

Bayerisches Landesamt
für Wasserwirtschaft



**Untersuchungen zur
Durchgängigkeit von
Fließgewässern für Fische**

Materialien Nr. 79 (Februar 1999)

**Untersuchungen zur
Durchgängigkeit von
Fließgewässern für Fische**

Materialien Nr. 79 (Februar 1999)

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Lazarettstraße 67, D-80636 München,
eine Behörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung
und Umweltfragen

Leitung: Dipl.-Biol. Dr. Erik Bohl,
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft – Institut für Wasserforschung

Bearbeitung: Dipl.-Biol. Thomas Vordermeier,
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft – Institut für Wasserforschung

Druck: Eigendruck
Für den Druck wurde Recycling-Papier aus 100% Altpapier verwendet.

Nachdruck und Wiedergabe – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers

Vorwort

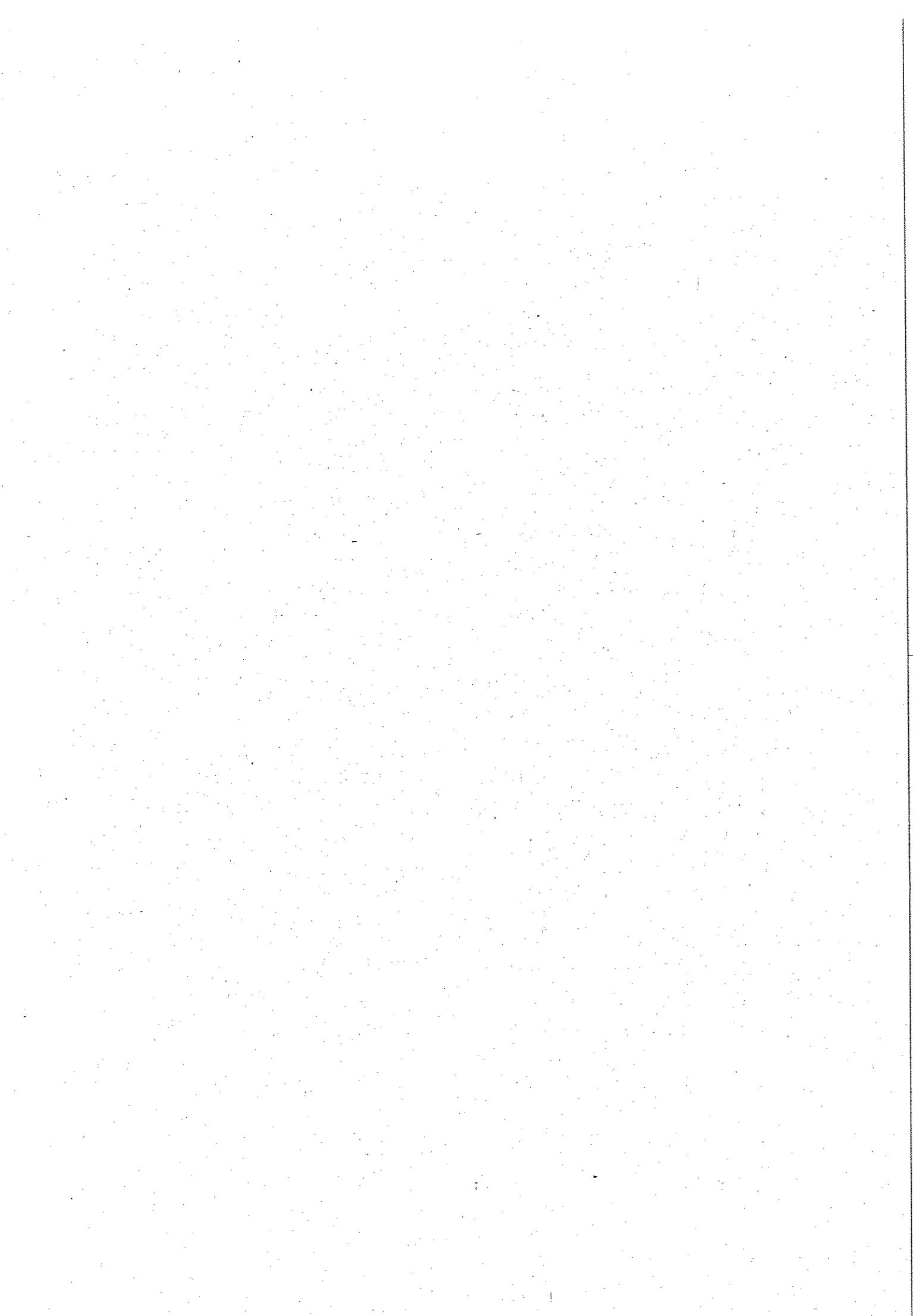
Kleine Fließgewässer sind für die Ökologie und den Wasserhaushalt unserer Landschaft außerordentlich bedeutsam. Sie bilden unter anderem den Lebensraum von Kleinfischarten wie Bachschmerle, Elritze oder Mühlkoppe sowie unzähligen Makrozoobenthosorganismen. Stark mäandrierende Bäche als prägende Elemente der früheren Kulturlandschaft sind heutzutage jedoch nicht mehr die Regel, sondern leider nur noch die Ausnahme. Durch zunehmende Beanspruchung seitens der Landwirtschaft, des Siedlungswasserbaues, aber auch der Energiewirtschaft, wurden gerade diese Gewässersysteme im Laufe dieses Jahrhunderts stark verändert und damit ökologisch empfindlich gestört bzw. geschädigt. Als eine der deutlichsten Folgen des technischen Gewässerausbau ist neben dem Verlust von Lebensraum die Unterbrechung der Durchgängigkeit für die Fisch- und Makrozoobenthosfauna durch Querbauwerke zu nennen. Dieses, sowie Änderungen auf legislativer Ebene führten Anfang der achtziger Jahre zu einem Umdenken in der Wasserwirtschaft, wobei fortan in immer stärkerem Maße beim Gewässerausbau und bei der Gewässerunterhaltung naturnahe, ökologisch verträgliche Mittel und Methoden eingesetzt und angewendet werden. Durch das Zusammenwirken von Ingenieuren und Biologen finden nunmehr die wichtigen ökologischen Aspekte bei der Renaturierung von Fließgewässern in hohem Maße Beachtung.

Zur Renaturierung sind jedoch spezielle Kenntnisse über die unterschiedlichen ökologischen Ansprüche der Wasserorganismen notwendig, welche bisher nur von den wirtschaftlich genutzten Fischarten, wie z. B. den Forellen- oder Lachsartigen, vorlagen. Die Ansprüche der ökologisch ebenso wichtigen Kleinfischarten sind demgegenüber weniger bekannt. Es war eines der wichtigsten Ziele dieser Arbeit, an Hand dreier strömungsliebender Kleinfischarten gerade diese Ansprüche bei der quellwärts gerichteten Wanderung zu quantifizieren. Die in einer künstlichen Fließrinne gewonnenen Ergebnisse lassen sich bei anstehenden Renaturierungsmaßnahmen auf kleine Fließgewässer wie Bäche und Gräben übertragen und dort in ökologisch verträglichen Maßnahmen umsetzen.

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
Institut für Wasserforschung
Wielenbach, im Februar 1999



Dr. Mühlhölzl

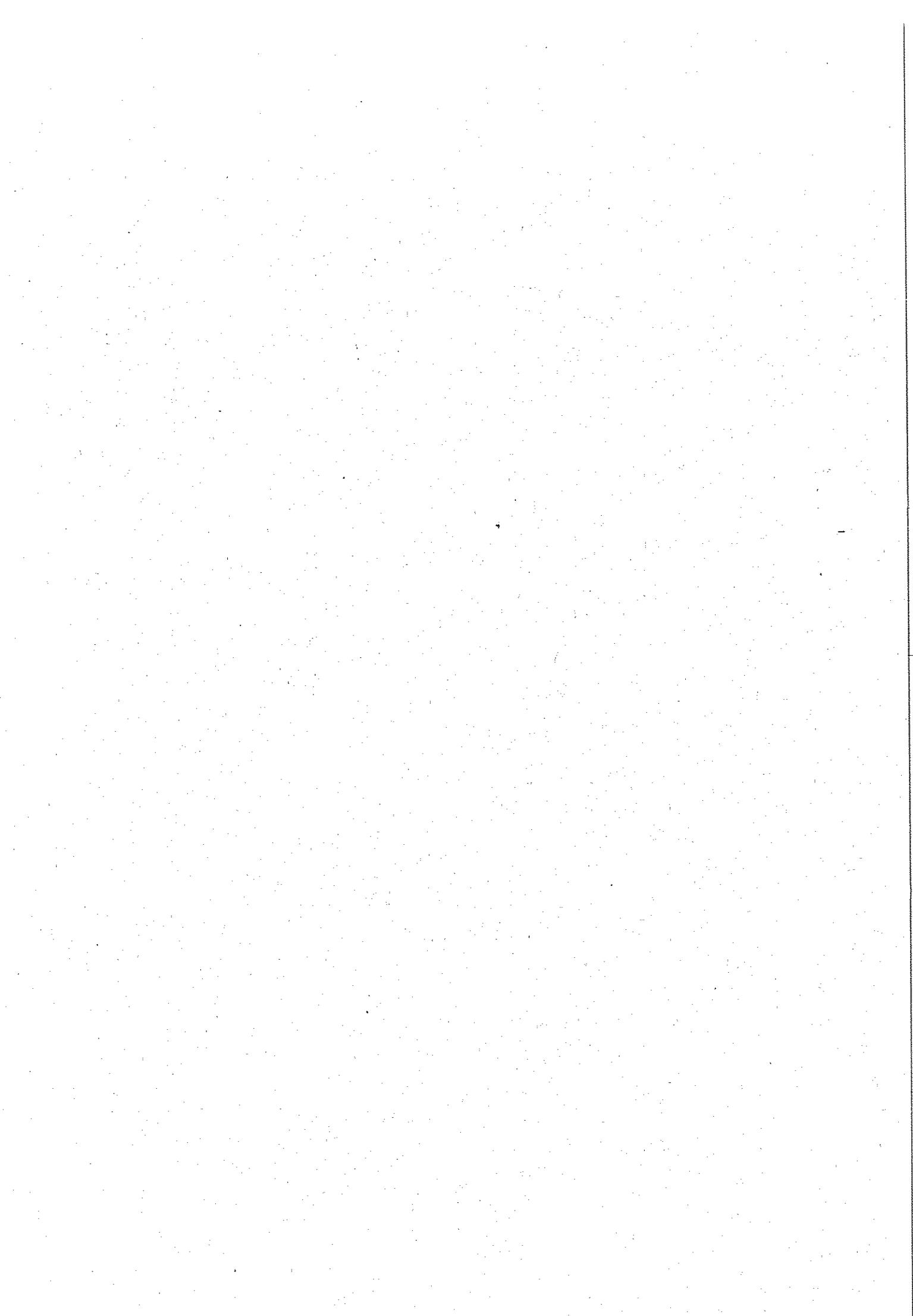


Inhaltsübersicht

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Migrationsbarrieren in kleinen Fließgewässern	4
1.2 Auswirkungen von Migrationsbarrieren auf Fische	7
1.3 Charakterisierung von Mühlkoppfen-, Elritzen- und Bachschmerlen- habitaten.....	9
2. Material und Methoden	12
2.1 Fließgerinne.....	13
2.2 Meßgeräte	15
2.3 Versuchsbeschreibung und Versuchsdurchführung	16
2.4 Versuchsfische.....	19
2.5 Datenerfassung und Datenauswertung.....	34
3. Ergebnisse	35
3.1 VAKI-River Stock Monitor (RSM)	35
3.2 Chemisch-physikalische Parameter im Versuchszeitraum.....	42
3.2.1 Einzelversuche mit Mühlkoppfen.....	47
3.2.2 Einzelversuche mit Elritzen und Bachschmerlen	48
3.3 Migrationsversuche mit Mühlkoppfen (<i>Cottus gobio</i>).....	49
3.3.1 „Strömung“	49
3.3.2 „Wassertiefe“ (Mächtigkeit der Wassersäule).....	53
3.3.3 „Bodensubstrate“.....	57
3.3.4 „Bodenschwelle“.....	64
3.3.4.1 „Höhe der Bodenschwelle“	64
3.3.4.2 „Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“.....	68
3.3.4.2 „Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“.....	72
3.3.5 „Absturz“	76
3.3.6 „Verrohrung“.....	80

3.4	Migrationsversuche mit Elritzen (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	88
3.4.1	„Strömung“	88
3.4.2	„Wassertiefe“ (Mächtigkeit der Wassersäule)	93
3.4.3	„Bodensubstrate“	97
3.4.4	„Bodenschwelle“	104
3.4.4.1	„Höhe der Bodenschwelle“	104
3.4.4.2	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“	108
3.4.4.3	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“	112
3.4.5	„Absturz“	116
3.4.6	„Verrohrung“	120
3.5	Migrationsversuche mit Bachschmerlen (<i>Barbatula barbatula</i>)	128
3.5.1	„Strömung“	128
3.5.2	„Wassertiefe“ (Mächtigkeit der Wassersäule)	133
3.5.3	„Bodensubstrate“	137
3.5.4	„Bodenschwelle“	144
3.5.4.1	„Höhe der Bodenschwelle“	144
3.5.4.2	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“	148
3.5.4.3	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“	152
3.5.5	„Absturz“	156
3.5.6	„Verrohrung“	160
4.	Diskussion	168
5.	Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse und Empfehlungen zu deren Umsetzung in die Praxis	178
5.1	Mühlkoppe	179
5.2	Elritze	181
5.3	Bachschmerle	182
5.4	Rhithralregion	183
5.5	Allgemeine Empfehlungen für die Renaturierung kleiner Fließgewässer	185
5.6	Anwendbarkeit der Ergebnisse	189
6.	Weiterer Forschungsbedarf	190

7.	Zusammenfassung	191
8.	Literatur	192
9.	Anhang	197
9.1	Abbildungen	197
9.2	Tabellen	199
9.2.1	VAKI-River Stock Monitor (RSM)	199
9.2.2	Chemisch-physikalische Parameter	204



1. Einleitung

Das aktive Überwinden von verschiedenen großen Distanzen wird nahezu von allen Fischarten im Fließgewässer vollzogen, woran nicht nur die klassischen Wanderfische wie Nase (*Chondrostoma nasus* L.), Barbe (*Barbus barbus* L.), Äsche (*Thymallus thymallus* L.) oder Huchen (*Hucho hucho* L.) beteiligt sind.

Die Wanderung von Fischen in Bächen und Gräben betrifft in großem Ausmaß auch stationär oder resident lebende Fischarten, die im übrigen in der Lage sind, ansehnliche räumliche Veränderungen zu bewerkstelligen (BLESS, 1990; BOHL, 1994; PETER, 1995; WATERSTRAAT, 1992). Und gerade dies hat eine sehr vielfältige ökologische Bedeutung für deren Erhalt. Davon besonders betroffen sind Klein- und Bodenfische wie Elritze (*Phoxinus phoxinus* L.), Schneider (*Alburnoides bipunctatus* Bloch), Mühlkoppe (*Cottus gobio* L.), Bachschmerle (*Barbatula barbatula* L.*) oder Gründling (*Gobio gobio* L.).

Wichtige Faktoren, die den Fischaufstieg bzw. Fischwanderungen beeinflussen, sind u. a. in einer Veränderung des Habitats (nach Hochwasser oder nach Verbauung) zu suchen, aber auch ein unzureichender oder sich verändernder Status quo im derzeitigen Lebensraum (fehlende Unterstände oder verlorengegangene Laichplätze, Veränderung der Futtersituation) lassen Fische wandern, ebenso wie eine Veränderung im Bestand (Artenzusammensetzung, Dichte, Populationsaufbau). Für Fische sind letztlich sowohl endogene (Laichzeit, Winterruhe) als auch exogene Stimuli (Veränderung der Wassertemperatur, Lichtverhältnisse, Abflußgeschehen) notwendig, um mit der Wanderung zu beginnen. Auch unter den Aspekten der Wiederbesiedelung von Gewässerabschnitten, entweder nach einem Fischsterben oder dem Austrocknen kleinerer Fließgewässer, und dem der Arterhaltung zu Grunde liegenden genetischen Austausch zwischen den einzelnen Populationen, sind Wanderungsversuche von Fischen zu sehen. Gerade diverse Kleinfischarten neigen bei einer unterbrochenen Durchgängigkeit der Fließgewässer zur Bildung von genetisch voneinander getrennten Inselpopulationen (BLESS, 1981; BRUNKEN, 1988).

Bezogen auf diese Funktionen ist die ökologische Durchgängigkeit bzw. das Fließgewässerkontinuum (VANNOTE et al., 1980) sowohl für die Fischfauna als auch für die artenreiche Gruppe der benthischen Wirbellosen (HALLE, 1993) schon in den meisten größeren Fließgewässern durch unterschiedliche strukturelle und nutzungsbedingte Eingriffe

* nach alter Nomenklatur: *Noemacheilus barbatulus*

erheblich eingeschränkt. Dabei ist heutzutage die Entwicklung von technischen Fischaufstiegshilfen weit fortgeschritten (JUNGWIRTH et al., 1994; DVWK, 1995; BORN, 1995; BORN & STEIN, 1995). Die modernen Fischaufstiege orientieren sich jedoch überwiegend an der physischen Schwimm- und Sprungleistung von Lachsartigen (*Salmonidae*) und anderen Nutzfischarten und sind zudem in den meisten Fällen auf größere Gewässer mit ökonomischer Nutzung beschränkt, wobei selbstverständlich die gesamte fischbiologische Bedeutung nur unzulänglich erfaßt wird. Aber auch moderne Wanderhilfen sind nur zum Teil dazu geeignet, die Barrierewirkung von Querbauwerken in qualitativer und quantitativer Weise zu kompensieren. Meist bleiben dabei die Juvenilstadien vieler Fischarten aber auch einige Kleinfischarten als wichtige Teile der Zönose auf der Strecke.

Besonders gravierend ist die mangelnde Passierbarkeit in vielen kleinen Fließgewässern, in denen durch die geringen Dimensionen von Abfluß und Gewässerbett die Bewegungsfreiheit der Fische ohnehin stark eingeschränkt bleibt. Hinzu kommen die vielfältigen technischen Eingriffe in Bächen und Gräben. Hier können Sohlrampen, Sohlabstürze oder Verrohrungen durch Unterbindung des Fließgewässerkontinuums und einer dadurch bedingten Verhinderung der Fischmigrationen zu einer drastischen Verarmung der Fischfauna des Oberlaufes beitragen. Dies gilt wiederum in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht.

So können schon minimale bauliche Eingriffe bei ungünstiger Ausführung zu nachhaltigen Schäden an Fischpopulationen führen. Eine Schadensdezimierung durch eine natürliche Zuwanderung von Tieren aus ober- oder unterhalb lebenden Populationen ist meist nicht mehr möglich. Die unmittelbaren Auswirkungen solcher fischwirksamen Barrieren sind am Beispiel des Gewässersystems der mittleren und unteren Salzach auf bayerischer Seite in grobem Maßstab dokumentiert (BOHL, 1994). BLESS (1985) beschreibt in einer Fallstudie sehr detailliert ähnliche Folgen für die Ichthyozönosen in verschiedenen Bächen. BRUNKEN (1988, 1989) zeigt die Wirkung von Querbauwerken auf das Vorkommen der Bachschmerle in kleinen Fließgewässern Niedersachsens.

In der Regel besteht in der Praxis keine Möglichkeit eigener Aufstiegs- bzw. Wanderhilfen für wirtschaftlich nicht genutzte Fischarten in Bächen und Gräben. Gerade hier muß deren sachgerechte Gestaltung bzw. die strukturelle Renaturierung den ökologischen Verbund gewährleisten und die Notwendigkeit spezieller unterhaltsbedürftiger und wartungsintensiver Aufstiegsbauwerke bzw. Wanderhilfen verhindern.

Die ökologische Funktionsfähigkeit der Gewässersysteme in unserer Kulturlandschaft erfordert die Vereinbarkeit der biologischen Belange der jeweiligen Fischfauna bezüglich der Passierbarkeit mit den technischen Anforderungen an die Strukturen im Gewässer.

Bisherige Arbeiten zum Thema Fischmigrationen erstrecken sich häufig auf die Funktion, den Bau, die Gestaltung und die Überprüfung von Fischaufstiegsanlagen und dies hauptsächlich an größeren Fließgewässern (BORN, 1995; DVWK, 1996 u. a.). Dabei wurde der Schwerpunkt nicht immer auf die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten uninteressanten Kleinfischarten gelegt. Auch im Bereich der Fließgerinnenforschung zeigt sich, daß die Aspekte der Fischwanderungen und Fischtreppe zwar bearbeitet werden (QUAST et al., 1997), aber Kleinfischarten bisher stark vernachlässigt wurden, da auf diesem Gebiet hauptsächlich Fragestellungen bezüglich wirbelloser Organismen experimentell untersucht wurden. Dies verdeutlicht, wie notwendig Forschungsarbeiten bezüglich des Fischarten- und Biotopschutzes sind.

In einem künstlichen Fließgerinne wurden deshalb einige Grundlagen zur Überwindbarkeit von Strömung, definierten Strukturen und Hindernissen (z. B. Sohlwellen, Sohlabstürze, Verrohrungen) für Fische unterschiedlicher Beweglichkeit und Schwimmweise erarbeitet. Die Zielsetzung dabei ist, für die Kleinfischarten **Elritze**, **Bachschmerle** und **Mühlkoppe** nachvollziehbare Richtwerte sowohl bezüglich deren Minimalanforderungen an hydraulische Gegebenheiten in Bächen und Gräben als auch deren maximale physische Leistungskapazität an Migrationsbarrieren vorzulegen. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen beziehen sich zwar zunächst auf die Dimension von Kleinstgewässern (III. Ordnung), können aber ebenso auf größere Gewässer übertragen werden, da die Untersuchungen zum einen fischartbezogen als auch aufgeschlüsselt nach den einzelnen Hindernisarten durchgeführt wurden. Dabei kann vorausgesetzt werden, daß sich in Fließgewässern unterschiedlicher Dimension weder die physische Leistung einer Kleinfischart ändert beim Versuch ein Migrationshindernis zu bewältigen, noch der Kraftaufwand selbst, der aufzubringen ist, um über dieselbe Barriere zu gelangen.

Das Vorhaben ist ein Beitrag zur Förderung und Berücksichtigung der Belange der Fischfauna bei der naturnahen Gestaltung und Unterhaltung kleinerer Fließgewässer. Im Zentrum steht die Entwicklung einer funktionellen Zielvorstellung für die Gewässerökologie, wobei die unmittelbare und praktische Umsetzbarkeit in Form von Maßnahmen der technischen Gewässeraufsicht angestrebt wird.

Die Finanzierung dieses Projektes wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen getragen.

1.1 Migrationsbarrieren in kleinen Fließgewässern

Wanderhindernisse können sich sowohl aus biogenen Gründen wie z. B. Totholzverklausungen o. ä. (vgl. TRÄBING et al., 1997) in den Fließgewässern ausbilden, als auch rein anthropogener Natur sein. Während die biogenen Hindernisse zeitlich und räumlich als instabil angesehen werden können, verursacht die Sperrwirkung der anthropogenen Barrieren langfristige bis dauerhafte und quantitativ hohe ökologische Schäden. Anthropogen bedingte Migrationsbarrieren in Form von Längs- oder Querbauwerken sind nicht nur in großen und mittelgroßen Fließgewässern vorzufinden, sondern sie sind in den vergangenen Jahrzehnten auch zum festen technischen Bestandteil von Bächen und Gräben in unserer Kulturlandschaft geworden. Die Auswirkungen dieser oftmals gravierenden Baumaßnahmen betreffen damit nicht nur den isolierten „Lebensraum Fließgewässer“, sondern sämtliche darin lebenden Biozönosen und deren spezifische Populationen. Während sich dieser Einfluß auf eine bestimmte Fischart in den großen Flüssen oftmals erst nach langen Jahren und allmählich ankündigt, kann es in kleinen Fließgewässern wie Bächen und Gräben auf Grund der kleineren räumlichen Dimensionen und der kleineren Populationsgrößen schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit zu Ausfällen einzelner Fischarten oder zu Einbußen in der Populationsgröße kommen.

Wasserkraftanlagen z. B. an gestauten Bächen spielen in den kleinen Fließgewässern aus quantitativer Sicht nur eine untergeordnete Rolle. Öfters sind allerdings **Wehranlagen** anzutreffen, die teilweise noch in Funktion, teils bereits funktionslos geworden, Bäche in eine Abfolge von ökologisch isolierten Teilstrecken zergliedern. Am häufigsten jedoch sind *Bauwerke des Wasserbaus* als Ursache für die unterbrochene longitudinale und laterale Durchgängigkeit in kleinen Fließgewässern zu nennen. Hierunter fallen alle **Quer- und Längsbauwerke**, aber auch **hydraulische Barrieren** (geringer Wasserfilm, hohe Strömungsgeschwindigkeiten) sind mit der Problematik der Migrationsunterbrechung hauptsächlich bei Gegenstromwanderungen von Makroinvertebraten und Fischen in enge Verbindung zu bringen.

1.1.1 Querbauwerke

Abstürze

Abstürze wandeln überschüssige Strömungsenergie auf kürzester Strecke durch die Ausbildung einer Deckwalze in Wärme um. Erreicht wird dies durch den Wechselsprung beim

Fließwechsel von schießendem zu strömendem Abfluß (HALLE, 1993). Sie können sich sowohl aus biogen natürlichen als auch erosionsbedingten Gründen in den Fließgewässern ausbilden, mehrheitlich sind sie jedoch anthropogenen Ursprungs. So bilden sich oftmals schon nach kurzer Zeit am Auslauf einer Verrohrung tiefe Kolke oder es kommt dort durch eine Eintiefung des Unterwassers zu unüberwindbaren Abstürzen. Sohlschwellen können bei Niedrigwasserführung des Gewässers ebenso als Abstürze fungieren. Sehr häufig ergeben sich große Höhendifferenzen nach Pegel- oder Wehranlagen.

Das abstürzende Wasser fällt entweder über eine lotrechte oder eine steil geneigte Absturzwand, wobei sich der Überfallstrahl bei einer geneigten Schußwand nicht von dieser ablösen kann, sondern anliegt. Sofern die Differenz zwischen Ober- und Unterwasser nicht zu groß ist, ermöglicht ein kompakter und gebündelter, anliegender Strahl nach dem heutigen Kenntnisstand aufwanderungswilligen Fischen die Passage über den Absturz (JUNGWIRTH, 1994 und 1995).

Einzelheiten zur physischen Leistungsfähigkeit der verschiedenen Fischarten bei der Überwindung von Abstürzen („Sprungleistung“) oder der artspezifischen Schwimmleistungen sind hauptsächlich von Nutzfischarten wie z. B. den Lachsartigen bekannt (JENS, 1982; WINSTONE et al., 1985). Größere Wissensdefizite bestehen diesbezüglich aber bei wirtschaftlich nicht oder nur selten genutzten Fischarten und insbesondere bei Kleinfischen. Erst in jüngster Zeit befassen sich verschiedene Arbeitsgruppen und Autoren direkt und indirekt mit diesen speziellen Fragestellungen (BARANDUN, 1990; BLESS, 1990; BRUNKEN 1988; JUNGWIRTH, 1994, 1995; JUNGWIRTH und PELIKAN 1989; PETER, 1995; SCHUMANN, 1994; STAHLBERG-MEINHARDT, 1994; STAHLBERG & PECKMANN, 1987). Ungeachtet dessen lassen sich auch weiterhin noch einige der bestehenden Lücken im Kenntnisstand z. B. über die maximale Fallhöhe, minimale Fließgeschwindigkeit im Oberwasser oder der minimalen Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser eines Absturzes schließen.

Bodenschwellen oder Sohlgleiten

Grundschwellen sind in die Gewässersohle eingesetzt und ragen über diese hinaus, wobei sie eine Mindestfließtiefe durch Aufhöhung des Niedrigwasserstandes herbeiführen. Hauptsächlich in laufbegradigten Fließgewässern besteht die wasserbauliche Funktion von Bodenschwellen oder Sohlgleiten in der Stabilisierung und Sicherung des Untergrundes und dem Abbau von Gefälle. Boden- oder Grundschwellen können aus den unterschiedlichsten Materialien (Holz, Beton, Naturstein) bestehen und verschiedene Dimensionen annehmen. Eine segregierende

Wirkung auf Fischpopulationen ähnlich derer bei Abstürzen besteht ebenso, besonders wenn Bodenschwellen sicherheitshalber überdimensioniert gebaut wurden (flächendeckende Steinschüttungen, Pflasterungen), von hohen Fließgeschwindigkeiten überströmt werden oder das Gefälle bei Sohlgleiten zu steil ausgelegt ist.

1.1.2 Längsbauwerke

Verrohrungen

Kleinere Verrohrungen bzw. Verdohlungen wie sie im Straßenbau und hier wiederum hauptsächlich im Feldwegebau als Durchlässe und Unterführungen Verwendung finden sind oftmals mit Problemen verbunden, da sehr häufig ein zu steiles Gefälle, fehlendes oder ungeeignetes Bodensubstrat in der Verrohrung hohe Strömungsgeschwindigkeiten induziert und aufwanderungswilligen Organismen das Weiterkommen erschwert oder gar gänzlich verhindert. Bei der Ein- bzw. Auswanderung besteht ein krasser Hell-/Dunkel-Kontrast, der zu Orientierungsirritationen bei den wandernden Tieren führen und so die Gefahr der Abdrift erhöhen kann (HALLE, 1993). Wie schon erwähnt können nach solchen Verrohrungen Abstürze bzw. Auskolkungen entstehen und es kommt auf diese Weise zu einer synergetischen Kette von hintereinander geschalteten, nicht oder nur schwer überwindbaren Migrationshindernissen.

Glatte Sohloberflächen

Durch zu glatte Sohloberflächen mit ungenügender Rauigkeit entsteht in ausgebauten und begradigten Fließgewässern mit Regelprofilen sehr oft ein homogenes Strömungsbild mit hohen Fließgeschwindigkeiten, welche die physische Kapazität mancher Fischart ohne weiteres übersteigen können. Solche Situationen können auf einzelne kurze Gewässerstrecken (Straßen- und Bahnunterquerungen, Pegelbauwerke) beschränkt sein, in der Gesamtheit der Fälle sind davon aber meistens längere Abschnitte betroffen.

1.1.3 Hydraulische Barrieren

Hydraulische Barrieren leiten sich aus den Folgen eines jahrzehntelang aus rein technischer Sicht konsequent betriebenen Wasserbaues ab. Sie lassen sich auch als indirekte Migrationsbarrieren funktionaler Art beschreiben.

Hierzu zählt beispielsweise ein zu gering ausgebildeter Wasserfilm in den Fließgewässern, der einerseits natürlich (Niedrigwasserführung) andererseits aber auch anthropogen bedingt (Restwasser in Ausleitungsstrecken) sein kann. Weiterhin sind dauerhaft sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten, primär verursacht durch die Laufbegradigung vieler Gewässer, für viele aquatische Organismen ein entscheidender Punkt hinsichtlich einer nicht durchführbaren Aufwanderung, welches dann letztlich für die entsprechende Biozönose durch die Unterbrechung im Fließgewässerkontinuum eine Eingrenzung des Lebensraumes darstellt.

1.2 Auswirkungen von Migrationsbarrieren auf Fische

Ausbreitungen bzw. Wanderungen im Gewässer sind für Fische lebenswichtige Ortsveränderungen. Davon betroffen sind auch zeitweise stationär lebende Arten und deren unterschiedliche Altersstadien in kleinen Fließgewässern wie Bäche und Gräben (HOFFMANN, 1996). Die Ursachen dieser funktionellen Wanderungen sind vielfältig, die dabei bewältigten Distanzen sind unterschiedlich. Zu differenzieren ist hierbei auch zwischen den Begriffen „Bewegung“ (fish movement) und „Wanderung“ (fish migration) (vgl. PELZ, 1989).

Zum Zwecke der Fortpflanzung werden beispielsweise die bekannten **Laichwanderungen** (HOFFMANN et al., 1995) durchgeführt, um die geeigneten Laichhabitate erreichen zu können. Die Hauptwanderzeiten für die einzelnen Fischarten liegen dabei über das ganze Jahr hinweg verstreut (vgl. JENS et al., 1997).

Auch das Aufsuchen von geeigneten Nahrungsgründen (Fressplätze) durch spezielle **Nahrungswanderungen** (HOFFMANN et al., 1995) ist für Fische mit einer aktiven Ortsverlagerung verbunden.

Durch das **Aufsuchen von adäquaten Ruheplätzen und Schutzhabitaten** zu bestimmten Tages- oder Jahreszeiten (z. B. Winterlager) versuchen Fische verloren gegangene Energie zu remobilisieren oder dem Raubdruck durch Prädatoren zu entgehen.

Im Zuge **sukzessiver Prozesse**, z. B. einer Wiederbesiedelung nach Hochwasserereignissen, nach Einleitung toxischer Substanzen oder nach erfolgter Wiederherstellung einer günstigen Gewässerqualität (BLESS, 1992), kommt es zum Aufsuchen von unterschiedlichen Habitattypen. Hier sei u. a. auch das **Ausnutzen von Temporär- und Pionierstandorten** genannt oder die speziellen, quellwärts gerichteten **Kompensationsbewegungen**, welche

strömungsbedingte Driftverluste bei Jungfischen ausgleichen sollen (BLESS, 1985 und 1990; STAHLBERG-MEINHARDT, 1994).

Ein weiterer, für Fische wichtiger Grund zur Migration besteht in der **Regulierung der Bestandsdichte**. Dies kann ursächlich mit einem Ausdünnen einer eventuell lokal vorhandenen Überpopulation einer Art verbunden sein. Desweiteren gehört hierzu aber auch die **Vermeidung von intra- und interspezifischen Konkurrenzsituationen**.

Ebenso sei auf die natürliche Ausbreitung der Arten zur Erhaltung einer genetischen Variabilität in den einzelnen Populationen hingewiesen. Zum Zwecke des **Genetischen Austausches** sind Wanderungen deshalb unabdingbar, ohne die es zur Bildung von Inselepopulationen in den Gewässer Oberläufen kommt (BARANDUN, 1990; BLESS, 1985). Ein ausreichend großer Genpool ist aber zur Gewährleistung der genetischen Variabilität eine der Prämissen, um zukünftiges Überleben durch Anpassung an eine sich ständig verändernde Umwelt zu gewährleisten.

Eine der Grundvoraussetzungen all dieser in ihrer Funktion unterschiedlichen Wanderungen zu gewährleisten und ungestört ablaufen zu lassen, sind aber durchgängige Gewässer. Die Zerstückelung der Fließgewässer durch Querbauwerke erhöht das Aussterberisiko von Fischbeständen, vor allem in Extremsituationen. Eine selbständige Wiederbesiedelung in Richtung der Oberläufe wird dadurch eingeschränkt oder gänzlich verhindert (BARANDUN, 1990; BLESS 1990; BRUNKEN & PELZ, 1989). Weil eben schon einzelne, nach menschlichem Ermessen minimale bauliche Eingriffe wie z. B. Sohlschwellen oder Verrohrungen, für bestimmte Fischarten unüberwindliche Barrieren darstellen können und ihnen so keinerlei Chancen verbleiben ihren Lebenszyklus in verschiedenen Mikrohabitaten zu schließen, sollte jede zukünftige bauliche Veränderung auf ihre pure Notwendigkeit äußerst konsequent überprüft werden. Mit diesem Wissen sind auch die vorhandenen, bereits realisierten wasserbaulichen Maßnahmen in ihrer Existenzberechtigung zu hinterfragen und durch eventuelle Ausgleichsmaßnahmen oder funktionelle Wanderhilfen zu substituieren (vgl. BORN & STEIN, 1995).

1.3 Charakterisierung von Mühlkoppfen-, Elritzen und Bachschmerlenhabitaten

Tab. 1.3.1: Übersicht zur Charakterisierung von Kleinfischhabitaten basierend auf den Erhebungen des Projektes „Fischartenkartierung in Bayern“ (Quelle: Bayerische Landesanstalt für Fischerei, Starnberg)

	Grundverteilung aller Fließgewässer in Bayern	Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)
Stand: 21.03.1996				
Gesamtanzahl der Befischungsstrecken/Fischart N	2834	2834/948	2834/306	2834/761
mittlere Höhe über N. N. [m]	301 - 400	301 - 400	401 - 500	301 - 400
pH	$\bar{x} = 7,74$	7,6 - 8,0	7,6 - 8,0	7,6 - 8,0
el. Leitfähigkeit [µS/cm]	$\bar{x} = 545,3$	>800	601 - 700	0 - 200
WASSERKÖRPER				
Tiefe (Grad der Variabilität)	3	3	3	3
mittlere Tiefe [m]	0,25 - 0,5	0,25 - 0,5	0,25 - 0,5	0,25 - 0,5
minimale Tiefe [m]	0,00 - 0,05	0,10 - 0,25	0,00 - 0,05	0,00 - 0,05
maximale Tiefe [m]	0,25 - 0,5	1,00 - 1,50	0,25 - 0,5	0,75 - 1,00
Breite (Grad der Variabilität)	2	2	2	3
mittlere Breite [m]	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0
minimale Breite [m]	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0	0,51 - 1,0	2,1 - 5,0
maximale Breite [m]	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0	2,1 - 5,0
Strömung (Grad der Variabilität)	2	2	2	3
Strömung [cm/s]	21 - 30	21 - 30	11 - 20	21 - 30
GESAMTSTRUKTUR				
Variabilität der Strukturen	3	2	2	3
Grad der Natürlichkeit	4	4	4	3
STRUKTUR DER GEWÄSSERSOEHLE				
Felsen (>500 mm)	0	0	0	0
Feinkies (>2 mm)	3	3	3	3
Schlamm	0	0	0	0
Steine (>63 mm)	0	0	0	3
Sand (>0,063 mm)	1	2	1	2
grober Kies (>20mm)	1	1	1	3
Schluff/Ton (>0,002 mm)	0	0	0	0
TECHNISCHE EINGRIFFE				
Sohlpflaster	0	0	0	0
Grundschwelle	0	0	0	0

Abundanzwerte:

 0 = keine, nicht vorhanden
 1 = sehr wenig
 2 = wenig

 3 = mittel
 4 = viel
 5 = sehr viel

Tabelle 1.3.1 begründet sich auf den vorläufigen Ergebnissen der Erhebungen des Projektes „Fischartenkartierung in Bayern“, welches seit dem Jahre 1989 durchgeführt wird (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998). Für diese Zusammenstellung wurden aus Häufigkeitsverteilungen ausschließlich Werte mit einem Maximalvorkommen der betreffenden Fischarten berücksichtigt.

Insgesamt wurden 2834 bayerische Fließgewässerstrecken von den Fachbehörden der Bezirke und der Bayerischen Landesanstalt für Fischerei untersucht. Hierbei wurden neben gezielten Untersuchungen zum Fischbestand auch Analysen zu den spezifischen Umweltbedingungen in den Lebensräumen der einzelnen Fischarten vorgenommen, d. h. es wurden Informationen über die ökologischen Gegebenheiten im und am Gewässer gesammelt.

An 33,5% aller Standorte traten Bachschmerlen in den Fängen auf, 26,9% der begutachteten Fließstreckenabschnitte waren u. a. von Mühlkoppen besiedelt und lediglich an 10,8% aller Probestellen kamen Elritzen vor.

Laut dieser Erhebung besiedelt die Bachschmerle Fließgewässer mit einer mittleren Tiefe zwischen 0,25 und 0,5 m und einer mittleren Breite im Bereich von 2,1 bis 5 m, wobei die Tiefe in etwas höherem Maße variiert als die Breite. Die Strömung weist wenig Variabilität auf. Die mittlere Fließgeschwindigkeit erreicht Werte zwischen 0,21 bis 0,3 m/s.

Auch die Strukturen im Gewässer variieren wenig. Typische Bachschmerlenstandorte sind als bedingt naturnah anzusehen, d. h. es können leichte Begradigungen, einseitiges oder zu schmales Ufergehölz, nahe an das Gewässer herangeführte landwirtschaftliche Nutzflächen oder diverse Baumaßnahmen am Gewässer vorhanden sein (z. B. Autobahn, Bahndamm).

Als natürliche Bodensubstrate kommen hauptsächlich Feinkies (>2 mm) und Sand (>0,063 mm) vor, der gelegentlich mit grobem Kies (>20 mm) vermischt ist.

Sohlpflaster und Grundschwellen tauchen in den untersuchten Gewässerabschnitten nicht auf.

Die Mühlkoppe dagegen kommt eher in Gewässern vor, die sowohl hinsichtlich der Tiefe als auch der Breite in einem mittleren Grade variieren. Dabei erstreckt sich die mittlere Tiefe auf den Bereich zwischen 0,25 und 0,5 m, die mittlere Breite liegt zwischen 2,1 und 5 m. Die Strömung kommt mit einem mittleren Variabilitätsgrad vor, d. h. die Mühlkoppe bevorzugt in ihrem Habitat eher heterogene Strömungsmuster, wobei die mittlere Fließgeschwindigkeit Werte zwischen 0,21 und 0,3 m/s annimmt.

Die Strukturen wechseln sich in mittlerem Maße ab. Gewässer, in denen Mühlkoppen vorkommen, sind als naturnah zu bezeichnen. Das bedeutet, daß alle hydrologischen, morphologischen und strukturellen Elemente einem recht natürlichen Gewässerverlauf entsprechen, wobei das Vorkommen von diffusen häuslichen und landwirtschaftlichen

Abwässern davon unabhängig ist. Auch die Uferbereiche und Uferstreifen können leichten anthropogenen Einflüssen unterliegen.

Als natürliche Bodensubstrate kommen in gleichem Maße sowohl Feinkiese (>2 mm), Steine (>63 mm) als auch grober Kies (>20 mm) vor, während Sand (>0,063 mm) eine untergeordnetere Rolle spielt.

Sohlpflaster und Grundswellen sind in den untersuchten Gewässerstrecken mit einem Vorkommen der Mühlkoppe nicht vorhanden.

Der Wasserkörper eines typischen Elritzenhabitates wird mit einem mittleren Variabilitätsgrad der Tiefe beschrieben, wobei sich die Dimension der mittleren Tiefe dabei zwischen 0,25 und 0,5 m bewegt. Die Breite des typischen Elritzenbaches schwankt dagegen kaum. Dieser ist im Mittel zwischen 2,1 und 5 m breit. Ebenso variiert die Strömung nur wenig. Die mittlere Fließgeschwindigkeit liegt im Bereich zwischen 0,11 und 0,2 m/s.

Auch die im Gewässer vorhandenen Strukturen weichen wenig voneinander ab. ElritzenGewässer sind deshalb als bedingt naturnah anzusehen.

Als natürliche Substrate sind hauptsächlich Feinkiese mit einer mittleren Körnung >2 mm vorhanden.

Technische Eingriffe wie Sohlpflaster und Grundswellen fehlen in den untersuchten Fließgewässerabschnitten.

Vergleichend dazu gibt Tab. 1.3.2 einen Überblick zur Charakterisierung von Bachschmerlen-, Elritzen- und Mühlkoppenhabitaten in anderen Gewässern Deutschlands.

Tab. 1.3.2: Übersicht zur groben Charakterisierung von Kleinfischhabitaten basierend auf Freilandhebungen diverser Autoren.

	Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)
CHEMISCH-PHYSIKALISCHE PARAMETER			
pH		7,7 - 8,5	
Temperatur _{Wasser} [°C]		5,9 - 20,9	
O ₂ [mg/l]		8,4 - 13,2	
WASSERKÖRPER			
Tiefe [m]	0,02 - 0,20	0,25 - 0,48	keine Präferenz 0 ⁺ -Individuen < 0,2 m
Breite [m]	1,5 - 2,5		keine Präferenz

Fortsetzung Tab. 1.3.2: Übersicht zur groben Charakterisierung von Kleinfischhabitaten basierend auf Freilandhebungen diverser Autoren.

	Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)
HYDRAULIK			
Strömung [cm/s]	10 - 70 mit Präferenz bei 20	20 - 80	20 - 70
maximale Strömung [cm/s]	100		120
STRUKTUREN DER GEWÄSSERSOEHLE			
Kies		+	
Schlamm		+	
Steine		-	
Sand		+	
Steinschüttung		-	
Ton, Lehm		-	
Bearbeiter	BRUNKEN, 1988	BLESS, 1992	STAHLBERG- MEINHARDT, 1994
Gewässer	Gewässersystem im Raum Braunschweig	„Swist“	„Nette“/„Neile“

2. Material und Methoden

Um die biologischen Minimalanforderungen von diversen Kleinfischarten an hydraulische Gegebenheiten in Bächen und Gräben als auch die maximale physische Leistungskapazität an Migrationsbarrieren zu untersuchen, die diese Fischarten in einem von anthropogenen Einflüssen geprägten aquatischen Lebensraum aufbringen müssen, wurde am Institut für Wasserforschung in der Versuchsanlage Wielenbach ein künstliches Fließgerinne mit einem dementsprechenden Meßinstrumentarium erstellt. Eines der Ziele dieses Projektes war die weitgehend automatische und kontinuierliche Registrierung der Fischbewegungen und gleichzeitige Aufzeichnung der wesentlichen Umgebungsparameter. Dafür wurde ein modifizierter Fischzähler (VAKI-River Stock Monitor, RSM) eingesetzt, der die Tiere während der Versuchsabläufe in ihrem natürlichen motorischen Verhalten nicht beeinflusste. Es mußten auch keinerlei Manipulationen an den Versuchsfischen (z. B. Sender, Marken)

vorgenommen werden. Gerade wegen der geringen Größe der Testfische und im Rahmen des Tierschutzes wurde besonderer Wert darauf gelegt, eine Applikation von Sendern oder Marken zu umgehen.

Die Vorteile eines künstlichen Fließgerinnes liegen darin begründet, daß die Versuche gut nachvollziehbar sind, während die untersuchten Parameter gut darstellbar und kontrollierbar bleiben. Außerdem sind die Testfische immer vollständig und jederzeit verfügbar. Als nachteilig erweist sich aber, daß die Ergebnisse nicht vollständig einer Freilandsituation entsprechen können, da dort (selbst in einem ausgebauten Gewässer) meist eine Heterogenität und Komplexität der vielzähligen Parameter vorherrscht. Deshalb sollte nach Abschluß der Rinnenversuche angestrebt werden, daß die erhaltenen Ergebnisse auf ein natürliches kleines Fließgewässer ausgeweitet und dort verifiziert werden.

2.1 Fließgerinne

Das Fließgerinne (Abb. A2.1.1) wurde so gestaltet, daß in ihm unterschiedliche Struktur- und Strömungsbedingungen erzeugt, aber auch verschiedene Migrationsbarrieren simuliert werden können und dies in einem annähernd natürlichen Maßstab. Es besteht im wesentlichen aus einem Unterwasser- und einem Oberwasserbecken mit den jeweiligen Abmessungen von $2 \times 1 \times 1$ m (L x B x H), welche durch eine Rinne ($3,4 \times 0,4 \times 0,5$ m) miteinander verbunden sind. Als Baumaterial wurden wasserfest verleimte, 18 - 23 mm starke Holzplatten verwendet. Unterwasserbecken und Rinne sind mit mehreren Sichtfenstern versehen worden, um die Bewegungsmechanismen der Fische beim Auf- oder Abstieg verfolgen zu können. Außerdem ist das Unterwasserbecken mit der Rinne durch eine hydraulische Hubvorrichtung höhenvariabel einstellbar. Damit kann eine Veränderung des Gefälles mit einer Höhendifferenz von ca. 10 cm bewirkt werden, was wiederum eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers nach sich zieht. Auf diese Weise sind Strömungsgeschwindigkeiten bis $v \leq 1,75$ m/s simulierbar. Die Wasserversorgung setzt sich aus zwei verschiedenen Wasserqualitäten zusammen: Quellwasser und Bachwasser. Die Wassermenge, aber auch die Wasserqualität kann über vier Zulaufrohre eingestellt werden. Die maximale Literleistung liegt bei etwa 50 l/s. Um den Wasserbedarf zum einen für die höheren Fließgeschwindigkeiten zu decken und zum anderen den Wasserverbrauch in einem vertretbaren Rahmen zu halten, mußten Pumpvorrichtungen eingebaut werden, durch die mit Hilfe eines parallel geschalteten Vorratsteiches eine teilweise Mehrfachnutzung des Wassers erreicht werden konnte.

Der Wasserstand (Pegel) im Gerinne wird über zwei Standrohre am Ende des Unterwasserbeckens reguliert.

Das Wasser wird im Oberwasserbecken durch zwei „Strömungshomogenisatoren“ strömungsberuhigt und fließt ohne größere Turbulenzen laminar in die Rinne ab. Bei der Aufnahme von Strömungsprofilen in der Fließrinne zeigte sich, daß nur geringe Gradienten von lateral nach zentral, bedingt durch Reibungsverluste an der rauhen Oberfläche des Baumaterials bzw. an der Grenzschicht Luft-Wasser, auftraten (Abb. 2.1.1). Es ist daher denkbar, daß die Versuchsfische auf diese geringen Strömungsgradienten reagieren und sie bei extremen Abflußspitzen gerade noch nutzen können, um eine Aufwärtsbewegung zu vollenden.

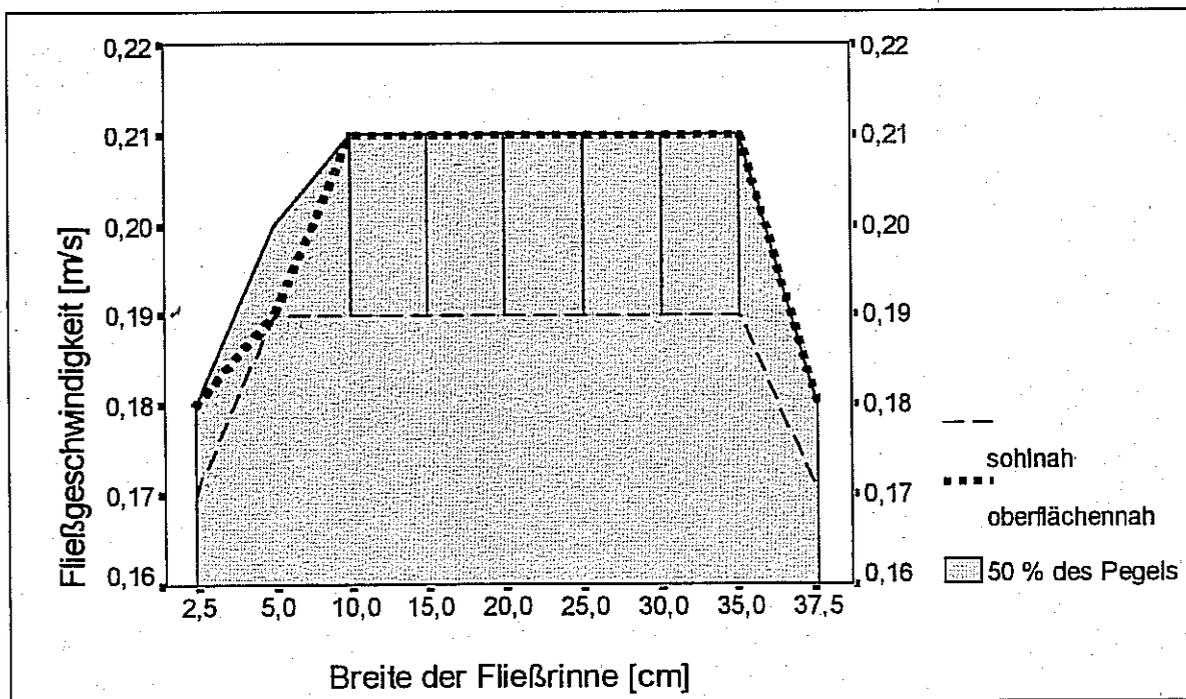


Abb. 2.1.1: Strömungsverhältnisse in verschiedenen Horizonten der experimentellen Fließrinne.

Um die Versuchsfische sanft zu einer aufwärts gerichteten Wanderung zu bewegen, wurden zwei unterschiedliche Strategien parallel angewandt. Zum einen erhielten die großen Becken eine gegensätzliche Ausstattung. Im Unterwasserbecken wurde auf Versteckmöglichkeiten vollkommen verzichtet, während das Oberwasserbecken gänzlich mit großen Röhren aus PVC gefüllt war, die den Fischen Schutz vor ihren Artgenossen und der Strömung boten. Zum anderen wurden die Versuchsfische in großen Dichten eingesetzt (vgl. ZERRATH, 1996), die ein Vielfaches der natürlichen Dichte betragen (vgl. BLESS, 1990; BRUNKEN, 1988; STAHLBERG-MEINHARDT, 1994). Diese bewußt erzeugten Massenansammlungen sollten unter den Individuen „Sozialstreß“ entstehen lassen, dem in der Versuchsanlage nur durch eine

Wanderung in das Oberwasserbecken mit den reichlich dargebotenen Versteckmöglichkeiten entgangen werden konnte. Gerade bei der solitär lebenden und revierbildenden Mühlkoppe, von der keine natürlichen Massenansammlungen bekannt sind (BLESS, 1990) konnte beobachtet werden, daß dies ein entscheidender Grund für eine Ortsverlagerung war. Darüber hinaus ist speziell von der Mühlkoppe bekannt, daß quellwärts gerichtete Ausgleichsbewegungen zur Regulierung der Bestandsdichte von unterschiedlichen Altersstadien unternommen werden (BLESS, 1990; STAHLBERG-MEINHARDT, 1994), welche für den Versuchsablauf besonders förderlich waren.

2.2 Meßgeräte

Während der laufenden Versuche wurden regelmäßig, d. h. alle 60 Minuten verschiedene chemisch-physikalische Parameter im Oberwasserbecken gemessen und die Werte anschließend in zwei Datenloggereinheiten (*A-Hirnchen* und *B-Hirnchen*; Fa. OTT, Kempten) abgespeichert. Damit war die direkte EDV-technische Übertragung und eine schnelle Auswertung am PC möglich. Zu den ermittelten Umweltparametern gehören pH, Wasser- und Lufttemperatur [°C], Sauerstoffgehalt [mg/l] und Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$], die alle mit WTW-Feldgeräten („LF191“, „Oxi191“, „pH196“; Fa. WTW, Weilheim) erfaßt wurden.

Die Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers wurden am Ein- und Auslauf der Fließrinne induktiv (*NAUTILUS*, Fa. OTT) und zur Kontrolle mittels Meßflügel (Fa. REINHARD, Bodenfelde; \varnothing 1,8 cm) ermittelt. Die Daten wurden ebenfalls alle 60 Minuten in Datenloggern abgespeichert.

Für die vollautomatische Registrierung der Fischpassagen kam ein ursprünglich für die Aquakultur entwickelter sogenannter „River Stock Monitor“ (Fa. VAKI, Reykjavik/Island) zum Einsatz, der bezüglich der Fischwanderungen mehr Informationen liefern kann als die herkömmliche Lichtschrankentechnik. Die Apparatur ist laut Herstellerangaben in der Lage, Passagen von Fischen vollautomatisch zu registrieren und nach der Zeit, der Schwimmrichtung und -tiefe der Fische zu differenzieren. Da es sich bei diesem Gerät um eine Sonderanfertigung für den Einsatz in Fließgewässern handelt und es erst für die speziellen Versuchsbedingungen präpariert werden mußte, war eine langwierige Entwicklungsarbeit seitens der Soft- und Hardware abzuleisten. Trotz großem Feedback und mehreren Probeläufen gelang es der Herstellerfirma aber nie, die anfänglichen Probleme (s. 3.1) vollständig aus dem Weg zu räumen.

Dieser Fischzähler (Abb. A2.1.2) wurde am Übergang des Aufstiegsbehälters in die Fließrinne installiert. Das Gerät besteht aus zwei Scanner-Einheiten (20 x 60 cm) mit jeweils zwei Reihen Infrarotemittierenden Dioden und -empfangenden Sensoren. Passiert ein Fisch dieses Scannersystem, wird seine genaue Position über die Anzahl der blockierten Sensoren in einer Zentraleinheit verrechnet und abgespeichert. Auf diese Weise können die über die Zeit integrierten Daten als Fischbewegungen im Monats- oder Tagesverlauf graphisch dargestellt werden. Außerdem lassen sich zusätzliche Informationen über die Anzahl der Auf- und Abwärtsbewegungen im Untersuchungszeitraum oder in der entsprechenden Tiefenzonierung gewinnen. Diese Ergebnisse sollten dann letztlich auf einen Zusammenhang mit den dargebotenen Versuchseinstellungen hin überprüft werden.

2.3 Versuchsbeschreibung und Versuchsdurchführung

Im Fließgerinne wurde die Ausbreitung bzw. die Verteilung der Versuchsfische unter den gegebenen Bedingungen untersucht. Als alleiniges Kriterium für die Überwindbarkeit von Strömung, definierten Strukturen und Hindernissen (z. B. Sohlschwellen, Sohlabstürze, Verrohrungen) zählte der erfolgreich aufwärts gewanderte Fisch.

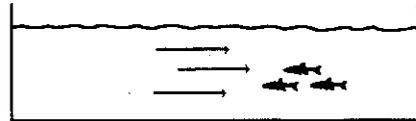
Da zahlreiche Faktoren wie z. B. Strömung, Varianz der Tiefe, Strukturvielfalt oder die verschiedensten Verbauungsformen die Ausbreitungsgrenzen für Fischpopulationen innerhalb eines Fließgewässers bilden (BLESS, 1981, 1990; JUNGWIRTH & WINKLER, 1983), wurden während dieses Forschungsvorhabens einige der wesentlichen Parameter näher untersucht. Im Vordergrund standen dabei:

- Strömungsgeschwindigkeit des Wassers bei laminarem Abfluß
- Vertikale Mächtigkeit des Wasserfilms
- Material und Rauigkeit der Sohle
- Bodenschwelle (Höhe/Strömungsgeschwindigkeit und vertikale Mächtigkeit des Wasserfilms im Oberwasser)
- Absturz (Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser)
- Verrohrung (Befüllungsgrad/Strömungsgeschwindigkeit)

Die Versuche gliedern sich deshalb analog ihrer funktionellen Gruppen in Strömungs-, Tiefen-, Substrat- und Barrierenversuche. Zum besseren Verständnis sind sie in der Darstellung mit dem jeweiligen Symbol gekennzeichnet.

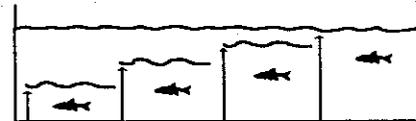
„Nullversuche“ mit minimaler Strömung und einer mittleren vertikalen Mächtigkeit der Wassersäule dienten der Kalibrierung oder der Abschätzung der quantitativen Wanderungsraten.

„Strömungsversuche“



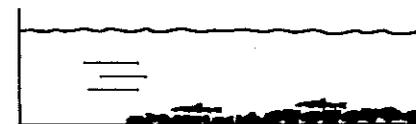
Die Strömung ist einer der dominierenden Faktoren im aquatischen Lebensraum. Deshalb wurde die Fließrinne während der „Strömungsversuche“ mit sich steigenden Fließgeschwindigkeiten aber einer konstanten vertikalen Mächtigkeit der Wassersäule beschickt. Hierbei konnten leider nicht immer lineare und gleichmäßige Schrittweiten eingehalten werden, die Auftreppung mußte sich nach der zur Verfügung stehenden Wassermenge richten.

„Tiefenversuche“



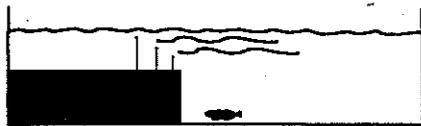
JUNGWIRTH (1983) hat gezeigt, daß die Diversität der Fischgemeinschaften mit der Varianz der Tiefe eng korreliert ist. Ebenso wichtig ist aber die Frage der Mindestdotation entweder bei den heute üblichen technischen Umgehungsgerinnen oder natürlicherweise in kleinen Fließgewässern, die im Laufe des Sommers der Gefahr des Austrocknens ausgesetzt sind. Diesen Aspekten sollte durch mehrere Versuchsstellungen mit unterschiedlichen Tiefenverhältnissen bei konstanter Fließgeschwindigkeit Rechnung getragen werden („Tiefenversuche“ oder Versuche zur „vertikalen Mächtigkeit der Wassersäule“).

„Substratversuche“



Bei den durchgeführten „Substratversuchen“ wurden Kiese unterschiedlicher Körnung (16 mm/32 mm) in die Rinne ausgebracht und bei konstanter vertikaler Mächtigkeit der Wassersäule mit diversen Fließgeschwindigkeiten überströmt.

„Barrierenversuche“



Zu den sogenannten „Barrierenversuchen“ gehören die Versuchsanstellungen zur Auswirkung von Sohlschwellen und Abstürzen unterschiedlicher Höhe und Verrohrungen auf die Migrationsrate der Testfische. Dabei wurde im Falle der zu ermittelnden Maximalhöhe der Bodenschwellen und Abstürzen sowohl die Fließgeschwindigkeit als auch die vertikale Mächtigkeit der Wassersäule des Oberwassers konstant gehalten. Bei den Fragestellungen zur Fließgeschwindigkeit und der vertikalen Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser einer Bodenschwelle war deren Höhe konstant.

Die Auswertung von Teildaten der bayerischen Fischartenkartierung erbrachte dazu wertvolle Erkenntnisse über die realistischen Dimensionen der wichtigsten morphologischen und strukturellen, chemisch-physikalischen aber auch der hydraulischen Parameter, die dann in der technischen Fließrinne simuliert werden konnten.

In der praktischen Durchführung dauerte eine Versuchsanstellung 24 Stunden, da das Migrationsverhalten der Fische mindestens in einer belichteten und in einer unbelichteten Phase (Tag- und Nachtrhythmus) zu prüfen war. Vorversuche von 6 bzw. 12 Stunden Dauer während des Tages erbrachten keine zufriedenstellenden quantitativen Ergebnisse. Zur weiteren Absicherung der Aussagefähigkeit der Befunde wurde jeder Versuch mindestens einmal wiederholt.

Nachdem zum jeweiligen Versuchsbeginn alle notwendigen Parameter vorstellungsgerecht eingestellt waren, wurden die Fische vorsichtig in das Unterwasserbecken eingesetzt und nach einer Dauer von 24 Stunden aus dem Oberwasserbecken wieder mittels Kescherfängen abgefischt. Es erfolgte eine leichte Ruhigstellung der Fische durch Zugabe eines Sedativums ins Hälterwasser (*HYPNODIL*, Fa. JANSSEN, Neuss). So konnten die Individuen gezählt und einzeln gemessen (Totallänge) bzw. gewogen werden. Während einer ein- bis zweistündigen Erholungsphase in einem mit Frischwasser durchströmten Behälter konnten die Versuchsfische anschließend ihre ursprüngliche Mobilität wiedererlangen. Sodann standen sie für einen weiteren Versuch erneut zur Verfügung.

2.4 Versuchsfische

Für die Bearbeitung der Fragestellungen wurden Fischarten der oberen (Epirhithral) und unteren (Metarhithral) Forellenregion mit verschiedenen biologischen Eigenschaften bezüglich der Beweglichkeit und Schwimmweise als auch der Präferenz für Teillebensräume herangezogen: Die Mühlkoppe (*Cottus gobio*; Abb. A2.4.1) als eine bodenbewohnende Art ohne Schwimmblase, die Bachschmerle (*Barbatula barbatula*; Abb. A2.4.2) als Vertreter einer bodengebundenen Fischart mit Schwimmblase und die Elritze (*Phoxinus phoxinus*; Abb. A2.4.3) als eine sprungfreudige Species, die sich im freien Wasserkörper fortbewegt.

Es handelt sich im übrigen auch um Fischarten, die in der *Roten Liste gefährdeter Tiere in Bayern (1993)* aufgeführt sind. Die Elritze und Bachschmerle gelten darin beispielsweise als *gefährdet* (Gefährdungskategorie 3), während die Mühlkoppe als eine *potentiell gefährdete* Fischart (Gefährdungskategorie 4b) ausgewiesen ist, welche zwar eine deutlich rückläufige Bestandsentwicklung zeigt, deren Bestandssituation aber insgesamt noch nicht als kritisch zu betrachten ist.

Mühlkoppe (*Cottus gobio*)



Die Mühlkoppen wurden am 06.03.1997 und 11.03.1997 mit Hilfe des Elektrofischfangergerätes (Fa. GRASSL, 0,8 kW) dem Hardtbach bei Wielenbach entnommen. Es wurden dabei Größen zwischen 6,5 cm und 13,2 cm gefangen mit Gewichten zwischen 3 g und 34 g (Tab. 2.4.1a). Das Längenspektrum der Fische und deren Häufigkeiten entsprechen annähernd einer Normalverteilung (Abb. 2.4.1a).

Bei den Versuchsanstellungen wurde mit einer Dichte bzw. einer Biomasse von 124,5 Tieren pro Quadratmeter ($\cong 1620,5 \text{ g/m}^2$) gearbeitet (Tab. 2.4.1a). BLESS (1990) stellte in Freilanduntersuchungen an einem typischen Mühlkoppenbach (Breite in m, min. - max.: 1,49 - 3,22/Wassertiefe in cm, min. - max.: 3 - 45) eine durchschnittliche Besiedlungsdichte von 5 ± 2 Individuen pro 10 m Bachstrecke fest ($\cong 0,5 \pm 0,2 \text{ n/m}^2$, *Anmerk. d. Autors*). Ähnliche Ergebnisse liefert STAHLBERG-MEINHARDT (1994). Hier werden Dichteangaben von 0,1 - 1,3 Individuen/m² gemacht, wobei die Mühlkoppe (Tiere > 50 mm TL) in den

„Schwerpunkthabitaten“ (der Untersuchungen, *Anmerk. d. Autors*) mit 0,5 - 1,0 Tieren pro Quadratmeter vorkommt. In wenig gestörten „Fließgewässerbereichen“ von Bächen der norddeutschen Tiefebene ermittelte WATERSTRAAT (1992) Individuendichten von 0,3 - 0,6 n/m².

Zwischen den Versuchen wurden die Fische in einer großen Langstromrinne, ausgestattet mit vielen Tonröhren als Versteckmöglichkeiten und einer ausreichenden Frischwasserzufuhr gehalten. Nur dort wurden die Mühlkopen während der gesamten Versuchszeit gefüttert, anfangs zuerst mit Forellenlaich, später dann mit Forellenbrütlings. Darüber hinaus wurde auch piscivores Verhalten beobachtet, bzw. eine gewisse Neigung zum Kannibalismus (vgl. STAHLBERG-MEINHARDT, 1994), wobei besonders oft große, starke Männchen die kleinen Weibchen erbeuteten. Ein weiterer Grund für die auffallend hohe Mortalitätsrate von 43% (stückbezogen) bzw. 45,9% (Biomasse) war eine latente Infektion der Fische mit Ektoparasiten der Gattungen *Gyrodactylus* und *Dactylogyrus* (Tab. 2.4.1c). Bezogen auf die gesamte Versuchsdauer entspricht dies einer monatlichen Mortalitätsrate von 8,6% (stückbezogen) bzw. 9,2% (Biomasse). Durch die Sterblichkeit blieb aber die Grundverteilung der Tiere entsprechend den Längensklassen des Anfangsbestandes annähernd erhalten (Abb. 2.4.1b). Aus Abb. 2.4.2 und Tab. 2.4.1b geht hervor, daß die kleinsten Exemplare mit der Zeit ausfielen, während bei den restlichen Fischen mittlerer Größe ein deutliches Längenwachstum mit einer allerdings nur leichten Gewichtszunahme stattgefunden hat.

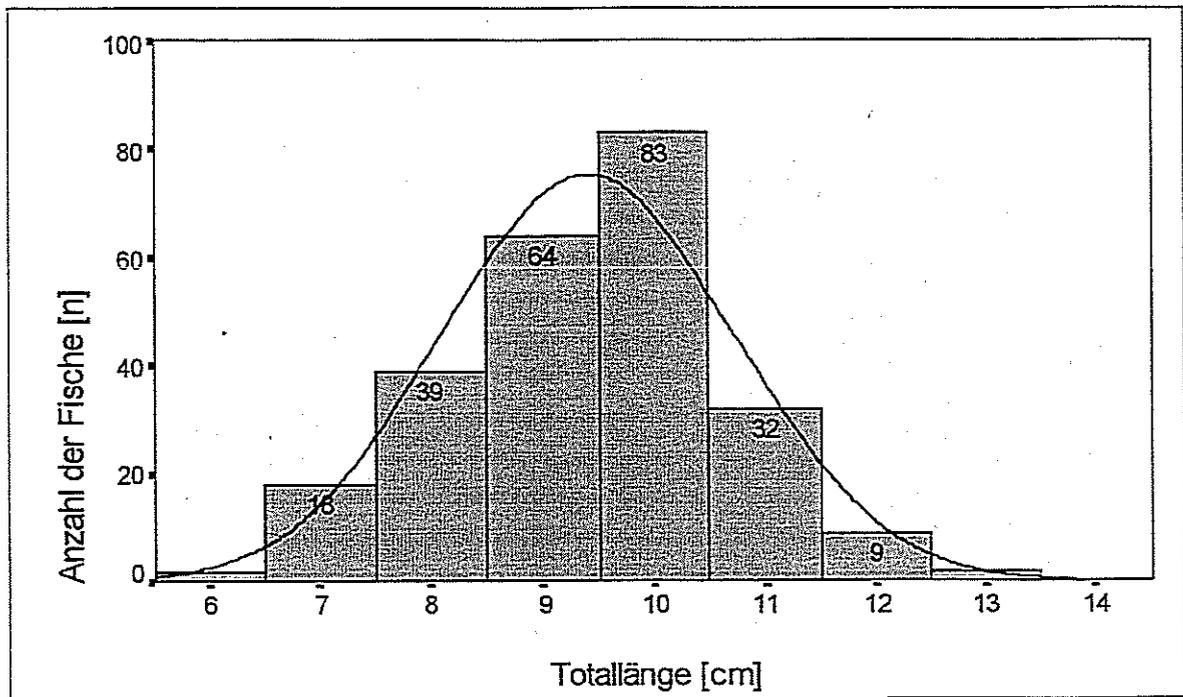


Abb. 2.4.1a: Längenhäufigkeitsverteilung im Anfangsbestand der in den Versuchen eingesetzten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 249; Stand: 12.03.1997].

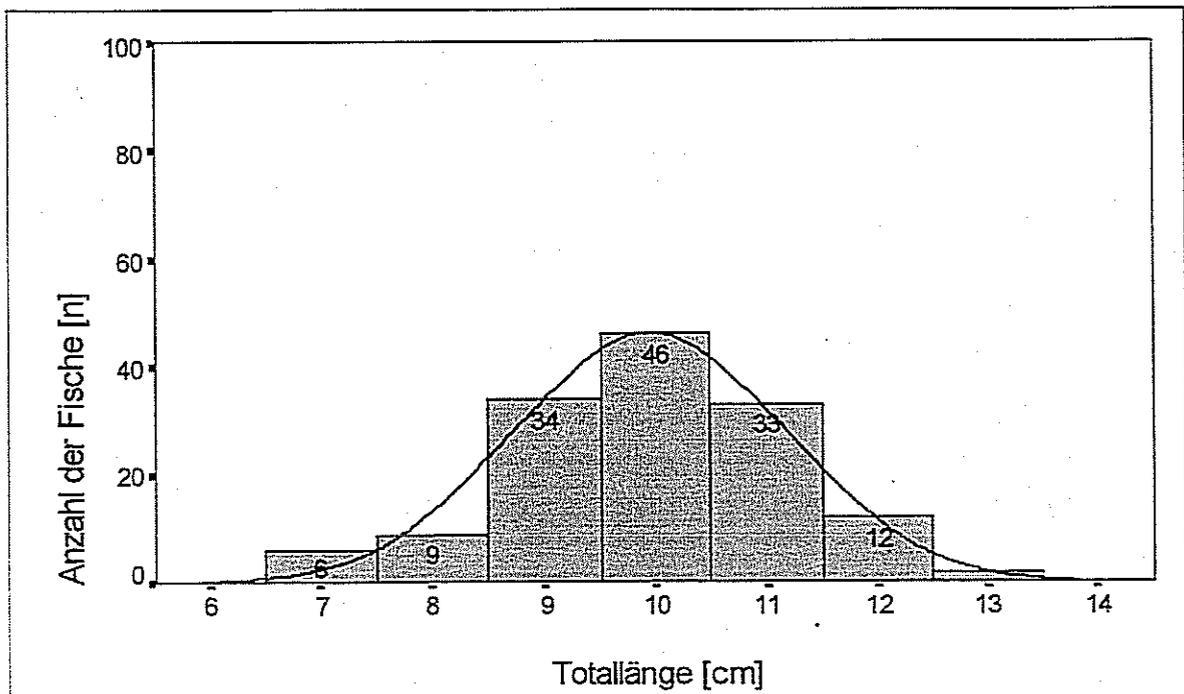


Abb. 2.4.1b: Längenhäufigkeitsverteilung im Endbestand der in den Versuchen eingesetzten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 142; Stand: 26.08.1997].

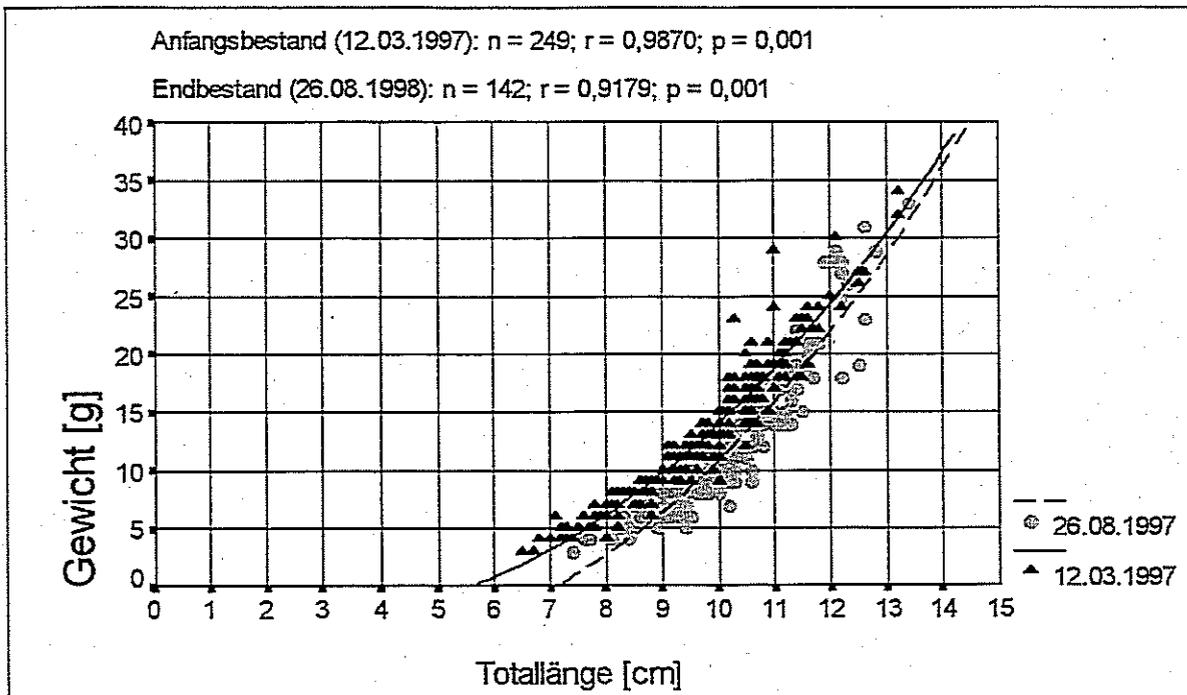


Abb. 2.4.2: Längen-Gewichtskorrelation der in den Versuchen eingesetzten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) [Anfangsbestand: 12.03.1997; Endbestand: 26.08.1997].

Tab. 2.4.1a: Statistische Kennzahlen der morphometrischen Größen und Dichteangaben im Anfangsbestand der Versuchsfischart Mühlkoppe (*Cottus gobio*) vom 12.03.1997.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	Totallänge [cm]	Gewicht [g]
Anzahl [n] / Gesamtgewicht [g]	249	3241
Mittelwert \bar{x}	9,7	13,0
Median \tilde{x}	9,8	12,0
Standardabweichung s	1,317	5,928
Minimum	6,5	3
Maximum	13,2	34
Biomasse [n/m^2 bzw. g/m^2]	124,5	1620,5

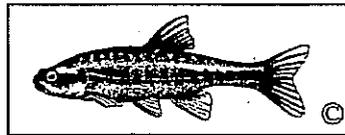
Tab. 2.4.1b: Statistische Kennzahlen der morphometrischen Größen und Dichteangaben im Endbestand der Versuchsfischart Mühlkoppe (*Cottus gobio*) vom 26.08.1997.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	Totallänge [cm]	Gewicht [g]
Anzahl [n] / Gesamtgewicht [g]	142	1753
Mittelwert \bar{x}	10,2	12,3
Median \tilde{x}	10,2	10,5
Standardabweichung	1,221	6,461
Minimum	7,4	3
Maximum	13,4	33
Biomasse [n/m^2 bzw. g/m^2]	71	876,5

Tab. 2.4.1c: Mortalitätsraten von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) im Versuchszeitraum vom 12.03.1997 bis 26.08.1997.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	(12.03.1997 - 26.08.1997)	
	Anzahl [n]	Biomasse [g]
Mortalitätsrate [%]	43,0	45,9

Elritze (*Phoxinus phoxinus*)



Das Prozedere bezüglich Hälterung und Handling gleicht bei den Arten Elritze und Bachschmerle demjenigen der Mühlkoppe, bei der Fütterung wurde lebendes Zooplankton verabreicht. In beiden Fällen handelt es sich ebenfalls um strömungsadaptierte Wildfische, die am 01.09.1997 bzw. 13.10.1997 mittels Elektrofischfanggerät (Fa. GRASSL, 0,8 kW) der Mangfall bei Rosenheim (Fkm 5,4) entnommen wurden. Es war auf Grund einer hohen Sterblichkeit notwendig, mit verschiedenen Chargen von Versuchsfischen zu arbeiten. Bei der anfangs verwendeten Grundgesamtheit betrug die monatliche Mortalitätsrate wegen eines starken ektoparasitären Befalls 17,3% (stückbezogen) bzw. 16,3% (Biomasse), im späteren Verlauf mußten durchschnittliche monatliche Verluste von ca. 8,7% (stückbezogen und Biomasse) hingenommen werden (Tab. 2.4.2c).

Bei beiden Befischungen wurden Elritzen mit einem ähnlichen, annähernd normalverteilten Längenspektrum zwischen ca. 4 cm und 10 cm gefangen, durch eine unterschiedliche Anzahl und Zusammensetzung der Größen waren die Fische aus der Grundgesamtheit II durchschnittlich aber etwas größer und schwerer (Tab. 2.4.2a, Abb. 2.4.3a, Abb. 2.4.4a).

Unter Berücksichtigung der Mortalitätsraten läßt sich bei beiden Chargen mit fortschreitender Versuchsdauer zwar eine quantitative Reduktion beobachten, die Häufigkeitsverhältnisse bleiben davon aber unberührt (Tab. 2.4.2b, Abb. 2.4.3b, Abb. 2.4.4b).

Ein signifikantes Wachstum der Versuchsfische konnte bei keiner der eingesetzten Grundgesamtheiten nachgewiesen werden (Abb. 2.4.5, Abb. 2.4.6), wobei zum einen die Hälterungszeit zu kurz war und zum anderen abnehmende Wassertemperaturen gegen Jahresende kein Längenwachstum bzw. eine Gewichtszunahme mehr zuließen. Andererseits

kann gesagt werden, daß die verwendeten Elritzen praktisch bei gleichbleibender Kondition in den Versuchen eingesetzt wurden.

In beiden Fällen wurde mit hohen Fischdichten bzw. Biomassen gearbeitet. Statistisch wurden anfangs 173,5 Tiere pro Quadratmeter ($\cong 484 \text{ g/m}^2$) eingesetzt, bei der zweiten Charge 232 Tiere n/m^2 ($\cong 821 \text{ g/m}^2$). Aus Freilanduntersuchungen von STAHLBERG-MEINHARDT (1994) liegen dazu maximale Dichteangaben von $0,23 \text{ n/m}^2$ vor.

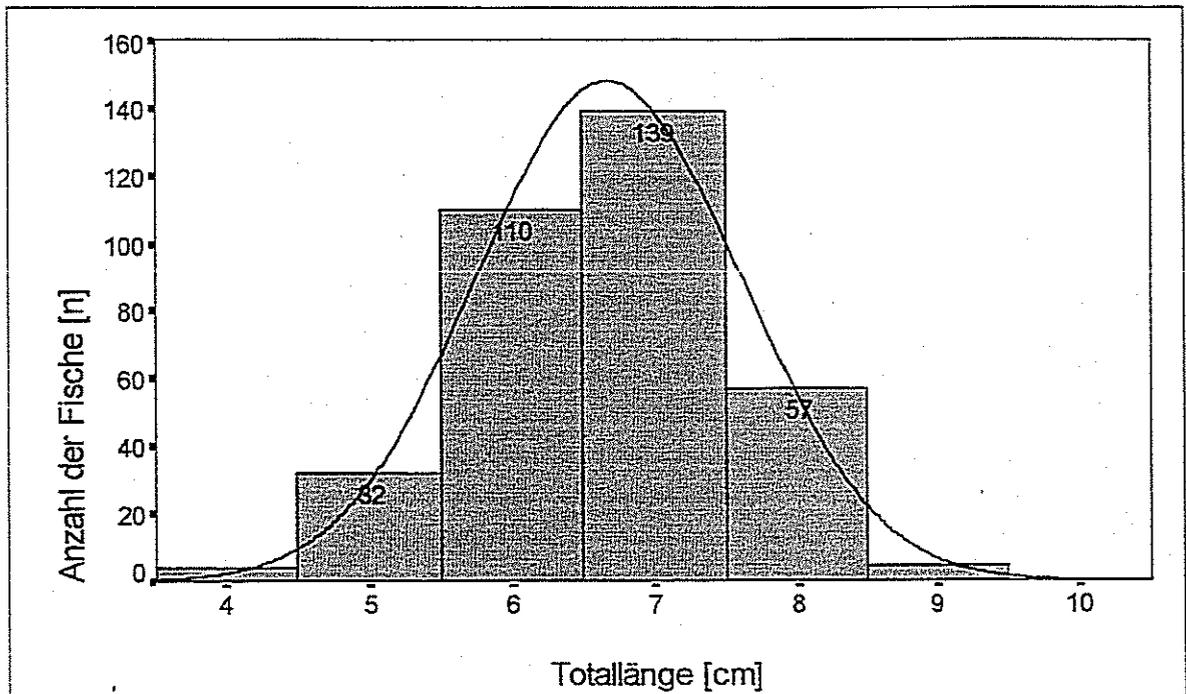


Abb. 2.4.3a: Längenhäufigkeitsverteilung im Anfangsbestand (Grundgesamtheit I) der in den Versuchen eingesetzten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 347; Stand: 03.09.1997].

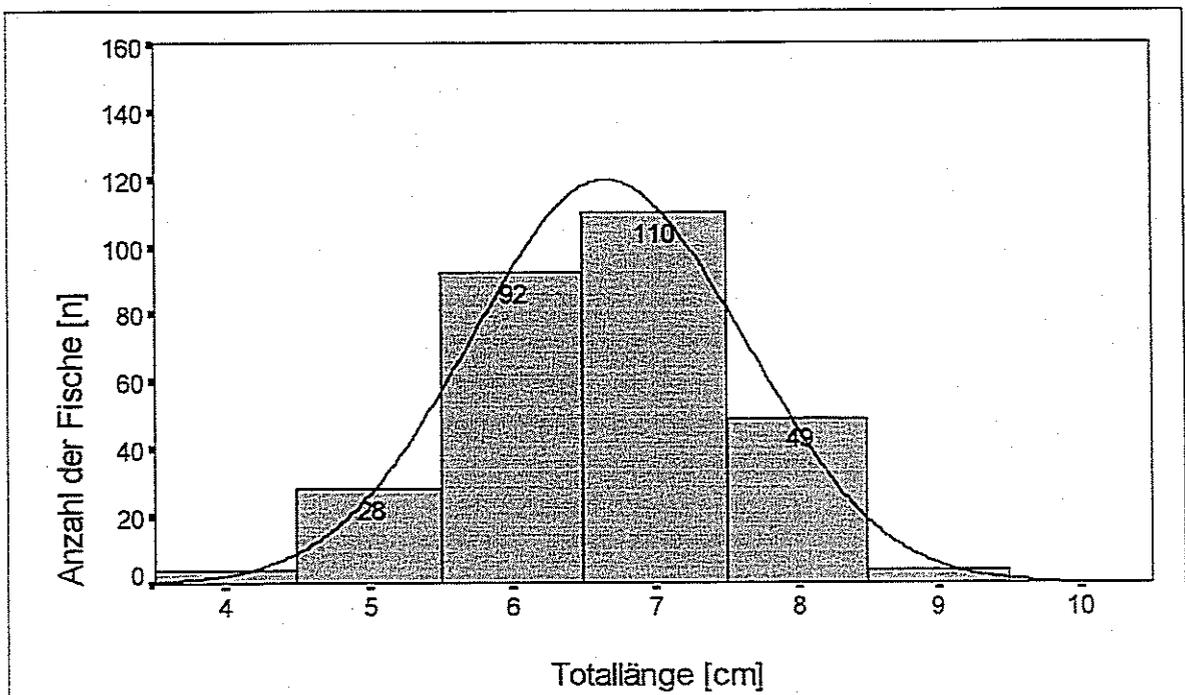


Abb. 2.4.3b: Längenhäufigkeitsverteilung im Endbestand (Grundgesamtheit I) der in den Versuchen eingesetzten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 287; Stand: 26.09.1997].

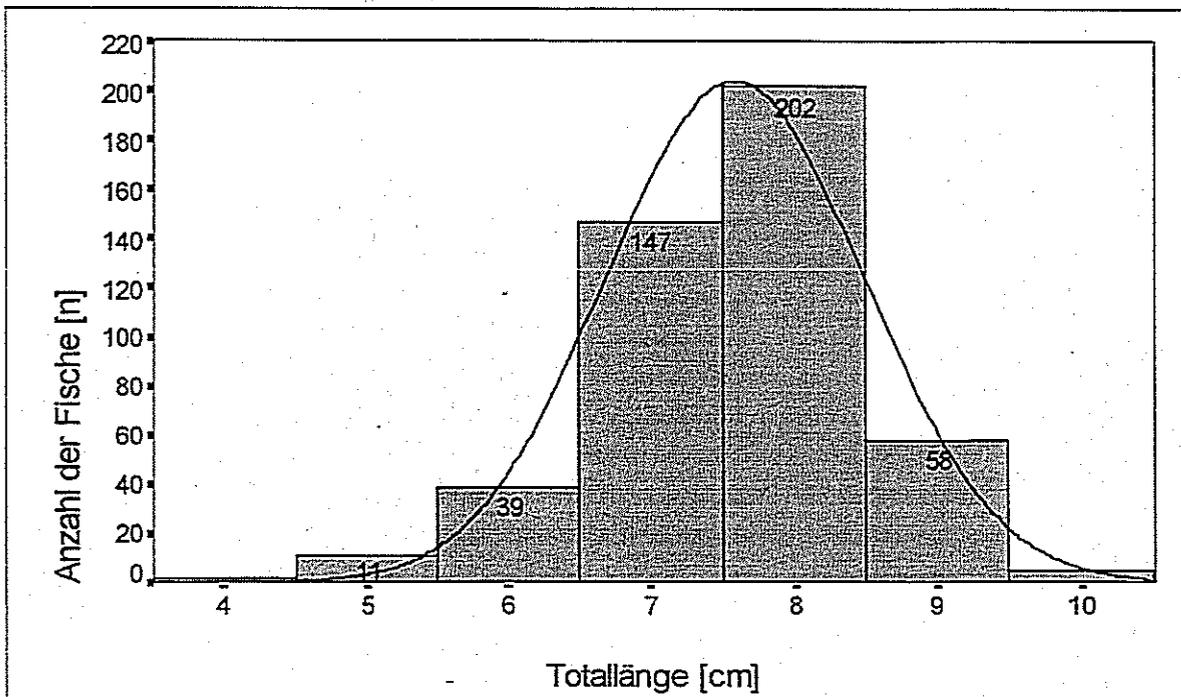


Abb. 2.4.4a: Längenhäufigkeitsverteilung im Anfangsbestand (Grundgesamtheit II) der in den Versuchen eingesetzten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 464; Stand: 15.10.1997].

