsgebietsgröße zu beschreiben. Daher ist es sinnvoll, die für Sohlgleiten relevanten Abflüsse MNO, MO und 330Q als Abflussspenden auszudrücken, da diese Werte auch herangezogen werden können, wenn

kein Pegel in unmittelbarer Nähe vorhanden ist.

Die Abflüsse MNO, MO und 330Q werden im Folgenden als Betriebsabflüsse bezeichnet. Bei der hydraulischen Bemessung von Sohlgleiten werden zwei Berechnungsszenarien unterschieden:

- Bemessung für Betriebsabflüsse: Die Sohlgleite ist so zu bemessen, dass die geforderten maximalen Fließgeschwindigkeiten und minimalen Wassertiefen während des Betriebsspektrums zwischen MNO und 330Q eingehalten werden. Betriebsabflüsse sind also diejenigen Abflüsse, die nur an wenigen Tagen im Jahr über- oder unterschritten werden.
- Bemessung für maximale Abflüsse bzw. für maximale Geschwindigkeiten: Die Sohlgleite muss für ein Hochwasserereignis mit mehrjährigem Wiederkehrintervall

MNq in Abhängigkeit von der EZG-Größe

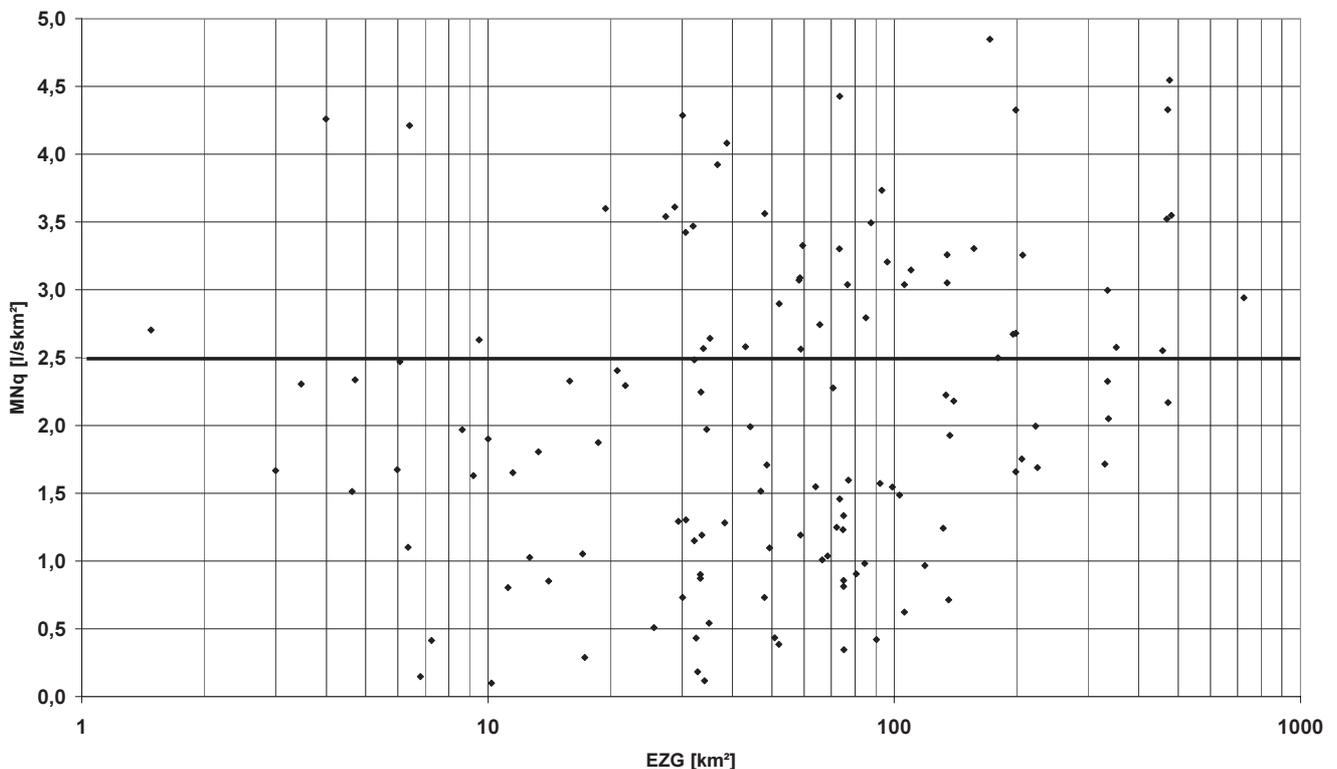


Abbildung B.1: Beziehung zwischen der mittleren Niedrigwasserspende MNq und der Einzugsgebietsgröße an 156 Pegeln in Schleswig-Holstein.

### Mq in Abhängigkeit von der EZG-Größe

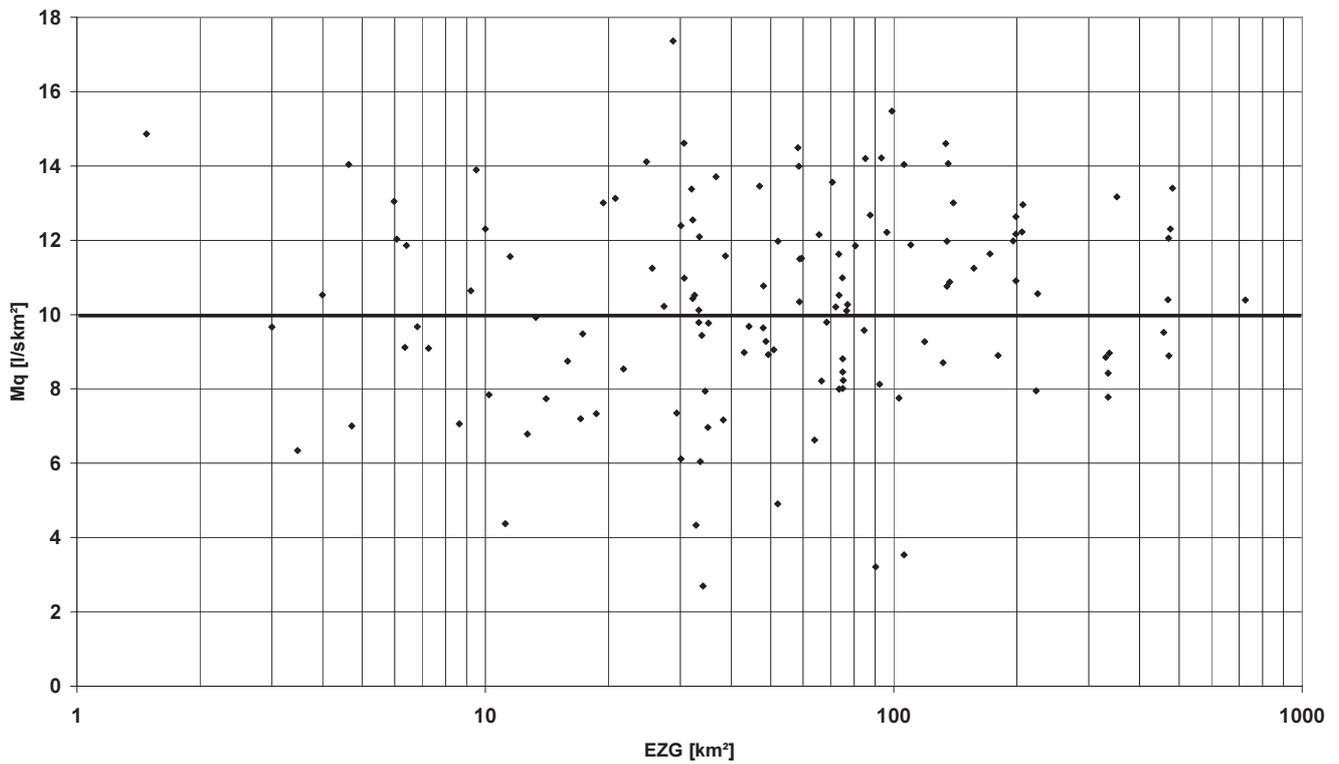


Abbildung B.2: Beziehung zwischen der Mittelwasserspende  $M_q$  und der Einzugsgebietsgröße an 156 Pegeln in Schleswig-Holstein.

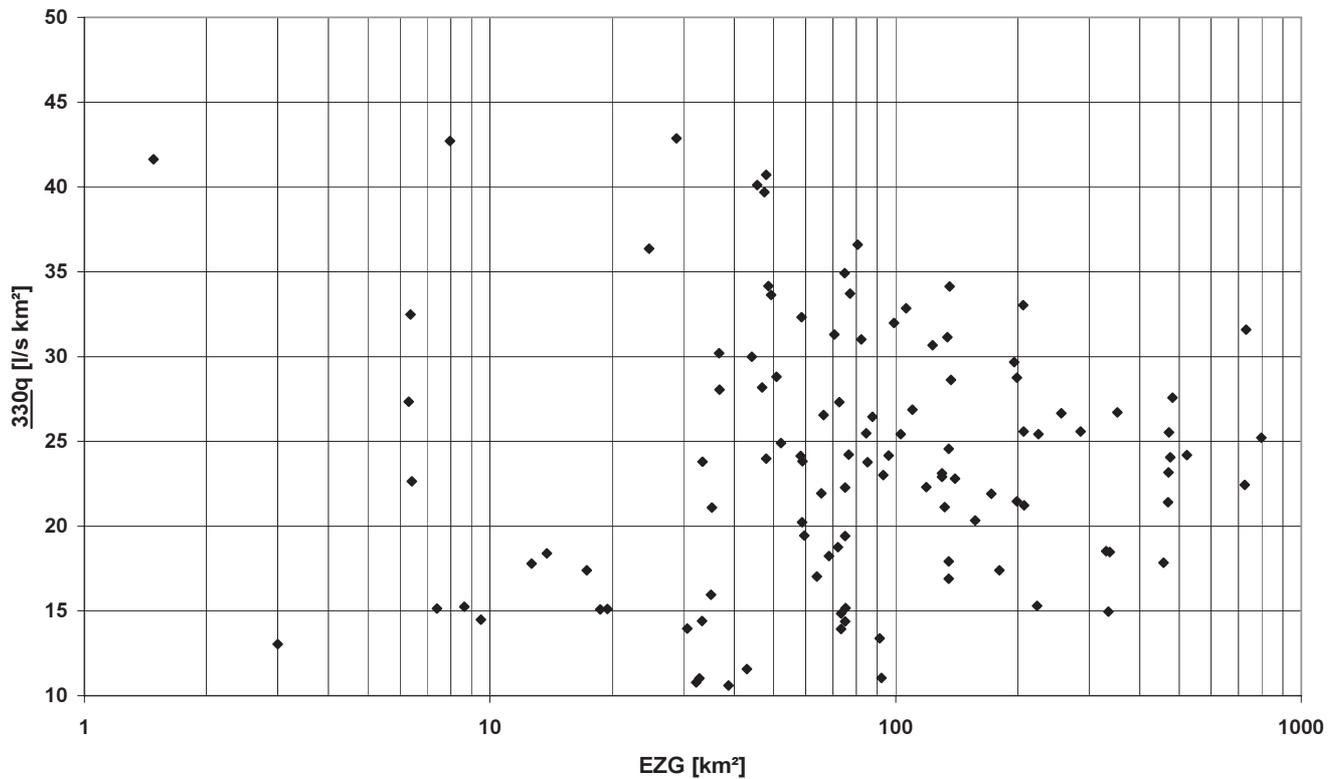


Abbildung B.3: Beziehung zwischen der Abflussspende  $\underline{330q}$  und der Einzugsgebietsgröße an 156 Pegeln Schleswig-Holsteins.

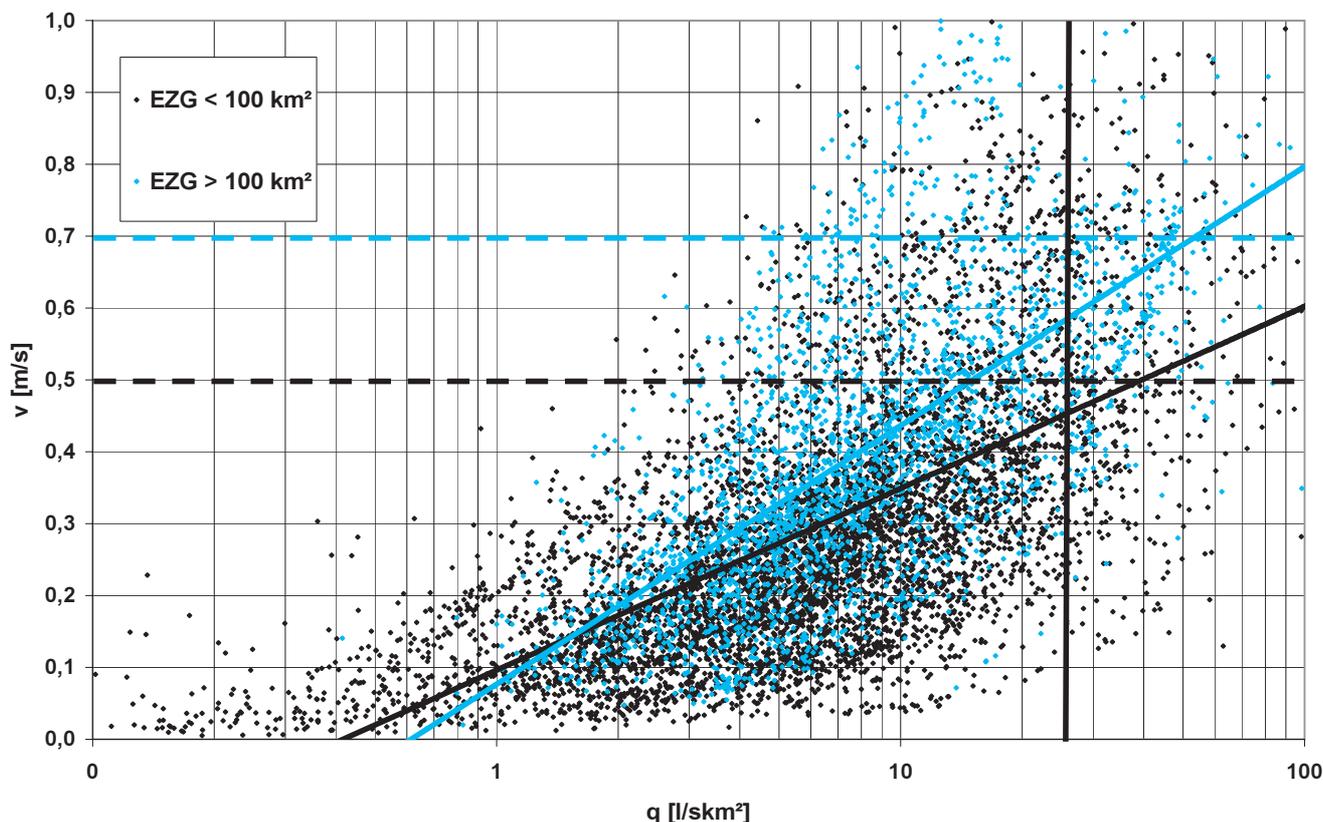


Abbildung B.4: Mittlere Fließgeschwindigkeiten an 156 Pegeln Schleswig-Holsteins in Abhängigkeit von der Abflussspende für verschiedene Einzugsgebietsgrößen (8.786 Abflussmessungen)

Tabelle B.1: Mittlere Fließgeschwindigkeiten an Pegeln Schleswig-Holsteins in Abhängigkeit von der Abflussspende. Grau unterlegt sind Messungen (absolute und relative Anzahl), die über den Vorgaben für Sohlgleiten liegen.

AE	v [m/s]	q: 0 - 10 l/skm <sup>2</sup>		q: 10 - 25 l/skm <sup>2</sup>		q: > 25 l/skm <sup>2</sup>		Anzahl
<100 km <sup>2</sup>	0 - 0,5	4122	96,0%	1095	75,8%	234	47,0%	5451
	0,5 - 0,7	146	3,4%	228	15,8%	140	28,1%	514
	> 0,7	25	0,6%	122	8,4%	124	24,9%	271
<b>Anzahl</b>		<b>4293</b>		<b>1445</b>		<b>498</b>		<b>6236</b>
>100 km <sup>2</sup>	0 - 0,5	1399	87,9%	344	52,7%	68	22,2%	1811
	0,5 - 0,7	144	9,1%	212	32,5%	166	54,2%	522
	> 0,7	48	3,0%	97	14,9%	72	23,5%	217
<b>Anzahl</b>		<b>1591</b>		<b>653</b>		<b>306</b>		<b>2550</b>

so bemessen werden, dass die Standsicherheit gewährleistet ist. Hier ist in der Regel ein  $HQ_{50}$  anzusetzen. Bei einem hohen Gefährdungspotenzial, beispielsweise im innerörtlichen Bereich sollte das  $HQ_{100}$  angesetzt werden.

Im Folgenden wird die Variabilität der Betriebsabflussspenden  $MNq$ ,  $Mq$  und  $330q$  in Schleswig-Holstein dargestellt.

### B.1.1 Mittlere Niedrigwasserspende (MNq)

Die Bandbreite der Niedrigwasserspenden ( $MNq$ ) in Schleswig-Holstein variiert zwischen etwa 0,1 und 4,8 l/(s km<sup>2</sup>) (Abbildung B.1). Wenn für Bemessungsfragen keine detaillierten Informationen zu  $MNq$  vorliegen, kann - trotz der Variation - mit einem mittleren Wert von 2,5 l/(s km<sup>2</sup>) gerechnet werden.

### B.1.2 Mittelwasserspense (Mq)

Die Bandbreite der Mittelwasserspense (Mq) in Schleswig-Holstein ist aus Abbildung B.2 zu erkennen. Mq schwankt um den Mittelwert von ca. 10 l/(s km<sup>2</sup>). Wenn für Bemessungsfragen keine detaillierten Informationen zu Mq vorliegen, kann mit diesem Wert gerechnet werden. Die Mittelwasserspense Mq beträgt etwa das Vierfache der mittleren Niedrigwasserspense MNq.

### B.1.3 Abflussspende $\underline{330q}$

Die zum Betriebsabfluss  $\underline{330Q}$ , also dem an 330 Tagen im Jahr unterschrittenen Abfluss, gehörige Abflussspende  $\underline{330q}$  liegt in Schleswig-Holstein zwischen 10 und 42 l/(s km<sup>2</sup>); für Einzugsgebiete größer 100 km<sup>2</sup> schränkt sie sich auf 15 bis 35 l/(s km<sup>2</sup>) ein (Abbildung B.3). Für kleinere Einzugsgebiete kann sie in Einzelfällen erheblich variieren. Sollten für Bemessungsfragen keine detaillierten Informationen zu  $\underline{330q}$  vorliegen, kann mit 25 l/(s km<sup>2</sup>) gerechnet werden. Die Abflussspende  $\underline{330q}$  beträgt etwa das 2,5-fache der Mittelwasserspense Mq.

### B.2 Mittlere Fließgeschwindigkeiten $v_m$

Limitierender Faktor für die aufwärts gerichtete Wanderung von Fischen ist insbesondere die Fließgeschwindigkeit. Für Sohlgleiten sollten keine schärferen Anforderungen bezüglich der zulässigen Fließgeschwindigkeiten gestellt werden, als sie an natürlichen Gewässerabschnitten ohnehin vorliegen. Aus vorliegenden Messungen an Gewässerquerschnitten können plausible Forderungen für sinnvolle Geschwindigkeitsvorgaben innerhalb von Sohlgleiten abgeleitet werden, da diese Geschwindigkeiten ohnehin von Fischen überwunden werden müssen, wenn sie sich stromauf bewegen.

Zur Betrachtung der in den Fließgewässern Schleswig-Holsteins auftretenden mittleren Fließgeschwindigkeiten  $v_m$  wurden ca. 9.000 Abflussmessungen aus den letzten 10 Jahren an 156 Pegeln ausgewertet (Abbildung B.4). Es wurde dabei zwischen Messungen an Pegeln mit einem Einzugsgebiet kleiner als 100 km<sup>2</sup> (schwarz) und einem Einzugsgebiet größer als 100 km<sup>2</sup> (grau) unterschieden. Diese Unterscheidung wurde vorgenommen, da an größeren Fließgewässern auch ein größerer Fließquerschnitt

Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Abflussspende für verschiedene Fließgewässertypen

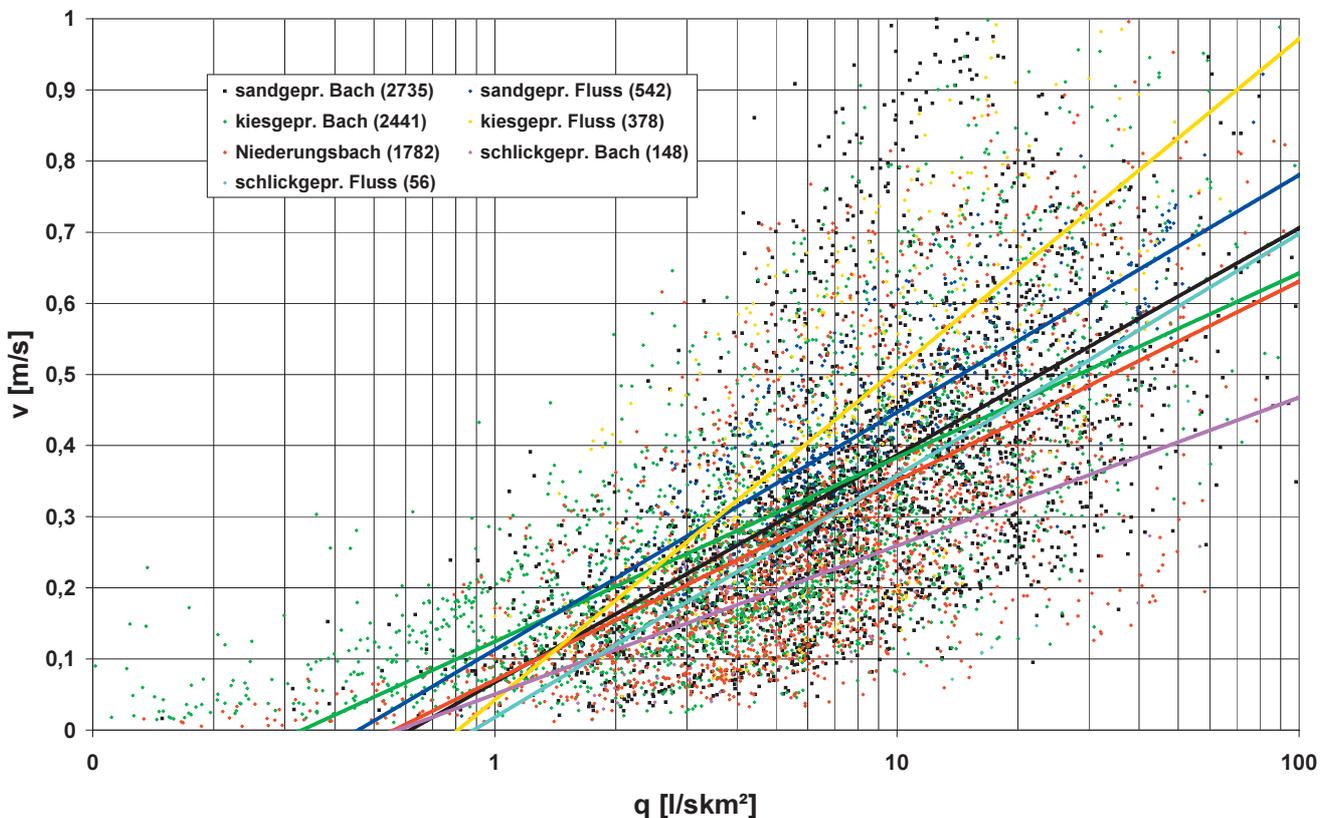


Abbildung B.5: Beziehung zwischen der mittleren Fließgeschwindigkeit und der Abflussspende an 156 Pegeln in Schleswig-Holstein für die Fließgewässertypen (8.786 Abflussmessungen).

vorliegt, bei dem dann auch größere Zonen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten vorhanden sind (s. B.3).

Anhand der in Abbildung B.4 eingetragenen Regressionsgeraden lässt sich erkennen, dass sich für die Abflusspende  $330q$  von  $25 \text{ l/(s km}^2\text{)}$  für Einzugsgebiete kleiner als  $100 \text{ km}^2$  eine Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0,45 \text{ m/s}$  und für Einzugsgebiete größer als  $100 \text{ km}^2$  eine Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0,58 \text{ m/s}$  ergibt.

Bedenkt man, dass sich die Pegel häufig an ausgebauten Gewässerabschnitten befinden und somit nicht unbedingt die Strömungssituation widerspiegeln, die natürlicherweise vorliegen würde, so lassen sich hieraus hydrologisch sinnvolle zulässige Fließgeschwindigkeiten innerhalb von Sohlgleiten von  $0,5 \text{ m/s}$  für Einzugsgebiete kleiner als  $100 \text{ km}^2$  und  $0,7 \text{ m/s}$  für Einzugsgebiete größer als  $100 \text{ km}^2$  begründen. Abbildung B.4 gibt somit einen repräsentativen Überblick über die derzeit in Schleswig-Holstein real auftretenden mittleren Fließgeschwindigkeiten, wobei sich die Genauigkeit der Abflussmessungen im Allgemeinen in einem Bereich von  $\pm 10\%$  bewegt.

Tabelle B.1 zeigt die Anzahl der Messungen für verschiedene Geschwindigkeitsklassen in Abhängigkeit von der Abflusspende und der Einzugsgebietsgröße.

Beispielsweise liegen für Einzugsgebiete kleiner als  $100 \text{ km}^2$  bei Abflüssen unter Mittelwasserabfluss ( $Mq = 10 \text{ l/(s km}^2\text{)}$ ) insgesamt  $96\%$  der Messungen unter den geforderten  $0,5 \text{ m/s}$ . Für Einzugsgebiete größer als  $100 \text{ km}^2$  liegen bei Abflüssen unter Mittelwasserabfluss ( $Mq = 10 \text{ l/(s km}^2\text{)}$ )  $97\%$  der Messungen unter den geforderten  $0,7 \text{ m/s}$ . Entsprechend liegen bei Abflusspenden zwischen  $Mq$  und  $330q$   $75,8\%$  der Messungen für kleine Einzugsgebiete und  $85,1\%$  für größere Einzugsgebiete unter den für Sohlgleiten geforderten Fließgeschwindigkeiten.

Insgesamt übersteigen lediglich  $8,3\%$  aller Messungen bei Abflüssen unterhalb von  $330q = 25 \text{ l/(s km}^2\text{)}$  die für Sohlgleiten zulässigen Geschwindigkeiten (Tabelle B.1). Da davon ausgegangen werden kann, dass die Überschreitungen häufig an solchen Pegeln auftraten, die in ausgebauten, nicht naturnahen Gewässerabschnitten liegen, sind die biologisch geforderten zulässigen Fließgeschwindigkeiten aus hydrologischer Sicht angemessen, um eine longitudinale Durchgängigkeit zu erreichen.

Zusammenfassend kann abgeleitet werden, dass die geforderten Fließgeschwindigkeiten auch außerhalb von Sohlgleiten in der Regel für  $330Q$  eingehalten werden und daher für Sohlgleiten keine schärferen Anforderungen gestellt werden als sie an freien Gewässerabschnitten vorliegen.

Bei möglichen Grenzfällen (s. Kapitel C.1.2), in Bereichen, in denen die mittlere Fließgeschwindigkeit auch natürlicherweise über den für Sohlgleiten geforderten Grenzwert liegt, besteht die Option, die zulässigen Geschwindigkeiten geringfügig zu erhöhen. Die Analyse von mittleren Fließgeschwindigkeiten  $v_m$  kann auch nach Fließgewässertypen differenziert dargestellt werden (Abbildung B.5). In der Tendenz sind die mittleren Fließgeschwindigkeiten in den Fließgewässertypen des kies- und des sandgeprägten Flusses größer als in den Bächen und in dem Typ schlickgeprägter Bach kleiner als in den anderen Typen. Die Streuung der Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Fließgewässertypen ist allerdings erheblich. Bei der Festlegung der zulässigen mittleren Fließgeschwindigkeit für Sohlgleiten wurde daher eine hydrologische Unterscheidung über die Einzugsgebietsgröße einer typologischen Unterscheidung vorgezogen.

### B.3 Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Fließquerschnitts

Entscheidend für die longitudinale Durchgängigkeit eines Fließgewässers ist es, ob ausreichend große Bereiche mit Fließgeschwindigkeiten  $v$  kleiner als  $0,5 \text{ m/s}$  innerhalb des Fließquerschnitts vorhanden sind. Die mittlere Fließgeschwindigkeit liefert hier nur einen Anhaltspunkt, da in größeren Fließgewässern auch größere Bereiche vorliegen, bei denen die lokale Fließgeschwindigkeit wesentlich geringer als die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  ist.