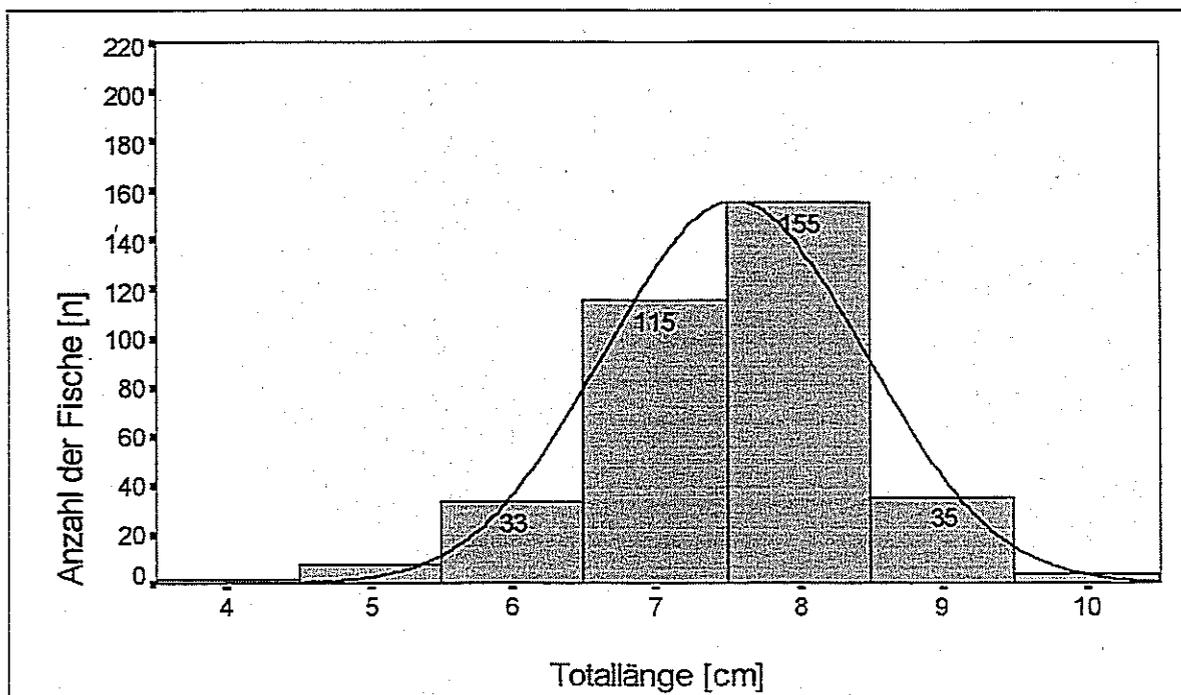


Abb. 2.4.4b: Längenhäufigkeitsverteilung im Endbestand (Grundgesamtheit II) der in den Versuchen eingesetzten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 352; Stand: 07.01.1998].

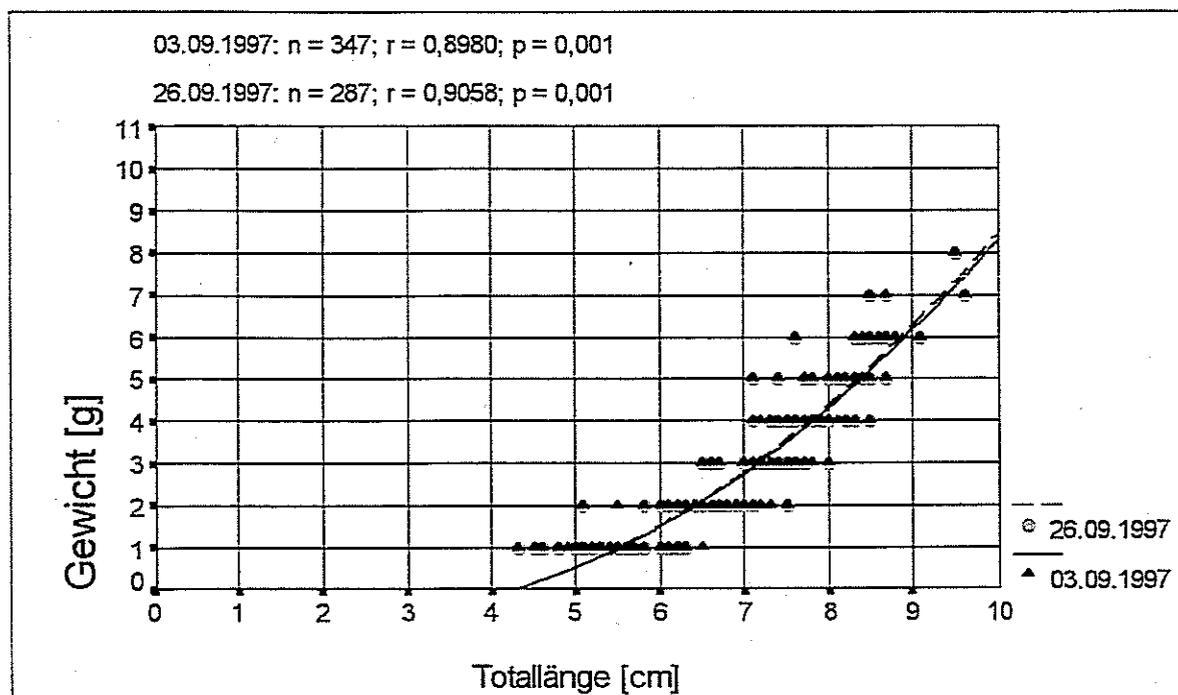


Abb. 2.4.5: Längen-Gewichtskorrelation der in den Versuchen eingesetzten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) der Grundgesamtheit I [Anfangsbestand: 03.09.1997; Endbestand: 26.09.1997].

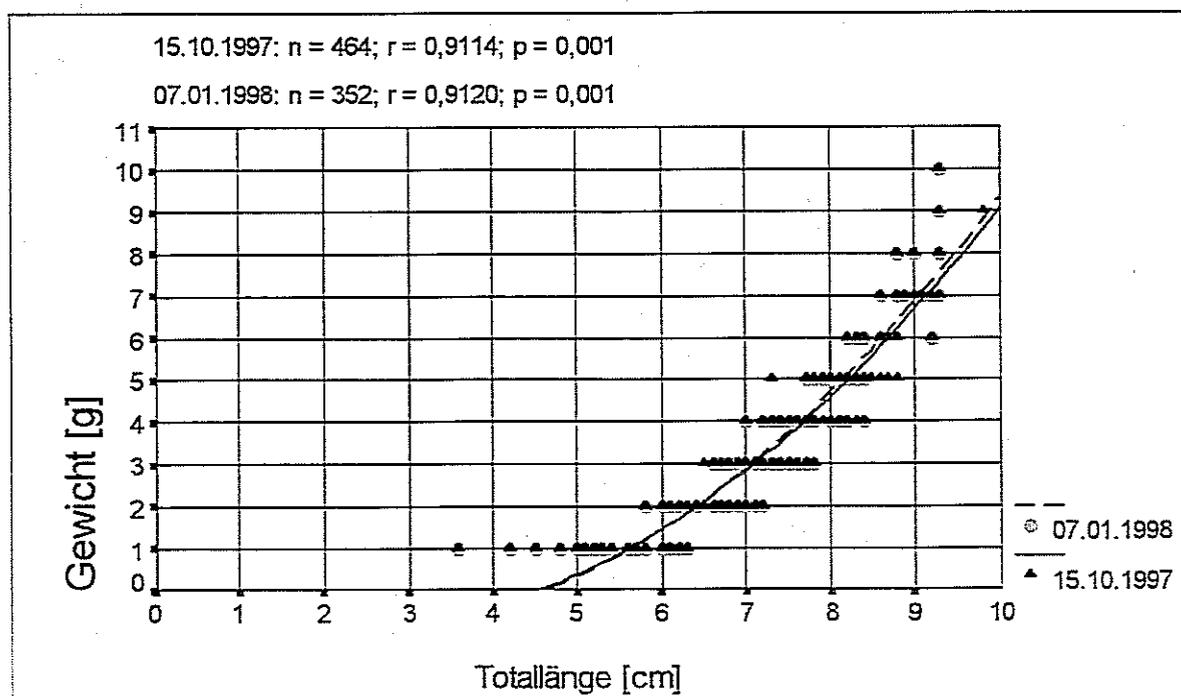


Abb. 2.4.6: Längen-Gewichtskorrelation der in den Versuchen eingesetzten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) der Grundgesamtheit II [Anfangsbestand: 15.10.1997; Endbestand: 07.01.1998].

Tab. 2.4.2a: Statistische Kennzahlen der morphometrischen Größen und Dichteangaben im Anfangsbestand der Versuchsfischart Elritze (*Phoxinus phoxinus*) vom 03.09.1997 bzw. 15.10.1997 (Grundgesamtheit I und II).

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Grundgesamtheit I (03.09.1997)		Grundgesamtheit II (15.10.1997)	
	Totallänge [cm]	Gewicht [g]	Totallänge [cm]	Gewicht [g]
Anzahl [n] / Gesamtgewicht [g]	347	968	464	1642
Mittelwert \bar{x}	6,93	2,79	7,33	3,54
Median \tilde{x}	7,10	3,00	7,40	3,00
Standardabweichung s	0,933	1,399	0,906	1,548
Minimum	4,3	1,0	3,6	1,0
Maximum	9,6	8,0	9,8	10,0
Biomasse [n/m ² bzw. g/m ²]	173,5	484	232	821

Tab. 2.4.2b: Statistische Kennzahlen der morphometrischen Größen und Dichteangaben im Endbestand der Versuchsfischart Elritze (*Phoxinus phoxinus*) vom 26.09.1997 bzw. 07.01.1998 (Grundgesamtheit I und II).

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Grundgesamtheit I (26.09.1997)		Grundgesamtheit II (07.01.1998)	
	Totallänge [cm]	Gewicht [g]	Totallänge [cm]	Gewicht [g]
Anzahl [n] / Gesamtgewicht [g]	287	810	352	1248
Mittelwert \bar{x}	6,91	2,82	7,30	3,55
Median \tilde{x}	7,00	3,00	7,30	3,00
Standardabweichung s	0,955	1,448	0,900	1,566
Minimum	4,3	1,0	3,6	1,0
Maximum	9,6	8,0	9,3	10,0
Biomasse [n/m ² bzw. g/m ²]	143,5	405	176	624

Tab. 2.4.2c: Mortalitätsraten von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) im Versuchszeitraum (Grundgesamtheit I und II).

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Grundgesamtheit I (03.09.1997 - 26.09.1997)		Grundgesamtheit II 15.10.1997 - 07.01.1998	
	Anzahl [n]	Biomasse [g]	Anzahl [n]	Biomasse [g]
Mortalitätsrate [%]	17,3	16,3	24,1	24,0

Bachscherle (*Barbatula barbatula*)

Bei beiden Grundgesamtheiten zeigen sich Defizite in der Verteilung der Größen, wobei die Längensklassen 6 cm und 7 cm deutlich unterrepräsentiert sind (Abb. 2.4.7a, Abb. 2.4.8a). Die lückenhafte Verteilung der Fische beruht dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf einem Fangzufall, sondern sie läßt sich als eine Folge des synchronen Wachstums von 1^+ nach 2^+ interpretieren. Die zu Anfang benutzte Charge bestand aus Tieren, die durchschnittlich etwas kleiner und leichter waren als die später verwendeten (Tab. 2.4.3a). Die zuerst eingesetzten Bachschmerlen verminderten sich quantitativ aus Gründen hoher Mortalität entsprechend ihrer Präsenz in der Grundgesamtheit I, bei der Grundgesamtheit II fielen im Laufe der Zeit anteilmäßig mehr bzw. überproportional viele Fische der oberen Größenklassen (9 cm und 10 cm) aus (Abb. 2.4.7b, Abb. 2.4.8b).

Die Bachschmerle erwies sich bezüglich des Fanges und der Hälterung als eine sehr sensible Fischart. Bei beiden Chargen traten durchschnittliche monatliche Mortalitätsraten von ca. 20% (stückbezogen und Biomasse) auf (Tab. 2.4.3c). Regelmäßige Obduktionen zeigten, daß die Tiere primär von Ektoparasiten der Gattungen *Trichodina*, *Chilodonella*, *Costia* und *Ichthyophthirius* befallen waren. Sekundär kam es zu bakteriell bedingten Nekrosen der Schleimhaut. Es kann auch nicht völlig ausgeschlossen werden, daß einzelne Fische durch das Fangen mit dem Elektrogerät vorgeschädigt waren. Insgesamt gesehen kam es bei den Fischen der Grundgesamtheit II zu einem Verlust von 56,8% (stückbezogen) bzw. 61,1% (Biomasse) im Vergleich zum Anfangsbestand (Tab. 2.4.3b).

Wie schon bei den Elritzen läßt sich auch bei den Bachschmerlen kein signifikantes Wachstum bei den eingesetzten Grundgesamtheiten nachweisen (Abb. 2.4.9, Abb. 2.4.10), wobei auch hier zum einen die Hälterungszeit zu kurz war und zum anderen abnehmende Wassertemperaturen gegen Jahresende kein Längenwachstum bzw. eine Gewichtszunahme mehr zuließen.

Die errechneten Fischdichten bzw. Biomassen betragen anfangs 75,5 Tiere (n) pro Quadratmeter ($\cong 314 \text{ g/m}^2$), später dann nur noch 44 n/m² ($\cong 204,5 \text{ g/m}^2$), da beim zweiten Befischungstermin nicht mehr Bachschmerlen verfügbar waren (Tab. 2.4.3a).

Basierend auf Untersuchungen an Freilandgewässern macht STAHLBERG-MEINHARDT (1994) Dichteangaben von maximal $0,16 \text{ n/m}^2$, BRUNKEN (1988) ermittelte Maximalwerte von $0,37 - 1,0 \text{ n/m}^2$, bzw. Jahresmittelwerte von $0,07 - 0,09 \text{ n/m}^2$. SCHUMANN (1994) stellte in Gräben des NSG „Federsee“ eine Abundanz von $0,7 \text{ n/m}^2$ fest.

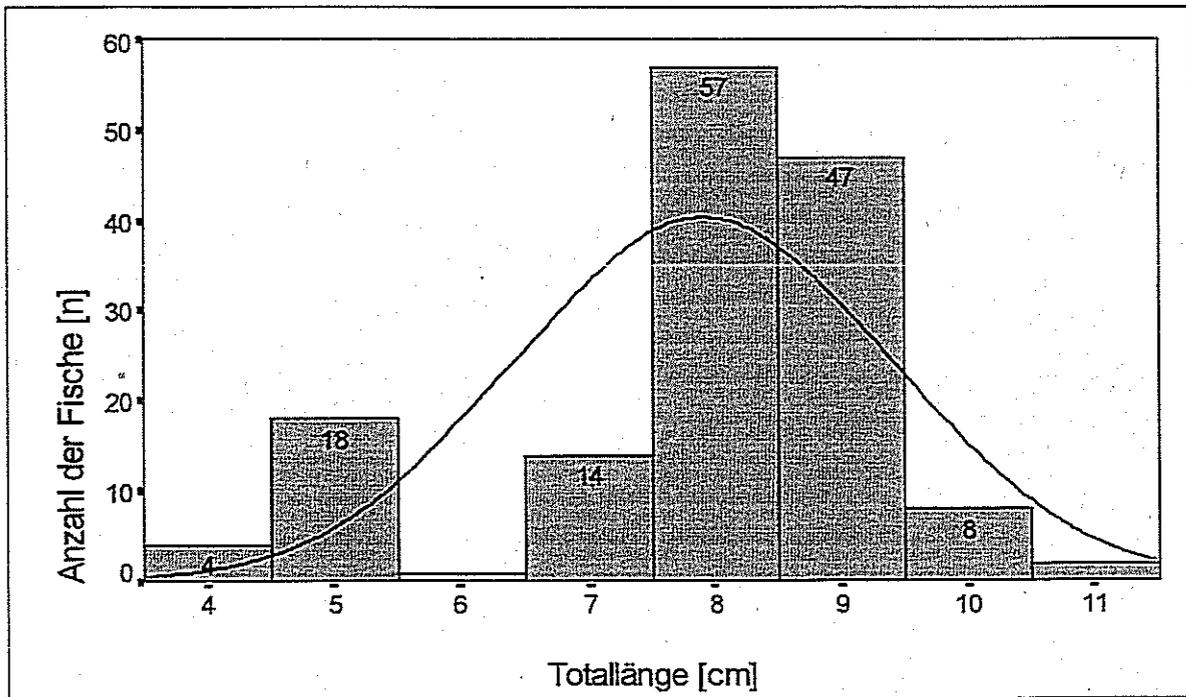


Abb. 2.4.7a: Längenhäufigkeitsverteilung im Anfangsbestand (Grundgesamtheit I) der in den Versuchen eingesetzten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 151; Stand: 03.09.1997].

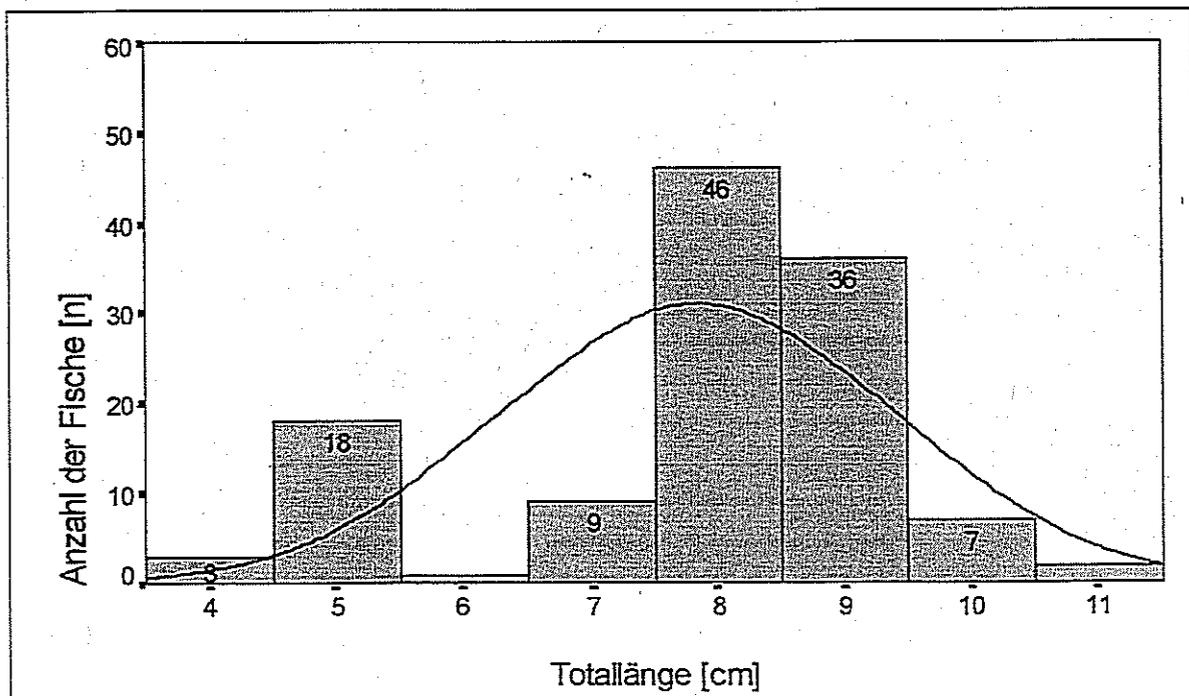


Abb. 2.4.7b: Längenhäufigkeitsverteilung im Endbestand (Grundgesamtheit I) der in den Versuchen eingesetzten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 122; Stand: 26.09.1997].

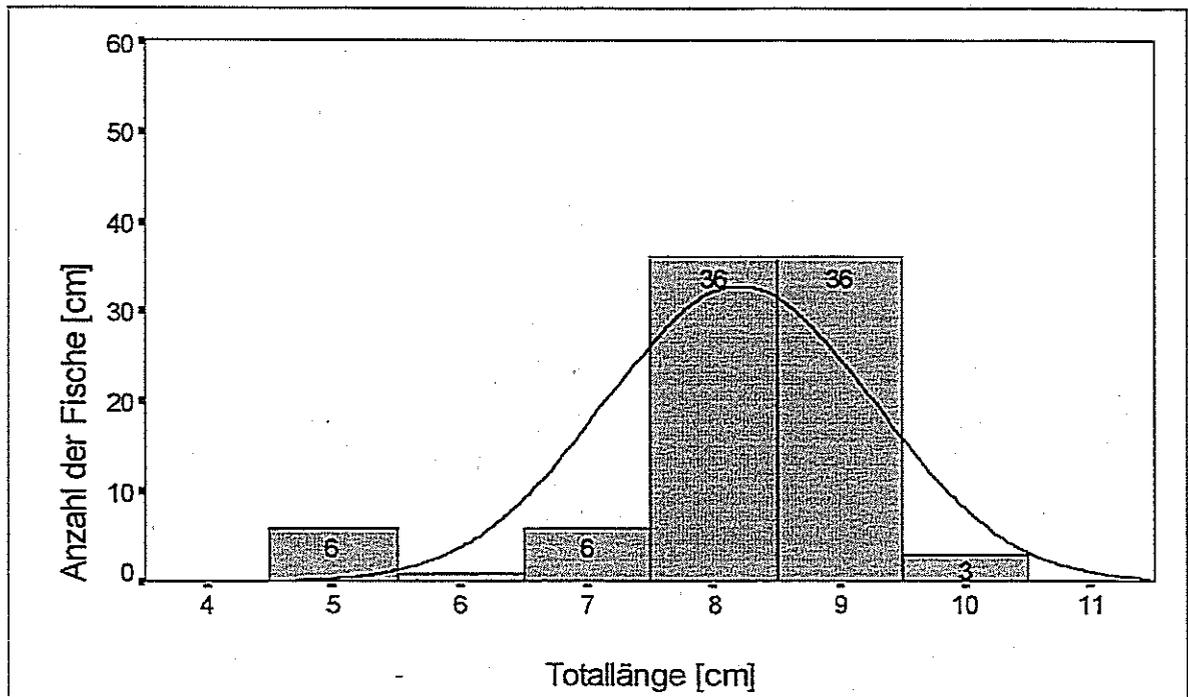


Abb. 2.4.8a: Längenhäufigkeitsverteilung im Anfangsbestand (Grundgesamtheit II) der in den Versuchen eingesetzten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 88; Stand: 15.10.1997].

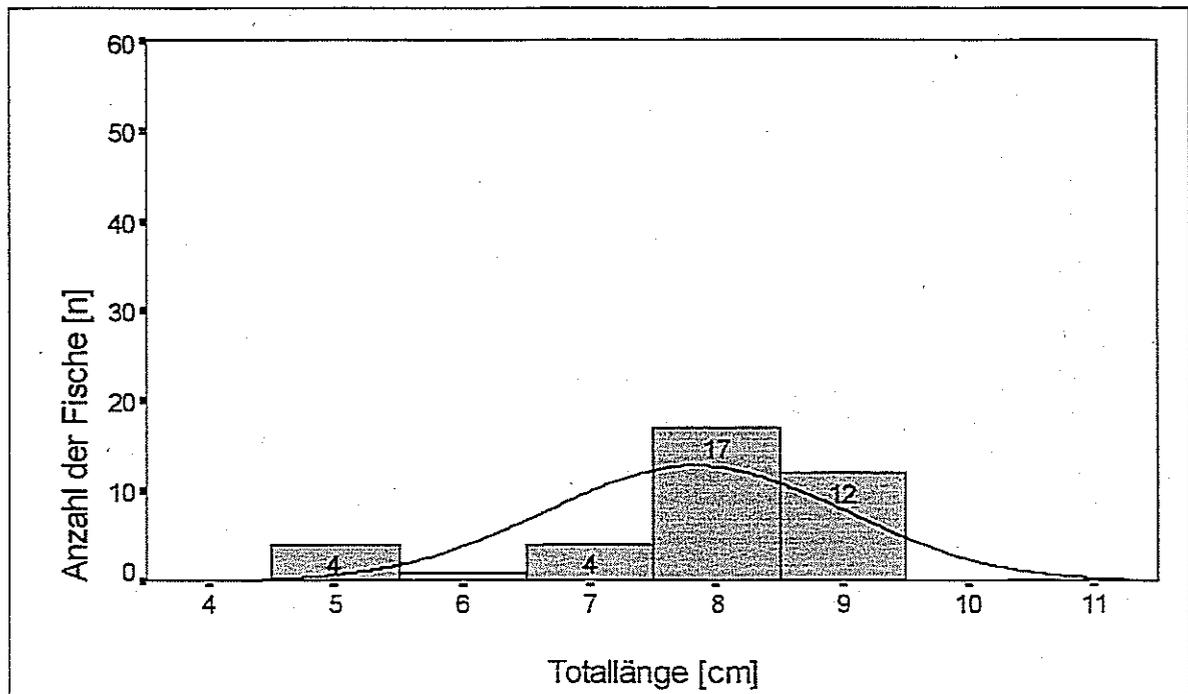


Abb. 2.4.8b: Längenhäufigkeitsverteilung im Endbestand (Grundgesamtheit II) der in den Versuchen eingesetzten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) [Klassenbreite = 1 cm; n = 38; Stand: 07.01.1998].

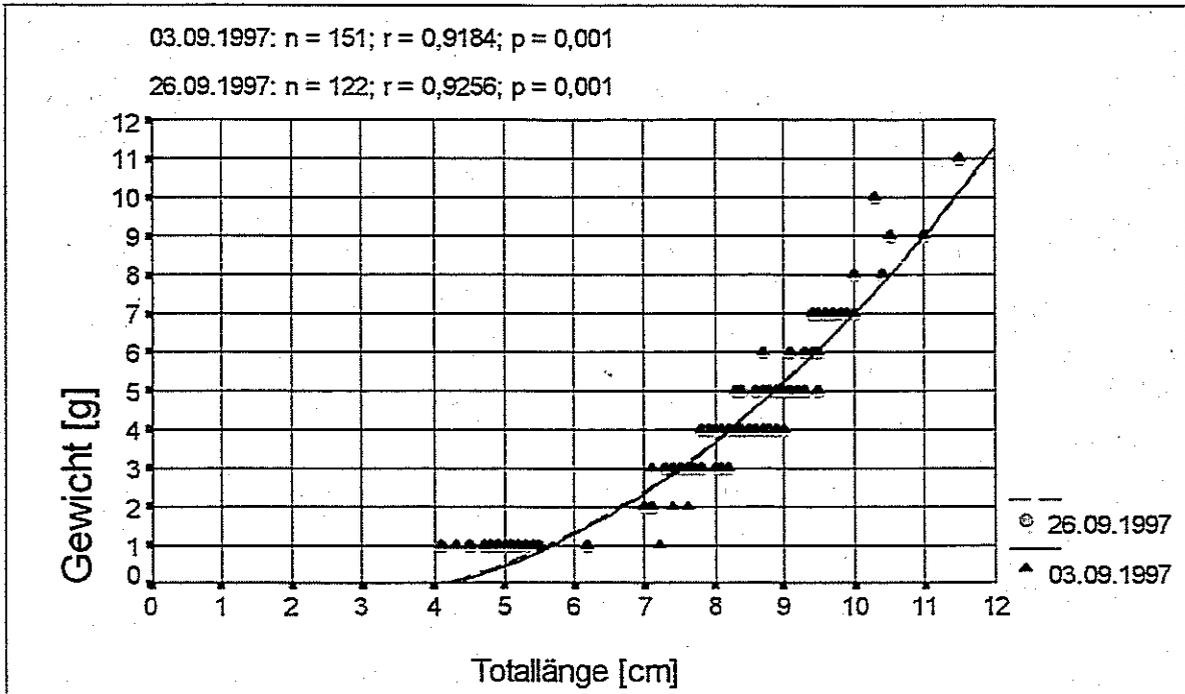


Abb. 2.4.9: Längen-Gewichtskorrelation der in den Versuchen eingesetzten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) der Grundgesamtheit I [Anfangsbestand: 03.09.1997; Endbestand: 26.09.1997].

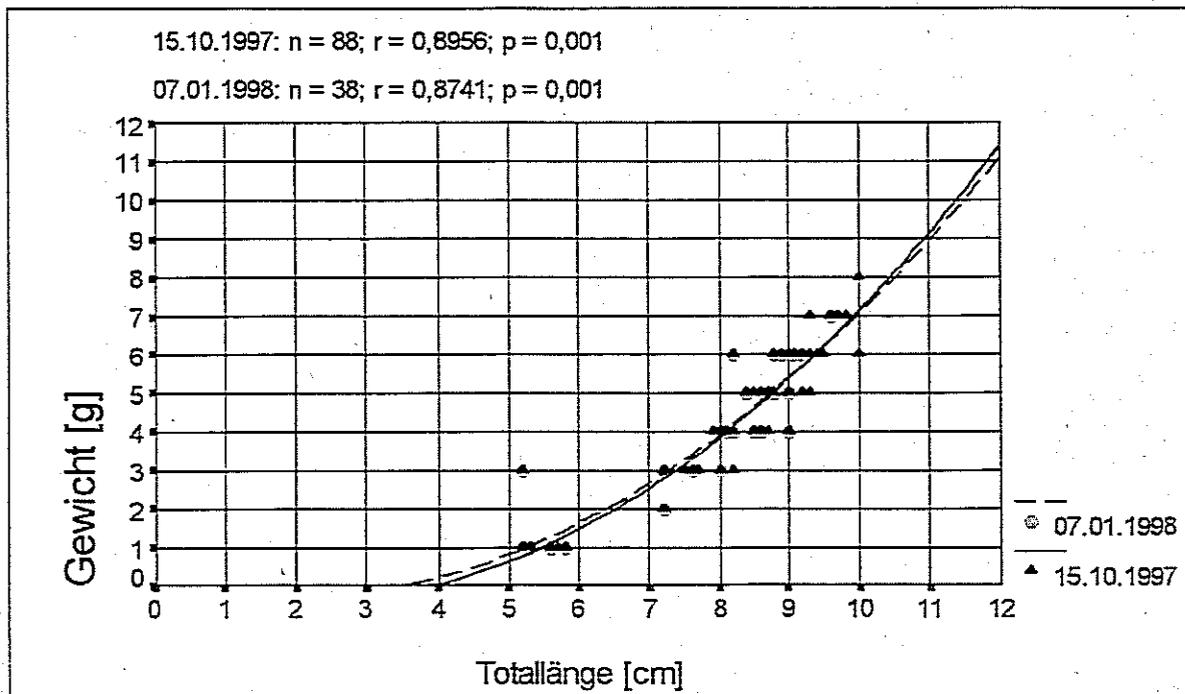


Abb. 2.4.10: Längen-Gewichtskorrelation der in den Versuchen eingesetzten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) der Grundgesamtheit II [Anfangsbestand: 15.10.1997; Endbestand: 07.01.1998].

Tab. 2.4.3a: Statistische Kennzahlen der morphometrischen Größen und Dichteangaben im Anfangsbestand der Versuchsfischart Bachschmerle (*Barbatula barbatula*) vom 03.09.1997 bzw. 15.10.1997 (Grundgesamtheit I und II).

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Grundgesamtheit I (03.09.1997)		Grundgesamtheit II (15.10.1997)	
	Totallänge [cm]	Gewicht [g]	Totallänge [cm]	Gewicht [g]
Anzahl [n] / Gesamtgewicht [g]	151	628	88	409
Mittelwert \bar{x}	8,16	4,16	8,46	4,65
Median \tilde{x}	8,50	4,00	8,70	5,00
Standardabweichung s	1,488	1,994	1,068	1,532
Minimum	4,1	1,0	5,2	1,0
Maximum	11,5	11,0	10,0	8,0
Biomasse [n/m ² bzw. g/m ²]	75,5	314	44	204,5

Tab. 2.4.3b: Statistische Kennzahlen der morphometrischen Größen und Dichteangaben im Endbestand der Versuchsfischart Bachschmerle (*Barbatula barbatula*) vom 26.09.1997 bzw. 07.01.1998 (Grundgesamtheit I und II).

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Grundgesamtheit I (26.09.1997)		Grundgesamtheit II (07.01.1998)	
	Totallänge [cm]	Gewicht [g]	Totallänge [cm]	Gewicht [g]
Anzahl [n] / Gesamtgewicht [g]	122	503	38	159
Mittelwert \bar{x}	8,09	4,12	8,09	4,18
Median \tilde{x}	8,45	4,00	8,50	4,00
Standardabweichung s	1,565	2,079	1,182	1,574
Minimum	4,1	1,0	5,2	1,0
Maximum	11,5	11,0	9,6	7,0
Biomasse [n/m ² bzw. g/m ²]	61	251,5	19	79,5

Tab. 2.4.3c: Mortalitätsraten von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) im Versuchszeitraum (Grundgesamtheit I und II).

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Grundgesamtheit I (03.09.1997 - 26.09.1997)		Grundgesamtheit II 15.10.1997 - 07.01.1998	
	Anzahl [n]	Biomasse [g]	Anzahl [n]	Biomasse [g]
Mortalitätsrate [%]	19,2	19,9	56,8	61,1

2.5 Datenerfassung und Datenauswertung

Die Datenerfassung erfolgte mit *Microsoft EXCEL 5.0* bzw. Software der Firmen OTT-Hydrometrie (KHYDRAS II) und VAKI (ARVAKI 1.2a). Ausgewertet wurde mit SPSS für Windows 6.1.2 und Harvard Graphics 3.0. Der Text wurde mit *Microsoft WORD 6.0* abgefaßt.

Bei der Darstellung der Ergebnisse wurde auf verschiedene Diagrammtypen zurückgegriffen, deren Inhalt und Aussagefähigkeit nachfolgend in Kürze und im allgemeinen erläutert wird.

Boxplots

Ein Boxplot kennzeichnet die Verteilung der Werte. Die graue Box stellt den Bereich der 50% mittleren Werte dar. Dies sind die Werte zwischen dem 25%- und dem 75%-Perzentil. Der Median (50%-Perzentil) wird durch den schwarzen Strich innerhalb der Box dargestellt. Die horizontal verlaufenden Striche über und unter der Box geben den größten und den kleinsten Wert an, der nicht als extremer Wert oder als Ausreißer klassifiziert wird.

Die Zahlen direkt unter der horizontalen Achse geben die Anzahl der Fälle wieder, die in ein Boxplot eingegangen sind (BROSIUS, G. & BROSIUS, F; 1995).

Fehlerbalken-Diagramme

Fehlerbalken-Diagramme zeigen den Mittelwert der Stichprobe sowie Angaben über die geschätzte Lage des Mittelwertes auf der Basis des 95% Konfidenzintervall (CI) in der Grundgesamtheit an (BROSIUS, G. & BROSIUS, F; 1995).

Pareto-Diagramme

Pareto-Diagramme stellen die Häufigkeiten verschiedener Beobachtungen oder Messungen jeweils durch einen Balken dar. Die unterschiedlichen Häufigkeiten sind in absteigender Folge angeordnet, und die Balken werden zusätzlich um eine Linie der kumulierten relativen Häufigkeiten ergänzt (BROSIUS, G. & BROSIUS, F; 1995). Zahlenangaben in oder auf den Balken geben die Anzahl der Fälle wieder, die in das Diagramm eingegangen sind.

Im Falle der kumulierten Häufigkeiten wurden die einzelnen Ergebnisse der jeweiligen Versuche relativ zur Gesamtsumme aller Ergebnisse gesetzt und kumuliert nach ihrem Schwierigkeitsgrad im Diagramm abgebildet. Dabei wurde davon ausgegangen, daß 100% der Versuchsfische den Versuch mit dem geringsten Schwierigkeitsgrad erfolgreich absolvieren

konnten. Das kumulierte Ergebnis des Versuches mit dem nächsthöheren Schwierigkeitsgrad vermindert sich so automatisch um dasjenige aus dem vorhergegangenen Versuch etc..

Als zweite Prämisse wurde die Annahme gemacht, daß es aus biologischer Sichtweise ausreichend sein sollte, wenn ein Wanderhindernis für 70% der Testfische zu bewältigen ist. Damit sollte es für eine genügend große Anzahl von Individuen aber auch für die unterschiedlichen Größenklassen möglich sein, den geeigneten Lebensraum auch im Oberwasser eines Wanderhindernisses zu suchen.

Hierbei handelt es sich allerdings um einen willkürlich oder subjektiv festgelegten Wert, der im einzelnen zu diskutieren ist.

3. Ergebnisse

3.1 VAKI-River Stock Monitor (RSM)

Im Zuge der Möglichkeit zur Chancennutzung neuer Technologien auf fischereibiologischem Gebiet fiel die Entscheidung am Anfang des Projektes auf den Einsatz eines vollautomatischen elektronischen Fischzählers (VAKI-River Stock Monitor, RSM), der ursprünglich für die Aquakultur zum Zählen von Fischen mit einem Gewicht größer als 300 g entwickelt wurde. Eigens für dieses Projekt wurde vom Hersteller die Software des Gerätes zum Erfassen von Fischen mit einer Größe unter 10 cm abgeändert. Die damit erzielbaren potentiellen Vorteile lagen sowohl im völligen Verzicht einer individuellen Markierungsmethode bei den Versuchsfischen als auch im Verzicht auf zeitintensive Videoaufzeichnungen und -auswertungen, ebenso in der vollautomatischen Registrierung aller die Passage betreffenden Daten (Zeit, Tiefe, Richtung usw.). Unter diesen Umständen sollte den Versuchsfischen eine im Verhalten ungehinderte, von außen nicht beeinflusste Migration (z. B. durch künstliche Beleuchtung) möglich sein.

Laut Hersteller können folgende Optionen zur Erfassung von passageabhängigen Daten gewählt werden:

1.) Darstellung der „Counts“ über einen längeren Zeitraum (z. B. 1 Monat)

Hierbei werden alle Datensätze mittels einer Häufigkeitsverteilung über einen zu definierenden Zeitraum graphisch dargestellt (Abb. 3.1.1).

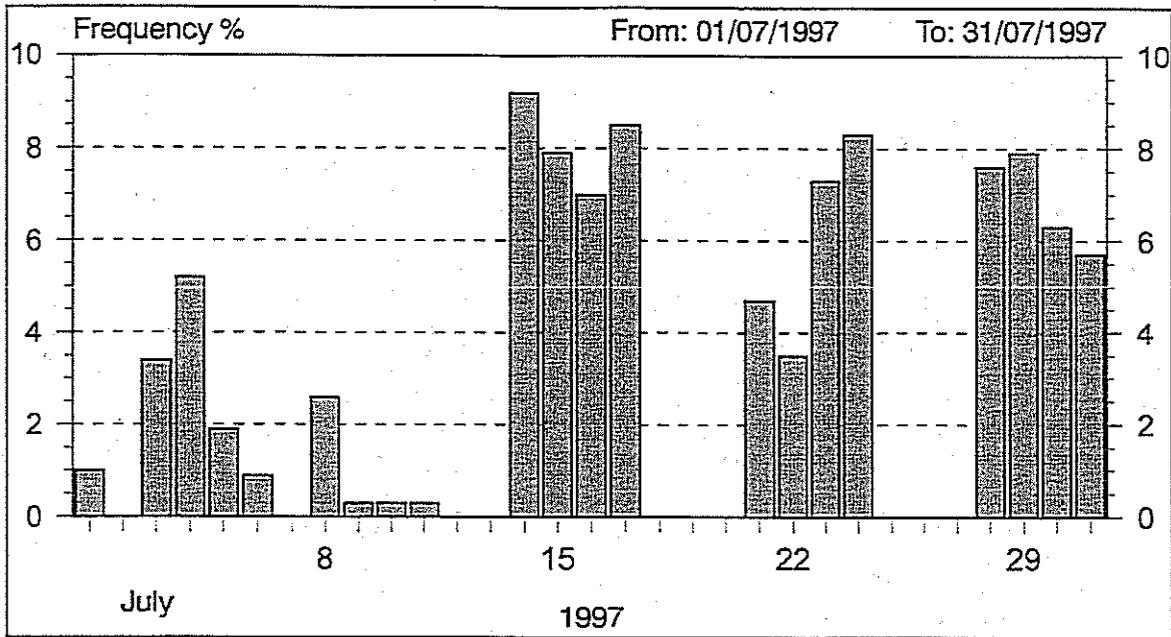


Abb. 3.1.1: Elektronisch erfaßte Wanderungsaktivitäten von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 01.07.1997 bis 31.07.1997 (n=1186).

2.) Darstellung der „Counts“ im Tages- bzw. Nachtgang (24 Std.)

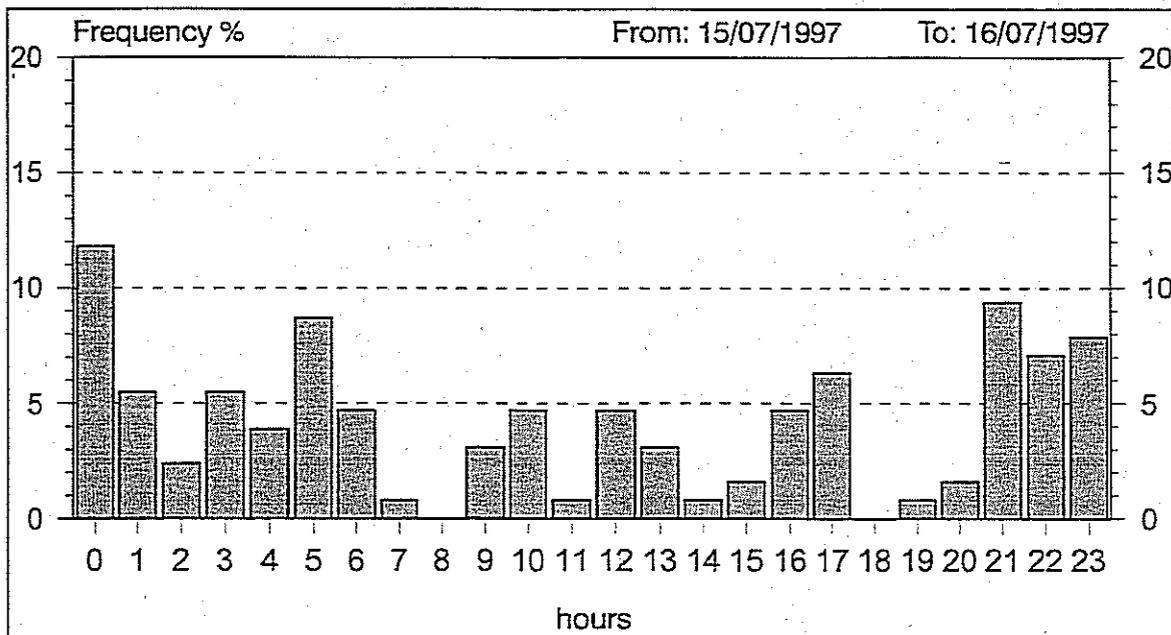


Abb. 3.1.2: Aktivitätsmuster im Nacht-/Tagrhythmus von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 15.07.1997 bis 16.07.1997 (n=228).

Diese Darstellung eignet sich besonders um die Hauptphasen der Wanderungsaktivitäten der Versuchsfische festzustellen (Abb. 3.1.2). So läßt sich etwa die optimale Dauer eines Versuches bestimmen (z. B. 6, 12 oder 24 Std. usw.).

Die erhaltenen Counts können dann weiterhin differenziert werden in Aufwärts- und Abwärtsbewegungen (Abb. 3.1.3).

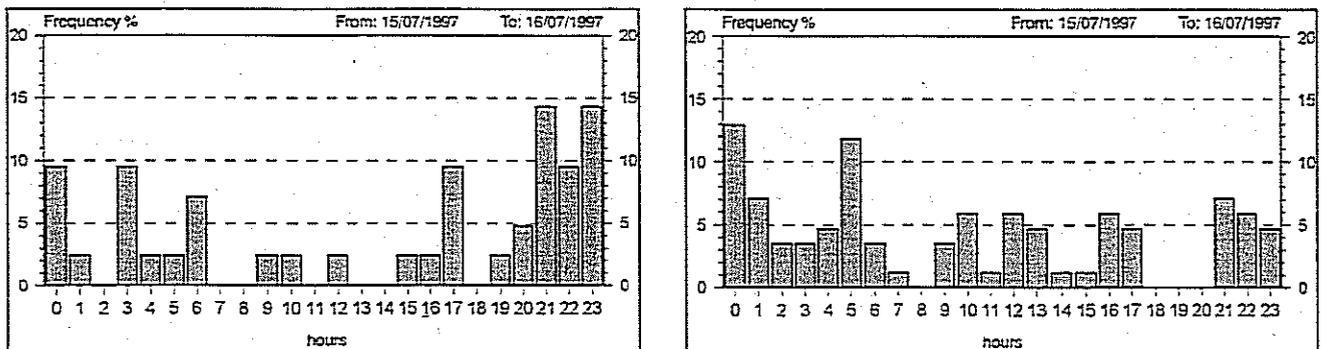


Abb. 3.1.3: Aktivitätsmuster aufgeschlüsselt nach Aufwärtsbewegungen (linke Teildarstellung; n=93) und Abwärtsbewegungen (rechte Teildarstellung; n=135) im Nacht-/Tagrhythmus von Mühlkopfen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 15.07.1997 bis 16.07.1997.

3.) Darstellung der „Counts“ als Längenhäufigkeitsverteilung der Fische pro definierter Zeiteinheit (z. B. 24 Std., 1 Woche, 1 Monat usw.)

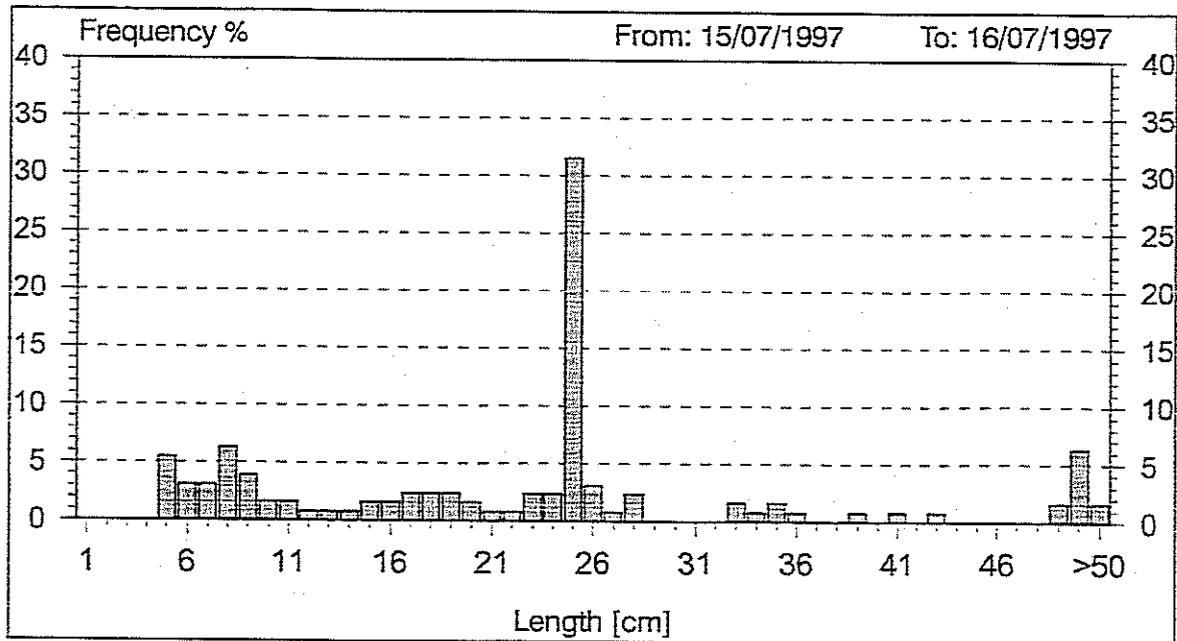


Abb. 3.1.4: Längenhäufigkeitsverteilung elektronisch erfaßter Daten von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 15.07.1997 bis 16.07.1997 ($n=126$).

Werden aus dieser Längenhäufigkeitsverteilung schließlich diejenigen Counts herausgefiltert, die im originalen Datensatz den aufwärts gewanderten Fischen zugeordnet sind und anschließend mit den Längen der tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen verglichen, lassen sich die Angaben des RSM aus dem Versuch gut überprüfen.

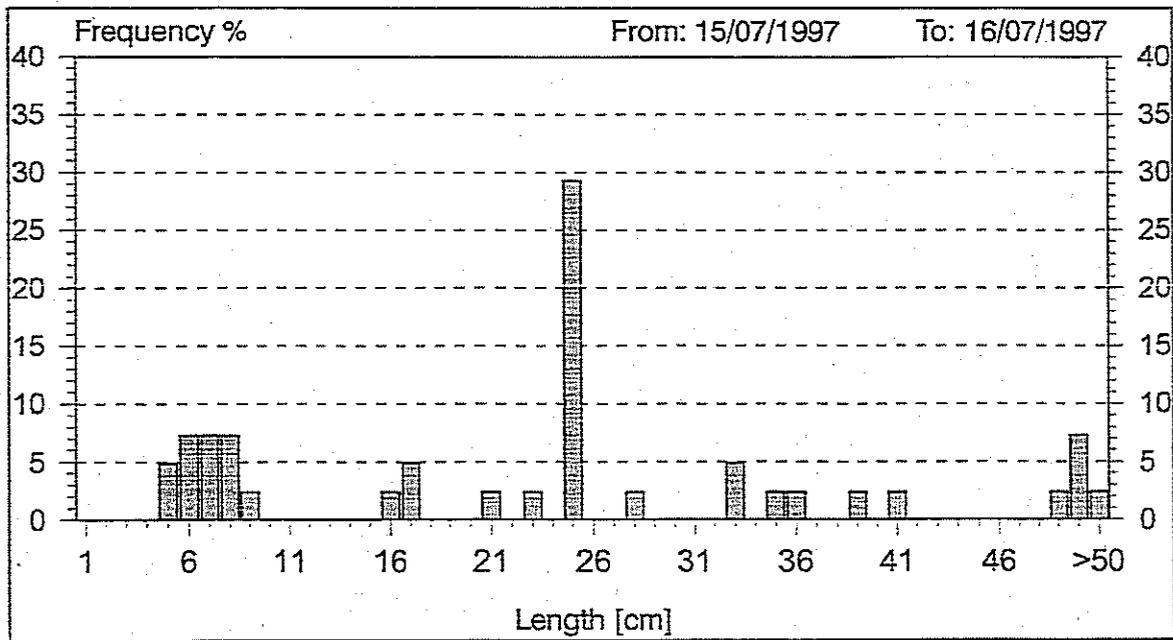


Abb. 3.1.5: Längenhäufigkeitsverteilung elektronisch erfaßter Daten von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 15.07.1997 bis 16.07.1997 (n=41).

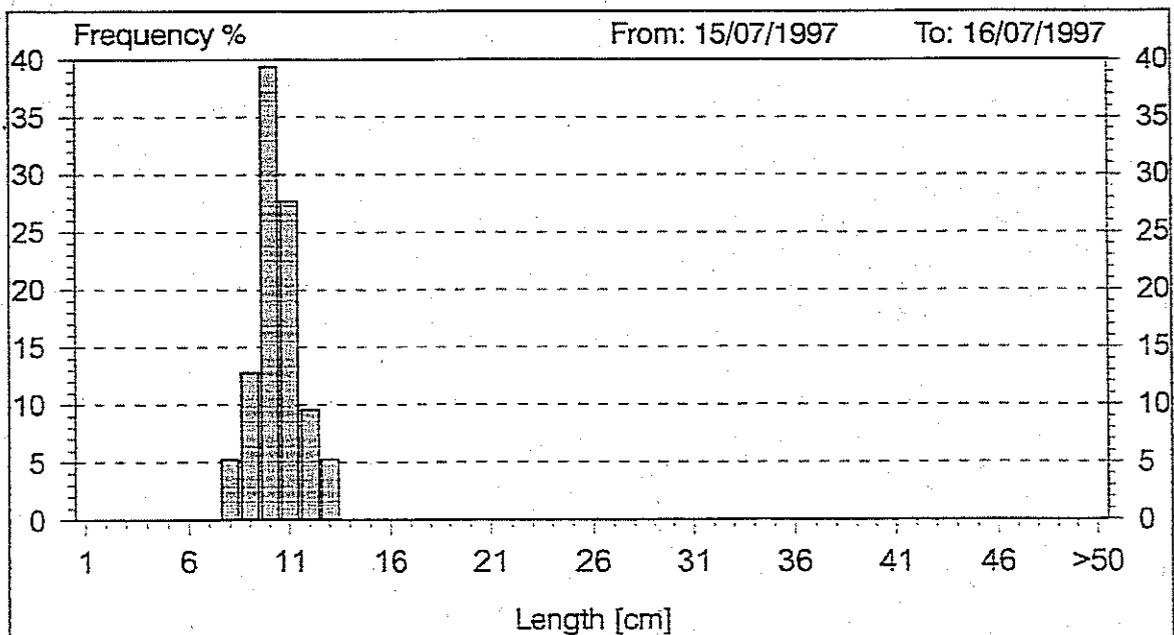


Abb. 3.1.6: Längenhäufigkeitsverteilung von tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 15.07.1997 bis 16.07.1997 (n=94).

Der Vergleich (Abb. 3.1.5, Abb. 3.1.6) zeigt, daß weder die Anzahl der gemessenen Counts mit den tatsächlich gewanderten Fischen übereinstimmt (s. a. Tab. 3.1.1 und Tab. A3.1.1 bis Tab. A3.1.9) noch die ermittelte Längenhäufigkeitsverteilung der tatsächlichen entspricht.

Bei späteren Versuchen mit Elritzen und Bachschmerlen wurde deshalb der RSM zwar noch weiterhin eingesetzt, die Ergebnisse dann aber wegen zu großer Ungenauigkeiten und Unabwägbarkeiten nicht mehr graphisch umgesetzt.

4.) Darstellung einer „Tiefen- oder Horizontalverteilung“ der Versuchsfische

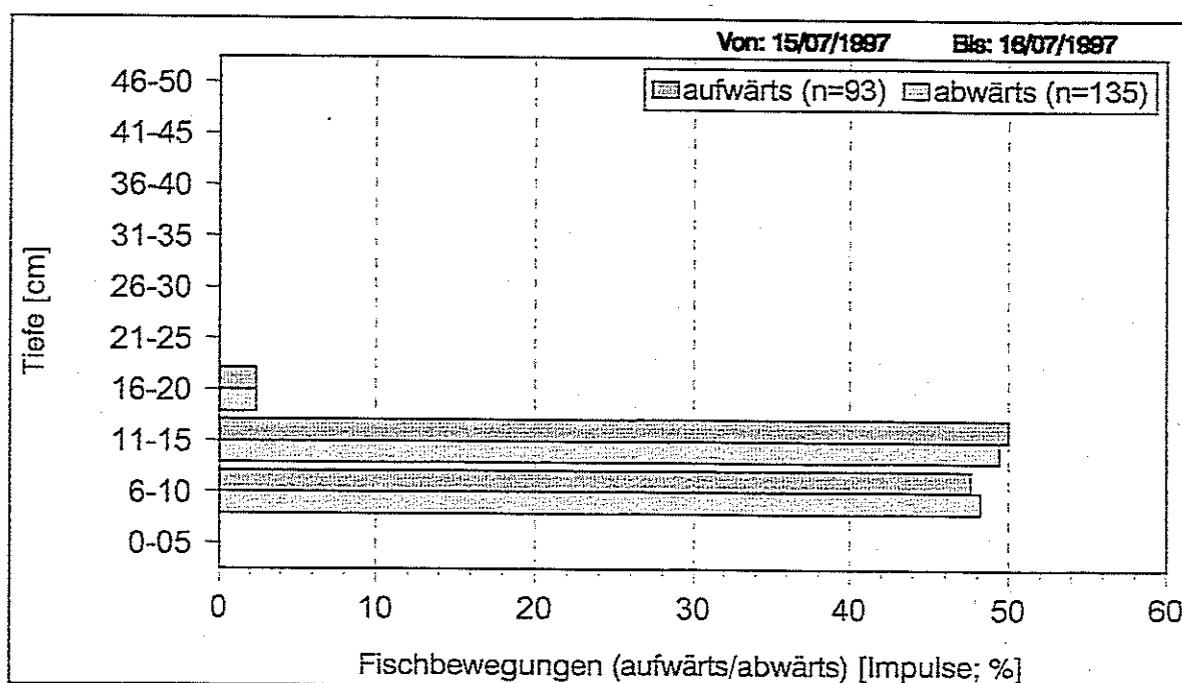


Abb. 3.1.7: Elektronisch erfaßte auf- und abwärtsgerichtete Bewegungen von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) in einer künstlichen Fließrinne im Zeitraum vom 15.07.1997 bis 16.07.1997.

Diese Art der graphischen Darstellung war nur mit Hilfe eigener Softwareerstellung und Auswertung möglich. Auch ergab sich für diesen Aspekt keine Möglichkeit zur Kalibrierung bzw. Überprüfung der Daten. Aus Abb. 3.1.7 geht hervor, daß die Versuchsfische den vertikalen Wasserkörper bis zu einer Tiefe von 20 cm zur Wanderung benutzen können.

Tab. 3.1.1: Minimale und maximale Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Versuchsanstellung.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>) Versuchsbeschreibung	Nettoabweichung [%]	
	minimal	maximal
„Strömung“	-49,8	-4,8
„Mächtigkeit der Wassersäule“	-63,7	37,3
„Strömung/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“	-1970,4	-9,4
„Strömung/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“	-40,0	9925,4
„Höhe der Bodenschwelle“	-38,1	-9,5
„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“	-62,7	-9,5
„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“	-138,7	-6,7
„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser“	-4100,0	90,9
„Strömung/Mächtigkeit der Wassersäule/Verrohrung“	-16,3	140,9

Tab. 3.1.1 und Tab. A3.1.1 bis Tab. A3.1.9 zeigen teilweise sehr hohe Abweichungen in der Nettobilanz der elektronisch erfaßten Zählraten im Vergleich zu den tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen.

Insgesamt gesehen bereiten dem RSM vor allem kleine Fischgrößen (bis 10 cm) aber auch schon leicht wechselnde Wasserstände große Schwierigkeiten. Hierbei kann es an den Sensoren der Scannerplatten zu Irritationen bzw. Lichtreflexionen an der Wasseroberfläche kommen.

Ein weiteres Problem in der Erfassung der Fischbewegungen liegt im Wanderverhalten der einzelnen Fischart selbst: während Mühlkoppen noch weitgehend einzeln durch den Scanner hindurchschwimmen, wandert die Elritze gerne kollektiv im Schwarm. Hier hat der Counter mit dem Problem zu kämpfen, den einzelnen Fisch individuell aufzulösen. Wie die Praxis gezeigt hat, ist hierfür die Software aber noch nicht geeignet, da die Dateninformation nicht über die simultane Erfassung von horizontaler und vertikaler Abtastung im Scannerbereich zustande kommt.

Außerdem werden Daten von Fischen, die sich länger als 10 s zwischen den Scannerplatten aufhalten, automatisch gelöscht. Dies war oftmals bei Mühlkoppen der Fall, die nur eine kurze Strecke aufwärts schwimmen, sich dann für eine längere Ruhepause an einer geeigneten Stelle niederlassen, um danach wieder weiter zu ziehen.

→FAZIT:

Der dargebotene Fischzähler ist in seiner momentanen Version nicht geeignet genaue bzw. verlässliche, richtungsbezogene Angaben zur Passage von Kleinfischen zu machen.

Störfaktoren wie Luftblaseneintrag und -verwirbelung, wechselnde Wasserstände, hohe Strömungsgeschwindigkeiten ($v \geq 1$ m/s) aber auch das unterschiedliche Wanderverhalten der einzelnen Fischart beeinträchtigen die Zählraten in negativer Weise. Es kommt in der Mehrzahl der Fälle entweder zu defizitären, unterrepräsentierten Angaben oder zu Überzählungen, die meistens mehr als 10% Abweichung beinhalten.

Das eigentliche Problem der Datenungenauigkeit stellt sowohl die Soft- als auch die Hardware zur Erkennung und Messung der Fischpassage dar. Seitens der Hardware ist das Gerät ausgelegt Größendifferenzen von 5 mm zu erfassen, es läßt aber keine vertikale Auflösung im Scannerbereich zu.

3.2 Chemisch-physikalische Parameter im Versuchszeitraum

Die Abbildungen 3.2.1 bis 3.2.5 geben einen Überblick zu den wichtigsten chemisch-physikalischen Parametern Sauerstoff (mg/l), elektrische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, Wasser- und Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) während der einzelnen Versuchsanstellungen im gesamten Untersuchungszeitraum.

Bei der Wasserversorgung der Versuchsanlage handelt es sich um zwei unterschiedliche Wasserqualitäten (Bach- und Quellwasser), die meistens im Verhältnis 3:1 eingespeist wurden. Ab Anfang Oktober 1997 wurde jedoch ganz auf das aggressive Quellwasser (H_2CO_3) verzichtet und nur noch Bachwasser verwendet, welches mittels Pumpen teilweise wieder in den Versorgungskreislauf rückgeführt wurde.

Der Sauerstoffgehalt des Wassers folgt einem jahreszeitlichen Verlauf. Er bewegt sich im Bereich von 5,2 mg/l bis 15,5 mg/l (Abb. 3.2.1) und korreliert in weiten Teilen mit der Wassertemperatur ($r = -0,4886$; $p = 0,000$). Es ist allerdings nicht auszuschließen, daß zumindest

zeitweise fäulnisfähige Stoffe im verwendeten Bachwasser für die dargestellten Sauerstoff-Minimumgehalte verantwortlich sind.

Die elektrische Leitfähigkeit zeigt insgesamt gesehen einen weiten Streuungsbereich von 762 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bis 1495 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Abb. 3.2.2). Dieser ist jedoch durch zwei verschiedene Vorgehensweisen bedingt. Von März bis Ende September 1997 wurde die Versuchsrinne im reinen Durchflußverfahren mit Bach- und Quellwasser beschickt. Danach wurde ein Teil des Wassers in einem großen offenen Betonteich aufgefangen und über ein Pumpsystem wieder dem Kreislauf beigemischt. Hierbei ließ es sich nicht vermeiden, daß größere Mengen von zugeflossenem Niederschlagswasser für eine allmähliche Herabsetzung der Leitfähigkeit sorgten.

Das verwendete Wasser zeichnet sich durch einen hohen Hydrogenkarbonatgehalt aus und verfügt damit über eine ausgezeichnete Pufferkapazität. Aus diesen Gründen weist der pH-Wert eine große Stabilität über den gesamten Versuchszeitraum auf (Abb. 3.2.3). Hierbei sind Werte zwischen 7,1 und 8,2 aufgetreten, die einen für Fische günstigen Bereich charakterisieren.

Die Wassertemperatur ist ebenso wie die Lufttemperatur über einen typischen jahreszeitlichen Verlauf geprägt (Abb. 3.2.4, Abb. 3.2.5), wobei Minimalwerte von 0,3°C (Wasser) bzw. -5°C (Luft) und Maximalwerte von 19°C (Wasser) bzw. 33°C (Luft) vorkommen. Beide Parameter sind auf Grund des hohen Bachwasseranteils im Durchfluß- bzw. späteren Kreislaufverfahren eng miteinander korreliert ($r=0,8679$; $p=0,000$). Kurzfristige Spitzen der Wassertemperatur über 16°C im Juni 1997 könnten theoretisch bei der Versuchsfischart Mühlkoppe zu erhöhtem Thermostreß geführt haben, was aber durch Verhaltensbeobachtungen nicht bestätigt werden kann.

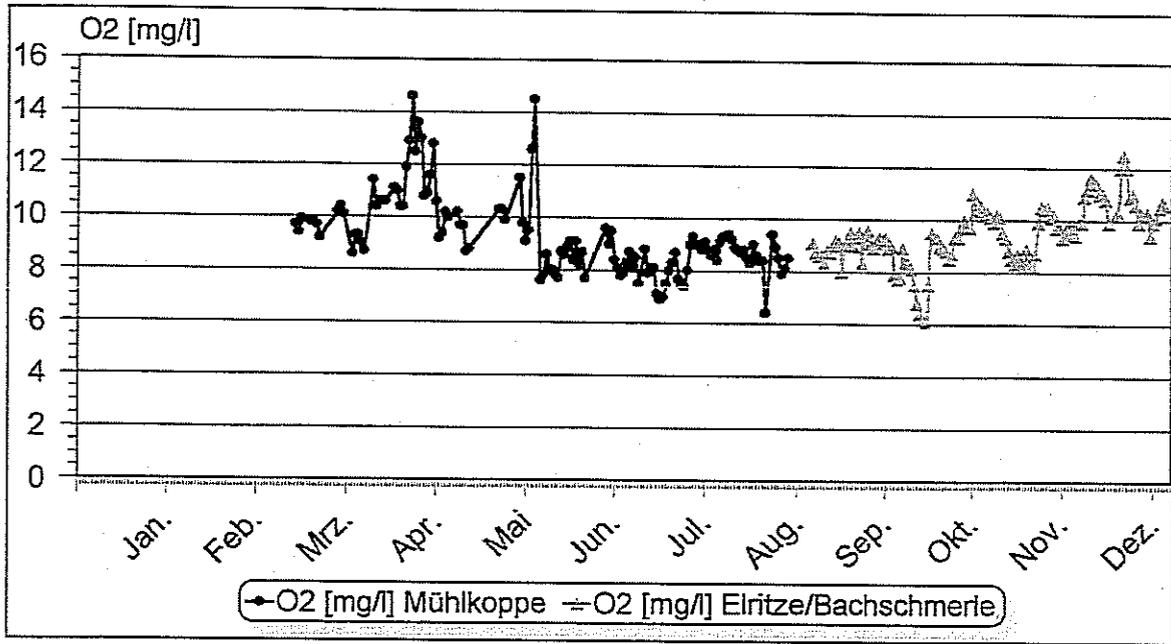


Abb. 3.2.1: Sauerstoffgehalt in der Versuchsrinne (Tagesmittelwerte) im Zeitraum März bis Dezember 1997 maßgebend für die Fischarten Mühlkoppe (*Cottus gobio*), Elritze (*Phoxinus phoxinus*) und Bachschmerle (*Barbatula barbatula*).

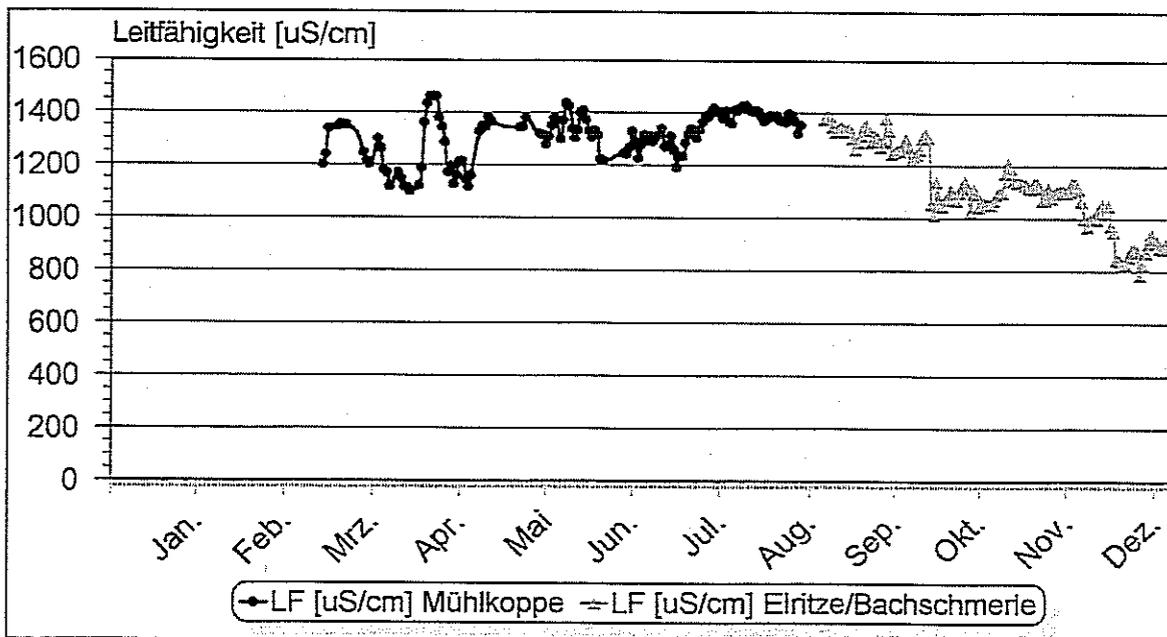


Abb. 3.2.2: Elektrische Leitfähigkeit in der Versuchsrinne (Tagesmittelwerte) im Zeitraum März bis Dezember 1997 maßgebend für die Fischarten Mühlkoppe (*Cottus gobio*), Elritze (*Phoxinus phoxinus*) und Bachschmerle (*Barbatula barbatula*).

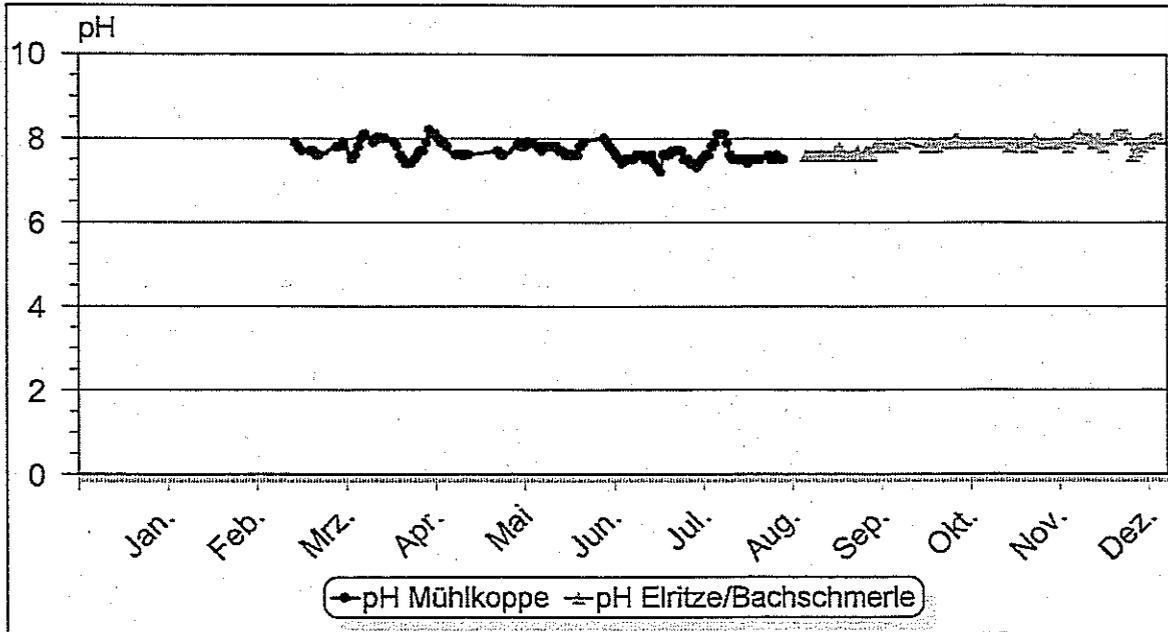


Abb. 3.2.3: pH-Wert in der Versuchsrinne (Tagesmittelwerte) im Zeitraum März bis Dezember 1997 maßgebend für die Fischarten Mühlkoppe (*Cottus gobio*), Elritze (*Phoxinus phoxinus*) und Bachschmerle (*Barbatula barbatula*).

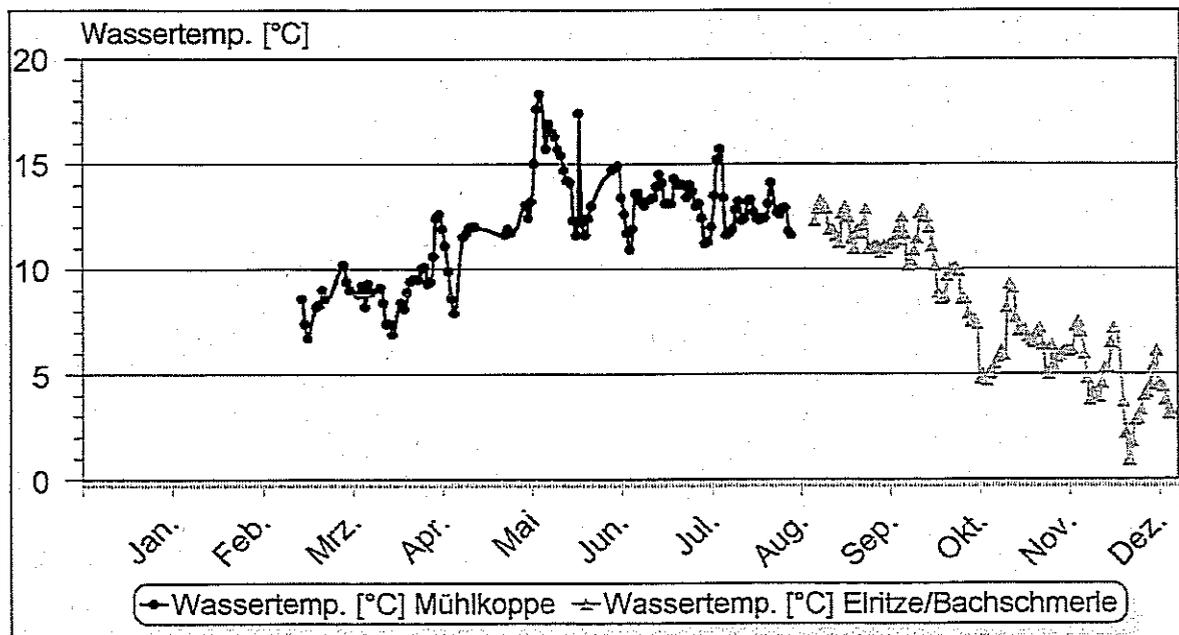


Abb. 3.2.4: Wassertemperatur in der Versuchsrinne (Tagesmittelwerte) im Zeitraum März bis Dezember 1997 maßgebend für die Fischarten Mühlkoppe (*Cottus gobio*), Elritze (*Phoxinus phoxinus*) und Bachschmerle (*Barbatula barbatula*).

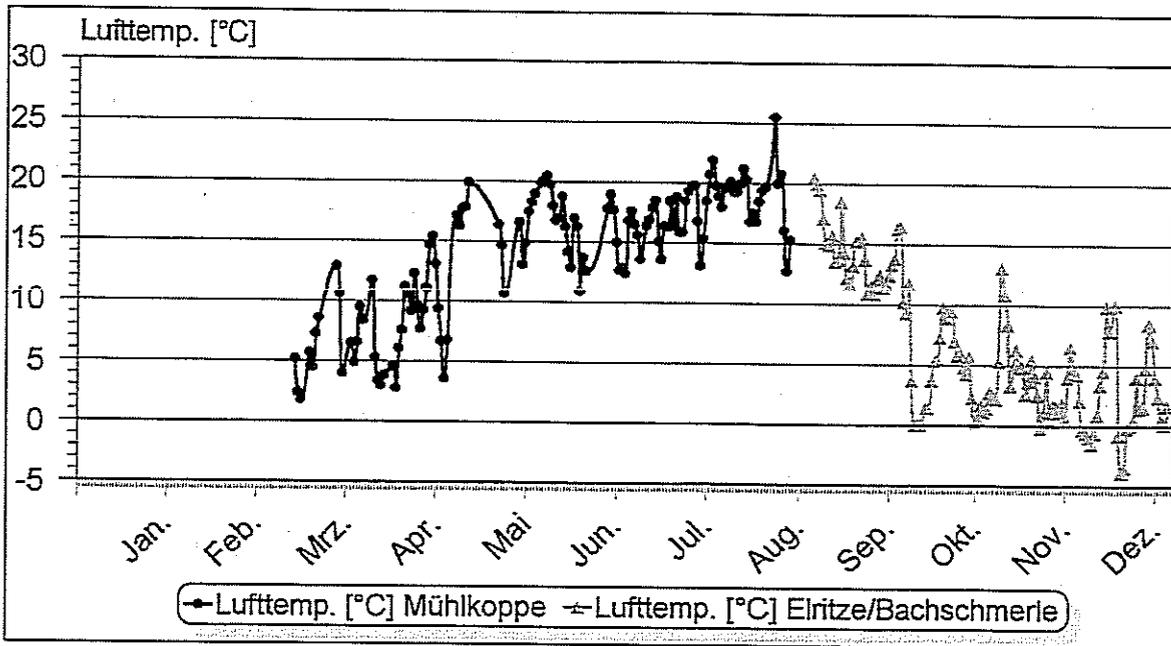


Abb. 3.2.5: Umgebungstemperatur der Versuchsrinne (Tagesmittelwerte) im Zeitraum März bis Dezember 1997.

Tab. 3.2.1: Chemisch-physikalische Randbedingungen aller durchgeführten Migrationsversuche mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) im Zeitraum März bis August 1997.

19.03.1997 bis 26.08.1997	Min.	Max.
O ₂ [mg/l]	5,2	15,5
el. Leitfähigkeit [uS/cm]	1040	1495
pH	7,1	8,3
Temp.-Wasser [°C]	5,8	19,0
Temp.-Luft [°C]	-3,8	33,3

Tab. 3.2.2: Chemisch-physikalische Randbedingungen aller durchgeführten Migrationsversuche mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) und Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) im Zeitraum September 1997 bis Januar 1998.

03.09.1997 bis 07.01.1998	Min.	Max.
O ₂ [mg/l]	5,8	13,6
el. Leitfähigkeit [uS/cm]	762	1476
pH	7,5	8,2
Temp.-Wasser [°C]	0,3	16,5
Temp.-Luft [°C]	-5	28,5

→FAZIT:

Aus Tab. 3.2.1 und Tab. 3.2.2 ist ersichtlich, daß alle durchgeführten Versuche in einem für die Fischarten Mühlkoppe, Elritze und Bachschmerle verträglichen Milieu stattgefunden haben und folglich keine oder nur geringfügige Aktivitätseinbußen oder Meidungsreaktionen der Fische in Betracht gezogen werden müssen.

3.2.1 Einzelversuche mit Mühlkoppen

Die genaue Dokumentation des Verlaufes der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den jeweils durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bzw. deren statistische Kennzahlen befindet sich im tabellarischen Anhang (Tab. A3.2.1.1 bis Tab. A3.2.1.9).

Daraus geht u. a. hervor, daß im allgemeinen die parametrischen Werte innerhalb einer Versuchsreihe nur unwesentlich schwanken. Sofern aber Schwankungen vorhanden sind, können diese größtenteils auf die nicht immer chronologische Abfolge der Versuche zurückgeführt werden.

Bei den Parametern „Sauerstoff“, „elektrische Leitfähigkeit“, „pH“ und „Wassertemperatur“ treten hin und wieder unterschiedlich hohe Standardabweichungen zwischen den einzelnen Versuchen auf, da die entsprechenden Sensoren durch die Strömung oftmals nicht im Mischbereich zweier Wasserqualitäten gehalten wurden. Als unmittelbare Folge kam es deshalb zur Messung von Extremwerten.

Die Strömungsgeschwindigkeit in der Fließrinne konnte auf Grund von Wasserdruckschwankungen nicht immer exakt auf dem anfangs eingestellten Sollwert gehalten werden. Die Abweichungen halten sich aber im akzeptablen Rahmen.

3.2.2 Einzelversuche mit Elritzen und Bachschmerlen

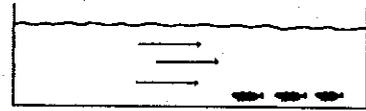
Die Werte der im Anhang aufgeführten Tabellen (Tab. A3.2.2.1 bis Tab. A3.2.2.9) zur Wasserbeschaffenheit treffen sowohl auf Elritzen als auch auf Bachschmerlen zu, da beide Fischarten gemeinsam in der jeweiligen Versuchsanstellung eingesetzt wurden.

Auch hier ergibt sich aus der versuchsspezifischen Dokumentation, daß auf die gehälterten Fische keine außergewöhnlichen Streßsituationen, ursächlich und primär bedingt durch die Wasserqualität, eingewirkt haben. Ähnliche Kenndaten zu den chemisch-physikalischen Parametern liegen im Falle der Elritze aus Untersuchungen von BLESS (1992) von einem Freilandgewässer vor.

Für Schwankungen der einzelnen Parameter bzw. kleinere Abweichungen vom Sollwert gilt dasselbe wie das bereits unter 3.2.1 erwähnte.

3.3 Migrationsversuche mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*)

3.3.1 „Strömung“ (v)



Bei Versuchen mit langsam gesteigerter Fließgeschwindigkeit und einer konstanten Mächtigkeit der Wassersäule von $t = 25$ cm zeigt sich im Bereich zwischen $v = 0,1$ m/s und $v = 0,5$ m/s ein stückbezogener relativer Aufstiegserfolg von $\geq 83\%$ (Individuen). Ab einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75$ m/s verringert sich die Erfolgsquote in beiden Versuchen auf fast 67%. Wird die Fließgeschwindigkeit nochmals erhöht auf einen Wert von $v = 0,9$ m/s, sinkt der Anteil aufwärts gewanderter Mühlkoppen rapide ab in einen Bereich zwischen 8% und 14,5% (Tab. 3.3.1.1, Abb. 3.3.1.1).

Abb. 3.3.1.2 läßt erkennen, daß die unteren Längenklassen (< 9 cm) weniger an der Aufwärtswanderung beteiligt sind.

Abb. 3.3.1.3 zeigt das relative Verhältnis der potentiell möglichen zu den tatsächlich gewanderten Fischen als eine herausgezoomte Längenhäufigkeitsverteilung, gültig für die Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,9$ m/s. Auch hier wird deutlich, daß die Längenklassen 10 cm und 11 cm im oberen Strömungsbereich am stärksten zum Wandererfolg beigetragen haben.

Dasselbe Ergebnis wird in Abb. 3.3.1.4 sichtbar, wo die Zunahme der Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75$ m/s auf $v = 0,9$ m/s zu einer deutlichen Erhöhung der mittleren Totallänge führt (95% Konfidenzintervall). Hierfür sind ebenfalls die Längenklassen 10 und 11 cm verantwortlich.

Werden die erhaltenen strömungsbezogenen Daten als kumulierte Häufigkeiten dargestellt, wird deutlich, daß in den angestellten Versuchen im Fließgeschwindigkeitsbereich $v < 0,5$ m/s ca. 70% der erfolgreich gewanderten Individuen vertreten sind (Abb. 3.3.1.5).

Da im Bereich $v < 0,5$ m/s bei den Individuallängen der erfolgreich gewanderten Mühlkoppen auch keine gravierende Abweichung von der Grundgesamtheit auftritt (Abb. 3.3.1.2), läßt sich dieser Bereich als optimal für die Wanderung der Mühlkoppen in einem ausgebauten Fließgewässer postulieren.

→FAZIT:

Um bei Mühlkoppen eine quantitative Migrationsrate von ca. 70% zu erreichen, sollte gewährleistet sein, daß in kleinen Fließgewässern ausreichend strömungsberuhigte Zonen („pools“) vorhanden sind und die sohnnahe Fließgeschwindigkeit im Bereich von Fließstrecken („riffles“) den Richtwert von $v \leq 0,5$ m/s nicht wesentlich und dauerhaft überschreitet.

Tabelle 3.3.1.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm)								
	[m/s]	0,1	0,1	0,5	0,5	0,75	0,75	0,9	0,9
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		230	227	227	207	168	171	20	36
Stück [%]		92,4	91,2	91,2	83,1	67,5	68,7	8,0	14,5
Biomasse [g]		3073	3067	3048	2758	2278	2288	214	441
Biomasse [%]		94,8	94,6	94,0	85,1	74,7	75,0	7,0	14,5
Länge Minimum [cm]		6,5	6,8	6,5	6,5	6,5	6,5	7,5	7,8
Länge Maximum [cm]		13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	11,9	13,2
Gewicht Minimum [g]		3	4	3	3	3	3	4	5
Gewicht Maximum [g]		34	34	34	34	34	34	22	26

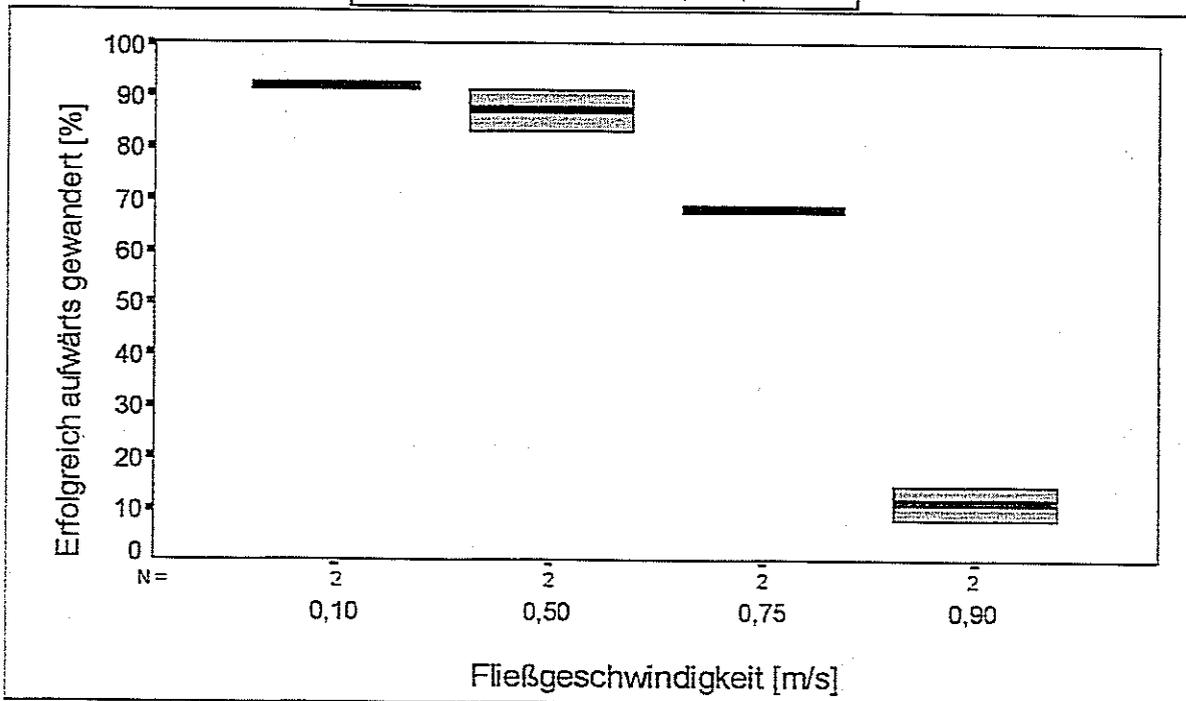
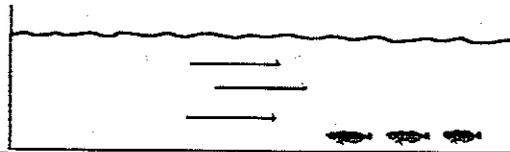


Abb. 3.3.1.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

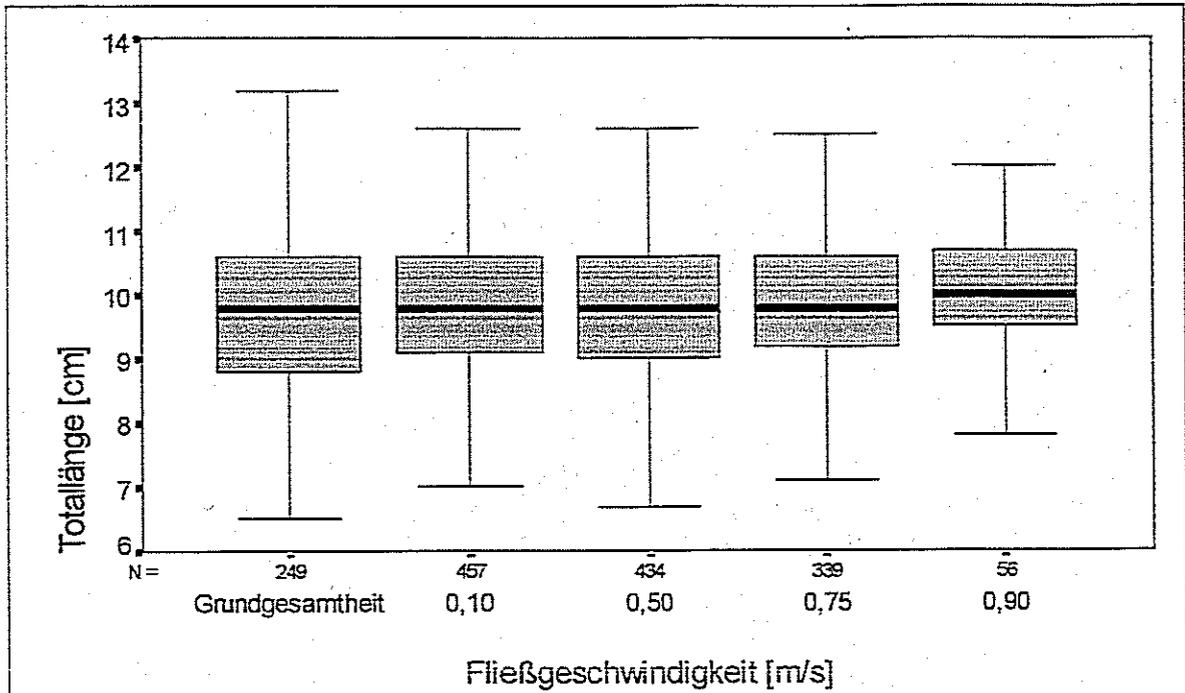


Abb. 3.3.1.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

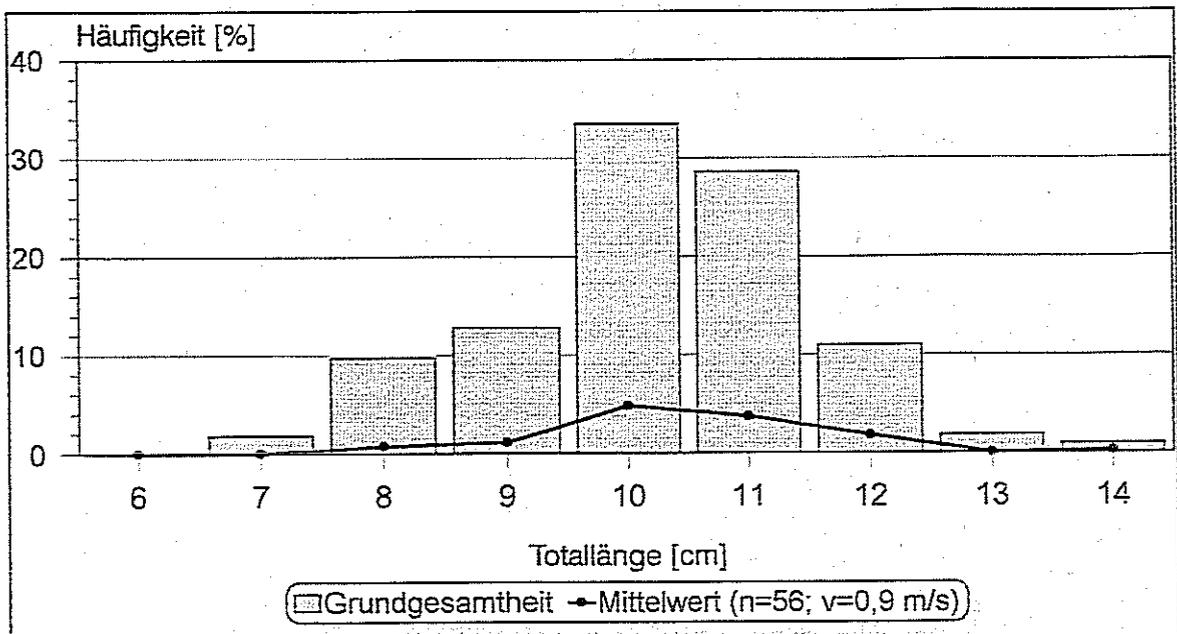


Abb. 3.3.1.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 0,9 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm].