Um ein aus biologischer und hydrologischer Sicht vertretbares Kriterium zu definieren, werden anhand einiger Beispiele die Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Querprofils bei Abflüssen im Bereich von  $330Q$  für verschiedene Einzugsgebietsgrößen analysiert. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten liegen für die betrachteten Beispiele bei ca.  $0,6 \text{ m/s}$  für  $330Q$  (Abbildung B.6). Es handelt sich hierbei um Pegel an ausgebauten Gewässerabschnitten.

Anhand der Isotachen an den betrachteten Pegeln kann hydrologisch begründet werden, dass die zulässige mittlere Fließgeschwindigkeit bei Einzugsgebieten größer als  $100 \text{ km}^2$  auf  $0,7 \text{ m/s}$  erhöht werden

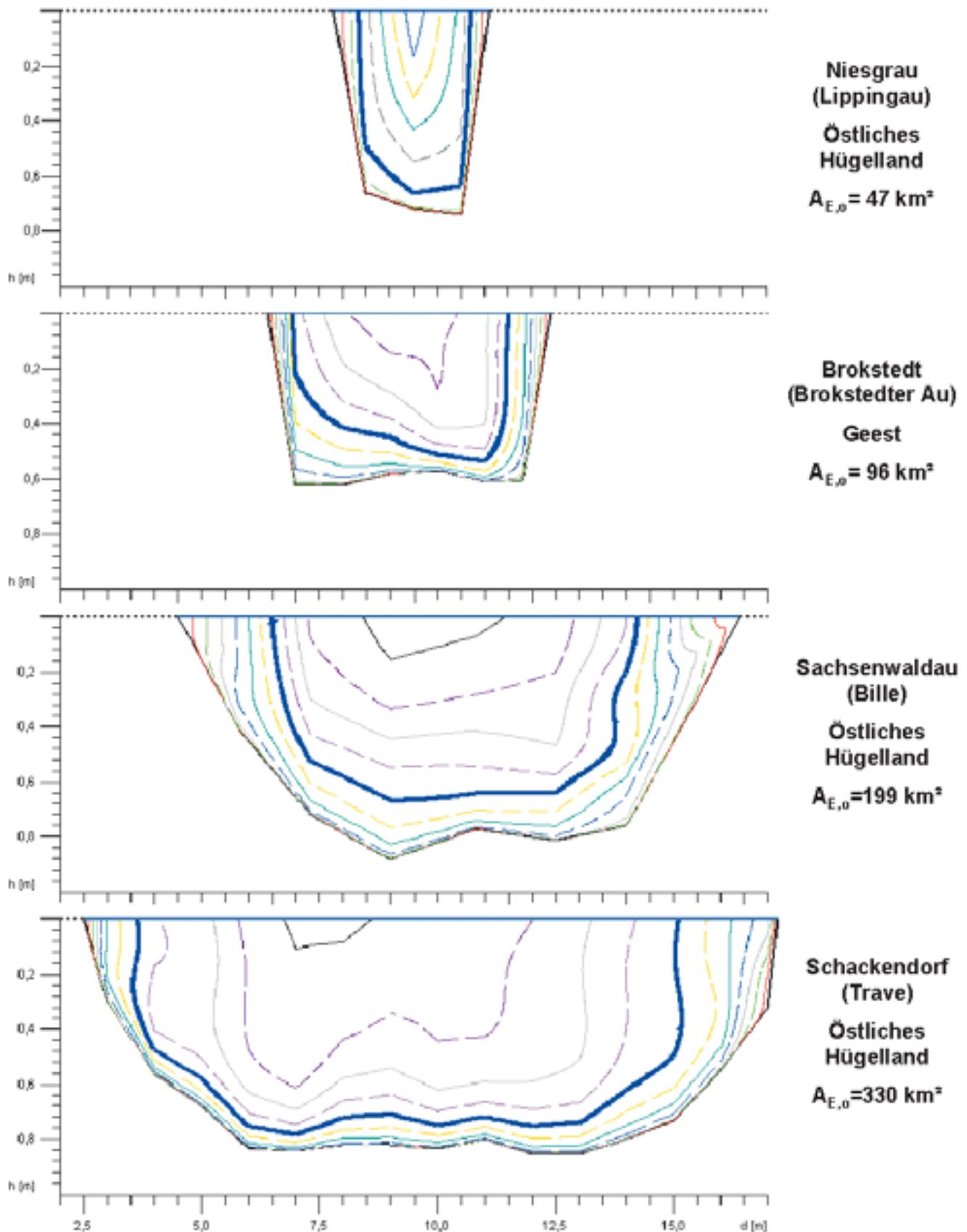


Abbildung B.6: Geschwindigkeitsverteilung im Querprofil für verschiedene Einzugsgebietsgrößen bei Abflüssen im Bereich von 330Q. Die querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit liegt jeweils bei ca. 0,6 m/s. Die dicke blaue Linie entspricht ca. der 0,5 m/s – Isotache. Während bei Einzugsgebieten, die deutlich kleiner als 100 km<sup>2</sup> sind, nicht ausreichend große Bereiche mit Fließgeschwindigkeiten kleiner als 0,5 m/s vorliegen (oben, Pegel Niesgrau), ist dies bei Einzugsgebietsgrößen, die deutlich größer als 100 km<sup>2</sup> sind (unten, Pegel Sachsenwaldau und Schackendorf), der Fall. Bei Einzugsgebietsgrößen von ca. 100 km<sup>2</sup> (2. von oben, Pegel Brokstedt) sind gerade noch ausreichend große Bereiche mit Fließgeschwindigkeiten kleiner als 0,5 m/s vorhanden.

kann, da in diesen Fließgewässern ausreichend große Randbereiche vorliegen, in denen die lokale Fließgeschwindigkeit kleiner als 0,5 m/s ist.

#### **B.4 Natürliche Gewässerbreite nach Regimetheorie**

Im Allgemeinen sollte die Breite einer Sohle der des Gewässers in seinem natürlichen Zustand entsprechen. Bei ausgebauten Gewässerabschnitten sollte daher geprüft werden, ob die Gewässerbreite innerhalb der aus der Regimetheorie ableitbaren natürlichen Gewässerbreiten liegt.

Im Allgemeinen kann die Gewässerbreite  $b$  mit einer Beziehung der Form

$$b = a \cdot Q_{\text{bordvoll}}^c$$

Gleichung B-1

ermittelt werden.

Nach SCHERLE (1999) können zur Abschätzung von natürlichen Gewässerbreiten Regimegleichungen gut herangezogen werden. Der Exponent  $c$  ist dabei in der Regel in der Größenordnung von 0,5. Das bedeutet, dass die natürliche Gewässerbreite proportional zur Wurzel des bordvollen Abflusses ist, der in der Größenordnung von  $HQ_1$  bis  $MHQ$  liegt. Der Faktor  $a$  ist hingegen stark variabel, er schwankt, wenn  $c = 0,5$  ist, im Bereich zwischen 2 bis 5. Die Variabilität ist im Wesentlichen stark vom anstehenden Substrat beeinflusst.

Somit ergibt sich:

$$b = 2 \dots 5 \cdot \sqrt{MHQ}$$

Gleichung B-2

Die Ausprägung des Querschnitts ist in starkem Maße von der Sedimentstruktur insbesondere dem Lehmgehalt abhängig, dabei gilt:

- Je lehmhaltiger Sohle und Böschung, desto tiefer und schmaler ist das Gewässer eingeschnitten
- Je größer der Lehmgehalt, desto kleiner ist das Verhältnis Gewässerbreite zu Gewässertiefe
- Umgekehrt gilt, je sandhaltiger das Sediment ist, desto breiter und flacher ist das Gewässer
- Mit Zunahme des Abflusses vergrößert sich primär die Gewässerbreite und in geringerem Maße die Wassertiefe

# C Hydrologische Bemessung von Sohlgleiten

Die für die hydraulische Bemessung von Sohlgleiten anzuwendenden Verfahren sind im Wesentlichen im DVWK-Merkblatt 232/1996 beschrieben. Sie sind gemäß den biologischen Anforderungen anzupassen.

## C.1 Geschüttete Bauweise

Geschüttete Bauweisen werden generell empfohlen. Das Gefälle im Naturraum Niedere Geest ist kleiner als 1:50 zu wählen, in der Hohen Geest und im Östlichen Hügelland kann auch ein Gefälle von 1:30 gewählt werden, wenn die Einhaltung der biologischen Forderungen dadurch nicht gefährdet wird. (s. C.1.2).

Die Sohlgleite ist so zu bemessen, dass eine mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  kleiner als 0,5 m/s für Einzugsgebiete kleiner als 100 km<sup>2</sup> und kleiner als 0,7 m/s für Einzugsgebiete größer als 100 km<sup>2</sup> bei Abflüssen kleiner als  $330Q$  eingehalten wird.

Der Abfluss  $330Q$  kann, wenn keine detaillierten Informationen vorliegen, aus der Abflussdauerlinie eines benachbarten Pegels über Abflussspenden übertragen werden. Liegt kein benachbarter Pegel vor, so können die in B.1 aufgeführten mittleren Abflussspenden verwendet werden.

Die für die hydraulische Berechnung erforderliche mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  wird aus der Fließformel von DARCY-WEISBACH bestimmt. Der Widerstandsbeiwert  $\lambda$  sollte nach dem Widerstandsgesetz von COLEBROOK-WHITE angesetzt werden.

Die mittlere Fließgeschwindigkeit berechnet sich nach DARCY-WEISBACH ZU:

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gr_{hy}l}$$

Gleichung C-1

$$r_{hy} = \frac{A}{l_u}$$

Gleichung C-2

mit:  $v_m$  = mittlere Geschwindigkeit [m/s]  
 $l$  = Gefälle [-]  
 $A$  = Profilquerschnitt [m<sup>2</sup>]  
 $r_{hy}$  = hydraulischer Radius [m]

$l_u$  = benetzter Umfang [m]

$\lambda$  = Widerstandsbeiwert [-]

Der Widerstandsbeiwert nach COLEBROOK-WHITE lässt sich in Fließgewässern mit rauer Sohle bestimmen zu:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,03 \log \frac{k_s / r_{hy}}{14,84}$$

Gleichung C-3

mit:  $k_s$  = äquivalente Sandrauheit [m]

$r_{hy}$  = hydraulischer Radius [m]

Der Gültigkeitsbereich dieser Beziehung ist für  $k_s < 0,45 r_{hy}$  angegeben. Die äquivalente Sandrauheit  $k_s$  kann für Sohlsubstrat bestimmt werden zu  $k_s \approx d_{90}$ . Für Steinschüttungen kann der mittlere Steindurchmesser angesetzt werden.

Der Abfluss  $Q$  ergibt sich zu:

$$Q = v_m A$$

Gleichung C-4

mit:  $Q$  = Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]

Bei der hydraulischen Berechnung von Sohlgleiten müssen je nach Konstruktion der Fließwiderstand von Störsteinen bei geschütteter Bauweise oder die Steinriegel bei aufgelöster Bauweise gesondert berücksichtigt werden.

### C.1.1 Bemessung von Störsteinen

Beim Einbau von Störsteinen wird die Rauheit des Fließgewässerabschnittes aus der Sohlrauheit und dem Einfluss der Rauheit der Störsteine gebildet. Der Widerstandsbeiwert  $\lambda$  kann für diesen Fall nach ROUVÉ (1987) berechnet werden zu:

$$\lambda_{ges} = \frac{\lambda_s + \lambda_0(1 - \epsilon_0)}{(1 - \epsilon_v)}$$

Gleichung C-5

mit:

$$\lambda_s = 4c_w \frac{\sum A_s}{A_{0,ges}}$$

Gleichung C-6

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_0}} = -2,03 \log \frac{k_s / r_{hy}}{14,84}$$

Gleichung C-7

$$\epsilon_0 = \frac{\sum A_{0,s}}{A_{0,ges}} = \frac{\sum A_{0,s}}{l_u \cdot l} =$$

$$= \frac{\text{Grundfläche der Störsteine}}{\text{betrachtete Gesamtgrundfläche}}$$

Gleichung C-8

$$\epsilon_v = \frac{\sum V_s}{V_{ges}} = \frac{\sum V_s}{A \cdot l} =$$

$$= \frac{\text{eingetauchtes Volumen der Störsteine}}{\text{betrachtetes Gesamtvolumen}}$$

Gleichung C-9

- mit:  $\lambda_{ges}$  = Gesamtwiderstandsbeiwert [-]  
 $\lambda_0$  = Widerstandsbeiwert der Sohle [-]  
 $\lambda_s$  = Widerstandsbeiwert der Störsteine [-]  
 $r_{hy} = A/l_u$  = hydraulischer Radius [m]  
 $k_s$  = äquivalente Sohlrauheit [m]  
 $A_s = d_s \cdot h'$  = angeströmte Fläche der Störsteine [m<sup>2</sup>]  
 $h'$  = Eintauchtiefe der Störsteine [m]  
 $d_s$  = mittlerer Durchmesser der Störsteine  
 $c_w \approx 1,5$  = Formwiderstandsbeiwert [-]

Sollen in unterschiedlichen Profilabschnitten unterschiedliche Steingrößen verwendet werden, so müssen  $\lambda_s$ ,  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_v$  entsprechend Gleichung C-6, Gleichung C-8 und Gleichung C-9 ermittelt werden.

Für die praktische Anwendung zur Ermittlung der erforderlichen Störsteinanzahl und -größe kann der Gesamtwiderstandsbeiwert aus der Superposition des Sohl- und des Störsteinwiderstandes gebildet werden:

$$\lambda_{ges} = \lambda_s + \lambda_0$$

Gleichung C-10

Diese Beziehung kann auch zur Bemessung von Profilen mit unterschiedlicher Störsteingröße in verschiedenen Profilabschnitten (NQ, MQ, ...) angewendet werden. Hierbei ist der Störsteinwiderstand getrennt für die Profilabschnitte mit den jeweils relevanten Wassertiefen zu ermitteln.