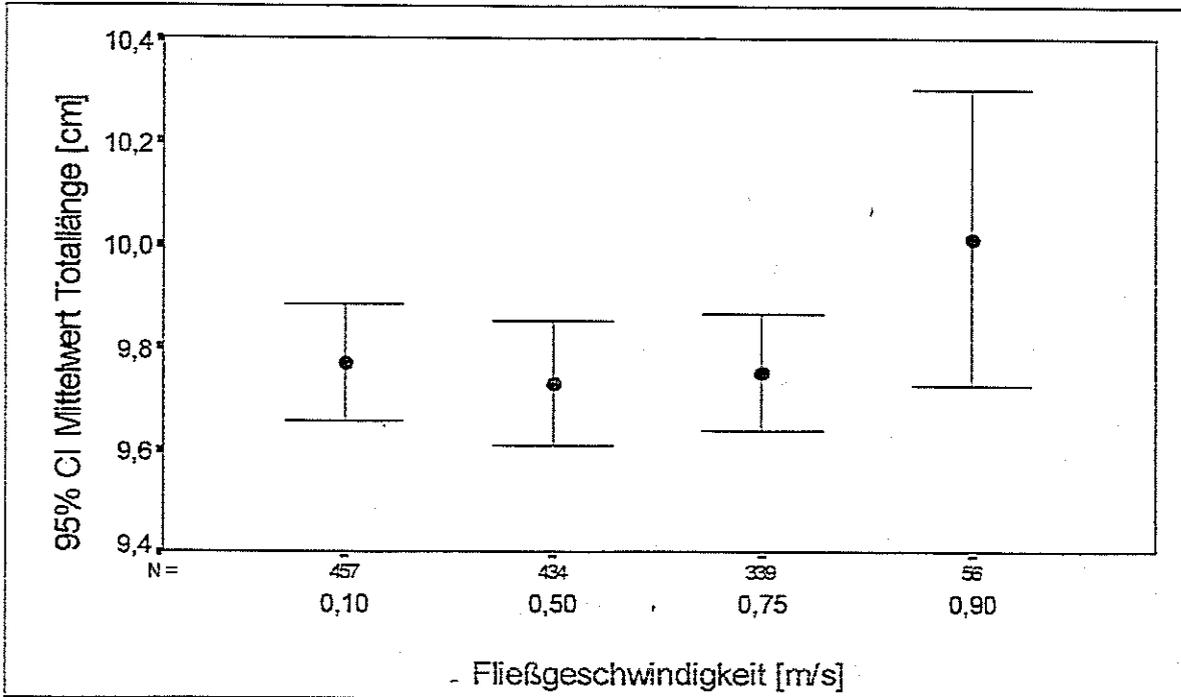


Abb. 3.3.1.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

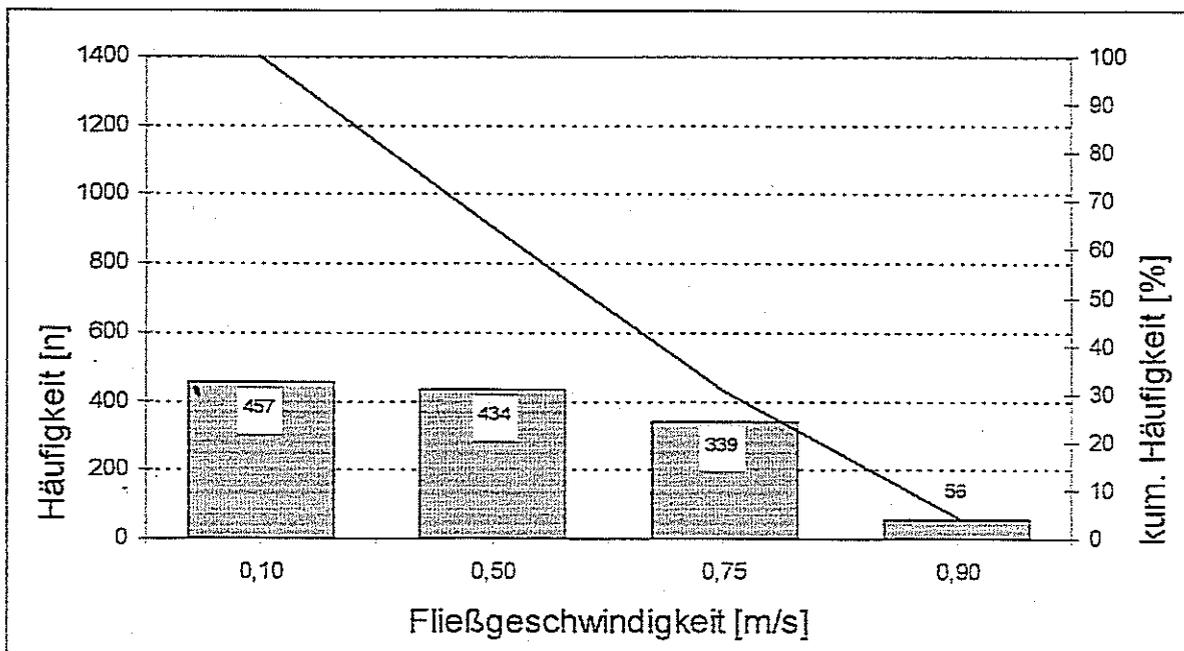


Abb. 3.3.1.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.2 „Wassertiefe“ (vertikale Mächtigkeit der Wassersäule; t)



Eine Reduzierung der Wassertiefe von anfänglich $t = 40$ cm auf letztlich $t = 2,5$ cm führt bei einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,25$ m/s zu einer Abnahme der Wanderungsrate von 94% auf 68% (Tab. 3.3.2.1). Dabei bilden sich in Zwischenschritten plateaumäßige Stagnationen in der aufwärts gerichteten Wanderung heraus. Solche befinden sich zwischen $t = 10$ cm und $t = 20$ cm bzw. zwischen $t = 2,5$ cm und $t = 5$ cm. Auf diesen Plateaus führt eine weitere Verringerung der Wassertiefe nicht zu einer Abnahme im stückbezogenen Aufstiegserfolg (Abb. 3.3.2.1). Das läßt vermuten, daß Mühlkoppfen auf eine Verringerung der Wassertiefe zwar reagieren, dies aber nur in größeren Skaleneinheiten.

Aus Tab. 3.3.2.1 und Abb. 3.3.2.2 geht hervor, daß unter den Versuchsbedingungen der abnehmenden Wassertiefe prinzipiell alle Größenklassen an der nach oben gerichteten Wanderung teilnehmen.

Der stückbezogene Wanderungserfolg der verschiedenen Größenklassen ist dabei allerdings proportional zum Parameter Wassertiefe in Beziehung zu setzen. Abb. 3.3.2.3 verdeutlicht dies für die Versuchsstellung Wassertiefe $t = 2,5$ cm. Hier beteiligen sich alle Größenklassen proportional zu den potentiell möglichen an der nach oben gerichteten Wanderung.

Ab einer Wassertiefe von $t < 10$ cm erhöhen sich jedoch die Werte der mittleren Totallänge (95% Konfidenzintervall) deutlich und setzen sich von denjenigen mit einer Wassertiefe von $t > 10$ cm ab (Abb. 3.3.2.4).

In der Abfolge der kumulierten Häufigkeiten wird ein Wanderungspotential von etwas über 70% bei einer Wassertiefe von annähernd $t \geq 20$ cm erreicht (Abb. 3.3.2.5). Bei einem Anstieg der Wassertiefe auf $t = 40$ cm zeigt sich nochmals eine plateaumäßige markante Erhöhung der Erfolgsrate der aufwärts gewanderten Mühlkoppfen.

→FAZIT:

Bezüglich des nach oben gerichteten Migrationserfolges bei Mühlkoppfen wirkt sich eine Wassertiefe von $t \geq 20$ cm bei gleichzeitig niedriger Fließgeschwindigkeit förderlich auf die daran beteiligten Größenklassen und einer quantitativen Migrationsrate von ca. 70% aus. Eine Barrierewirkung ist bei diesen Dimensionen und unter diesen Prämissen nicht gegeben.

Tab. 3.3.2.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20	40	40
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		166	162	156	184	221	209	217	216	236	234
Stück [%]		69,5	68,1	63,9	76,3	90,2	85,3	87,1	86,7	94,8	94,0
Biomasse [g]		2279	2270	2155	2534	2996	2880	2888	2839	3090	3091
Biomasse [%]		73,5	73,4	69,2	81,6	93,7	90,2	90,3	88,8	95,3	96,7
Länge Minimum [cm]		6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,7	6,5	6,5	6,5
Länge Maximum [cm]		13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2
Gewicht Minimum [g]		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Gewicht Maximum [g]		34	34	34	34	34	34	34	34	34	34

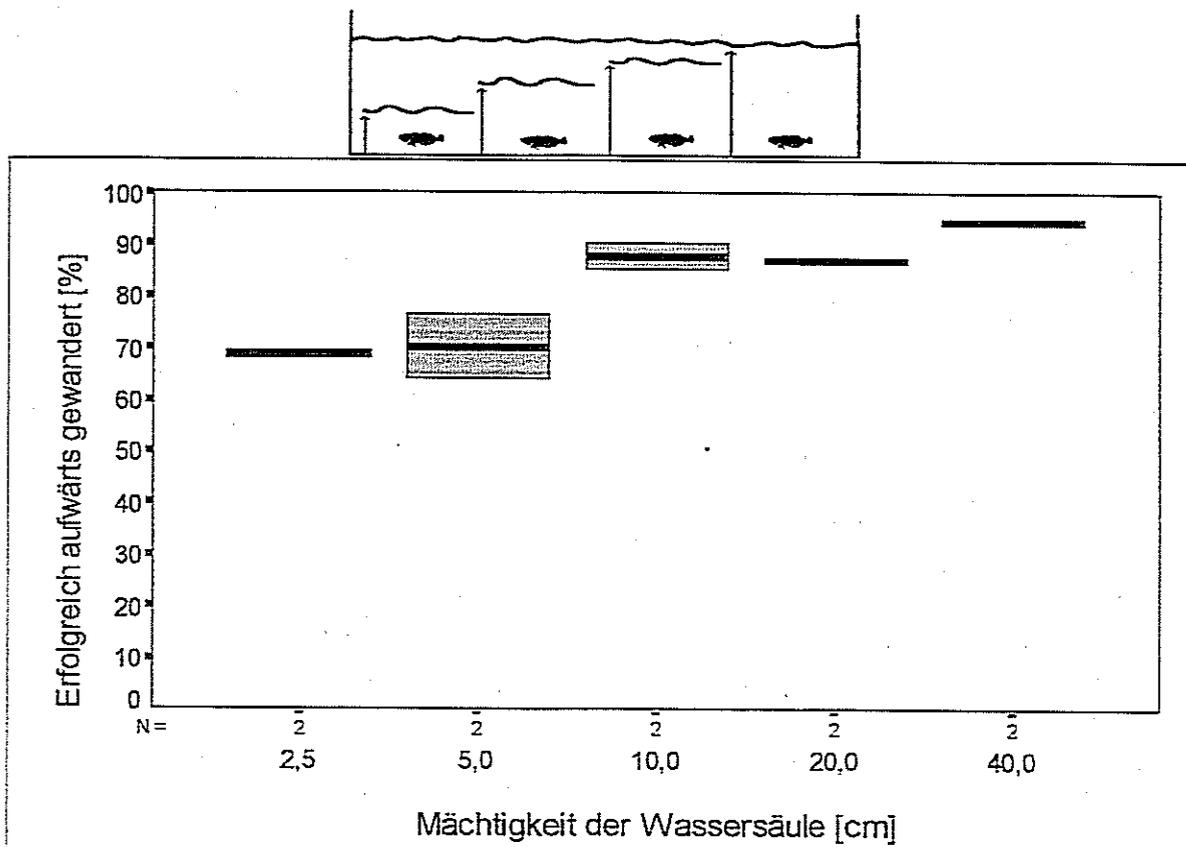


Abb. 3.3.2.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

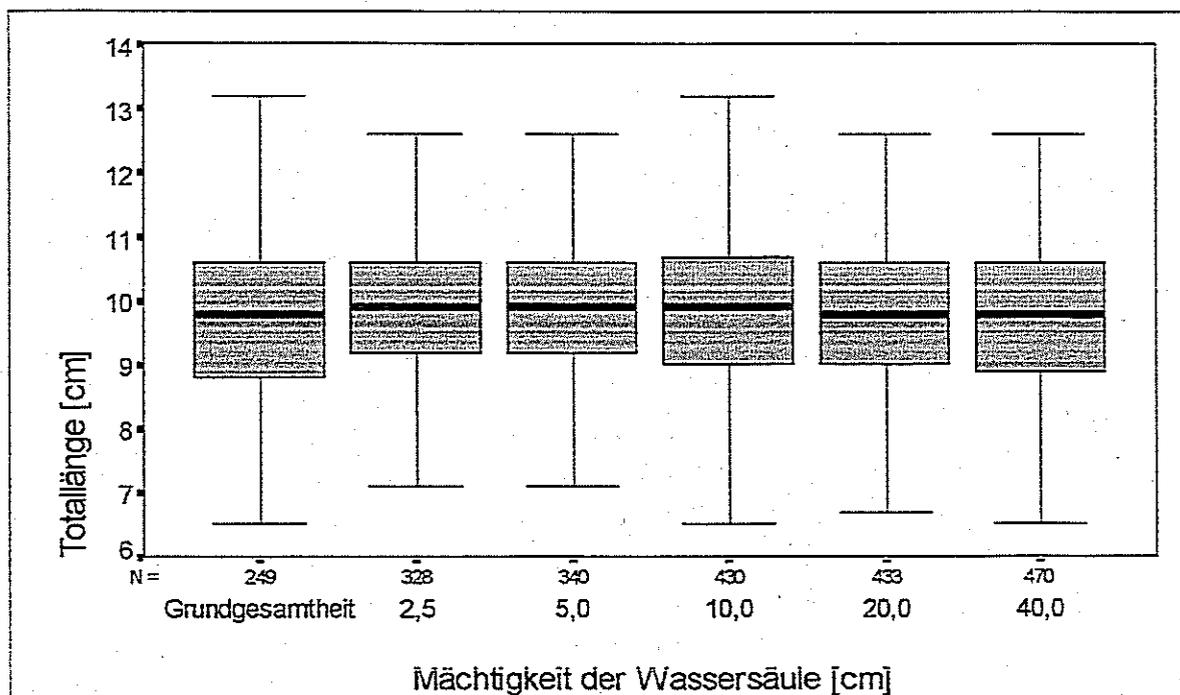


Abb. 3.3.2.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

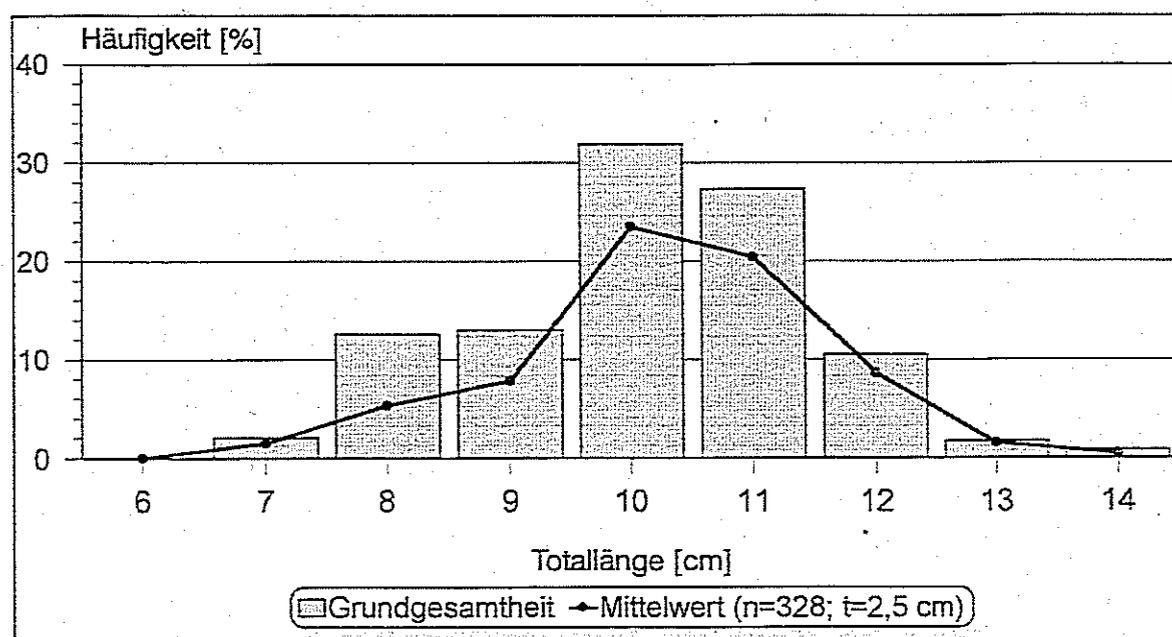


Abb. 3.3.2.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule von 2,5 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s].

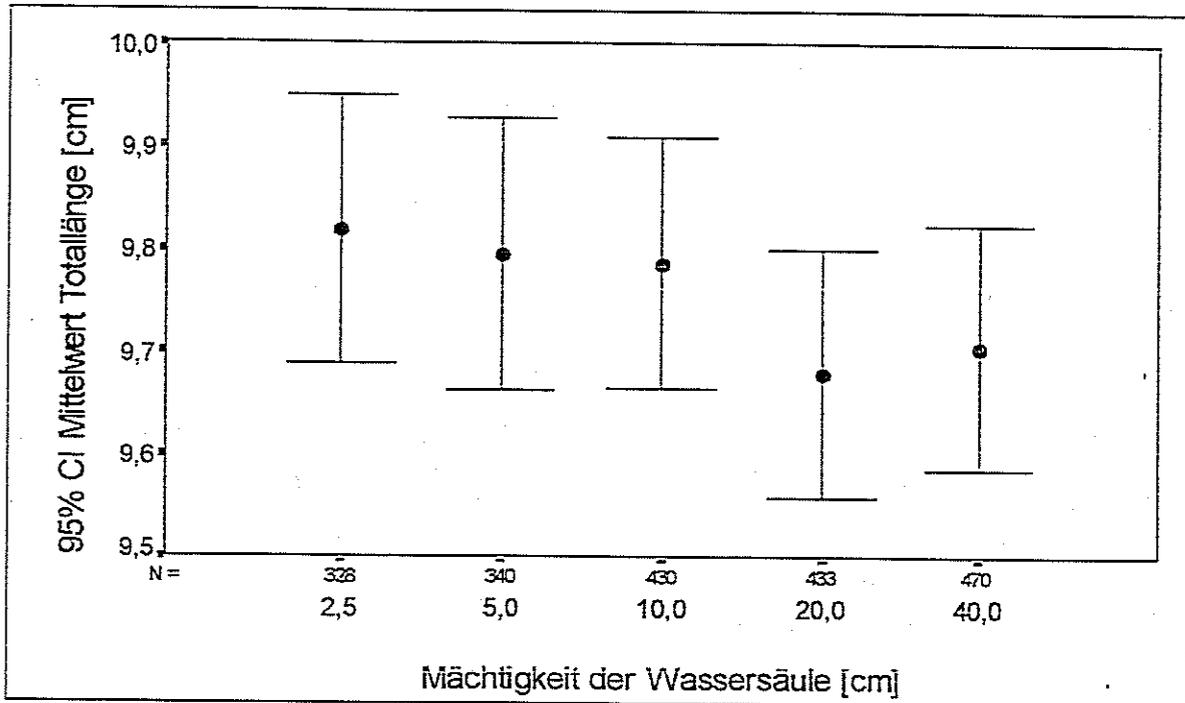


Abb. 3.3.2.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

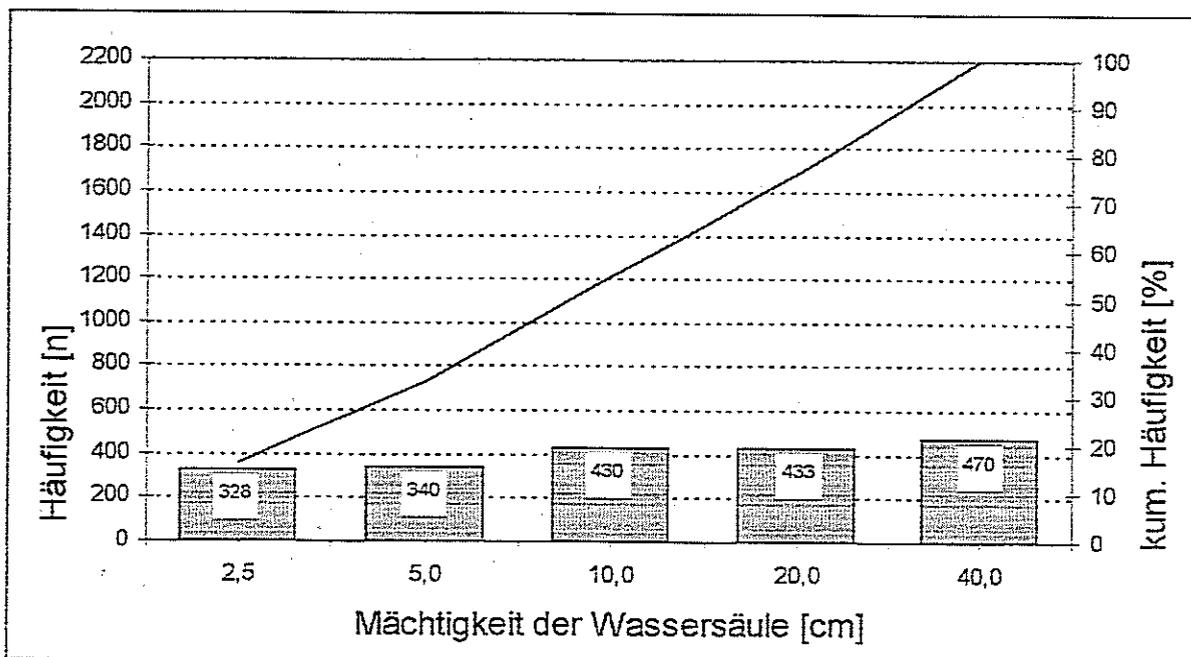


Abb. 3.3.2.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.3 „Bodensubstrate“



Beim direkten Vergleich des Wanderungserfolges von Mühlkoppen bei verschiedenen Bedingungen und Korngrößen der Bodensubstrate (ohne/ \varnothing 16 mm/ \varnothing 32 mm) und unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zeigt sich, daß sich die Mittel- bzw. Medianwerte der Versuchsansätze mit verschiedenen Substrattypen bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s tendenziell im Bereich knapp unter 90% bewegen (Tab. 3.3.3.1.a, Tab. 3.3.3.1.b, Abb. 3.3.3.1). Wird die Strömungsgeschwindigkeit dagegen bis $v = 1,0$ m/s gesteigert, verringert sich der Anteil erfolgreich aufwärts gewandelter Fische in der Fließrinne ohne Substratauflage auf einen mittleren Wert von ca. 10%, während sich dieser in Versuchen mit unterschiedlichem Substrat lediglich auf knapp 50% verkleinert. Somit stellt sich die Bedeutung von grobem Bodensubstrat erst bei erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten heraus.

Werden die Verteilungen und Lagen der Individuallängen bei unterschiedlichem Bodensubstrat miteinander verglichen, so steigt in allen Fällen der Medianwert mit zunehmender Fließgeschwindigkeit leicht gegenüber der Grundgesamtheit an (Abb. 3.3.3.2.a, Abb. 3.3.3.2.b), dies jedoch um so mehr bei kleinerem Substrat. Das bedeutet, daß mit zunehmender Fließgeschwindigkeit die unteren Größenklassen der Fische nicht mehr an der nach oben gerichteten Wanderung teilnehmen können.

Diese Feststellung spiegelt sich auch in den Darstellungen der mittleren Totallängen (95% Konfidenzintervall) gegenüber der Fließgeschwindigkeit in den Abb. 3.3.3.4.a und Abb. 3.3.3.4.b wieder.

Aus quantitativer Sicht können die unteren Größenklassen bis 9 cm eher erfolgreich eine Aufwärtswanderung absolvieren bei einer Präsenz von größerem Substrat mit einer durchschnittlichen Körnung von 32 mm (Abb. 3.3.3.3.a, Abb. 3.3.3.3.b).

Der Vergleich der kumulierten Häufigkeiten ergibt einheitlich in beiden Fällen, daß bei Anwesenheit von Bodensubstrat und einer Fließgeschwindigkeit bis $v = 0,5$ m/s schon annähernd 70% der Individuen erfolgreich aufwärts gewandert sind (Abb. 3.3.3.5.a, Abb. 3.3.3.5.b).

→FAZIT:

Im niedrigen Fließgeschwindigkeitsbereich bis $v \leq 0,5$ m/s spielt die Korngröße des Bodensubstrates eher eine untergeordnete Rolle. Dieses gewinnt erst bei Fließgeschwindigkeiten im Bereich von $0,5 \leq v \leq 1,0$ m/s an Bedeutung. Liegt die durchschnittliche Körnung dann allerdings zwischen 16 und 32 mm (grober Kies), zeigt sich ein zunehmender Wanderungserfolg nicht nur in quantitativer Hinsicht, sondern auch darin, daß die unteren Größenklassen aufwärts migrieren können.

Tab. 3.3.3.1.a: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei kleiner Korngröße des Bodensubstrates (16 mm) und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,5*	0,5*	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		227	207	149	134	71	86
Stück [%]		91,2	83,1	87,6	78,8	43,3	52,4
Biomasse [g]		3048	2758	1908	1892	926	1169
Biomasse [%]		94,0	85,1	78,3	79,8	39,1	49,5
Länge Minimum [cm]		6,5	6,5	8,0	8,0	7,6	7,7
Länge Maximum [cm]		13,2	13,2	13,2	13,2	12,8	12,8
Gewicht Minimum [g]		3	3	3	3	4	4
Gewicht Maximum [g]		34	34	34	34	29	30

* ohne Substrat/Mächtigkeit des Wasserfilms = 25 cm

Tab. 3.3.3.1.b: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei großer Korngröße des Bodensubstrates (32 mm) und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)							
	[m/s]	0,9*	0,9*	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:								
Stück [n]		20	36	137	140	154	98	59
Stück [%]		8,0	14,5	83,5	85,4	93,9	60,1	36,4
Biomasse [g]		214	441	1664	1758	2125	1165	615
Biomasse [%]		7,0	14,5	70,2	74,1	89,6	49,5	26,1
Länge Minimum [cm]		7,5	7,8	7,8	7,8	7,8	7,6	7,6
Länge Maximum [cm]		11,9	13,2	12,5	12,5	13,4	12,5	12,3
Gewicht Minimum [g]		4	5	3	3	3	4	4
Gewicht Maximum [g]		22	26	26	30	34	29	26

* ohne Substrat/Mächtigkeit des Wasserfilms = 25 cm

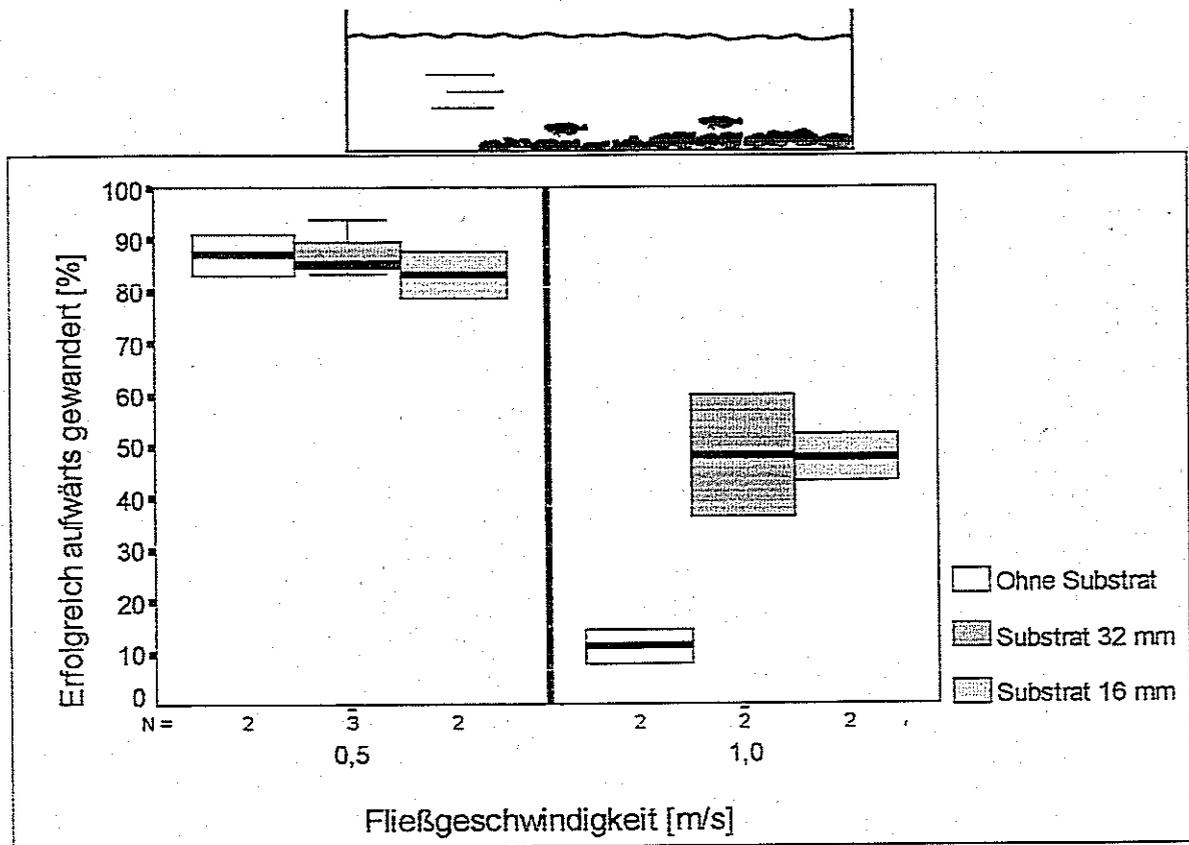


Abb. 3.3.3.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Korngröße des Bodensubstrates und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

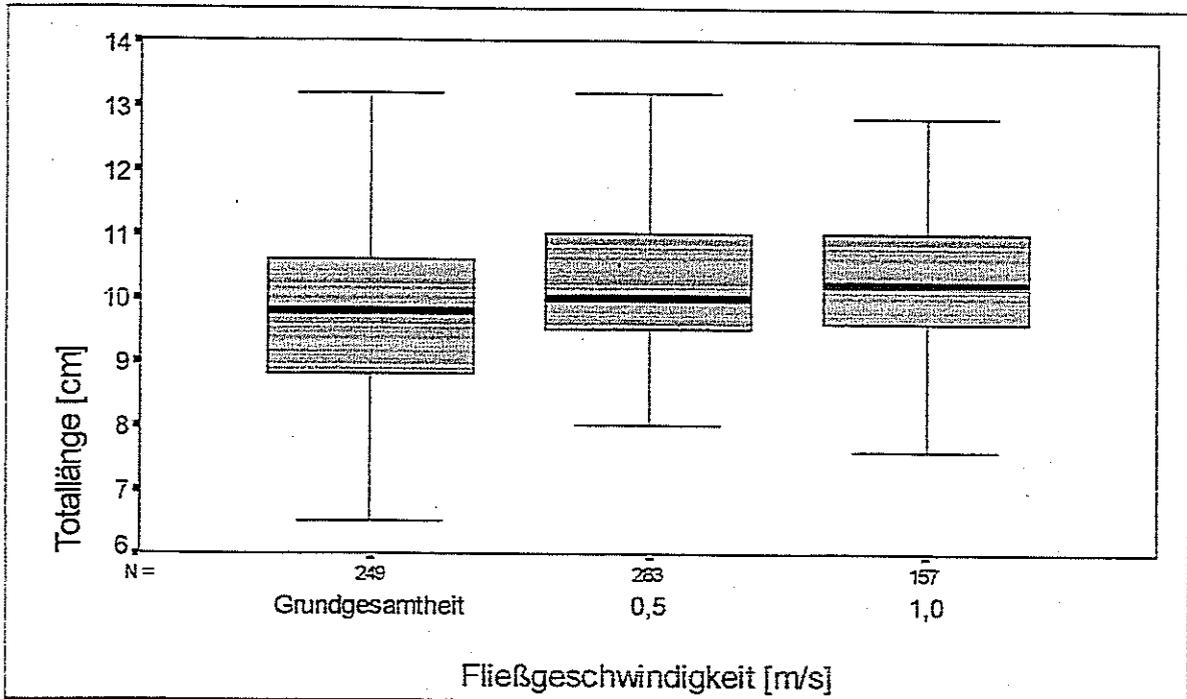


Abb. 3.3.3.2a: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

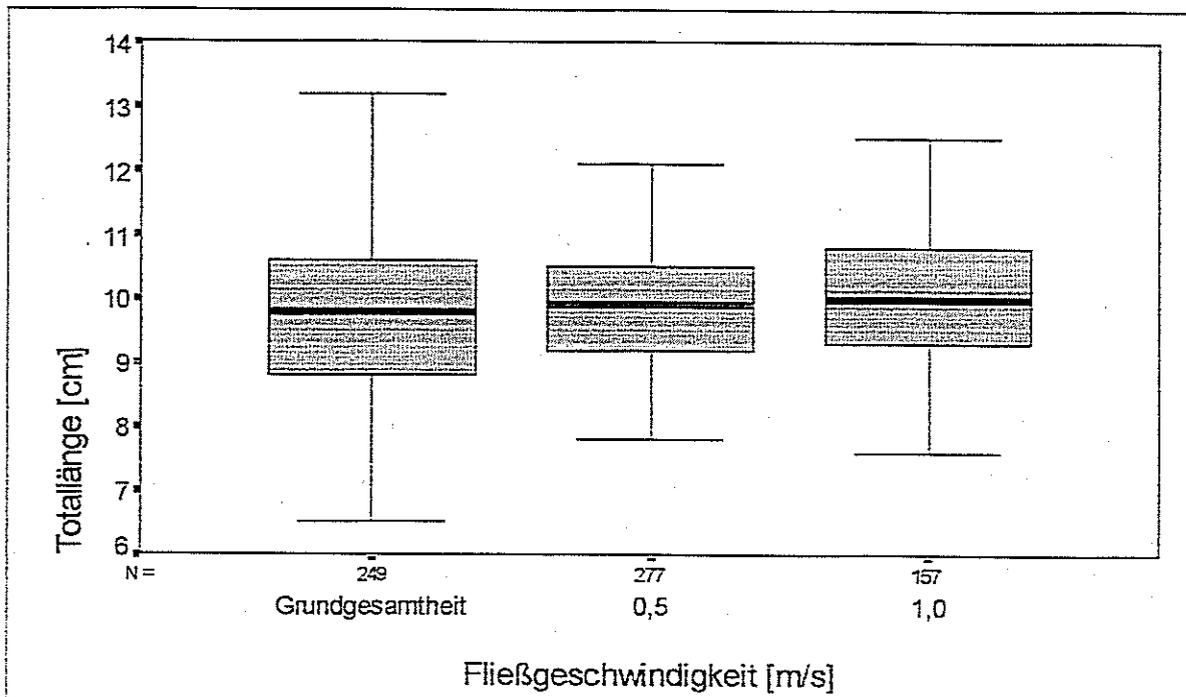


Abb. 3.3.3.2b: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

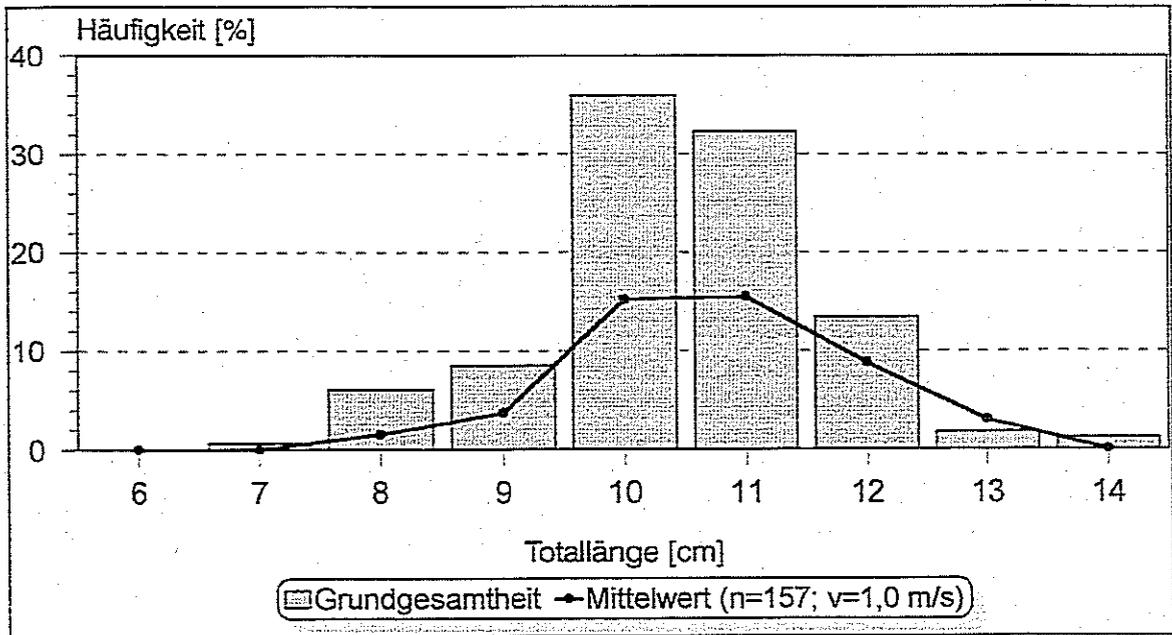


Abb. 3.3.3.a: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

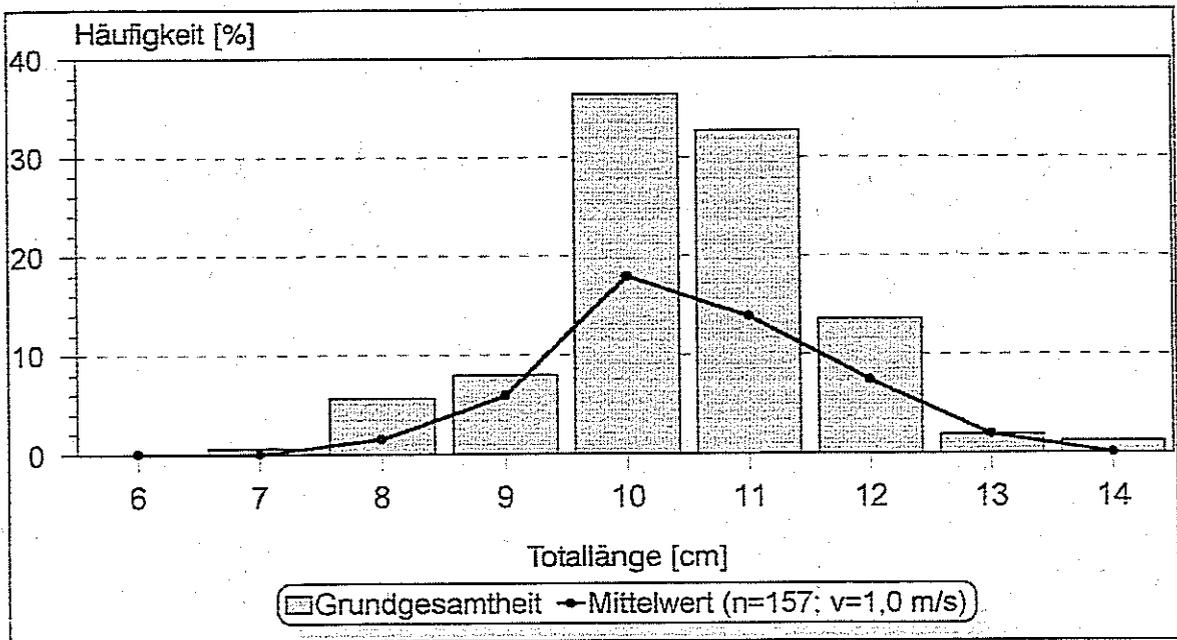


Abb. 3.3.3.b: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

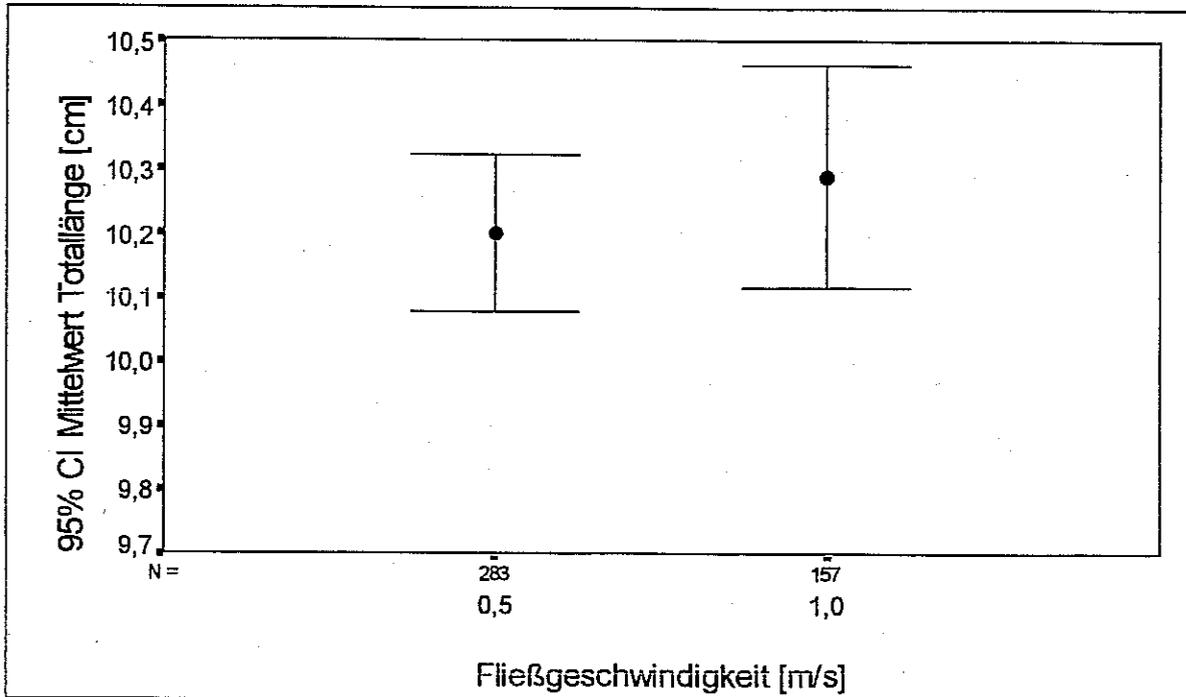


Abb. 3.3.3.4a: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

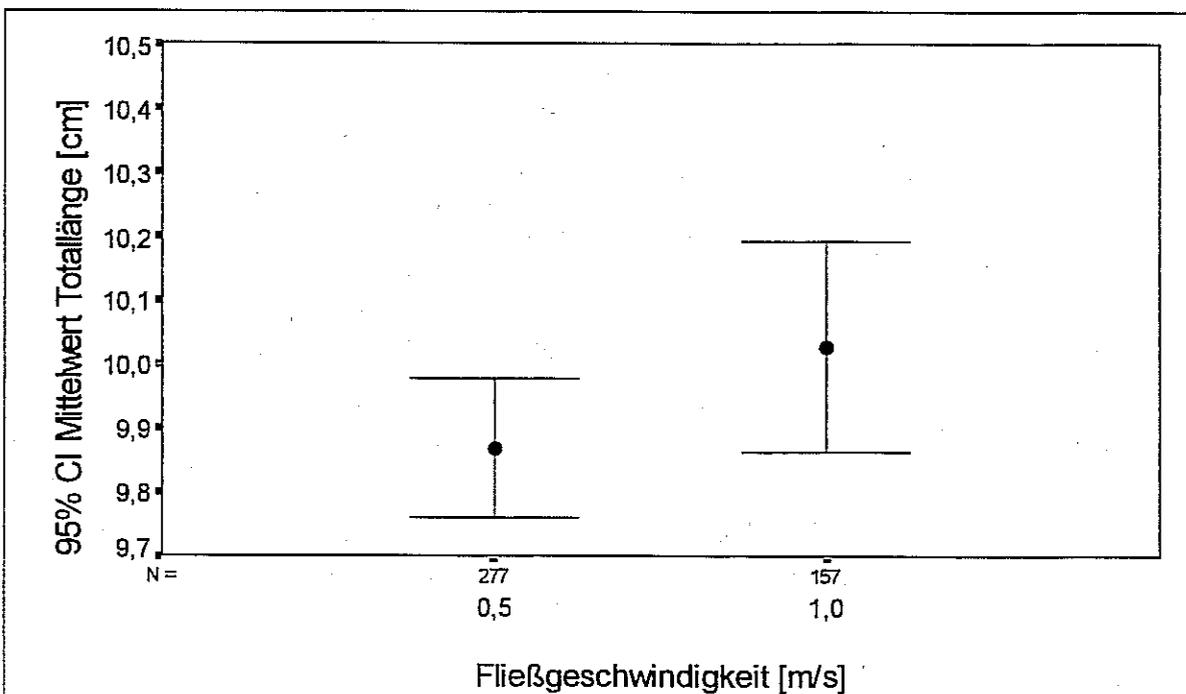


Abb. 3.3.3.4b: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

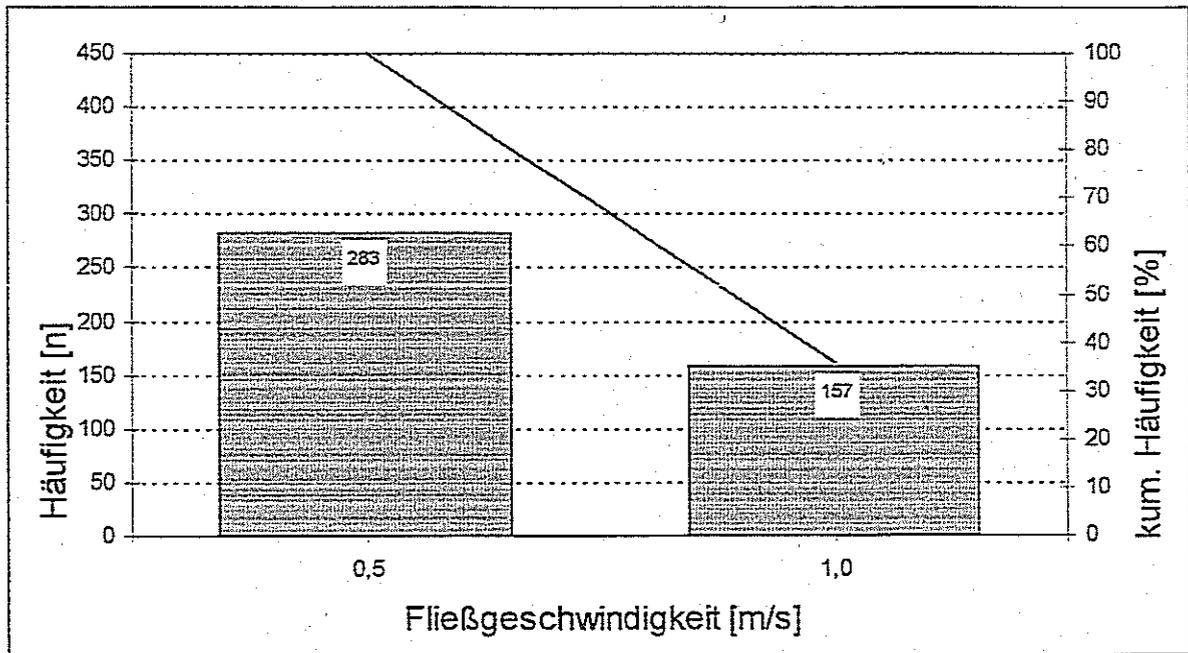


Abb. 3.3.3.5a: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

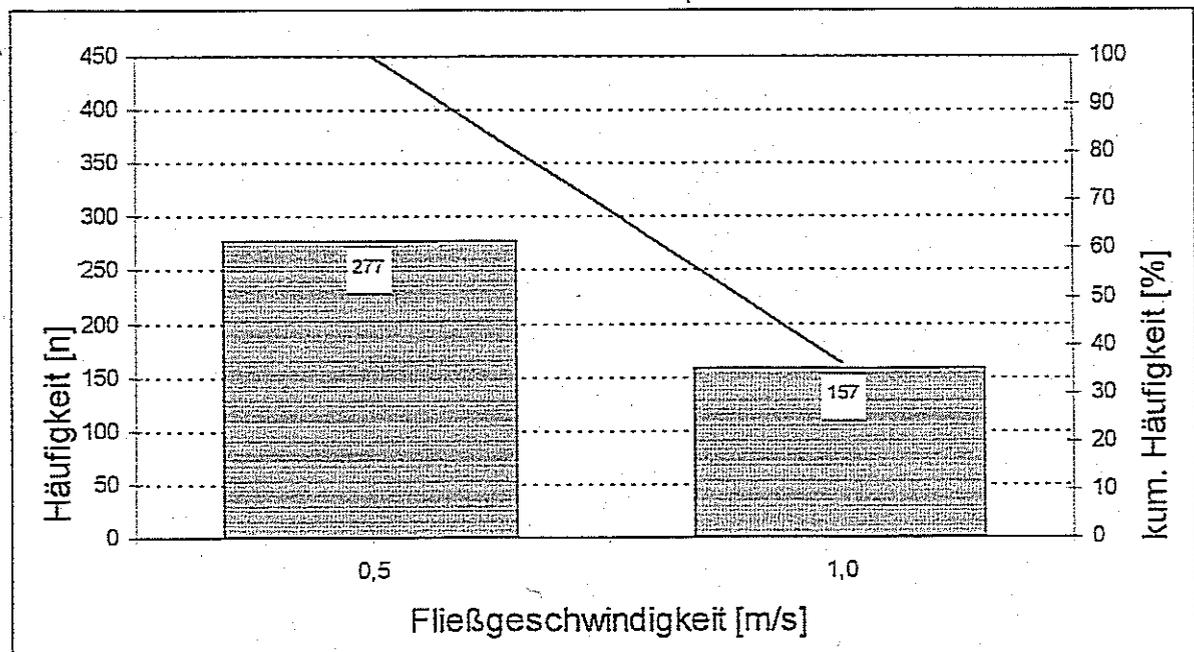


Abb. 3.3.3.5b: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.4 „Bodenschwelle“

3.3.4.1 „Höhe der Bodenschwelle“ (h_s)

Bei Höhen einer simulierten Bodenschwelle zwischen $h_s = 5$ cm und $h_s = 30$ cm beträgt der relative stückbezogene Wanderungserfolg maximal ca. 96% und minimal etwa 72% (Tab. 3.3.4.1.1, Abb. 3.3.4.1.1). Liegt die Strömungsgeschwindigkeit des Oberwassers im Bereich $v \leq 0,25$ m/s und ist die Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser ausreichend ausgebildet, läßt sich zwar mit steigender Schwellenhöhe ein leichter Gradient in der Erfolgsquote feststellen, doch dieser erscheint mit einer Abnahme von rund einem Fünftel des Ausgangswertes als tolerierbar. Dies zeigt, daß Mühlkoppfen als Bodenfische ohne Schwimmblase größere Hindernisse ohne weiteres im freien Wasserkörper überschwimmen können, unter der Prämisse, daß die hydraulischen Bedingungen im Oberwasser den biologischen Richt- und Grenzwerten dieser Fischart entsprechen.

Prinzipiell nehmen an der nach oben gerichteten Wanderung über die verschiedenen hohen Bodenschwellen alle Größenklassen teil (Tab. 3.3.4.1.1, Abb. 3.3.4.1.2). Selbst bei einer Höhe von $h_s = 30$ cm findet eine erfolgreiche Wanderung proportional zur gegebenen Grundgesamtheit statt (Abb. 3.3.4.1.3). Die mittlere Totallänge (95% Konfidenzintervall) erhöht sich leicht mit steigender Höhe der Bodenschwelle (Abb. 3.3.4.1.4). Dies verdeutlicht, daß bei zunehmendem Schwierigkeitsgrad des Wanderhindernisses eher die größeren Tiere erfolgreich sind.

Bei den Einzelversuchen ist ein stückbezogener Gradient im Wanderungserfolg mit zunehmender Schwellenhöhe h_s nicht erkennbar. Die Ergebnisse verhalten sich eher etwas inhomogen (Abb. 3.3.4.1.5). Doch unter den Annahmen, daß ein Wanderungserfolg von 70% als tolerierbar betrachtet werden kann und die hydraulischen Begleitparameter ähnlich denjenigen in den Versuchsstellungen sind, liegt die maximale Schwellenhöhe demnach zwischen $h_s = 10$ cm und $h_s = 15$ cm.

→FAZIT:

Unter der Voraussetzung einer günstigen Strömungsgeschwindigkeit ($v_s \leq 0,25$ m/s; siehe auch 3.3.4.3) und einer ausreichenden Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser (mindestens $10 \text{ cm} \leq t_s \leq 20 \text{ cm}$; siehe auch 3.3.4.2) wirkt eine maximale Schwellenhöhe zwischen $h_s = 10$ cm und $h_s = 15$ cm für die nach oben gerichtete Migration der Mühlkoppe nicht als Hindernis und ist deshalb tolerierbar.

Tab. 3.3.4.1.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Höhe der Bodenschwelle [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm)												
	[cm]	5	5	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30
erfolgreich aufwärts gewandert:													
Stück [n]		209	194	202	210	188	198	176	179	147	156	171	146
Stück [%]		92,9	87,4	91,8	96,3	87,4	92,5	83,0	87,7	72,4	78,8	86,4	74,5
Biomasse [g]		2882	2714	2820	2900	2645	2763	2507	2551	2120	2240	2493	2134
Biomasse [%]		95,7	90,5	94,3	98,5	90,1	95,0	88,2	89,9	76,0	80,3	89,9	76,9
Länge Minimum [cm]		6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Länge Maximum [cm]		13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2
Gewicht Minimum [g]		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Gewicht Maximum [g]		34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34

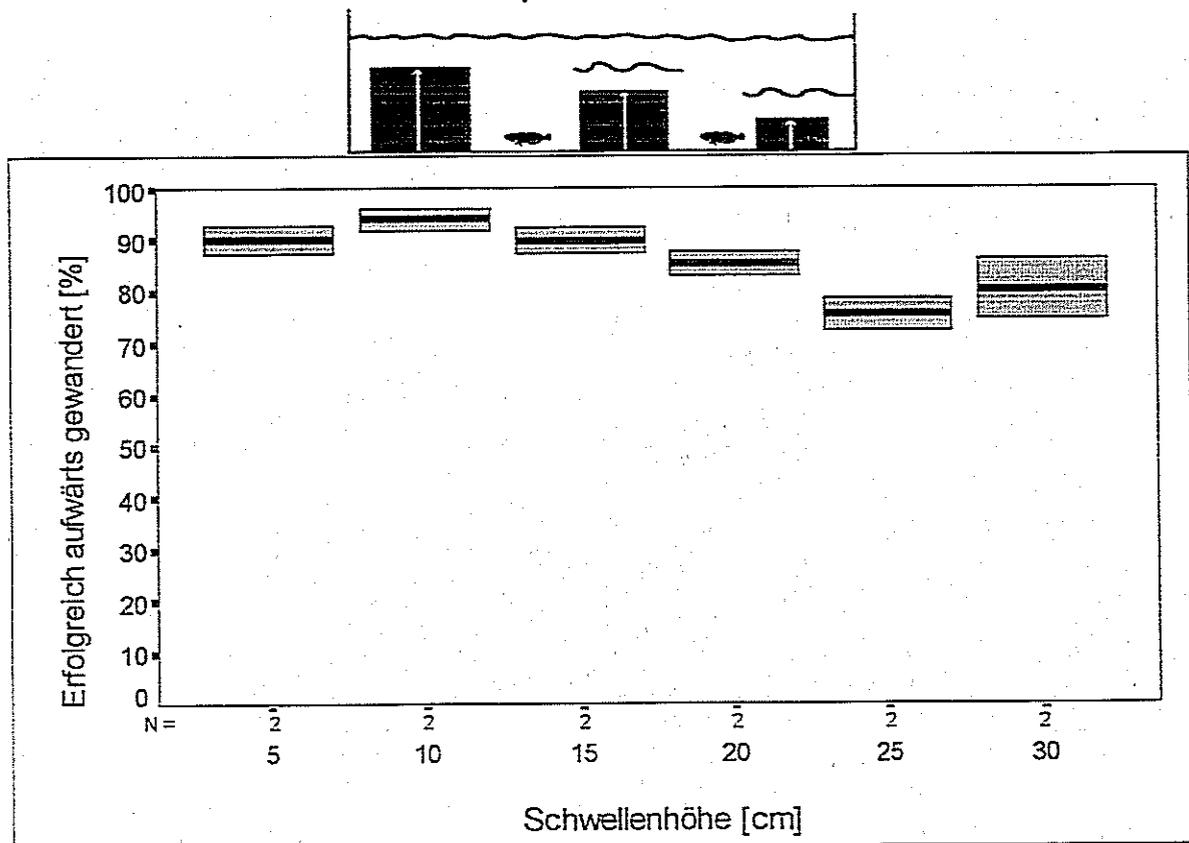


Abb. 3.3.4.1.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

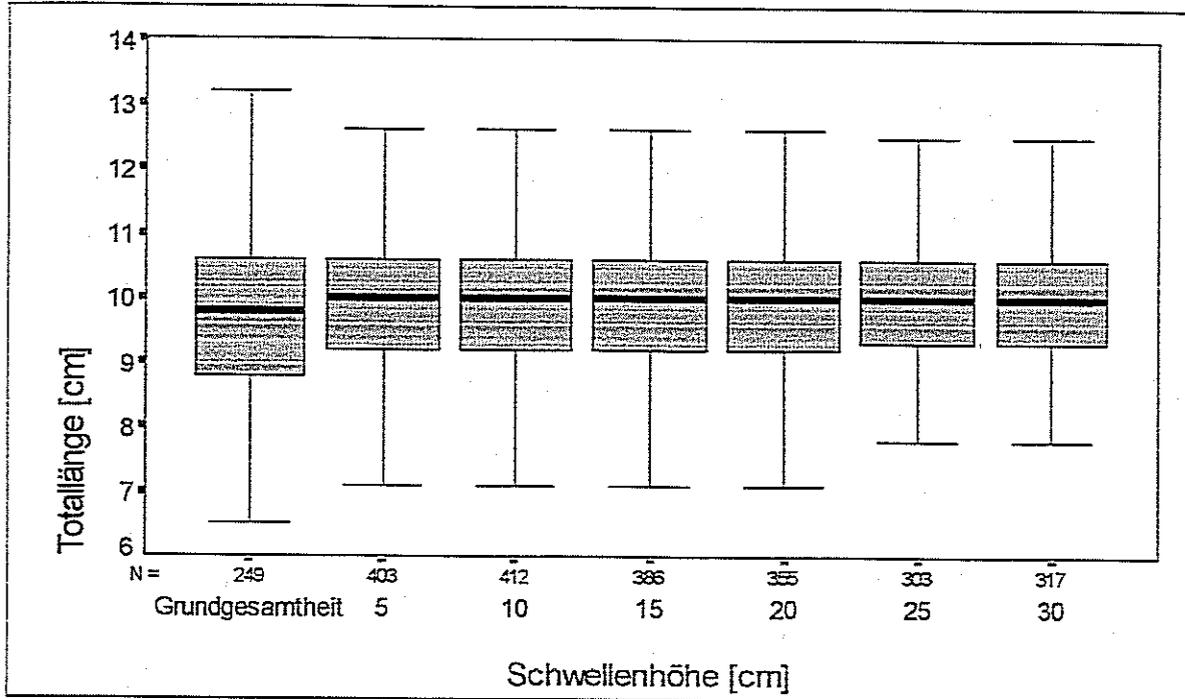


Abb. 3.3.4.1.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

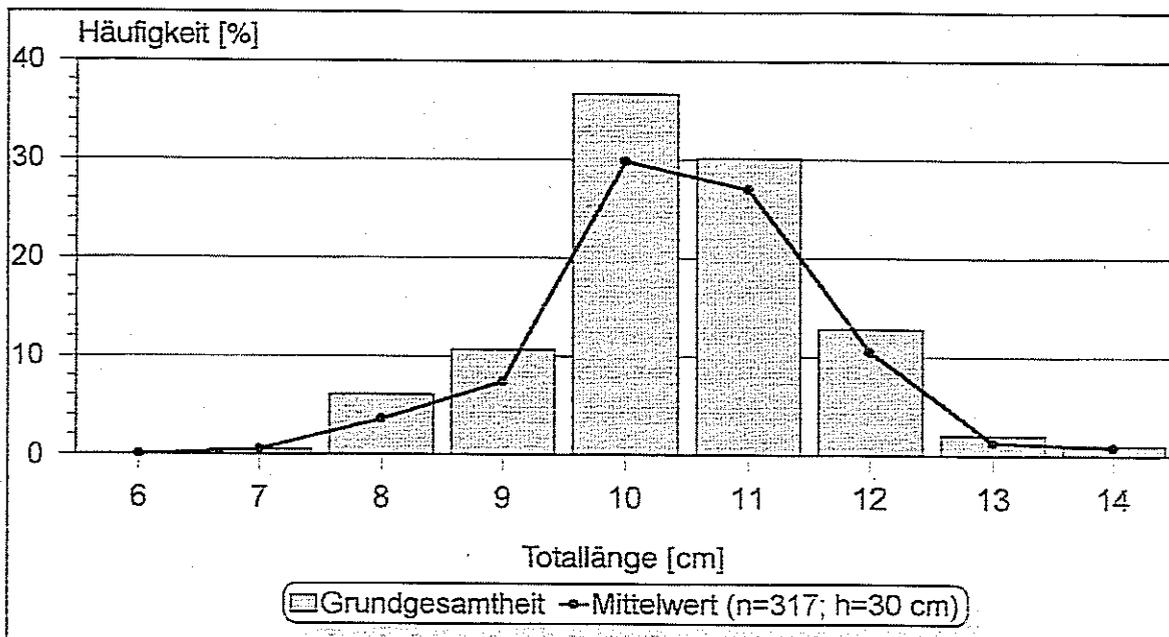


Abb. 3.3.4.1.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Bodenschwelle mit einer maximalen Höhe von 30 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s].

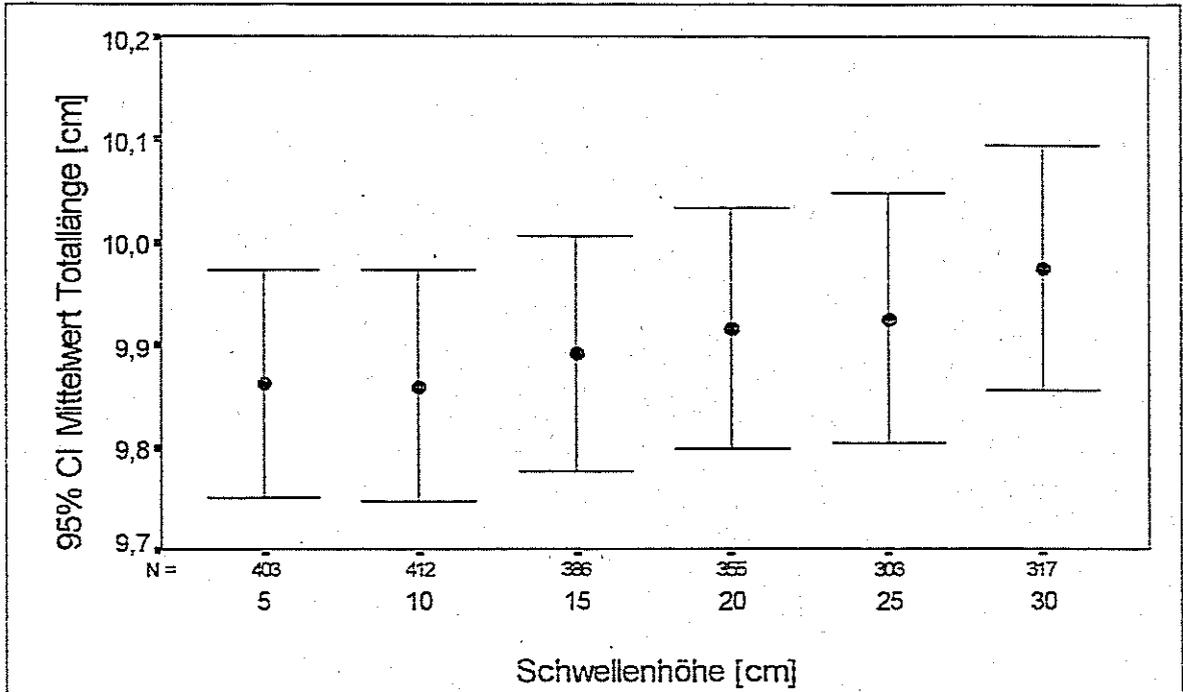


Abb. 3.3.4.1.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

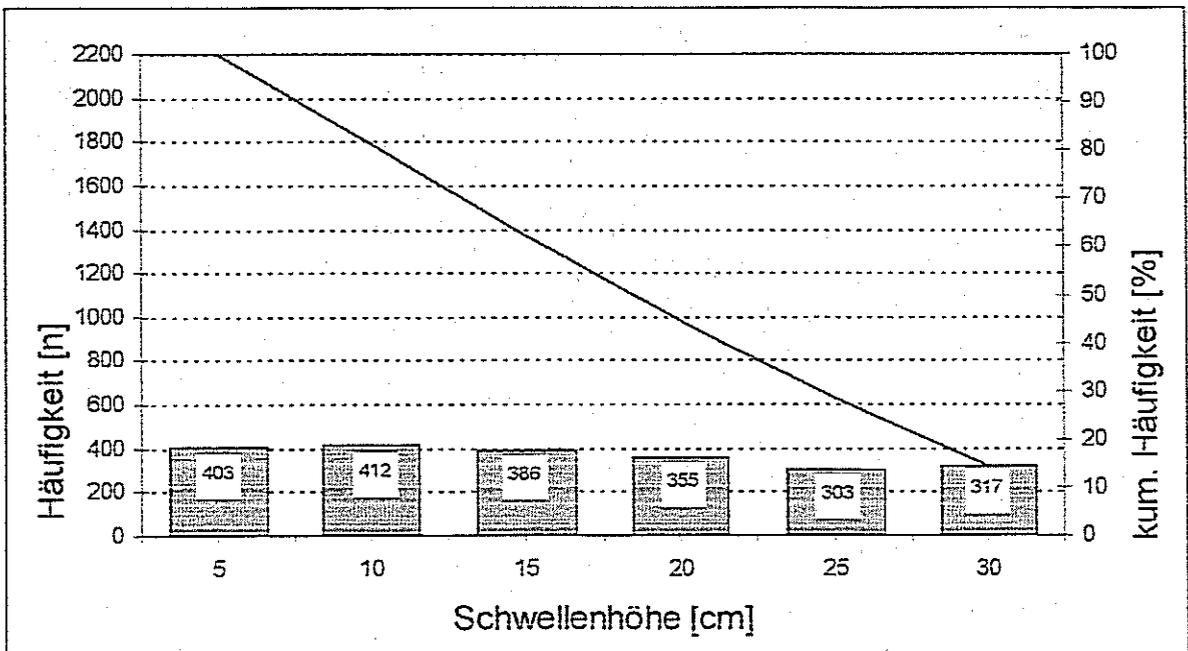
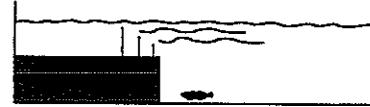


Abb. 3.3.4.1.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.4.2 „Vertikale Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“ (t_s)



Bei abnehmender Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle reagieren Mühlkoppen bei gegebener Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser mit abnehmendem Wanderungserfolg (Tab. 3.3.4.2.1, Abb. 3.3.4.2.1). Gravierend wirkt sich die Verringerung der Wassersäule von $t_s = 20$ cm auf $t_s = 10$ cm aus. Hierbei nimmt die Erfolgsquote bereits um ein Drittel ab, danach erfolgen die Abnahmen in kleinerem Umfang.

Beim Wanderungsverhalten der verschiedenen Größenklassen fällt auf, daß mit abnehmender Wassersäule t_s zuerst noch die größeren Individuen migrieren, dann jedoch in der Mehrzahl die etwas kleineren Exemplare (Abb. 3.3.4.2.2).

Bei einer minimalen Wassersäule über der Schwelle von $t_s = 2,5$ cm wandern die verschiedenen Größenklassen noch proportional ihrem Vorkommen in der Grundgesamtheit, jedoch in quantitativer Hinsicht nur von geringem Ausmaß (Abb. 3.3.4.2.3).

Die Betrachtung der mittleren Totallängen (95% Konfidenzintervall) ergibt ein ähnliches Bild. Bis zu einer Absenkung der Wassersäule auf $t_s = 5$ cm nehmen die größeren Exemplare an der Wanderung teil, danach in der Mehrzahl wieder die kleineren (Abb. 3.3.4.2.4). Bei dieser Wassertiefe sind die großen Exemplare entweder optisch auffällig und damit gefährdet oder aber sie erreichen im Wasserkörper nicht mehr die gewünschte Schubkraft mit ihren Schwanzschlägen. Dieses Verhalten ist jedoch bei den Versuchen mit unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in der Fließrinne nicht beobachtet worden.

Eine kumulierte Häufigkeit von ca. 70% stückbezogenem Wanderungserfolg wird mit einer minimalen Wassersäule über der Bodenschwelle zwischen $t_s = 10$ cm und $t_s = 20$ cm erreicht (Abb. 3.3.4.2.5).

→FAZIT:

Für die aufwärts gerichtete Wanderung der Mühlkoppe sollte die Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle wenigstens $10 \text{ cm} \leq t_s \leq 20 \text{ cm}$ betragen (bei ausreichend geringer Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser von $v_s \leq 0,25$ und einer maximaler Schwellenhöhe im Bereich zwischen $h_s = 15 \text{ cm}$ und $h_s = 20 \text{ cm}$). Flacher überströmte Strukturen können die Aufwärtswanderung behindern.

Tab. 3.3.4.2.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlich hoher Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle [cm]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s)								
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		56	42	83	101	109	94	202	210
Stück [%]		32,6	24,4	48,3	58,7	63,0	54,7	91,8	96,3
Biomasse [g]		660	426	949	1242	1440	1093	2820	2900
Biomasse [%]		26,8	17,3	38,6	50,5	58,5	44,4	94,3	98,5
Länge Minimum [cm]		7,7	7,8	7,6	7,5	7,1	7,5	6,5	6,5
Länge Maximum [cm]		12,2	12,4	12,3	12,6	12,7	12,7	13,2	13,2
Gewicht Minimum [g]		3	3	3	4	3	4	3	3
Gewicht Maximum [g]		30	28	27	27	30	30	34	34

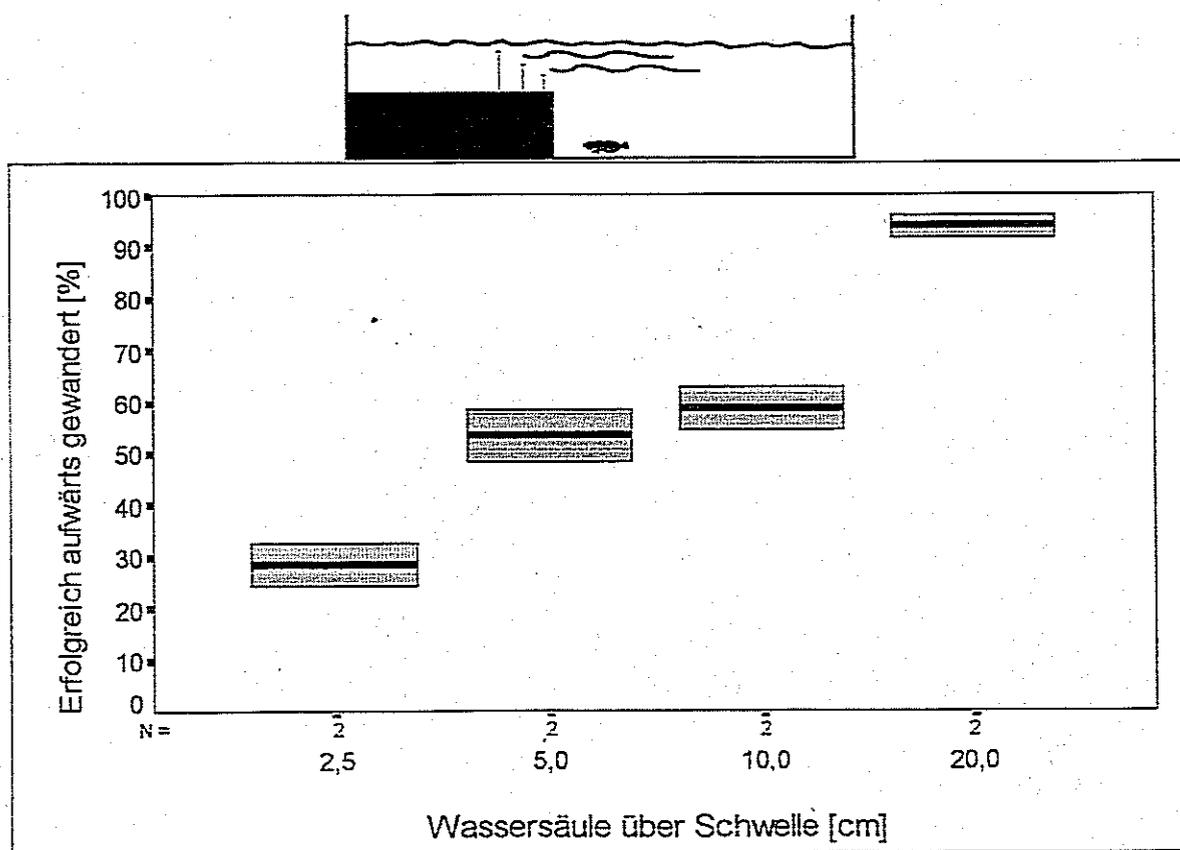


Abb. 3.3.4.2.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

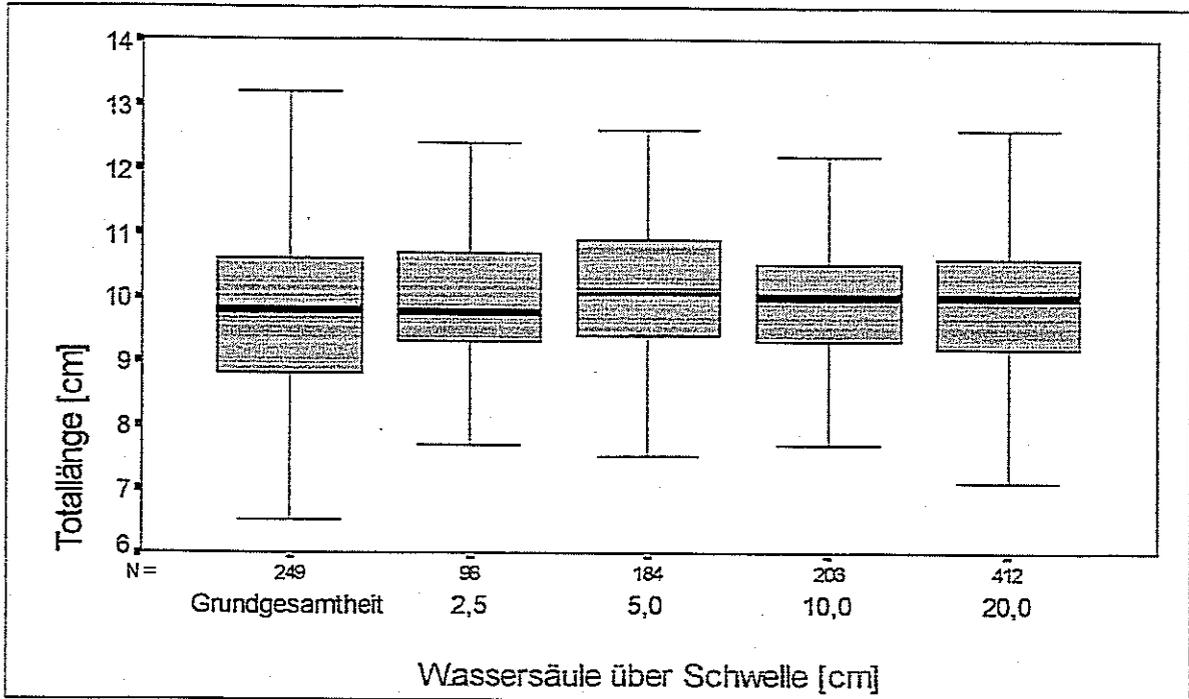


Abb. 3.3.4.2.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

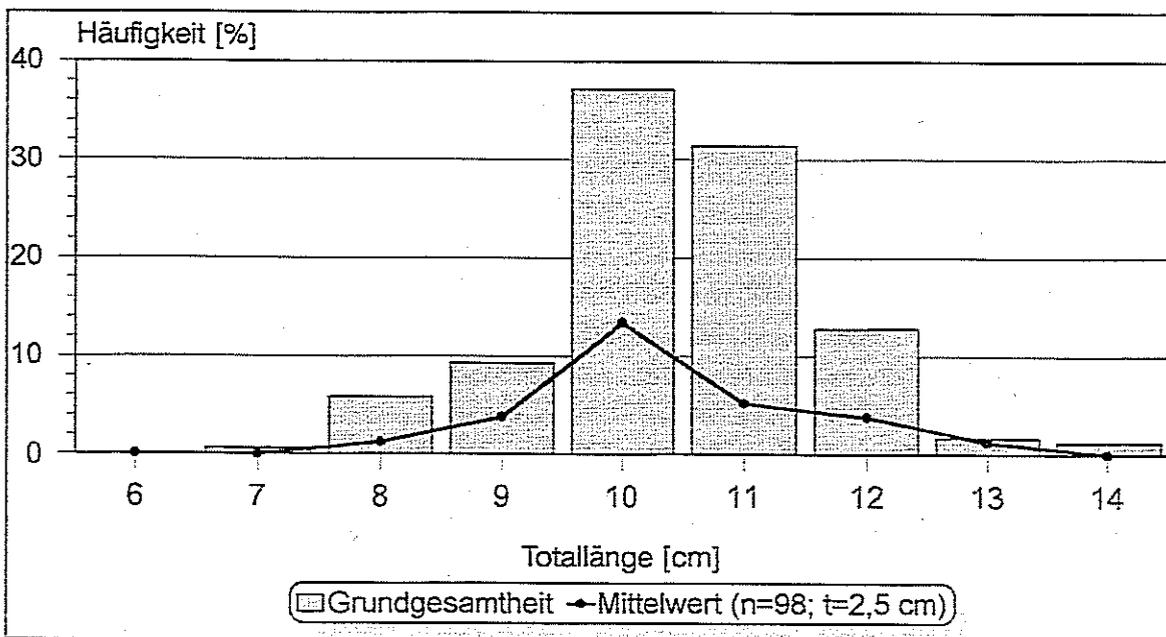


Abb. 3.3.4.2.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule von 2,5 cm über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s].

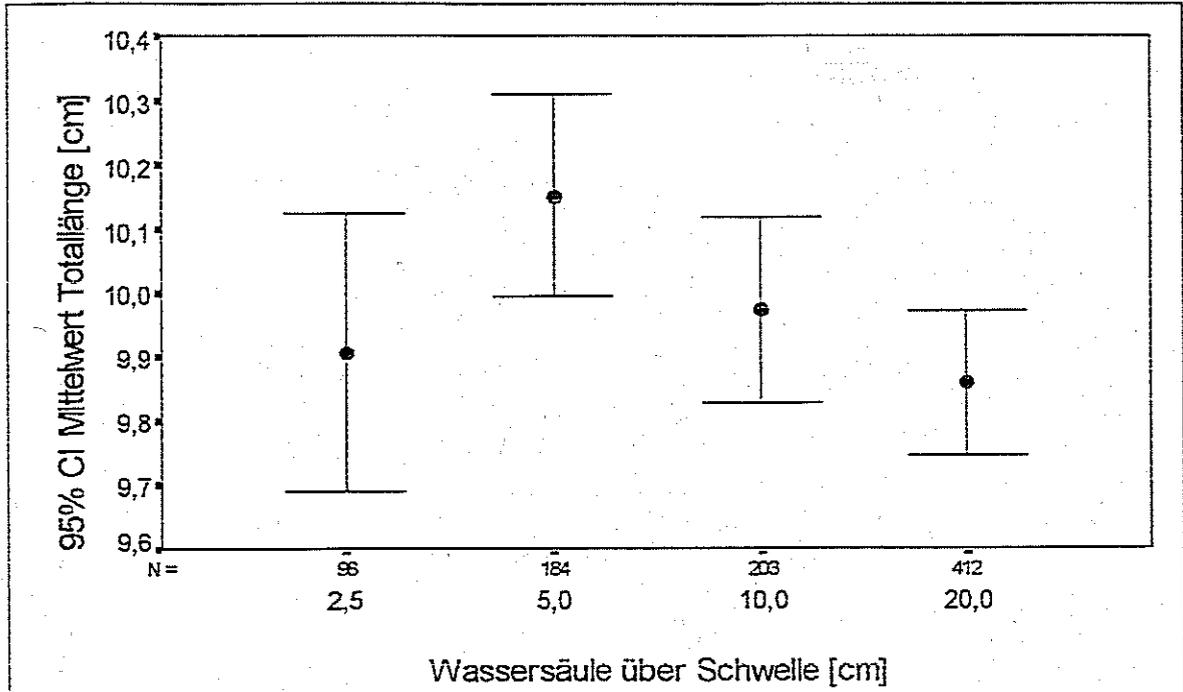


Abb. 3.3.4.2.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

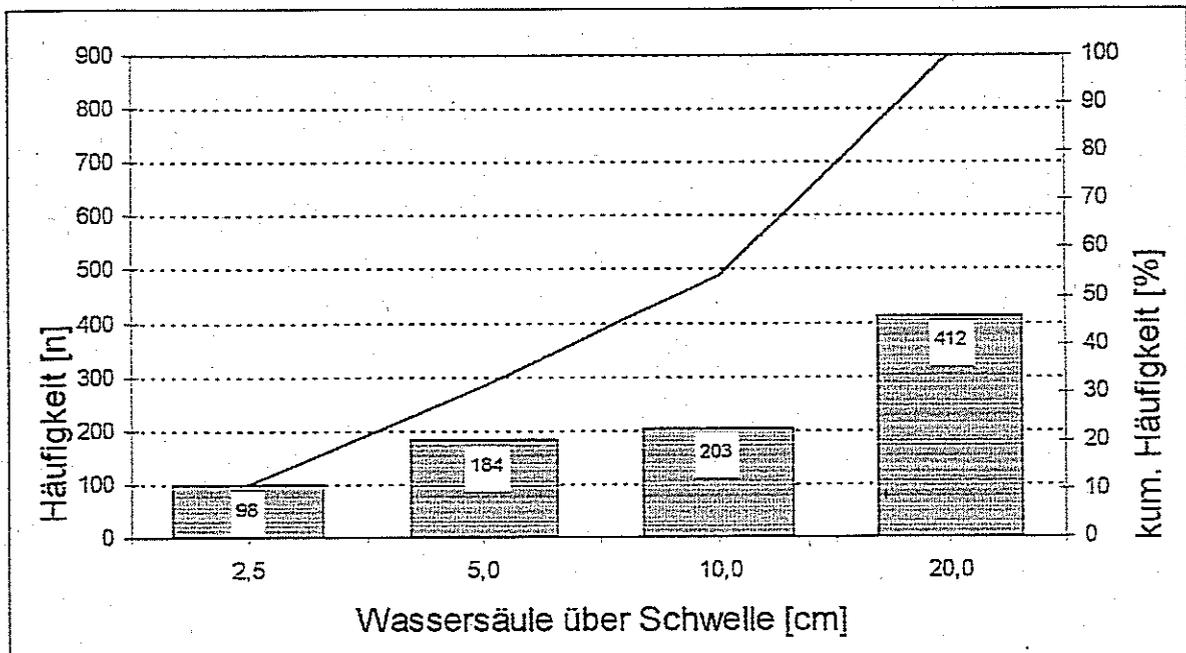


Abb. 3.3.4.2.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.4.3 „Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“ (v_s)



Der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle auf das Migrationsverhalten der Mühlkoppe macht sich im Bereich zwischen $v_s = 0,25$ m/s und $v_s = 0,75$ m/s erst langsam, danach aber stetig bemerkbar (Abb. 3.3.4.3.1). Insgesamt gesehen fällt die Erfolgsquote entlang des Strömungsgradienten von ca. 58% auf 16% ab (Tab. 3.3.4.3.1).

Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus den Strömungsversuchen macht deutlich, daß bis zu einer Fließgeschwindigkeit von $v \leq 0,75$ m/s der stückbezogene relative Wanderungserfolg bei Versuchen ohne Bodenschwelle größer ist, dann aber im Bereich $v \geq 0,75$ m/s die Erfolgsquote mit hoher Strömung und Bodenschwelle bei weitem übertrifft. Dies mag darin begründet sein, daß die zu überwindende Distanz bei den Strömungsversuchen in der Fließrinne um ca. zwei Drittel länger ist als in den Versuchen mit den Wanderhindernissen. Dieses Phänomen deutet darauf hin, daß Mühlkoppfen auf kurzen Abschnitten etwas höhere Fließgeschwindigkeiten tolerieren als auf längeren Strecken.

Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit v_s über der Bodenschwelle werden die unteren Größenklassen von der Strömung herausselektiert, während die größeren Tiere noch stand halten können (Abb. 3.3.4.3.2). Bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von $v_s = 1,25$ m/s sind an der Aufwärtsbewegung nur die Fische mit einer Körperlänge ≥ 9 cm beteiligt (Abb. 3.3.4.3.3). Auch hier ist der quantitative Verlauf mit den Ergebnissen aus den Strömungsversuchen vergleichbar (Abb. 3.3.1.3).

Die Größenselektion entlang des Strömungsgradienten wird durch die mittleren Totallängen (95% Konfidenzintervall) nochmals bestätigt (Abb. 3.3.4.3.4).

Die kumulierten Häufigkeiten des stückbezogenen Wanderungserfolges ergeben bei einer Fließgeschwindigkeit von $v_s \leq 0,5$ m/s die geforderte Erfolgsquote von ca. 70% (Abb. 3.3.4.3.5). Dabei muß jedoch beachtet werden, daß es sich bei diesen Versuchsanordnungen um „short distance“-Tests handelt (s. oben).

→FAZIT:

Die tolerierbare Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser einer Bodenschwelle sollte innerhalb kurzer, kleinräumiger Wanderstrecken den Eckwert von $v_s = 0,75$ m/s nicht überschreiten. Bei längeren Wanderdistanzen oberhalb der Schwelle sollte der zu akzeptierende Richtwert im Bereich $v_s \leq 0,5$ m/s liegen. Lange „Spurstrecken“ können durch eine kleinräumige Strukturierung, rauhe Bauweise und Einsatz von Bodensubstrat verkürzt werden.

Tab. 3.3.4.3.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle [m/s]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm)											
	[m/s]	0,25	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75	1,0	1,0	1,25	1,25	1,25
erfolgreich aufwärts gewandert:												
Stück [n]		109	94	86	98	90	94	75	68	28	27	31
Stück [%]		63,0	54,7	50,0	57,0	52,6	55,0	43,9	39,8	16,4	15,8	18,1
Biomasse [g]		1440	1093	1034	1153	1061	1121	991	948	466	457	456
Biomasse [%]		58,5	44,4	42,0	47,1	43,4	45,8	40,5	38,7	19,0	18,7	18,6
Länge Minimum [cm]		7,1	7,5	7,2	7,2	7,2	7,2	8,4	8,3	9,3	8,5	9,3
Länge Maximum [cm]		12,7	12,7	12,7	13,4	12,7	12,6	12,7	12,7	12,8	12,8	12,7
Gewicht Minimum [g]		3	4	3	3	3	3	5	5	8	6	8
Gewicht Maximum [g]		30	30	30	32	28	29	29	29	29	28	28

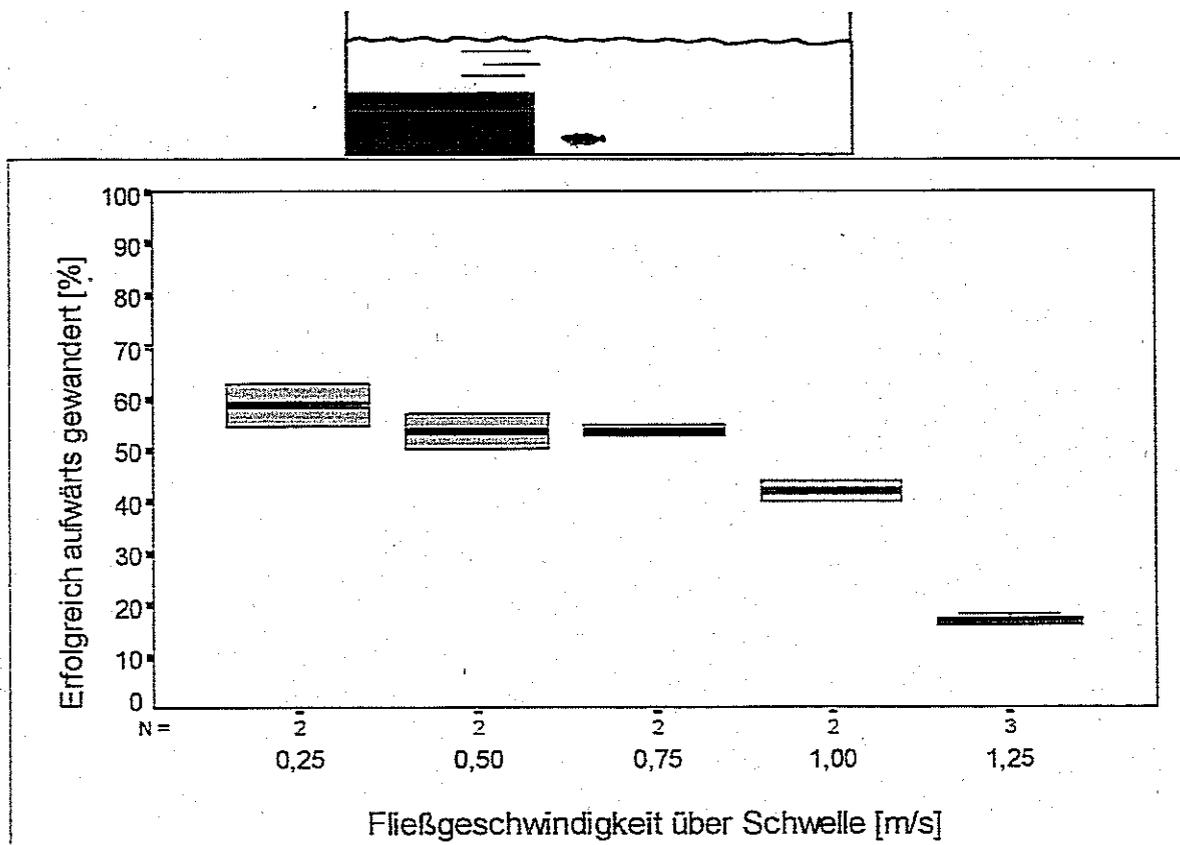


Abb. 3.3.4.3.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

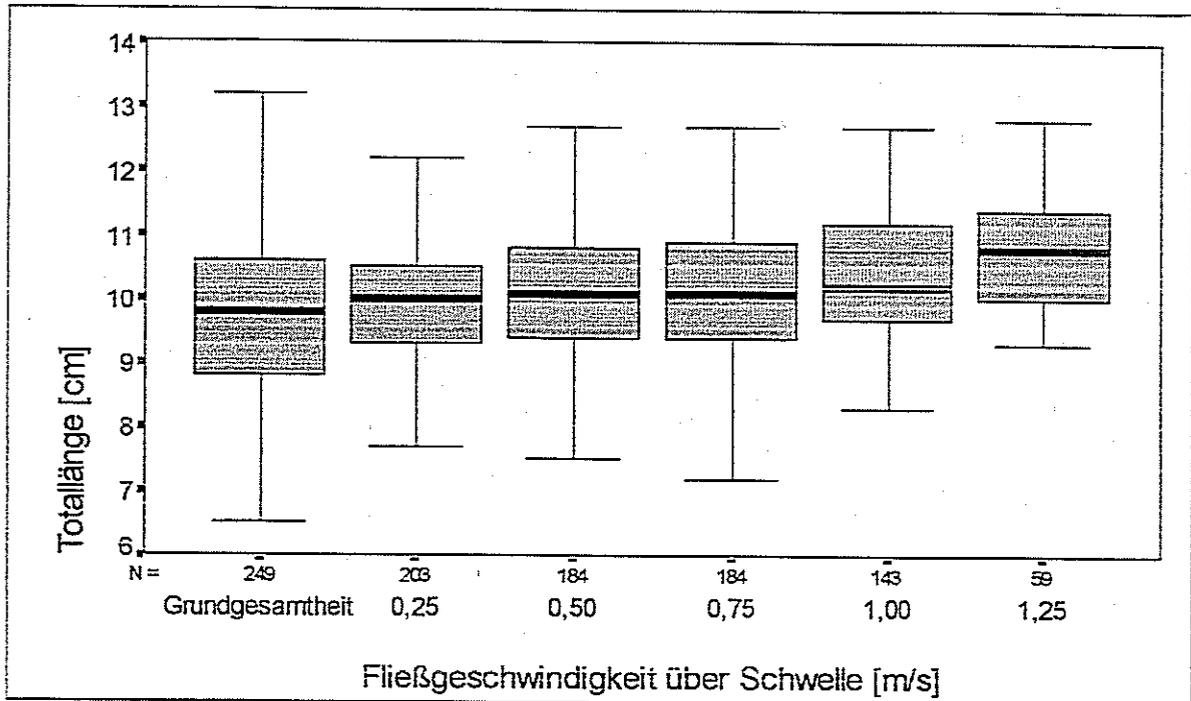


Abb. 3.3.4.3.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

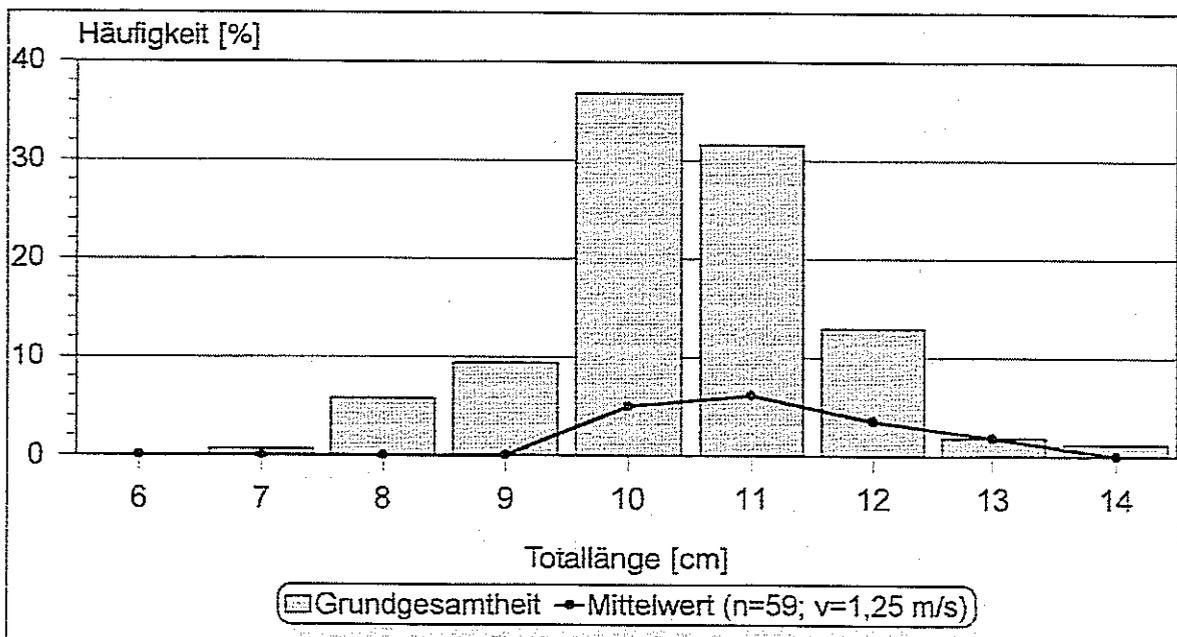


Abb. 3.3.4.3.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,25 m/s über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm].

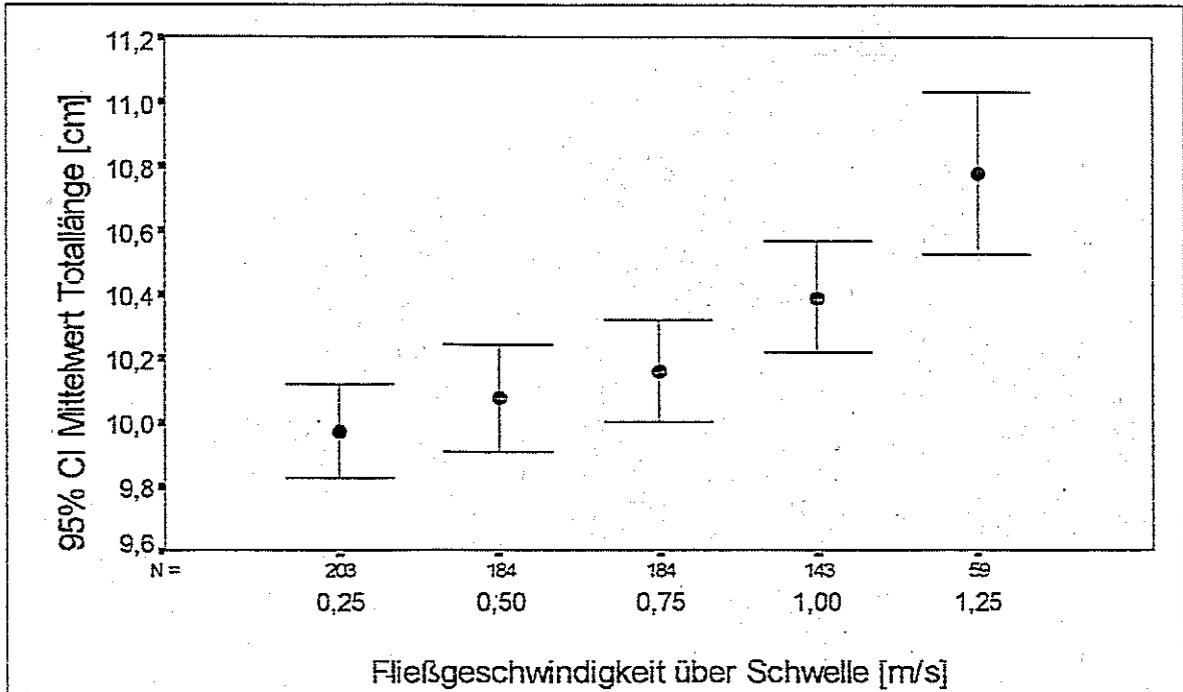


Abb. 3.3.4.3.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

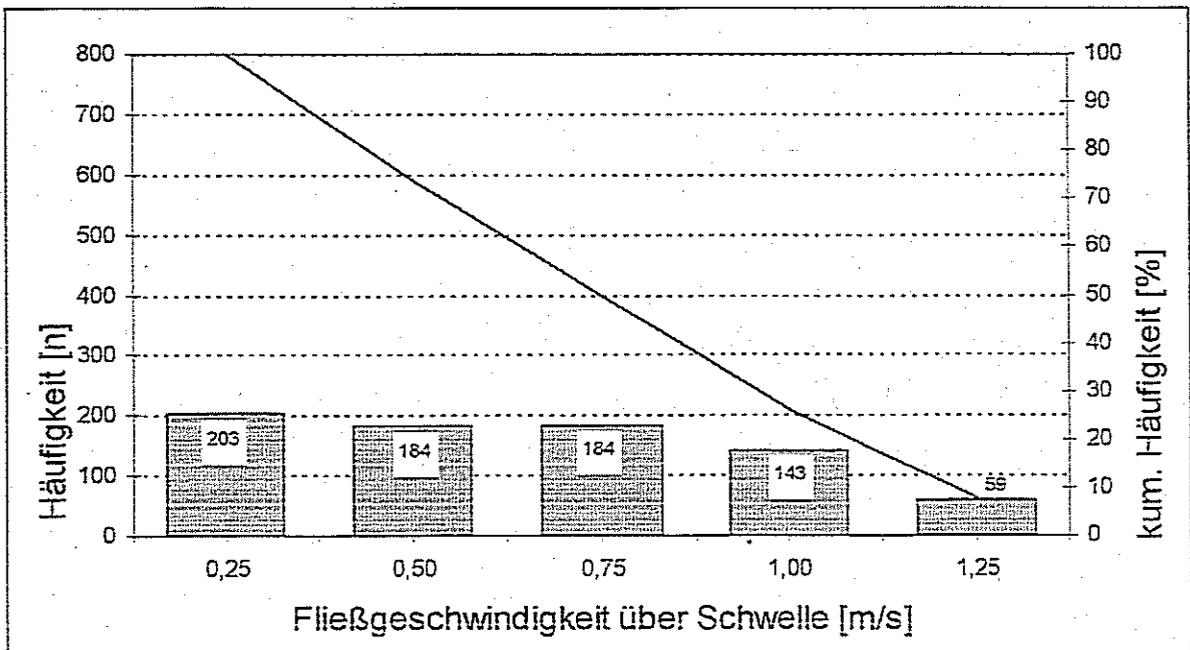


Abb. 3.3.4.3.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.5 „Absturz“ (Δh)

Besonders gravierend auf das Wanderverhalten der Mühlkoppe wirkt sich die Präsenz eines Absturzes mit freiem Fall des Wassers aus. Bei einem konstanten Wasserpegel von 10 cm im Unterwasser bzw. 8 cm im Oberwasser sinkt der Wanderungserfolg rapide mit zunehmender Fallhöhe des Wassers am Absturz, wobei schon eine Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von nur $\Delta h = 5$ cm eine Erfolgsrate von lediglich etwas über 20% erbringt (Tab. 3.3.5.1, Abb. 3.3.5.1).

Die Individuallängen der gewanderten Fische steigen mit zunehmender Absturzhöhe (Abb. 3.3.5.4). Konkret bedeutet dies, daß größere Höhendifferenzen von den kleineren und schwächeren Individuen (meist Weibchen) nicht mehr überwunden werden können. Die ganz großen und oftmals auf Grund ihrer massiven Körperform „bulligen“ Männchen mit hohen Strömungswiderstandsbeiwerten können aber den Absturz auch nicht bewältigen, sondern nur noch diejenigen Exemplare, die ein optimiertes Verhältnis zwischen Körperkraft und Strömungswiderstand aufweisen.

Sowohl die unteren (kleine Exemplare) als auch die oberen (ganz große Exemplare) Größenklassen haben dieses optimierte Verhältnis nicht und können folglich den Absturz nicht überwinden (Abb. 3.3.5.2). In quantitativer Weise ist der Anteil der jeweiligen gewanderten Größenklasse an der potentiell möglichen, d. h. derjenigen die wandern könnte; bei einer Fallhöhe von 12,5 cm verschwindend gering (Abb. 3.3.5.3).

Schon bei einer Fallhöhe von $\Delta h = 5$ cm werden alleine knapp 60% der auf die Stückzahl bezogenen Erfolgsquote erreicht (Abb. 3.3.5.5). Bei einer Erhöhung der Fallhöhe auf $\Delta h = 7,5$ cm erreichen nur noch etwas über 40 % (kumuliert) der Mühlkoppen das Oberwasser. Steigende Fallhöhen verringern den kumulierten Zuwachs im Wanderungserfolg beträchtlich. Deshalb sollte bei einer geforderten Erfolgsquote von 70% eine Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von $\Delta h = 5$ cm als Maximalgrenze möglichst nicht oder aber nur unwesentlich überschritten werden.

→ FAZIT:

In einem Fließgewässer mit einem Vorkommen der Mühlkoppe sollte ein Absturz mit abgelöstem Wasserstrahl gänzlich vermieden werden!

Ist ein bestehender aber nicht zu beseitigen oder substituierbar darf die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser den Richtwert von $\Delta h = 5$ cm nicht wesentlich überschreiten. Gleichzeitig sollten dieselben Randbedingungen wie im Falle der Bodenschwelle erfüllt sein (maximale Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser: $v_A \leq 0,25$ m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Unter- und Oberwasser: mindestens $10 \text{ cm} \leq t_A \leq 20 \text{ cm}$).

Tab. 3.3.5.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm)												
	[cm]	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5
erfolgreich aufwärts gewandert:													
Stück [n]		12	40	62	22	11	31	4	4	4	1	5	1
Stück [%]		6.9	23.1	35.8	12.7	6.4	17.9	2.3	2.3	2.3	0.6	2.9	0.6
Biomasse [g]		121	464	715	265	133	371	41	49	51	12	61	14
Biomasse [%]		4.9	18.7	28.9	10.7	5.4	15.0	1.7	2.0	2.1	0.5	2.5	0.6
Länge Minimum [cm]		7.6	7.6	7.5	8.6	7.7	7.8	9.5	10.3	9.5	10.2	9.8	11.1
Länge Maximum [cm]		11.3	12.5	12.5	11.9	12.2	12.6	10.7	11.1	11.8	10.2	11.2	11.1
Gewicht Minimum [g]		4	4	3	6	4	4	8	11	8	12	9	14
Gewicht Maximum [g]		16	29	28	19	24	27	12	15	16	12	14	14

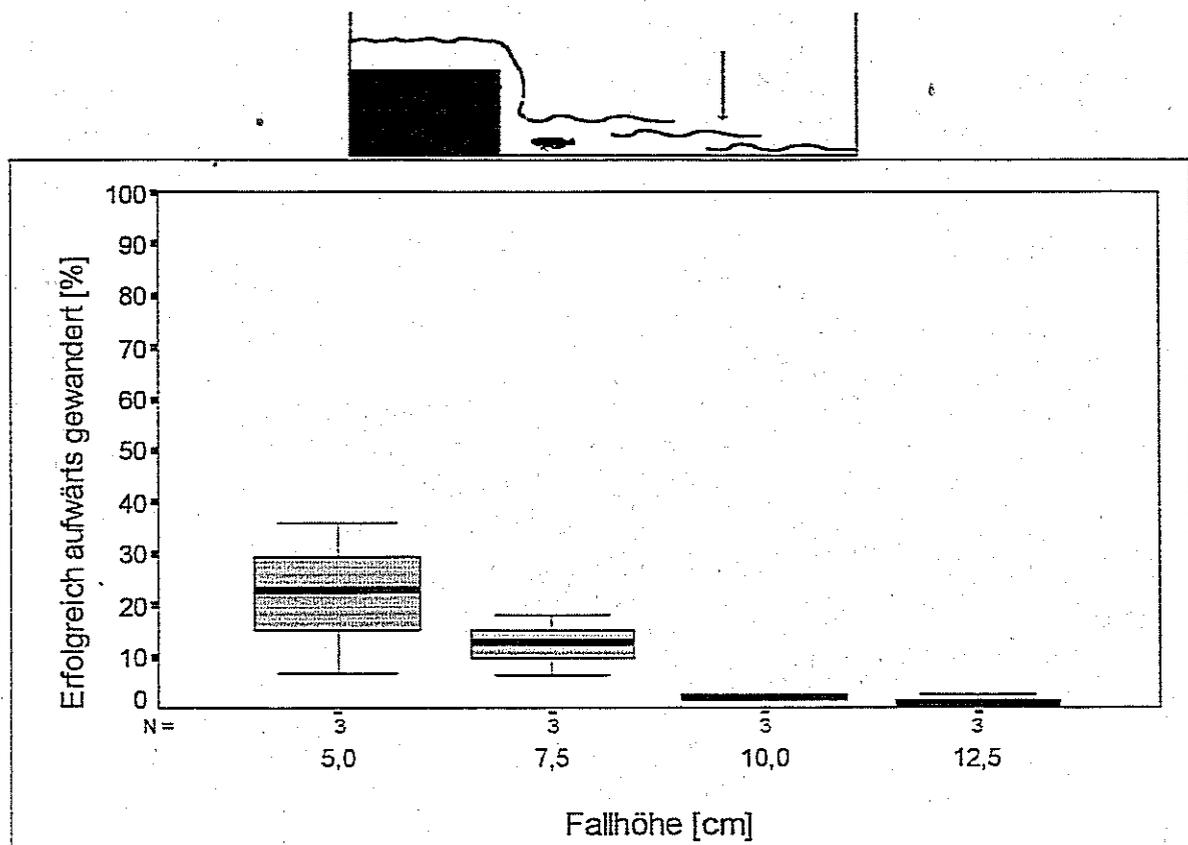


Abb. 3.3.5.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

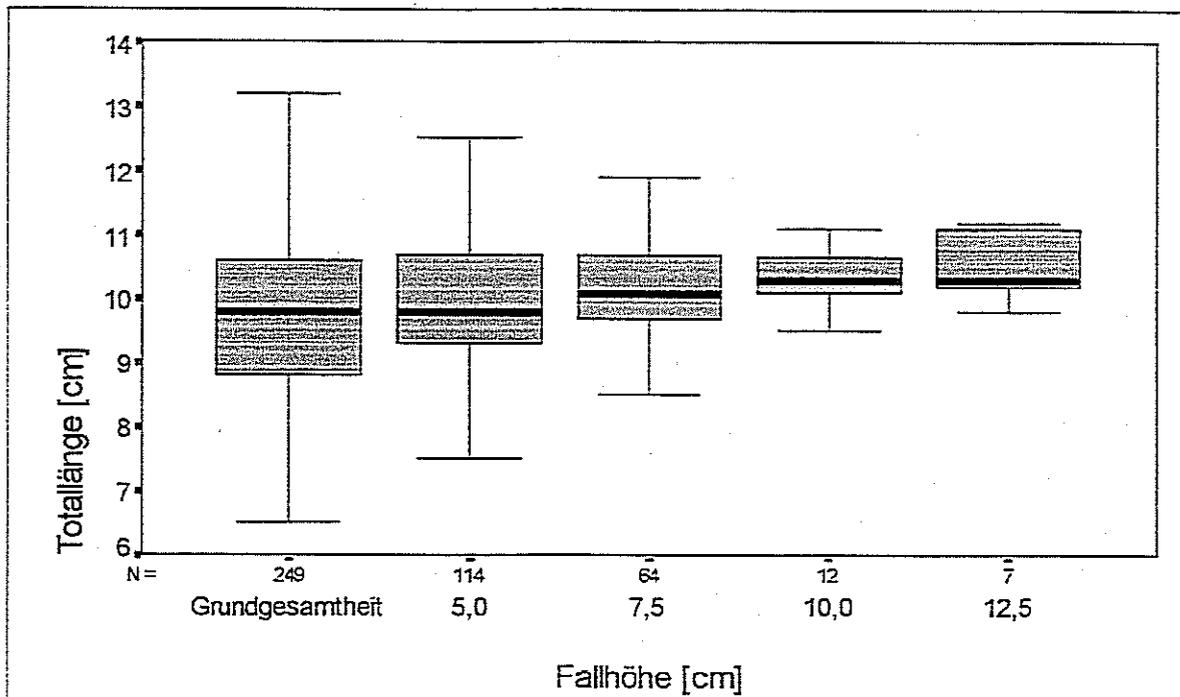


Abb. 3.3.5.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

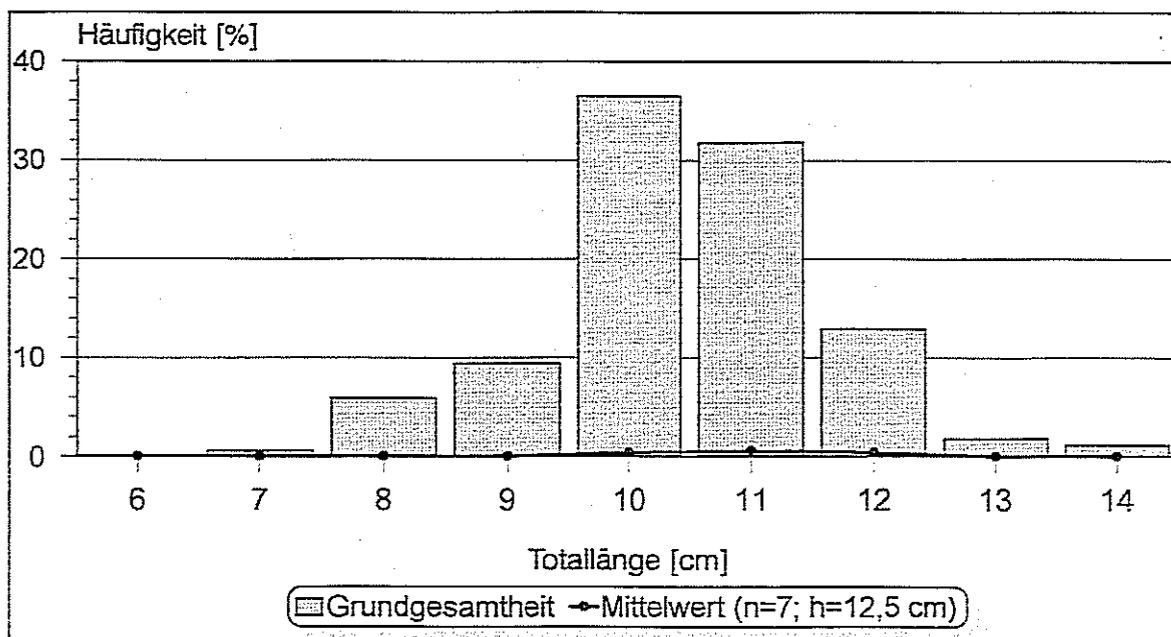


Abb. 3.3.5.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei einer maximalen Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von 12,5 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm].

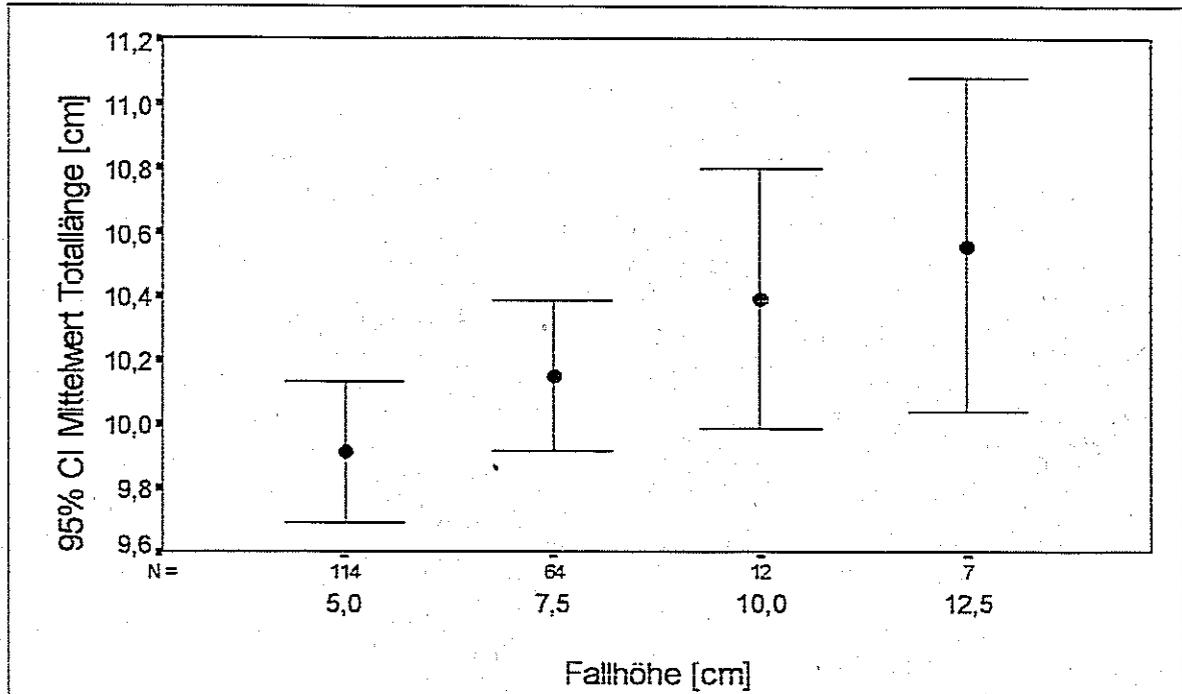


Abb. 3.3.5.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

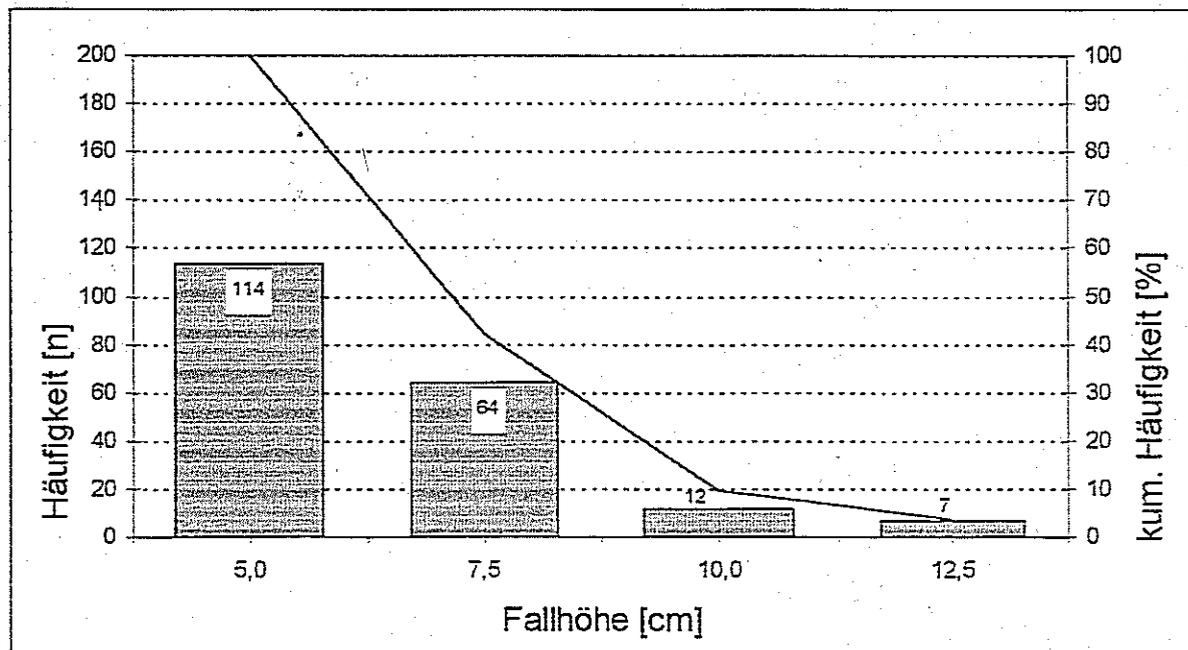


Abb. 3.3.5.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.3.6 „Verrohrung“



Unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände oder Befüllungsgrade in einer Verrohrung wirken auf wandernde Mühlkoppen stark segregierend. Während die Wanderungsrate in einer Verrohrung mit gefülltem Querschnitt entlang eines Strömungsgradienten kontinuierlich von knapp 50% auf ca. 10% abfällt, verringert sich die Erfolgsquote in einer Verrohrung mit halbem Wasserstand schlagartig schon im Fließgeschwindigkeitsbereich $v \leq 0,5$ m/s von 40% auf etwa 11% (Tab. 3.3.6.1, Abb. 3.3.6.1). Die vergleichende Darstellung der Ergebnisse aus Versuchen mit der Fließrinne (ohne Wanderhindernisse, ohne Substratauflage, bei gleicher Fließgeschwindigkeit) und einer Verrohrung mit vollem Wasserstand macht die negative Auswirkung der Verrohrung auf den Migrationserfolg der Mühlkoppe deutlich (Abb. 3.3.6.2). Im Fließgeschwindigkeitsbereich zwischen $v = 0,1$ m/s und $v = 0,75$ m/s bestehen große quantitative Unterschiede im stückbezogenen Wanderungserfolg, aber nicht in der Art der Abnahme der jeweiligen Erfolgsraten. Bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,9$ m/s scheint die Strömung der alleinige migrationslimitierende Parameter zu sein, da sich die Ergebnisse in quantitativer Hinsicht dann wieder stark ähneln.

Hinsichtlich der Beteiligung der verschiedenen Größenklassen an der Aufwärtsbewegung läßt sich feststellen, daß sowohl bei halbem aber auch bei vollem Wasserstand in der Verrohrung eine gewisse Größenselektion mit fortschreitender Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit zu erkennen ist. Bei hoher Strömung wandern weder die ganz großen noch die ganz kleinen Exemplare aufwärts, sondern diejenigen Individuen mit einer Länge von etwa 10 cm (Abb. 3.3.6.3a, Abb. 3.3.6.3b). Bei vollem Wasserstand migrieren die diversen Größenklassen proportional ihrer Präsenz in der Grundgesamtheit, bei halbem Wasserstand ist eine leichte Verschiebung zu den etwas größeren Tieren mit einer Totallänge von ca. 11 cm zu erkennen (Abb. 3.3.6.4a, Abb. 3.3.6.4b). Quantitativ gesehen findet eine Aufwärtsbewegung in beiden Fällen aber nur in Bruchteilen der potentiell möglichen statt.

Die Darstellung der mittleren Längen der Versuchsfische (95% Konfidenzintervall) verdeutlicht ebenfalls den Einfluß der Strömung bei der Durchwanderung der Verrohrung. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten von $v \geq 0,75$ m/s fallen die Exemplare der oberen Größenklassen aus dem Pool der Erfolgsquote heraus (Abb. 3.3.6.5b). Im Bereich bis zu

$v = 0,5$ m/s verhalten sich die mittleren Längen der Versuchsfische bei halber und voller Verrohrung analog (Abb. 3.3.6.5a).

Bei halbem Wasserstand wandern etwas mehr als 70% der Mühlkoppen durch die Verrohrung, vorausgesetzt die Strömungsgeschwindigkeit liegt bei $v = 0,1$ m/s (Abb. 3.3.6.6a). 70% der Fische durchschwimmen die Verrohrung bei vollem Wasserstand unter den getesteten Substrat- bzw. Rauigkeitsbedingungen bis zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit von $v \leq 0,5$ m/s (Abb. 3.3.6.6b).

→ **FAZIT:**

Da sich gezeigt hat, daß unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände (Befüllungsgrade) in einer Verrohrung auf wandernde Mühlkoppen stark segregierend wirken können, wird dafür plädiert, Verrohrungen durch Überbrückungen zu substituieren.

Ist dies nicht möglich, sollte der Wasserstand in einer Verrohrung immer möglichst hoch sein. Ein maximaler Befüllungsgrad ist unter Beachtung der technischen Kapazitätsreserven für Maximalabflüsse jederzeit anzustreben.

Hohe Fließgeschwindigkeiten in einer Verrohrung vermindern äußerst effizient den Wanderungserfolg bei Mühlkoppen. Deshalb sollten die noch tolerierbaren Strömungsgeschwindigkeiten bei halbem Wasserstand in der Verrohrung $v = 0,1$ m/s und bei vollem Wasserstand $v = 0,5$ m/s nicht übersteigen.

Ein Ausbringen von möglichst grobem Bodensubstrat verringert die Fließgeschwindigkeit direkt über der Sohle und ermöglicht aufwanderungswilligen Mühlkoppen die Migration durch den Porenraum des Substrates.

Tab. 3.3.6.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/Mächtigkeit der Wassersäule [cm]/Verrohrung“													
	[m/s]	0,1*	0,1*	0,5*	0,5*	0,1**	0,1**	0,1**	0,5**	0,5**	0,75**	0,75**	0,9**	0,9*
erfolgreich aufwärts gewandert:														
Stück [n]		76	80	22	24	49	92	89	76	81	53	52	20	20
Stück [%]		38,8	41,0	11,3	12,5	25,7	48,4	48,4	40,4	43,3	28,3	28,1	10,8	10,9
Biomasse [g]		896	943	285	307	545	1096	1051	942	1012	667	617	251	215
Biomasse [%]		32,4	34,3	10,5	11,3	20,1	41,0	42,4	35,4	38,0	25,3	23,4	9,5	8,2
Länge Minimum [cm]		7,4	8,0	8,5	8,8	7,7	7,6	7,7	7,5	8,1	8,0	8,6	8,4	8,6
Länge Maximum [cm]		12,6	13,0	11,8	12,3	12,8	12,4	12,6	12,5	12,7	12,2	12,3	12,3	11,9
Gewicht Minimum [g]		3	4	5	7	4	4	4	4	4	4	6	6	6
Gewicht Maximum [g]		24	24	22	22	24	24	24	24	24	23	22	22	21

*Wasserstand in der Verrohrung $\cong 12,5$ cm

**Wasserstand in der Verrohrung $\cong 25$ cm

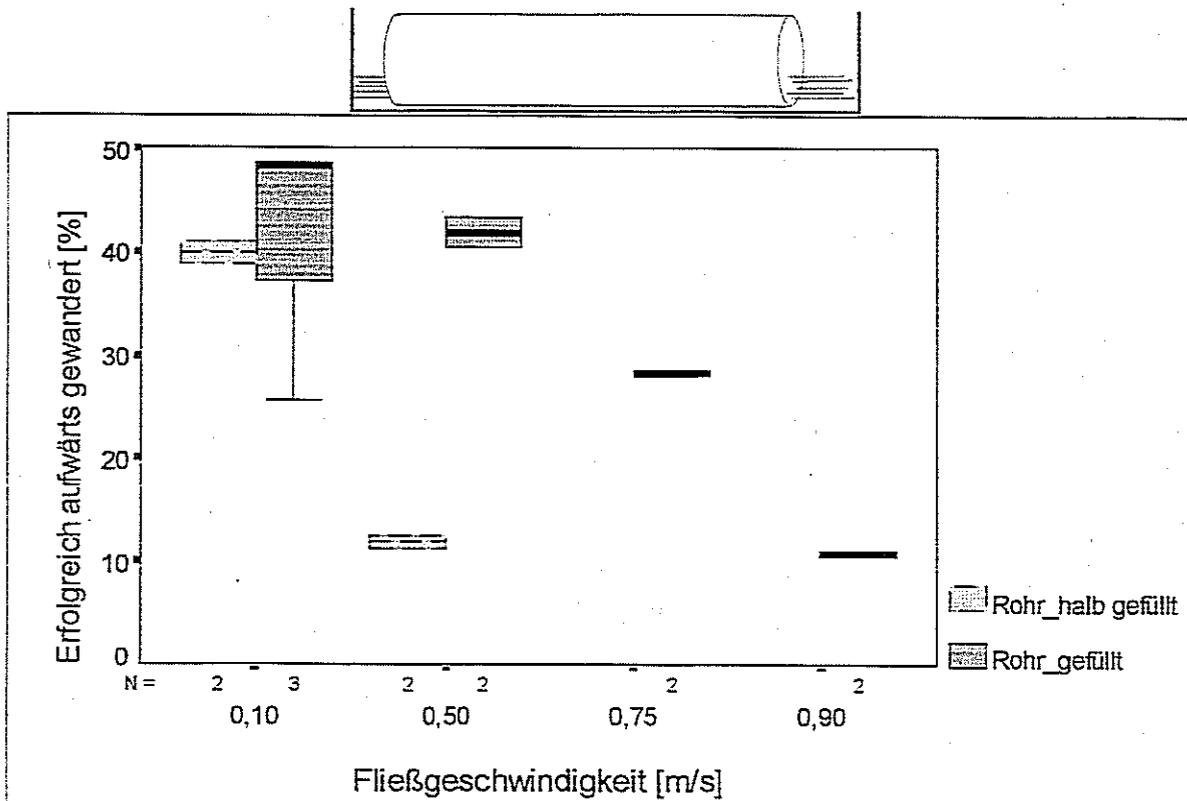


Abb. 3.3.6.1: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

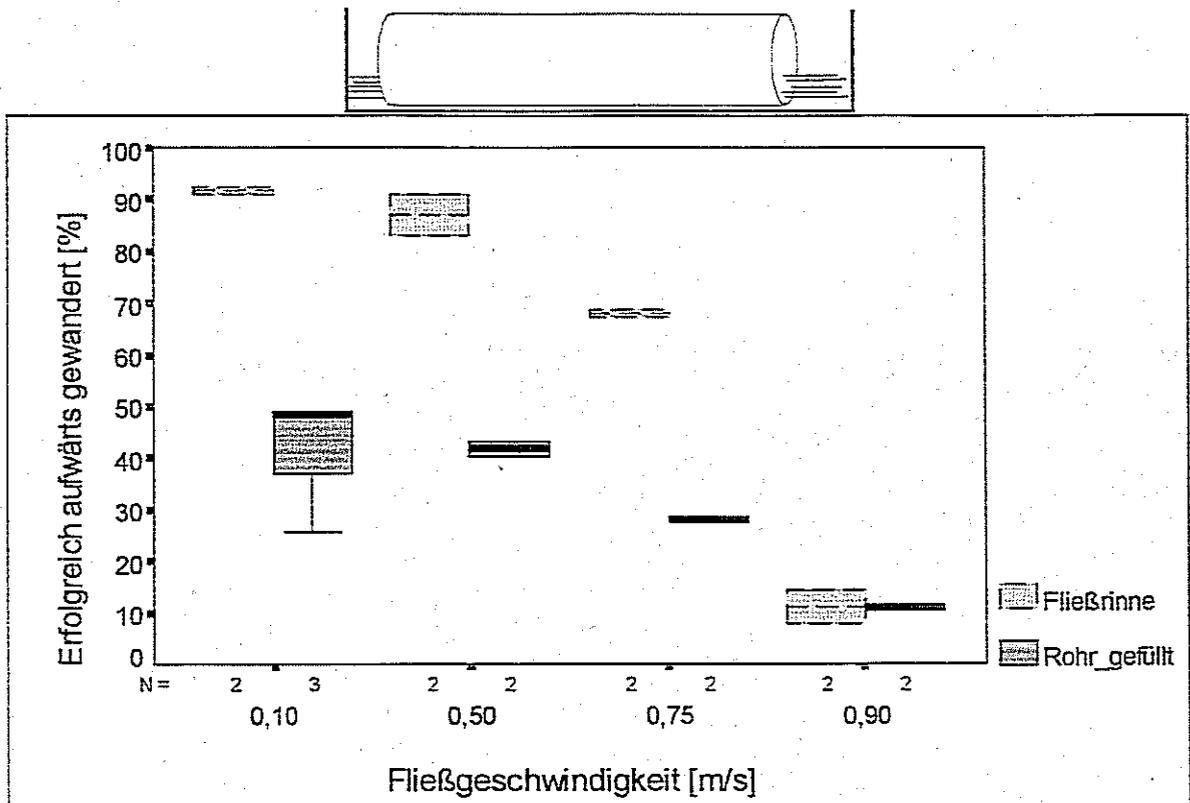


Abb. 3.3.6.2: Relative Aufwärtswanderungen von Mühlkopfen (*Cottus gobio*) in der Fließrinne (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; keine Substratauflage) und in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

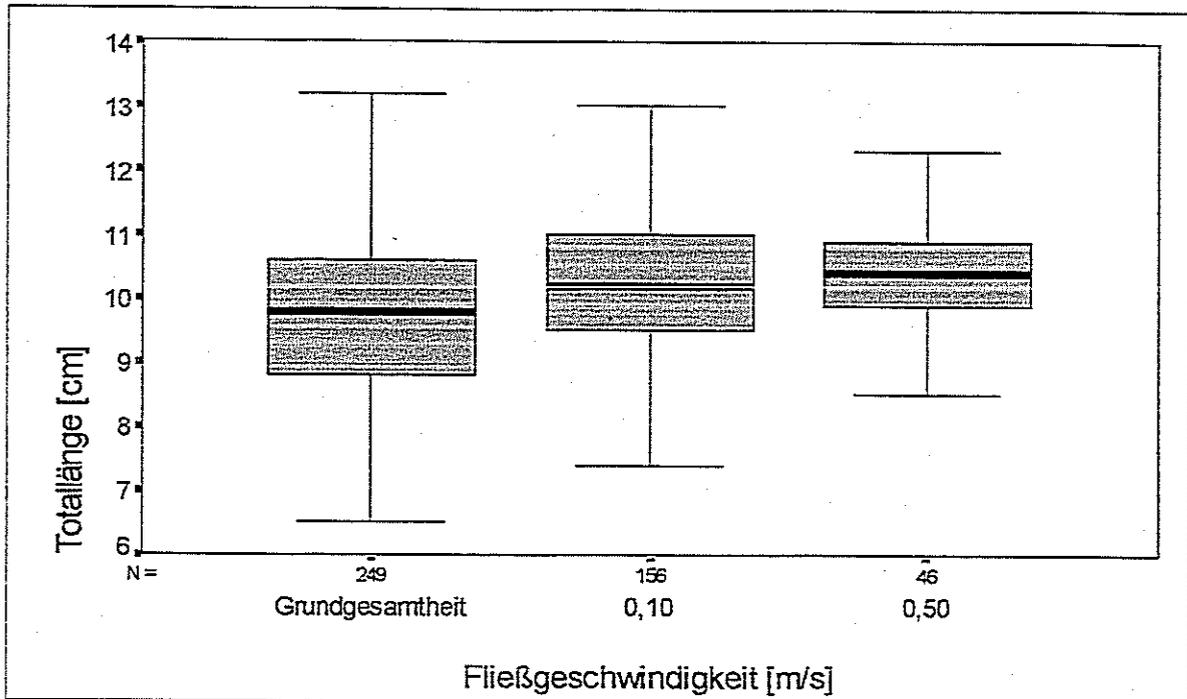


Abb. 3.3.6.3a: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

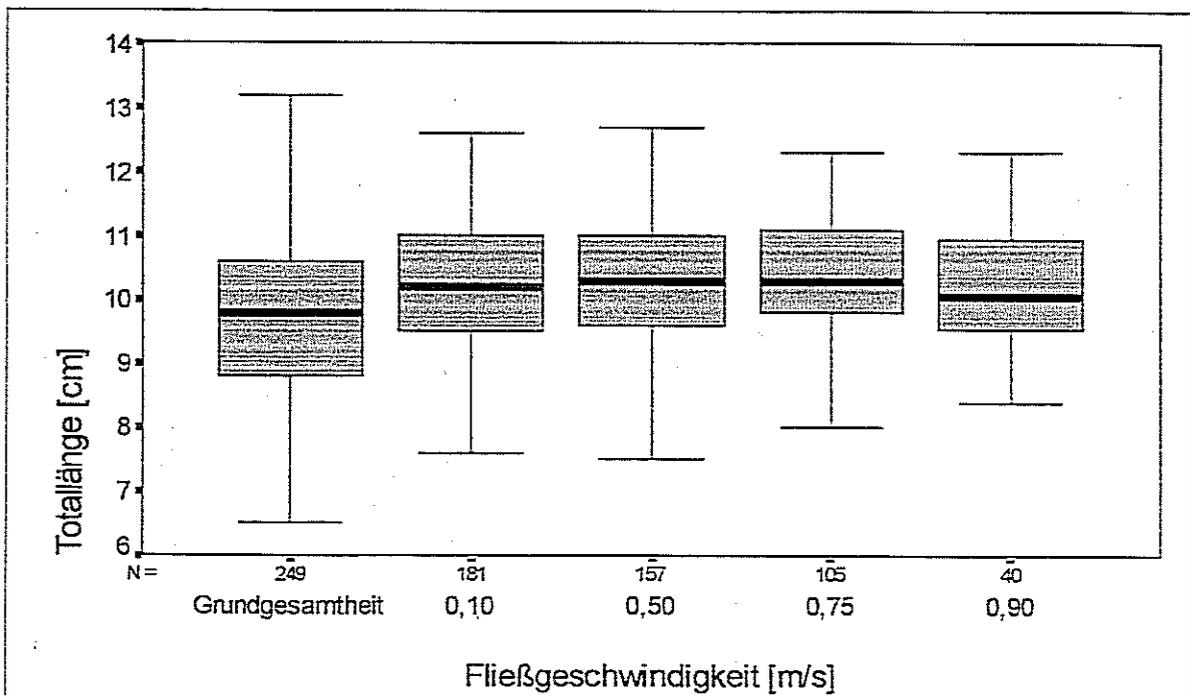


Abb. 3.3.6.3b: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Mühlkopfen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

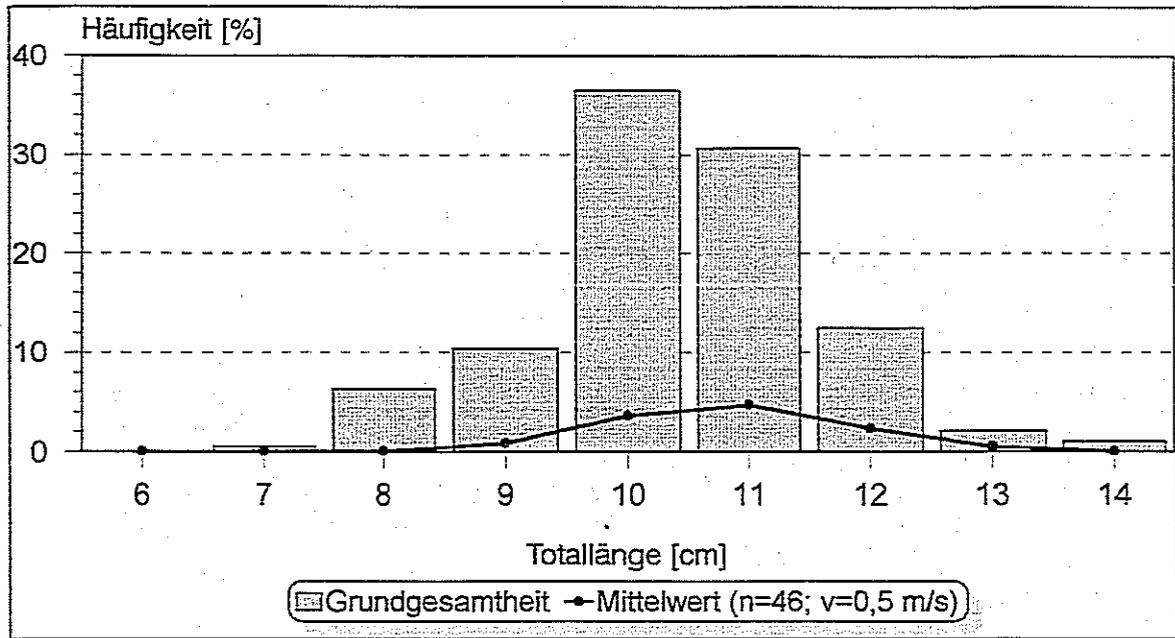


Abb. 3.3.6.4a: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s.

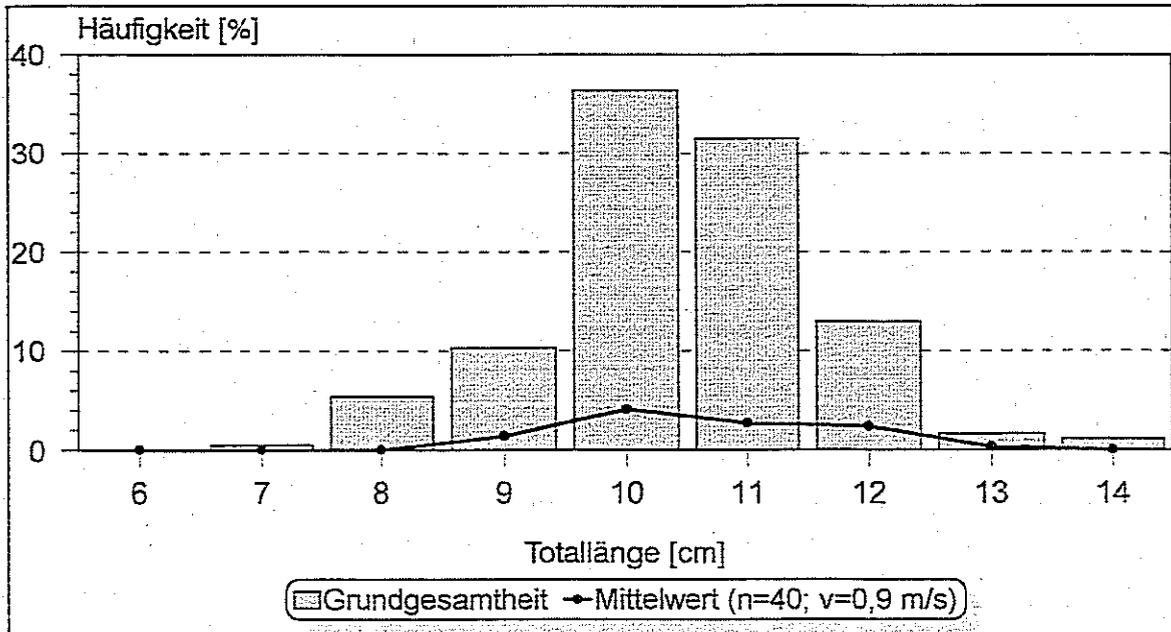


Abb. 3.3.6.4b: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 0,9 m/s.

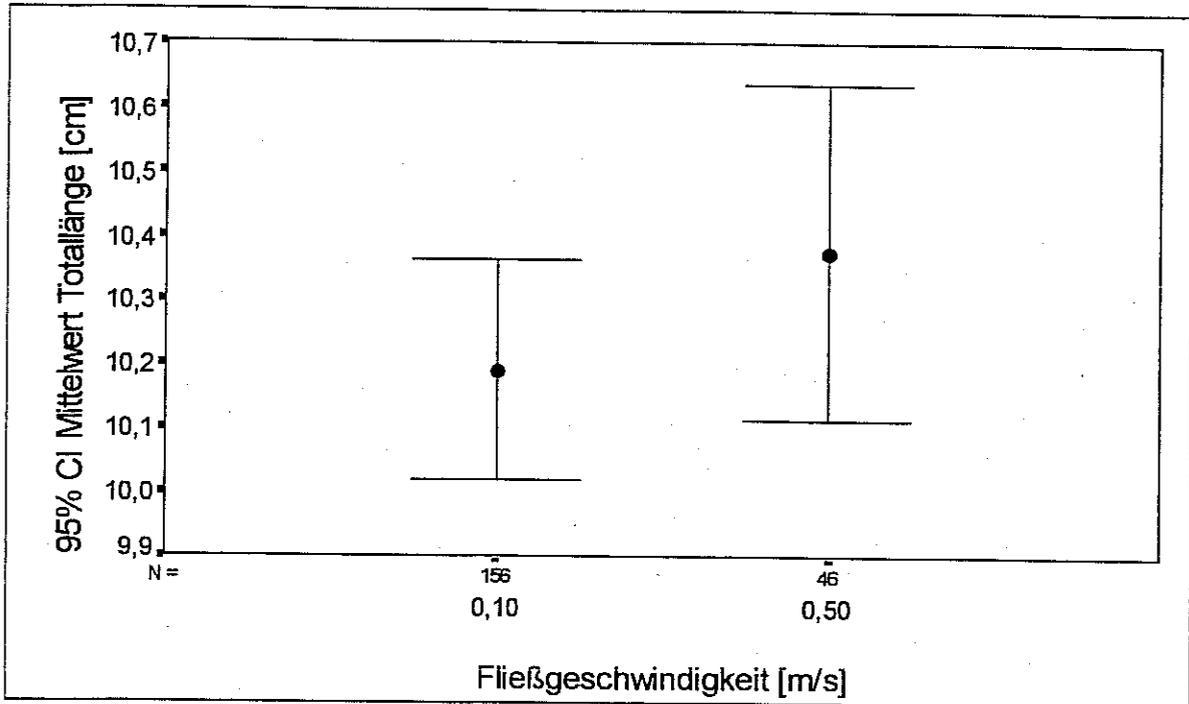


Abb. 3.3.6.5a: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

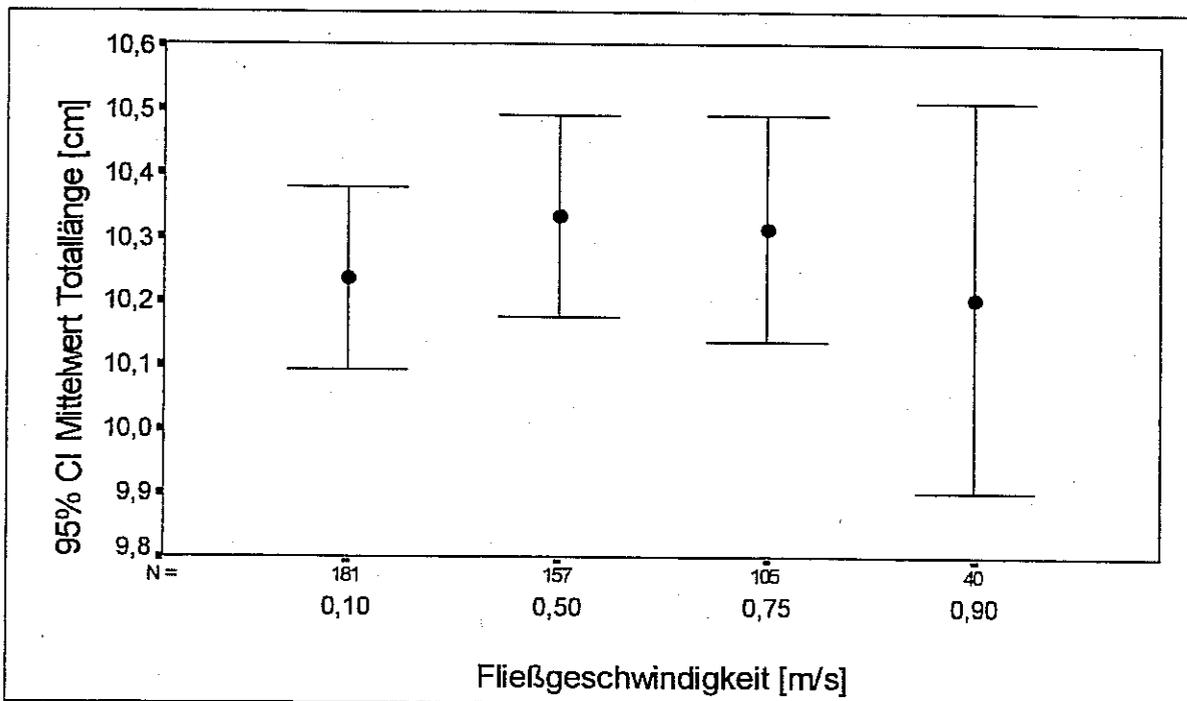


Abb. 3.3.6.5b: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

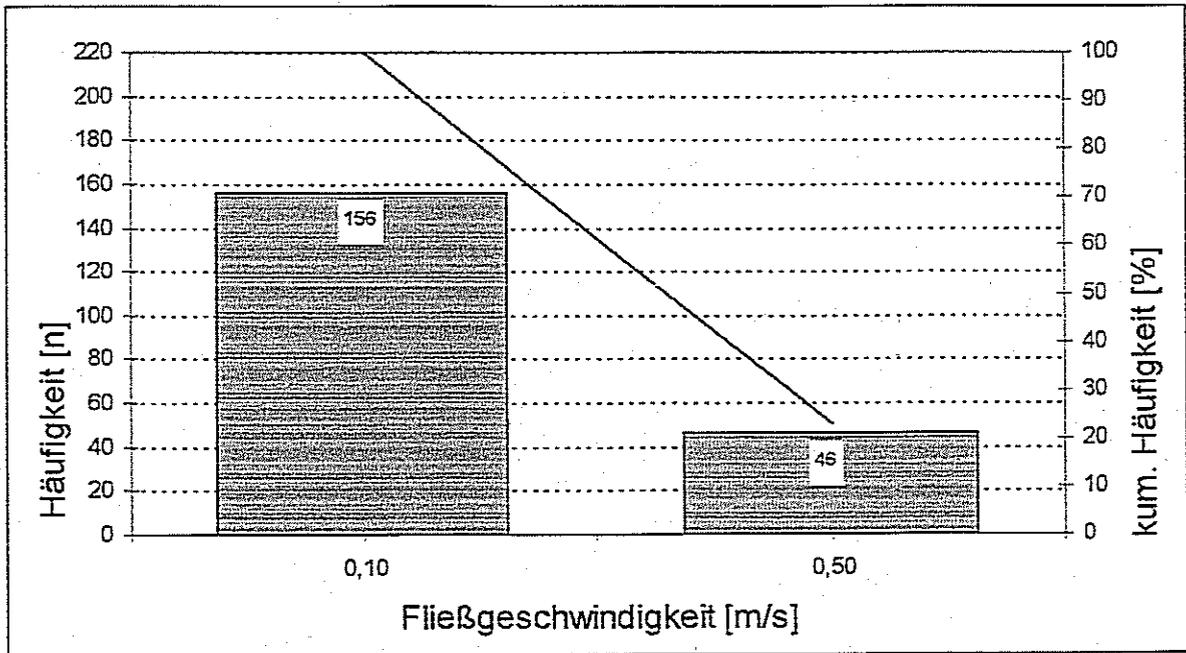


Abb. 3.3.6.6a: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

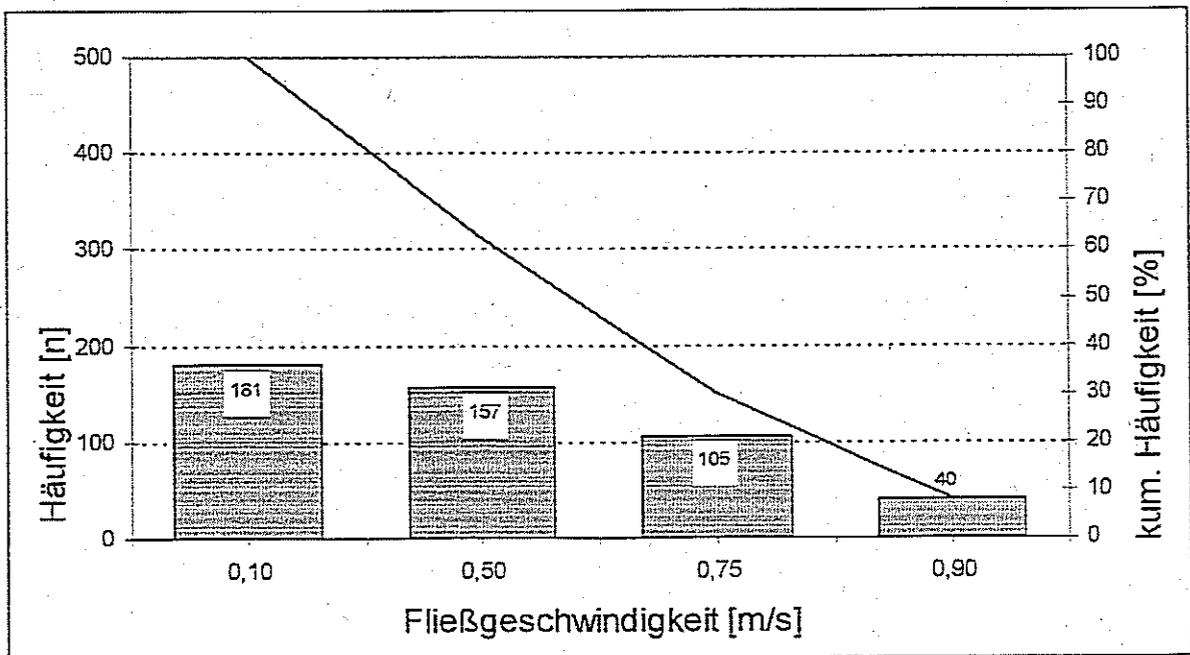
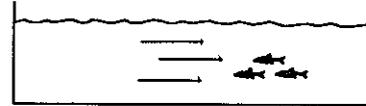


Abb. 3.3.6.6b: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4 Migrationsversuche mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*)

3.4.1 „Strömung“ (v)



Auf Grund einer hohen Sterblichkeit der Versuchsfische mußte bei diesen Versuchsanstellungen mit zwei verschiedenen Chargen von Elritzen gearbeitet werden (Grundgesamtheit I und II). Als Vergleich bzw. Kalibrierung wurde der Aufstiegserfolg beider Chargen bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s gemessen. Sowohl die relative Stückzahl als auch die nach oben gewanderte relative Biomasse orientieren sich nahe am durchschnittlichen Wert von 96,7% (Stück) bzw. 99,1% (Biomasse).

Insgesamt gesehen ergibt sich im Bereich zwischen $v = 0,1$ m/s und $v = 1,7$ m/s ein deutlicher Gradient im Wandererfolg der Elritze entlang der Strömungsachse. Bei Strömungsgeschwindigkeiten bis $v \leq 0,75$ m/s erreichen mehr als 90% der Versuchsfische aus beiden Chargen den oberen Behälter. Wird die Fließgeschwindigkeit darüber hinaus bis auf einen Wert von $v = 1,2$ m/s erhöht, sinkt der Migrationserfolg zuerst stetig, tendiert dann aber bei noch höheren Geschwindigkeiten annähernd gegen Null (Tab. 3.4.1.1a, Tab. 3.4.1.1b, Abb. 3.4.1.1).

Abb. 3.4.1.2 verdeutlicht, daß bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von $v \leq 0,75$ m/s nahezu das gesamte Längenspektrum der Versuchsfische an der Aufwärtsbewegung beteiligt ist. Mit zunehmenden Geschwindigkeiten erhöhen sich deren Medianwerte der Totallängen markant, bei $v \geq 1,5$ m/s wandern fast ausnahmslos nur noch starke, große Exemplare nach oben. Dabei liegen die individuellen Längen im Bereich zwischen 8 cm und 10 cm (Abb. 3.4.1.3). Hier selektiert die Strömung die aufwärts wandernden Fischgrößen.

Ebenso steigt die mittlere Totallänge (95% CI) der nach oben gewanderten Fische entlang des Strömungsgradienten (Abb. 3.4.1.4). Im Bereich von $v \leq 0,9$ m/s liegt die mittlere Totallänge unter 7,5 cm; bei $v \leq 0,75$ m/s streuen die Einzelwerte nur in geringem Maße. Bei $v \geq 0,9$ m/s erweitern sich teilweise die Streubereiche und die mittleren Totallängen steigen bis 9,3 cm an.

Bezüglich der kumulierten Häufigkeiten läßt sich sagen, daß bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von $v \leq 0,5$ m/s etwas über 70% der erfolgreich nach oben gewanderten Elritzen vertreten sind (Abb. 3.4.1.5).

→ FAZIT:

Eine Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von $0,5 \leq v \leq 0,75$ m/s wird für Elritzen als tolerabler Bereich erachtet, in dem sowohl nahezu das gesamte Längenspektrum der Fische nach oben wandern kann als auch eine Migrationsrate von etwa 70% erreicht wird.

Tab. 3.4.1.1a: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) [Grundgesamtheit I] bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)								
	[m/s]	0,5	0,5	0,9	0,9	1,5	1,5	1,7	1,7
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		294	285	197	202	12	8	3	2
Stück [%]		96,4	95,3	63,1	66,0	4,1	2,8	0,9	0,6
Biomasse [g]		837	814	592	470	67	52	23	14
Biomasse [%]		99,2	98,9	68,8	54,8	8,3	6,4	2,6	1,6
Länge Minimum [cm]		4,3	4,3	4,5	4,3	8,0	8,7	9,2	9,3
Länge Maximum [cm]		9,6	9,6	9,6	8,2	9,5	9,6	9,4	9,3
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	4	5	7	7
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	6	8	8	8	7

Tab. 3.4.1.1b: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) [Grundgesamtheit II] bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)								
	[m/s]	0,1	0,1	0,5	0,5	0,75	0,75	1,2	1,2
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		461	460	448	454	438	432	195	182
Stück [%]		99,8	100,0	97,0	98,3	94,6	93,3	42,0	39,3
Biomasse [g]		1635	1627	1613	1619	1607	1591	918	843
Biomasse [%]		99,9	100,0	98,6	99,0	98,0	97,2	56,0	51,4
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	4,5	3,6	4,8	5,2	6,9	7,0
Länge Maximum [cm]		9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1	2	2
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	10	10	10	10	10

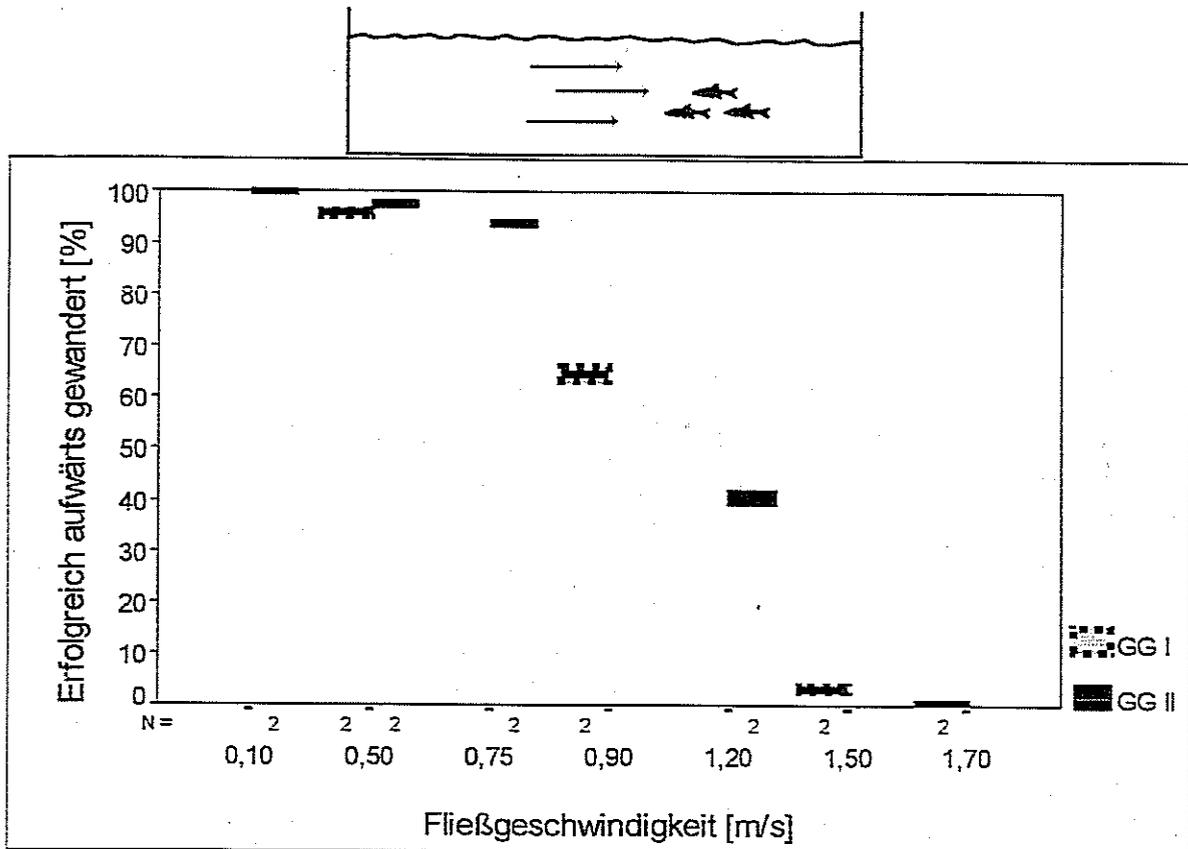


Abb. 3.4.1.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

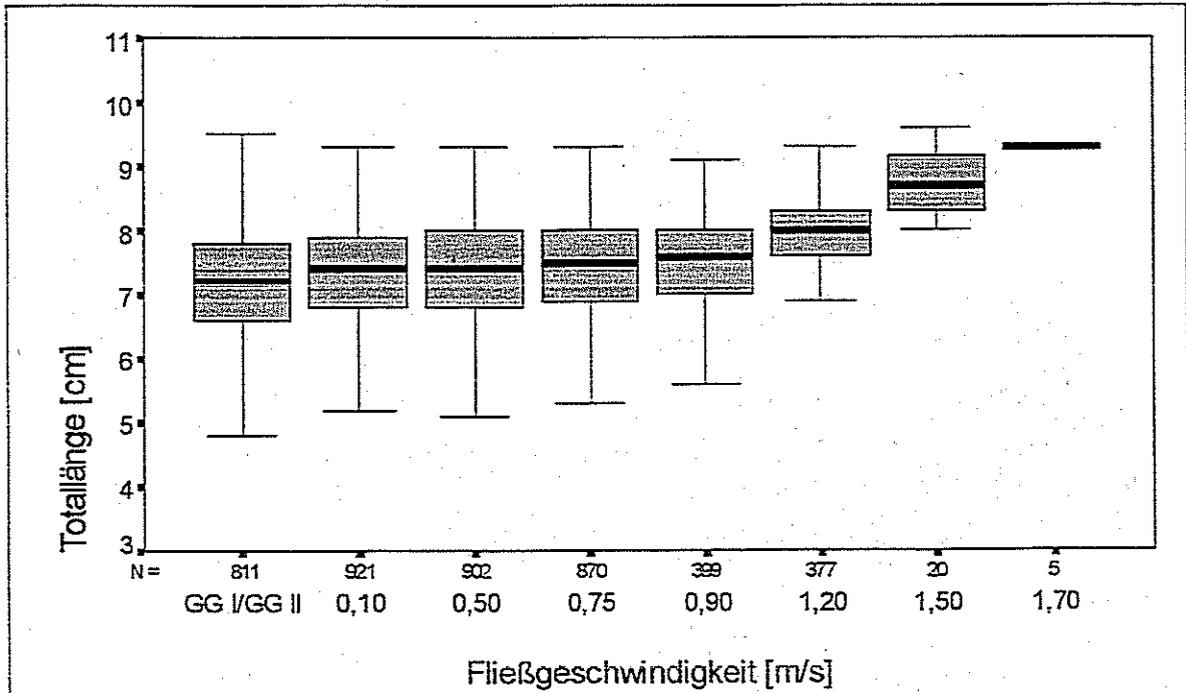


Abb. 3.4.1.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0.25}$, \bar{x} , $x_{0.75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

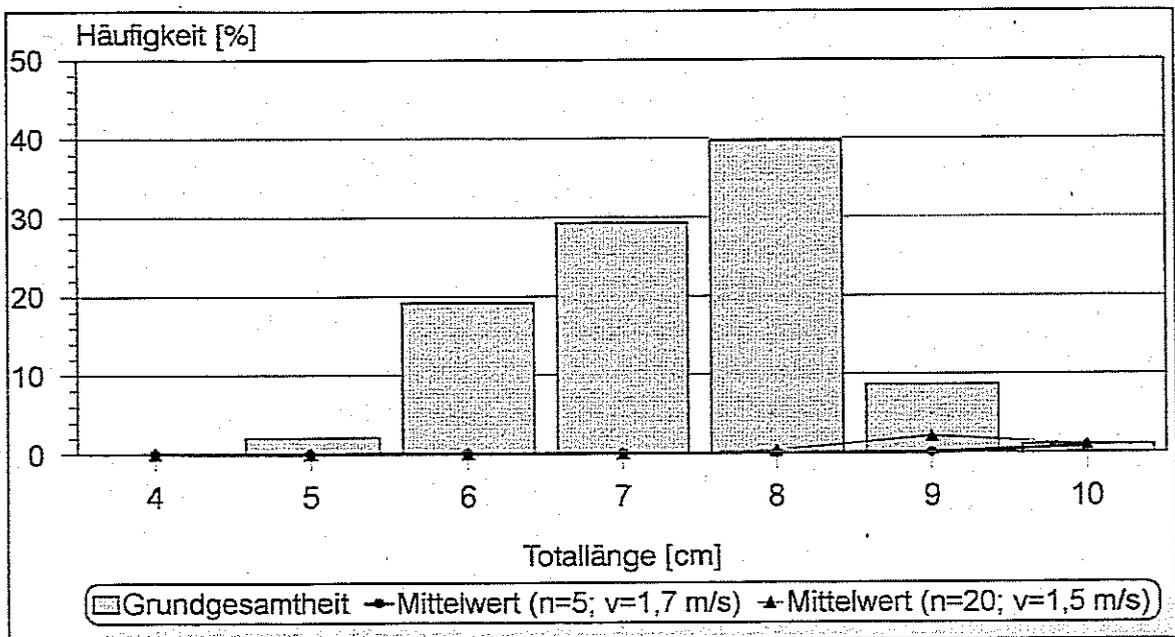


Abb. 3.4.1.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von 1,5 m/s bzw. 1,7 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

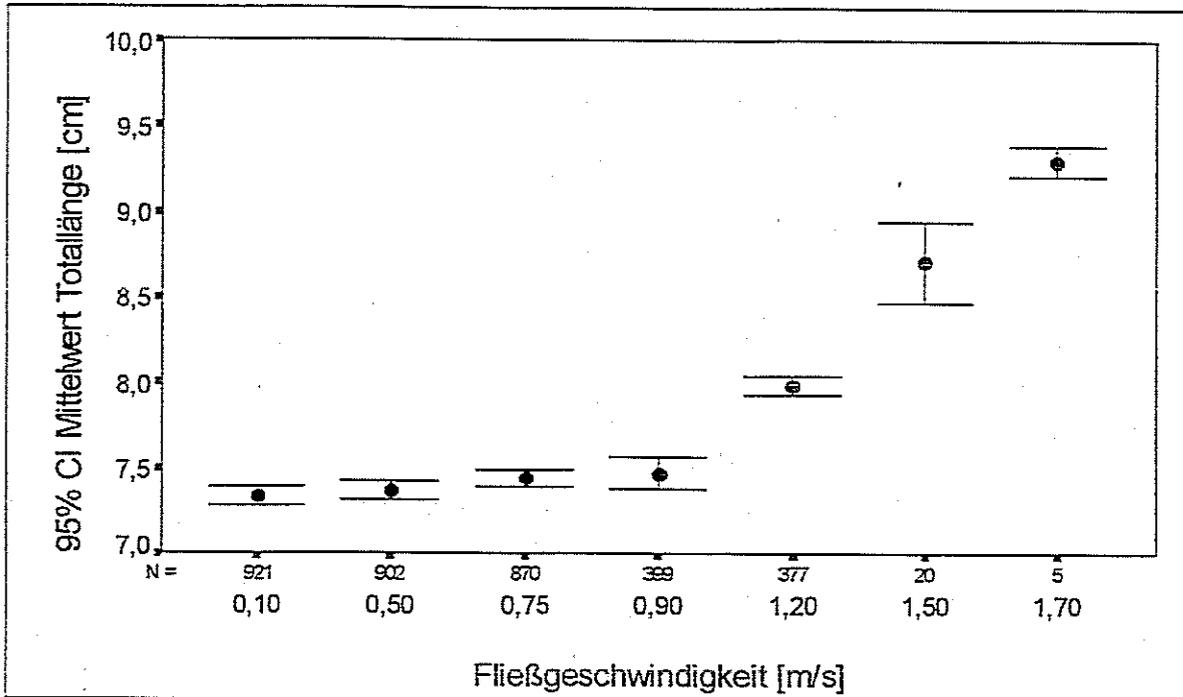


Abb. 3.4.1.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

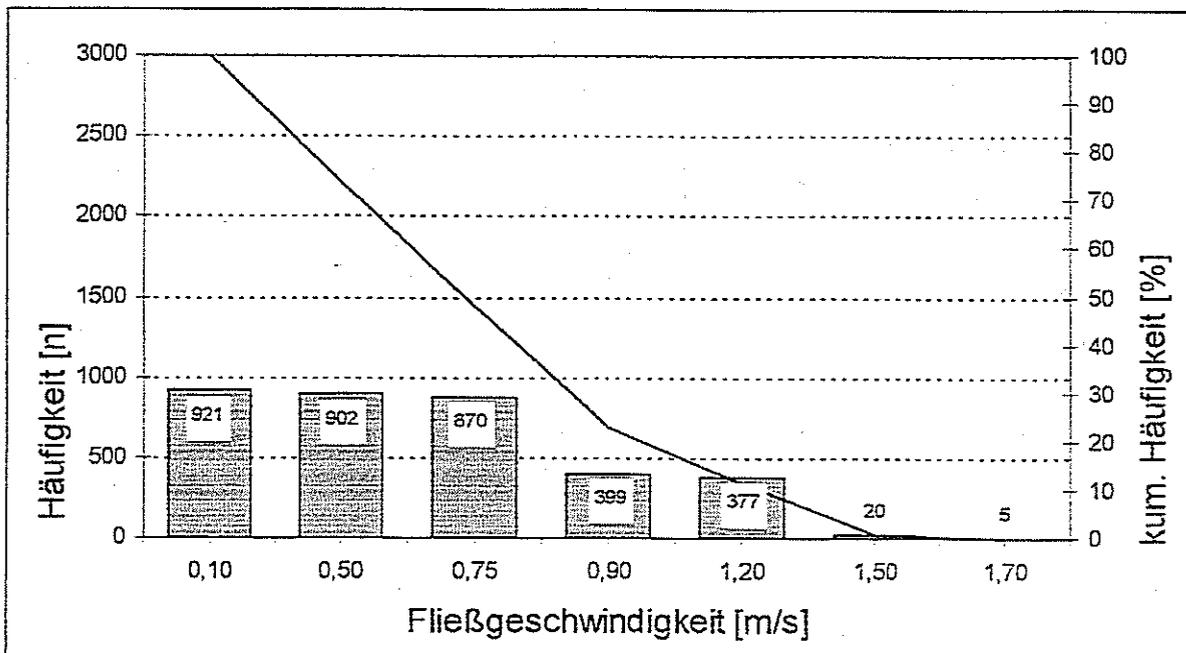
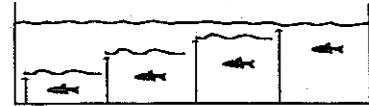


Abb. 3.4.1.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.2 „Wassertiefe“ (Vertikale Mächtigkeit der Wassersäule; t)



Die immerwährende Halbierung in der Mächtigkeit der Wassersäule von anfangs $t = 40$ cm auf $t = 5$ cm führt bei Elritzen zu keiner nennenswerten Abnahme in der nach oben gerichteten Wanderungsrate (Tab. 3.4.2.1, Abb. 3.4.2.1). Diese beträgt hier im Durchschnitt 95,8% (stückbezogen) bzw. 98,2% (Biomasse). Lediglich die Streubreiten nehmen im Bereich einer Wassertiefe zwischen $t = 5$ cm und $t = 10$ cm leicht zu. Erst bei einer nochmaligen Halbierung der Wassersäule auf letztlich $t = 2,5$ cm zeigt sich eine Abnahme auf durchschnittlich 80,4% (stückbezogen) bzw. 86,7% (Biomasse).

Werden die Längenspektren der bei den jeweiligen Wassertiefen gewanderten Elritzen mit ihrer Grundgesamtheit verglichen, fallen bei den medianen, minimalen und maximalen Totallängen keinerlei gravierende Abweichungen von der Norm auf, nur die mediane Totallänge liegt bei einer Mächtigkeit der Wassersäule von $t = 2,5$ cm im Bereich von wenigen Millimetern leicht erhöht vor (Abb. 3.4.2.2). Dies bedeutet generell, daß auch etwas größere Elritzen einen extrem klein ausgebildeten freien Wasserkörper zur Aufwärtsbewegung nutzen können. Die zusätzliche Betrachtung der Längenhäufigkeitsverteilung, gültig für eine Wassertiefe von $t = 2,5$ cm, veranschaulicht, daß alle Längenspektren der gewanderten Elritzen proportional ihrer Präsenz zur Grundgesamtheit an der nach oben gerichteten Migration beteiligt sind, die Exemplare mit einer Totallänge von ca. 10 cm sogar zu annähernd 100% (Abb. 3.4.2.3). Ähnliche Verhältnisse spiegelt auch Abb. 3.4.2.4 wider, aus der hervorgeht, daß bei einer minimalen Wassertiefe von $t = 2,5$ cm auch die durchschnittlich leicht größeren Elritzen noch in der Lage sind, den noch verbliebenen spärlichen Wasserkörper zur Aufwärtswanderung zu nutzen.

Bei den nach oben gewanderten Elritzen ergibt die Abfolge der kumulierten Häufigkeiten ein Erfolgspotential von 70% bei einer Mächtigkeit der Wassersäule im Bereich zwischen $t = 10$ cm und $t = 20$ cm (Abb. 3.4.2.5).

→ FAZIT:

Eine Mächtigkeit der Wassersäule von mindestens $t = 10$ cm (bei gleichzeitig niedriger Fließgeschwindigkeit) stellt für aufwärts wandernde Elritzen keinerlei Hemmnis für eine hohe Migrationsrate innerhalb der untersuchten Größenklassen dar.

Tab. 3.4.2.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20	40	40
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		293	287	352	355	372	358	390	385	405	396
Stück [%]		79,4	81,5	94,4	96,2	93,7	96,0	96,5	96,5	96,7	96,4
Biomasse [g]		1090	1075	1271	1261	1318	1286	1386	1376	1436	1398
Biomasse [%]		87,3	86,1	97,8	97,0	99,9	97,5	98,3	98,0	99,0	98,0
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	4,5	3,6	3,6	3,6	3,6	4,2	3,6	3,6
Länge Maximum [cm]		9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,8	9,8	9,8	9,8
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

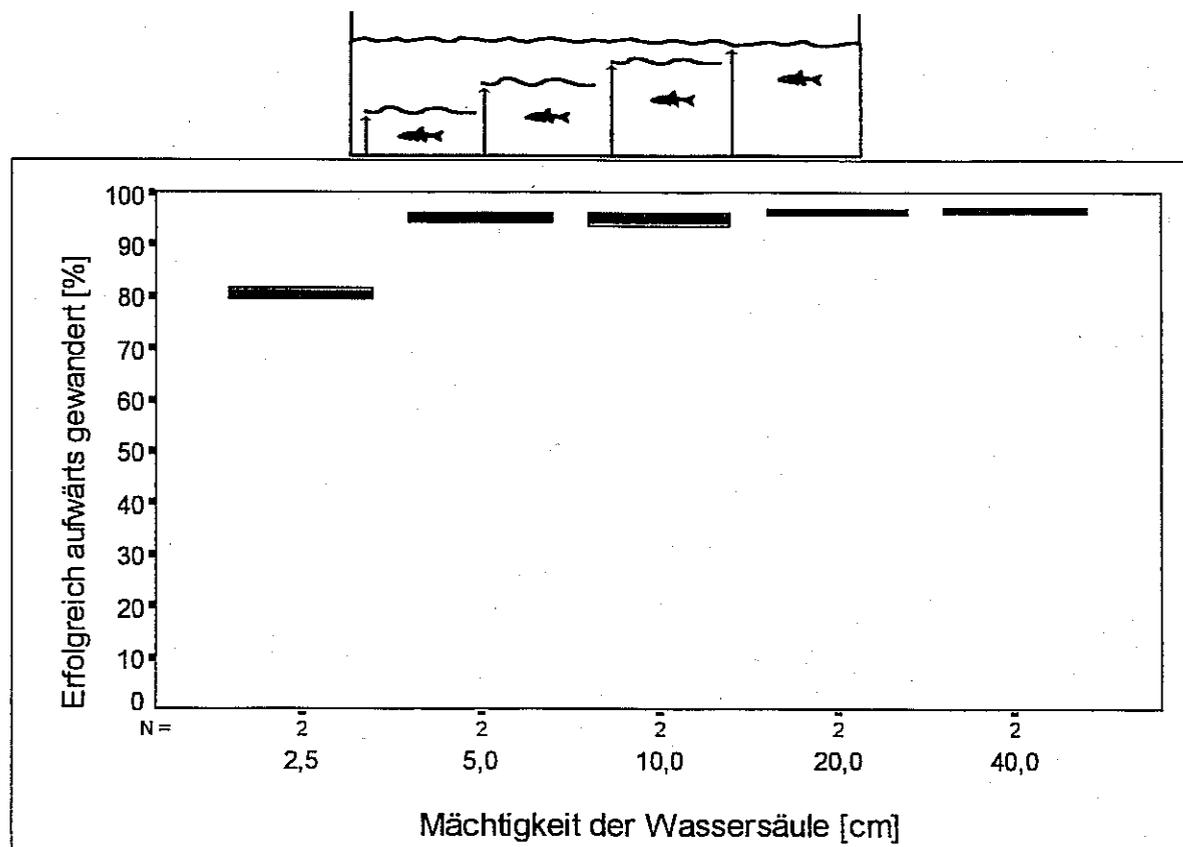


Abb. 3.4.2.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

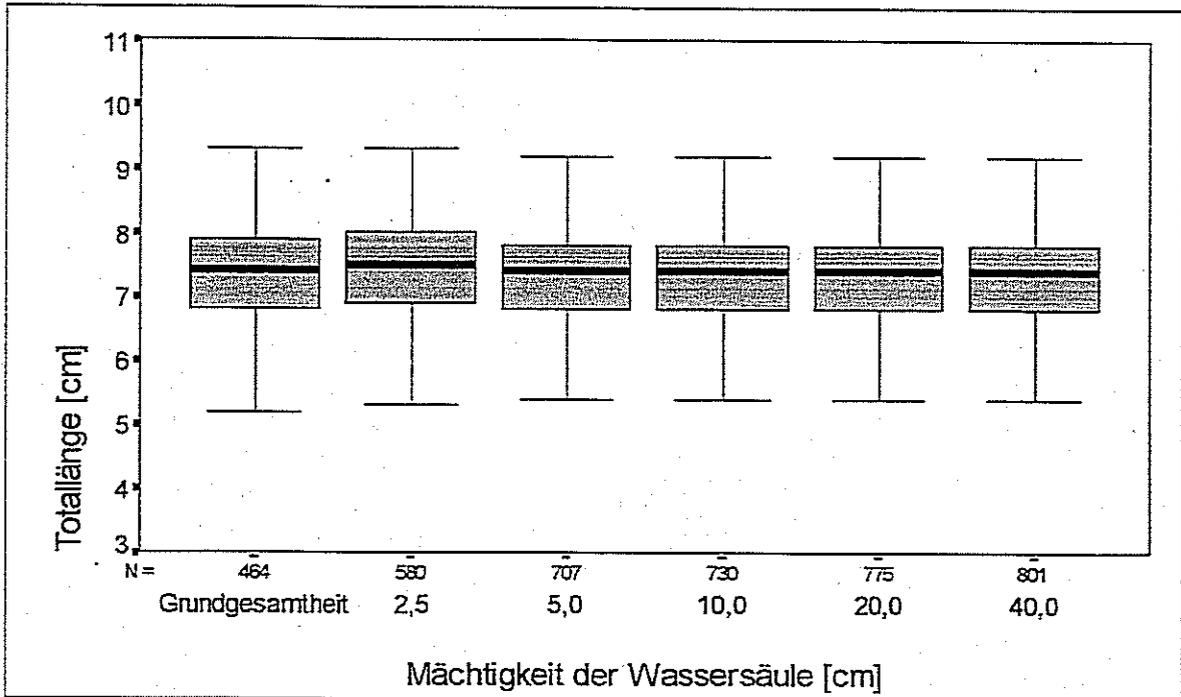


Abb. 3.4.2.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

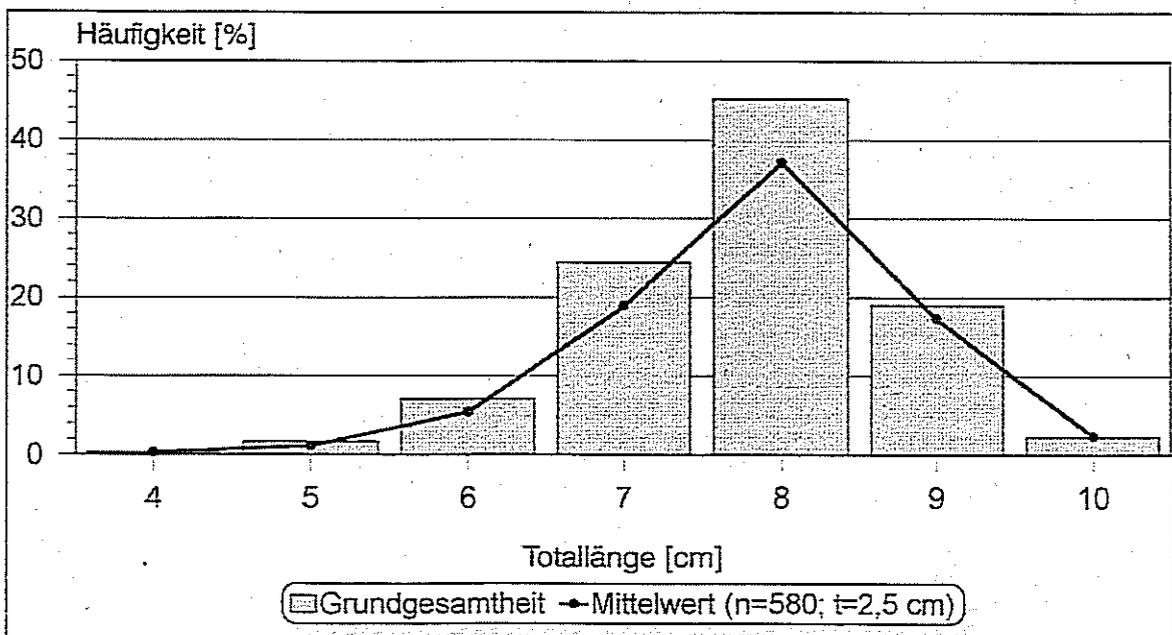


Abb. 3.4.2.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule von 2,5 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s].