Es wird darauf hingewiesen, dass zur Ermittlung der Wasserspiegellagen bei Bemessungsabfluss  $HQ_{100}$  oder  $HQ_{50}$  der im DVWK-Merkblatt 232 angegebene Anwendungsbereich  $h_m/h_s < 1,5$  in der Regel überschritten sein wird. Das DVWK-Merkblatt lässt die Frage offen, wie in diesem Fall der Reibungsansatz zu wählen ist, weshalb auch im Rahmen der

Empfehlung keine über das DVWK-Merkblatt 232 hinaus gehenden Empfehlungen gegeben werden können.

$$\lambda_s = 4c_w \frac{A_s}{a_x a_y}$$

Gleichung C-11

- mit:  $A_s = d_s \cdot h'$  = angeströmte Fläche der Störsteine [m<sup>2</sup>]  
 $c_w \approx 1,5$  = Formwiderstandsbeiwert [-]  
 $a_x$  = mittlerer Abstand der Störsteine in Fließrichtung [m]  
 $a_y$  = mittlerer Abstand der Störsteine quer zur Fließrichtung, bei nur einem Stein im Querschnitt ist  $a_y$  gleich der Gerinnebreite [m]

Die maximale Fließgeschwindigkeit in den Engstellen zwischen den Störsteinen kann mit der folgenden Formel abgeschätzt werden:

$$v_{max} = \frac{v_m}{1 - \frac{\sum A_s}{A_{ges}}}$$

Gleichung C-12

- mit:  $v_{max}$  = maximale Geschwindigkeit [m/s]  
 $v_m$  = mittlere Geschwindigkeit [m/s]  
 $\sum A_s$  = Summe der angeströmten Störsteinflächen [m<sup>2</sup>]  
 $A_{ges}$  = Fließquerschnitt [m<sup>2</sup>]

Da die Störsteine unregelmäßig zu verteilen sind, ist von einer hohen Strömungsdiversität innerhalb der Sohlgleite auszugehen. Bei einem maximal zulässigen Anteil der Störsteinfläche innerhalb der Sohlgleite von 20% (Draufsicht), liegt die maximale Geschwindigkeit zwischen den Störsteinen  $v_{max}$  auch ca. 25% über dem geforderten  $v_m$ . Bei der Betrachtung einzelner Profile kann es zu einer darüber hinausgehenden Erhöhung von  $v_m$  kommen. Es wird aufgrund der hohen Strömungsdiversität davon ausgegangen, dass hier keine separate Forderung für die Geschwindigkeit in den Engstellen aufgestellt werden muss, da bei der geschütteten Bauweise anders als bei der Riegelbauweise kein Flaschenhalseffekt auftritt.

Ein Nachweis der FROUDE-Zahl ist aufgrund der geforderten vergleichsweise geringen Fließgeschwindigkeiten und der erwarteten hohen Strömungsdiversität nicht erforderlich. Die oben genannten Berechnungsformeln sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nur in den folgenden Bereichen gültig:

Gefälle:  $I \leq 1:20$   
 Wassertiefe:  $h_m/h_s < 1,5$   
 mit:  $h_m$  = mittlere Wassertiefe  
 $h_s$  = Störsteinhöhe ab  
 Sohle

Abstände der Störsteine:  $a_x = a_y = 1,5 \text{ bis } 3 d_s$   
 $A_y - d_s > 0.3 \text{ m}$

Die Angaben über den mittleren Störsteinabstand sind für die Bemessung, nicht aber für die Bauausführung maßgebend, da es wünschenswert ist, die Störsteine eher unregelmäßig anzuordnen, um eine hohe Strömungsdiversität zu erreichen.

Ziel sollte es sein, den Großteil der Energieumwandlung durch vergleichsweise große Störsteine in der Niedrigwasserrinne zu realisieren. Oberhalb des Mittelwasserprofils sollten eher kleinere Störsteine Verwendung finden, da diese Bereiche den größten Teil des Jahres trocken liegen.

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass die sich aus der Bemessung ergebenden Störsteindurchmesser innerhalb des oben aufgeführten Anwendungsbereiches der verwendeten Berechnungsansätze liegen. Die ambitionierten Forderungen hinsichtlich einzuhaltender Geschwindigkeiten werden es aber erforderlich machen, die Berechnungsansätze auch über den bisher bekannten Anwendungsrahmen hinaus anzuwenden. Daher sollten kleinere Überschreitungen des bisherigen Anwendungsrahmens toleriert werden.

Zur Berechnung von Wasserspiegellagen oberhalb, innerhalb und unterhalb von Sohlgleiten

können Wasserspiegellagenmodelle eingesetzt werden.

### C.1.2 Umsetzung der Bemessung von Störsteinen für die Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse

Der generelle Ablauf der Bemessung von Störsteinen einer geschütteten Sohlgleite ist in Abbildung C.1 dargestellt.

Bei der Optimierung sollten folgende Grundzusammenhänge berücksichtigt werden:

- Das Sohlsubstrat hat nur sehr geringen Einfluss auf die Energieumwandlung.
- Relativ kleine Störsteine im Niedrigwasserprofil erfordern mehr Störsteine im Mittelwasser- und 330Q-Profil, um auch für höhere Abflüsse die Geschwindigkeitsforderungen einhalten zu können.
- Relativ große Wassertiefen erfordern größere Störsteine im Niedrigwasserprofil, um auch im Mittelwasser- und 330Q-Profil noch eine ausreichende Reibungswirkung zu erzielen.
- Je kleiner die Wassertiefen sind, umso leichter lässt sich eine Störsteinfläche kleiner 20% erreichen, umso breiter wird jedoch das erforderliche Profil. Hier besteht die Gefahr eines überbreiten Profils.
- Ein geringes Gefälle führt zu einer geringen Steindichte, jedoch werden insgesamt aufgrund der größeren Länge mehr Störsteine benötigt, womit die Kosten steigen.

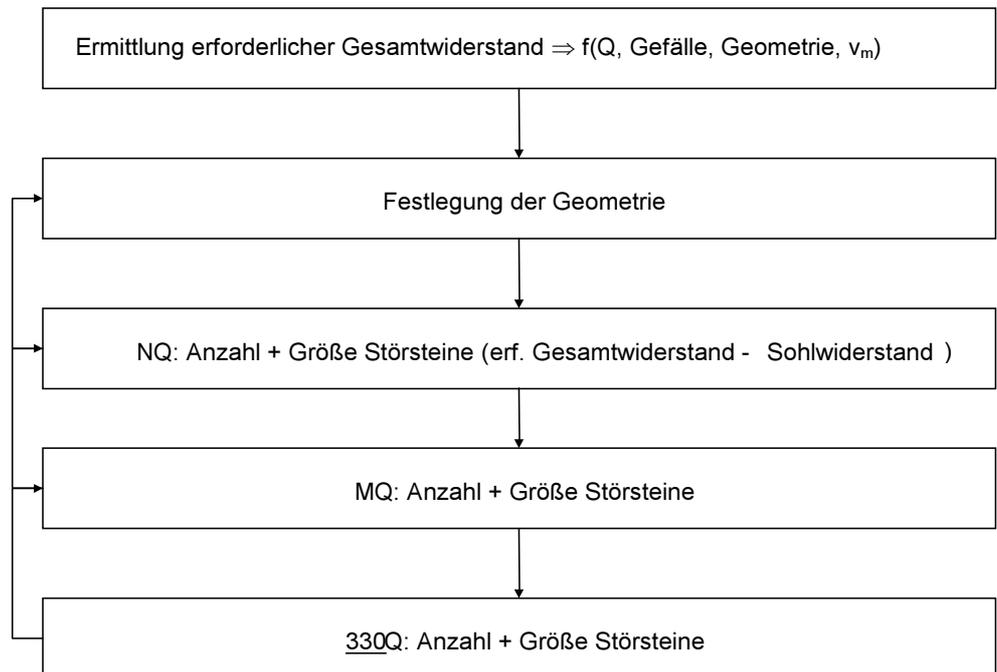


Abbildung C.1: Schematischer Ablauf der Bemessung von geschütteten Sohlgleiten

Folgende Parameter sind so zu optimieren, dass die formulierten biologischen Anforderungen erfüllt werden können:

- Zulässige mittlere Geschwindigkeit  $v_m$
- Gefälle
- Betriebsabfluss MNQ
- Betriebsabfluss MQ
- Betriebsabfluss 330Q
- Geometrie Niedrigwasserquerschnitt ( $h_{MNQ}, b_{MNQ}$ )
- Geometrie Mittelwasserquerschnitt ( $h_{MQ}, b_{MQ}$ )
- Geometrie bei Betriebsabfluss 330Q ( $h_{330Q}, b_{330Q}$ )
- Durchmesser Störsteine Niedrigwasserprofil
- Durchmesser Störsteine Mittelwasserprofil
- Durchmesser Störsteine Hochwasserprofil
- Durchmesser Sohlsubstrat

Bei kleineren Gewässern ist es nicht erforderlich, alle Profile bautechnisch auszubilden. Die Störsteine werden hier in der Regel eine einheitliche Größe aufweisen.

Bei einer Anzahl von 12 freien Parametern müssen eine Anzahl Grundannahmen getroffen werden, um Aussagen treffen zu können, die die gesamte Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse umfassen.

- $V_m(330Q)$  kleiner 0,5 m/s für Einzugsgebiete kleiner 100 km<sup>2</sup>
- $V_m(330Q)$  kleiner 0,7 m/s für Einzugsgebiete größer 100 km<sup>2</sup>
- Ansatz von MNQ = 2,5 l/(s km<sup>2</sup>) \*  $A_{Eo}$
- Ansatz von MQ = 10 l/(s km<sup>2</sup>) \*  $A_{Eo}$
- Ansatz von 330Q = 25 l/(s km<sup>2</sup>) \*  $A_{Eo}$
- Ansatz von  $b_{330Q} = b_{Regime} = 3 \cdot \sqrt{MHQ} = 3 \cdot \sqrt{60} \text{ l/(s km}^2) \cdot A_{Eo}$  (vgl. B.4)
- Geometrische Abmessungen des Profils werden für unterschiedliche Gefälle nicht variiert
- Abmessungen der Störsteine werden für unterschiedliche Gefälle nicht variiert.
- Abmessungen der Störsteine im Niedrig-

und Mittelwasserprofil orientieren sich an der Beziehung:  $d_s$  größer als 0.5 x mittlere Wassertiefe. Im 330Q-Profil muss diese Bedingung nicht eingehalten werden.

- Das Sohlsubstrat hat sehr geringen Einfluss auf Energieumwandlung und wird konstant mit  $d = 0,1 \text{ m}$  angesetzt.

Im Folgenden werden für 3 unterschiedliche Einzugsgebietsgrößen die sich ergebenden geometrischen Abmessungen, erforderlichen Störsteinabmessungen und Störsteinflächen ermittelt. Hierdurch soll ein Überblick gegeben werden, welche Grundzusammenhänge bei der Gestaltung von geschütteten Sohlgleiten zu beachten sind, welcher Spielraum der Bemessung zur Erfüllung der biologischen Anforderungen zur Verfügung steht und in welchen Fällen sich die Erfüllung der biologischen Anforderungen aus hydraulischer Sicht besonders kritisch darstellt. In Tabelle C.1 sind die sich unter den genannten Voraussetzungen ergebenden Profilgeometrien und optimierten Störsteinabmessungen dargestellt.

Aus den Berechnungsergebnissen können folgende Einschätzungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit der biologischen Anforderungen abgeleitet werden:

- **EZG kleiner als 30 km<sup>2</sup>:** Die Erfüllung der biologischen Anforderungen wird bei Sohlgleiten mit einem Gefälle flacher als 1:50 in der Regel möglich sein. Bei einem Gefälle von 1:30 kann die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,5 m/s unter Umständen nicht erfüllt werden. Es wird hier zu prüfen sein, ob man gegebenenfalls eine höhere zulässige Geschwindigkeit (größer als 0,5 m/s), eine höhere zulässige Störsteinfläche (größer als 20%) oder eine breitere Profilgeometrie hinnimmt.
- **EZG 30 – 100 km<sup>2</sup>:** Die Erfüllung der biologischen Anforderungen wird bei einem Gefälle von 1:30 bei einem EZG knapp unter 100 km<sup>2</sup> nahezu unmöglich. Generell

Tabelle C.1: Bemessung von Störsteinen. Ergebnisse für drei charakteristische Einzugsgebietsgrößen. In den grau unterlegten Feldern wird die zulässige Störsteinfläche von 20% überschritten. v: Fließgeschwindigkeit, b\_Reg: Natürliche Gerinnebreite berechnet nach der Regimetheorie, b: Gerinnebreite, h: Wassertiefe, d: Höhe der Störsteine über Sohle.

EZG	Q [m³/s]	Geometrie									1:30		1:50		1:100	
		b_Reg [m]	b (v=0,5) [m]	h (v=0,5) [m]	d (v=0,5) [m]	b (v=0,7) [m]	h (v=0,7) [m]	d (v=0,7) [m]	vm=0,5	vm=0,7	vm=0,5	vm=0,7	vm=0,5	vm=0,7		
									m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s		
30 km <sup>2</sup>	MNQ 0,075		0,8	0,2	0,35	-	-	-	18,9%	-	11,8%	-	4,9%	-		
	MQ 0,3		2,3	0,4	0,1	-	-	-	13,5%	-	11,0%	-	7,6%	-		
	330Q 0,75	4,0	4,5	0,6	0,1	-	-	-	23,4%	-	18,6%	-	11,7%	-		
100 km <sup>2</sup>	MNQ 0,25		1,7	0,3	0,4	1,2	0,3	0,45	25,0%	14,2%	16,9%	8,6%	8,7%	3,5%		
	MQ 1		5	0,6	0,15	3,6	0,6	0,15	24,3%	15,5%	19,1%	11,5%	12,3%	7,1%		
	330Q 2,5	7,3	7,5	1	0,1	7,1	0,9	0,1	58,0%	19,8%	48,6%	15,3%	33,8%	9,3%		
300 km <sup>2</sup>	MNQ 0,75		-	-	-	2,7	0,4	0,5	-	19,0%	-	12,2%	-	5,9%		
	MQ 3		-	-	-	8	0,8	0,2	-	22,0%	-	16,1%	-	9,5%		
	330Q 7,5	12,7	-	-	-	14,3	1,25	0,1	-	29,6%	-	23,9%	-	15,8%		

wird hier zu flacheren Gefällen geraten. Selbst bei einem Gefälle von 1:50 kann die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,5 m/s in der Regel nicht erfüllt werden. Es wird hier zu prüfen sein, ob man gegebenenfalls eine höhere zulässige Geschwindigkeit (größer als 0,5 m/s), eine höhere zulässige Störsteinfläche (größer als 20%) oder eine überbreite Profilgeometrie hinnimmt. Die Riegelbauweise ist allerdings keine Alternative: Da in den Lücken zwischen den Riegeln ohnehin aus hydraulischen Gründen ein  $v_m = 0,7$  m/s hingenommen werden muss (vgl. Kapitel C.2.2), sollte in solchen Fällen eher eine geschüttete Sohlgleite umgesetzt und ein  $v_m$  kleiner als 0,7 m/s hingenommen werden, wodurch die anderen biologischen Anforderungen (Störsteinfläche kleiner als 20%; Profilgeometrie) zu erfüllen sind.