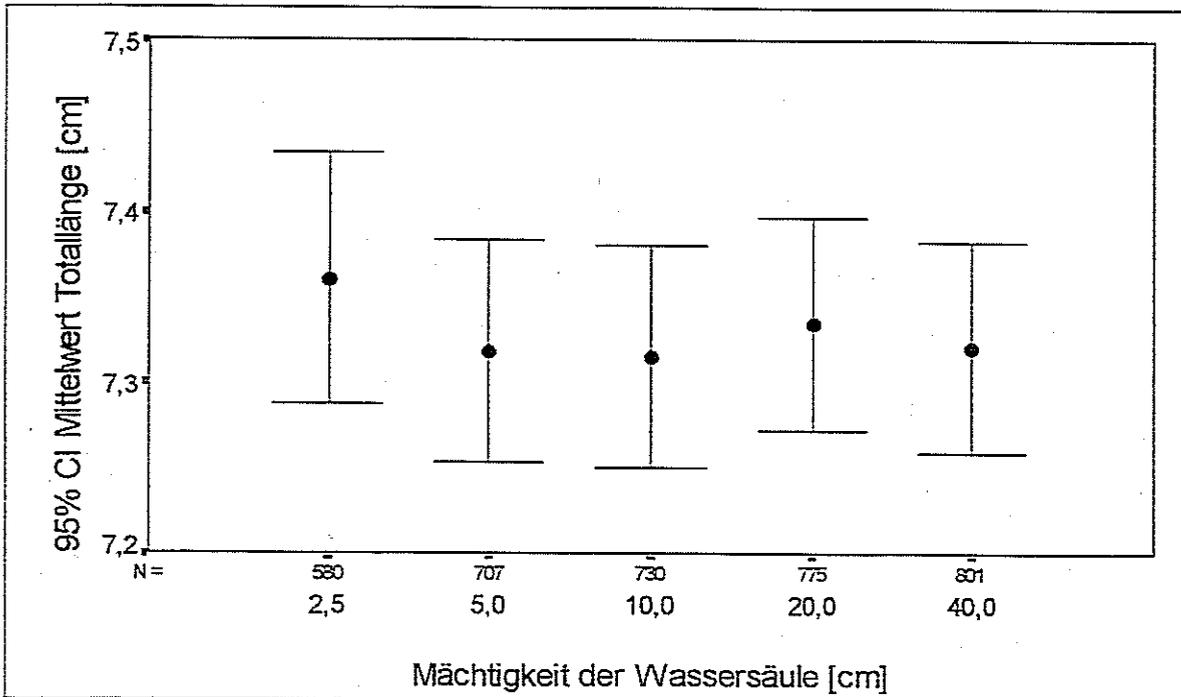


Abb. 3.4.2.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

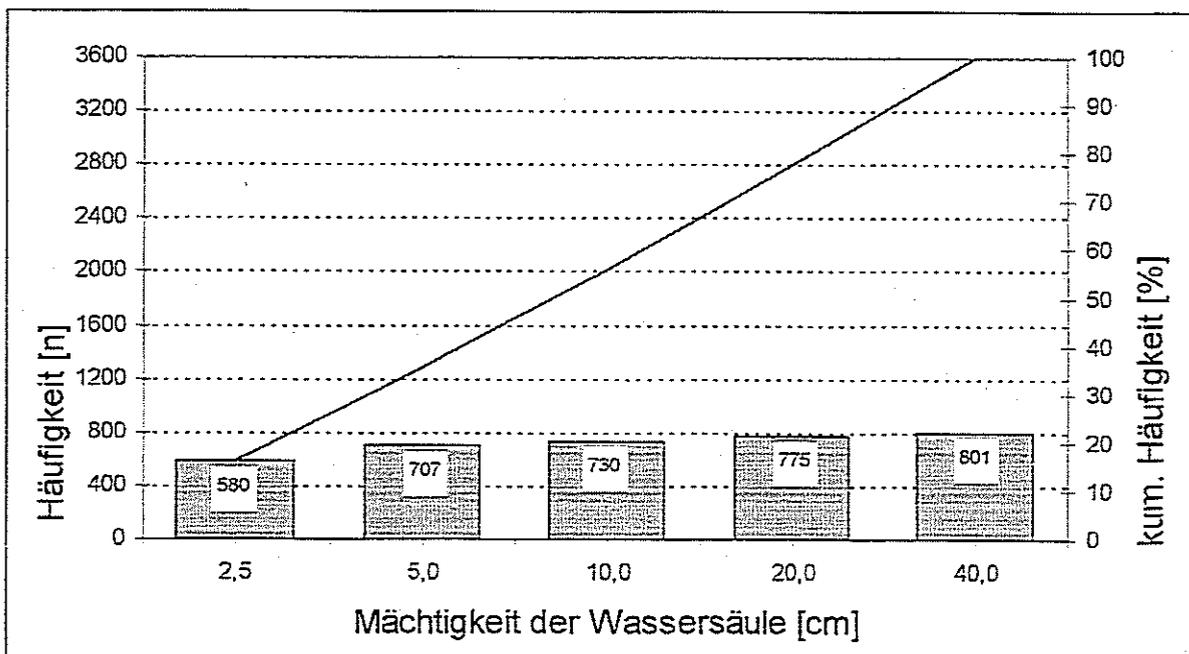


Abb. 3.4.2.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.3 „Bodensubstrate“



Ein Vergleich der Wanderungsbilanzen aus Versuchen sowohl mit kleinem (16 mm), großem (32 mm) als auch gänzlich ohne Substrat, ergibt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s keinen Unterschied in der Erfolgsrate aufwärts wandernder Elritzen (Tab. 3.4.3.1.a, Tab. 3.4.3.1.b, Abb. 3.4.3.1). Eine deutliche Abweichung kommt erst bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1$ m/s zum Vorschein. Dabei zeigt sich die positive Wirkung des Substrates in höheren Wanderungsraten gegenüber denjenigen aus Versuchen mit glatter Sohlfläche. Daraus läßt sich für die Fische eine gewisse Schutzfunktion des Substrates bei hohen Strömungswerten ableiten.

Bei Versuchen mit kleinen Korngrößen des Bodensubstrates (16 mm) und einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1$ m/s sind die minimalen und maximalen Fischgrößen im Vergleich zur Grundgesamtheit etwas weniger vertreten als bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s (Abb. 3.4.3.2a), während bei Versuchen mit einer größeren Körnung (32 mm) dererlei Unterschiede nicht auftauchen (Abb. 3.4.3.2b). Somit wird nochmals der Vorteil von größerem Bodensubstrat für die nach oben gerichtete Migration von Elritzen unterstrichen.

Eine spezielle Betrachtung der Längenhäufigkeitsverteilungen der gewanderten Elritzen bei den beiden untersuchten Korngrößen und einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1$ m/s offenbart, daß bei größerem Substrat geringfügig mehr Fische aus den Größenklassen 6 cm, 7 cm und 10 cm aufwärts wandern (Abb. 3.4.3.3a, Abb. 3.4.3.3b).

Ein ähnliches Bild ergibt sich aus dem Vergleich der mittleren Totallängen (95% CI). Hier sind die Mittelwerte aus den Versuchen mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s für beide Substratgrößen identisch, während sie bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1$ m/s bei kleinem Substrat nur leicht erhöht vorliegen (Abb. 3.4.3.4a, Abb. 3.4.3.4b). Dies könnte bedeuten, daß grobkörnige Bodensubstrate auch den etwas kleineren Elritzen Schutz gegenüber höherer Strömung bieten und ihnen damit eine Möglichkeit zur aufwärtsgerichteten Wanderung eingeräumt wird.

Bei beiden getesteten Korngrößen liegen die kumulierten Häufigkeiten zum Erreichen des geforderten 70%-igen Wanderungserfolges bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,5$ m/s und $v = 1,0$ m/s (Abb. 3.4.3.5a, Abb. 3.4.3.5b).

→FAZIT:

Um eine Wanderungsrate von ca. 70% und ein möglichst vollständiges Längenspektrum von erfolgreich aufwärts wandernden Elritzen zu gewährleisten, sollte das vorhandene Bodensubstrat grobkörnig (≤ 32 mm) sein. Gleichzeitig darf die gegebene Strömungsgeschwindigkeit aber keinesfalls größer als $v = 0,75$ m/s sein.

Tab. 3.4.3.1.a: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei kleiner Korngröße des Bodensubstrates (16 mm) und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,5*	0,5*	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		294	285	324	330	284	285
Stück [%]		96,4	95,3	93,4	95,1	81,8	83,1
Biomasse [g]		837	814	914	931	823	831
Biomasse [%]		99,2	98,9	94,4	96,2	85,9	87,0
Länge Minimum [cm]		4,3	4,3	4,6	4,3	4,3	4,5
Länge Maximum [cm]		9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	8	7	8

*ohne Substrat

Tab. 3.4.3.1.b: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei großer Korngröße des Bodensubstrates (32 mm) und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,9*	0,9*	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		197	202	312	304	292	282
Stück [%]		63,1	66,0	94,5	93,3	85,1	83,2
Biomasse [g]		592	470	882	863	845	819
Biomasse [%]		68,8	54,8	96,5	95,1	89,3	88,8
Länge Minimum [cm]		4,5	4,3	4,3	4,3	4,5	4,3
Länge Maximum [cm]		9,6	8,2	9,6	9,6	9,6	9,6
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		8	6	8	8	8	8

*ohne Substrat

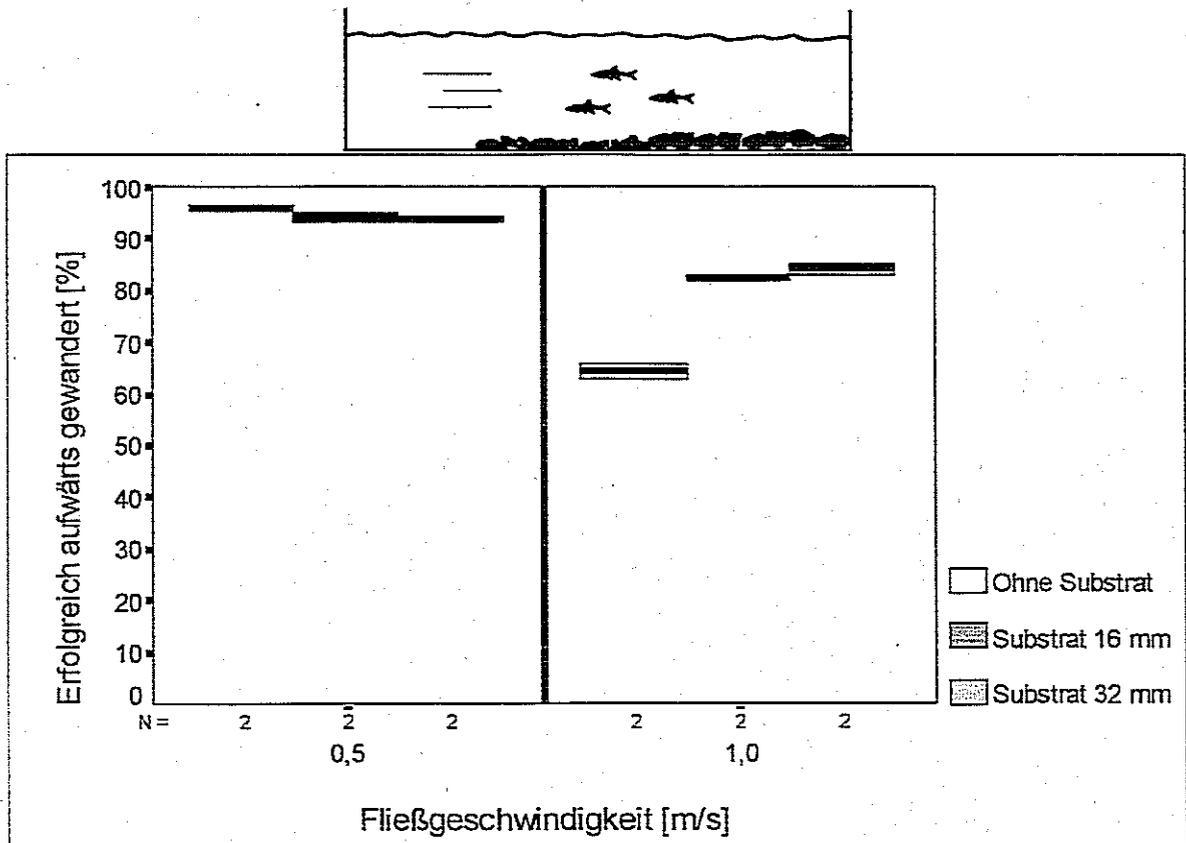


Abb. 3.4.3.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Korngröße des Bodensubstrates und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

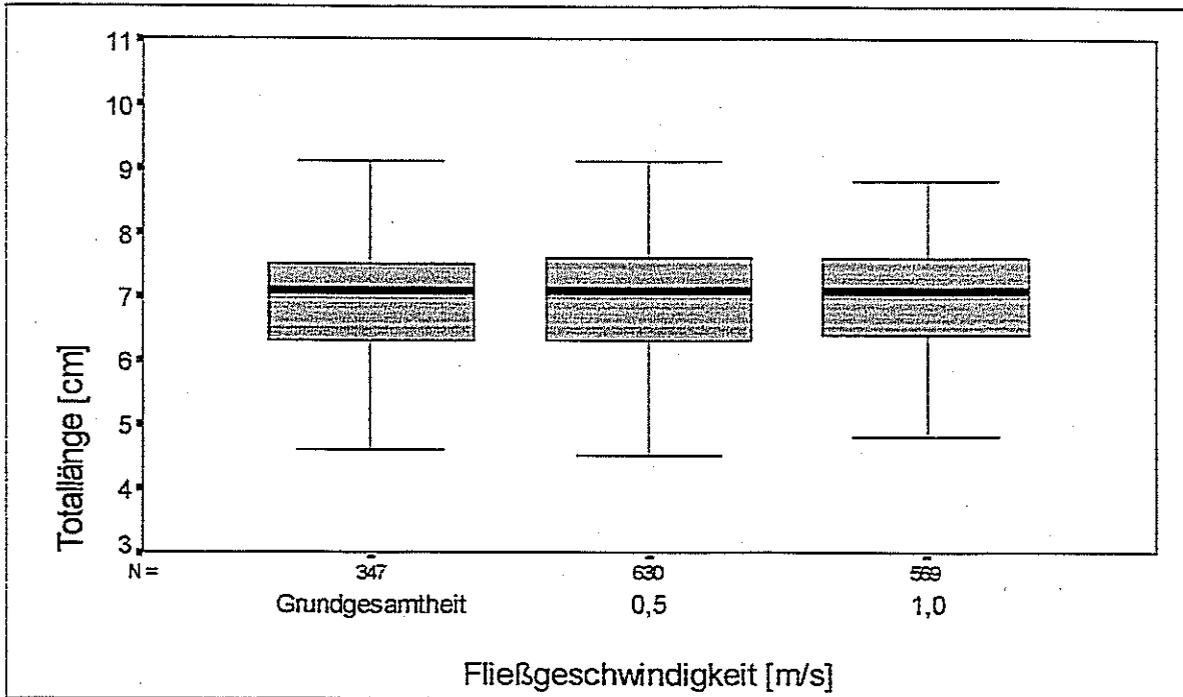


Abb. 3.4.3.2a: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

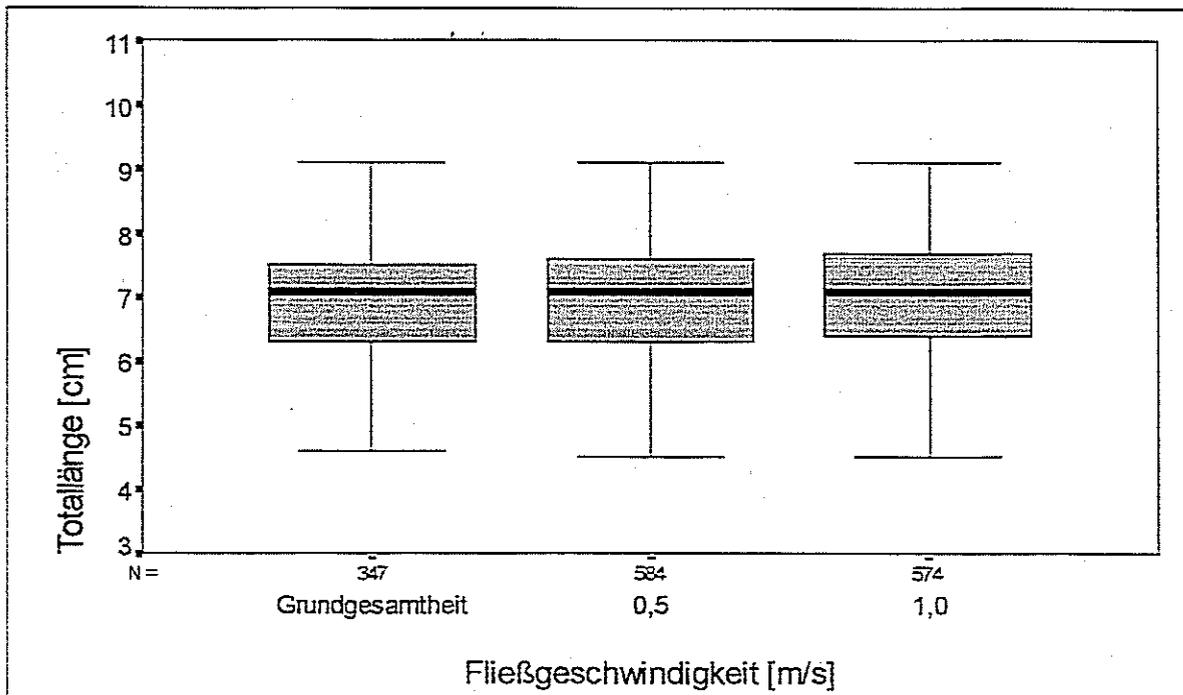


Abb. 3.4.3.2b: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

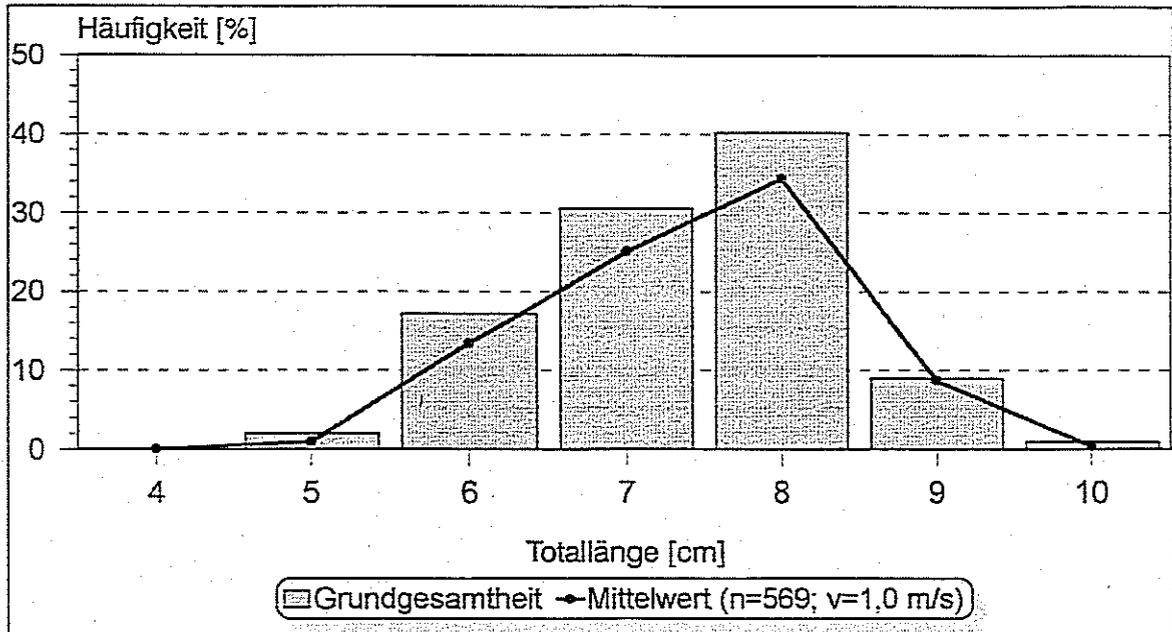


Abb. 3.4.3.3a: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

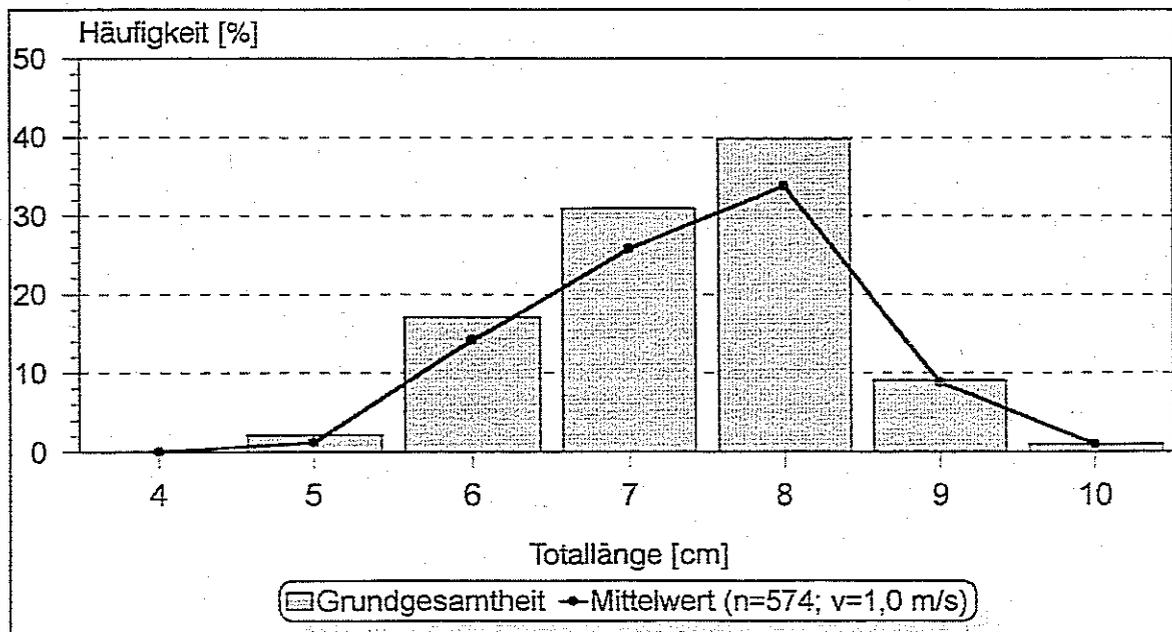


Abb. 3.4.3.3b: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

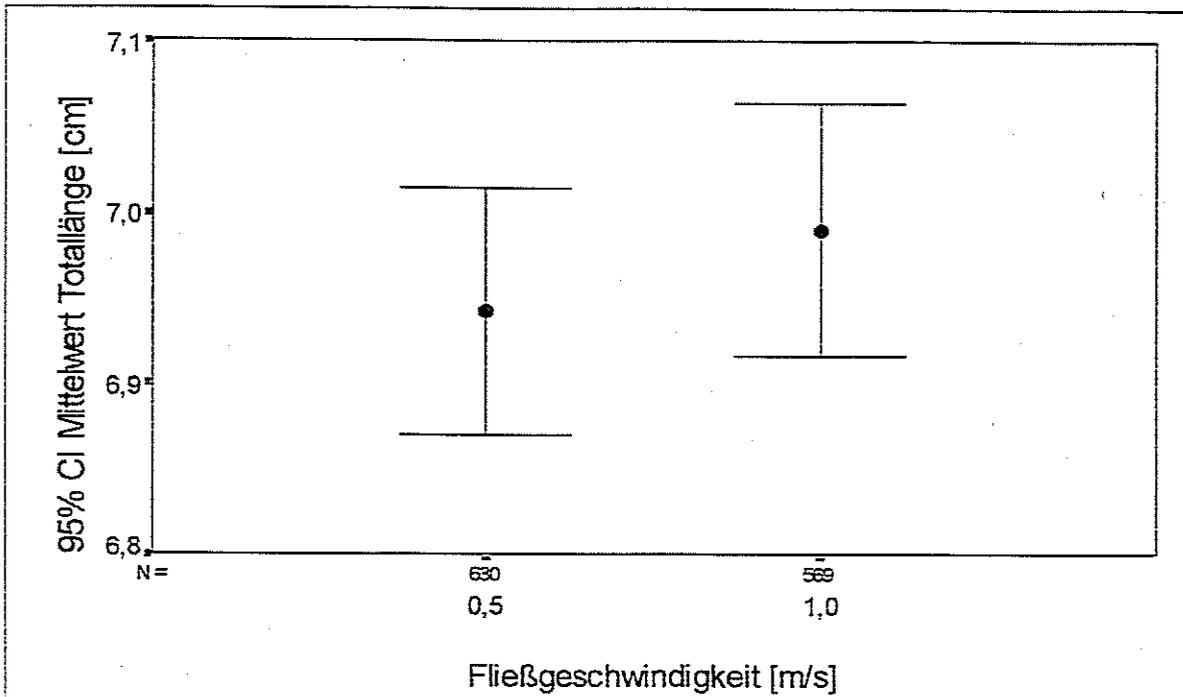


Abb. 3.4.3.4a: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

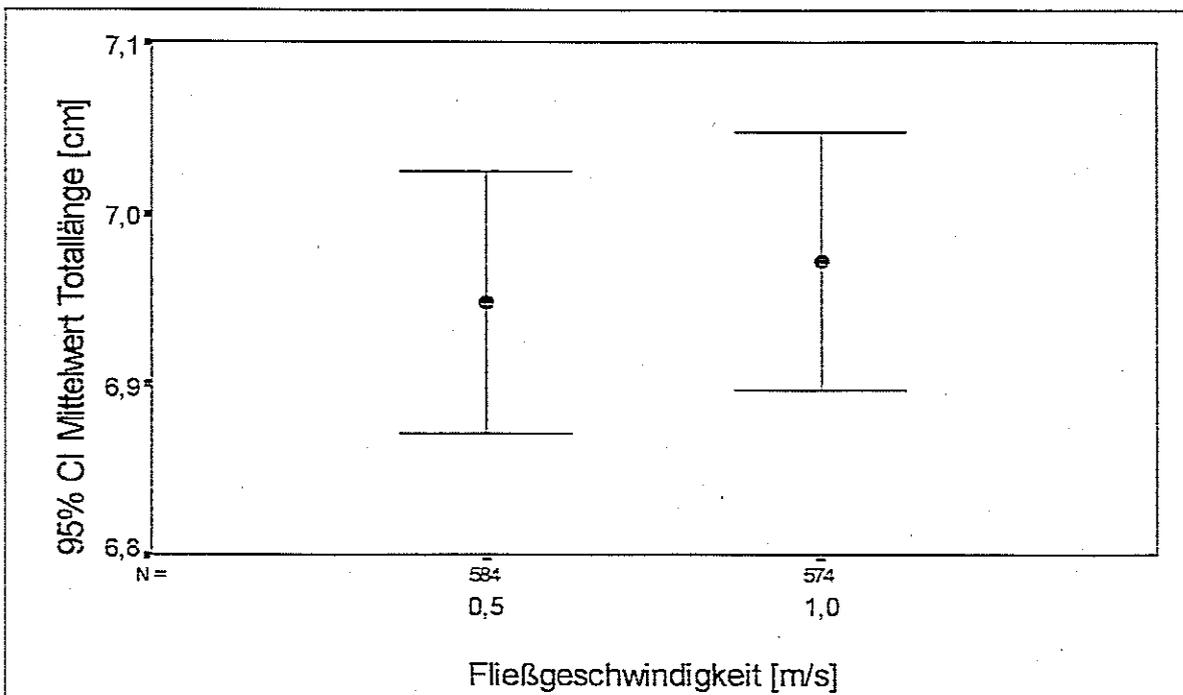


Abb. 3.4.3.4b: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

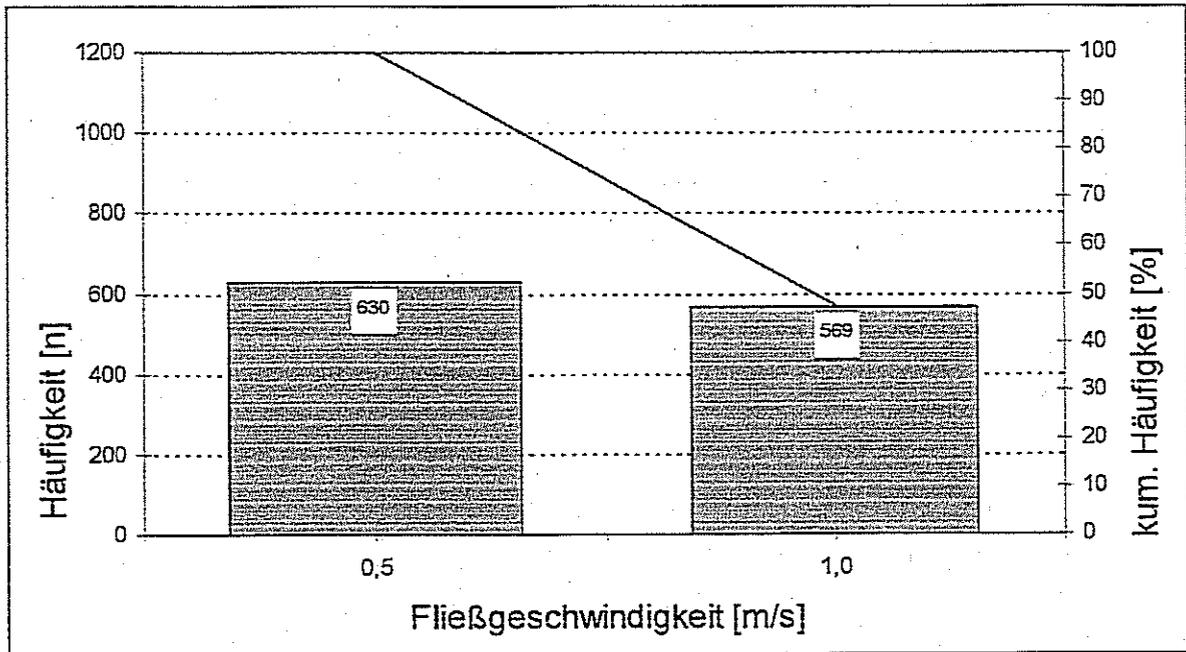


Abb. 3.4.3.5a: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

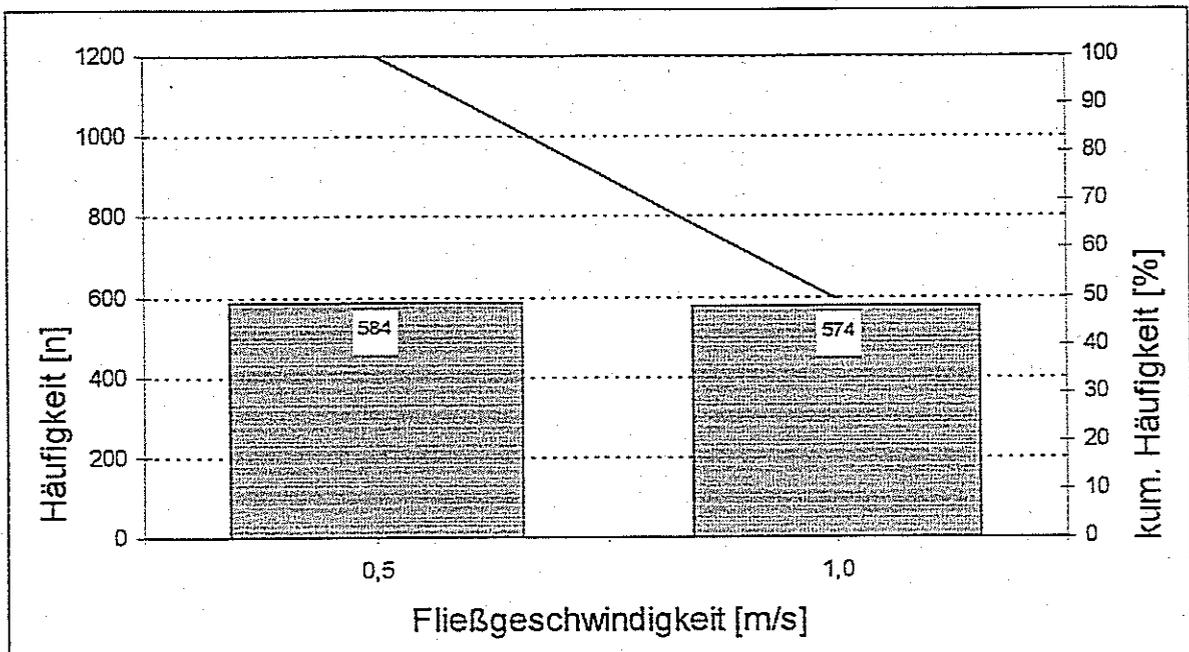
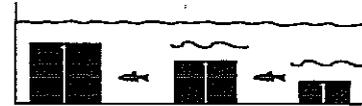


Abb. 3.4.3.5b: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.4 „Bodenschwelle“

3.4.4.1 „Höhe der Bodenschwelle“ (h_s)



Die Versuche zur Ermittlung des Einflusses von unterschiedlich hohen Bodenschwellen auf die aufwärts gerichtete Migration bei Elritzen konnten aus zeitlichen Gründen nur jeweils einfach, d. h. ohne Kontrollversuch durchgeführt werden. Aus diesem Grunde kann keine Schwankungsbreite der quantitativen Ergebnisse angegeben werden.

In keinem der Versuche mit verschiedenen hohen Bodenschwellen im Bereich zwischen $h_s = 5$ cm und $h_s = 30$ cm lag die Erfolgsquote der Versuchsfische unter 90%. Dies gilt sowohl für die stückbezogene Aufwärtswanderung als auch für die gewanderte Biomasse der Elritzen (Tab. 3.4.4.1.1, Abb. 3.4.4.1.1).

Auch aus dem direkten Vergleich der Totallängen der bei den jeweiligen Versuchen aufwärts gewanderten Exemplare mit der Grundgesamtheit zeigt sich kein markanter Unterschied in den medianen, minimalen und maximalen Werten (Abb. 3.4.4.1.2). Somit stellt sich der Faktor „Bodenschwelle“ für sich genommen für die im Freiwasser lebenden und migrierenden Elritzen nicht als gröbenselektiv wirkendes Wanderhindernis dar.

Selbst bei einer $h_s = 30$ cm hohen Schwelle wandern Elritzen in höchstem Maße quantitativ und auch proportional zur Grundgesamtheit (Abb. 3.4.4.1.3).

Die mittleren Totallängen (95% CI) erhöhen sich zwar linear mit zunehmender Schwellenhöhe, dies aber in einem Bereich eines Millimeters (Abb. 3.4.4.1.4).

Unter Betrachtung einer Erfolgsquote von ca. 70% der kumulierten Häufigkeiten ist diese Forderung bei einer maximalen Schwellenhöhe von etwa $h_s \leq 15$ cm erreicht (Abb. 3.4.4.1.5).

→FAZIT:

Bodenschwellen sind für die im Freiwasser lebenden und migrierenden Elritzen als alleiniger Faktor nicht als Wanderhindernisse auszumachen. Bezüglich des gewanderten Längenspektrums der Versuchsfische läßt sich für Schwellen mit $h_s \leq 30$ cm kein ausgeprägt negativer Einfluß feststellen. Aus quantitativer Sicht sollte aber eine vorhandene Bodenschwelle die maximale Höhe von 15 cm nicht überschreiten.

Tab. 3.4.4.1.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Höhe der Bodenschwelle [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm)						
	[cm]	5	10	15	20	25	30
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		447	443	424	418	418	417
Stück [%]		99,1	98,2	94,9	93,5	93,5	94,3
Biomasse [g]		1586	1575	1528	1516	1518	1521
Biomasse [%]		99,6	99,6	96,6	95,8	97,1	98,1
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Länge Maximum [cm]		9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	10	10	10

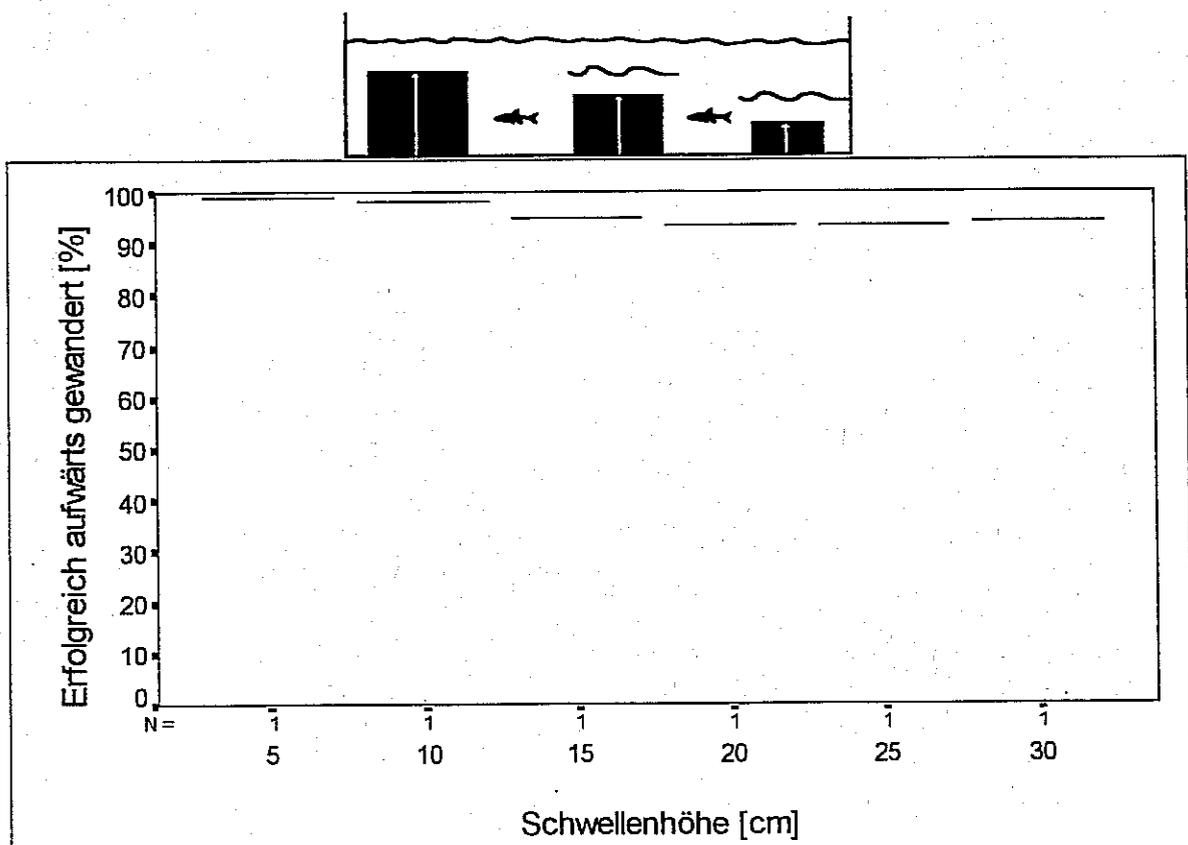


Abb. 3.4.4.1.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

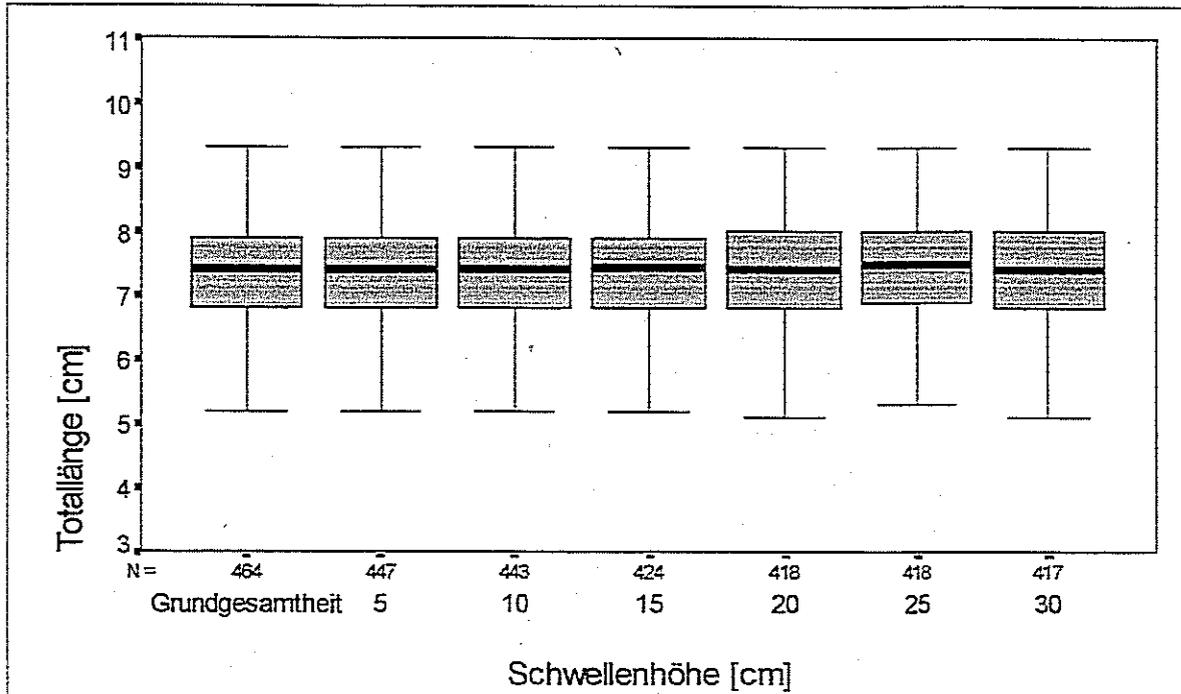


Abb. 3.4.4.1.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

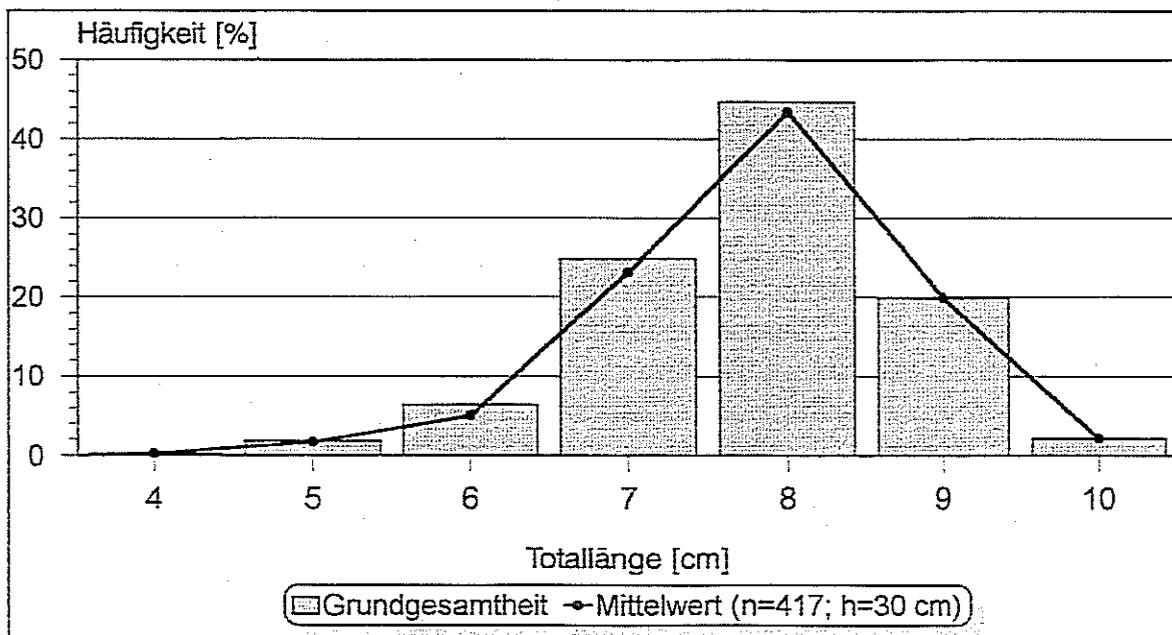


Abb. 3.4.4.1.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Bodenschwelle mit einer maximalen Höhe von 30 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s].

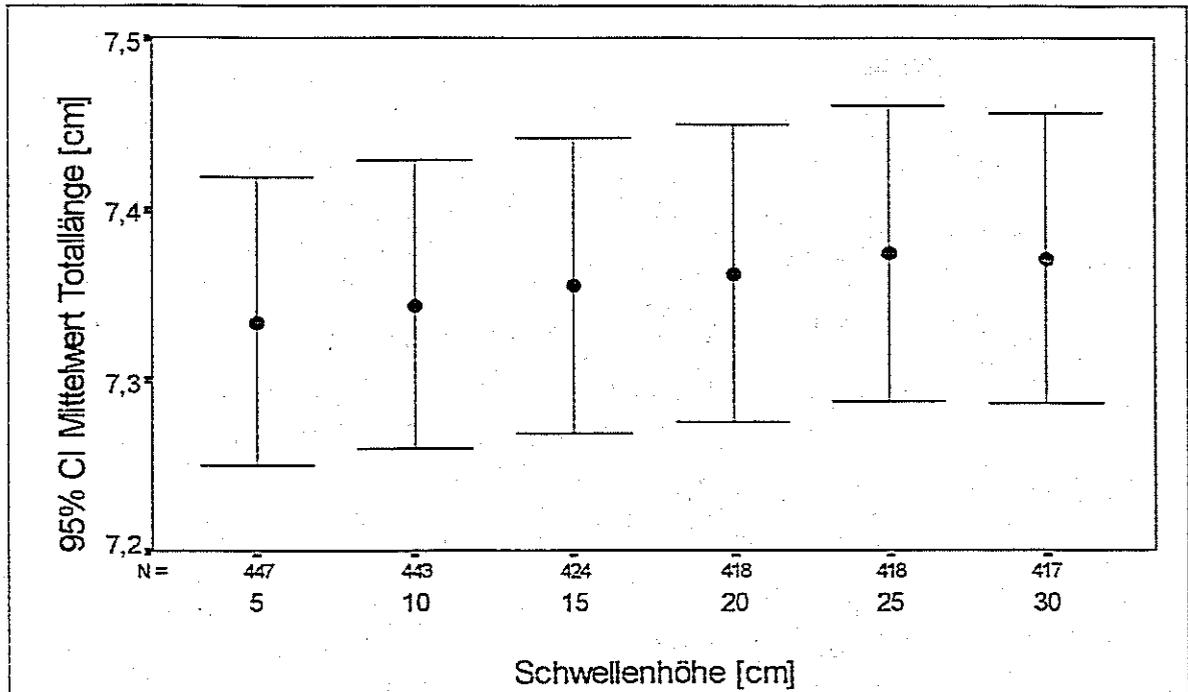


Abb. 3.4.4.1.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

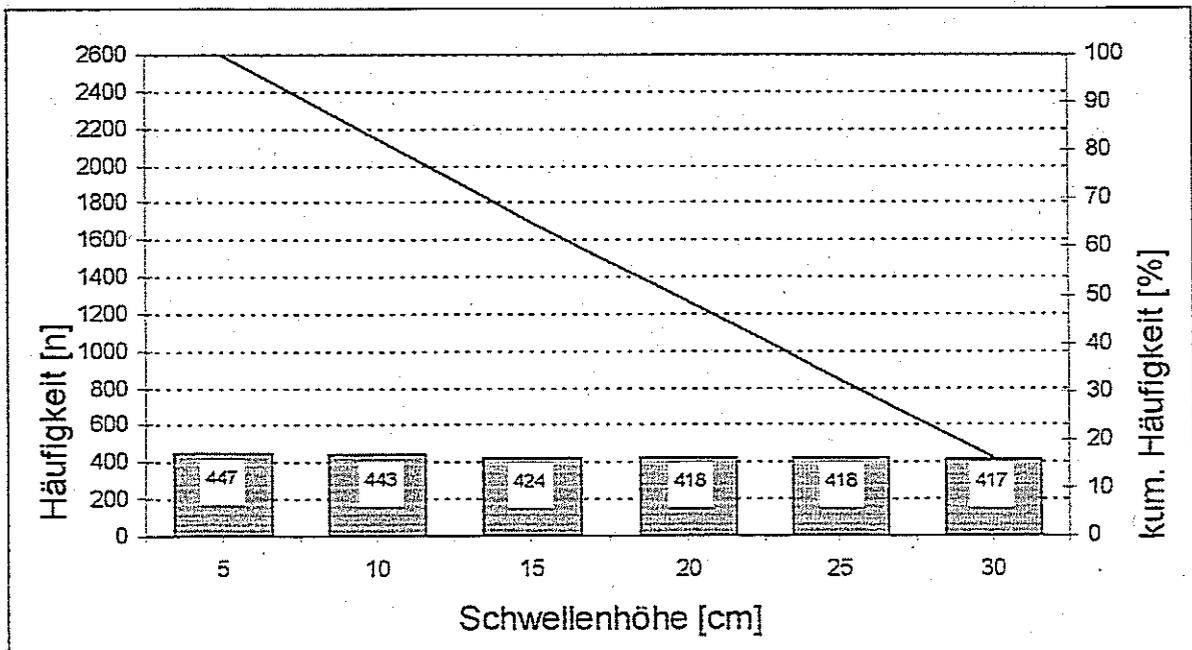
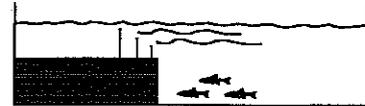


Abb. 3.4.4.1.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.4.2 „Vertikale Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“ (t_s)



Auch für diese Versuchsanstellung konnten keine Kontrollversuche durchgeführt werden. Die quantitative Streubreite ist deshalb ebenfalls nicht bekannt.

Die Reduzierung der Wassertiefe über einer Bodenschwelle von anfangs $t_s = 20$ cm auf $t_s = 5$ cm ist mit einem durchschnittlichen Wandererfolg von 97,5% (stückbezogen) bzw. 98,6% (Biomasse) verbunden, d. h. eine Abnahme der Wassersäule induziert nicht gleichzeitig eine Abnahme in der Aufwärtswanderung der Elritzen (Tab. 3.4.4.2.1, Abb. 3.4.4.2.1). Diese Ergebnisse entsprechen in ihrem Ausmaß und ihrer Dimension exakt denjenigen aus den Versuchen zur „Mächtigkeit der Wassersäule“.

Bei einer weiteren Halbierung der Wassertiefe über der Schwelle von $t_s = 5$ cm auf letztlich $t_s = 2,5$ cm ist ebenfalls analog zu den erwähnten „Tiefenversuchen“ ein stückbezogener Rückgang von 15% und ein Rückgang in der gewanderten Biomasse von 18% zu verzeichnen. Auch beim Vergleich der gewanderten Längenspektren aus den jeweiligen Versuchen mit der Grundgesamtheit an Elritzen fallen keine auffälligen Abnormitäten ins Auge (Abb. 3.4.4.2.2).

Die spezielle Betrachtung der Längenhäufigkeitsverteilung bei einer Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle von $t_s = 2,5$ cm erbringt ebenfalls analog zu den vorangegangenen „Tiefenversuchen“ eine quantitativ hohe Beteiligung der Größenklassen an der Aufwärtswanderung entsprechend proportional ihrer Präsenz zur Grundgesamtheit (Abb. 3.4.4.2.3).

In ähnlich analoger Weise zu den „Tiefenversuchen“ zeigen sich die mittleren Totallängen bei Mächtigkeiten der Wassersäule zwischen $t_s = 20$ cm und $t_s = 5$ cm als konstant und in ihren Dimensionen gleich ausgeprägt (Abb. 3.4.4.2.4). Abweichend davon sind bei einer Wassersäule über der Schwelle von $t_s = 2,5$ cm jedoch Exemplare mit leicht geringeren mittleren Totallängen über das „Wanderhindernis“ aufwärts migriert.

Die Abfolge der kumulierten Häufigkeiten ergibt eine Erfolgsrate von 70% bei einer Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle von etwa $t_s = 10$ cm (Abb. 3.4.4.2.5).

→FAZIT:

Liegt die Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle im Bereich zwischen mindestens $t_s = 5$ cm und $t_s = 10$ cm (bei gleichzeitig niedriger Fließgeschwindigkeit) so stellt dies für aufwärts wandernde Elritzen mit den daran beteiligten Größenklassen kein eigentliches Wanderhindernis dar.

Tab. 3.4.4.2.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlich hoher Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle [cm]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s)				
	[cm]	2,5	5	10	20
erfolgreich aufwärts gewandert:					
Stück [n]		354	421	429	443
Stück [%]		81,9	96,3	97,9	98,2
Biomasse [g]		1224	1497	1525	1575
Biomasse [%]		80,3	97,8	98,5	99,6
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	3,6	3,6
Länge Maximum [cm]		9,8	9,8	9,8	9,8
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	10

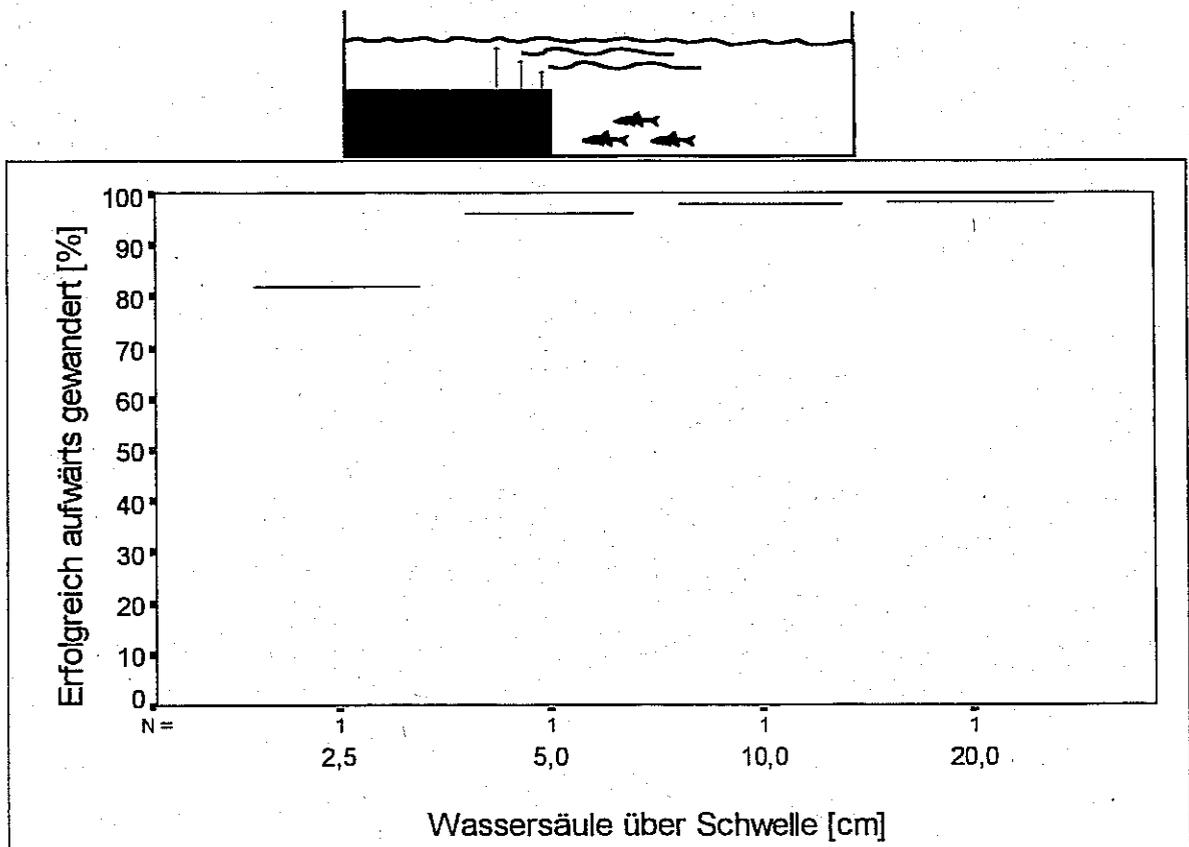


Abb. 3.4.4.2.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

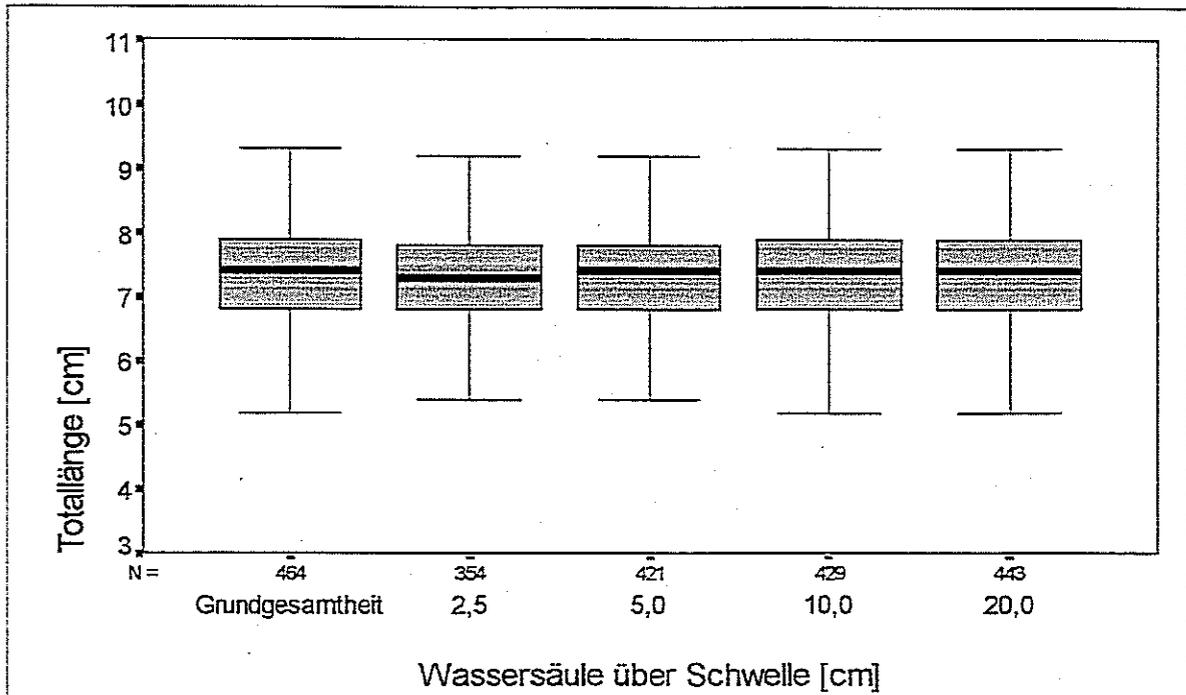


Abb. 3.4.4.2.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

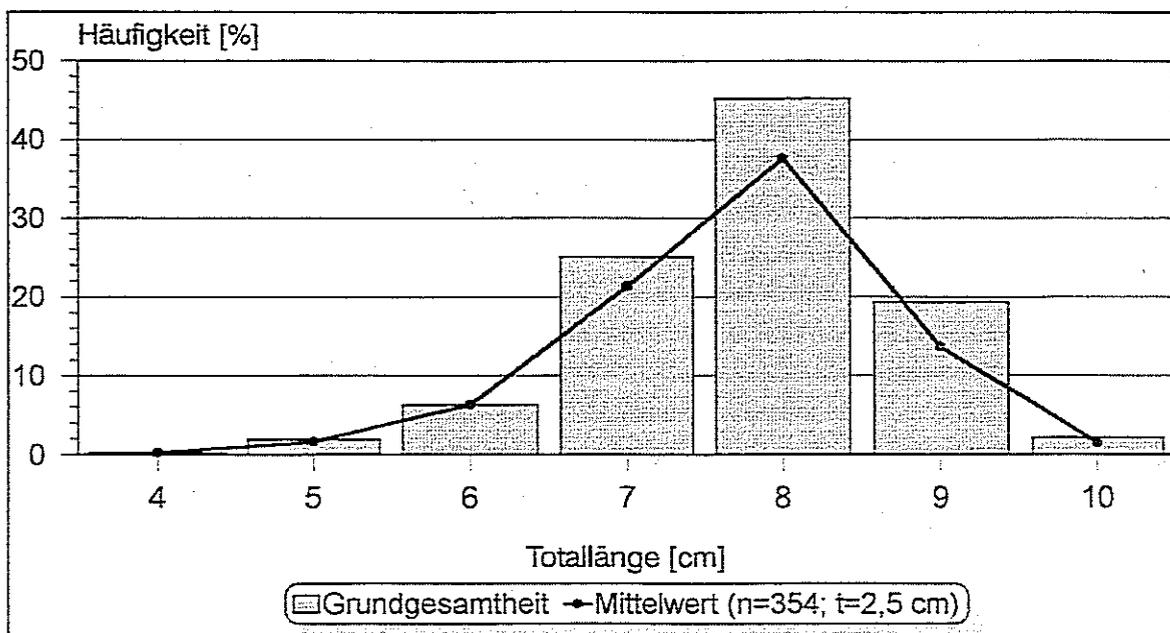


Abb. 3.4.4.2.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule von 2,5 cm über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s].

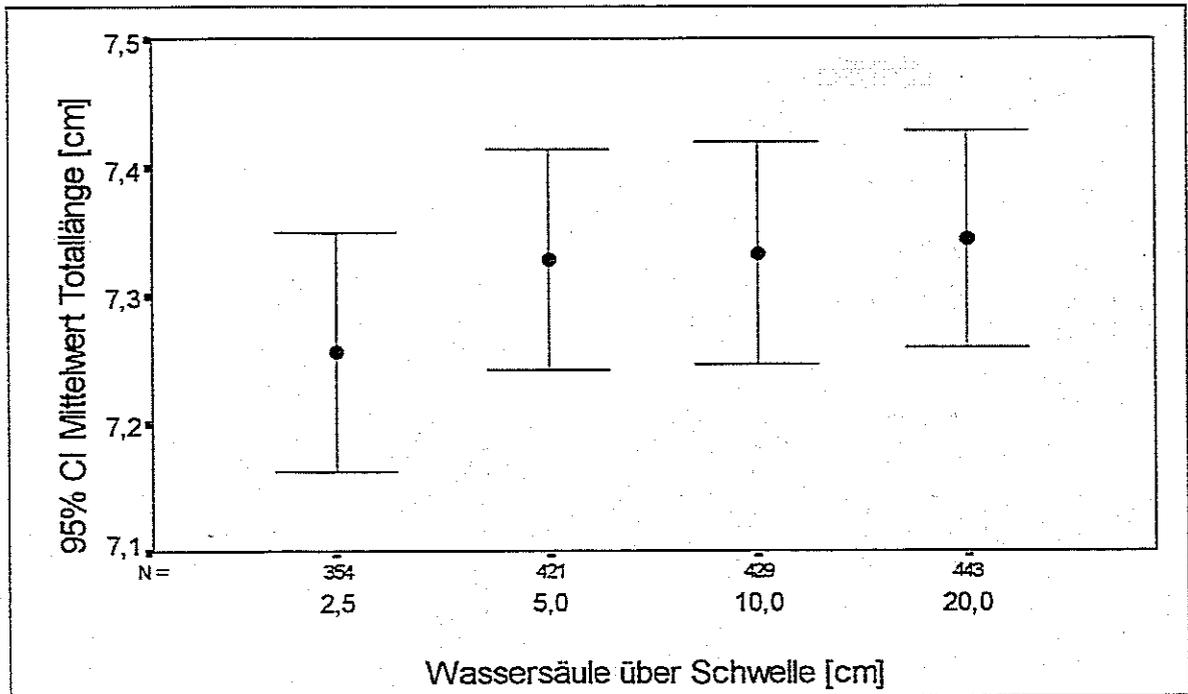


Abb. 3.4.4.2.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

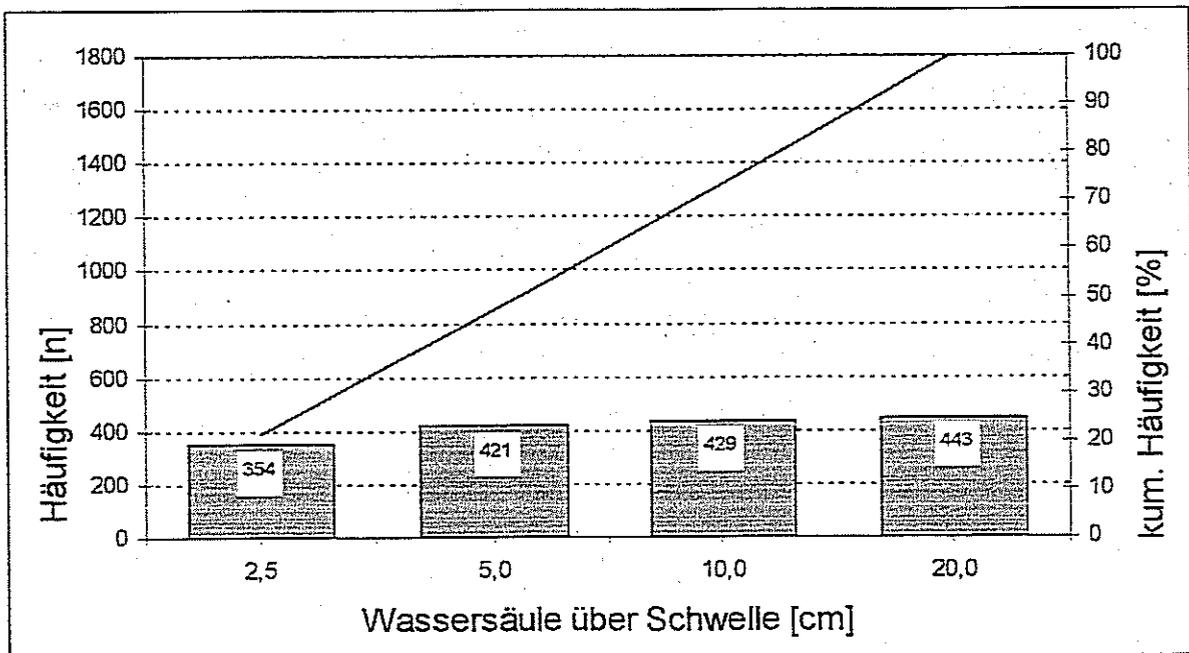


Abb. 3.4.4.2.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.4.3 „Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“ (v_s)



Ähnlich den „Strömungsversuchen“ ergibt sich für Fließgeschwindigkeit über der Bodenschwelle eine abnehmende Erfolgsrate bei den aufwärts gewanderten Elritzen entlang des Strömungsgradienten. Der quantitative Wandererfolg liegt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v_s \leq 0,75$ m/s jeweils über 90%, nimmt dann aber mit zunehmender Geschwindigkeit rasch ab (Tab. 3.4.4.3.1, Abb. 3.4.4.3.1).

Die Totallängen der an der aufwärts gerichteten Wanderung beteiligten Elritzen ähneln der Grundgesamtheit bis zu einer Fließgeschwindigkeit von $v_s \leq 1,0$ m/s in höchster Weise, erst ab einer Geschwindigkeit von $v_s = 1,25$ m/s nehmen die kleineren Exemplare nicht mehr an der Wanderung teil (Abb. 3.4.4.3.2). In diesem Bereich wandern nur noch Elritzen der Größenklassen 8 cm bis 10 cm (Abb. 3.4.4.3.3). Hier bewirkt die Strömung eine klar zu erkennende Selektion der Fischgrößen zu Gunsten der großen Individuen.

Ähnliches tritt bei der Betrachtung der mittleren Totallängen (95% CI) zu Tage. Bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von $v_s \leq 1,0$ m/s bleiben die Mittelwerte der Fischlängen konstant und verfügen über ähnliche Streuungstendenzen, danach zeigen die Werte, daß sich nur noch die großen Exemplare entgegen der Strömung behaupten können (Abb. 3.4.4.3.4).

Die kumulierten Häufigkeiten ergeben eine Erfolgsquote von vertretbaren 70% bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa $v_s \leq 0,5$ m/s (Abb. 3.4.4.3.5).

→ **FAZIT:**

Unter dem Blickwinkel einer quantitativen Erfolgsquote von mindestens 70% bei der Überwindbarkeit der Strömungsgeschwindigkeit über einer Bodenschwelle sollte die Strömung den Richtwert von $v_s \leq 0,5$ m/s nicht wesentlich überschreiten.

Handelt es sich bei den zu bewältigenden Wanderstrecken um sehr kurze Abschnitte (≤ 1 m) darf die Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle dabei auch noch im Bereich von $v_s \leq 1,0$ m/s liegen. Hierbei sind keine Einbußen bei den verschiedenen Längensklassen der aufwärts wandernden Elritzen zu erwarten. Dieser Richtwert kann allerdings nicht für eine beliebige Abfolge von kurzen Wanderdistanzen gelten (z. B. in Fischtreppe).

Tab. 3.4.4.3.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle [m/s]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm)							
	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,25	1,25
erfolgreich aufwärts gewandert:								
Stück [n]		429	415	395	326	96	98	92
Stück [%]		97,9	96,3	92,3	76,5	22,8	23,3	21,9
Biomasse [g]		1525	1477	1420	1218	467	466	433
Biomasse [%]		98,5	97,5	94,4	81,8	31,4	31,4	29,3
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	3,6	3,6	7,1	7,0	7,0
Länge Maximum [cm]		9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	3	2	2
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	10	10	9	10

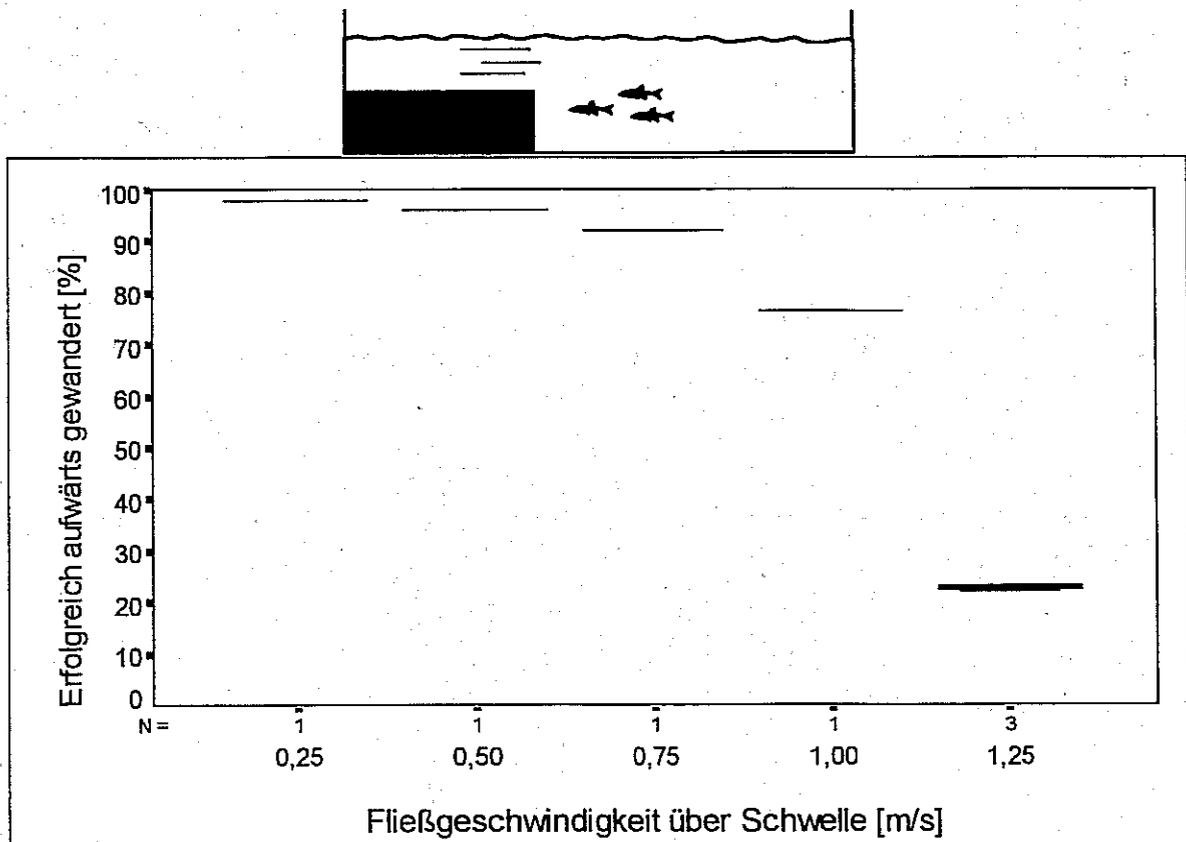


Abb. 3.4.4.3.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

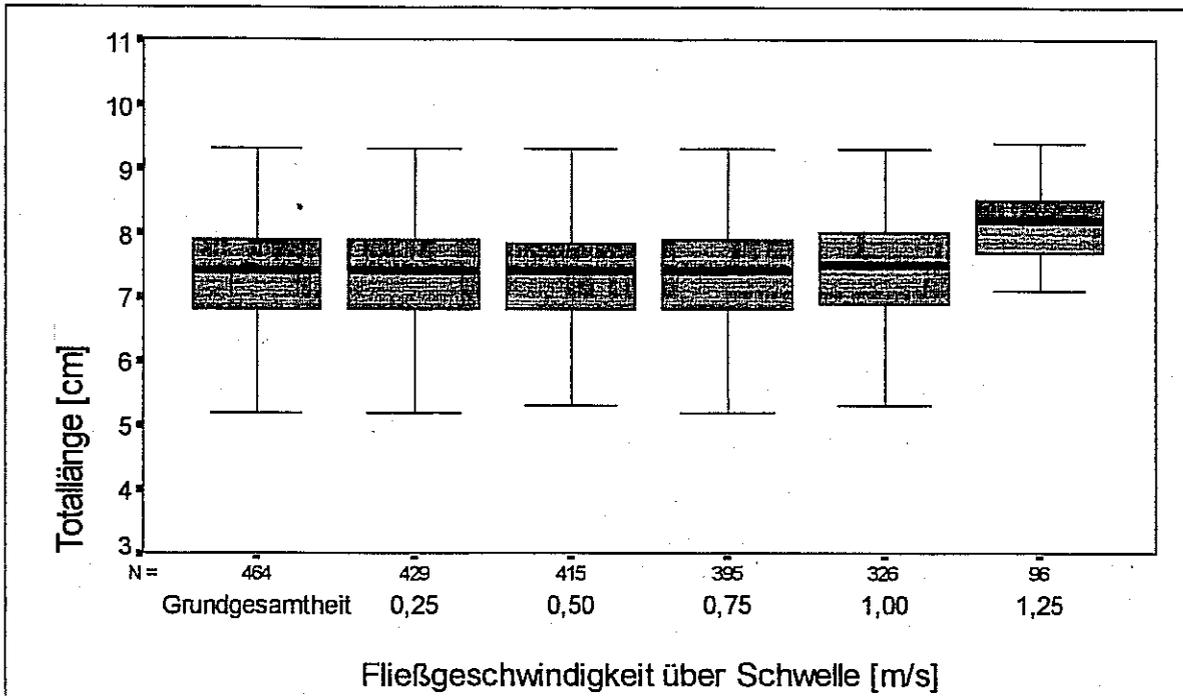


Abb. 3.4.4.3.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

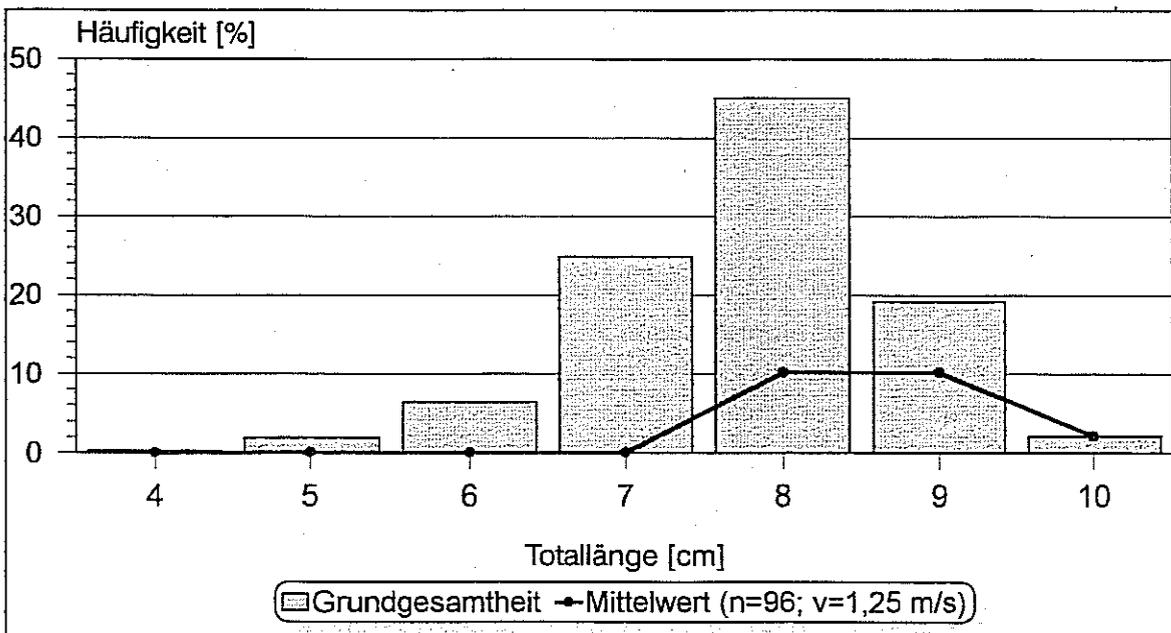


Abb. 3.4.4.3.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,25 m/s über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm].

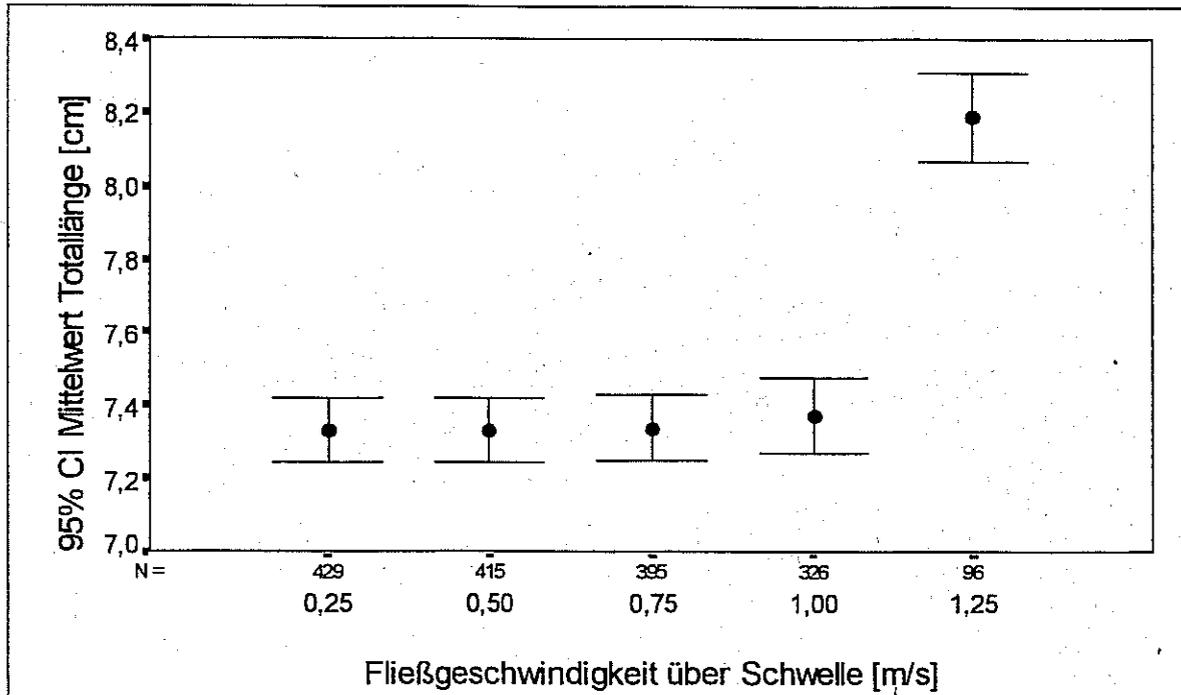


Abb. 3.4.4.3.4: Mittlere Totallängen (95%-Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

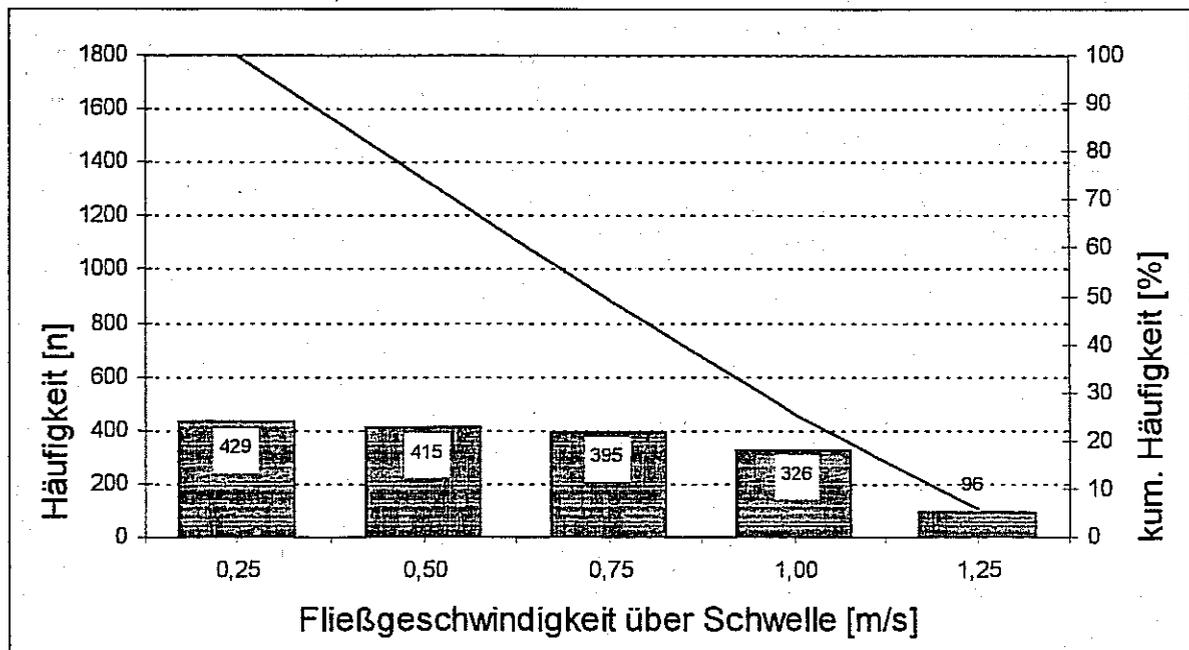


Abb. 3.4.4.3.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.5 „Absturz“ (Δh)

Bis zu einer Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von $\Delta h = 7,5$ cm liegt die quantitative Erfolgsquote der aufwärts gewanderten Elritzen jeweils deutlich über 90% (stückbezogen, Biomasse), sinkt aber schon bei $\Delta h = 10$ cm auf durchschnittlich 26% (stückbezogen) bzw. 34% (Biomasse) und tendiert bei einer Fallhöhe von $\Delta h = 12,5$ cm gegen Null (Tab. 3.4.5.1, Abb. 3.4.5.1).

Im Vergleich zur Grundgesamtheit stellen sich im Bereich von $\Delta h \leq 7,5$ cm keine gravierenden Abweichungen in der Zusammensetzung des Längenspektrums der erfolgreich gewanderten Elritzen heraus. Erst bei einer Fallhöhe von $\Delta h \geq 7,5$ cm werden zunehmend die kleineren Individuen herausselektiert und bei einer Absturzhöhe von $\Delta h = 12,5$ cm können nur noch einige wenige, aber dafür großen Exemplare das Wanderhindernis überwinden (Abb. 3.4.5.2).

Eine genaue Betrachtung der Längenhäufigkeitsverteilung der erfolgreich aufwärts gewanderten Elritzen bei den extremen Höhenunterschieden von $\Delta h = 10$ cm und $\Delta h = 12,5$ cm läßt erkennen, daß die unteren Längensklassen bis 7 cm aus quantitativer Sicht nahezu gar nicht zum Wandererfolg beitragen (Abb. 3.4.5.3).

Ein signifikanter Anstieg der mittleren Totallänge (95% CI) ab einer Fallhöhe von $\Delta h = 10$ cm untermauert nochmals den oben aufgeführten Sachstand (Abb. 3.4.5.4). Auf der anderen Seite bedeutet dies aber auch, daß Wasserspiegeldifferenzen zwischen Ober- und Unterwasser von maximal $\Delta h = 7,5$ cm ohne Einbußen im Längenspektrum für Elritzen als überwindbar betrachtet werden können.

Eine unter biologischen Gesichtspunkten vertretbare Erfolgsquote von 70% ergibt sich aus den kumulierten Häufigkeiten bei einer Fallhöhe von etwa $\Delta h = 5$ cm (Abb. 3.4.5.5).

→ FAZIT:

Die Elritze gehört bekanntermaßen zu den Fischarten mit einem gut entwickelten Sprungvermögen. Das Leistungspotential dieser Spezies ist jedoch eng begrenzt. Deshalb sollte die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser bei einem bestehenden und nicht substituierbaren Absturz den Richtwert von maximal $\Delta h = 7,5$ cm nicht überschreiten! Um den Fischen den Aufstieg ins Oberwasser zu erleichtern sollte dabei gleichzeitig gewährleistet sein, daß die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser durchschnittliche Werte von $v_s \leq 0,5$ m/s nicht übersteigt.

Unter rein quantitativen Aspekten ist eine maximale Fallhöhe von $\Delta h = 5$ cm zu fordern, um sicher zu stellen, daß möglichst vielen Individuen der Einstieg ins Oberwasser gelingt.