- **EZG 100 – 300 km<sup>2</sup>:** Die Erfüllung der biologischen Anforderungen wird selbst bei Sohlgleiten mit einem Gefälle von 1:30 in der Regel möglich sein.
- **EZG größer als 300 km<sup>2</sup>:** Die Erfüllung der biologischen Anforderungen wird bei Sohlgleiten mit einem Gefälle flacher als 1:50 in der Regel möglich sein. Bei einem Gefälle von 1:30 kann die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,7 m/s unter Umständen nicht erfüllt werden. Hier sollte geprüft werden, ob die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,7 m/s gegebenenfalls erhöht werden kann.

In allen Varianten kommen oberhalb des Mittelwasserprofils nur noch Störsteine mit einem Durchmesser  $d$  von 0,1 m zum Einsatz. Dies steht nur scheinbar im Widerspruch zu der Aussage, dass das Sohlsubstrat, welches einen Durchmesser in der gleichen Größenordnung aufweist, nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtwiderstand hat. Zu unterscheiden ist hier zwischen dem Fließwiderstand einer mehr oder weniger ebenen Fläche und dem Fließwiderstand eines einzelnen exponierten Hindernisses. Bei dem genannten Störsteindurchmesser handelt es sich also um das erforderliche Maß der Exposition des einzelnen Störsteins.

### C.1.3 Nachweis der Stabilität des Sohlsubstrats

Die Standsicherheit der Sohlgleite und die Stabilität des Sohlmaterials sind innerörtlich für ein  $HQ_{100}$  und außerhalb von Ortschaften für ein  $HQ_{50}$  nachzuweisen. In Ausnahmefällen kann bei einem hohen Schadenspotential auch außerörtlich ein Bemessungsabfluss  $HQ_{100}$  angesetzt werden. Um die Stabilität einer Sohl-

gleite zu gewährleisten, müssen die notwendigen Mindeststeingrößen ermittelt werden. Nach WHITTAKER & JAGGI (1986) gilt als Stabilitätskriterium für geschüttete Sohlrampen:

$$q_{zul} = 0,257 \sqrt{g \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} l^{-7/6} d_{65}^{3/2}$$

Gleichung C-13

GEBLER (1991) empfiehlt für Sohlgleiten in lockerer Bauweise einen zusätzlichen Sicherheitsaufschlag von 10 bis 20%. WHITTAKER & JAGGI (1986) empfehlen den zulässigen spezifischen Abfluss  $q_{zul}$  um 20% abzumindern, da Gleichung C-13 für dicht gepackte Schüttsteindeckwerke unter Laborbedingungen ermittelt wurde.

Mit:

$$d_{65} \approx \frac{d_s}{1,06}$$

Gleichung C-14

$\rho_s = 2700$  kg/m<sup>3</sup> und einem Sicherheitsaufschlag von 20% ergibt sich folgende vereinfachte Gleichung:

$$q_{zul} = 0,246 \sqrt{g} l^{-7/6} d_s^{3/2}$$

Gleichung C-15

Aufgrund des gegliederten Profils ist der breitenspezifische Abfluss in der Niedrigwasserrinne höher als im Hochwasserprofil, dadurch ist in der Niedrigwasserrinne ein gröberes Sohlsubstrat erforderlich.

- mit:  $q_{zul}$  = zulässiger spezifischer Abfluss [m<sup>3</sup>/(m\*s)]  
 $l$  = Gefälle der Sohlgleite [-]  
 $d_s$  = äquivalenter Kugeldurchmesser der Steine [m]  
 $d_{65}$  = Korndurchmesser bei 65% Siebdurchgang  
 $\rho_s$  = Dichte der Steine [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  = Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

Im Folgenden wird für die Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse aufgezeigt, wann die biologischen Anforderungen ohne weitere Einschränkungen umsetzbar sind, ohne die Stabilität des Bauwerks zu gefährden.

Hierzu müssen Grundannahmen getroffen werden, um Aussagen über die gesamte Bandbreite möglicher Verhältnisse treffen zu können:

- Der zulässige spezifische Bemessungsabfluss wird gemäß Gleichung C-15 ermittelt.

## Erforderlicher Durchmesser des Sohlmaterials in Abhängigkeit des Gefälles und $A_{E,o}$

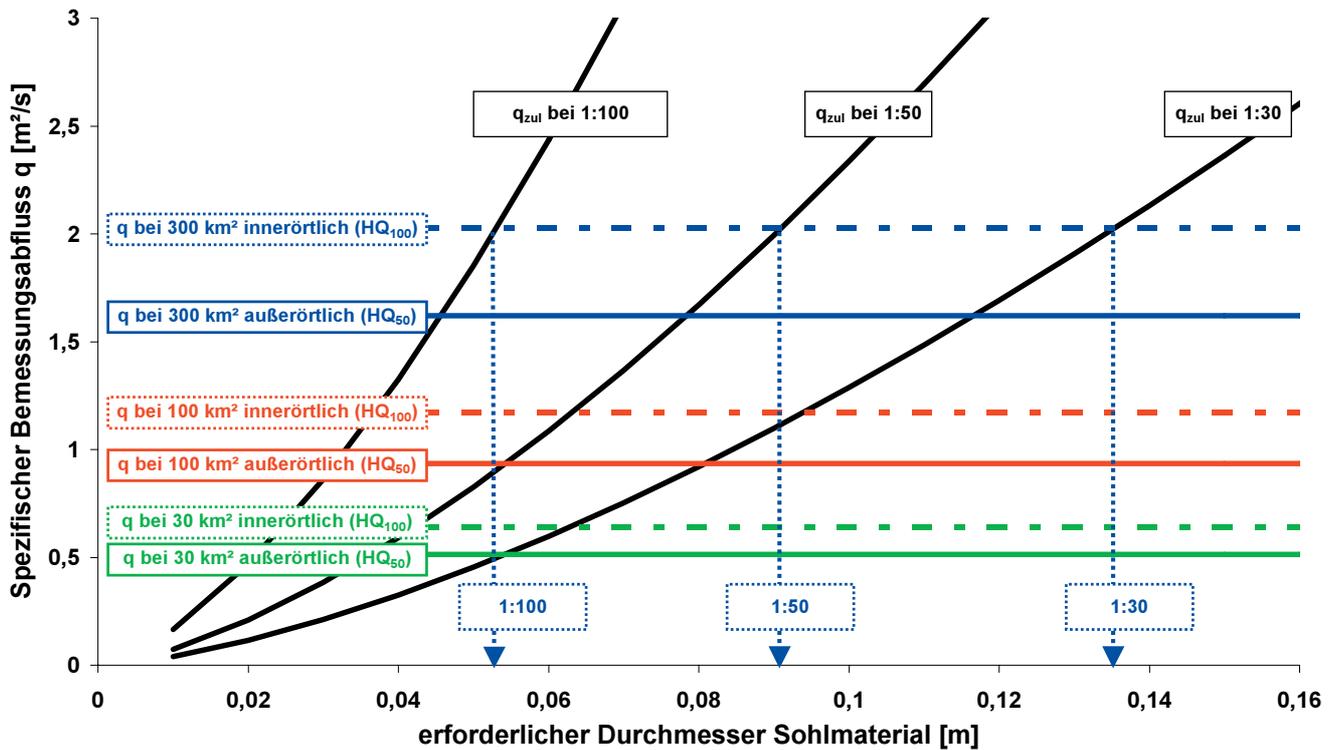


Abbildung C.2: Erforderlicher Durchmesser des Sohlsubstrats. Schwarze Linien: Zulässiger spezifischer Abfluss bei unterschiedlichen Gefällen in Abhängigkeit von der Größe des Sohlsubstrats. Blaue, rote und grüne Linien: Vorhandener spezifischer Bemessungsabfluss für unterschiedliche Einzugsgebietsgrößen. Liegt die schwarze Linie über der bunten, ist das Sohlmaterial lagestabil. Beispielsweise ergibt sich für eine innerörtliche Sohlgleite mit einem EZG von 300 km<sup>2</sup> bei einem Gefälle von 1:50 ein erforderlicher Durchmesser von 0,09 m.

- Der vorhandene spezifische Bemessungsabfluss wird aus  $Q_{\text{Bemessung}}/b_{\text{bordvoll}}$  ermittelt. Innerörtlich wird für  $Q_{\text{Bemessung}} = HQ_{100} = 100 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2 \cdot A_{E,o}$  angesetzt. Außerörtlich wird für  $Q_{\text{Bemessung}} = HQ_{50} = 80 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2 \cdot A_{E,o}$  angesetzt. Für die bordvolle Gewässerbreite wird gemäß Regime-theorie (vgl. B.4)  $b_{\text{bordvoll}} = 3,5 \cdot \sqrt{MHQ} = 3,5 \cdot \sqrt{60 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2 \cdot A_{E,o}}$  angesetzt.

Somit können für das Bemessungsereignis der vorhandene und der zulässige spezifische Abfluss ermittelt werden. Liegt der zulässige spezifische Abfluss über dem vorhandenen, so besteht keine Erosionsgefahr, dabei ist jedoch in der tiefer liegenden Niedrigwasserrinne der breitenspezifische Abfluss gesondert nachzuweisen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung C.2 dargestellt.

Die Stabilität des Sohlmaterials muss für jede Sohlgleite individuell nachgewiesen werden. Es ist aus Abbildung C.2 jedoch erkenntlich, dass unter den getroffenen Annahmen ein Sohlsubstrat in der Regel lagestabil ist, das in der Größenordnung von 0,08 bis 0,1 m liegt und somit die biologischen Anforderungen erfüllt. In Abhängigkeit des Gefälles lassen sich folgende Aussagen treffen.

- **Gefälle 1:30:** Das aus den biologischen Anforderungen abgeleitete Sohlmaterial mit einem Durchmesser von 8 bis 10 cm wird in der Regel nur bei EZG kleiner als 100 km<sup>2</sup> bei Bemessungsabfluss lagestabil bleiben (innerörtlich: 10 cm; außerörtlich 8 cm). Bei größeren Einzugsgebieten wird zu prüfen sein, ob man größeres Sohlmaterial oder eine unter Umständen überbreite Profilgeometrie hinnimmt. Es wird weiterhin zu prüfen sein, ob durch die vorhandenen Störsteine eine Stabilisierung des Sohlmaterials auftritt.
- **Gefälle 1:50:** Das aus den biologischen Anforderungen abgeleitete Sohlmaterial mit einem Durchmesser von 8 bis 10 cm bleibt bei EZG bis ca. 300 km<sup>2</sup> lagestabil.
- **Gefälle 1:100:** Das aus den biologischen Anforderungen abgeleitete Sohlmaterial mit einem Durchmesser von 8 bis 10 cm bleibt generell lagestabil.

### C.1.4 Umsetzung der gestalterischen Vorgaben

Die Sohlgleite ist aus einer unsortierten Steinschüttung (Naturmaterial) mit Durchmessern 50 - 300 mm als eine durchgehende Stein- und

Kieslage mit einer Schichtdicke von mindestens 30 bis 50 cm herzustellen, sofern die Stabilität für Bemessungsabfluss nachgewiesen wurde. Ein mittlerer Korndurchmesser  $d_m$  von 8 – 10 mm sollte nicht unterschritten werden. Das Porenvolumen dieser Geröllschüttung sollte mit Material der Körnungen 2/16, 8/16 und 16/64 mm verfüllt werden. Feineres Material soll in der Bauphase nicht eingebracht werden. Das Material kann nach Kornfraktionen getrennt angeliefert und vor Ort gemischt eingebaut werden. Alternativ kann eine gemischte, breit gestreute Körnungslinie für das Material direkt Verwendung finden. Ein geeigneter Ungleichförmigkeitsgrad ist in jedem Fall sicherzustellen.

Bei trockener Bauweise kann ein mineralischer Filter gewählt werden, der nach den folgenden Filterregeln (NESTMANN & LEHMANN 2000) beim Übergang vom Deckwerk zum Unterbau und vom Unterbau zu anstehendem Sohlmaterial zu erstellen ist:

Für gestreckte Kornverteilungskurven:

$$\frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \leq 5$$

Gleichung C-16

mit:  $d_{15,F}$  = Korndurchmesser des Filters (gröberes Material) bei 15% Siebdurchgang [m]

$d_{85,B}$  = Korndurchmesser der Basis (feineres Material) bei 85% Siebdurchgang [m]

Für steile, parallele Kornverteilungskurven:

$$\frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \leq 4$$

Gleichung C-17

In nasser Bauweise ist es bautechnisch nicht möglich, diese Filterregeln einzuhalten. Das gleiche Material kann auch im Bereich der Nachbettsicherung eingesetzt werden. Die Schüttung sollte hier ebenfalls eine Schichtdicke von mindestens 30 cm aufweisen.

Die Nachbettsicherung ist wie folgt auszuführen:

Nach GEBLER (1991) ergibt sich die erforderliche Kolkentiefe  $h_{\text{Kolk}}$  zu:

$$t = h_{\text{Kolk}} = \frac{h_R}{3} \text{ bis } \frac{h_R}{2}$$

Gleichung C-18

mit:  $h_{\text{Kolk}}$  = Kolkentiefe [m]  
 $h_R$  = Absturzhöhe [m]

Die Länge des Übergangsbereichs vom Kolk-tiefpunkt bis zur natürlichen Gewässersohle im Unterwasser ergibt sich zu:

$$l_U = 7 \text{ bis } 10 \cdot h_R$$

Gleichung C-19

mit:  $l_U$  = Länge des Übergangsbereichs [m]

Die Kolkbreite sollte nicht breiter als das 330Q-Profil sein.

Da die zulässigen mittleren Fließgeschwindigkeiten  $v_m$  vergleichsweise niedrig liegen, wird zunächst die Anwendung der unteren Grenzwerte von GEBLER (1991) empfohlen. Eine Überprüfung der Bemessungsansätze sollte aber durch Erfolgskontrollen (vgl. D.2) sichergestellt werden. Insbesondere ist eine dauerhafte Ansammlung von Feinmaterial innerhalb und unterhalb des Kolks unerwünscht.