Tab. 3.4.5.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	7,5	7,5	10	10	12,5	12,5
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		449	444	441	446	422	416	122	115	2	2
Stück [%]		98,9	98,4	96,1	97,2	92,1	91,2	26,8	25,2	0,4	0,4
Biomasse [g]		1590	1583	1577	1583	1538	1527	560	537	12	11
Biomasse [%]		99,8	99,4	97,2	97,8	95,3	94,6	34,7	33,3	0,7	0,7
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	6,4	6,4	8,3	8,5
Länge Maximum [cm]		9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7	9,9	8,7	8,7
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1	2	2	6	5
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	10	10	10	10	10	6	6

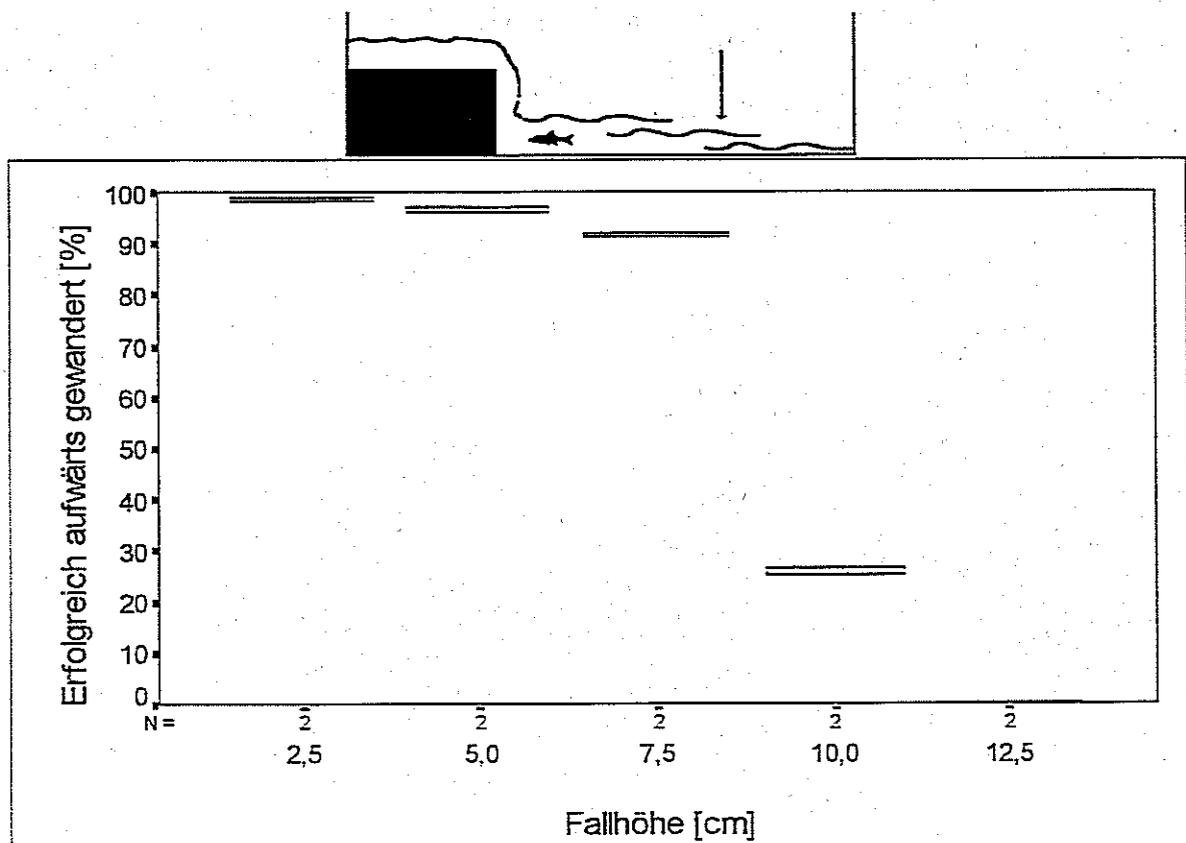


Abb. 3.4.5.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

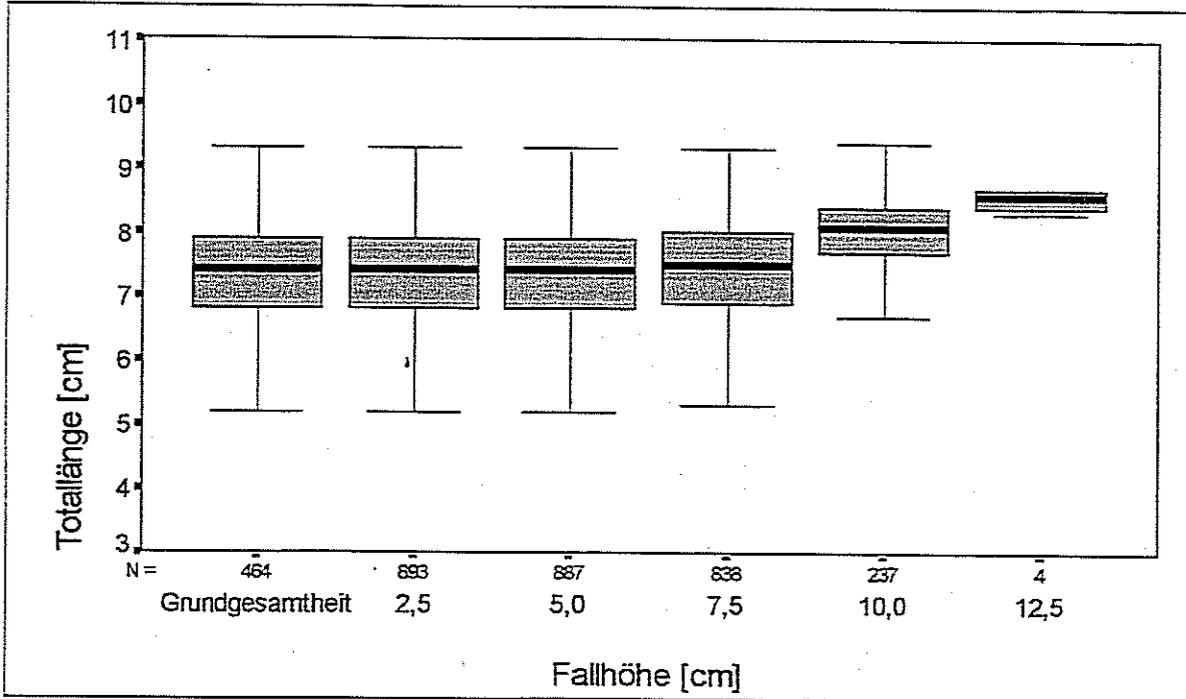


Abb. 3.4.5.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

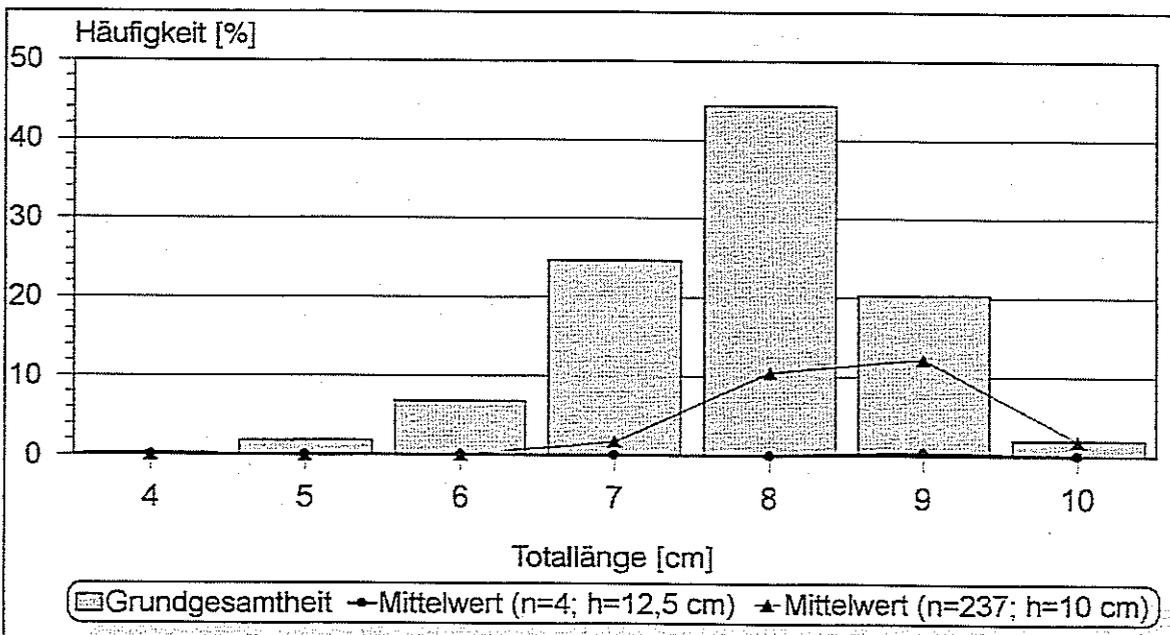


Abb. 3.4.5.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei maximalen Wasserspiegeldifferenzen zwischen Ober- und Unterwasser von 10 cm bzw. 12,5 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm].

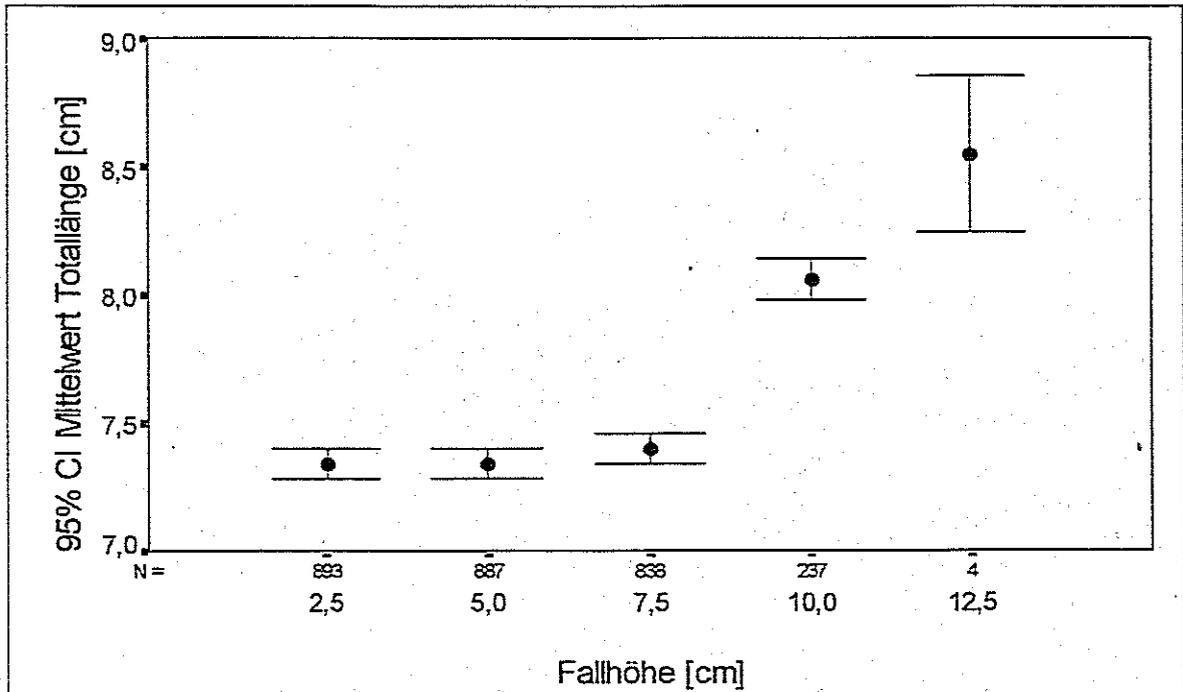


Abb. 3.4.5.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

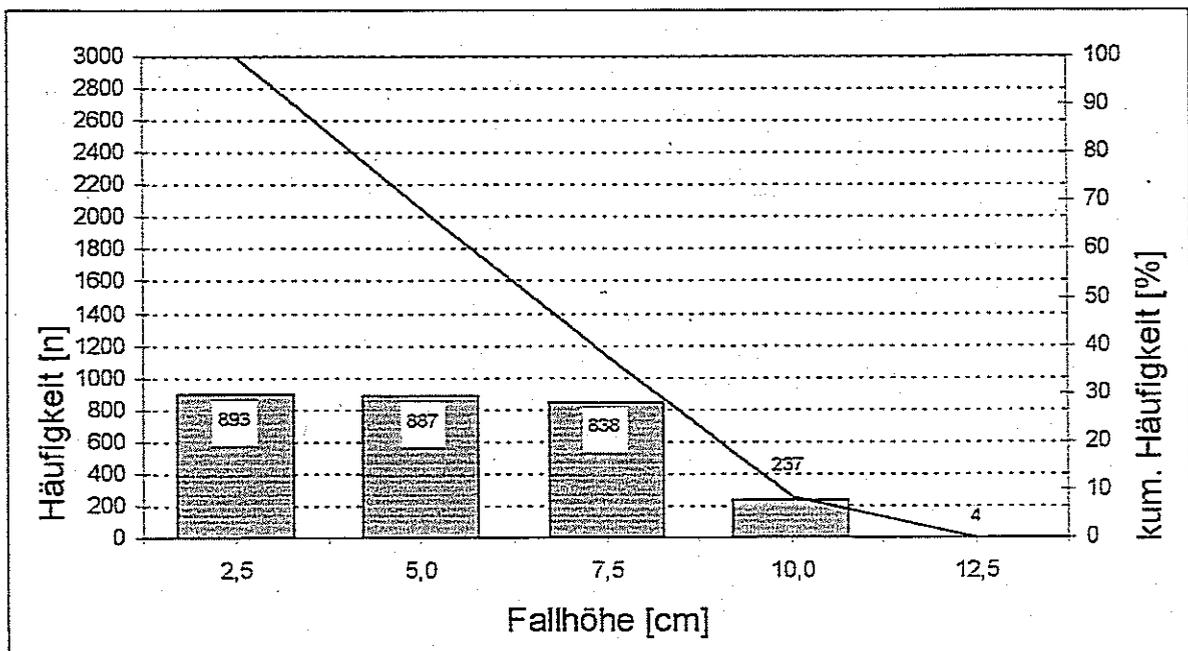


Abb. 3.4.5.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.4.6 „Verrohrung“



Verschiedene Befüllungszustände einer Verrohrung (halbvoll, voll) kombiniert mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zeigen im Bereich von $v \leq 0,75$ m/s hohe Erfolgsquoten bei aufwärts wandernden Elritzen von jeweils über 90%. Erst bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s differenzieren sich die Ergebnisse deutlicher: 65,4% (stückbezogen) der Elritzen durchwandern die gefüllte Verrohrung, während sich die Erfolgsrate bei nur halb gefülltem Rohr mit durchschnittlich 15,2% (stückbezogen) als relativ bescheiden ausweist (Tab. 3.4.6.1, Abb. 3.4.6.1).

Vergleicht man die Daten aus den durchgeführten Versuchen in der Fließrinne mit denen der Verrohrung in gefülltem Zustand ergeben sich daraus nur minimale quantitative Abweichungen über das gesamte Strömungsprofil (Abb. 3.4.6.2a). Die Versuche mit einer nur halb gefüllten Verrohrung erbringen im Bereich $v \leq 0,75$ m/s ähnliche Ergebnisse, bei einer höheren Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s dagegen wandern mehr Elritzen in der Fließrinne aufwärts (Abb. 3.4.6.2b). Dies läßt sich eventuell auf das größere Profil der Fließrinne und damit auf den größeren Wasserkörper zurückführen als in der halb gefüllten Verrohrung. Bei vielen Versuchen konnte beobachtet werden, daß Elritzen öfters kollektiv im Schwarm wandern als individuell zu migrieren. Da ein Schwarm größere räumliche Ansprüche an die Umgebung stellt als Einzeltiere könnte dies als mögliche Ursache für das obige Ergebnis gesehen werden.

Analog zu den Ergebnissen aus den Strömungsversuchen ändern sich sowohl bei gefüllter als auch bei nur halb gefüllter Verrohrung weder die medianen, minimalen noch maximalen Totallängen der Versuchsfische bei Strömungsgeschwindigkeiten bis $v \leq 0,75$ m/s. Erst ab einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s zeigen sich Defizite in den Längenklassen der kleineren Individuen (Abb. 3.4.6.3a, Abb. 3.4.6.3b).

Ist der Befüllungszustand der Verrohrung maximal, wandern die Elritzen bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s in großen Abundanzen und proportional ihrer Präsenz in der Grundgesamtheit, wobei die Längenklassen 9 cm und 10 cm allerdings äußerst stark vertreten sind (Abb. 3.4.6.4a). Im Gegensatz dazu migrieren bei halbem Wasserstand und gleicher Fließgeschwindigkeit nur wenige Individuen der Längenklassen 8 cm bis 10 cm durch die Verrohrung aufwärts (Abb. 3.4.6.4b).

Bezogen auf das gesamte Strömungsprofil stimmen die Werte der mittleren Totallänge (95% CI) für beide Befüllungszustände und für den Fließgeschwindigkeitsbereich $v \leq 0,75$ m/s in hohem Maße überein. Erst bei $v = 1,0$ m/s bestätigt sich der obige Sachverhalt nochmals, wobei sich bei halber Befüllung der Verrohrung das Längenspektrum der gewanderten Elritzen auf die größeren Exemplare beschränkt (Abb. 3.4.6.5a, Abb. 3.4.6.5b).

Die Abfolge der kumulierten Häufigkeiten ergibt in beiden Fällen, daß ca. 70% der Individuen bis zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit von $v \leq 0,5$ m/s durch die Verrohrung wandern (Abb. 3.4.6.6a, Abb. 3.4.6.6b).

→ **FAZIT:**

Bis zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit von $v \leq 0,75$ m/s sind in einer Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) bei einer Wasserhöhe von $t \geq 12,5$ cm keine Einbußen in der Zusammensetzung der verschiedenen Größenklassen bei aufwärts wandernden Elritzen zu erwarten. Der Befüllungszustand der Verrohrung sollte dabei ein Maximalmaß annehmen. Hierbei müssen in der Praxis allerdings die technischen Sicherheitsreserven bei Hochwasserabflüssen beachtet werden.

Unter rein quantitativen Aspekten sind Fließgeschwindigkeiten in Verrohrungen von $v \leq 0,5$ m/s wünschenswert, ebenfalls bei maximalen Befüllungszuständen.

Tab. 3.4.6.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]/Mächtigkeit der Wassersäule [cm]/Verrohrung“										
	[m/s]	0,25 [*]	0,5 [*]	0,75 [*]	1,0 [*]	1,0 [*]	1,0 [*]	0,25 ^{**}	0,5 ^{**}	0,75 ^{**}	1,0 ^{**}
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		453	452	444	70	86	53	456	450	447	300
Stück [%]		98,5	98,3	96,5	15,3	18,7	11,5	99,3	98,0	97,4	65,4
Biomasse [g]		1618	1614	1589	357	447	276	1611	1606	1580	1209
Biomasse [%]		99,4	99,2	97,9	22,0	27,5	17,0	99,3	99,0	97,4	74,5
Länge Minimum [cm]		3,6	3,6	3,6	6,8	7,1	7,1	3,6	3,6	3,6	6,0
Länge Maximum [cm]		9,8	9,8	9,8	9,7	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8	9,8
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	3	3	3	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		10	10	10	9	10	10	10	10	10	9

*Wasserstand in der Verrohrung $\cong 12,5$ cm

**Wasserstand in der Verrohrung $\cong 25$ cm

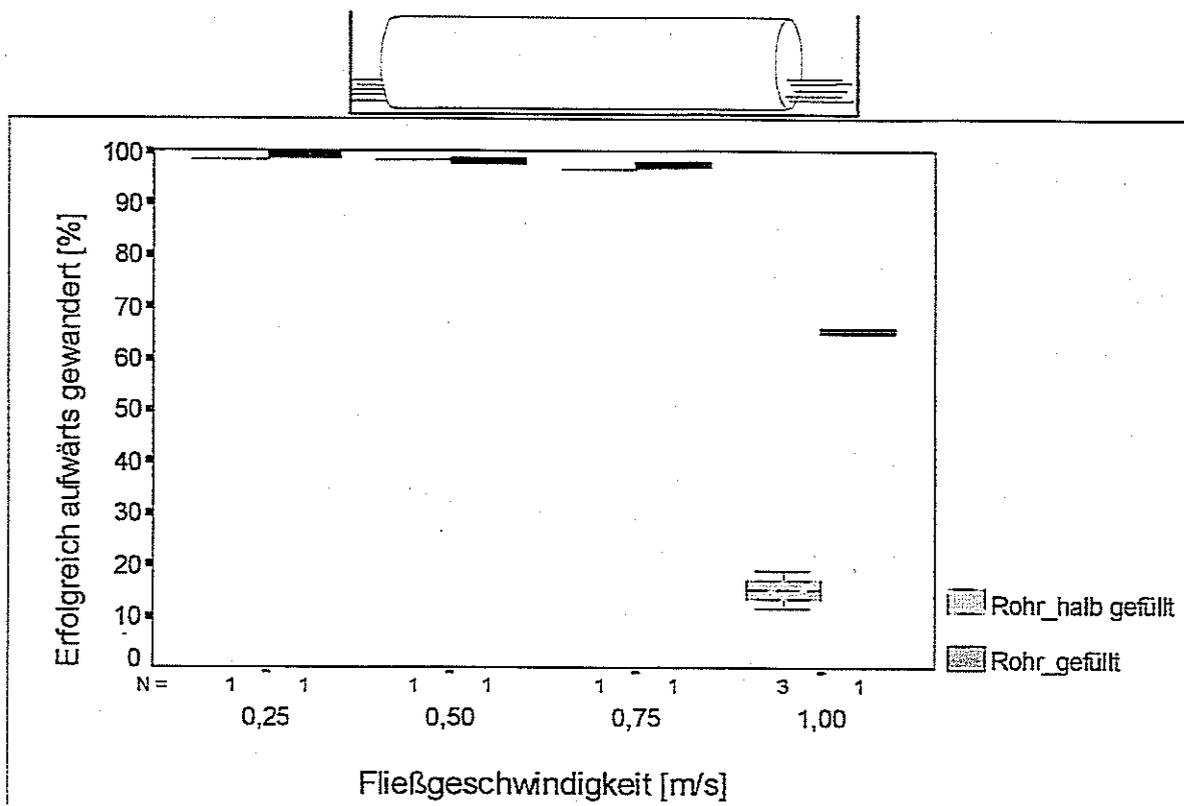


Abb. 3.4.6.1: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

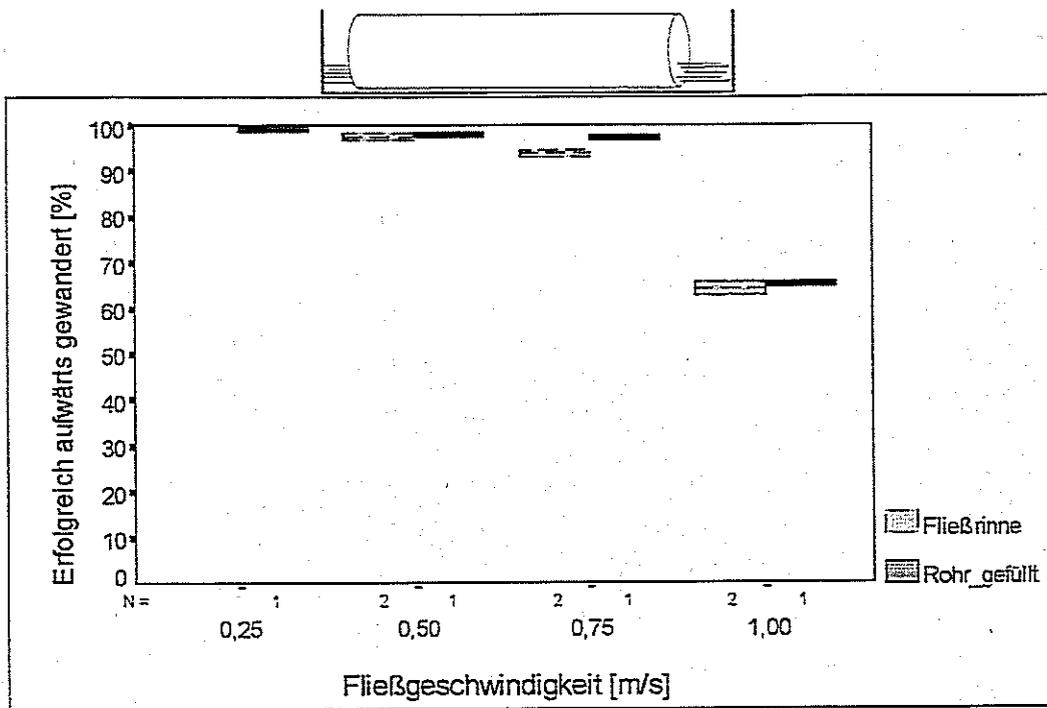


Abb. 3.4.6.2a: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) in der Fließrinne (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; keine Substratauflage) und in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm, ganz gefüllt) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

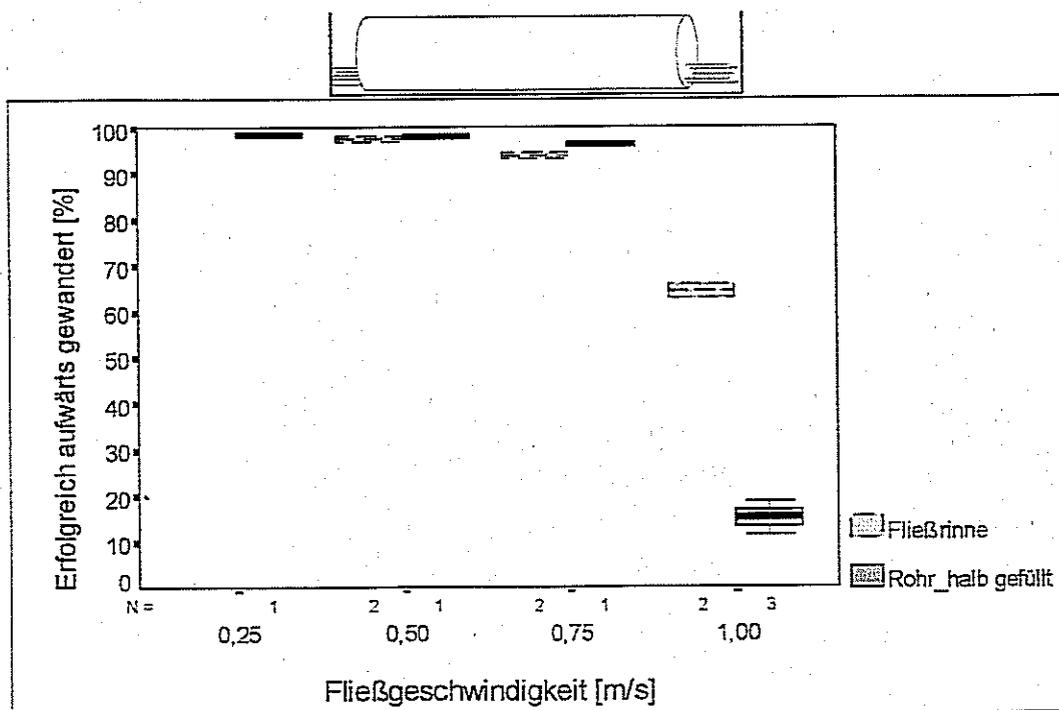


Abb. 3.4.6.2b: Relative Aufwärtswanderungen von Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) in der Fließrinne (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; keine Substratauflage) und in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm, halb gefüllt) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

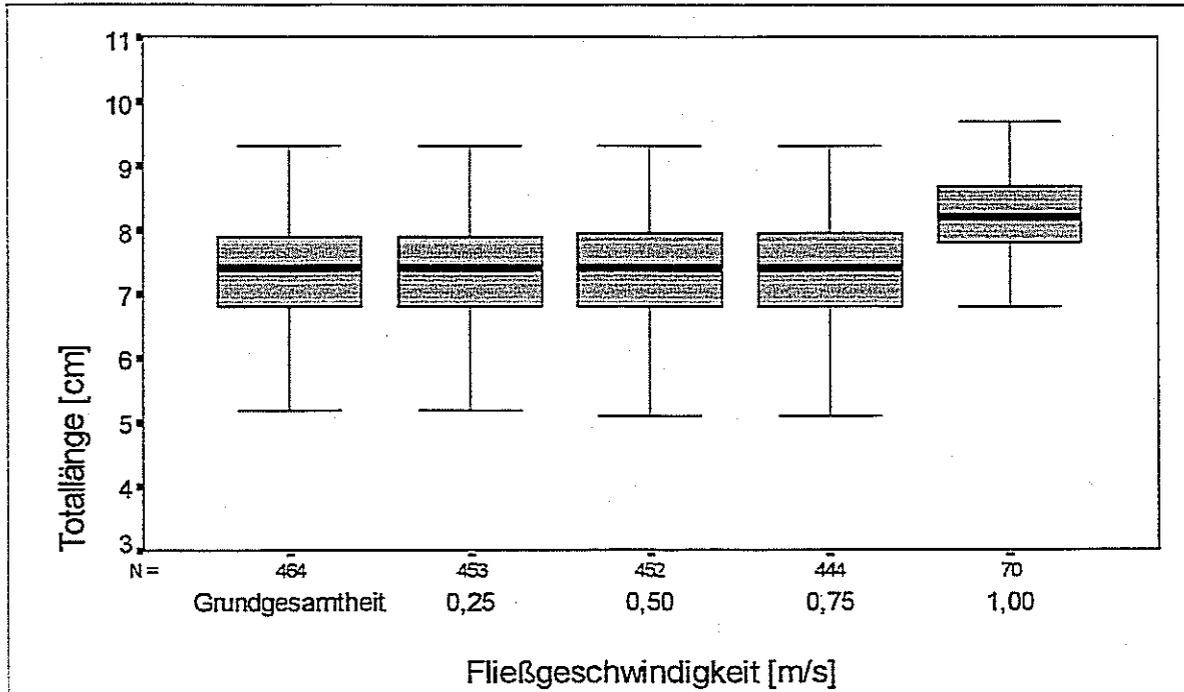


Abb. 3.4.6.3a: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

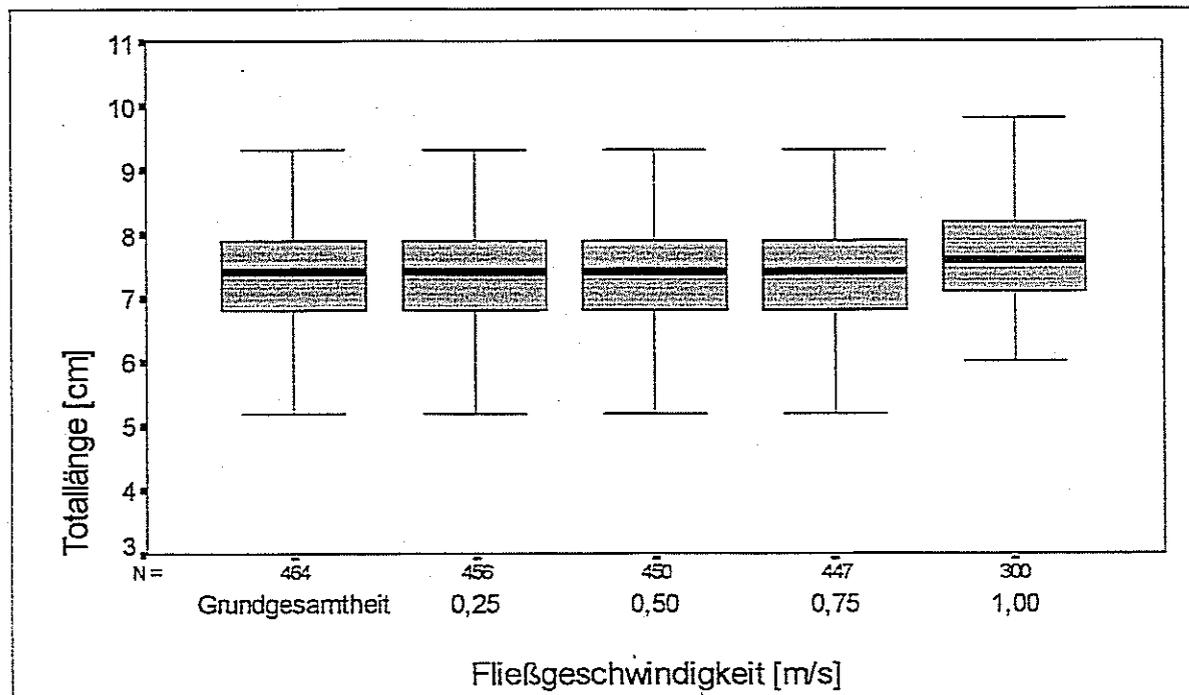


Abb. 3.4.6.3b: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

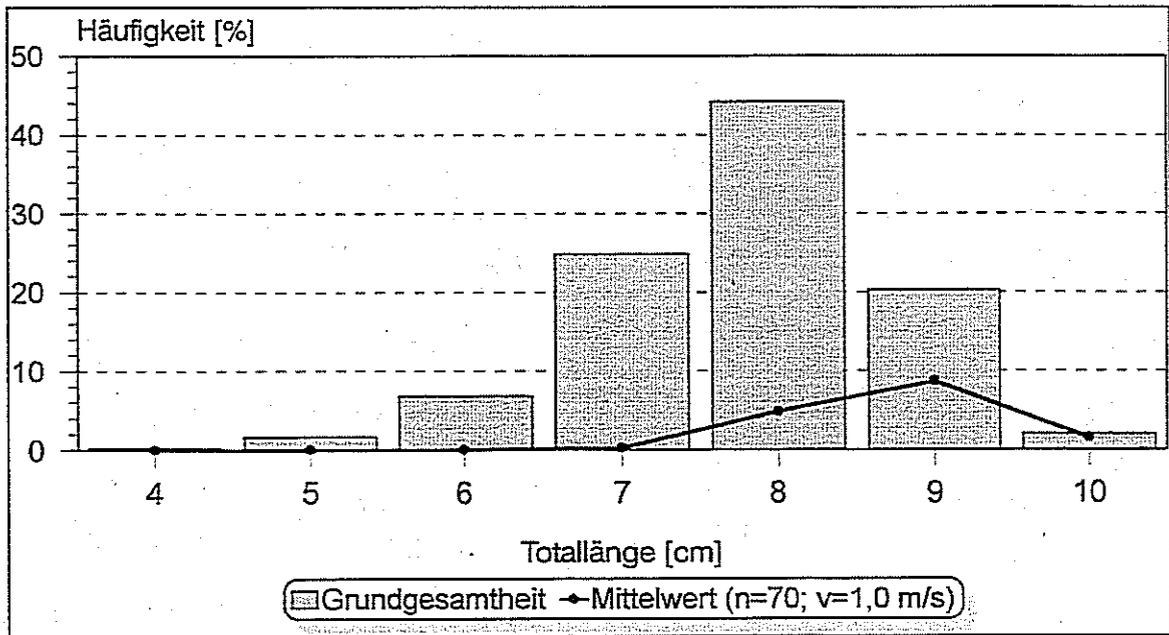


Abb. 3.4.6.4a: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s.

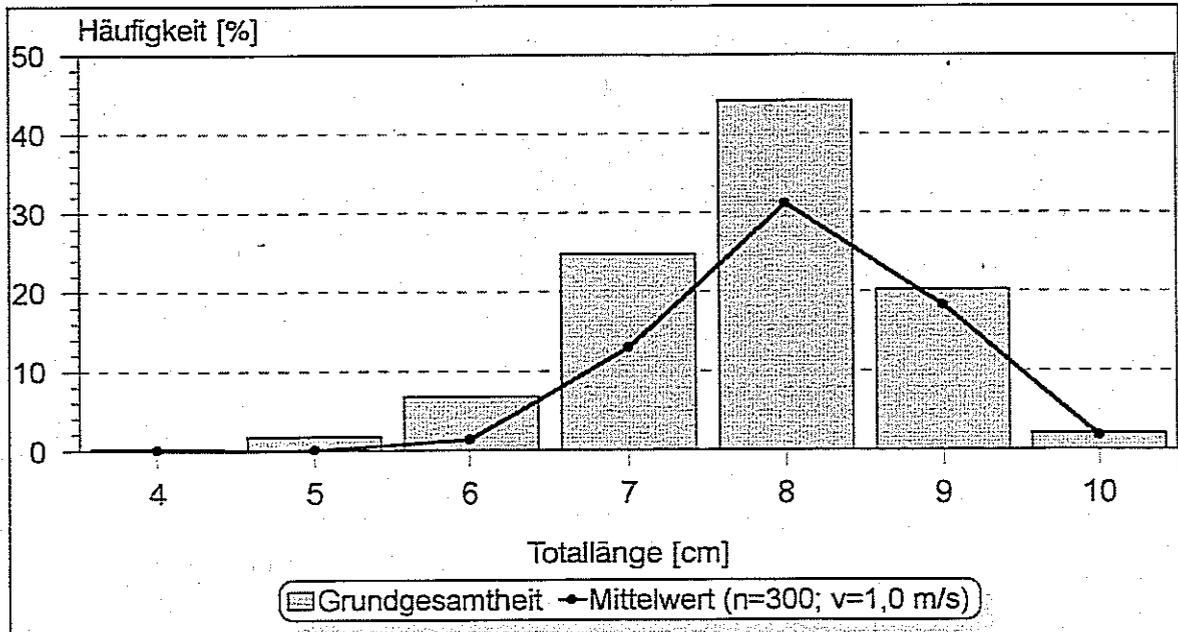


Abb. 3.4.6.4b: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s.

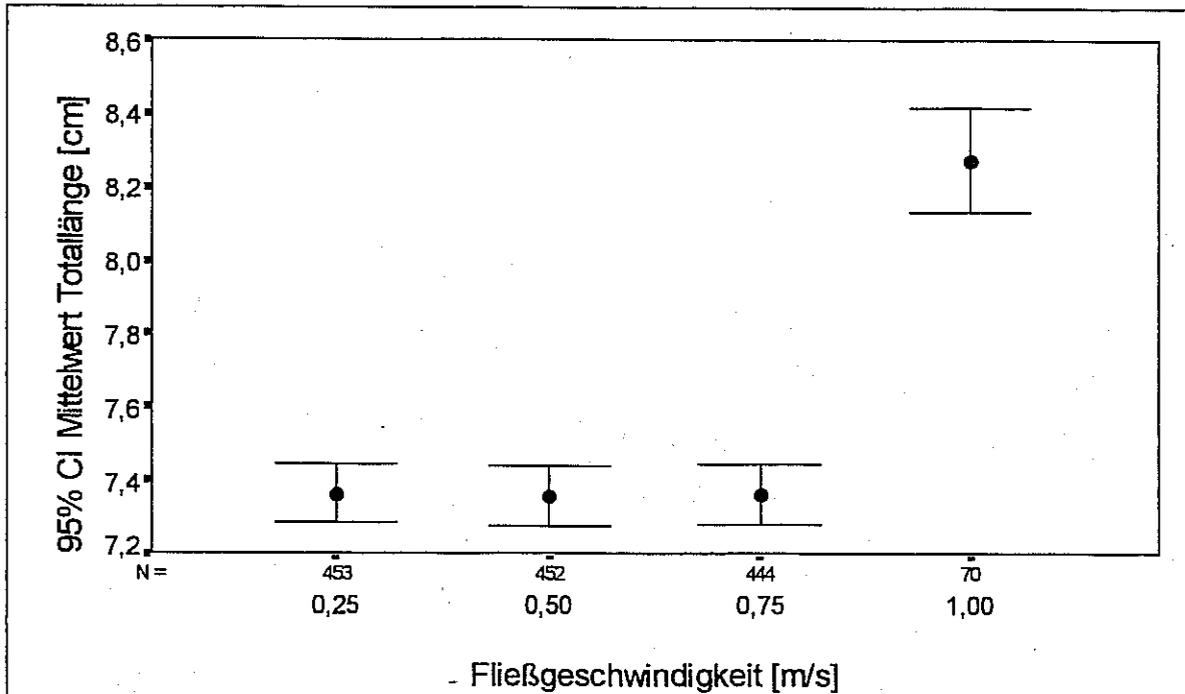


Abb. 3.4.6.5a: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

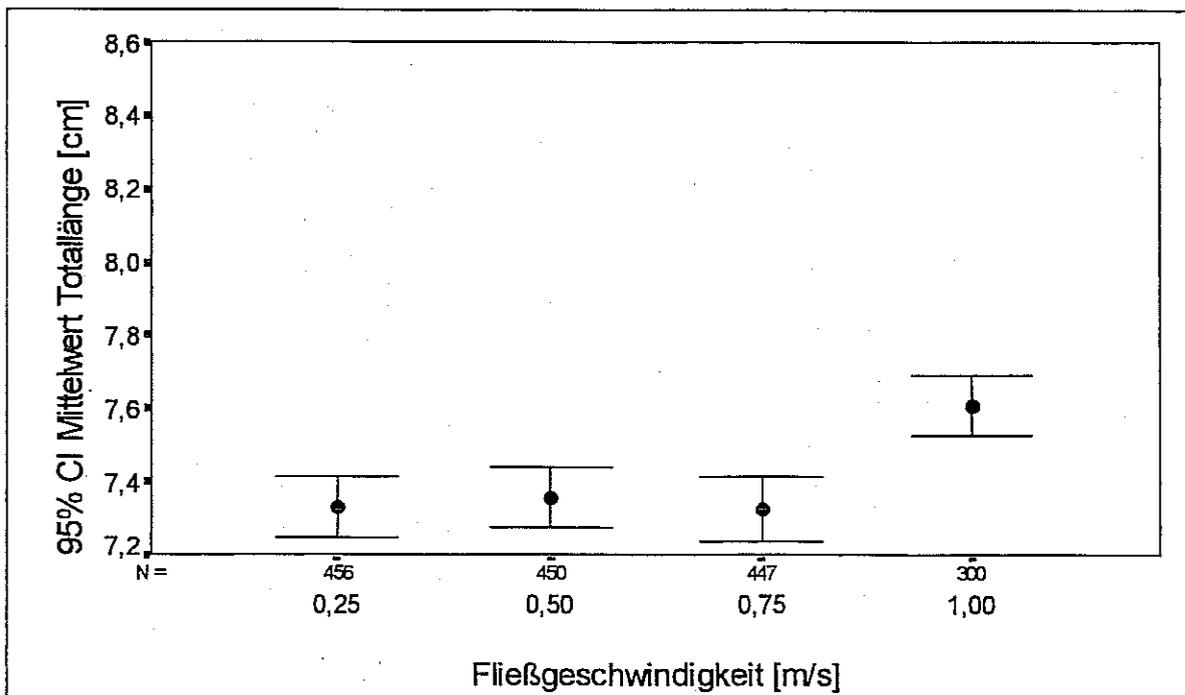


Abb. 3.4.6.5b: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

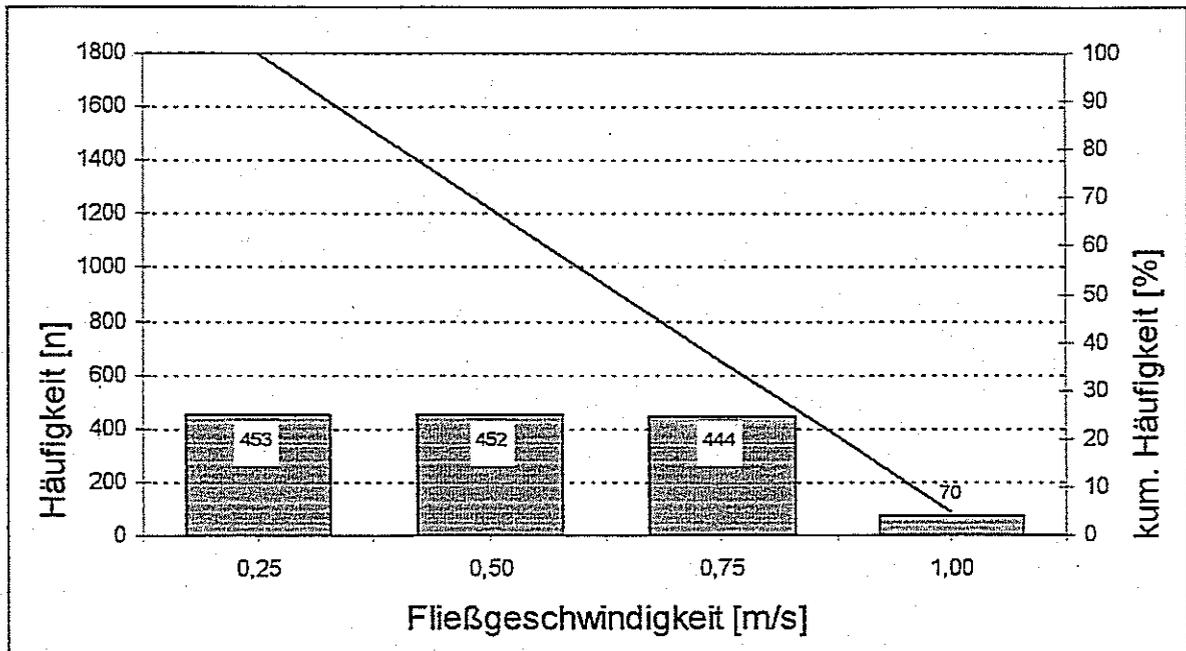


Abb. 3.4.6.6a: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

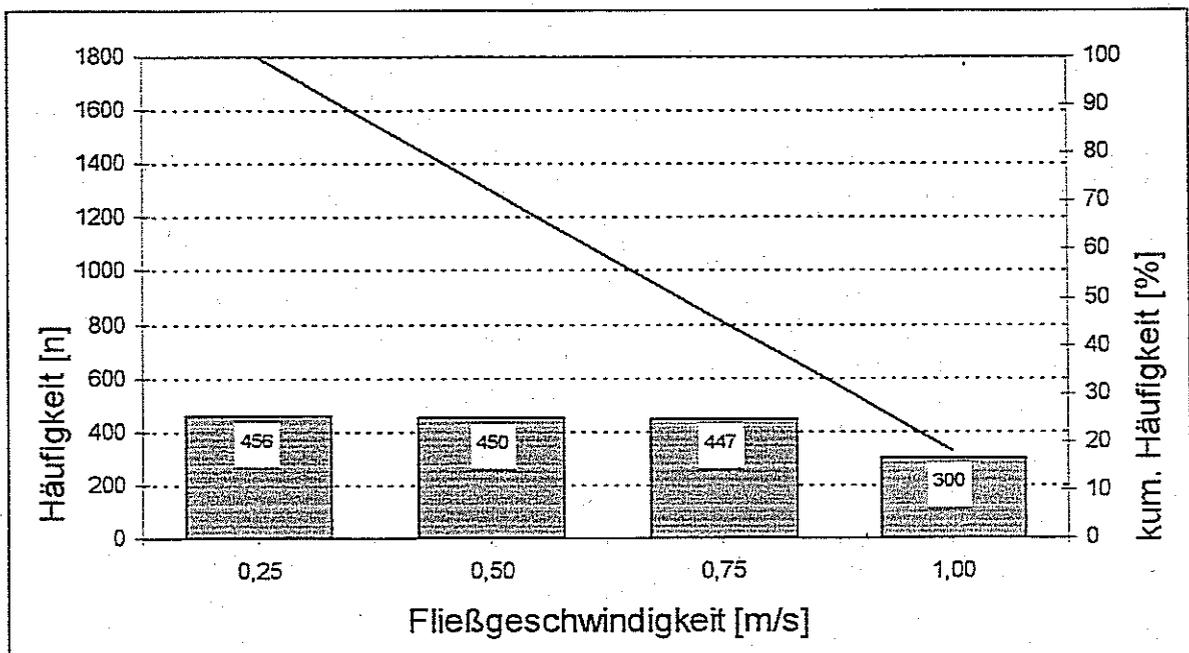
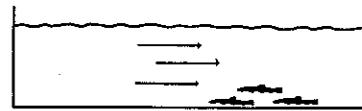


Abb. 3.4.6.6b: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5 Migrationsversuche mit Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*)

3.5.1 „Strömung“ (v)



Wie bei der Elritze mußte auch bei der Bachschmerle auf Grund einer hohen Sterblichkeit mit zwei verschiedenen Chargen von Versuchsfischen gearbeitet werden (Grundgesamtheit I und II). Abgleichend wurden beide Gruppen einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s ausgesetzt. Ein gravierender Unterschied im mittleren Aufstiegserfolg beider Chargen besteht nicht. Sowohl die Ergebnisse in der relative Stückzahl als auch in der nach oben gewanderten relative Biomasse liegen nahe am durchschnittlichen Wert von 81,9% (Stück) bzw. 84,5% (Biomasse).

Werden alle strömungsbezogenen Daten gepoolt, ergibt sich im Bereich bis $v \leq 0,9$ m/s eine allmähliche Abnahme in der Wanderungsrate von knapp 95% auf durchschnittlich 76,9%. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten fallen die Erfolgsquoten allerdings auf ein äußerst niedriges Niveau von weniger als 15%. Nur noch einige wenige Exemplare erreichen schließlich den oberen Behälter bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,7$ m/s (Tab. 3.5.1.1a, Tab. 3.5.1.1b, Abb. 3.5.1.1).

Im Vergleich zu den beiden Grundgesamtheiten wandert im Bereich von $v \leq 0,9$ m/s etwa ein und dasselbe Längenspektrum an Fischen. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten selektieren hauptsächlich die unteren Längensklassen heraus. Bei Werten von $v = 1,7$ m/s stellen darüber hinaus auch noch die ganz großen Exemplare die Wanderung ein (Abb. 3.5.1.2). In diesem für die Fische extremen Strömungsbereich sind nur die Größenklassen 8 cm bis 10 cm an der aufwärts gerichteten Wanderung beteiligt (Abb. 3.5.1.3).

Auch die mittlere Totallänge (95% CI) der Versuchsfische steigt mit zunehmender Strömung an, besonders deutlich ab Werten von $v > 0,9$ m/s (Abb. 3.5.1.4). Beim Versuch mit $v = 1,2$ m/s wanderten Exemplare aus der Grundgesamtheit II mit scheinbar deutlich höheren mittleren Totallängen. Dies relativiert sich allerdings wieder, wenn die gewanderten Fische dieses Versuches in Relation zu den potentiell möglichen gesetzt werden. Dann zeigt sich eine ähnliche Beteiligung der Längensklassen wie bei denjenigen aus den Versuchen mit $v \geq 1,5$ m/s mit Fischen aus der Grundgesamtheit I.

Bei Betrachtung der kumulierten Häufigkeiten läßt sich sagen, daß bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,5 \leq v \leq 0,75$ m/s etwa 70% der erfolgreich nach oben gewanderten Bachschmerlen vertreten sind (Abb. 3.5.1.5).

→ **FAZIT:**

Eine Strömungsgeschwindigkeit von $v \leq 0,9$ m/s dürfte bei der aufwärts gerichteten Migration von Bachschmerlen zu keinerlei Einbußen im Längenspektrum führen. Sollen allerdings unter rein quantitativen Aspekten mehr als 70% der Fische aufwärts wandern, darf die Fließgeschwindigkeit keinesfalls höher als $v = 0,75$ m/s sein.

Tab. 3.5.1.1a: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) [Grundgesamtheit I] bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)								
	[m/s]	0,5	0,5	0,9	0,9	1,5	1,5	1,7	1,7
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		101	102	99	98	12	13	5	6
Stück [%]		80,2	82,9	76,7	77,2	9,8	10,7	3,7	4,5
Biomasse [g]		418	425	393	349	59	66	23	26
Biomasse [%]		82,9	84,5	75,4	67,4	11,7	13,1	4,2	4,9
Länge Minimum [cm]		4,1	4,1	4,1	4,1	8,0	8,0	8,1	8,3
Länge Maximum [cm]		11,5	11,5	11,5	9,5	9,6	10,0	9,2	9,3
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	4	3	4	2
Gewicht Maximum [g]		11	11	11	7	6	7	6	5

Tab. 3.5.1.1b: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) [Grundgesamtheit II] bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)								
	[m/s]	0,1	0,1	0,5	0,5	0,75	0,75	1,2	1,2
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		74	73	69	67	67	65	13	12
Stück [%]		92,5	94,8	83,1	81,7	77,9	76,5	14,8	14,0
Biomasse [g]		347	342	324	315	321	308	75	64
Biomasse [%]		93,8	95,8	85,5	85,1	81,7	80,2	18,9	16,1
Länge Minimum [cm]		5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	8,2	8,3
Länge Maximum [cm]		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,7	10,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1	4	4
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	8	8	8	7	7

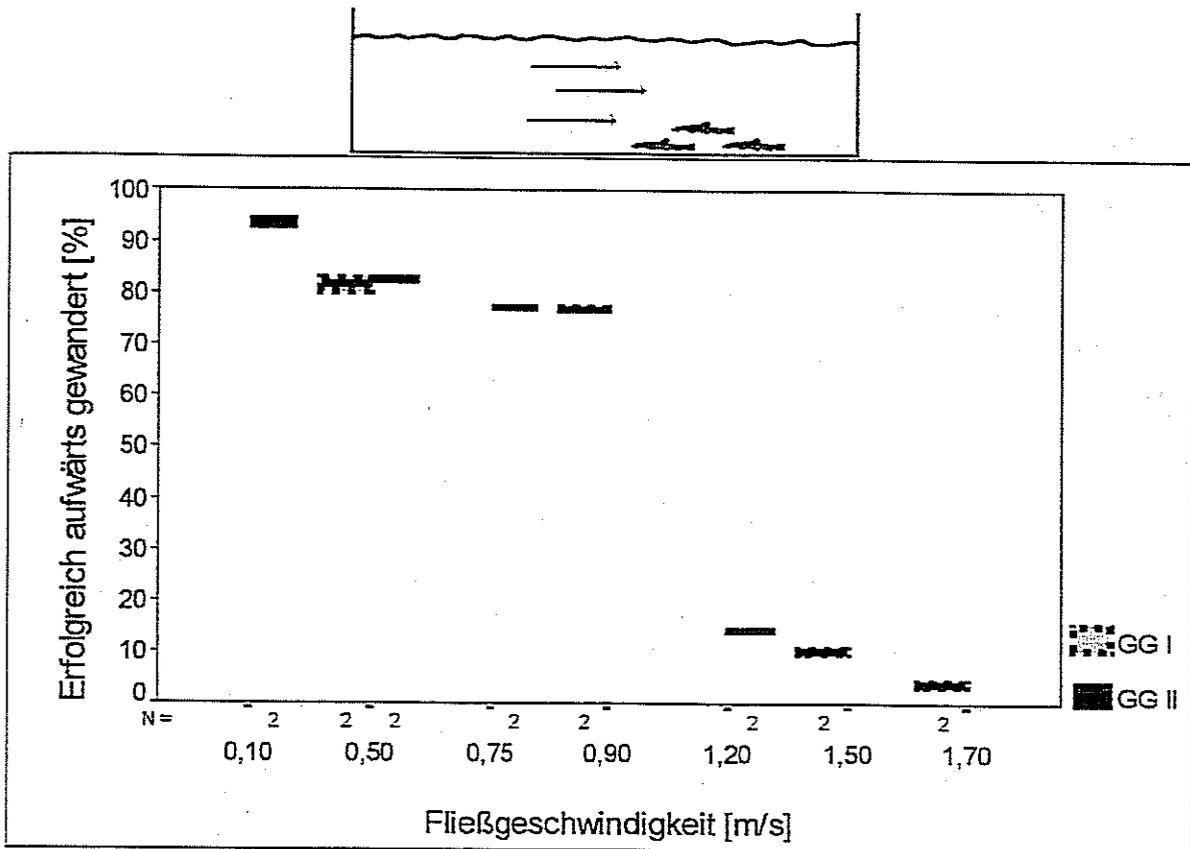


Abb. 3.5.1.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

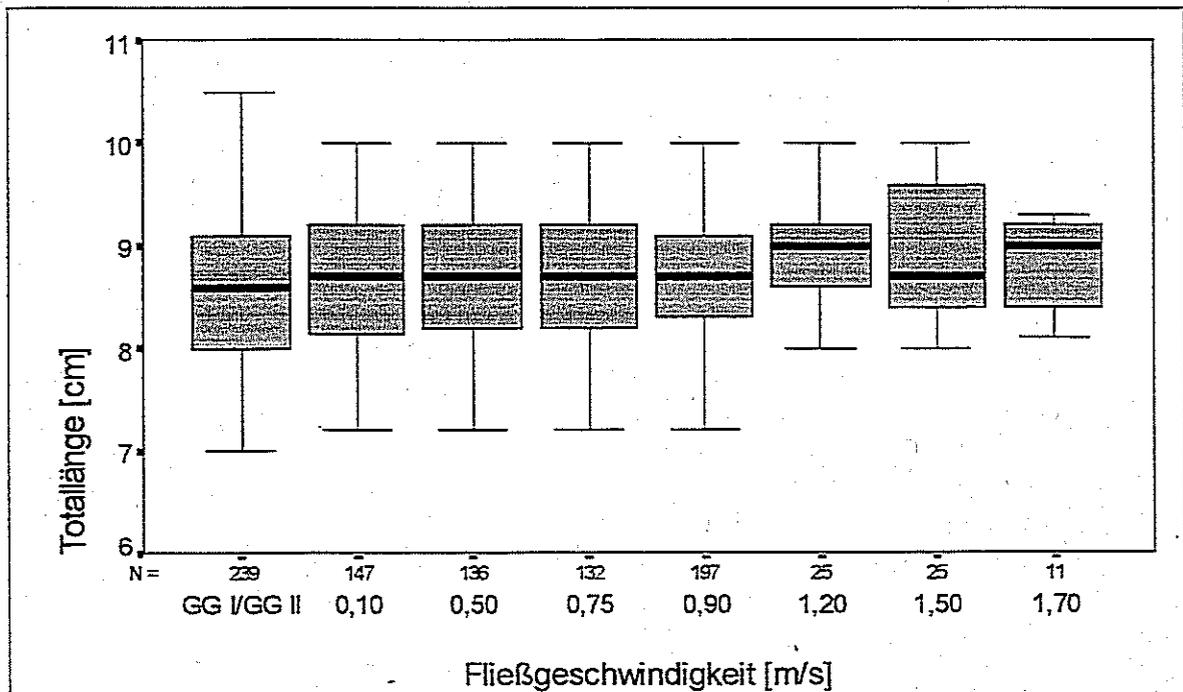


Abb. 3.5.1.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschrölen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

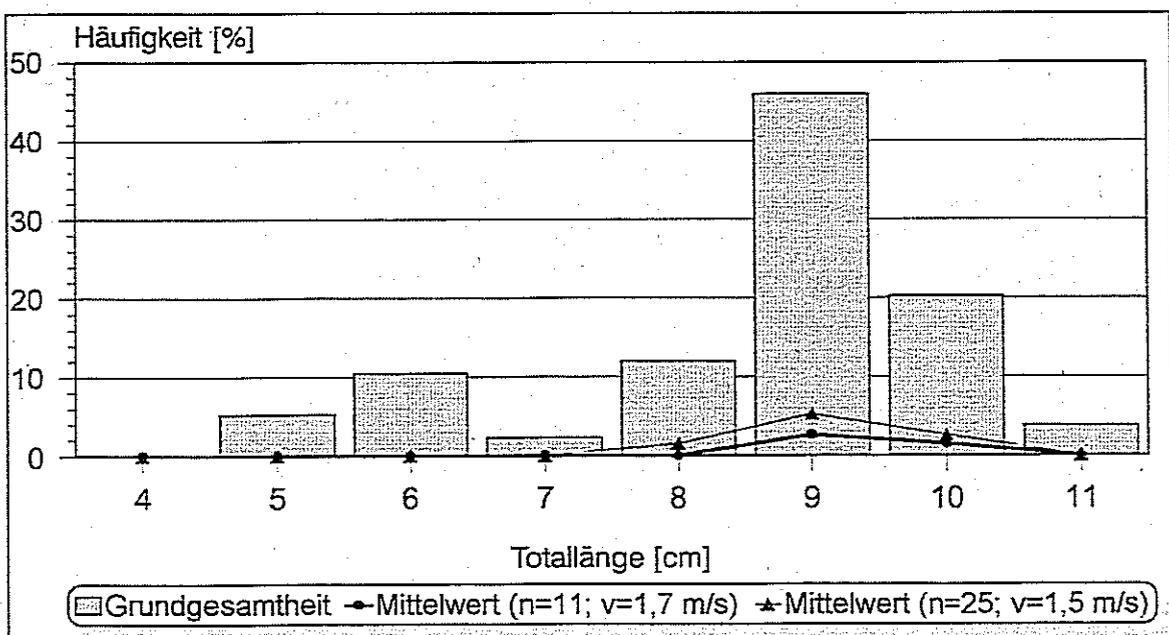


Abb. 3.5.1.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschrölen (*Barbatula barbatula*) bei maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von 1,5 m/s bzw. 1,7 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

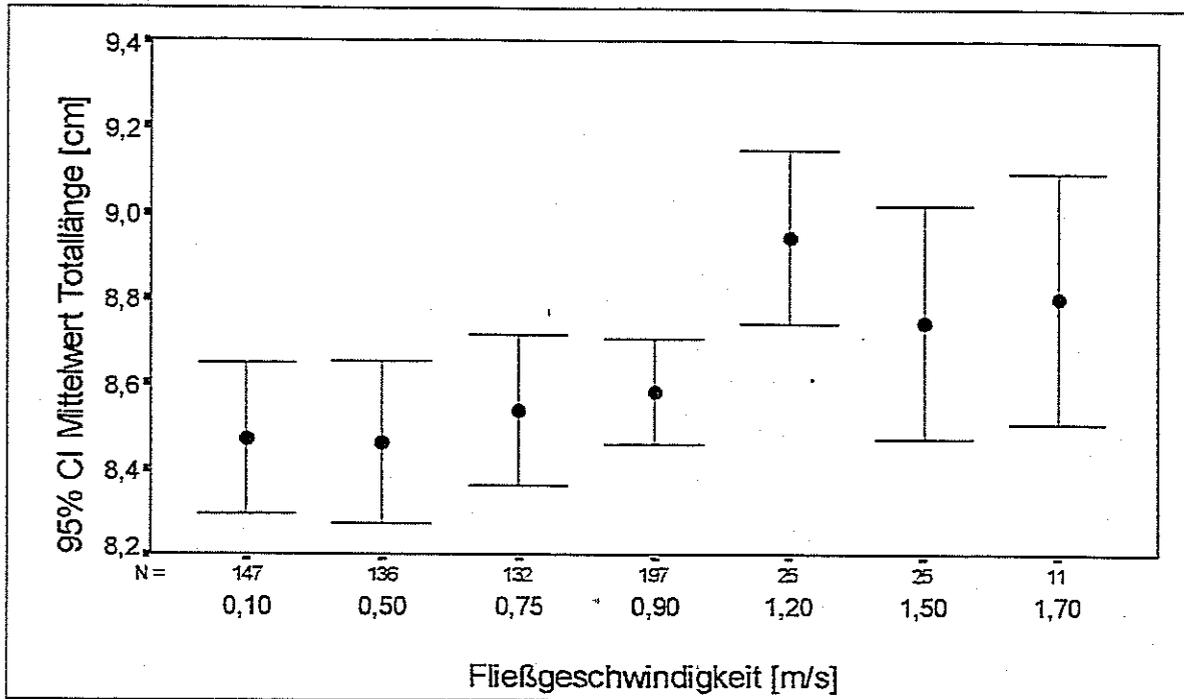


Abb. 3.5.1.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

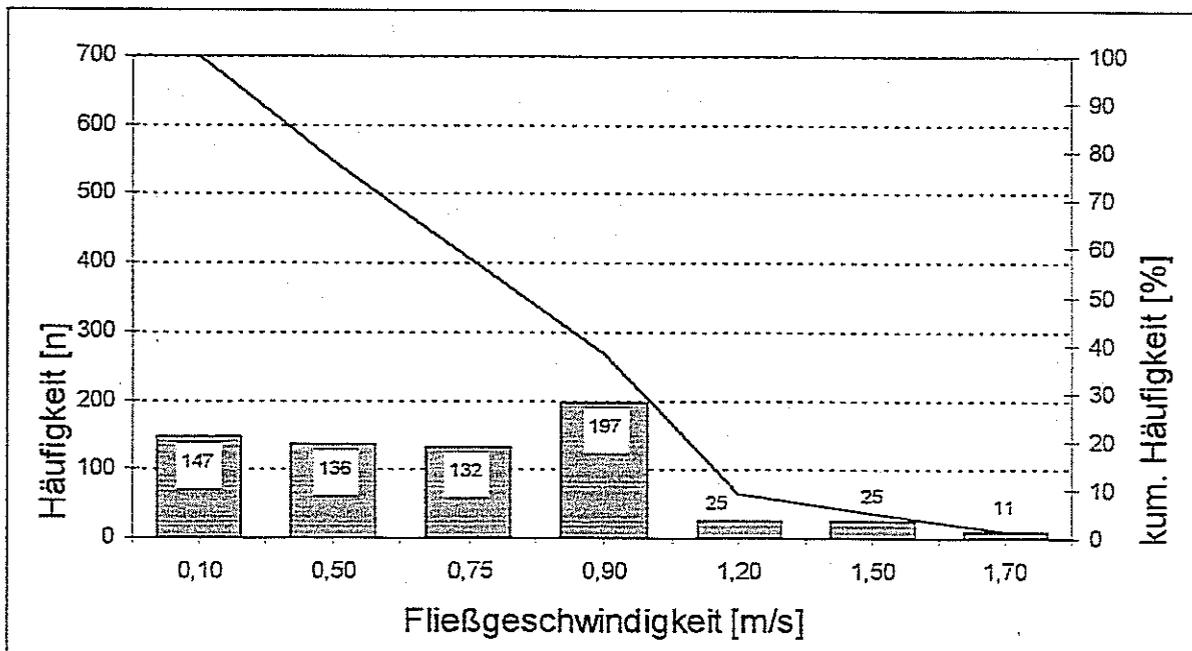


Abb. 3.5.1.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Daten gepoolt aus Grundgesamtheit I (GG I) und Grundgesamtheit II (GG II); Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.2 „Wassertiefe“ (Vertikale Mächtigkeit der Wassersäule; t)



Eine wiederholte Halbierung in der Mächtigkeit der Wassersäule von anfangs $t = 40$ cm auf $t = 5$ cm führt bei Bachschmerlen zu keiner nennenswerten Abnahme in der nach oben gerichteten Wanderungsrate (Tab. 3.5.2.1, Abb. 3.5.2.1). Die Erfolgsraten liegen dabei immer im Bereich über 90%, bei relativ geringen Schwankungsbreiten. Erst eine Verringerung in der Mächtigkeit der Wassersäule von $t = 5$ cm auf $t = 2,5$ cm erbringt niedrigere Erfolgsraten, die durchschnittlich bei 82,1% (stückbezogen) bzw. 87,1% (Biomasse) liegen.

Bezüglich der Längenspektren der gewanderten Bachschmerlen ergeben sich für den Tiefenbereich zwischen $5 \leq t \leq 40$ cm keinerlei Abweichungen verglichen mit der Grundgesamtheit. Bei einer Mächtigkeit der Wassersäule von $t = 2,5$ cm liegen allerdings geringere mediane Werte der Totallängen vor (Abb. 3.5.2.2). Dies bedeutet, daß bei dieser minimalen Wassertiefe aus quantitativer Sicht mehr kleinere Exemplare aufwärts gewandert sind.

Für diese defizitäre Migrationsrate der oberen Längensklassen kommen fast ausschließlich Fische zwischen 8 cm und 10 cm in Frage (Abb. 3.5.2.3).

Abb. 3.5.2.4 zeigt, daß die mittleren Totallängen der aufwärts gewanderten Bachschmerlen erst ab einer Wassertiefe von $t \leq 5$ cm abnehmen.

Bei den nach oben gewanderten Bachschmerlen ergibt die Abfolge der kumulierten Häufigkeiten ein Erfolgspotential von 70% bei einer Mächtigkeit der Wassersäule im Bereich zwischen $t = 10$ cm und $t = 20$ cm (Abb. 3.5.2.5).

→FAZIT:

Liegt im Gewässer eine Mächtigkeit der Wassersäule von mindestens $t = 10$ cm vor (bei gleichzeitig niedriger Fließgeschwindigkeit), so stellt dies für aufwärts wandernde Bachschmerlen keinerlei Migrationsbarriere dar, weder aus quantitativer Sicht, noch für die verschiedenen Größenklassen dieser Fischart.

Tab. 3.5.2.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20	40	40
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		33	33	42	41	46	43	47	49	49	49
Stück [%]		75,0	89,2	91,3	91,1	90,2	91,5	92,2	96,1	92,5	96,1
Biomasse [g]		136	141	193	187	213	204	219	233	229	232
Biomasse [%]		85,5	88,7	91,5	91,7	96,4	94,4	89,8	95,5	93,9	95,1
Länge Minimum [cm]		5,3	5,3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Länge Maximum [cm]		9,6	9,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		6	7	8	8	8	8	8	8	8	8

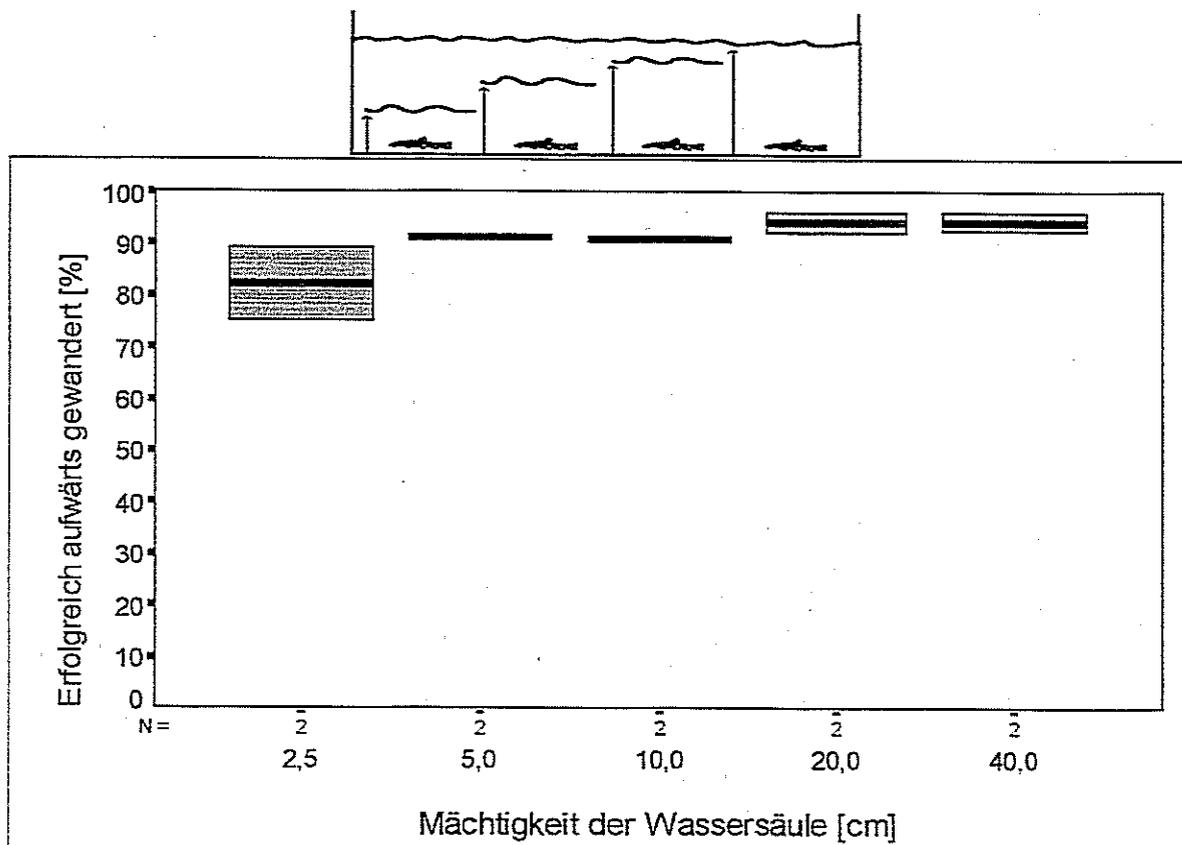


Abb. 3.5.2.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

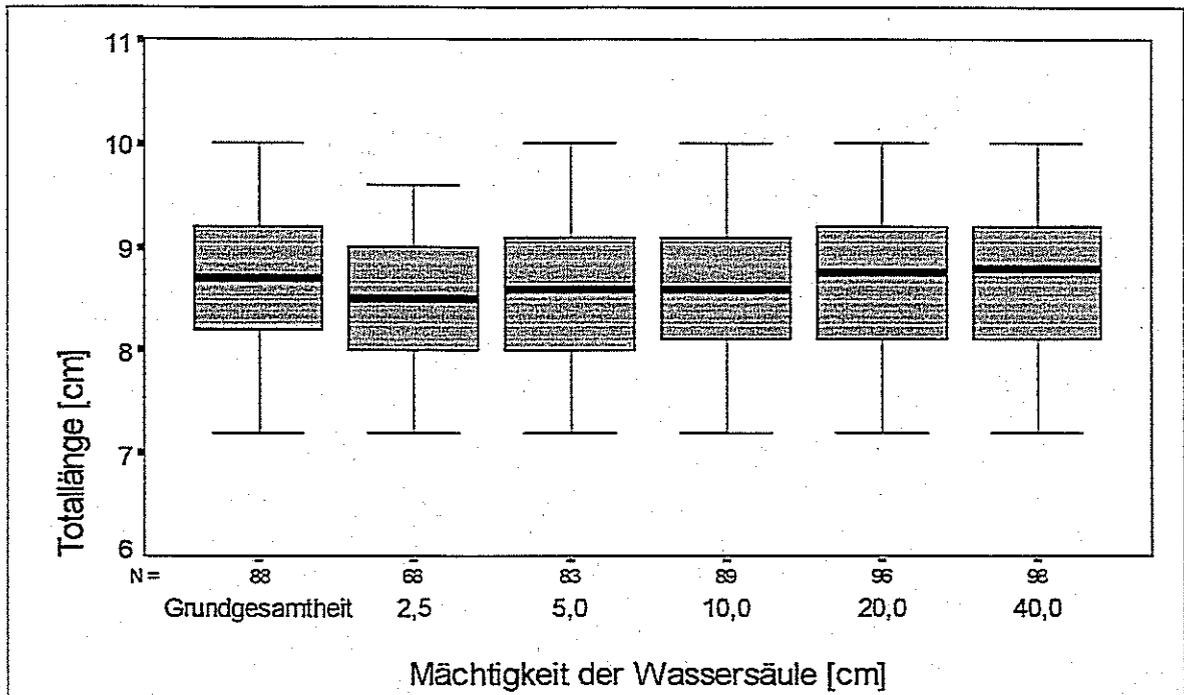


Abb. 3.5.2.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

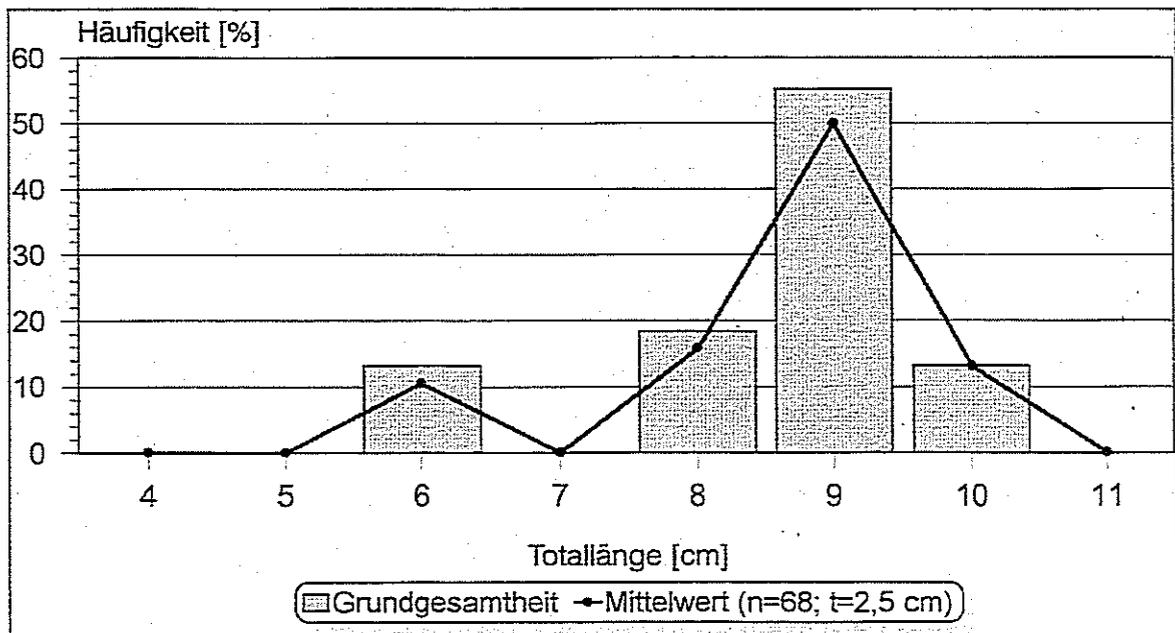


Abb. 3.5.2.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule von 2,5 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s].

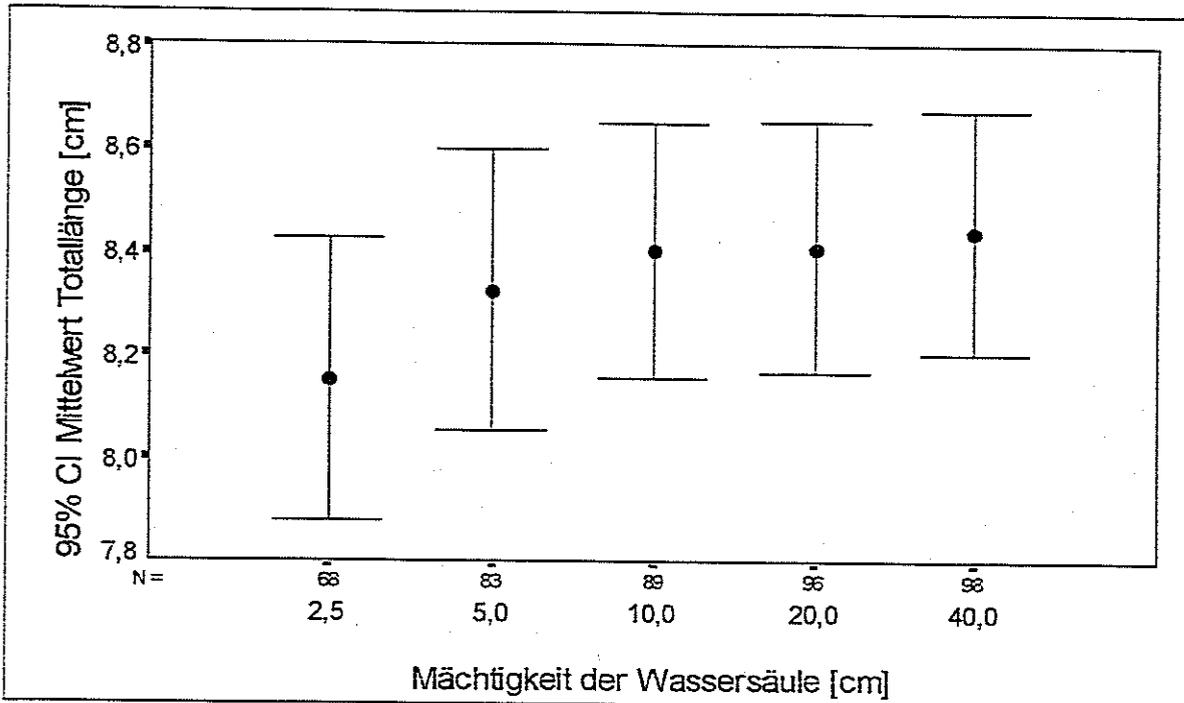


Abb. 3.5.2.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

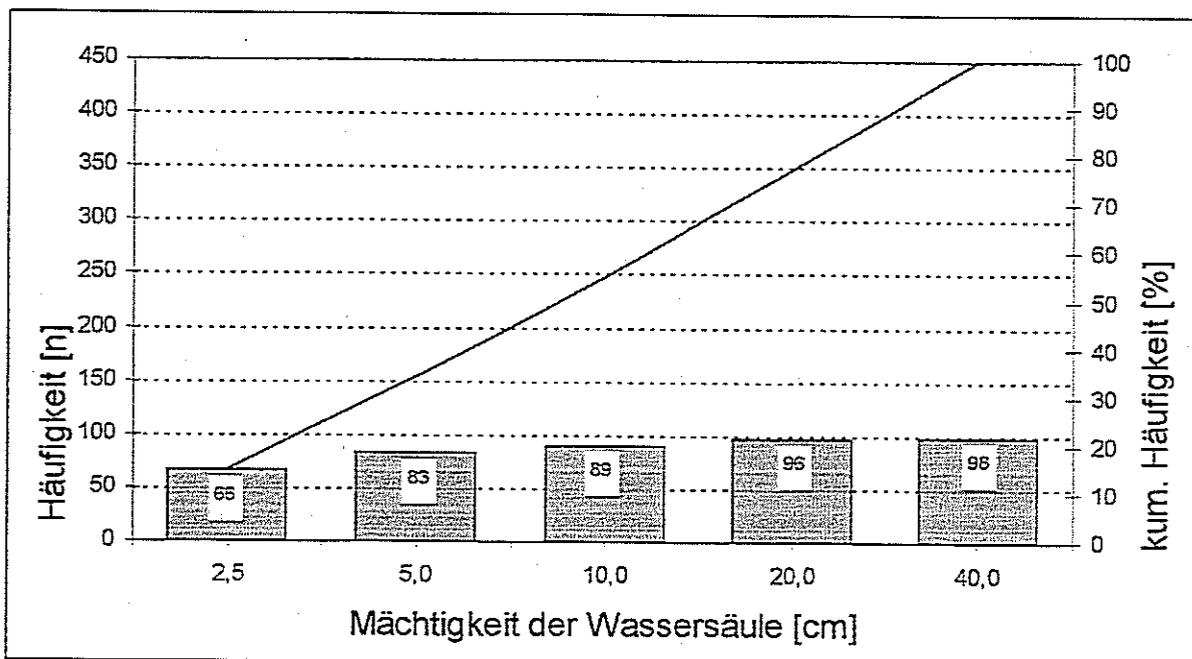
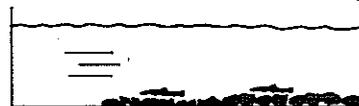


Abb. 3.5.2.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.3 „Bodensubstrate“



Ein Vergleich der Wanderungsbilanzen aus Versuchen mit kleinem (16 mm), großem (32 mm) und auch gänzlich ohne Substrat zeigt bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten von $v = 0,5$ m/s bzw. 1,0 m/s einen positiven Effekt des Substrates in höheren Wanderungsraten als in der bloßen Fließrinne. Die verschiedenen Substrate erbringen dabei einen zwischen 14,5% (16 mm) und 12,7% (32 mm) höheren stückbezogenen durchschnittlichen Wanderungserfolg im Vergleich zur Fließrinne ohne Substrat (Tab. 3.5.3.1.a, Tab. 3.5.3.1.b, Abb. 3.5.3.1). Hierbei ist auch ein leichter Gradient zwischen allen Versuchsansätzen entlang der Strömungsachse erkennbar. Vergleichend läßt sich daraus für die Fische eine gewisse Schutzfunktion des Substrates bei hohen Strömungswerten ableiten.

Bei beiden Substratgrößen ist bei den unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten keine Abweichung im Längenspektrum der aufwärts gewanderten Bachschmerlen gegenüber der Grundgesamtheit zu beobachten (Abb. 3.5.3.2a, Abb. 3.5.3.2b).

Ein Vergleich der Längenhäufigkeitsverteilungen der gewanderten Bachschmerlen bei den angebotenen Korngrößen und einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s läßt erkennen, daß die Versuchsfische in beiden Fällen in hohem Maße proportional ihrer Präsenz in der Grundgesamtheit gewandert sind. Bei größerem Substrat sind dabei geringfügig mehr Fische aus der Größenklasse 9 cm aufwärts gewandert (Abb. 3.5.3.3a, Abb. 3.5.3.3b).

Ähnliches zeigt der Vergleich der mittleren Totallängen (95% CI). Bei kleinem Substrat ergibt sich im Strömungsbereich von $0,5 \leq v \leq 1,0$ m/s kein deutlicher Unterschied der mittleren Totallängen. Hier wandert jeweils ein sehr ähnliches Längenspektrum. Es zeigt sich aber, daß für die schlanken Fische schon eine kleine Körnung des Substrates für die Aufwärtswanderung ausreichend ist. Demgegenüber wandern bei größerem Substrat scheinbar weitaus mehr der eher etwas größeren Exemplare aufwärts (Abb. 3.5.3.4a, Abb. 3.5.3.4b). Als eine Interpretationsmöglichkeit kommt hierbei in Frage, daß aus quantitativer Sicht die leicht größeren Exemplare für die Aufwärtswanderung prädestiniert scheinen.

Die kumulierten Häufigkeiten zum Erreichen des geforderten 70%-igen Wanderungserfolges liegen bei beiden Korngrößen bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,5$ m/s und $v = 1,0$ m/s (Abb. 3.5.3.5a, Abb. 3.5.3.5b).

→FAZIT:

Eine Wanderungsrate von ca. 70% und ein möglichst vollständiges Längenspektrum von erfolgreich aufwärts wandernden Bachschmerlen läßt sich erreichen, wenn Bodensubstrat vorhanden ist und dies mit einer Körnung von mindestens 16 mm. Gleichzeitig darf die gegebene Strömungsgeschwindigkeit aber keinesfalls größer als $v = 0,75$ m/s sein.