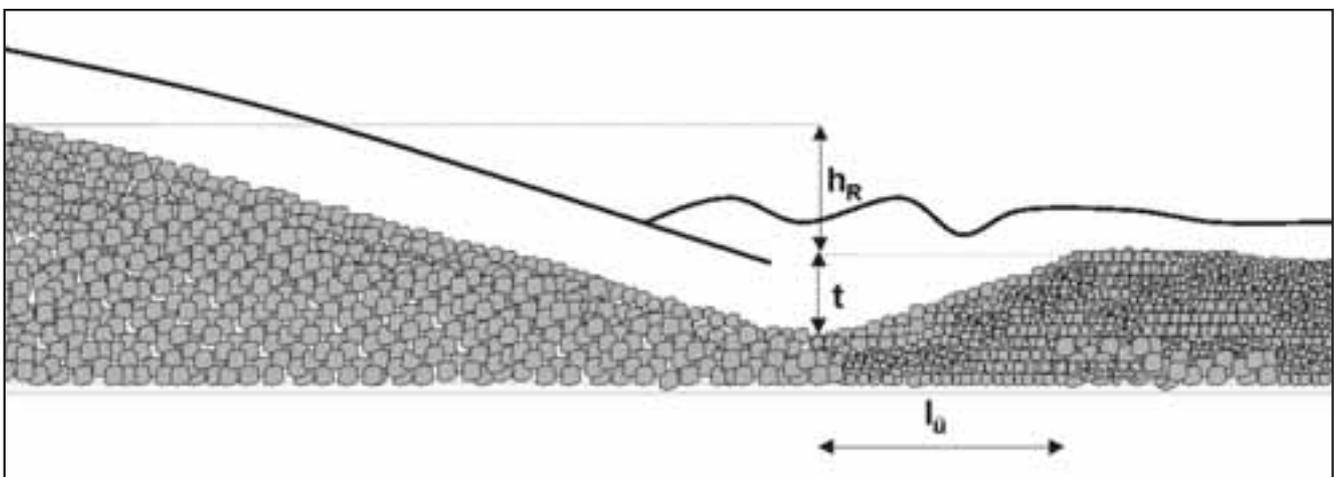


Abbildung C.3: Schemaskizze zur Nachbettsicherung

Die Böschung ist oberhalb des 330Q -Profils mit Lebendbauweise zu sichern.

## C.2 Riegelbauweise

Bei der Riegelbauweise werden einzelne tief gegründete Steinriegel so angeordnet, dass eine Kaskade aus einer Riegel-Becken-Struktur entsteht. Die Becken können mit dem anstehenden Sohlenmaterial verfüllt und einer natürlichen Dynamik überlassen werden. Auf die Einhaltung der maximalen Fließgeschwindigkeit in den Durchlässen soll besonders hingewiesen werden. In den Lücken ist schießender Abfluss zu vermeiden, da schießender Abfluss für die Fischfauna aus reiner Schwimmbewegung heraus physikalisch unmöglich zu überwinden ist. Die Steinriegel bestehen aus einzelnen größeren Feld-, Bruch- oder Wasserbausteinen, zwischen denen sich Durchlassöffnungen befinden. Dabei sollen die Lückenbreiten so bemessen werden, dass es auch bei geringen Abflüssen zu einem Aufstau in den Becken kommt. Gleichzeitig müssen die Lücken eine Mindestbreite aufweisen, um eine Verstopfung zu verhindern.

Zwischen den Steinen sollten Schlitz angeordnet werden, damit eine Durchwanderung der Gleite im Bereich des Sohlsubstrates (auf der Sohle und im Lückensystem) ermöglicht wird.

### C.2.1 Bemessung der Lückenbreiten

Das Abflussverhalten über und durch die Steinriegel kann mit den hydraulischen Gesetzmäßigkeiten des Überfalls über ein Wehr bestimmt werden. Der Einfluss, der durch vollkommenen oder rückgestauten Überfall entsteht, wird durch den Beiwert  $\sigma$  berücksichtigt (Abbildung C.5).

Als Bemessungswerkzeug für Überfälle steht die Poleni-Formel zur Verfügung, die eine ausreichend genaue Abschätzung ermöglicht:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sigma \left( \sum b_s \right) \sqrt{2g} \left( h_u^{3/2} \right)$$

Gleichung C-20

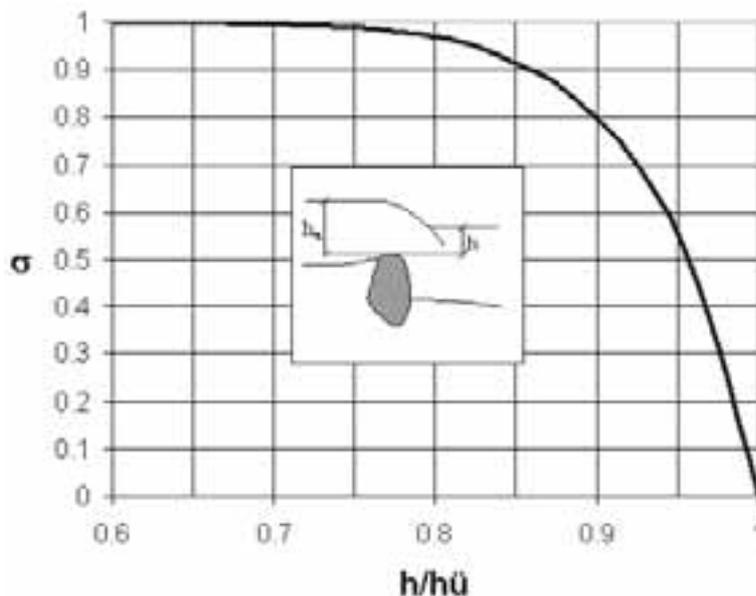


Abbildung C.5: Abminderungsbeiwert  $\sigma$  in Anlehnung an DVWK (1996)

Sollen für einen gewählten minimalen Abfluss die lichten Durchflussbreiten zwischen den einzelnen Steinen der Riegel bestimmt werden, so folgt:

$$\sum b_s = \frac{Q_{\min}}{\frac{2}{3} \mu \sigma \sqrt{2g} \left( h_u^{3/2} \right)}$$

Gleichung C-21

- mit:  $\sum b_s$  = Summe der lichten Durchflussbreiten, d.h. der Lückenbreiten zwischen den Steinen [m]  
 $Q_{\min}$  = minimaler Bemessungsabfluss [m<sup>3</sup>/s]  
 $\mu$  = Überfallbeiwert [-]  
 $\sigma$  = Abminderungsbeiwert nach Abbildung C.5 [-]  
 $h_u$  = Überfallhöhe [m]

Die Überfallbeiwerte für Steinriegel können nach DVWK (1996) abgeschätzt werden zu:

- $\mu$  = 0,5 bis 0,6 für breite, kantige Steine und gebrochenes Material  
 $\mu$  = 0,6 bis 0,8 für abgerundete Steine



Abbildung C.4: Schemaskizze zur Riegelbauweise, bei der die Lücken auf verschiedenen Sohlhöhen und Schlitz mit durchgehender Sohle angeordnet sind.

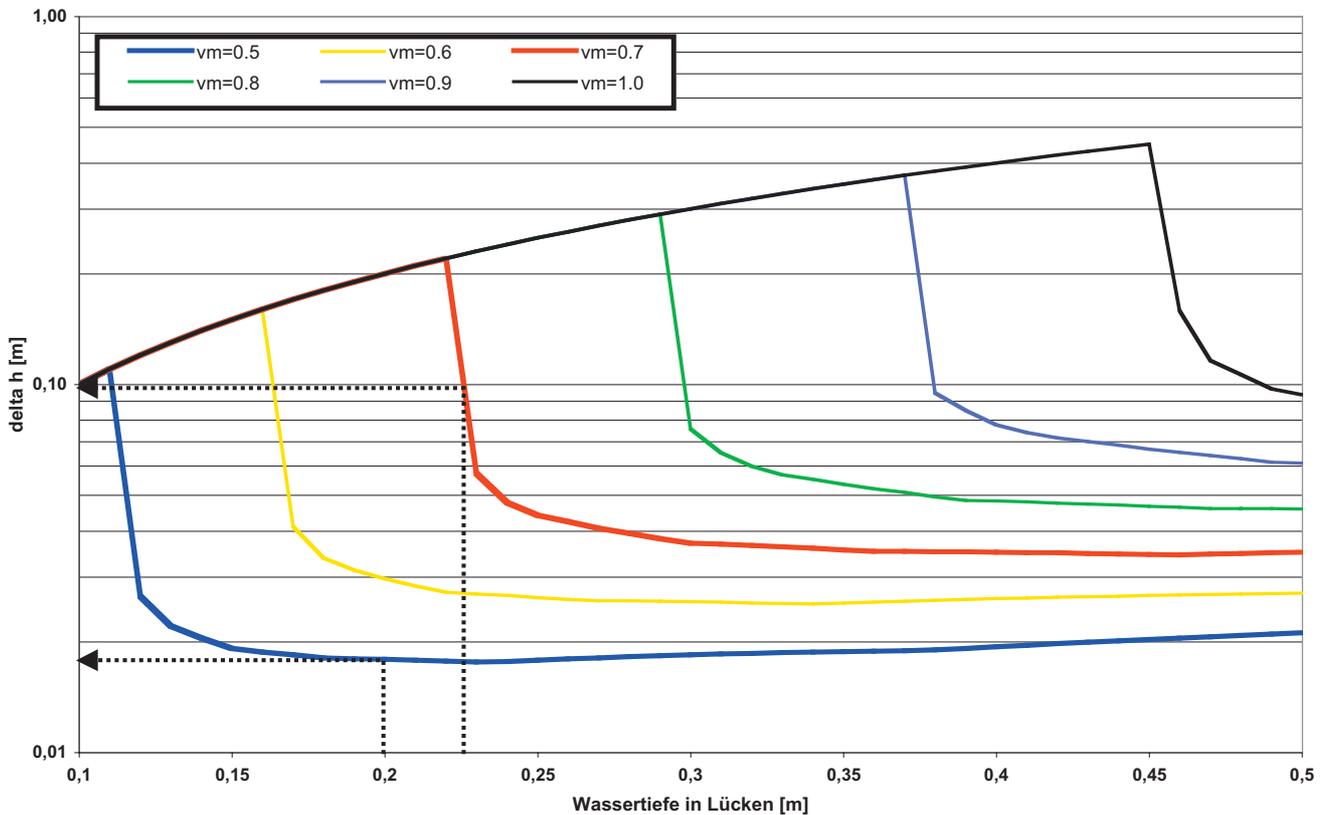


Abbildung C.6: Zusammenhang zwischen mittlerer Fließgeschwindigkeit  $v_m$ , Wassertiefe in den Lücken und Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  zwischen Ober- und Unterwasser. Beispielsweise ergibt sich bei einer zulässigen Wassertiefe in den Lücken von 0,2 m und einer zulässigen mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_m$  in den Lücken von 0,5 m/s (blaue Linie) eine zulässige maximale Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von weniger als 0,02 m. Um eine praktischen Anforderungen genügende Wasserspiegeldifferenz von 0,1 m zu erhalten, muss eine mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  in den Lücken von 0,7 m/s (rote Linie) hingenommen werden.

Haben die Durchlassöffnungen unterschiedliche Höhen oder werden die Steinriegel vollständig überströmt, müssen die Berechnungen abschnittsweise durchgeführt werden. Bemessungen nach anderen Überfallformeln, z.B. nach der Formel von DU BUAT oder WEISBACH, sind gegenüber der POLENI-Formel theoretisch besser begründet. Da aufgrund der Heterogenität der Riegel eine absolute Genauigkeit nicht erreicht werden kann, ist die Anwendung der Überfallformel von POLENI ausreichend.

Um eine Verstopfung der Lücken zu verhindern, wird eine Mindestlückenbreite von 0,2 m gefordert, sofern die Summe der lichten Durchflussbreiten  $\Sigma b_s$  aus Gleichung C-20 über diesem Grenzwert liegt.

### C.2.2 Umsetzung der Bemessung der Lückenbreiten für die Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse

Im folgenden Berechnungsbeispiel wird exemplarisch aufgezeigt, welche Bandbreite bei der Bemessung der erforderlichen Lückenbreiten zur Verfügung steht, wenn die biologischen Anforderungen eingehalten werden.

Die erforderliche Lückenbreite ergibt sich zu:

$$\Sigma b_s = \frac{Q}{\frac{2}{3} \mu \sigma \sqrt{2g} (h_u^{3/2})}$$

Gleichung C-22

mit:  $\Sigma b_s$  = Summe der lichten Durchflussbreiten, d.h. der Lückenbreiten zwischen den Steinen [m]

$Q$  = Abfluss [m<sup>3</sup>/s]

$\mu$  = Überfallbeiwert [-]

$\sigma$  = Abminderungsbeiwert [-]

$h_u$  = Überfallhöhe [m]

Aus der Kontinuitätsgleichung ergibt sich für Verhältnisse bei Betriebsabfluss:

$$Q = v_m \cdot A = v_m \cdot h_u \cdot b_s$$

Gleichung C-23

Setzt man Gleichung C-23 in Gleichung C-22 ein, so lässt sich nach der Überfallhöhe  $h_u$  auflösen:

$$h_{\bar{u}} = \left( \frac{v_m}{\frac{2}{3} \cdot \mu \sigma \sqrt{2g}} \right)^2$$

Gleichung C-24

Der Abminderungsbeiwert  $\sigma$  ist abhängig von dem Verhältnis (vgl. Abbildung C.5):

$$\frac{h}{h_{\bar{u}}} = \frac{h_{\bar{u}} - \Delta h}{h_{\bar{u}}}$$

Gleichung C-25

Somit lässt sich die zulässige Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  in Abhängigkeit von der Überfallhöhe  $h_{\bar{u}}$  für verschiedene mittlere Fließgeschwindigkeiten  $v_m$  ausdrücken. Setzt man den Überfallbeiwert  $\mu = 0,5$  (für breite, kantige Steine und gebrochenes Material), so ergibt sich der Zusammenhang zwischen mittlerer Fließgeschwindigkeit  $v_m$ , Wassertiefe in den Lücken und Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  zwischen Ober- und Unterwasser (Abbildung C.6).

Eine mittlere Geschwindigkeit von  $v_m = 0,5$  m/s bei einer Wassertiefe in den Lücken von  $h_{\bar{u}} = 0,2$  m lässt sich nur bei einer Wasserspiegeldifferenz zwischen den Becken  $\Delta h$  kleiner 0,02 m realisieren (Abbildung C.6). Somit lassen sich bei Riegelbauweise nicht alle geforderten hydrologischen Grenzwerte einhalten. Aufgrund der hydraulischen Zusammenhänge muss daher bei Riegelbauweisen von der Forderung einer mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_m$  kleiner 0,5 m/s abgewichen werden. Für Riegelbauweisen wird daher eine mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  kleiner 0,7 m/s gefordert.

Hieraus ergibt sich zwingend, dass die Wassertiefe über der Schwelle nicht größer als 0,20 bis 0,25 m sein darf, wenn eine Wasserspiegeldifferenz zwischen den Becken  $\Delta h \approx 0,1$  bis 0,15 m realisiert werden soll. Die Schwellenhöhe in den Lücken muss daher auf unterschiedliche Abflüsse (MNQ, MQ, 330Q) ausgerichtet sein, um zumindest in einer Lücke Geschwindigkeiten unterhalb des Grenzwerts einhalten zu können (Abbildung C.6).

Folgende Parameter sind bei der Riegelbauweise so zu optimieren, dass die formulierten biologischen Anforderungen erfüllt werden können:

- Zulässige mittlere Geschwindigkeit  $v_m$
- Gefälle
- Betriebsabfluss MNQ
- Betriebsabfluss MQ
- Betriebsabfluss 330Q

- Geometrie Niedrigwasserlücken ( $h_{MNQ}$ ,  $b_{MNQ}$ )
- Geometrie Mittelwasserlücken ( $h_{MQ}$ ,  $b_{MQ}$ )
- Geometrie der Lücken bei Betriebsabfluss 330Q ( $h_{330Q}$ ,  $b_{330Q}$ )

Es müssen eine Anzahl Grundannahmen getroffen werden, um Aussagen treffen zu können, die die gesamte Bandbreite der in Schleswig-Holstein vorkommenden Verhältnisse umfassen:

- $V_m$  kleiner 0,7 m/s in den Lücken für Abflüsse bis 330Q
- Ansatz von MNQ=2,5 l/(s km<sup>2</sup>) \*  $A_{E0}$
- Ansatz von MQ=10 l/(s km<sup>2</sup>) \*  $A_{E0}$
- Ansatz von 330Q =25 l/(s km<sup>2</sup>) \*  $A_{E0}$
- Ansatz des Widerstandsbeiwerts  $\mu = 0,5$  für breite, kantige Steine und gebrochenes Material
- Die minimale Höhe der Wassersäule über Bodenschwellen liegt zwischen 15 bis 20 cm.
- Die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser bei Schwellen beträgt 10 cm (MNQ bis 330Q).

Ziel der Bemessung ist die Berechnung der erforderlichen Lückenbreiten und -höhen für das MNQ-, MQ- und 330Q-Niveau und der Nachweis, dass die geforderte mittlere Geschwindigkeit von 0,7 m/s mindestens in einer der Lücken bis zum Abfluss 330Q eingehalten wird. Die Bemessung wurde für drei verschiedene Einzugsgebietsgrößen beispielhaft durchgeführt (Tabelle C.2).

Aus den Berechnungsergebnissen können folgende Einschätzungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit der biologischen Anforderungen abgeleitet werden:

- Bei Riegelbauweisen muss aus hydraulischen Gründen eine mittlere Fließgeschwindigkeit in den Lücken von  $v_m = 0,7$  m/s hingenommen werden, wenn die Mindestwassertiefe in den Lücken im Bereich von 0,2 m liegen soll. Das schränkt den sinnvollen Einsatz von Sohlgleiten in Riegelbauweise erheblich ein, da ein  $v_m = 0,7$  m/s bei geschütteten Sohlgleiten in nahezu allen Fällen unter Einhaltung der sonstigen biologischen Anforderungen zu erreichen ist.
- Die Einhaltung einer mittleren Fließgeschwindigkeit in den Lücken von  $v_m = 0,7$  m/s ist unabhängig von der Einzugsgebietsgröße und wird lediglich durch die Wassertiefen in den Lücken bestimmt. Dadurch ergeben sich bei unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen immer die gleichen Lückenhöhen, lediglich die Lückenbreite variiert.

Tabelle C.2: Bemessung von Sohlgleiten in der Riegelbauweise (1:30) für verschiedene Einzugsgebietsgrößen. In gelb markiert sind die berechneten Lückenbreiten und zugehörigen mittleren Fließgeschwindigkeiten in den Lücken für einzuhaltende Wasserstände.

AEo [km²]	Q [m³/s]	Lückenhöhe [m]			Lückenbreite [m]			Q [m³/s]			v [m/s]			
		h(NQ)	h(MQ)	h(330Q)	b(NQ)	b(MQ)	b(330Q)	Q(NQ)	Q(MQ)	Q(330Q)	v(NQ)	v(MQ)	v(330Q)	
30	NQ	0,075	0,2	-	-	0,6	-	-	0,08	-	-	0,66	-	-
	MQ	0,3	0,4	0,2	-	0,6	0,7	-	0,25	0,09	-	0,92	0,66	-
	330Q	0,75	0,6	0,4	0,2	0,6	0,7	1,1	0,35	0,25	0,15	1,03	0,92	0,66
100	NQ	0,25	0,2	-	-	1,9	-	-	0,25	-	-	0,66	-	-
	MQ	1	0,4	0,2	-	1,9	2,3	-	0,70	0,30	-	0,92	0,66	-
	330Q	2,5	0,6	0,4	0,2	1,9	2,3	3,7	1,17	0,84	0,49	1,03	0,92	0,66
300	NQ	0,75	0,2	-	-	5,7	-	-	0,75	-	-	0,66	-	-
	MQ	3	0,4	0,2	-	5,7	6,8	-	2,10	0,90	-	0,92	0,66	-
	330Q	7,5	0,6	0,4	0,2	5,7	6,8	11,1	3,51	2,52	1,47	1,03	0,92	0,66

- Eine mittlere Fließgeschwindigkeit in den Lücken von  $v_m = 0,7$  m/s bei Abflüssen bis 330Q kann immer erreicht werden, wenn die Unterkante der Lücken für MNQ, MQ und 330Q auf unterschiedlichem Sohlniveau errichtet werden kann (vgl. Abbildung C.4).
- Die Gesamtbreite einer Sohlgleite in Riegelbauweise wird bei Einhaltung einer mittleren Fließgeschwindigkeit in den Lücken von  $v_m = 0,7$  m/s in der Regel breiter als die natürliche Gewässerbreite sein: Da die Wassertiefen über den Lücken unabhängig von der Einzugsgebietsgröße sind und durch die Einhaltung einer mittleren Fließgeschwindigkeit in den Lücken von  $v_m$  kleiner 0,7 m/s auf eine maximale Wassertiefe von 0,2 m beschränkt sind, ergeben sich folgende Konsequenzen: Werden die Lücken beispielsweise auf drei unterschiedlichen Sohlniveaus (MNQ, MQ, 330Q) angeordnet, ergibt sich daraus eine Wassertiefe bei 330Q von  $3 \times 0,2 \text{ m} = 0,6 \text{ m}$ . Der notwendige Fließquerschnitt, um den Abfluss abzuführen, muss dann über eine überbreite Profilgeometrie erreicht werden.
- Der sinnvolle Einsatz von Sohlgleiten in Riegelbauweise ist auf solche Fälle begrenzt, in denen es aus bautechnischen oder rechtlichen Gründen nicht möglich ist, ein Gefälle flacher als 1:30 zu wählen. Das maximal zulässige Gefälle ergibt sich hier aus der Forderung einer maximalen Wasserspiegellagendifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von 0,1 bis 0,15 m und der Forderung einer minimalen Ausdehnung der Ruhezonen (Beckenlängen) zwischen den Riegeln von 3 m. Es ergibt sich also bei Ausreizung aller Bemessungsspielräume ein maximal zulässiges Gefälle von 1:20 (0,15 m / 3 m).
- Unter Umständen kann eine Riegelbauweise bei sehr großen Einzugsgebieten

>> 300 km² dort sinnvoll sein, wo es aus bautechnischen oder rechtlichen Gründen nicht möglich ist, ein Gefälle flacher als 1:30 zu wählen. In solchen Fällen müssen nämlich auch bei geschütteten Sohlgleiten die aus Tabelle C.1 hervorgehenden Einschränkungen hingenommen werden.

### C.2.3 Nachweis der Stabilität des Sohlsubstrats

Das von WHITTAKER & JAGGI (1986) ermittelte Kriterium für Schüttsteingleiten kann auch auf Steinschwellen in aufgelöster Bauweise übertragen werden. Der kritische Steindurchmesser ergibt sich dann zu:

$$d_{\text{krit}} = \frac{q_{\text{zul}}^{2/3} l_{\text{Schwelle}}^{7/9}}{0,404 \left( g \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)^{1/3}}$$

Gleichung C-26

- mit:  $q_{\text{zul}}$  = zulässiger spezifischer Abfluss [m³/(m\*s)]  
 $l_{\text{Schwelle}}$  = Gefälle zwischen zwei Becken [-]  
 $d_{\text{krit}}$  = minimaler Steindurchmesser [m]  
 $\rho_s$  = Dichte der Steine [kg/m³]  
 $\rho_w$  = Dichte des Wassers [kg/m³]

Für die zu erbringenden Standsicherheitsnachweise wird auf DVWK-Merkblatt 232 verwiesen.

# D Erfolgskontrollen

## D.1 Biologische Erfolgskontrollen

Sinnvoll sind biologische Erfolgskontrollen: Für die Fischfauna lassen sich bei großen Fließgewässern Fischzähler (Lichtschranken, Sichtfenster) installieren. Das Vorkommen von Fischen im Bereich der Sohlgleite kann erhoben werden, um gegebenenfalls Akkumulationen von Fischen direkt unterhalb der Gleite bei Wanderzeiten festzustellen, die Hinweise auf eine Barrierewirkung der Gleiten liefern. Bei kleinen Fließgewässern können Markierungen (unterhalb der Sohlgleite) und Wiederfänge (oberhalb der Sohlgleite) von Fischen vorgenommen werden. Es können Reusen im Bereich der Gleitenkrone zur Kontrolle gesetzt werden.

Zu Forschungszwecken lassen sich noch die Transponder-Technik und die Radio-Telemetrie einsetzen. Bezüglich des Makrozoobenthos ist ein Nachweis im Bereich der Sohlgleite zum Vorkommen insbesondere von Arten, die keine flugfähigen Lebensstadien haben, sinnvoll. Konkrete Empfehlungen werden hier nicht gegeben, da sich die Palette sinnvoller Erfolgskontrollen auf die jeweiligen ökologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen der Sohlgleite sowie des Fließgewässers bzw. des Einzugsgebiets beziehen muss. Biologische Erfolgskontrollen sollten jedoch durchgeführt werden, wenn die hydromorphologischen Bedingungen in Sohlgleiten von den hier formulierten abweichen.

## D.2 Hydraulische Erfolgskontrollen

Im Bereich der Sohlgleite sind Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen bei verschiedenen Abflüssen (MNO bis MQ, 330Q) zu messen und mit den Planungszielen zu vergleichen. Sie sind direkt nach Fertigstellung der Sohlgleite und nach einem Abfluss größer  $HQ_1$  durchzuführen. Bei ungünstigen Abweichungen sind Nachbesserungen notwendig. Es wird empfohlen, einen Probelauf der fertig gestellten Gleite zur Kontrolle der hydrologischen Größen durchzuführen, der ein Bestandteil der Bauausführung sein kann.

Die Bemessungsansätze zur Dimensionierung eines Kolks bedürfen einer Erfolgskontrolle, da die verwendeten Beziehungen für weitaus höhere mittlere Fließgeschwindigkeiten  $v_m$  in Sohlgleiten ermittelt wurden. Insbesondere ist eine dauerhafte Ansammlung von Feinmaterial innerhalb des Kolks unerwünscht.

Sollten die bei der Bemessung einer geschützten Sohlgleite sich ergebenden Störsteindurchmesser nicht innerhalb des bisherigen Erfahrungsbereichs der angewendeten Verfahren liegen, ist die Funktionstüchtigkeit durch Erfolgskontrollen aufzuzeigen.

# E Zusammenfassung

## E.1 Anforderungen an die Funktion und Bauweise von Sohlgleiten

Die Funktion einer Sohlgleite besteht in der Herstellung der Durchwanderbarkeit des Gewässers für die Gewässerfauna in beide Fließrichtungen. Für die Planung einer Gleite ergeben sich die Zielarten aus der gewässertypischen Fisch- und wirbellosen Fauna sowie den lokalen Rahmenbedingungen. Die ökologischen Ansprüche der Zielarten stellen zusammen mit den physiographischen Eigenschaften des Naturraumes und dem Abflussregime die planerisch einzuhaltenden Parameter bezüglich hydraulischer Eigenschaften, Wasserstände, Morphologie und Sohlsubstrate der Sohlgleite.

Grundsätzlich können baulich zwei Varianten von Sohlgleiten unterschieden werden, die so genannte Riegelbauweise und die geschüttete Bauweise. Bei einer Riegelbauweise wird der Absturz durch eine Abfolge von Riegeln und Becken überwunden, während bei einer geschütteten Sohlgleite die Wasserspiegeldifferenz kontinuierlich über eine flach geneigte Strecke überwunden und die Fließgeschwindigkeit des Wassers durch Störsteine reduziert wird. Die geschüttete Bauweise aus mehrlagiger Steinschüttung ist aus ökologischer Sicht grundsätzlich einer Riegelbauweise vorzuziehen.

Die geschüttete Bauweise mit höherem Gefälle (1:30 bis 1:50) wird für die Naturräume des Östlichen Hügellandes und der Hohen Geest und mit geringem Gefälle (1:50 bis 1:100) in den Naturräumen der Niederen Geest, Niederungen und Mooregebiete für Schleswig-Holstein empfohlen. Die Anlage geschütteter Sohlgleiten ist einfacher umzugestalten als die von Sohlgleiten aus Riegeln, so dass nachträgliche Verbesserungen möglich sind sowie landschaftsplanerisch auch zukünftig mehr Freiräume bestehen.

Die Riegelbauweise mit unregelmäßigen Riegeln (keine Schwellen) kann mit höherem Gefälle ( $\geq 1:30$ ) angewendet werden, falls aus rechtlichen oder bautechnischen Gründen geringere Gefälle oder eine geschüttete Bauweise nicht umsetzbar sind. Prinzipiell sind auch Kombinationen verschiedener Bauvarianten in einer Gleite möglich, wenn es die örtlichen Bedingungen erfordern und die hier formulierten Empfehlungen berücksichtigt werden.

Aufgrund biologischer Anforderungen ist bei Einzugsgebieten kleiner als 100 km<sup>2</sup> nach

Möglichkeit eine mittlere Fließgeschwindigkeit von  $v_m$  kleiner als 0,5 m/s an 330 Tagen im Jahr (330Q) zu gewährleisten, um eine longitudinale Durchgängigkeit zu ermöglichen. Bei Einzugsgebieten größer als 100 km<sup>2</sup> wird eine mittlere Fließgeschwindigkeit von  $v_m$  kleiner als 0,7 m/s an 330 Tagen im Jahr (330Q) gefordert, da hier aufgrund größerer Querprofile ausreichend große Bereiche mit  $v$  kleiner als 0,5 m/s vorliegen. Diese Grenzwerte werden an natürlichen Gewässerabschnitten in Schleswig-Holstein unterschritten, so dass sie auch aus hydrologischer Sicht sinnvoll sind.