Tab. 3.5.3.1.a: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei kleiner Korngröße des Bodensubstrates (16 mm) und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Strömung [m/s]/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,5*	0,5*	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		101	102	146	146	137	131
Stück [%]		80,2	82,9	96,7	97,3	91,3	89,7
Biomasse [g]		418	425	608	617	569	551
Biomasse [%]		82,9	84,5	97,0	98,4	93,3	90,9
Länge Minimum [cm]		4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Länge Maximum [cm]		11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		11	11	11	11	11	11

*ohne Substrat

Tab. 3.5.3.1.b: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei großer Korngröße des Bodensubstrates (32 mm) und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Strömung [m/s]/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,9*	0,9*	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		99	98	130	124	133	130
Stück [%]		76,7	77,2	94,2	90,5	91,7	91,5
Biomasse [g]		393	349	535	512	556	541
Biomasse [%]		75,4	67,4	94,4	92,9	94,1	94,9
Länge Minimum [cm]		4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,5
Länge Maximum [cm]		11,5	9,5	11,5	11,5	11,5	11,5
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		11	7	11	11	11	11

*ohne Substrat

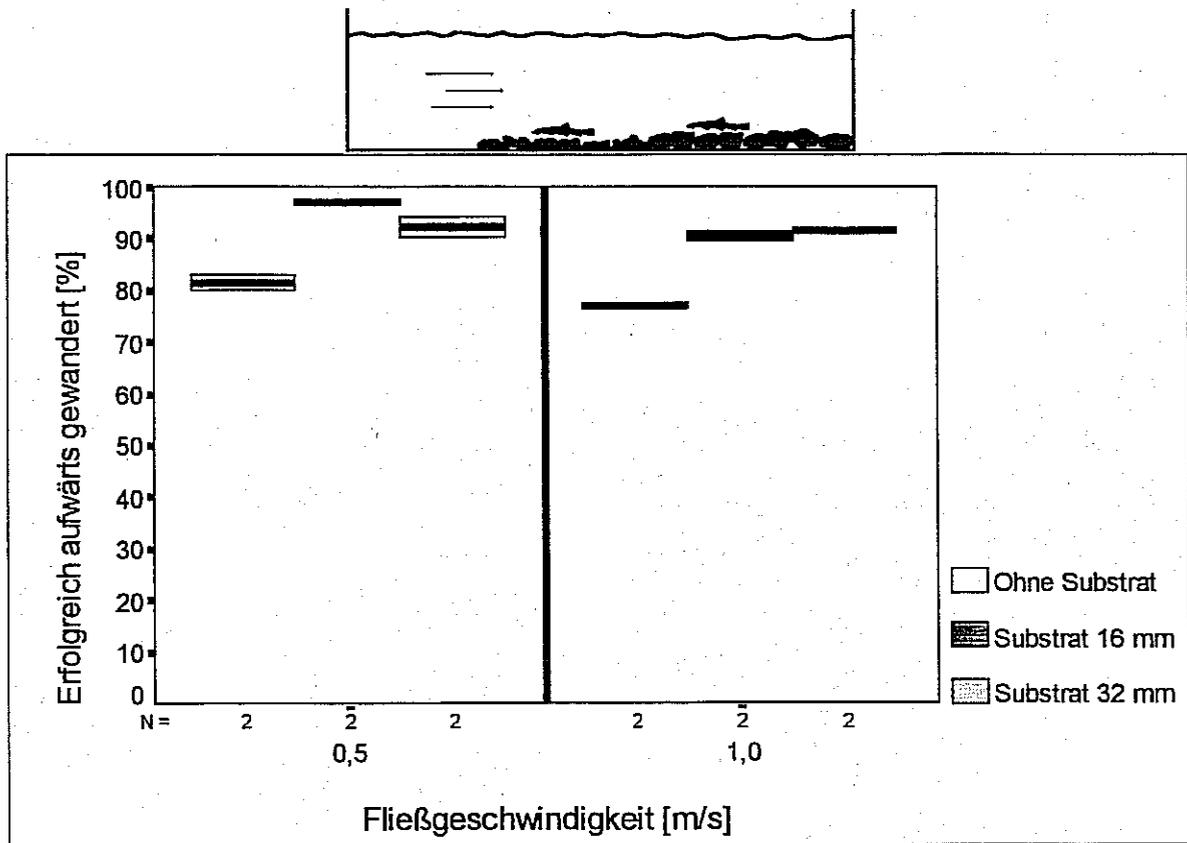


Abb. 3.5.3.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Korngröße des Bodensubstrates und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

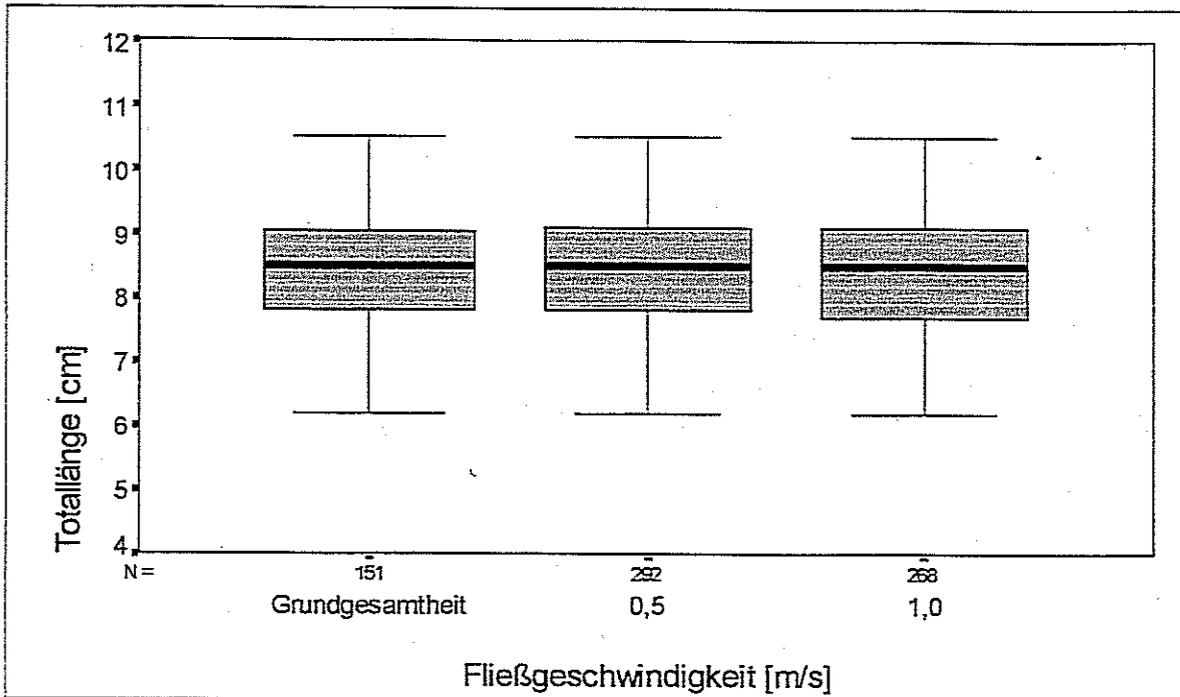


Abb. 3.5.3.2a: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

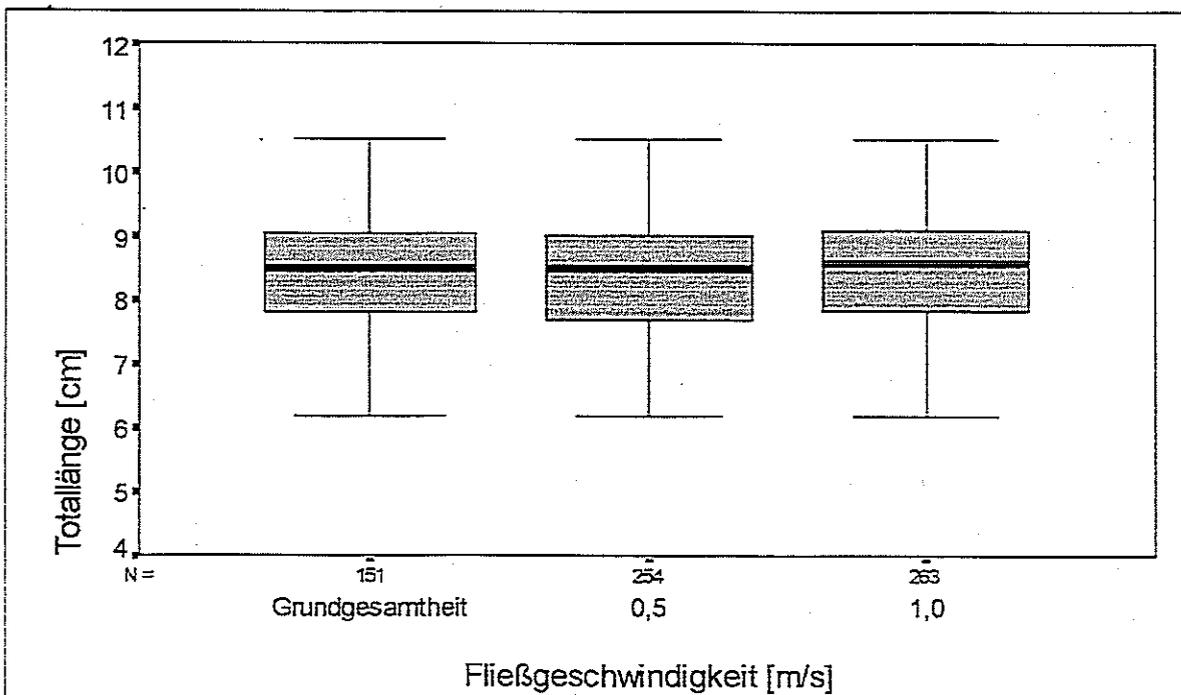


Abb. 3.5.3.2b: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

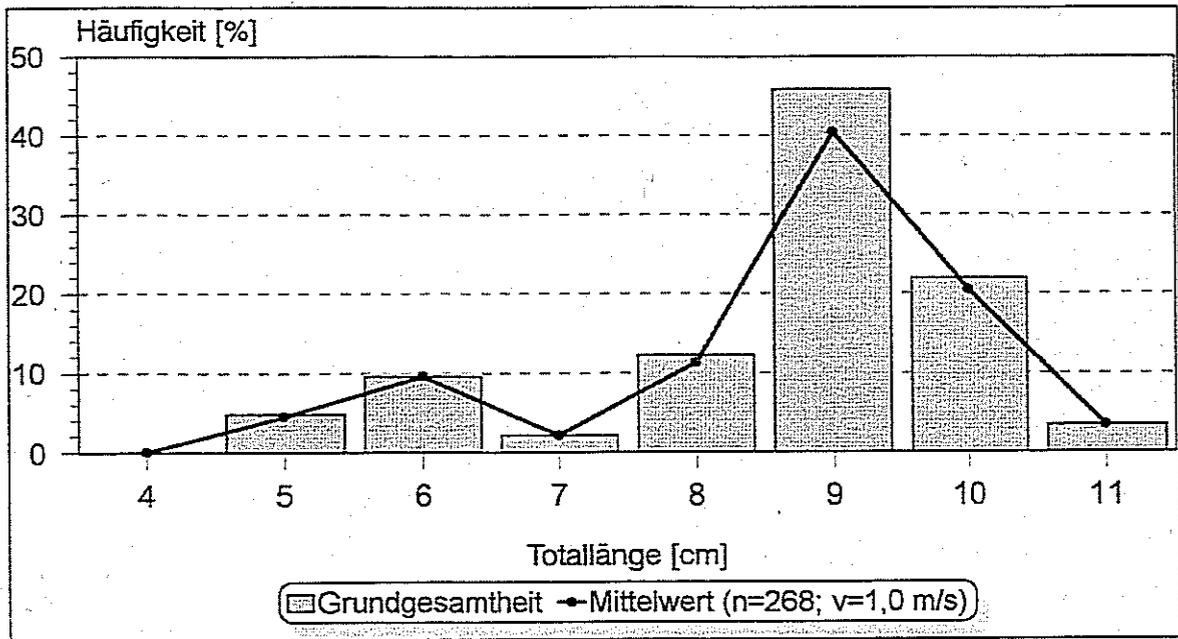


Abb. 3.5.3.3a: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

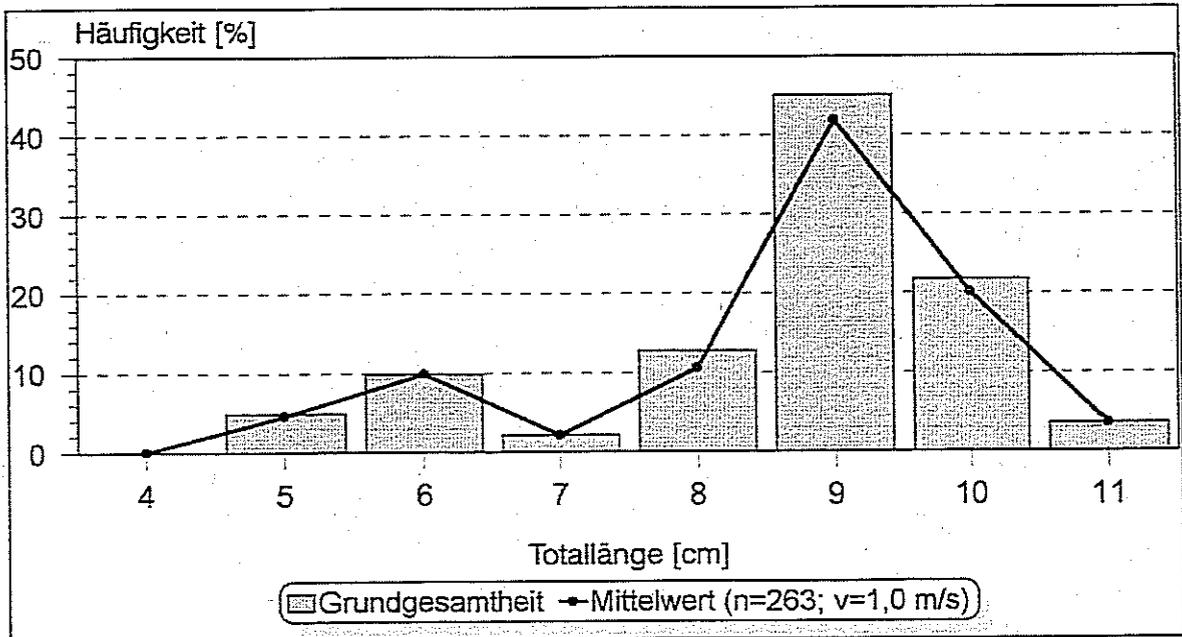


Abb. 3.5.3.3b: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm].

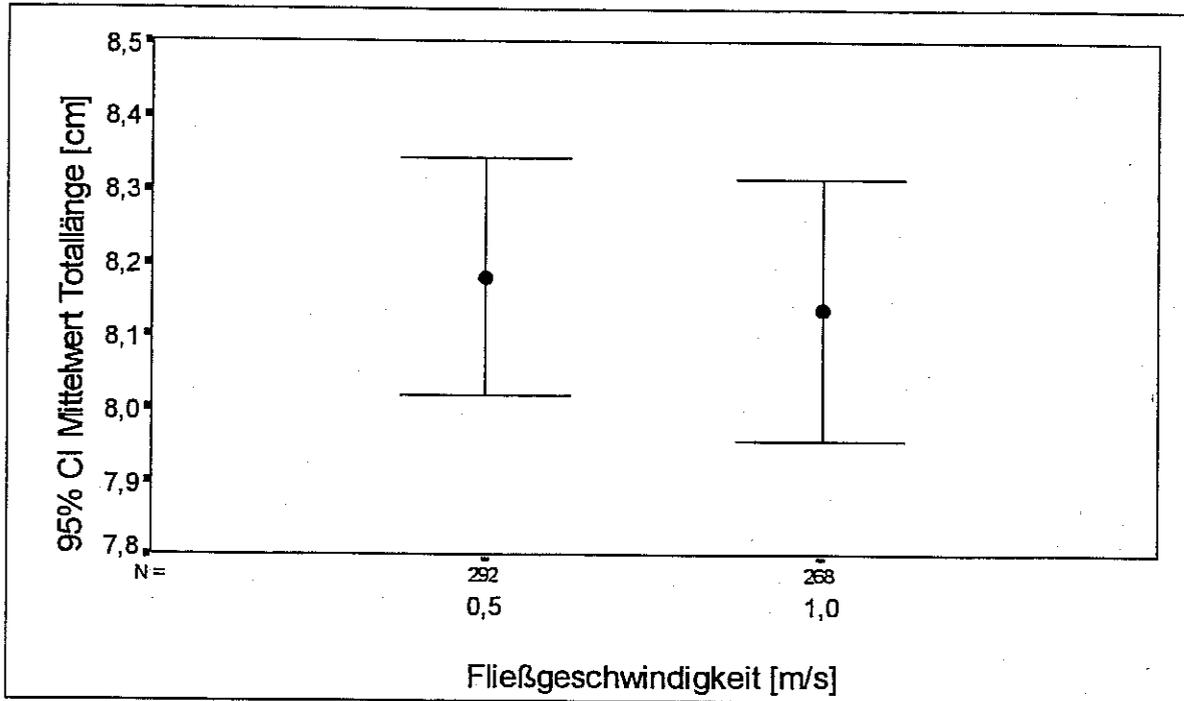


Abb. 3.5.3.4a: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

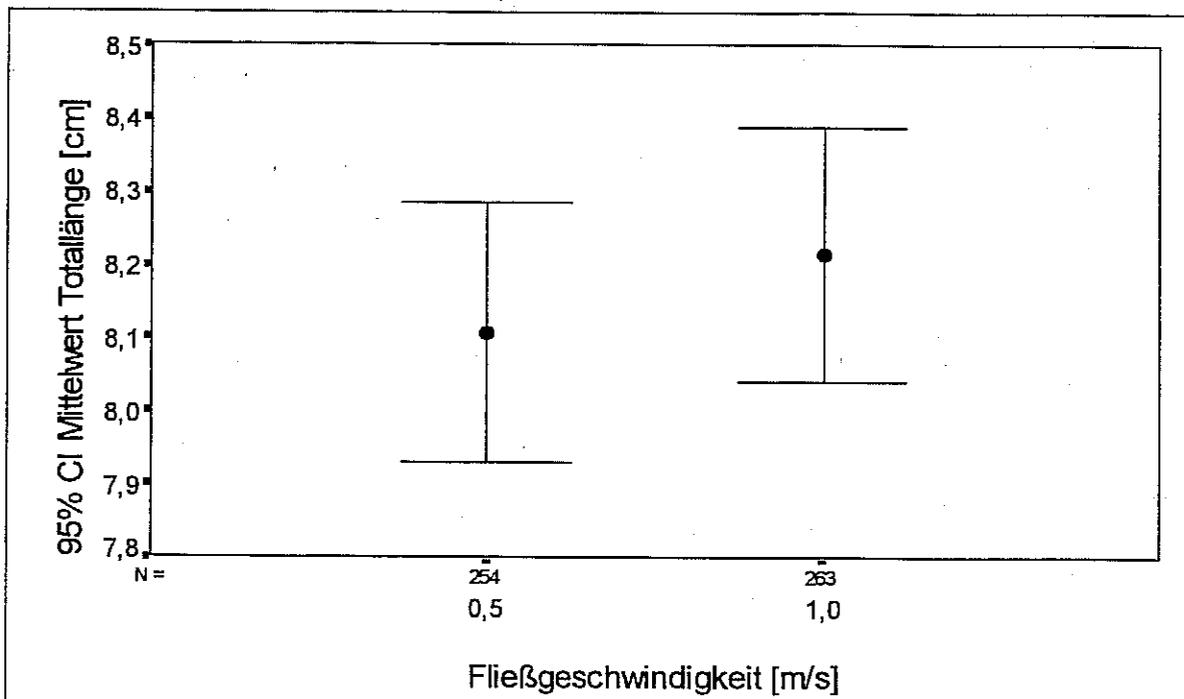


Abb. 3.5.3.4b: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

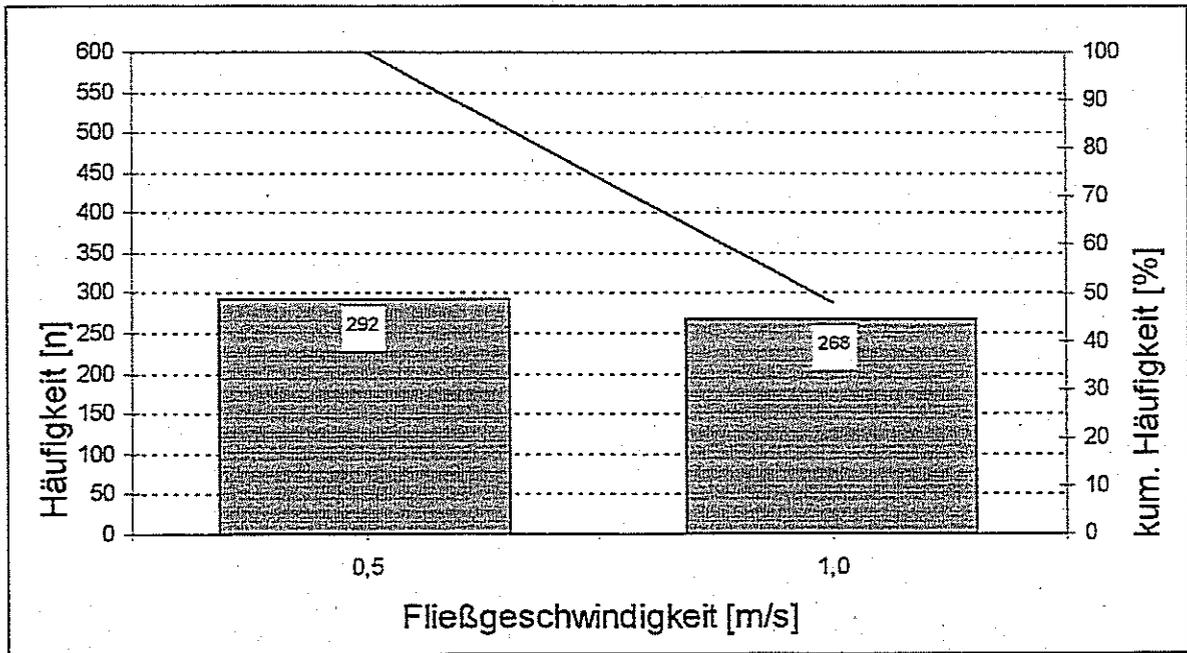


Abb. 3.5.3.5a: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 16 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

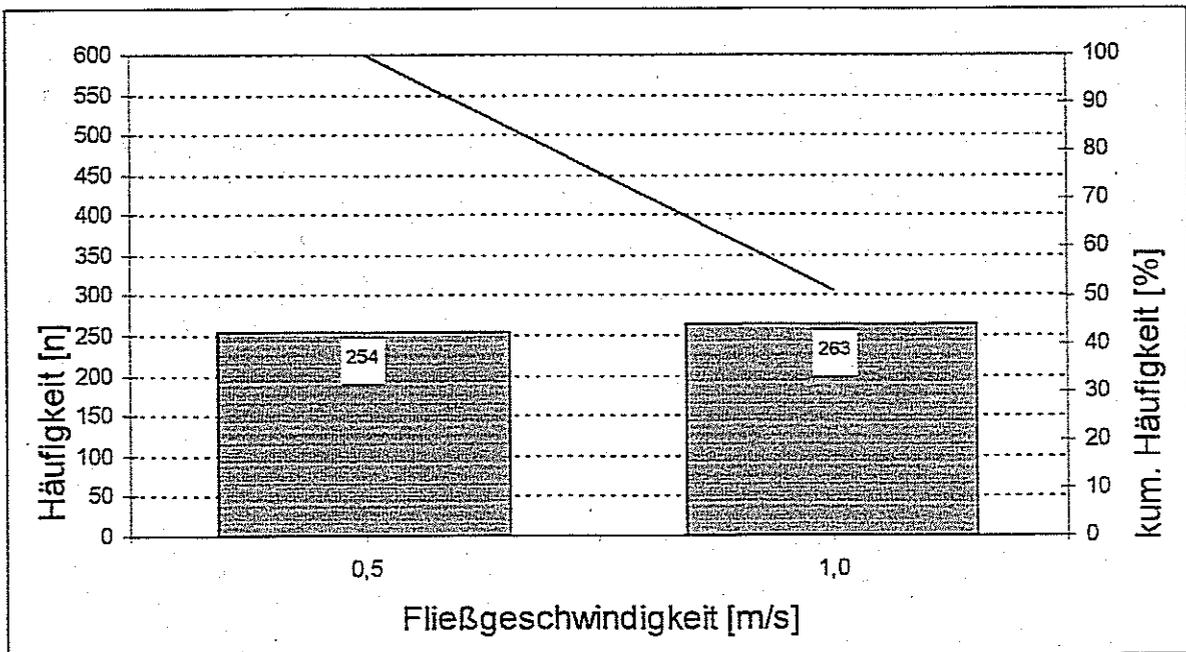


Abb. 3.5.3.5b: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer Korngröße des Bodensubstrates von 32 mm und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.4 „Bodenschwelle“

3.5.4.1 „Höhe der Bodenschwelle“ (h_s)

Die Versuche zur Ermittlung des Einflusses von unterschiedlich hohen Bodenschwellen auf die aufwärts gerichtete Migration bei Bachschmerlen konnten aus zeitlichen Gründen nur jeweils einfach, d. h. ohne Kontrollversuch durchgeführt werden. Aus diesem Grunde kann keine Schwankungsbreite der quantitativen Ergebnisse angegeben werden.

Die Erfolgsquote der Testfische lag bei allen Versuchen mit verschieden hohen Bodenschwellen im Bereich zwischen $h_s = 5$ cm und $h_s = 30$ cm jeweils über 90%. Dies betrifft sowohl die stückbezogene Aufwärtswanderung als auch die gewanderte Biomasse der Bachschmerlen (Tab. 3.5.4.1.1, Abb. 3.5.4.1.1).

Die vergleichende Aufstellung der Totallängen der bei den jeweiligen Versuchen aufwärts gewanderten Exemplare mit der Grundgesamtheit läßt keinen Unterschied in den medianen, minimalen und maximalen Werten erkennen (Abb. 3.5.4.1.2). Dies bedeutet, daß über eine $h_s = 30$ cm hohe Bodenschwelle die selben Längensklassen aufwärts wandern können als über eine $h_s = 5$ cm hohe Schwelle. Somit ist der alleinige Faktor „Bodenschwelle“ für die Bachschmerle noch nicht als Wanderhindernis aufzufassen.

Hinzu kommt, daß selbst bei einer $h_s = 30$ cm hohen Schwelle Bachschmerlen in höchstem Maße quantitativ und auch proportional zu ihrer Grundgesamtheit wandern (Abb. 3.5.4.1.3).

Desweiteren zeigen die mittleren Totallängen (95% CI) keine gravierende Abweichungen mit zunehmender Schwellenhöhe (Abb. 3.5.4.1.4).

Unter Betrachtung einer Erfolgsquote von ca. 70% der kumulierten Häufigkeiten ist diese Forderung bei einer maximalen Schwellenhöhe von etwa $h_s \leq 15$ cm erreicht (Abb. 3.5.4.1.5).

→FAZIT:

Bodenschwellen als alleiniger Faktor stellen für migrierende Bachschmerlen kein Wanderhindernis dar. Bezüglich des gewanderten Längenspektrums der Versuchsfische läßt sich für Schwellen mit $h_s \leq 30$ cm kein ausgeprägt negativer Einfluß feststellen. Aus quantitativer Sicht sollte aber eine vorhandene Bodenschwelle die maximale Höhe von 15 cm nicht überschreiten.

Tab. 3.5.4.1.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Höhe der Bodenschwelle [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm)						
	[cm]	5	10	15	20	25	30
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		60	61	60	61	58	58
Stück [%]		92,3	93,8	93,8	95,3	90,6	92,1
Biomasse [g]		277	284	277	285	271	267
Biomasse [%]		90,5	94,0	91,7	94,4	90,6	92,4
Länge Minimum [cm]		5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Länge Maximum [cm]		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	8	8	8

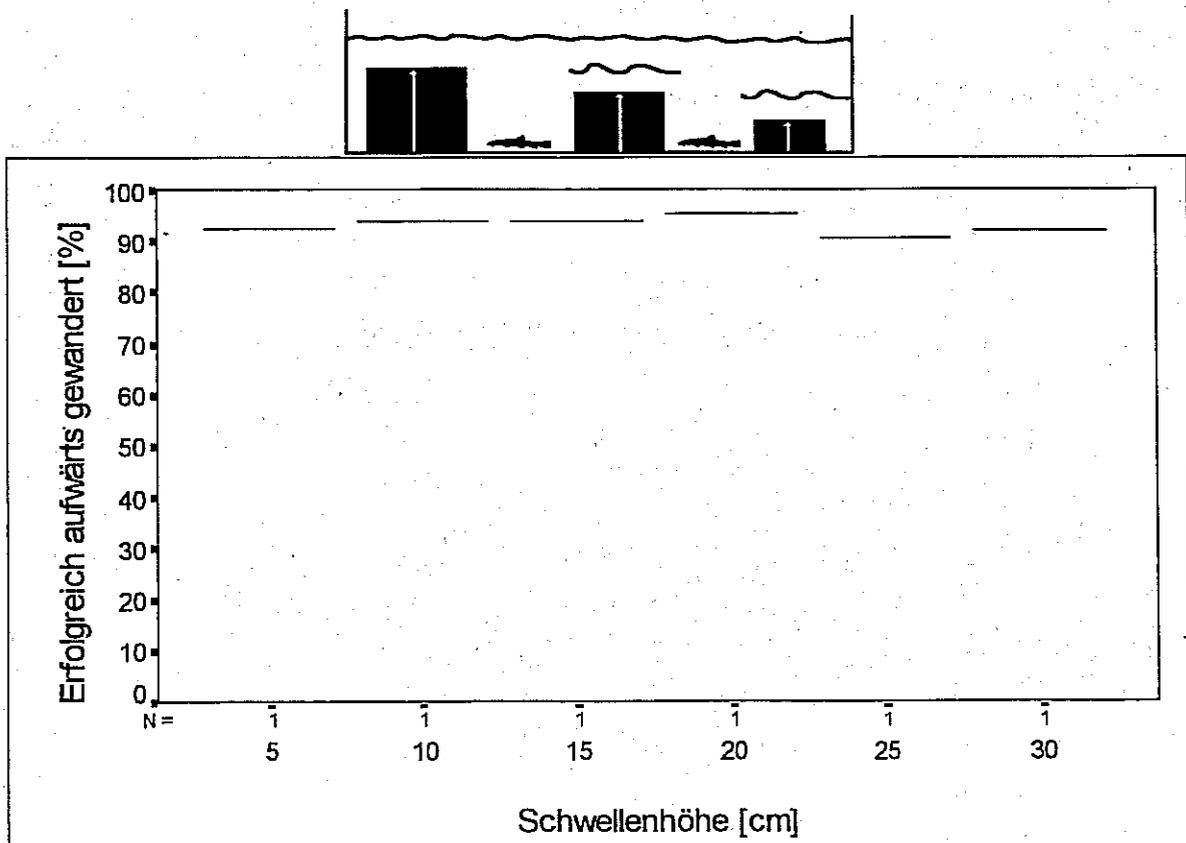


Abb. 3.5.4.1.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

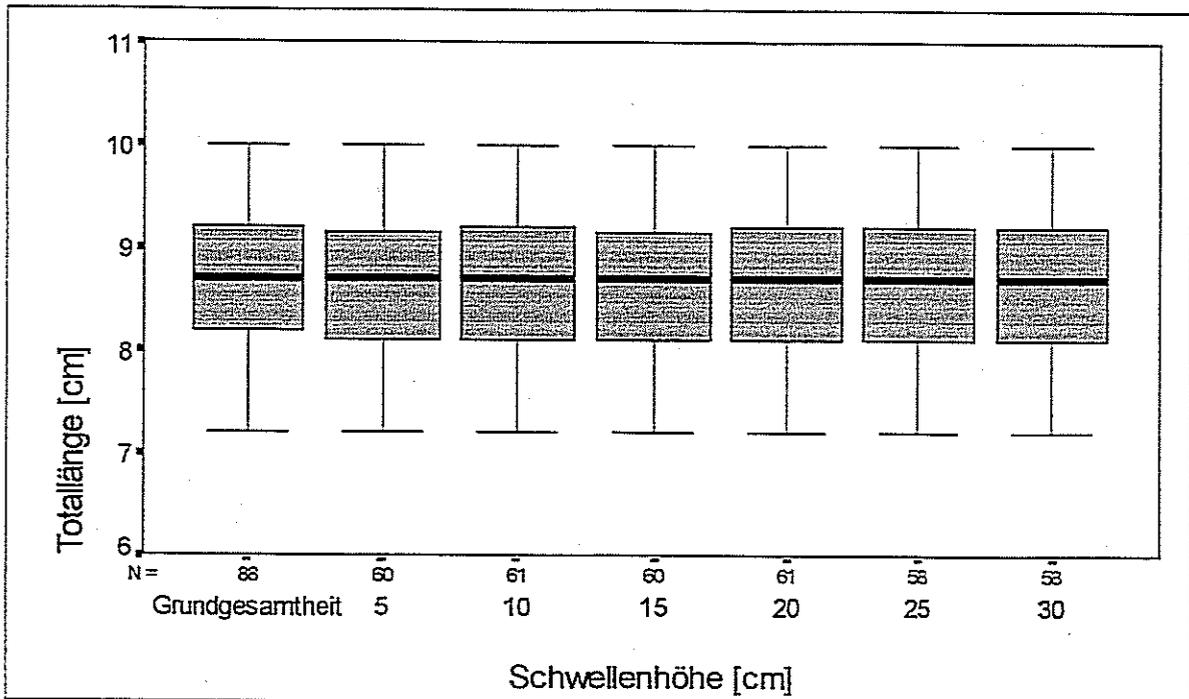


Abb. 3.5.4.1.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

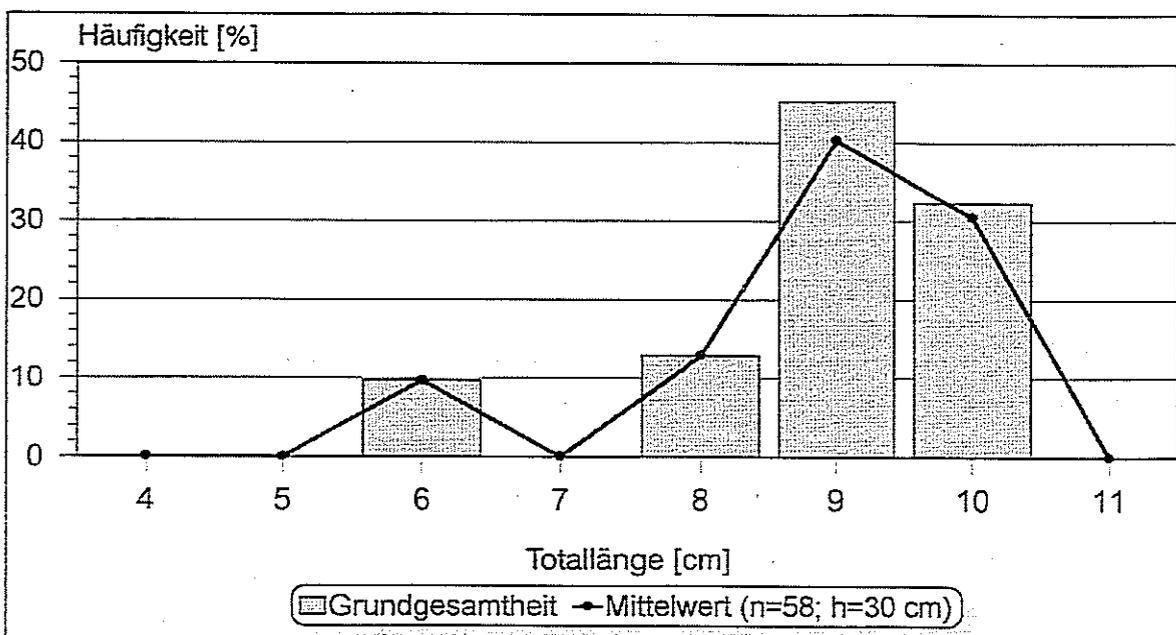


Abb. 3.5.4.1.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Bodenschwelle mit einer maximalen Höhe von 30 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s].

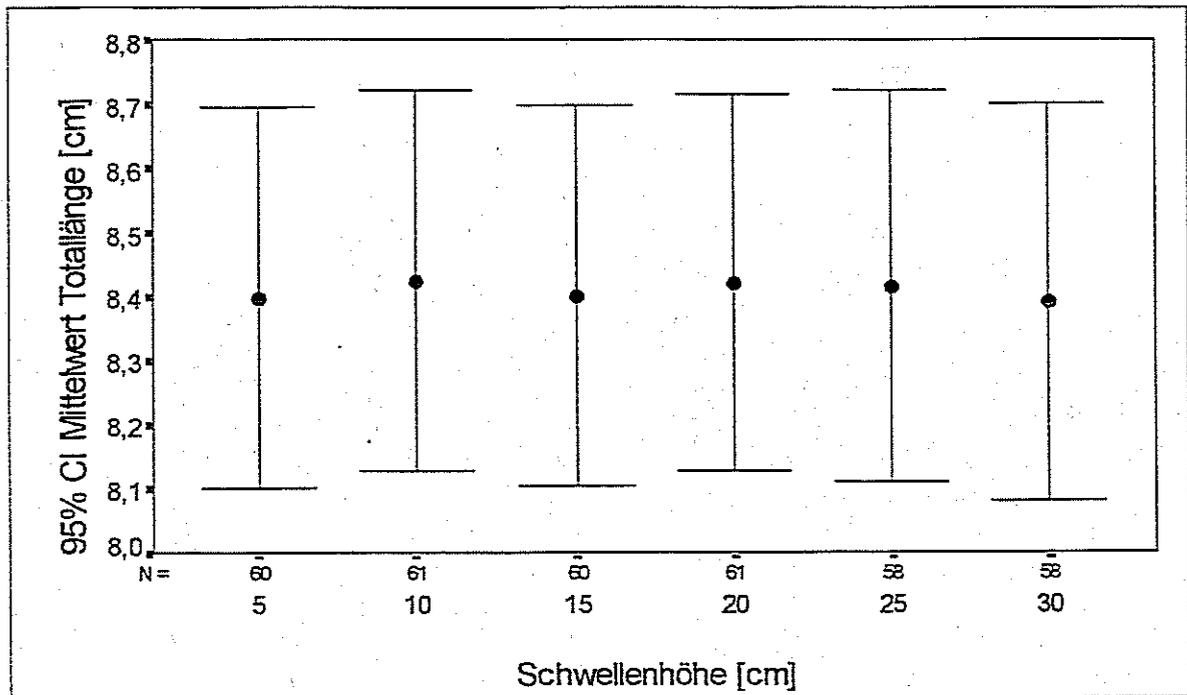


Abb. 3.5.4.1.4: Mittlere Totalängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

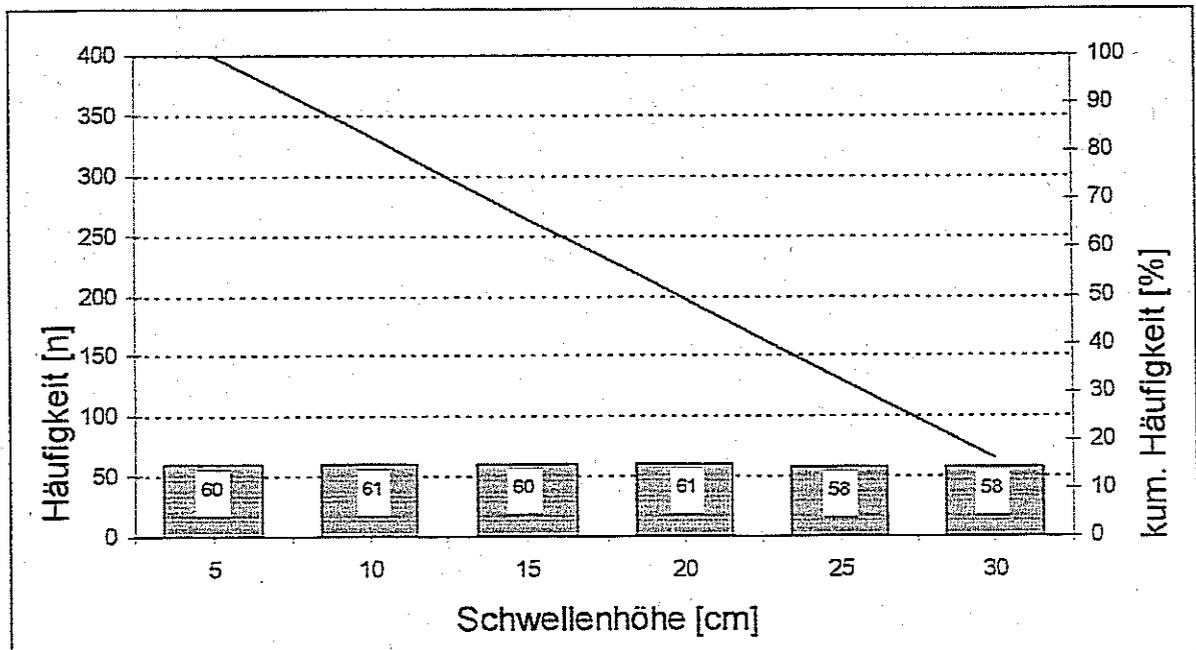
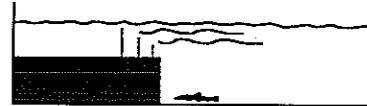


Abb. 3.5.4.1.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Höhe einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.4.2 „Vertikale Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle“ (t_s)



Auch für diese Versuchsanstellung konnten aus zeitlichen Gründen keine Kontrollversuche durchgeführt werden. Die quantitative Streubreite ist deshalb ebenfalls nicht bekannt.

Die Reduzierung der Wassertiefe über einer Bodenschwelle von anfangs $t_s = 20$ cm auf letztlich $t_s = 2,5$ cm induziert keine deutliche Abnahme in der Aufwärtswanderung der Bachschmerlen (Tab. 3.5.4.2.1, Abb. 3.5.4.2.1). Bei allen Versuchen liegt die Erfolgsrate über 90% (stückbezogen, Biomasse). Diese Ergebnisse entsprechen für den Bereich $5 \leq t_s \leq 20$ cm in ihrem Ausmaß und ihrer Dimension denjenigen aus den Versuchen zur „Mächtigkeit der Wassersäule“. Der Übergang von $t_s = 5$ cm auf $t_s = 2,5$ cm wirkt sich bei beiden Versuchsanstellungen dann allerdings nicht mehr in gleichem Maße fallend aus.

Im Vergleich liegen für die gewanderten Längenspektren aus den jeweiligen Versuchen mit der Grundgesamtheit an Bachschmerlen keine Abweichungen vor (Abb. 3.5.4.2.2). Dies bedeutet, daß in den angeführten Dimensionen die Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser einer Bodenschwelle von untergeordneter Bedeutung ist.

Selbst bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle von $t_s = 2,5$ cm ist eine quantitativ hohe Beteiligung aller Größenklassen an der Aufwärtswanderung entsprechend proportional ihrer Präsenz zur Grundgesamtheit gegeben (Abb. 3.5.4.2.3).

Die mittleren Totallängen der getesteten Bachschmerlen bleiben über alle Versuchsanstellungen relativ konstant und lassen keine Auffälligkeiten erkennen (Abb. 3.5.4.2.4).

Die Abfolge der kumulierten Häufigkeiten ergibt eine Erfolgsrate von 70% bei einer Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle von etwa $t_s = 10$ cm (Abb. 3.5.4.2.5).

→ FAZIT:

Die Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser einer Bodenschwelle ist in den untersuchten Dimensionen für aufwärts migrierende Bachschmerlen aller Größenklassen kein funktionelles Wanderhindernis (bei gleichzeitig niedriger Fließgeschwindigkeit). Aus Gründen der Sicherheit und Optimierung der Erfolgsraten beim Aufstieg sollte im Oberwasser aber mindestens eine Mächtigkeit der Wassersäule von $t_s = 10$ cm gegeben sein.

Tab. 3.5.4.2.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlich hoher Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle [cm]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s)				
	[cm]	2,5	5	10	20
erfolgreich aufwärts gewandert:					
Stück [n]		56	58	58	61
Stück [%]		91,8	95,1	95,1	93,8
Biomasse [g]		261	272	272	284
Biomasse [%]		93,5	94,1	94,1	94,0
Länge Minimum [cm]		5,2	5,2	5,2	5,2
Länge Maximum [cm]		10,0	10,0	10,0	10,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	8

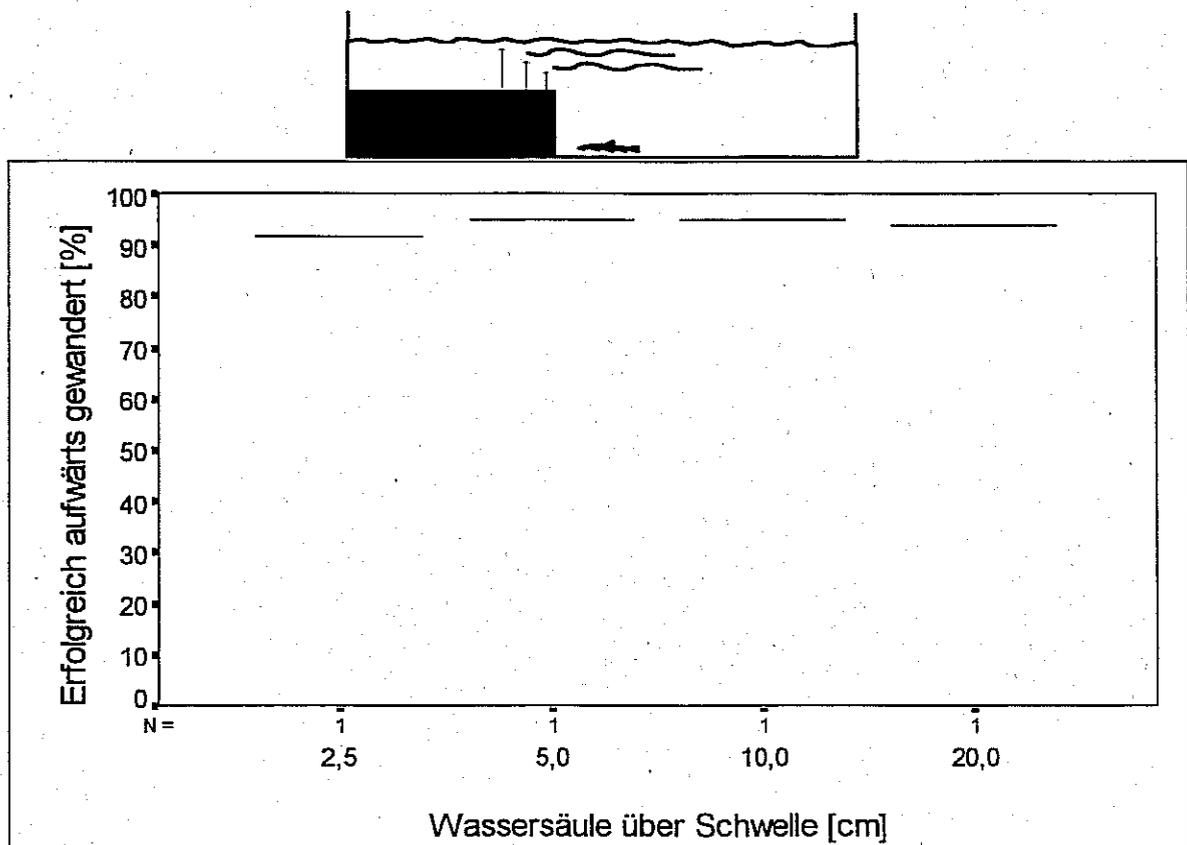


Abb. 3.5.4.2.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

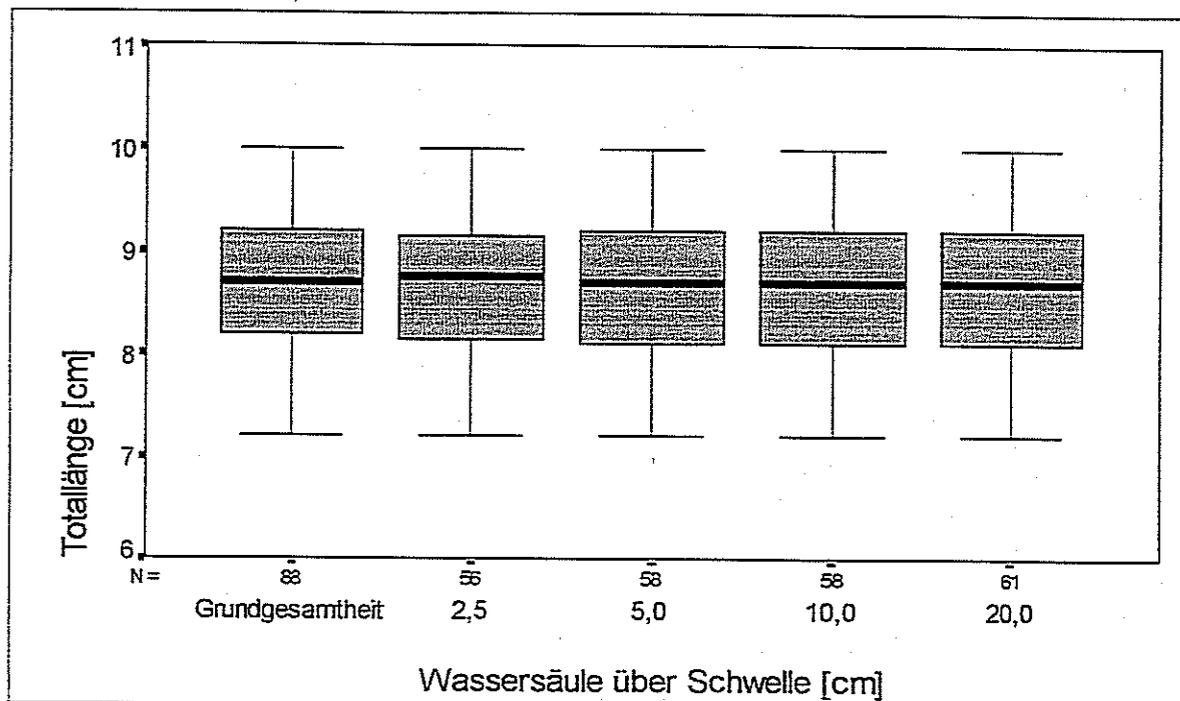


Abb. 3.5.4.2.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

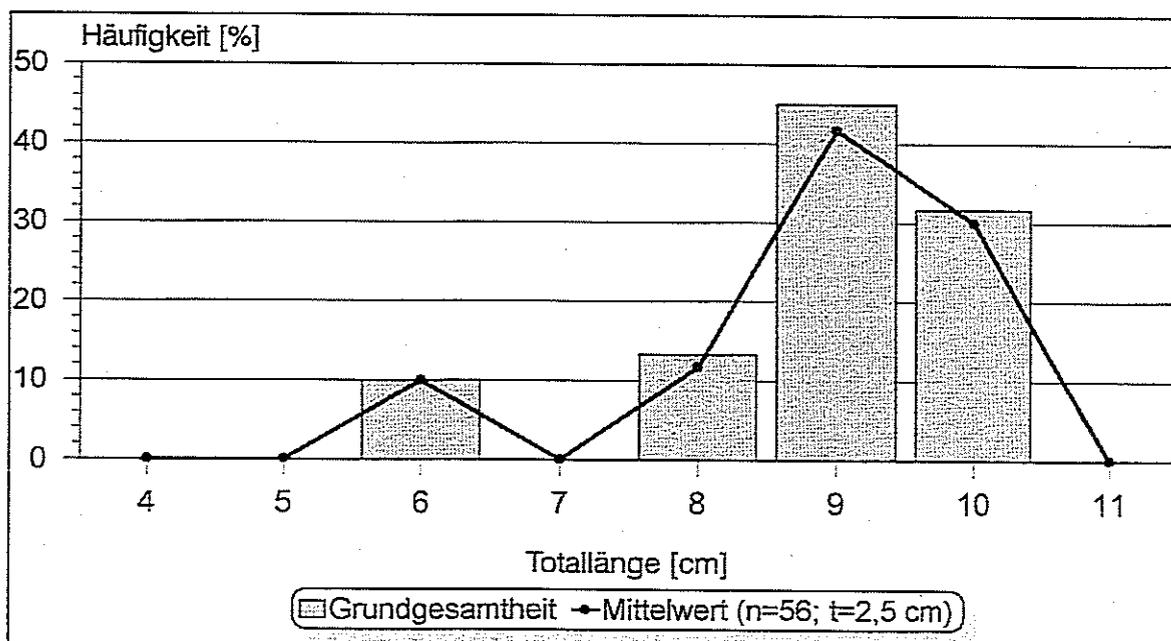


Abb. 3.5.4.2.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer minimalen Mächtigkeit der Wassersäule von 2,5 cm über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s].

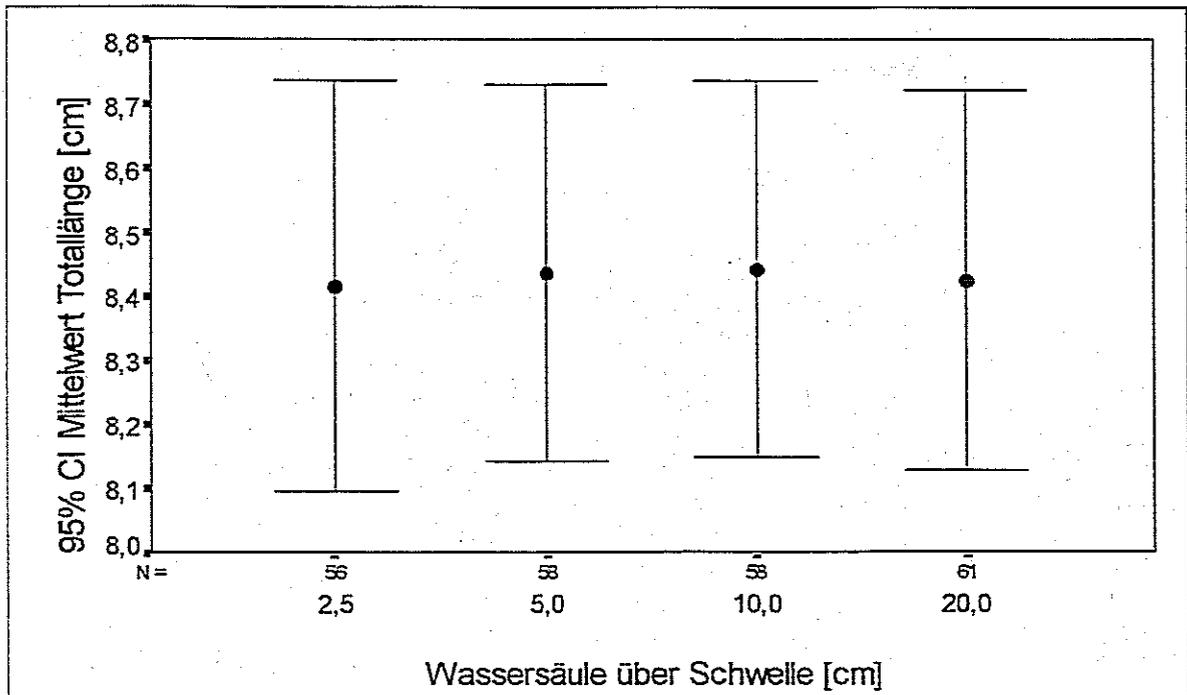


Abb. 3.5.4.2.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschrölen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; N = Anzahl der Individuallängen].

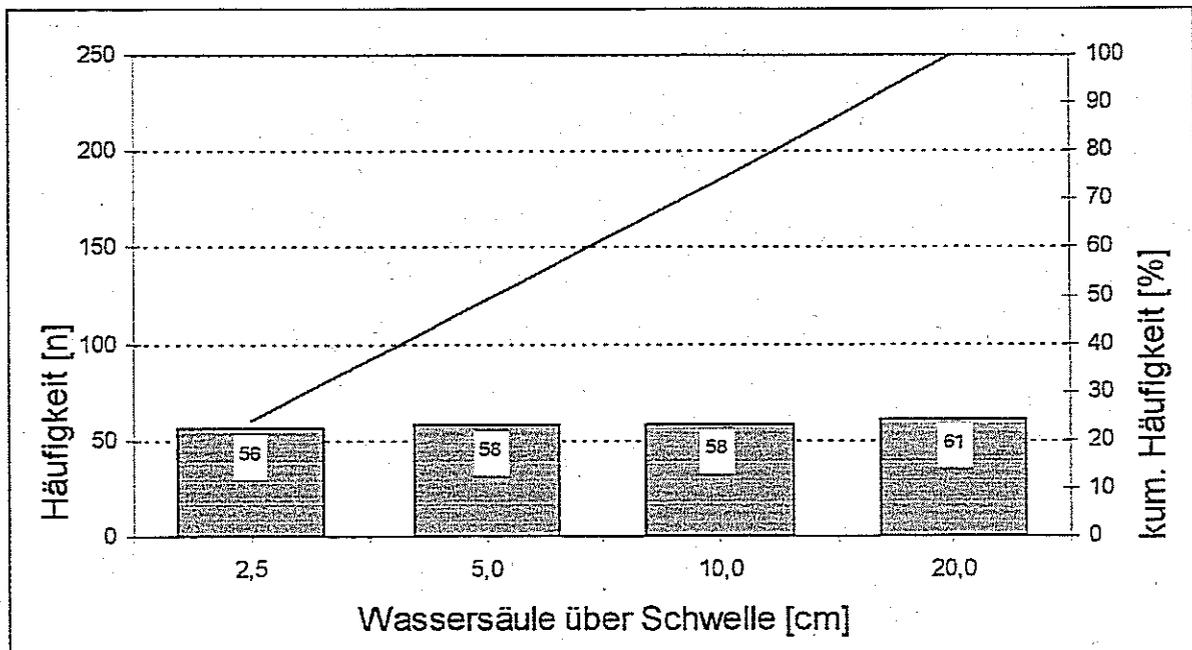
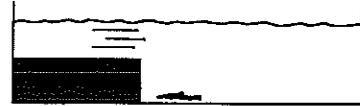


Abb. 3.5.4.2.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschrölen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.4.3 „Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle“ (v_s)



Analog den „Strömungsversuchen“ ergibt sich für Fließgeschwindigkeit über der Bodenschwelle eine abnehmende Erfolgsrate bei den aufwärts gewanderten Bachschmerlen mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit. Der quantitative Wandererfolg liegt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v_s = 0,25$ m/s bei 95,1%, nimmt aber bei einem Maximalwert von $v_s = 1,25$ m/s auf durchschnittlich 26,9% ab (Tab. 3.5.4.3.1, Abb. 3.5.4.3.1).

Die Totallängen der an der aufwärts gerichteten Wanderung beteiligten Bachschmerlen ähneln der Grundgesamtheit bis zu einer Fließgeschwindigkeit von $v_s \leq 1,0$ m/s, erst ab einer höheren Geschwindigkeit von $v_s = 1,25$ m/s nehmen nur noch größere Exemplare an der Wanderung teil (Abb. 3.5.4.3.2).

Dann allerdings wandern Individuen der Größenklassen 9 cm und 10 cm (Abb. 3.5.4.3.3). Wie aus ähnlichen Versuchen bereits bekannt, bewirkt hier die Strömung eine Selektion der Fischgrößen zu Gunsten der großen Bachschmerlen.

Ähnliches ergibt sich aus der Betrachtung der mittleren Totallängen (95% CI). Auch hier verändern sich die Mittelwerte der Fischlängen bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von $v_s \leq 1,0$ m/s nur wenig. Bei höherer Geschwindigkeit wandern ausnahmslos nur noch die größeren Exemplare entgegen der Strömung (Abb. 3.5.4.3.4).

Die kumulierten Häufigkeiten ergeben eine Erfolgsquote von vertretbaren 70% bei einer Fließgeschwindigkeit von $v_s \leq 0,5$ m/s (Abb. 3.5.4.3.5).

→ FAZIT:

Bei alleiniger Betrachtung einer quantitativen Erfolgsquote von mindestens 70% bei der aufwärts gerichteten Wanderung entgegen der Strömung über einer Bodenschwelle sollte die Strömungsgeschwindigkeit den Richtwert von $v_s \leq 0,5$ m/s nicht wesentlich überschreiten.

Handelt es sich bei den zu bewältigenden Wanderstrecken um sehr kurze Abschnitte (≤ 1 m) darf die Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle dabei auch noch im Bereich von $v_s \leq 1,0$ m/s liegen. Hierbei sind keine Einbußen bei den verschiedenen Längenklassen der aufwärts wandernden Bachschmerlen zu erwarten. Dieser Richtwert kann allerdings nicht für eine beliebige Abfolge von kurzen Wanderdistanzen gelten (z. B. in Fischtrepfen).

Tab. 3.5.4.3.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle [m/s]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm)							
	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,25	1,25
erfolgreich aufwärts gewandert:								
Stück [n]		58	48	43	33	13	14	16
Stück [%]		95,1	81,4	76,8	58,9	24,1	26,4	30,2
Biomasse [g]		272	219	190	141	65	73	86
Biomasse [%]		94,1	82,6	71,7	55,3	25,8	29,0	34,1
Länge Minimum [cm]		5,2	5,2	5,2	5,2	7,2	8,2	8,2
Länge Maximum [cm]		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	2	4	4
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	8	7	7	7

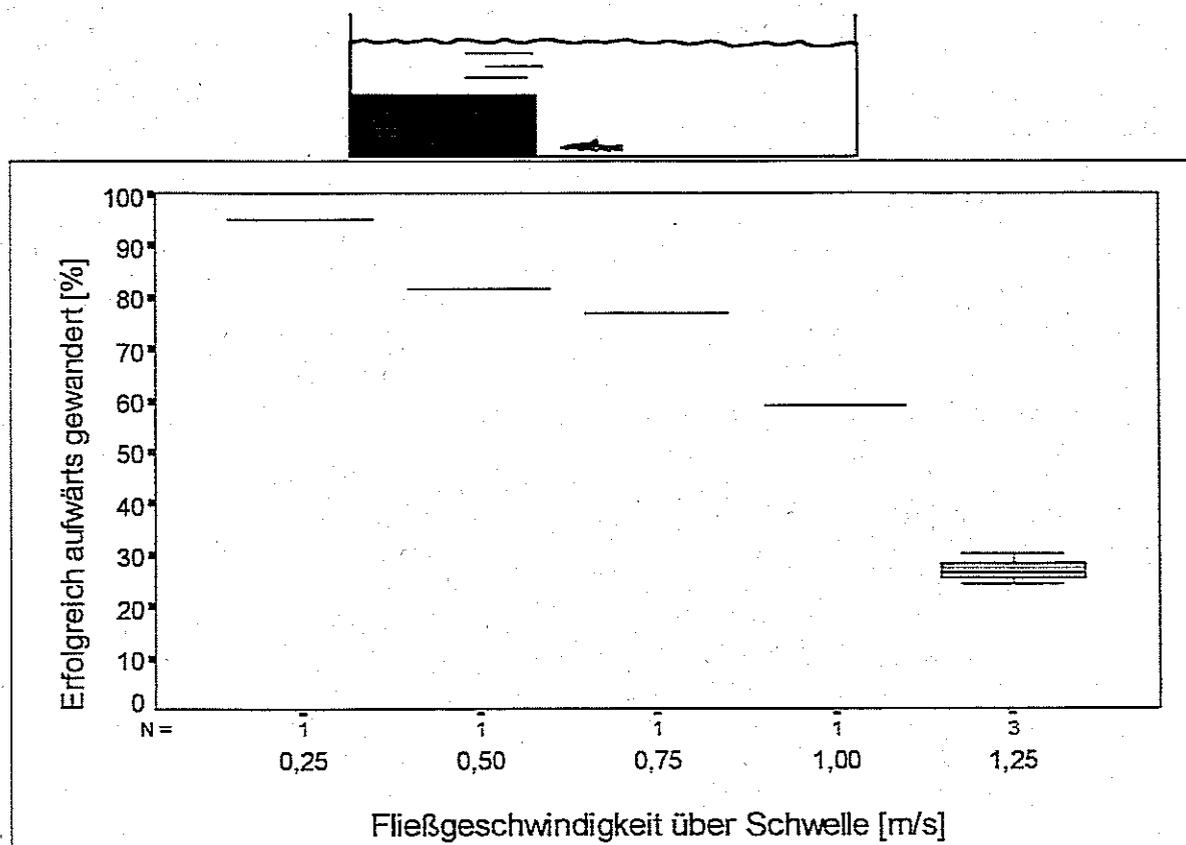


Abb. 3.5.4.3.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

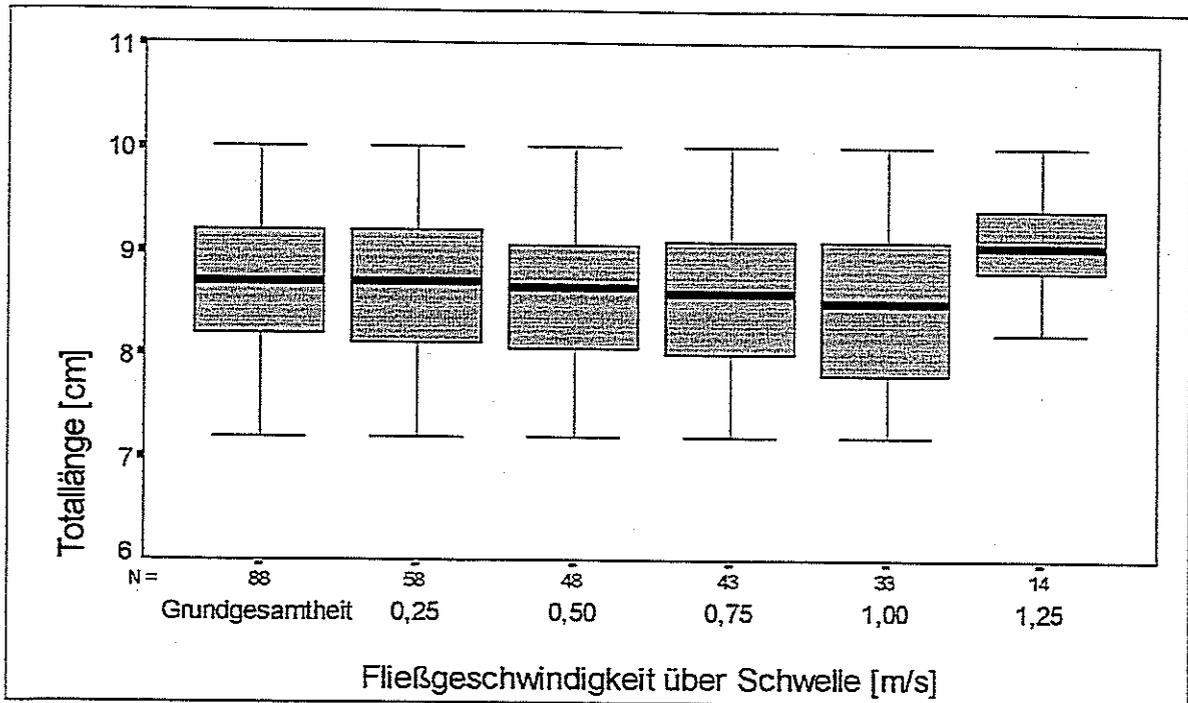


Abb. 3.5.4.3.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

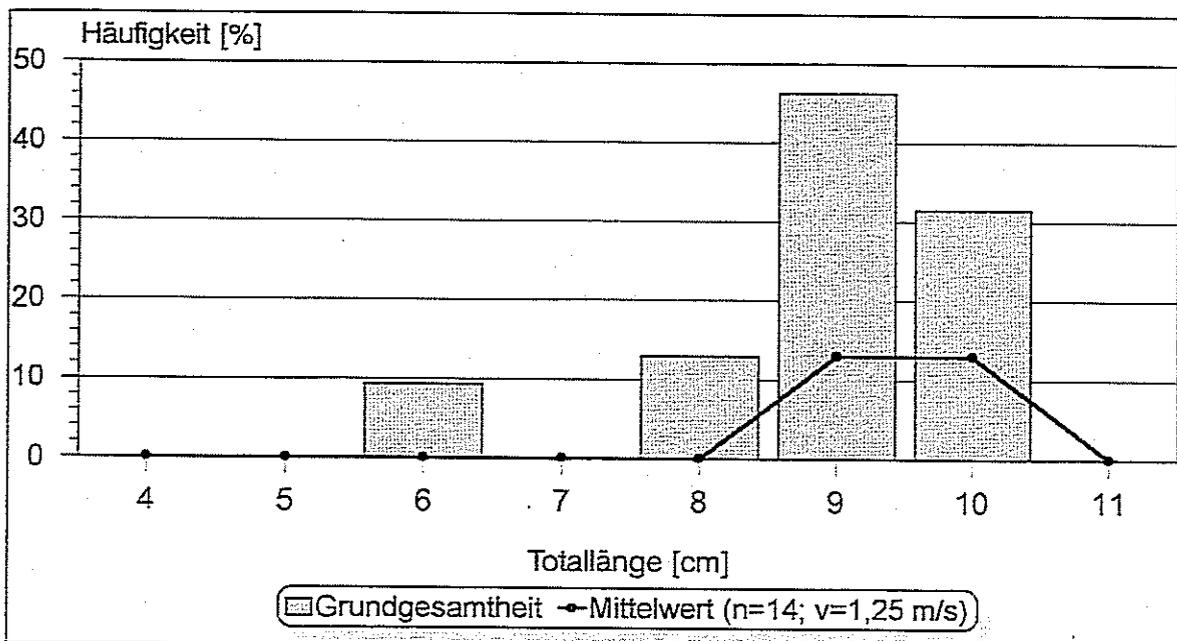


Abb. 3.5.4.3.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,25 m/s über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm].

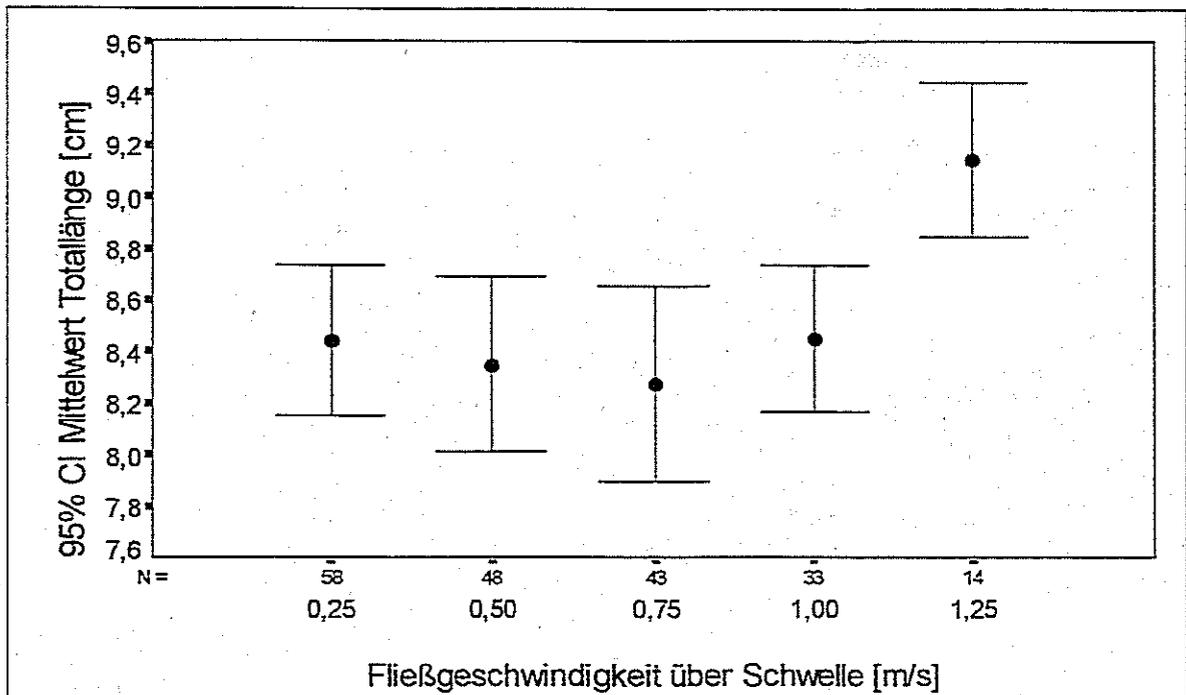


Abb. 3.5.4.3.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

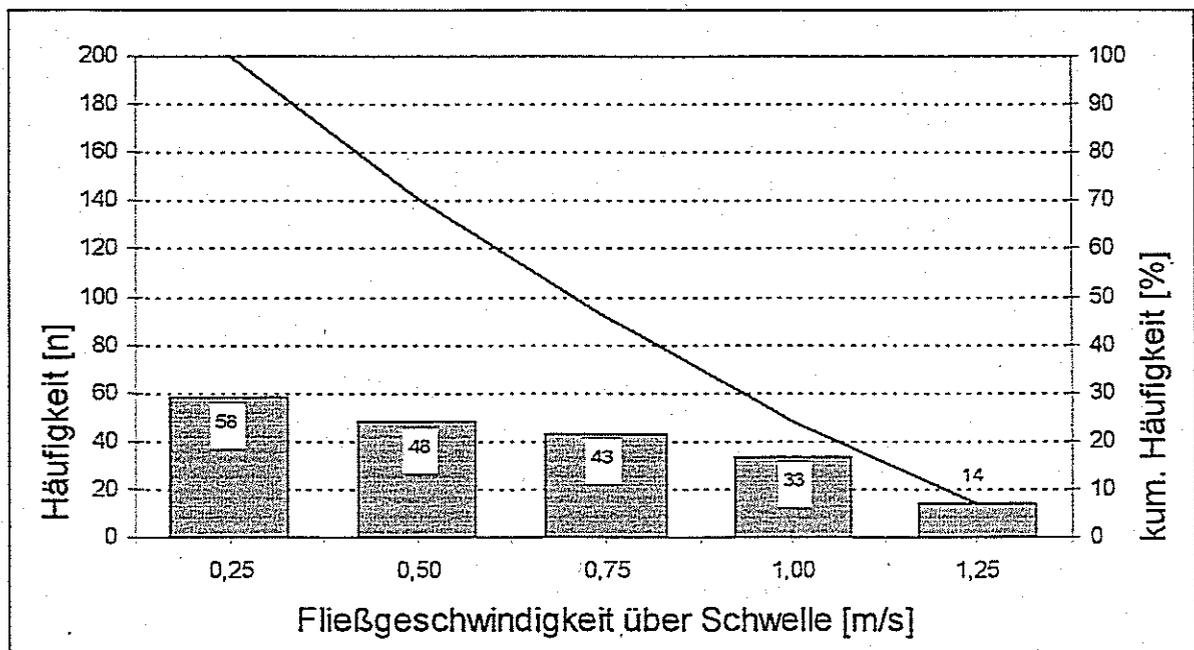


Abb. 3.5.4.3.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle in einem künstlichen Fließgerinne [Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.5 „Absturz“ (Δh)

Bis zu einer Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser von $\Delta h = 5$ cm liegt die quantitative Erfolgsquote der aufwärts gewanderten Bachschmerlen deutlich über 90% (stückbezogen, Biomasse). Diese sinkt bei $\Delta h = 7,5$ cm auf durchschnittlich 77,2% (stückbezogen) bzw. 77,8% (Biomasse). Bei $\Delta h \geq 10$ cm ist die Wanderungsrate unterbrochen (Tab. 3.5.5.1, Abb. 3.5.5.1).

Der Vergleich mit der Grundgesamtheit zeigt keine gravierenden Abweichungen in der Zusammensetzung des Längenspektrums der erfolgreich gewanderten Bachschmerlen bis zu einer Fallhöhe von $\Delta h \leq 7,5$ cm. Für $\Delta h > 7,5$ cm sind keine Aussagen mehr möglich, da die Erfolgsquote bei dieser Höhe abrupt gegen Null strebt (Abb. 3.5.5.2).

Aus der Längenhäufigkeitsverteilung der erfolgreich aufwärts gewanderten Bachschmerlen bei Höhenunterschieden von $\Delta h = 5$ cm und $\Delta h = 7,5$ cm geht hervor, daß sich die Versuchsfische höchst proportional ihrer Präsenz der jeweiligen Grundgesamtheit an der Aufwärtswanderung beteiligen (Abb. 3.5.5.3). Dies aber um so mehr, je kleiner der Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser.

Bis zu einer Fallhöhe von $\Delta h = 7,5$ cm besteht kein Unterschied in den Werten der mittleren Totallänge (95% CI), für größere Fallhöhen sind aus den schon erwähnten Gründen keine Aussagen mehr möglich (Abb. 3.5.5.4). Aus diesen Ergebnissen kann jedoch abgeleitet werden, daß Wasserspiegeldifferenzen zwischen Ober- und Unterwasser von maximal $\Delta h = 7,5$ cm als überwindbar angesehen werden können, ohne Einbußen im Längenspektrum für Bachschmerlen befürchten zu müssen.

Eine unter biologischen Gesichtspunkten vertretbare Erfolgsquote von 70% ergibt sich aus den kumulierten Häufigkeiten bei einer Fallhöhe von maximal $\Delta h = 5$ cm (Abb. 3.5.5.5).

→FAZIT:

Die Bachschmerle als eine am Gewässerboden lebende Fischart hat bei den durchgeführten Versuchen ein nicht zu erwartendes Leistungspotential gezeigt, welches dem der Elritze stark ähnelt. Bei beiden Spezies sollte die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser bei einem bestehenden und nicht substituierbaren Absturz den Richtwert von maximal $\Delta h = 7,5$ cm nicht überschreiten! Um den Fischen den Aufstieg ins Oberwasser zu erleichtern, sollte dabei gleichzeitig gewährleistet sein, daß die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser durchschnittliche Werte von $v \leq 0,5$ m/s nicht übersteigt. Bei diesen Richtwerten sind keine Einbußen im Längenspektrum der Fische zu erwarten.

Zur Optimierung der Erfolgsraten beim Aufstieg ist eine maximale Fallhöhe von $\Delta h = 5$ cm zu fordern, um sicher zu stellen, daß möglichst vielen Individuen der Einstieg ins Oberwasser gelingt.

Tab. 3.5.5.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne.

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	7,5	7,5	10	10	12,5	12,5
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		63	62	65	65	55	50	0	0	0	0
Stück [%]		96,9	95,4	95,6	95,6	80,9	73,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Biomasse [g]		296	293	304	304	261	237	0	0	0	0
Biomasse [%]		96,7	95,8	94,4	94,4	81,1	74,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Länge Minimum [cm]		5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Länge Maximum [cm]		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	8	8	8	0	0	0	0

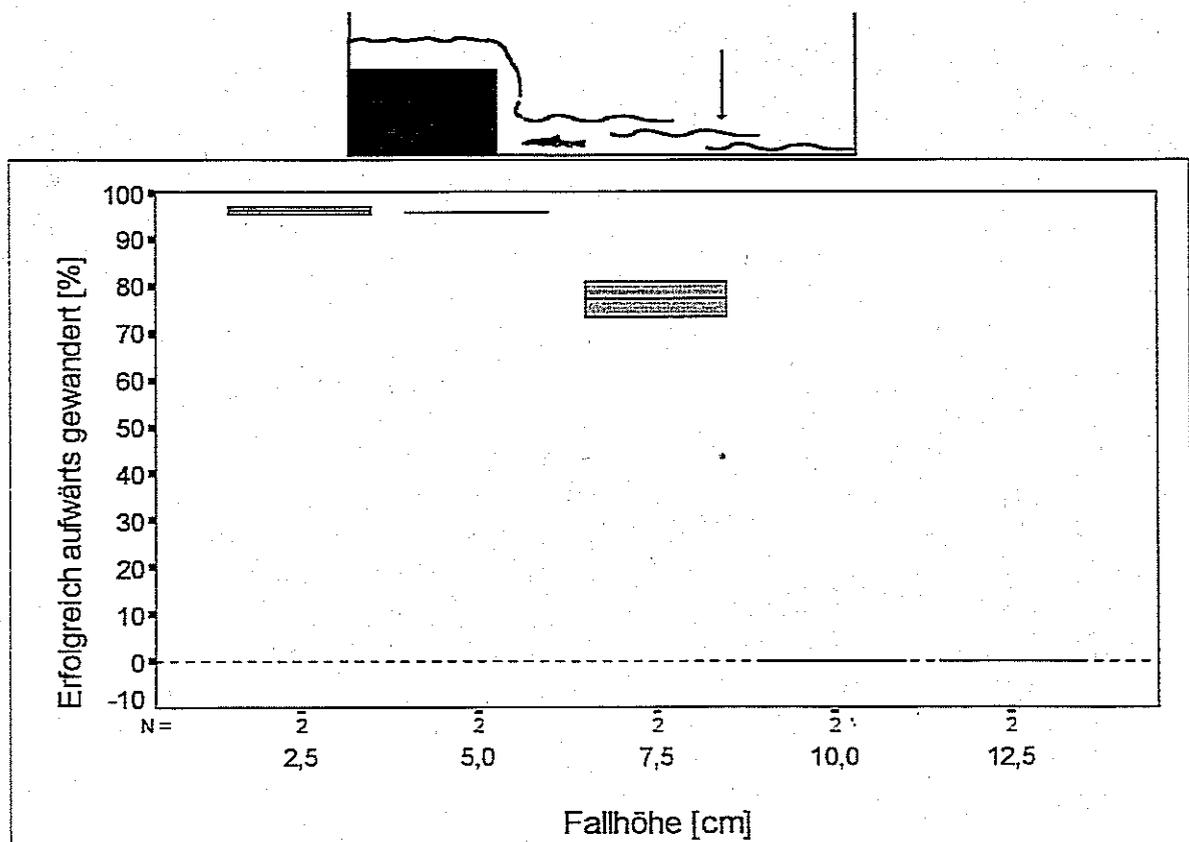


Abb. 3.5.5.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

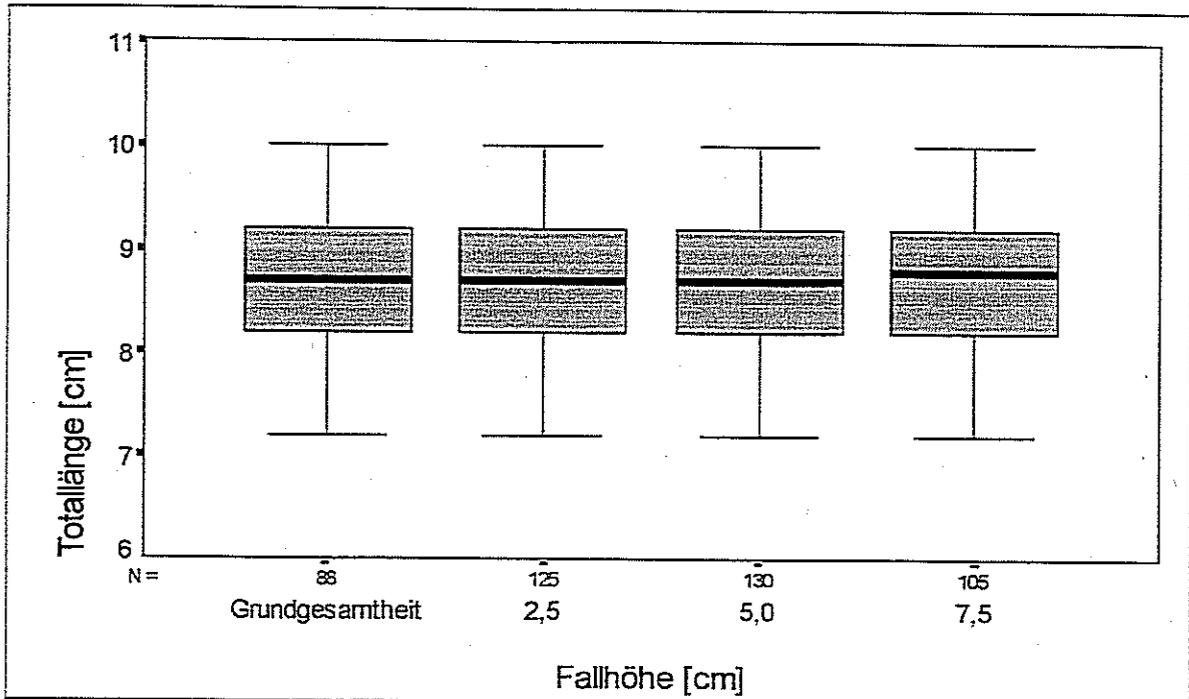


Abb. 3.5.5.2: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

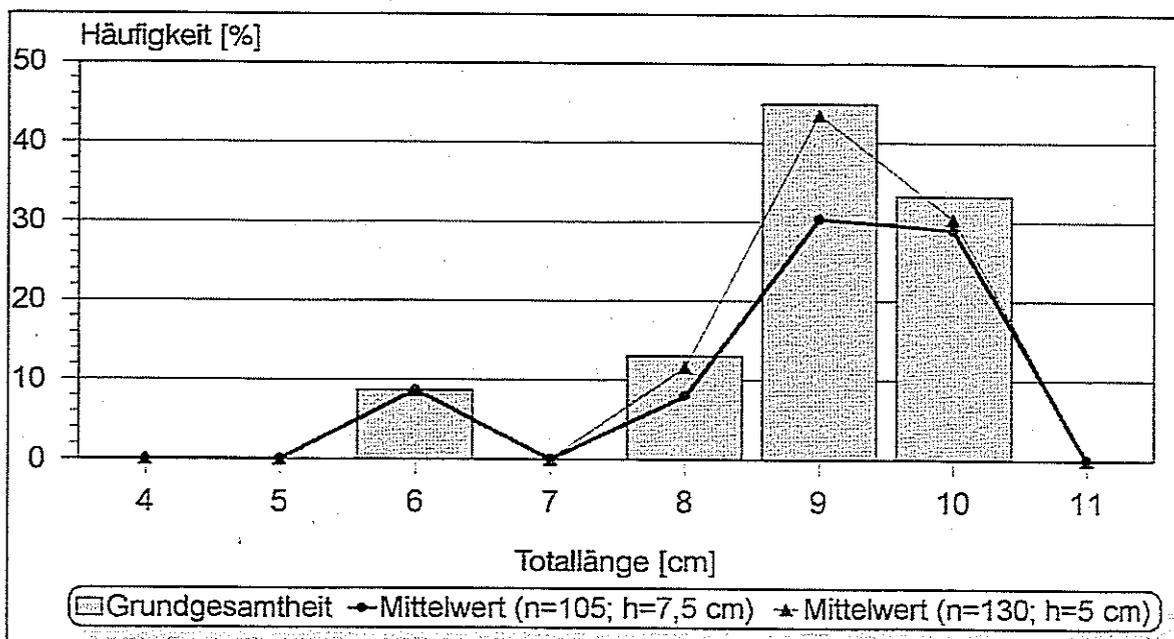


Abb. 3.5.5.3: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei maximalen Wasserspiegeldifferenzen zwischen Ober- und Unterwasser von 10 cm bzw. 12,5 cm in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm].

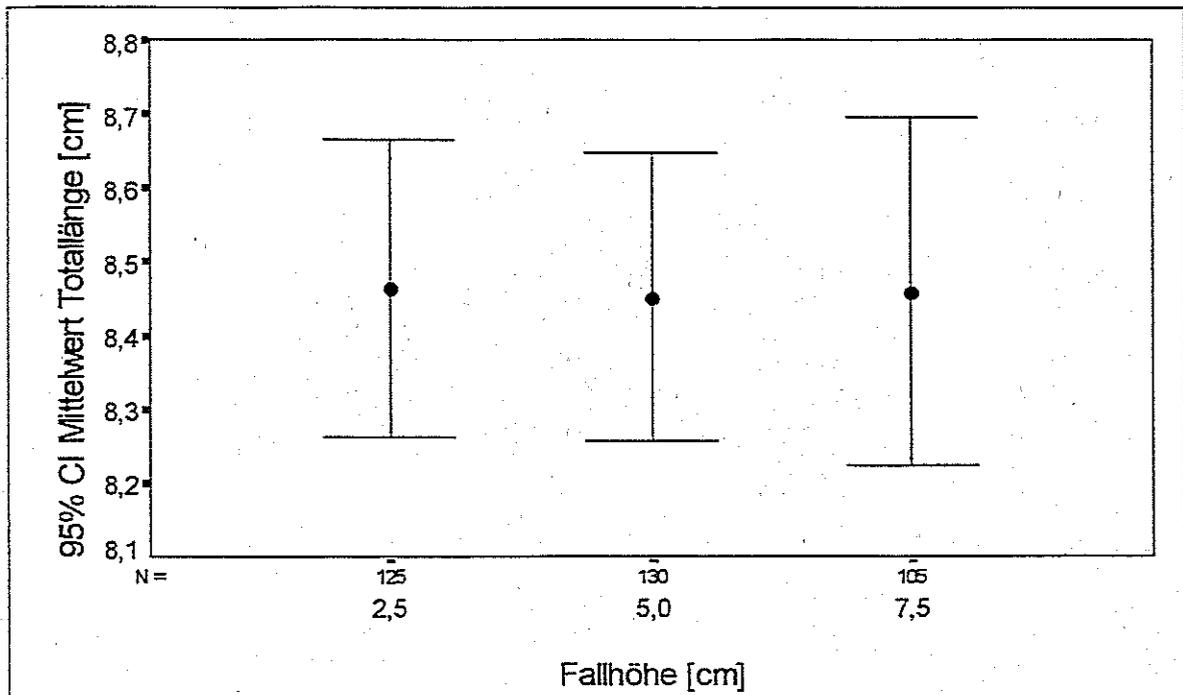


Abb. 3.5.5.4: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; N = Anzahl der Individuallängen].

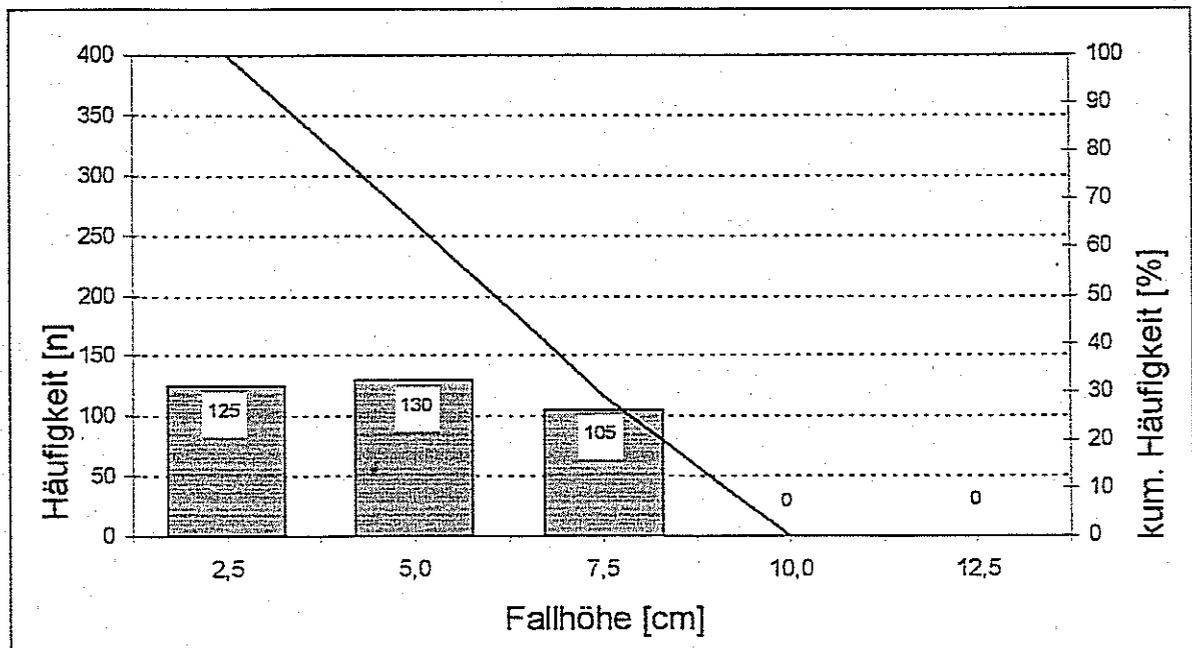


Abb. 3.5.5.5: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser in einem künstlichen Fließgerinne [Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm; Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

3.5.6 „Verrohrung“



Verschiedene Befüllungszustände einer Verrohrung (halbvoll, voll) kombiniert mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zeigen im Bereich von $v \leq 0,75$ m/s Erfolgsquoten bei aufwärts wandernden Bachschmerlen von jeweils über 90%. Erst bei einer hohen Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s divergieren die Ergebnisse: 68,6% (stückbezogen) der Bachschmerlen durchwandern die gefüllte Verrohrung, während durchschnittlich nur 23,5% (stückbezogen) das halb gefüllte Rohr passieren (Tab. 3.5.6.1, Abb. 3.5.6.1).

Im Vergleich zur Fließrinne fallen die Erfolgsquoten beim gefüllten Rohr im Fließgeschwindigkeitsbereich von $0,5 \leq v \leq 0,75$ m/s sogar um 9,4% bzw. 17,1% (stückbezogen) höher aus, erst bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s wandern ca. 8,3% mehr Bachschmerlen in der Rinne als in der Verrohrung (Abb. 3.5.6.2a).

Auch bei den Versuchen mit einer nur halb gefüllten Verrohrung wandern im Fließgeschwindigkeitsbereich von $0,5 \leq v \leq 0,75$ m/s 15,0% bzw. 14,9% (stückbezogen) mehr Fische durch das Rohr als bei vergleichbaren Verhältnissen in der Fließrinne. Bei einer höheren Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s besteht eine Differenz in der Erfolgsquote von 53,4% zu Gunsten der Fließrinne (Abb. 3.5.6.2b).