Es ist sinnvoll, Idealerweise durchgängige Zonen mit geringen Fließgeschwindigkeiten (mittlere Geschwindigkeit hier 0,2 bis 0,3 m/s für MNQ und MQ), z.B. in den Randbereichen der Sohlgleite, zu errichten. Zudem kann es notwendig sein, ein Niedrigwasserprofil anzulegen, um die geforderten Mindestwasserstände einzuhalten. Die Gleite sollte unbedingt hinsichtlich der Strömung und des Sedimentes an ober- und unterstrom gelegene Abschnitte angebunden sein.

## E.2 Sohlgleiten in geschütteter Bauweise

Bei einer geschütteten Sohlgleite sollte die Störsteinfläche innerhalb der Gleite kleiner als 20% sein. Die Breite sollte sich der Gewässerbreite oberstrom und unterstrom anpassen. Sohlgleiten sollten aus einer durchgehenden Schicht unsortiertem Korn bestehen.

Bei geschütteten Bauweisen ergeben sich folgende Konsequenzen für die konstruktive Umsetzung:

- Bei Einzugsgebieten kleiner als 30 km<sup>2</sup> wird die Erfüllung der biologischen Anforderungen bei Sohlgleiten mit einem Gefälle flacher als 1:50 in der Regel kein Problem sein. Bei einem Gefälle von 1:30 kann die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,5 m/s unter Umständen nicht erfüllt werden. Es wird hier zu prüfen sein, ob man gegebenenfalls eine höhere zulässige Geschwindigkeit größer als 0,5 m/s, eine höhere zulässige Störsteinfläche größer als 20% oder eine breitere Profilgeometrie hinnimmt.
- Bei Einzugsgebieten von 30 bis 100 km<sup>2</sup> wird die Erfüllung der biologischen Anforderungen bei einem Gefälle von 1:30 bei einem EZG knapp unter 100 km<sup>2</sup> nahezu unmöglich. Generell wird hier zu flacheren

Gefällen geraten. Selbst bei einem Gefälle von 1:50 kann die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,5 m/s unter Umständen nicht erfüllt werden. Es wird hier zu prüfen sein, ob man gegebenenfalls eine höhere zulässige Geschwindigkeit (größer als 0,5 m/s), eine höhere zulässige Störsteinfläche (größer als 20%) oder eine überbreite Profilgeometrie hinnimmt.

- Bei Einzugsgebieten von 100 bis 300 km<sup>2</sup> wird die Erfüllung der biologischen Anforderungen selbst bei Sohlgleiten mit einem Gefälle von 1:30 in der Regel möglich sein.
- Bei Einzugsgebieten größer als 300 km<sup>2</sup> wird die Erfüllung der biologischen Anforderungen bei Sohlgleiten mit einem Gefälle flacher als 1:50 in der Regel möglich sein. Bei einem Gefälle von 1:30 kann die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,7 m/s unter Umständen nicht erfüllt werden. Hier sollte geprüft werden, ob die Forderung eines  $v_m(330Q)$  kleiner als 0,7 m/s gegebenenfalls erweitert werden kann. Unter Umständen kann hier auch eine Riegelbauweise sinnvoll sein.

Die Stabilität einer Sohlgleite ist innerörtlich für ein  $HQ_{100}$  und außerhalb von Ortschaften für ein  $HQ_{50}$  nachzuweisen. Es ergeben sich folgende Konsequenzen für die Bemessung:

- Bei einem Gefälle von 1:30 wird das aus den biologischen Anforderungen abgeleitete Sohlmaterial mit einem Durchmesser von 8 bis 10 cm in der Regel nur bei EZG kleiner als 100 km<sup>2</sup> bei Bemessungsabfluss lagestabil bleiben (innerörtlich: 10 cm; außerörtlich 8 cm). Bei größeren Einzugsgebieten wird zu prüfen sein, ob man gröberes Sohlmaterial oder eine überbreite Profilgeometrie hinnimmt.
- Bei einem Gefälle von 1:50 wird das aus den biologischen Anforderungen abgeleitete Sohlmaterial mit einem Durchmesser von 8 bis 10 cm bei EZG bis ca. 300 km<sup>2</sup> lagestabil bleiben.
- Bei einem Gefälle von 1:100 wird das aus den biologischen Anforderungen abgeleitete Sohlmaterial mit einem Durchmesser von 8 bis 10 cm generell lagestabil bleiben.

### E.3 Sohlgleiten in Riegelbauweise

Bei der Riegelbauweise ist es hydraulisch unvermeidbar, dass in den Lücken hohe Fließgeschwindigkeiten auftreten, die die Passierbarkeit verringern. Deshalb ist ein Fließwechsel innerhalb der Lücken unbedingt zu vermeiden, da eine schießende Strömung aus reiner Schwimmbewegung heraus unmöglich überwunden werden kann. Aus hydraulischen Gründen muss bei zulässigen Wassertiefen in den Lücken von ca. 0,2 m eine mittlere Fließgeschwindigkeit in den Lücken von  $v_m \leq 0,7$  m/s zugelassen werden. Das schränkt den sinnvollen Einsatz von Sohlgleiten in Riegelbauweise erheblich ein, da ein  $v_m = 0,7$  m/s bei geschütteten Sohlgleiten in nahezu allen Fällen unter Einhaltung der sonstigen biologischen Anforderungen zu erreichen ist.

Der sinnvolle Einsatz von Sohlgleiten in Riegelbauweise sollte auf solche Fälle begrenzt bleiben, in denen es aus bautechnischen oder rechtlichen Gründen nicht möglich ist, ein Gefälle flacher als 1:30 zu wählen. Das maximal zulässige Gefälle ergibt sich hier aus der Forderung einer maximalen Wasserspiegellagedifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von 0,1 bis 0,15 m und der Forderung einer minimalen Ausdehnung der Ruhezonon (Beckenlängen) zwischen den Riegeln von 3 m. Es ergibt sich also bei Ausreizung aller Bemessungsspielräume ein maximal zulässiges Gefälle von 0,15 m / 3 m bzw. 1:20.

# Zitierte Literatur

- ADAM B, BOSSE R, DUMONT U, HADDERINGH R, JØRGENSEN L, KALUSA B, LEHMANN G, PISCHEL R, SCHWEVERS U (2004) Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen. Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. ATV-DVWK, Hennef.
- AMOROS C, ROUX AL, REYGRABELLET J-L, BRAVARD JP, PAUTOU G. (1987) A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers: Research and Management* 1:17–36.
- DVWK (1996) Fischaufstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DVWK Merkblätter, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas & Wasser mbH, Bonn. Band 232, 110p.
- BÖTTGER T (2003) Die Hege von Fischen in Schleswig-Holstein. Landessportfischereiverband Schleswig-Holstein, Verband der Binnenfischer und Teichwirte Schleswig-Holstein in Zusammenarbeit und Abstimmung mit der Oberen Fischereibehörde des Landes Schleswig-Holstein. 136p.
- BLAKE RW (1983) *Fish Locomotion*. Cambridge University Press, London. 208 pp.
- BRUNKE M (2001) Wechselwirkungen zwischen Fließgewässern und Grundwasser: Bedeutung für aquatische Biodiversität, Stoffhaushalt und Lebensraumstrukturen. *Wasserwirtschaft* 90: 32-37.
- BRUNKE M (2003) Durchgängigkeit in Fließgewässern aus biologischer Sicht. Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft. Infobrief zur EU Wasserrahmenrichtlinie 2/2003: 2.
- BRUNKE M (2004) Stream typology and lake outlets – a perspective towards validation and assessment from northern Germany (Schleswig-Holstein). *Limnologica* 34: 460-478.
- BRUNKE M, GONSER T (1997) The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37: 1-33.
- BRUNKE M, HOFFMANN A, PUSCH P. (2002) Associations between invertebrate assemblages and mesohabitats in a lowland river (Spree, Germany): A chance for predictions? *Archiv für Hydrobiologie* 154: 239-259.
- BUNZEL-DRÜKE M, SCHARF M, ZIMBALL O (2004) Zur Biologie der Quappe. Ein Literaturüberblick und Feldstudien aus der Lippeaue. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 36: 334-340.
- GEBLER R-J (1991) Sohlenrampen und Fischaufstiege, Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.
- GOWANS ARD, ARMSTRONG JD, PRIEDE IG, MCKELVEY S (2003) Movements of Atlantic salmon migrating upstream through a fish-pass complex in Scotland. *Ecology of Freshwater Fish* 12: 177 - 189.
- HARTMANN U (2002) Süßwasserfische. Erkennen und bestimmen. Steinbachs Naturführer. Mosaik Verlag, München. 191p.
- HILDREW AG, TOWNSEND C (1994) Species traits in relation to a habitat template for river systems. *Freshwater Biology* 31: 265-275.
- HIRSCHHAUSER T (2003) Was sind Querbauwerke? Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft des Landes Schleswig-Holstein. Infobrief zur EU-Wasserrahmenrichtlinie 2/2003: 3.
- HÜTTE M (2000) Ökologie und Wasserbau. Ökologische Grundlagen von Gewässerverbauung und Wasserkraftnutzung. Parey, Berlin. 280p.
- JENS G, BORN O, HOHLSTEIN R, KÄMMEREIT M, KLUPP R, LABATZKI P, MAU G, SEIFERT K, WONDRAK P (1997) Fischwanderhilfen. Notwendigkeit, Gestaltung, Rechtsgrundlagen. Schriftenreihe des Verbandes Deutscher Fischereiverwaltungsbeamter und Fischereiwissenschaftler. 114p.
- JUNGWIRTH M, HAIDVOGL G, MOOG O, MUHAR S, SCHMUTZ S (2003) Angewandte Fischökologie in Fließgewässern. *Facultas UTB*, Wien: 547.

- LAUNHARDT A, MUTZ M (2003) Totholz statt Steine, eine Alternative für Sohlgleiten in abflussschwachen Sandbächen. Deutsche Gesellschaft für Limnologie, Tagungsbericht 2002 (Braunschweig), Werder. 699-702p.
- LEMCKE R, WINKLER HM (1998) Überwindung von Hindernissen durch wandernde Flußneunaugen. Wasser & Boden 3 (50): 15-17.
- MAITLAND PS (2003) Ecology of the River, Brook, and Sea Lamprey. Conserving Natura 2000 Rivers Ecology Series No. 5: 52p.
- NESTMANN F, LEHMANN B (2000) Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Heft 63.
- NEUMANN M (2002) Die Süßwasserfische und Neunaugen Schleswig-Holsteins - Rote Liste. Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (Hrsg.), Flintbek. 58p.
- OVIDIO M, PHILIPPART J-C (2002) The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish. Synthesis of a 5-year telemetry study in the River Meuse basin. Hydrobiologia 483: 55-69.
- PASCHE E (2002) Empfehlungen zur Gestaltung und Berechnung von Sohlgleiten in Flachlandgewässern. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein.
- POTTGIESSER T, SOMMERHAUSER M (2004) Fließgewässertypologie Deutschlands: Die Gewässertypen und ihre Steckbriefe als Beitrag zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Handbuch für Angewandte Limnologie, 7/04 VIII-2.1. ecomed Verlagsgesellschaft Landsberg. (s. auch [www.wasserblick.net](http://www.wasserblick.net) oder [www.fliessgewaesserbewertung.de](http://www.fliessgewaesserbewertung.de)).
- QUINTELLA BR, ANDRADE NO, KOED A, ALMEIDA PR (2004) Behavioural patterns of sea lampreys' spawning migration through difficult passage areas, studied by electromyogram telemetry. Journal of Fish Biology 64: 961 - 972.
- REUSCH H, OTTO C-J, PETERS A (1995) Kontrolluntersuchungen zur ökologischen Effizienz von Sohlgleiten. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie. Nachhaltiges Niedersachsen 1: 141-156.
- ROUVÉ H (1987) Hydraulische Probleme beim naturnahen Wasserbau. DFG-Forschungsbericht, Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft.
- SCHERLE J (1999) Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen. Grundlagen, Leitbilder, Planung. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe Heft 199.
- SCHLOSSER IJ, ANGERMEIER PL (1995) Spatial variation in demographic processes of lotic fishes: conceptual models, empirical evidence, and implications for conservation. American Fisheries Society Symposium 17: 392-401.
- SOMMERHAUSER M, GARNIEL A, POTTGIESSER T (2001) Leitbilder für die Fließgewässer in Schleswig-Holstein. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. 62pp.
- SOMMERHAUSER M, SCHUMACHER H (2003) Handbuch der Fließgewässer Norddeutschlands. Typologie, Bewertung, Management - Atlas für die limnologische Praxis. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg 288p.
- SPRATTE S, HARTMANN U (1998) Fischartenkataster. Süßwasserfische und Neunaugen in Schleswig-Holstein. Hrsg. Ministerium für ländliche Räume, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Kiel 183p.
- STAHLBERG S, PECKMANN P (1986) Bestimmung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit für einheimische Kleinfischarten. Wasserwirtschaft 76: 340-342.
- VORDERMEIER T, BOHL E (1999) Biologische Toleranz- und Grenzwerte im Wanderverhalten von Kleinfischen. Kriterien für die Renaturierung kleiner Fließgewässer. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Versuchsanlage Wielenbach. 15p.
- WAGNER A, LEMCKE R (2003) Fischwanderungen in Binnengewässern - Konzepte, Begriffe und Beispiele. Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei, Mecklenburg-Vorpommern Heft 29. 130p.
- WARD JV (1989) The four-dimensional nature of lotic ecosystems. Journal of the North American Benthological Society 8:2-8.

- WARD JV (1998) Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. *Biological Conservation* 83: 269-278.
- WARD JV, BRETSCHKO G, BRUNKE M, DANIELOPOL D, GIBERT J, GONSER T, HILDREW AG (1998) The boundaries of river systems: The meta-zoan perspective. *Freshwater Biology* 40: 531-569.
- WHITTAKER J, JÄGGI M (1996) Blockschwellen, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich 91, 1986.
- WINTER HV, VAN DENSEN W (2001) Assessing the opportunities for upstream migration of non-salmonid fishes in the weir-regulated River Vecht. *Fisheries Management and Ecology* 8: 513-532.
- ZERRATH H (1996) Sprintleistungen einheimischer Klein- und Jungfische in Sohlgleitenmodellen - Daten zur Bewertung von Fisch-aufstiegshilfen. *Fischökologie* 9: 27-48.
- ZWICK P (1992) Stream habitat fragmentation - a threat to biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 1: 80-97.