Über den gesamten Strömungsbereich bis zu $v \leq 1,0$ m/s ändert sich weder bei gefüllter noch bei nur halb gefüllter Verrohrung das Längenspektrum der gewanderten Versuchsfische im Vergleich zu ihrer Grundgesamtheit. Das heißt, daß alle vorhandenen Größenklassen der Fische die Verrohrung passieren konnten. Lediglich bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s liegen leicht erhöhte Werte der medianen Totallängen aus Versuchen in der gefüllten Verrohrung vor. Dies zeigt ein verschobenes Längenspektrum zu Gunsten der großen Exemplare an (Abb. 3.5.6.3a, Abb. 3.5.6.3b).

Bei nur halbem Wasserstand in der Verrohrung wandert knapp ein Drittel der Versuchsfische der Größenklassen 8 cm bis 10 cm entsprechend ihrer Präsenz in der Grundgesamtheit wobei die Größen um 6 cm gar nicht vertreten sind (Abb. 3.5.6.4a). Im Gegensatz dazu migrieren bei vollem Wasserstand und gleicher Fließgeschwindigkeit außerordentlich viele Individuen der minimalen und maximalen Größenklassen (Abb. 3.5.6.4b).

Bezogen auf das gesamte Strömungsprofil nivellieren sich die Werte der mittleren Totallänge (95% CI) für beide Befüllungszustände bei Größen zwischen 8,4 cm und 8,5 cm ein. Allerdings tendiert das Längenspektrum der gewanderten Bachschmerlen bei halber Befüllung der

Verrohrung und einer maximalen Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0$ m/s in Richtung der größeren Exemplare (Abb. 3.5.6.5a, Abb. 3.5.6.5b).

Die Abfolge der kumulierten Häufigkeiten ergibt einheitlich in beiden Fällen, daß ca. 70% der Individuen bis zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit von $v \leq 0,5$ m/s durch die Verrohrung wandern (Abb. 3.5.6.6a, Abb. 3.5.6.6b).

→ FAZIT:

Bis zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit in einer Verrohrung von $v \leq 0,75$ m/s sind keine Einbußen in der Zusammensetzung der verschiedenen Größenklassen bei aufwärts wandernden Bachscherlen zu erwarten. Der Befüllungszustand der Verrohrung sollte dabei aber ein Maximalmaß annehmen. Hierbei müssen allerdings die technischen Sicherheitsreserven bei Hochwasserabflüssen beachtet werden.

Unter rein quantitativen Aspekten sind Fließgeschwindigkeiten in Verrohrungen von $v \leq 0,5$ m/s wünschenswert, ebenfalls bei maximalen Befüllungszuständen.

Tab. 3.5.6.1: Quantitative Migrationsbilanz von aufwärts gewanderten Bachschrerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Bachscherle (<i>Barbatula barbatula</i>)	„Strömung [m/s]/Mächtigkeit der Wassersäule [cm]/Verrohrung“										
	[m/s]	0,25 [*]	0,5 [*]	0,75 [*]	1,0 [*]	1,0 [*]	1,0 [*]	0,25 ^{**}	0,5 ^{**}	0,75 ^{**}	1,0 ^{**}
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		74	74	70	19	18	16	73	67	66	48
Stück [%]		96,1	97,4	92,1	25,3	24,0	21,3	97,3	91,8	94,3	68,6
Biomasse [g]		344	344	324	83	90	77	338	316	310	231
Biomasse [%]		97,7	97,7	92,0	23,6	25,6	21,9	98,8	95,5	93,7	70,9
Länge Minimum [cm]		5,2	5,2	5,2	7,2	7,2	7,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Länge Maximum [cm]		10,0	10,0	10,0	9,8	10,1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Gewicht Minimum [g]		1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
Gewicht Maximum [g]		8	8	8	7	7	8	8	8	8	8

*Wasserstand in der Verrohrung $\cong 12,5$ cm

**Wasserstand in der Verrohrung $\cong 25$ cm

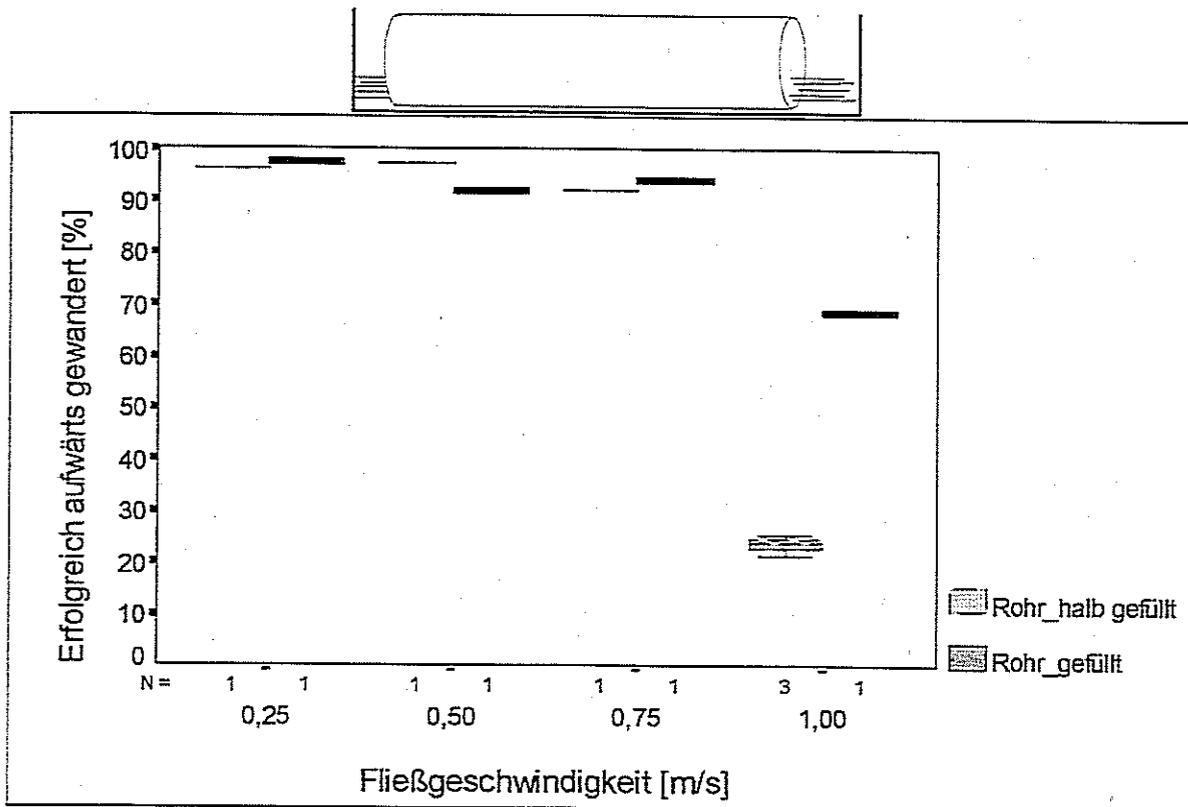


Abb. 3.5.6.1: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschrerlen (*Barbatula barbatula*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

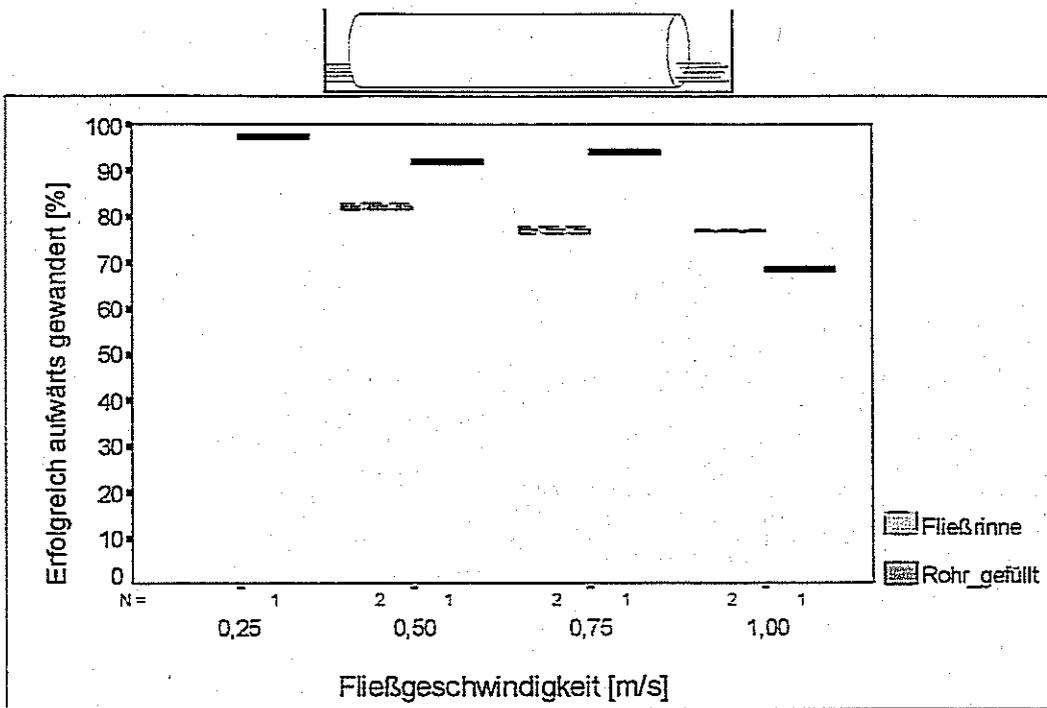


Abb. 3.5.6.2a: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) in der Fließrinne (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; keine Substratauflage) und in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm, ganz gefüllt) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

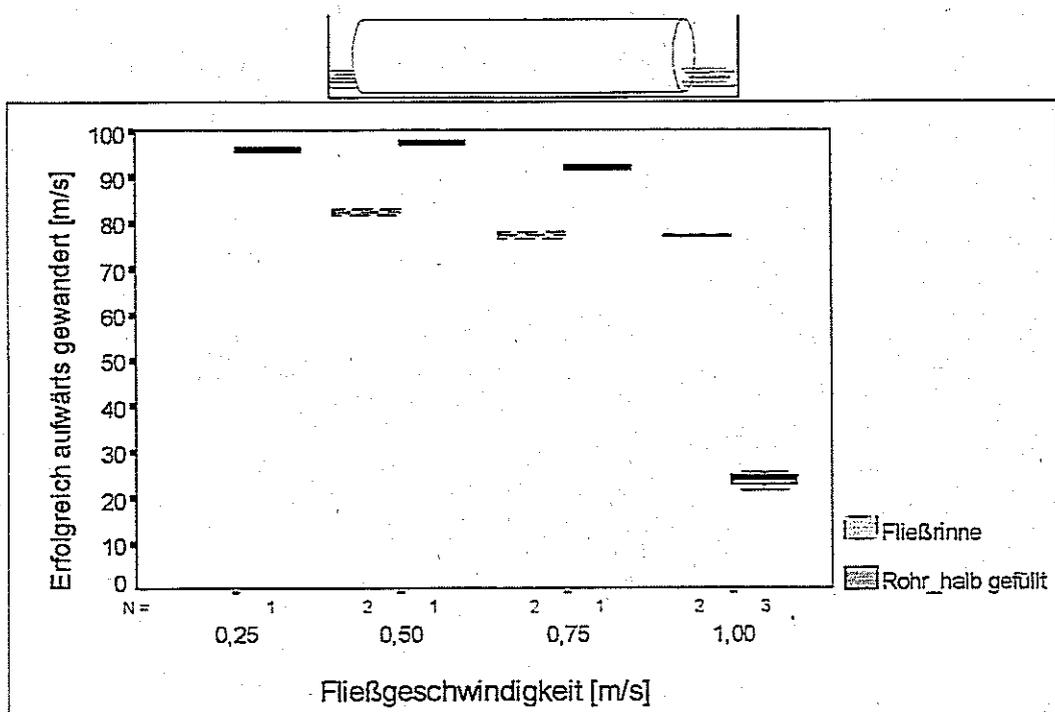


Abb. 3.5.6.2b: Relative Aufwärtswanderungen von Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) in der Fließrinne (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm; keine Substratauflage) und in einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm, halb gefüllt) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit [N = Anzahl der Versuche unter der jeweiligen Bedingung].

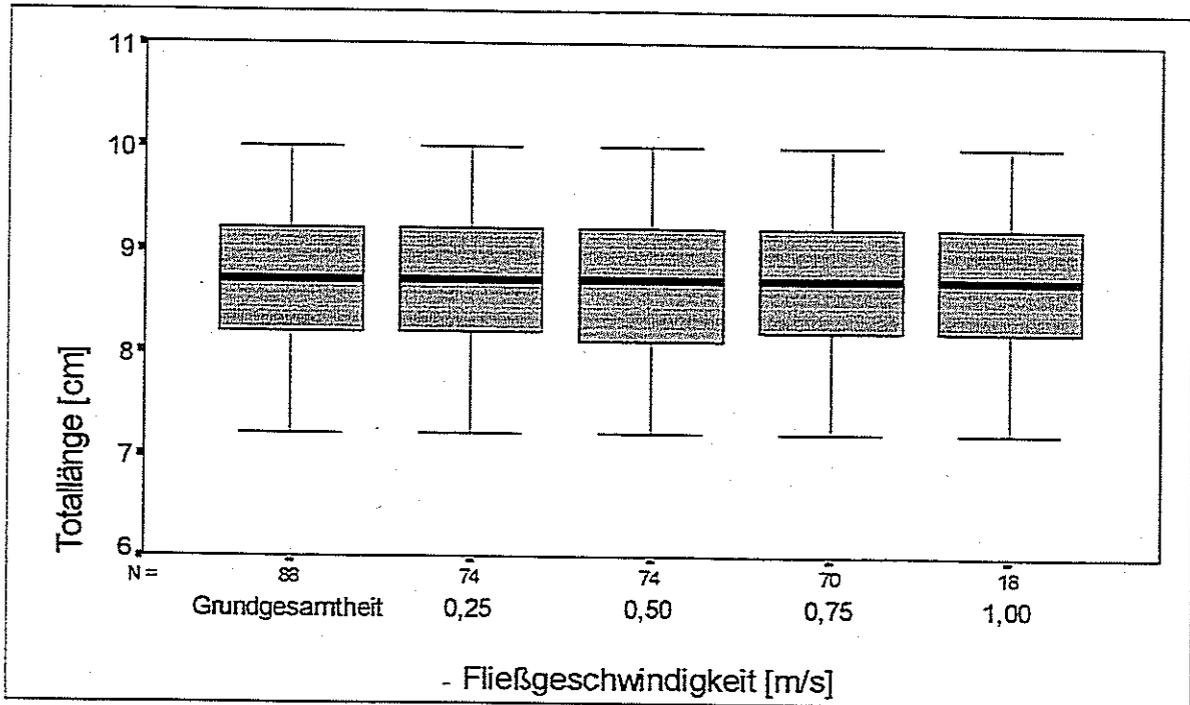


Abb. 3.5.6.3a: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

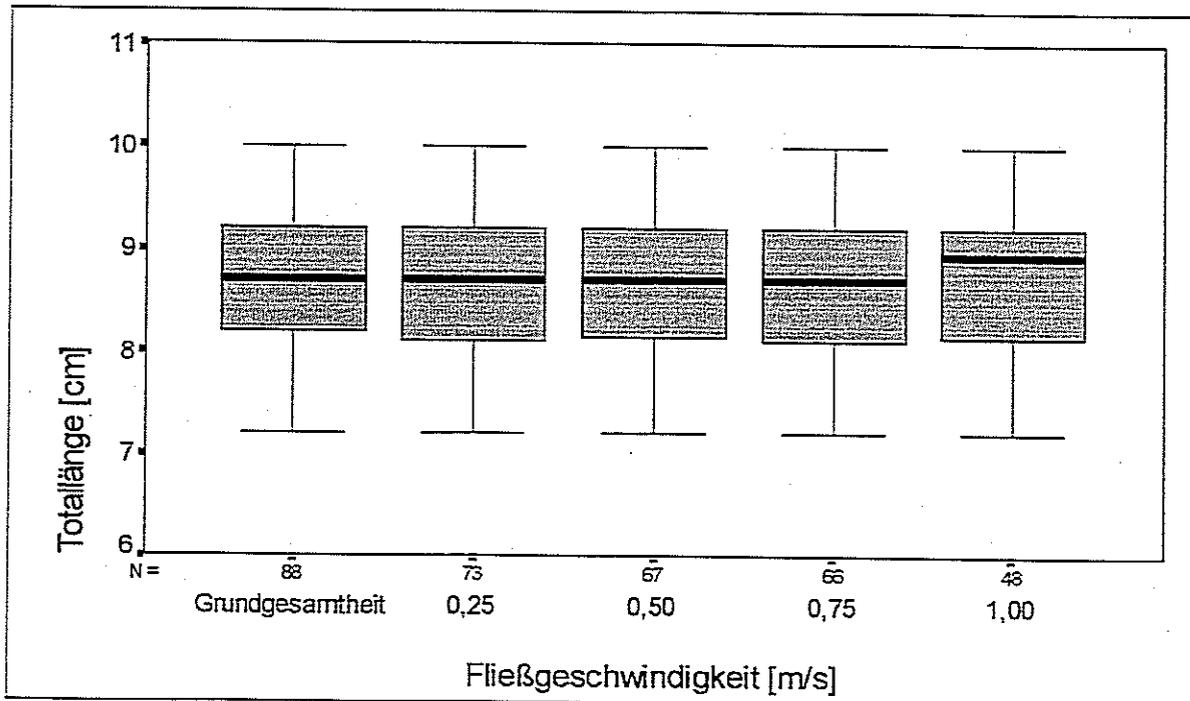


Abb. 3.5.6.3b: Verteilung und Lage der Individuallängen ($x_{0,25}$, \bar{x} , $x_{0,75}$) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

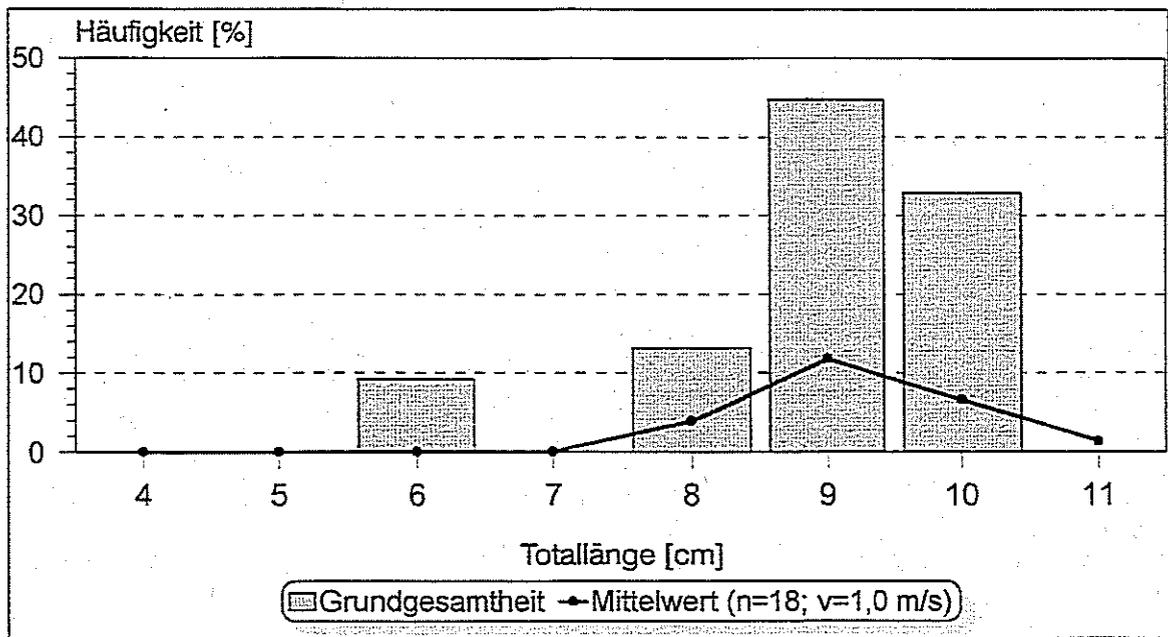


Abb. 3.5.6.4a: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s.

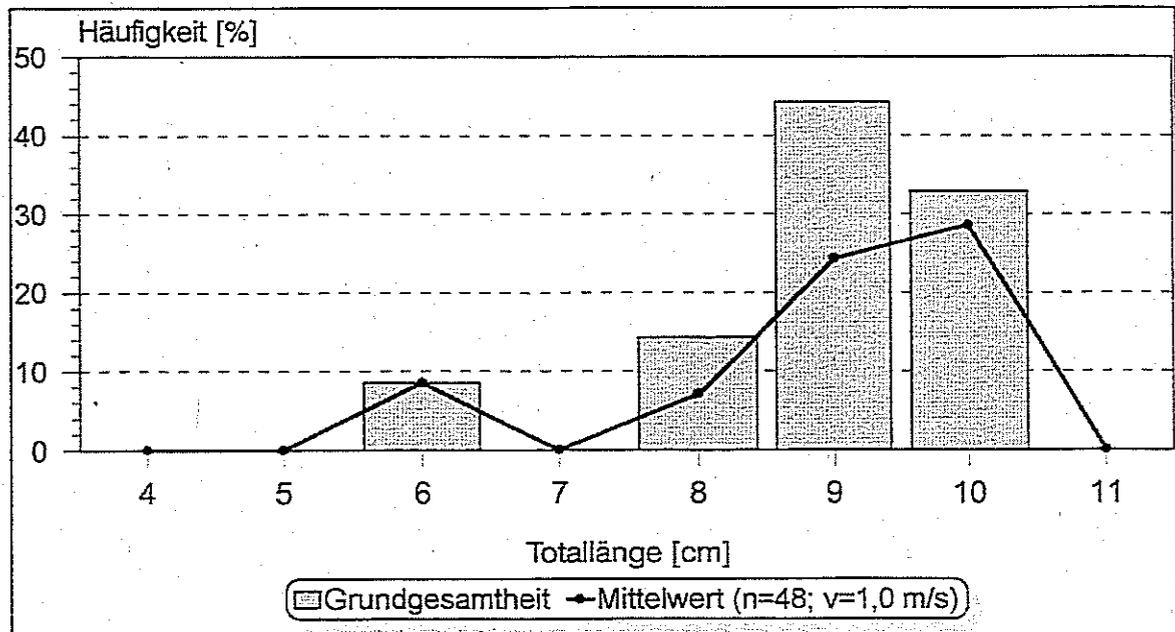


Abb. 3.5.6.4b: Relatives Verhältnis der Längenhäufigkeitsverteilungen von potentiell möglichen (Grundgesamtheit) zu tatsächlich aufwärts gewanderten (\bar{x}) Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s.

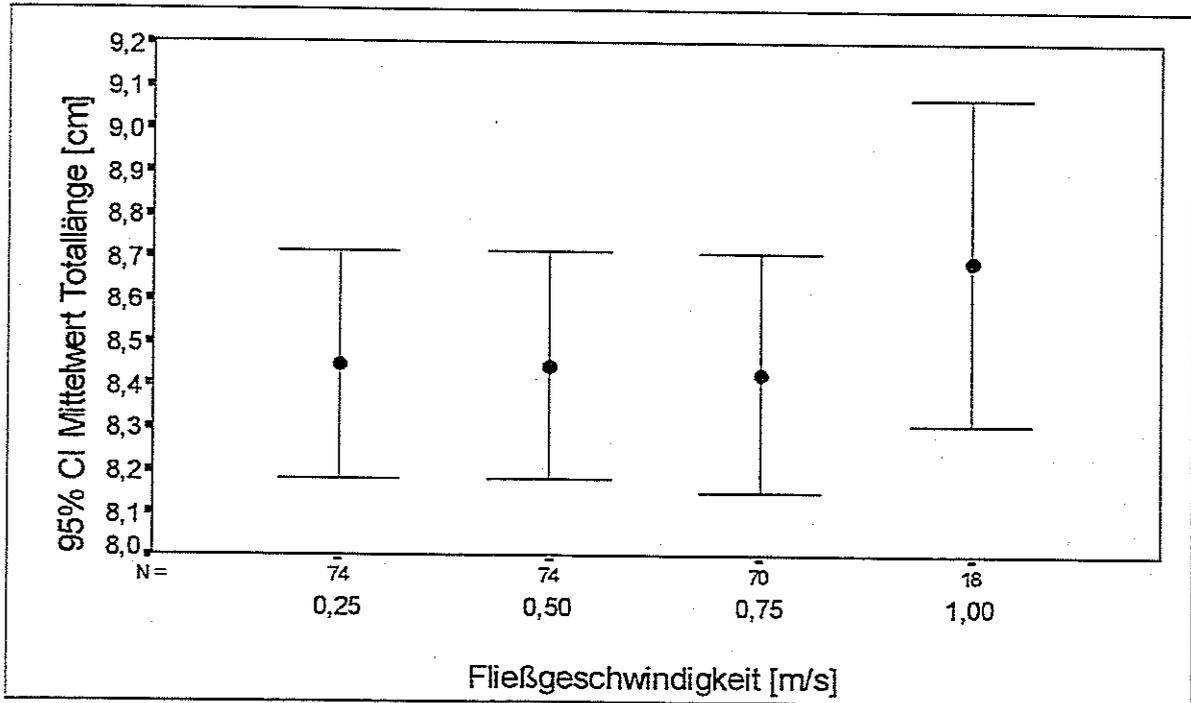


Abb. 3.5.6.5a: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

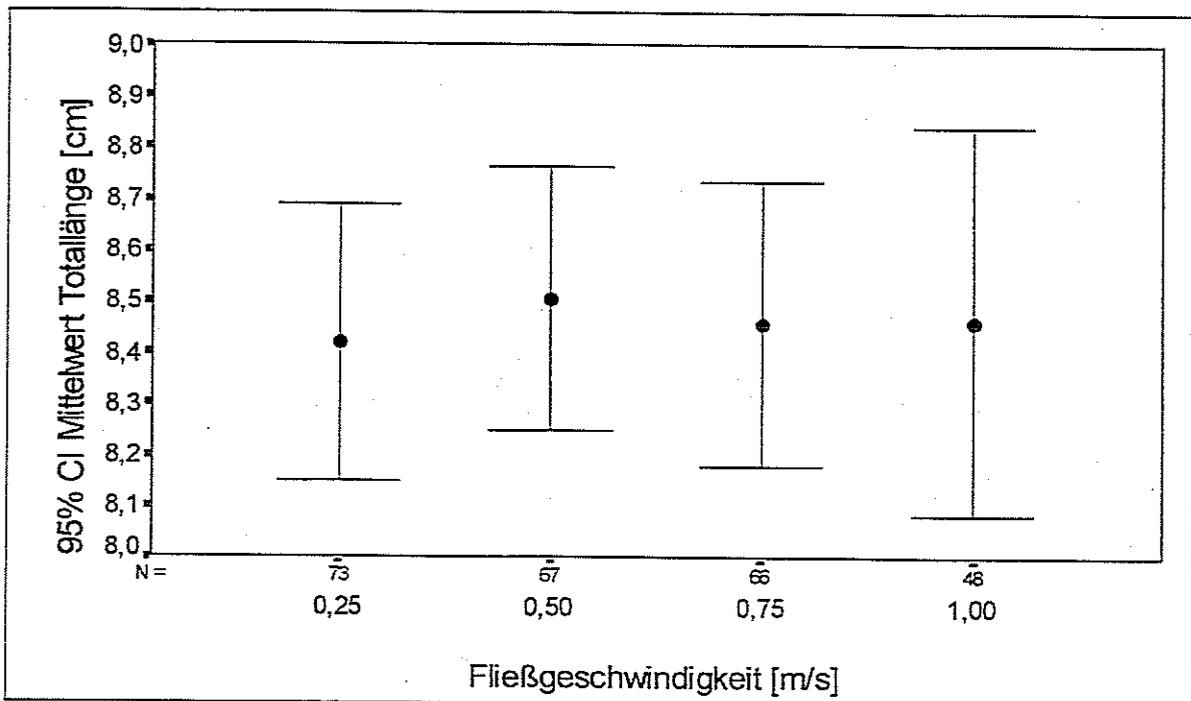


Abb. 3.5.6.5b: Mittlere Totallängen (95% Konfidenzintervall, CI) von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [N = Anzahl der Individuallängen].

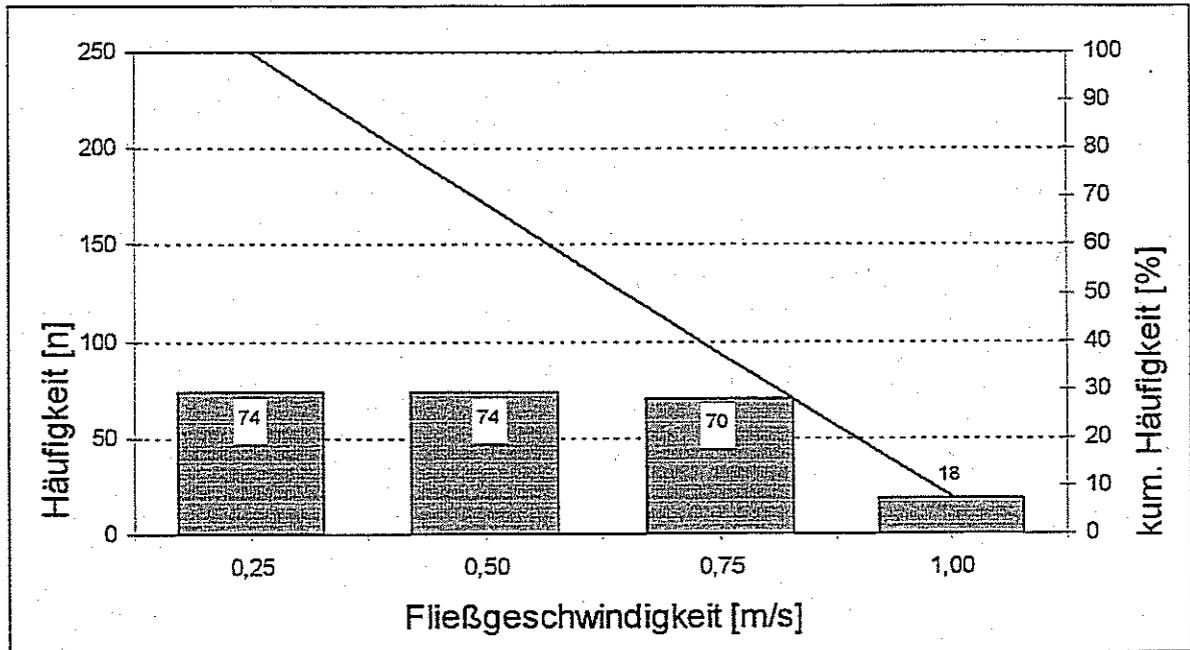


Abb. 3.5.6.6a: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit halbem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Zahlen in oder über den Balken = Anzahl der Individuen].

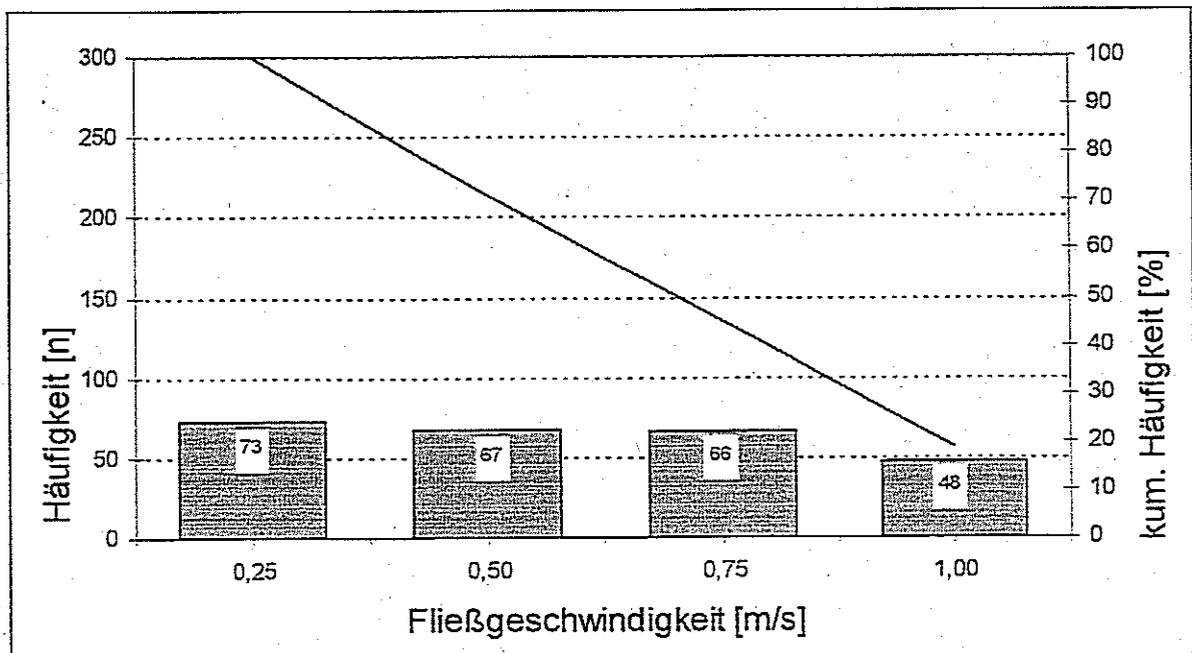


Abb. 3.5.6.6b: Absolute (Balken) und kumulierte (Linie) Häufigkeiten von aufwärts gewanderten Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) bei einer simulierten Verrohrung ($\varnothing = 25$ cm) mit vollem Wasserstand und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in einem künstlichen Fließgerinne [Zahlen in den Balken = Anzahl der Individuen].

4. Diskussion

Über die vielfältige Bedeutung der Durchgängigkeit der Gewässer für Fische besteht heute kein Zweifel mehr. Fische erreichen unterschiedliche Schwimgeschwindigkeiten, die u. a. abhängig sind von Körperform und -größe, Wassertemperatur, Kondition, Parasitierungsgrad und sich differenzieren lassen in Dauer-, gesteigerte, kritische und Sprintgeschwindigkeit (JENS, 1997). Gerade die kritische Schwimm- und die Sprintgeschwindigkeit beeinflussen den Wanderungserfolg der Fische entgegen hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Hierfür gelten Anhaltswerte, die sich aus Versuchen unter kontrollierten Bedingungen ableiten. JENS (1997) zitiert verschiedene Autoren und gibt als kritische Schwimgeschwindigkeit für die Mühlkoppe 0,2 - 0,34 m/s an, während für die Bachschmerle Werte von 0,24 - 0,46 m/s gemessen wurden. STAHLBERG & PECKMANN (1987) ermittelten für die Bachschmerle eine kritische Schwimgeschwindigkeit von 0,61 m/s und fanden einen Grenzwert von 0,4 m/s für alle in ihren Untersuchungen berücksichtigten Kleinfischarten (Bachschmerle, Dreistachliger Stichling, Gründling), bei dem die Fische längere Zeitperioden (mind. 15 Minuten) schwimmen können. Als maximale Fließgeschwindigkeit, entgegen der Fische gerade noch in der Lage sind, diese im Kurzsprint (ca. 15 s) zu überwinden, gibt GEBLER (1989, 1991) für Jung- und Kleinfische 1,0 m/s, für Cypriniden 1,5 m/s, für Forellen und andere Salmoniden 2,0 m/s an.

Die Angaben über die kurzzeitigen Schwimgeschwindigkeiten streuen breit. Laut GUNKEL (1996) sind die Vertreter der einheimischen Fischfauna in der Lage, kurzzeitig Strömungsgeschwindigkeiten von 1 - 1,5 m/s über geringe Distanzen zu durchschwimmen, wobei maximale Strömungsgeschwindigkeiten von 1,5 m/s in den Durchlässen einer Fischaufstiegsanlage nicht überschritten werden dürfen und die mittleren Geschwindigkeiten deutlich darunter liegen sollten. Nach LIEBSCH & WEDEMEYER (1994) können alle einheimischen Fischarten zum Überwinden von Hindernissen kurze Distanzen mit mindestens 2 bis 2,5 m/s zurücklegen, wobei diese Werte auch den beobachteten Fluchtgeschwindigkeiten entsprechen, die innerhalb einer Zeitdauer von < 1 s erreicht werden.

Solche Leistungen erbringen viele Fischarten sicherlich im Einzelfall. Es ist aber kritisch zu hinterfragen, ob Höchstleistungen dieser Dimension in einer kumulierten Kette von hintereinander geschalteten Einzeldisziplinen (z. B. lange Verrohrung - Hell-/Dunkel-Kontrast - hohe Fließgeschwindigkeit - Absturz - Tosbecken *oder* hohe Anzahl von Einzelkammern in

Fischtreppen mit großem Gefälle) auch noch erbracht werden können. Weiterhin stellt sich dann die Frage, ob dies, alles zusammengefaßt, auf leistungsschwache Arten wie z. B. bodenorientierte Kleinfische auch noch zutrifft.

In den Versuchen wurde angestrebt, jeweils einen definierbaren Faktor nachvollziehbar zu bearbeiten und seinen limitierenden Wert unter Versuchsbedingungen isoliert zu quantifizieren. Die so ermittelten Werte sind für die Freilandsituation als sichere Grenzen ebenso relevant, wenn auch hier durch andere Randbedingungen der Einfluß des jeweiligen Faktors abgemildert oder verwischt werden kann.

Die erarbeiteten Werte sollen somit die Minimalbedingungen für jeden untersuchten Faktor angeben, unter denen eine Bewegung der jeweiligen Fischart in ausreichendem Maß (Basis 70%) erforderlich sind. Darüber darf jedoch nicht vergessen werden, die einzelnen Bedingungen in ihrem Zusammenwirken zu berücksichtigen, was bereits in den Darstellungen der Ergebnisse vorgenommen wurde. Die betrifft etwa die Auswirkungen der Parameter „Fließgeschwindigkeit“, „Absturzhöhe“ und „Substratrauhigkeit“, welche sich in ihrer Barrierewirkung summieren oder auch u. U. teilweise kompensieren können.

Die Untersuchungen erfolgten in einer Apparatur mit relativ kleiner Dimensionierung, um die Abhängigkeiten der verschiedenen Bedingungen von Strömung und Strukturen detailliert herauszuarbeiten. Diese Mechanismen können jedoch kleinräumig in jeder Art von Fließgewässern von Bedeutung sein, insbesondere im Bereich von Schwellen, Wehren oder Fischaufstiegsanlagen.

Bei den hier durchgeführten Versuchen in einer künstlichen Fließrinne hat sich bei den Fischarten Mühlkoppe, Elritze und Bachschmerle erwartungsgemäß eine deutliche Abhängigkeit zwischen der aufwärts gerichteten Wanderung und der Strömungsgeschwindigkeit gezeigt. Daraus läßt sich ableiten, daß hohe Fließgeschwindigkeiten mit $v > 1$ m/s auf diese Kleinfische eine Barrierewirkung mit den dementsprechenden Folgen entwickeln können. Aus den Untersuchungen geht hervor, daß die Mühlkoppe bis zu einer Geschwindigkeit von $v \leq 0,75$ m/s hoch abundant (ca. 67%) migriert, darüber zeigt sich eine stark abfallende Tendenz. STAHLBERG-MEINHARDT (1994) stellte in Freilanduntersuchungen von Bächen mit typischen Mühlkoppenhabitaten Fließgeschwindigkeiten von 0,2 - 0,7 m/s fest, mit Maximalwerten bis zu 120 cm/s. BLESS

(1990) differenziert nach unterschiedlichen Altersstadien. Er hebt die existentielle Bedeutung von langsam fließenden Bereichen mit einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen 0,2 - 0,4 m/s für junge Groppen heraus und betont aber andererseits die Wichtigkeit von passenden Mikrohabitaten mit diversen Bedingungen, u. a. Geschwindigkeiten von 0,2 - 1,2 m/s zur Abwicklung der vollständigen Lebenszyklen der Mühlkoppe. Im oberen Fließgeschwindigkeitsbereich von ca. $v = 1,0$ m/s sind Koppen physisch noch in der Lage aktiv zu wandern, ab $v = 1,6$ m/s erfolgt eine sofortige Abdrift. Nach HOFFMANN (1996) kommt die Koppe im Flachwasser (stärker strömend) von Bachabschnitten mit steinigem Substrat (mittlere Korngrößen 8 - 10 cm) und einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 - 0,8 m/s (Driftkörpermessung) vor. JUNGWIRTH (1994, 1995) berichtet von gescheiterten Aufstiegsversuchen von Koppen in Fischaufstiegshilfen mit Strömungsgeschwindigkeiten von 1,77 m/s. Die vorläufigen Ergebnisse aus dem Projekt „Fischartenkartierung in Bayern“ zeigen, daß die Strömungsgeschwindigkeiten in den untersuchten bayerischen Gewässern mit einem Vorkommen der Mühlkoppe zwischen 0,21 - 0,3 m/s liegen (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998). Hierbei muß allerdings berücksichtigt werden, daß es sich bei diesen Angaben um Mittelwerte handelt, die durch subjektives Abschätzen bzw. durch die „Schwimmkörpermethode“ und Einzelmessungen zustande gekommen sind. Außerdem beziehen sich die angegebenen Werte auf die Strömungsgeschwindigkeit an der unmittelbaren Oberfläche und nicht auf sohlnahe Strömungsgeschwindigkeiten.

Bei Strömungsversuchen mit Elritzen hat sich ein Grenzwert von $v = 0,9$ m/s herauskristallisiert, ab dem die Wanderungsraten stark abnehmen. BLESS (1992) berichtet über Vorkommen von Elritzen in kleinen Fließgewässern mit Strömungsgeschwindigkeiten von 0,2 - 0,8 m/s. In 10,8% der untersuchten bayerischen Gewässer mit einem Vorkommen der Elritze beträgt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit zwischen 0,11 - 0,2 m/s (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998). RINGLER et al. (1994) sieht die ausbaubedingte Erhöhung der Fließgeschwindigkeit („mehr als 1 m/s“) bei gleichzeitigem Verlust strömungsarmer Stillwasserbereiche sogar als eine der wesentlichen Rückgangsursachen für die Elritze an.

Auch bei der Bachschmerle nahm im Versuch der Wanderungserfolg bei einer Geschwindigkeit von $v > 0,9$ m/s rapide ab. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt HANSEL et al. (1997) bei Rinnenversuchen. Dort nehmen die Mittelwerte von Anteilen eingesetzter Schmerlen, die eine Öffnung durchschwimmen, bei 0,89 m/s auf etwa 50% ab. Bei 1,39 m/s betragen die

Mittelwerte nur noch 8%. BRUNKEN (1988) beschreibt das Vorkommen von Bachschmerlen in kleinen norddeutschen Fließgewässern bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,1 - 0,7 m/s und maximal 1,0 m/s, wobei Werte von 0,2 m/s offenbar präferiert werden. JANSEN et al. (1996) fand Schmerlen „an allen Stellen im Bach“, wobei zumindest während der Vegetationsperiode, ein eindeutiger Schwerpunkt für flache Abschnitte (< 25 cm) mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von 30 - 50 cm/s und lückigem Sohlsubstrat mit großen „Störsteinen“ (> 20 cm) zu verzeichnen war. Nach ausführlichen Untersuchungen in kleinen Fließgewässern empfiehlt BLESS (1985), daß die maximale Strömungsgeschwindigkeit in den Lebensräumen der Bachschmerle auf Dauer nicht über 1,0 m/s liegen sollte. Für die Jugendstadien sind strömungsberuhigte Zonen von nicht mehr als 0,2 m/s von existentieller Bedeutung. Übergänge zwischen den Eckwerten sollten vorhanden sein. Die mittlere Fließgeschwindigkeit in bayerischen Bachschmerlengewässern beträgt 0,21 - 0,3 m/s (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998).

Mühlkoppen reagieren äußerst träge auf unterschiedliche vertikale Mächtigkeiten der Wassersäule. So konnte bei den durchgeführten Versuchen mit abnehmenden Wassertiefen nur ein leichtes Abfallen der Wanderungsraten festgestellt werden. Selbst bei einer minimalen Tiefe von 2,5 cm wanderten noch knapp 70% der eingesetzten Fische. STAHLBERG-MEINHARDT (1994) erhielt bei Freilandhebungen keine Hinweise auf eine Tiefenpräferenz bei adulten Mühlkoppen, wohl aber bei 0⁺-Individuen. Diese leben vorzugsweise in Bereichen mit Tiefen < 0,2 m. Demgegenüber waren die Abundanzen von Bachforelle, Elritze und Bachschmerle positiv mit der Tiefendiversität in Übereinstimmung mit JUNGWIRTH & WINKLER (1983) korreliert.

Weder bei Elritzen- noch bei Bachschmerlenversuchen konnte ein starker Einfluß der vertikalen Mächtigkeit der Wassersäule auf den Wanderungserfolg dieser Fischarten nachgewiesen werden. Bei minimalen Wassertiefen von 2,5 cm wanderten in beiden Fällen noch ca. 80% der Versuchsfische. Bei Untersuchungen an typischen Elritzengewässern stellte BLESS (1992) eine durchschnittliche Tiefe von 0,25 - 0,48 cm fest und kommt zu dem Ergebnis, daß junge Elritzen im Vergleich zu den Adulten deutlich niedrigere Wasserstände ertragen, ohne die Tendenz zur verstärkten Aufsuchung von Deckung zu zeigen. BRUNKEN (1988) gibt für charakteristische Bachschmerlenhabitate einen Tiefenbereich von 0,02 - 0,20 m an und betont, daß für das Vorkommen der Art flach überströmte, hartsubstratreiche Gewässerpartien ausschlaggebend sind, wobei besonders die geringe Wassertiefe von

Bedeutung ist. Derartige Biotopstrukturen sind in natürlichen Fließgewässern in charakteristischer Weise im Wechsel mit tieferen Zonen vorhanden (pool-riffle-patterns). JANSSEN et al. (1996) untersuchte Schmerlenhabitats und stellte ähnlich wie BRUNKEN, einen eindeutigen Schwerpunkt für flache Abschnitte (< 25 cm) fest. Hinsichtlich der Angaben zum maximalen Tiefenvorkommen aller drei Kleinfischarten in bayerischen Gewässern (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998) muß jedoch betont werden, daß dabei methodische Schwierigkeiten beim Fang der Tiere mit dem Elektroaggregat nicht unberücksichtigt bleiben dürfen.

Mühlkoppfen präferieren bei der aufwärts gerichteten Wanderung Bodensubstrat als Schutz vor hohen Fließgeschwindigkeiten. Dabei bewirkte die Größe des kiesigen Substrates bei den durchgeführten Rinnenversuchen lediglich eine unterschiedliche Streubreite, erbrachte in der quantitativen Betrachtung aber keine stark differierenden Werte. BLESS (1983) wies bei Mühlkoppfen eine größenspezifische Wahl bestimmter Substrattypen nach und der durch sie gebildeten Deckung. HOFFMANN (1996) beschreibt u. a. das räumliche und zeitliche Nutzungsmuster von Mühlkoppfen und charakterisiert typische Habitats als Bachabschnitte mit steinigem Substrat (mittlere Korngrößen 8 - 10 cm). JUNGWIRTH (1995) schlägt vor, Fischaufstiegshilfen durchgehend mit Sohlsubstrat auszustatten, da in Bereichen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit für Arten mit geringer Schwimmleistung die Gefahr der Abdrift besteht. Unter diesen Gegebenheiten stellen Möglichkeiten zum Aufsuchen von Strömungsschatten (z. B. Steinen) die einzige Chance für ein erfolgreiches Fortkommen dar. Eine Aufwärtswanderung von Mühlkoppfen gelingt in Fischaufstiegshilfen über den Porenraum von geschüttetem Sohlsubstrat (Korndurchmesser > 70 mm) von überflossenen Schotterfurten (JUNGWIRTH, 1994). Auch GEBLER (1991) weist darauf hin, daß viele Arten und insbesondere bodenorientierte Kleinfische (z. B. Bachschmerle, Mühlkoppe) bei der Aufwärtswanderung auf den Schutz des Lückensystems der Sohle und der Uferbereiche angewiesen sind. QUAST et al. (1997) empfiehlt das Einbringen von Grobsubstrat in Fischaufstiegsanlagen, um so eine sohlnahe Strömungsvielfalt zu erzeugen und damit auch leistungsschwache Fischarten zu fördern. Die Strukturen der Gewässersohle bestehen in bayerischen Mühlkoppengewässern hauptsächlich aus Feinkiesen (> 2 mm), groben Kiesen (> 3 mm) und Steinen (> 63 mm) (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998).

Elritzen und Bachschmerlen zeigten in Migrationsversuchen mit verschiedenen Korngrößen des kiesigen Bodensubstrates hauptsächlich bei einer Fließgeschwindigkeit von $v \cong 1,0$ m/s höhere

Erfolgsraten als in vergleichbaren Versuchen ohne Bodensubstrat. Nach BLESS (1985) gibt es bei der Bachschmerle aber keine echte Präferenz für grobes Substrat (Steine), wohl aber für Strukturelemente im Gewässer, die ein Hohlräumssystem bilden. Die Bachschmerle gehört zu den bodenorientierten Kleinfischarten, die zur Aufwärtswanderung das Lückensystem der Sohle benutzen (GEBLER, 1991). Die Gewässersohle bayerischer Elritzen- und Bachschmerlengewässer strukturiert sich hauptsächlich in Anteile aus Feinkies (> 2 mm), grobem Kies (> 20 mm) und Sand (> 0,063 mm) (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI, 1998). Daraus läßt sich für alle drei untersuchten Kleinfischarten die Notwendigkeit von grobem Sohlsubstrat als Migrationshilfe bei der Überwindung von hohen Strömungswerten bzw. beim Abbau von Strömungsstreß ableiten.

Die Barrierewirkung von Bodenschwellen und Abstürzen konnte an Hand der durchgeführten Untersuchungen für die Fischarten Mühlkoppe, Elritze und Bachschmerle ohne Zweifel belegt werden. Bei den einzelnen Querbauwerken muß jedoch differenziert werden nach der lichten Höhe der Bodenschwelle, der darüber hinweg fließenden vertikalen Mächtigkeit der Wassersäule, deren Fließgeschwindigkeit und der Fallhöhe (Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser) bei einem Absturz. Einen Überblick zur quantitativen Barrierewirkung der verschiedenen Migrationshindernisse auf die untersuchten Kleinfischarten gibt Tabelle 4.1.

Tab. 4.1: Zusammenfassender Überblick zur quantitativen Barrierewirkung verschiedener Migrationshindernisse auf rithrale Kleinfischarten (Ergebnisse aus Versuchen in einer künstlichen Fließrinne).

<i>Fischart/Migrationshindernis</i>	Mühlkoppe <i>(Cottus gobio)</i>	Elritze <i>(Phoxinus phoxinus)</i>	Bachschmerle <i>(Barbatula barbatula)</i>
hohe Strömungsgeschwindigkeit ($v > 1 \text{ m/s}$)	↑	↑	↑
vertikale Mächtigkeit der Wassersäule (bis min. 2,5 cm)	→	↓	↓
Höhe der Bodenschwelle (bis max. 30 cm)	→	↓	↓
Wassersäule ü. d. Bodenschwelle (bis min. 2,5 cm)	→	→	→
Fließgeschwindigkeit ü. d. Bodenschwelle ($v > 1 \text{ m/s}$)	↑	↑	↑
Absturz (Fallhöhe > 5 cm)	↑	↑	↑
Verrohrung	↑	→	→

↑ starke Barrierewirkung
→ leichte Barrierewirkung
↓ keine Barrierewirkung

Die Versuche wurden artspezifisch aufgegliedert, um speziell für die betrachteten Fischarten als Vertreter charakteristischer Schwimmweisen die limitierenden Bedingungen zu erarbeiten. Die untersuchten Arten sind der klassischen Lebensgemeinschaft der Forellenregion zuzuordnen, wo sie jedoch eher zu den schwächeren „Wanderern und Kletterern“ gehören. Ihre Grenzwerte als für diese Artengemeinschaft repräsentativ zu betrachten und umzusetzen bedeutet daher mit Sicherheit, jeweils der gesamten Fischzönose eine ausreichende Ausbreitungsmöglichkeit zu gewährleisten und das Gewässer diesbezüglich suffizient zu sanieren.

Über die segregierende Wirkung von Querbauwerken (hier speziell Bodenschwellen und Abstürze) auf Wasserorganismen wird seit langem in der Fachliteratur berichtet (BARANDUN, 1990; SEIFERT & HARTMANN, 1995; JUNGWIRTH, 1994 und 1995; JUNGWIRTH & PELIKAN, 1989; PETER, 1995; EAWAG, BUWAL, 1995; HALLE, 1993; ZERRATH 1996; JENS, 1982; STAHLBERG-MEINHARDT, 1994; BRUNKEN, 1988; SCHUMANN, 1994; BLESS, 1985; QUAST et al., 1997; DVWK, 1996 und 1997; GEBLER, 1991; GUNKEL, 1996; RINGLER et al., 1994). Arbeiten zum quantitativen Einfluß von Querbauwerken auf Fische sind unter der Berücksichtigung der methodischen Probleme im Freilandgewässer nicht ohne Schwierigkeiten durchzuführen und bleiben deshalb auf den rein qualitativen Aspekt in kleinen Fließgewässern oder Fischaufstiegsanlagen beschränkt. Seltener sind Hinweise zu erhalten, die in diese spezielle Problematik Kleinfischarten mit einbeziehen. So wurden unterschiedliche Ergebnisse, Ansichten und Meinungen bezüglich der Leistungsfähigkeit von Fischen bei der Überwindung von Abstürzen (und Bodenschwellen) veröffentlicht. BLESS (1985) weist schon in frühen Jahren nach, daß die Neubesiedlung durch die Bachschmerle in geeignet erscheinenden und quellwärts liegenden Habitaten und Strukturen vor Absturzbauwerken zum Erliegen kommt. Dabei können Sohlschwellen oder Absturzbauwerke mit nur 20 cm Fallhöhe die Ausbreitung stoppen, da sie unüberwindliche Biotopschranken darstellen, welche nur in einer Richtung passiert werden können (Ventileffekt). SCHUMANN (1994) kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Auch GEBLER (1991) bzw. EAWAG & BUWAL (1995) sehen einen 0,2 m hohen senkrechten Absturz mit abgelöstem Strahl für einen Großteil der Wasserbewohner und für Kleinfische als absolut unüberwindliches Hindernis an. JUNGWIRTH (1994 und 1995) berichtet von Untersuchungen in Fischaufstiegshilfen, wo Abstürze mit abgelöstem Überfallstrahl und Höhen von 10 cm bzw. 25 cm wohl noch von Jungforellen (> 118 mm Körperlänge), aber nicht mehr von Koppen passiert werden konnten. Auch ZERRATH (1996) ist der Meinung, daß senkrecht abfallende

Absturzbauwerke bereits ab einer Höhe von 20 cm für viele Fische ein unüberwindliches Hindernis darstellen. STAHLBERG-MEINHARDT (1994) sieht eine Gefährdung des Lebenszyklusses und damit der Fischarten durch Querbauwerke mit einer Absturzhöhe von mehr als 20 cm, welche die quellwärts gerichteten Ausgleichsbewegungen der Mühlkoppe unterbinden. Die maximalen Absturzhöhen für Forellen betragen nach Ansicht von JENS (1982) 0,3 m, für alle anderen Fischarten 0,25 m, aber besser nur 0,15 - 0,2 m. PETER (1995) gibt einen Bereich zwischen 10 cm und 30 cm an, der von Kleinfischen bereits nicht mehr überwunden werden kann. Sowohl SEIFERT & HARTMANN (1995) als auch JUNGWIRTH & PELIKAN (1989) differenzieren die noch zulässigen Höhenunterschiede an Absturzbauwerken in Umgehungsgerinnen oder Fischaufstiegshilfen nach Fischregionen. So wird zum einen für die Rhithralregion eine maximale Absturzhöhe von $\leq 0,2$ m (SEIFERT & HARTMANN) bis maximal 0,3 m (JUNGWIRTH & PELIKAN) vorgeschlagen, während in Potamalgewässern Höhenunterschiede von ca. 0,1 - 0,15 m (SEIFERT & HARTMANN) und nicht mehr als 0,1 m (JUNGWIRTH & PELIKAN) für tolerierbar angesehen werden.

Eine Barrierewirkung von Verrohrungen oder Rohrdurchlässen zeigte sich in den angestellten Versuchen besonders bei der Mühlkoppe, die sowohl auf hohe Fließgeschwindigkeiten als auch verringerte Wasserstände in der Verrohrung reagiert. Ein negativer Effekt des Hell-/Dunkel-Kontrastes beim Rohrein- bzw. Wiederaustritt auf das Migrationsverhalten der Mühlkoppen wird praktisch ausgeschlossen, da die Hauptwanderungsraten dieser Fischart hauptsächlich während der Dämmerung, in der Nacht und während der frühen Morgenstunden stattgefunden haben. Bei Elritze und Bachschmerle wird nur eine leichte Barrierewirkung der Verrohrung gesehen, obwohl auch hier sekundär eine Reaktion auf hohe Fließgeschwindigkeiten und niedrigen Wasserstand zu beobachten war. QUAST et al. (1997) konnte weder bei Aufstiegskontrollen an Umgehungsgerinnen oder anderen Anlagen (der Potamalregion, *Anmerkung d. Verfassers*), in deren Verlauf ein Rohrdurchlaß zu passieren war, eine Barrierewirkung feststellen. Entscheidend für die Durchwanderbarkeit solcher Anlagen scheint das Vorliegen von für den Fisch akzeptablen Strömungsbedingungen zu sein („insbesondere von maximalen Fließgeschwindigkeiten unter 2 m/s“). Ähnliche Beobachtungen zitiert JENS et al. (1997) von laichstimmigen Äschen (*Thymallus thymallus* L.) und Bachforellen (*Salmo trutta fario* L.). Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, daß eine ausreichende Wassertiefe und nicht zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten den Fischen das Durchschwimmen der verrohrten Strecken ermöglichen. Aus Untersuchungen von WATERSTRAAT (1989) ist bekannt, daß die Wanderung von laichwilligen Bachneunaugen (*Lampetra planeri*, BLOCH) durch eine 23 m

lange Verrohrung mit Fließgeschwindigkeiten von 0,74 - 0,87 m/s nicht beeinträchtigt wurde. Bei den Angaben anderer Autoren zur Auswirkung einer Verrohrung auf Kleinfischarten muß unterschieden werden, ob sich am Rohrauslauf ein Absturz gebildet hat. BLESS (1985) beschreibt den segregierenden Effekt einer 250 m lange Rohrleitung (\varnothing 30 cm; $v \approx 0,3$ m/s; schwankende Wasserstände zwischen 4 bis 10 cm Höhe) ohne Wasserabsturz auf Bachschmerlen. Bei Freilanduntersuchungen in Schmerlengewässern kommt SCHUMANN (1994) zu ähnlichen Ergebnissen und fordert deshalb, Betonrohre zukünftig und prinzipiell durch Brücken zu ersetzen. BRUNKEN (1988) berichtet über die synergetische Wirkung von Verrohrung und Absturz auf Bachschmerlenpopulationen, ohne den Effekt der einzelnen Baumaßnahme genauer abschätzen zu können.

Bei den durchgeführten Versuchen konnte lediglich bei einer Serie eine Korrelation zwischen der Wassertemperatur und der Erfolgsrate der Fische gefunden werden (Abb. 4.1). Da sich die Temperaturdifferenz aber innerhalb einer Zeitspanne von 10 Tagen einspielte und lediglich im Bereich von 3°C bewegte wird ein direkter Zusammenhang ausgeschlossen.

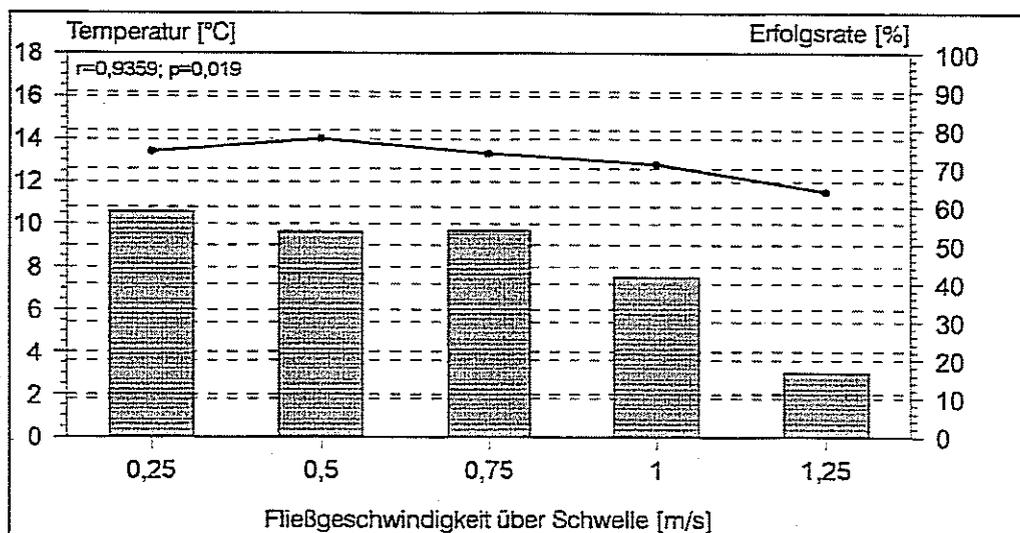


Abb. 4.1: Erfolgsrate von Mühlkoppen (*Cottus gobio*) und Wassertemperatur bei unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit über einer simulierten Bodenschwelle.

Die Wanderaktivitäten der Koppe sind hochsignifikant korreliert mit Wassertemperatur und Tageslänge. Dabei wird die Wanderungsaktivität von der Wassertemperatur in höherem Maße beeinflusst als von der Tageslänge. Die Temperatur des Wassers ist auch bei anderen Fischarten einer der wichtigsten Faktoren, die Wanderungen stimulieren (BLESS, 1990). Im Gegensatz

dazu fand STAHLBERG-MEINHARDT (1994) keine Korrelation der Bewegungen von Mühlkopfen mit der Wassertemperatur. Auch JUNGWIRTH (1994) konnte bei Untersuchungen in Fischaufstiegshilfen keine eindeutige Abhängigkeit des Fischaufstieges von der Wassertemperatur nachweisen.

Als Resümee läßt sich sagen, daß die Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt mit den Untersuchungen anderer Autoren korrespondieren und diese vielfach untermauern. Darüber hinaus konnten viele, ursächlich bereits bekannte Tatsachen oder bisher geltende Richtwerte, mit diesen Untersuchungen weiter spezifiziert werden. So besteht beispielsweise seit langem ein Konsens über die schädigende Wirkung von Querbauwerken auf Fischpopulationen. Mit den vorliegenden Ergebnissen sollen nun in Freilanduntersuchungen geeignete ökologisch verträgliche Bauwerke modelliert oder gefunden werden, um den schädigenden Einfluß auf Kleinfischarten möglichst zu unterbinden oder wenigstens zu minimieren.

Damit soll ein Beitrag zu einer ebenso praktikablen wie auch ökologisch wirksamen Verbesserung der Durchgängigkeitsverhältnisse in den Gewässern geleistet werden.

Die aus den Ergebnissen erarbeiteten Vorschläge erfordern überwiegend keinen höheren baulichen Aufwand als die klassischen „harten“ Lösungen. Wenn durch die präzise Formulierung und Beschreibungen von Minimalbedingungen für die Ausbreitung der Fische in der vorgenommenen Weise dem Wasserbauer hinreichend klare Vorgaben zu einer funktionsfähigen technischen Umsetzung an die Hand gegeben werden können, dann hat diese Studie ihr wichtigstes Ziel erreicht und kann hoffentlich zu einem ökologisch orientierten Zusammenwirken zwischen den biologischen und den ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen am Wasser beitragen.

5. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse und Empfehlungen zu deren Umsetzung in die Praxis

Im Sinne des heutigen Verständnisses vom Naturschutz wird nicht mehr die einzelne Tier- oder Pflanzenart in den Vordergrund als ein zu schützendes oder erhaltenswertes Gut gerückt, sondern es hat sich mittlerweile in allen betroffenen Schichten die Forderung nach einer Intaktheit der Lebensräume der jeweiligen Arten manifestiert. Im Falle der Ichthyozönosen kann diese Intaktheit u. a. nur mit einer funktionierenden Durchgängigkeit wiederhergestellt werden. In seiner ursprünglichen Bedeutung hätte dies aber eine konsequente Renaturierung sämtlicher Fließgewässer zur Folge. Da solche Ableitungen zum einen in unserer Kulturlandschaft nicht ohne weiteres zu realisieren sind und außerdem den unmittelbaren finanziellen und zeitlichen Rahmen bei weitem sprengen würde, müssen solche Forderungen momentan auf die sogenannten „Hotspots“ beschränkt bleiben. Hierunter fallen alle Wanderhindernisse, die den aquatischen Organismen die freie Auf- und Abwanderung verwehren.

Im Idealfall werden die bestehenden Migrationsbarrieren mit dem nötigen Sachwissen durch moderne Wanderhilfen ersetzt. Hier hat sich in jüngster Zeit beispielsweise an Wehren oder Abstürzen die sogenannte „Rauhe Rampe“ sowohl in ihrer Funktion als auch seitens ihrer naturnahen Bauweise in vielen Fällen hydrologisch und ökologisch bestens bewährt. Andererseits kann versucht werden, bestehende und in ferner Zukunft nicht substituierbare Barrieren wie Bodenschwellen, kleinere Abstürze oder Verrohrungen mit der Kenntnis der für Fische gültigen biologischen Grenz- und Richtwerte bezüglich der hydraulischen und morphologischen Parameter mit relativ wenig Mitteln und Aufwand um- und damit durchgängig zu gestalten. Der durch eine Wiederherstellung der Durchgängigkeit erzielbare positive Effekt würde sich dann im großen und ganzen zwar immer noch in ausgebauten Fließgewässern abspielen, in der Gesamtheit der Forderung nach einem intakten Lebensraum wäre damit aber eine weitere und entscheidende Hürde genommen.

Bei den nachfolgenden Tabellen handelt es sich zum einen um zusammengefaßte, fischartenspezifische Ergebnisse, die für kumulierte Migrationsraten kleiner als 70% erhalten wurden und zum anderen um abgeleitete Empfehlungen, für die Migrationsraten größer als 70% erwartet werden. Hierbei darf aber nicht vergessen werden, daß die Ergebnisse in einer künstlichen Fließrinne zustande gekommen sind und noch nicht durch Freilandbeobachtungen überprüft oder mit solchen verglichen werden konnten. Die Empfehlungen gelten deshalb

vorerst nur als Richtwerte, die das Ziel haben, Wanderhindernisse für Kleinfische durchgängiger zu machen.

5.1 Mühlkoppe

An allen die Durchgängigkeit betreffenden kritischen Stellen bzw. Wanderhindernissen wie z. B. Abschnitte mit hoher Strömung, im Oberwasser von Bodenschwellen und Abstürzen oder in Verrohrungen sollte die Fließgeschwindigkeit nicht höher als $v \leq 0,5$ m/s sein (Tab. 5.1.1). Handelt es sich hierbei um besonders kurze und nicht beliebig sich wiederholende Abschnitte (< 1 m), kann die Strömungsgeschwindigkeit in solchen Fällen durchaus Werte bis $v \leq 0,75$ m/s annehmen. Da Fische nicht in strömungsberuhigten ufernahen Bereichen aufwärts wandern sondern im Stromstrich, sollten andererseits die Richtwerte für ein positiv rheotaktisches Verhalten auch nicht unterschritten werden. Dies bedeutet, daß eine gewisse Mindestgeschwindigkeit des Wassers gegeben sein muß, damit sich Fische parallel zur Strömung ausrichten und versuchen gegen diese anzuschwimmen. So wird bei der Mühlkoppe Bachschmerle und Elritze die positive Rheotaxis ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,15 m/s ausgelöst (ADAM & SCHWEVERS, 1997). Um eine aufwärts gerichtete Wanderung für alle Größenklassen zu ermöglichen, werden heterogene Strömungsprofile, d. h. Bereiche mit abwechselndem Strömungsbild (laminar/turbulent) in jedem Falle präferiert.

Als generelle Mindestwassertiefe wird für kleine Fließgerinne mit einer Präsenz von Mühlkoppfen eine vertikale Mächtigkeit der Wasserschicht von $t \geq 10$ cm empfohlen. Diese sollte aber gerade an schwer überwindbaren Hindernissen wie Bodenschwellen und Abstürzen mit einem „Sicherheitsaufschlag“ ausgestattet sein, wobei die endgültige Tiefe im Unter- und Oberwasser solcher Migrationsbarrieren dann im Bereich von mindestens $10 \leq t \leq 20$ cm liegen muß.

Die lichte Höhe herkömmlicher Bodenschwellen sollte maximal $10 \leq h_s \leq 15$ cm betragen, die maximale Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser an einem Absturzbauwerk darf $\Delta h < 5$ cm zwingend nicht überschreiten. Dabei muß nochmals betont werden, daß Abstürze mit abgelöstem Wasserstrahl in Mühlkoppengewässern grundsätzlich bei allen Abflußverhältnissen, hauptsächlich jedoch bei Niedrigwasserführung vermieden werden sollten. Auch müssen als weitere Prämissen für die Überwindbarkeit beider Hindernistypen gleichzeitig die Forderungen nach einer reduzierten Strömungsgeschwindigkeit ($v \leq 0,5$ m/s) und einer Mindestwassertiefe im Oberwasser ($10 \leq t \leq 20$ cm) erfüllt sein. Der Überfallstrahl an einem Absturz darf weder aufgeweitet, abgelöst, noch zu stark belüftet sein. Bei einem kompakten Strahl, der auf eine geneigte Absturzwand fällt, haben Fische die Möglichkeit, das Hindernis schwimmend und nicht springend zu überwinden (vgl. DVWK, 1997; GEBLER, 1991; JUNGWIRTH; 1994).

Im Falle einer nicht vermeidbaren Verrohrung sollte ein maximaler Befüllungsgrad angestrebt werden mit einer oberen Grenze der Fließgeschwindigkeit von höchstens $v \leq 0,5$ m/s. Dabei dürfen allerdings Sicherheitsreserven für einen eventuell auftretenden Maximalabfluß und Aspekte der Standsicherheit nicht unberücksichtigt bleiben. Generell kann gesagt werden, daß eine Überdimensionierung im Durchmesser eines Rohres eher positiv zu werten ist. In Verbindung mit ausgebrachtem und stellenweise fixiertem, grobem Bodenmaterial würde eine Aufweitung des Rohrdurchmessers eine gewünschte Herabsetzung der Fließgeschwindigkeit nach sich ziehen. Hierbei muß es allerdings zu einem Kompromiß zwischen Geschiebeführung bzw. -ablagerung und Abfluß kommen. Die beste, aber wohl auch teuerste Methode zur Aufhebung der migrationshemmenden Wirkung einer Verrohrung wäre, deren Substitution durch eine Brückenkonstruktion (Überbrückung). Hierbei könnte das natürliche Substrat im Gewässerbett verbleiben, das Gefälle dem natürlichen angeglichen werden und bei einer extremen Abflußsituation käme es bei entsprechender Dimensionierung nicht zu einem Stauereffekt. Auch käme es weder zu einer Auskolkung noch zu einem Absturz des Wassers wie am Ende einer Verrohrung. Außerdem wäre eine Beeinflussung durch einen Hell-/Dunkel-Kontrast bei der Ein- bzw. Auswanderung in einen überbrückten Gewässerabschnitt möglicherweise geringer als bei einer gleich langen verrohrten Strecke.

Tab. 5.1.1: Ergebnisse und abgeleitete Empfehlungen bezüglich Wanderhindernissen in kleinen Fließgewässern mit einem Vorkommen der Mühlkoppe (*Cottus gobio*).

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	Ergebnisse bei Migrationsraten < 70%	abgeleitete Empfehlungen für Migrationsraten ≥ 70%
Fließgeschwindigkeit (v)	$v \geq 0,75$ m/s	$v \leq 0,5$ m/s
Wassertiefe (t)	$t < 10$ cm	$t \geq 10$ cm
Bodensubstrat 16 mm	$v \geq 1,0$ m/s	$v \leq 0,5$ m/s
Bodensubstrat 32 mm	$v \geq 1,0$ m/s	$v \leq 0,5$ m/s
Höhe der Bodenschwelle (h_s)	$h_s \geq 30$ cm?	max. $10 \leq h_s \leq 15$ cm und $v_s \leq 0,5$ m/s und mind. $10 \leq t_s \leq 20$ cm
Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle (t_s)	$t_s < 10$ cm	mind. $10 \leq t_s \leq 20$ cm
Fließgeschwindigkeit über der Bodenschwelle (v_s)	$v_s > 0,75$ m/s	$v_s \leq 0,75$ m/s (kurze Strecke*) $v_s \leq 0,5$ m/s (lange Strecke**)
Absturzhöhe (Δh) <small>v_A Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser t_A vertikale Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser</small>	$\Delta h \geq 5$ cm	$\Delta h < 5$ cm und $v_A \leq 0,5$ m/s und mind. $10 \leq t_A \leq 20$ cm
Verrohrung	$v \geq 0,5$ m/s	$v < 0,5$ m/s und max. Befüllungsgrad alternativ: Überbrückung

* < 1 m / ** > 1 m

5.2 Elritze

An Wanderhindernissen in Gewässern mit einem Vorkommen der Elritze sollte die Fließgeschwindigkeit im Bereich von $v \leq 0,5$ m/s liegen (Tab. 5.2.1). Dieser Richtwert gilt für längere Distanzen bis 3 m. Sind nur kurze Strecken (< 1 m) zu überwinden, kann die Strömungsgeschwindigkeit auch höhere Werte bis $v \leq 1,0$ m/s annehmen. Ist bei längeren Abschnitten (bis 3 m) Bodensubstrat (mind. 16 bzw. 32 mm) vorhanden, kann die Fließgeschwindigkeit mittlere Werte von $\max. 0,5 \leq v \leq 1,0$ m/s erreichen. Richtwerte für ein positiv rheotaktisches Verhalten sind zu beachten (vgl. 5.1 Mühlkoppe), heterogene Strömungsprofile sind in allen Fällen anzustreben.

Die empfohlene Mindestwassertiefe sollte an „sensiblen“ Stellen mindestens im Bereich von $10 \leq t \leq 20$ cm liegen.

Bodenschwellen sollten eine maximale Höhe von $10 \leq h_s \leq 15$ cm nicht überschreiten, während die maximale Differenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel (Absturz) $\Delta h < 5$ cm sein sollte. In beiden Fällen muß gleichzeitig gewährleistet sein, daß dabei keine höheren Fließgeschwindigkeiten als $v \leq 0,5$ m/s vorherrschen und die vertikale Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser der Hindernisse wenigstens $t_s > 10$ cm beträgt (allgemeine Hinweise zum „Absturz“ siehe 5.1 Mühlkoppe).

Für Verrohrungen gilt dasselbe wie im Fall der Mühlkoppe ($v \leq 0,5$ m/s; max. Befüllungsgrad).

Tab. 5.2.1: Ergebnisse und abgeleitete Empfehlungen bezüglich Wanderhindernissen in kleinen Fließgewässern mit einem Vorkommen der Elritze (*Phoxinus phoxinus*).

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	Ergebnisse bei Migrationsraten $< 70\%$	abgeleitete Empfehlungen für Migrationsraten $\geq 70\%$
Fließgeschwindigkeit (v)	$v \geq 0,75$ m/s	$v \leq 0,5$ m/s
Wassertiefe (t)	$t < 2,5$ cm ?	$10 \leq t \leq 20$ cm
Bodensubstrat 16 mm	$v \geq 1,0$ m/s ?	$\max. 0,5 \leq v \leq 1,0$ m/s
Bodensubstrat 32 mm	$v \geq 1,0$ m/s ?	$\max. 0,5 \leq v \leq 1,0$ m/s
Höhe der Bodenschwelle (h_s)	$h_s \geq 30$ cm ?	$\max. 10 \leq h_s \leq 15$ cm und $v_s \leq 0,5$ m/s und $t_s > 10$ cm
Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle (t_s)	$t_s < 2,5$ cm ?	$t_s > 10$ cm
Fließgeschwindigkeit über der Bodenschwelle (v_s)	$v_s > 1,0$ m/s	$v_s \leq 1,0$ m/s (kurze Strecke*) $v_s \leq 0,5$ m/s (lange Strecke**)
Absturzhöhe (Δh) <small>v_A Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser t_A vertikale Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser</small>	$\Delta h \geq 7,5$ cm	$\Delta h < 5$ cm und $v_A \leq 0,5$ m/s und $t_A > 10$ cm
Verrohrung	$v > 0,75$ m/s	$v \leq 0,5$ m/s und max. Befüllungsgrad alternativ: Überbrückung

* < 1 m / ** > 1 m

5.3 Bachschmerle

In längeren Gewässerabschnitten (bis 3 m) mit problematischen Bereichen bezüglich der Durchwanderbarkeit sollte die Strömungsgeschwindigkeit $v \leq 0,5 \text{ m/s}$ sein (Tab. 5.3.1). Ist Bodensubstrat vorhanden (mind. 16 bzw. 32 mm), können Werte bis max. $0,5 \leq v \leq 1,0 \text{ m/s}$ vorkommen. Dies gilt auch, wenn nur sehr kurze Distanzen ($< 1\text{m}$) von der Bachschmerle überwunden werden müssen. Richtwerte für ein positiv rheotaktisches Verhalten sind zu beachten (vgl. 5.1 Mühlkoppe), heterogene Strömungsprofile sind erstrebenswert.

Wie bei der Elritze liegt der Richtwert für die empfohlene Mindestwassertiefe an „sensiblen“ Stellen im Bereich von mindestens $10 \leq t \leq 20 \text{ cm}$.

Bodenschwellen sollten möglichst nicht höher als $h_s \leq 15 \text{ cm}$ sein, während die maximale Differenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel (Absturz) $\Delta h < 5$ zwingend nicht überschreiten darf. Ebenso wird empfohlen, die Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser der Hindernisse unter $v_s \leq 0,5 \text{ m/s}$ zu halten und eine vertikale Mächtigkeit der Wassersäule von mindestens $t_s > 10 \text{ cm}$ zu gewährleisten (allgemeine Hinweise zum „Absturz“ siehe 5.1 Mühlkoppe).

Für Verrohrungen gilt gleiches wie für die Mühlkoppe ($v \leq 0,5 \text{ m/s}$; max. Befüllungsgrad).

Tab. 5.3.1: Ergebnisse und abgeleitete Empfehlungen bezüglich Wanderhindernissen in kleinen Fließgewässern mit einem Vorkommen der Bachschmerle (*Barbatula barbatula*).

Bachschmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	Ergebnisse bei Migrationsraten $< 70\%$	abgeleitete Empfehlungen für Migrationsraten $\geq 70\%$
Fließgeschwindigkeit (v)	$v > 0,9 \text{ m/s}$	$v \leq 0,5 \text{ m/s}$
Wassertiefe (t)	$t < 2,5 \text{ cm} ?$	$10 \leq t \leq 20 \text{ cm}$
Bodensubstrat 16 mm	$v \geq 1,0 \text{ m/s} ?$	max. $0,5 \leq v \leq 1,0 \text{ m/s}$
Bodensubstrat 32 mm	$v \geq 1,0 \text{ m/s} ?$	max. $0,5 \leq v \leq 1,0 \text{ m/s}$
Höhe der Bodenschwelle (h_s)	$h_s \geq 30 \text{ cm} ?$	$h_s \leq 15 \text{ cm}$ und $v_s \leq 0,5 \text{ m/s}$ und $t_s > 10 \text{ cm}$
Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle (t_s)	$t_s < 2,5 \text{ cm} ?$	$t_s > 10 \text{ cm}$
Fließgeschwindigkeit über der Bodenschwelle (v_s)	$v_s > 0,75 \text{ m/s}$	$v_s \leq 1,0 \text{ m/s}$ (kurze Strecke*) $v_s \leq 0,5 \text{ m/s}$ (lange Strecke**)
Absturzhöhe (Δh) <small>v_A Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser t_A vertikale Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser</small>	$\Delta h > 7,5 \text{ cm}$	$\Delta h < 5 \text{ cm}$ und $v_A \leq 0,5 \text{ m/s}$ und $t_A > 10 \text{ cm}$
Verrohrung	$v > 0,75 \text{ m/s}$	$v \leq 0,5 \text{ m/s}$ und max. Befüllungsgrad alternativ Überbrückung

* $< 1 \text{ m}$ / ** $> 1 \text{ m}$

5.4 Rhithralregion

Deutliche Unterschiede der biologischen Grenz- und Toleranzwerte bei der Aufwärtswanderung, deren Dimensionen und der daraus abgeleiteten Empfehlungen zeigen sich bei allen drei untersuchten Kleinfischarten zwar nur in einigen wenigen Details (z. B. der Abhängigkeit der Erfolgsraten von der Fischgröße), sie liegen aber trotz des artspezifischen Raum- und Schwimmverhaltens innerhalb enger Grenzen. Dadurch dokumentiert sich signifikant die Anpassung dieser Fischarten an die Bedingungen des gemeinsamen Lebensraumes.

Um den Anforderungen der typischen rhithralen Artengemeinschaft bezüglich der Überwindbarkeit von Migrationshindernissen insgesamt gerecht zu werden, dürfen nur die strengsten Grenzwerte der einzelnen Arten in die praktische Umsetzung eingehen (Tab. 5.4.1). Auf diese Weise dürfte gewährleistet sein, daß damit denjenigen Arten mit einem besseren Leistungspotential (oberhalb dieser Grenzwerte) ohnehin die quellwärts gerichtete Migration gelingt. Die Grenzwerte der leistungsschwächsten Arten als repräsentativ für die Artengemeinschaft zu beachten und auch umzusetzen, bedeutet daher mit Sicherheit, jeweils der gesamten zutreffenden Fischzönose eine ausreichende und adäquate Ausbreitungsmöglichkeit zu gewähren und das Gewässer diesbezüglich angemessen zu sanieren.

Die **Fließgeschwindigkeit** in rhithralen Fließgewässern sollte an allen die Durchgängigkeit beeinträchtigenden Stellen den Richtwert von $v \leq 0,5 \text{ m/s}$ (im Stromstrich) nicht überschreiten. Dies betrifft hauptsächlich die Bereiche im Oberwasser von Bodenschwellen und Abstürzen, aber auch die Strömungsgeschwindigkeit in Verrohrungen.

Daß es sich bei dem geforderten Wert von $v \leq 0,5 \text{ m/s}$ auch gleichzeitig um einen in der Natur vorkommenden Eckwert handelt, zeigt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in bayerischen Fließgewässern (Abb. 5.4.1 - 5.4.3).

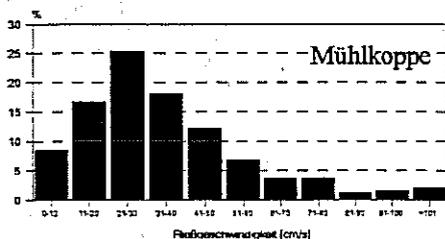


Abb. 5.4.1

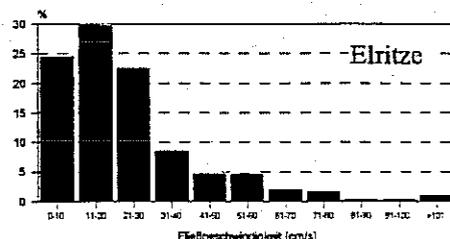


Abb. 5.4.2

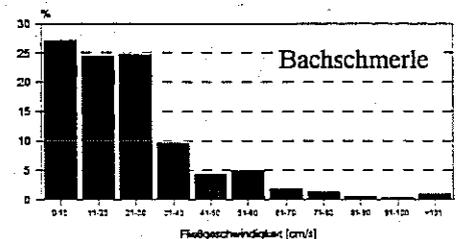


Abb. 5.4.3

Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in bayerischen Fließgewässern (Datenquelle: Bayerische Landesanstalt für Fischerei, Starnberg)

Als generelle **Mindestwassertiefe** (t), die vor allem auch während der Niedrigwasserperioden (MNQ) und darüber hinaus besonders an den sensiblen Stellen (im OW von Bodenschwellen und Abstürzen) unbedingt gewährleistet sein muß, wird ein Mindestwert von $10 \leq t \leq 20$ cm empfohlen.

Die maximale lichte **Höhe von Bodenschwellen** (h_s) muß auf einen Bereich von $10 \leq h_s \leq 15$ cm beschränkt werden.

An unvermeidbaren **Absturzbauwerken** ist zwingend darauf zu achten, daß die maximale Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser höchstens 5 cm beträgt (allgemeine Hinweise zum „Absturz“ siehe 5.1 **Mühlkoppe**).

Verrohrungen sind alternativ durch Überbrückungen zu substituieren, um das Gewässer in seinem ursprünglichen Verlauf nicht zu beeinträchtigen. Ist dies in Ausnahmefällen nicht möglich, sollte die Fließgeschwindigkeit in einer Verrohrung auf $v < 0,5$ m/s reduziert werden. Darüber hinaus ist darauf zu achten, daß genügend **grobkörniges Sohlsubstrat** vorhanden ist, um aufwanderungswilligen Fischen die Migration durch den Porenraum zu ermöglichen. Ein **maximaler Pegelstand** in der Verrohrung ist zu allen Zeiten anzustreben.

Tab. 5.4.1: Artspezifische Grenzwerte und daraus abgeleitete Empfehlungen zur Überwindbarkeit von Migrationshindernissen in der Rhithralregion.

Bachschmerle (B), Elritze (E), Mühlkoppe (M)	strengster artspezifischer Grenzwert (Basis: Migrationsraten < 70%)	daraus abgeleitete Empfehlungen (Basis: Migrationsraten ≥ 70%)
Fließgeschwindigkeit (v)	$v \geq 0,75$ m/s (E, M)	$v \leq 0,5$ m/s
Wassertiefe (t)	$t < 10$ cm (M)	$10 \leq t \leq 20$ cm
Bodensubstrat 16 mm	$v \geq 1,0$ m/s (E, B, M)	$v \leq 0,5$ m/s
Bodensubstrat 32 mm	$v \geq 1,0$ m/s (E, B, M)	$v \leq 0,5$ m/s
Höhe der Bodenschwelle (h_s)	$h_s \geq 30$ cm? (E, B, M)	max. $10 \leq h_s \leq 15$ cm und $v_s \leq 0,5$ m/s und mind. $10 \leq t_s \leq 20$ cm
Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle (t_s)	$t_s < 10$ cm (M)	mind. $10 \leq t_s \leq 20$ cm
Fließgeschwindigkeit über der Bodenschwelle (v_s)	$v_s > 0,75$ m/s (B, M)	$v_s \leq 0,5$ m/s
Absturzhöhe (Δh) <small>v_A Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser t_A vertikale Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser</small>	$\Delta h \geq 5$ cm (M)	$\Delta h < 5$ cm und $v_A \leq 0,5$ m/s und mind. $10 \leq t_s \leq 20$ cm
Verrohrung	$v \geq 0,5$ m/s (M)	$v < 0,5$ m/s und max. Befüllungsgrad alternativ: Überbrückung

5.5 Allgemeine Empfehlungen für die Renaturierung kleiner Fließgewässer

5.5.1 Vermeidung von hohen Strömungsgeschwindigkeiten ($>0,5$ m/s) an Stellen, die die Migration erschweren

Solche Stellen können sein: Abstürze, Sohlschwellen bei Niedrigwasser, Verrohrungen, Stellen im Gerinne mit fehlendem oder unzureichendem Sohlsubstrat usw..

Generell gilt jedoch:

a. Vermeidung eines begradigten, stark gestreckten Gewässerverlaufes und starkem Gefälle

Künstliche Anlage oder natürliches Entstehen von einzelnen Schlingen und Krümmungen führt zu einer lateralen Aufweitung des Gerinneprofils. Eine leichte Mäanderbildung ergibt eine bessere Verzahnung mit dem Umfeld als es in begradigten Gewässern der Fall ist. Es kommt zur Bildung von Prall- und Gleithängen und in Folge zu einer Veränderung des Geschieberegimes. Im gesamten Längsverlauf des Gewässers sollten Strömungsmuster nach dem Prinzip „pools and riffles“ vorhanden sein, wobei sich tiefere Stellen (Kolke) mit geringer Wasserströmung mit flacheren Stellen (Fließbereiche) und höherer Strömung abwechseln.

b. Aufrauung der Sohle mit gewässertypischem Substrat

Unterschiedliches Sohlsubstrat (Material und Körnung) erhöht die Varianz der Strömung und bietet Fischen und anderen Wasserorganismen gleichzeitig Schutz vor dieser. Außerdem kann die Sohle dadurch stabilisiert werden und es entsteht darüber hinaus ein zusätzliches Angebot an Lebensraum (Interstitial, Unterstände).

c. Remäandrierung des Gewässerverlaufes

Eine Laufverlängerung und Abnahme der Spiegellinie reduzieren die Strömungsgeschwindigkeit wirkungsvoll. Starke Mäandrierung tritt aber hauptsächlich nur in Tieflandbächen auf. Remäandrierung kann nur dort verwirklicht werden, wo es dem natürlichen Charakter des Gerinnes entspricht und wo ein dementsprechendes Raumangebot zur Verfügung steht.

d. Entsigelung der Landschaft, Erhöhung der natürlichen Wasserretention

Die natürliche Wasserretention im Bodenkörper des Einzugsgebietes, die die Speicherung von Niederschlägen und deren verzögerte Abgabe in das Gerinne gewährleistet, muß vorrangig verbessert bzw. wiederhergestellt werden. Melioration der Talaue ist zu vermeiden. Extreme Hochwasserspitzen und Überflutungen nach starken Niederschlägen in Regionen mit einem hohen Versiegelungsgrad ließen sich wirkungsvoll vermeiden. Abflußspitzen würden gedämpft und temporär auftretende hohe Fließgeschwindigkeiten reduziert.

5.5.2 *Verbesserung der Durchgängigkeit an Abstürzen und Schwellen*

a. Auflösung der meist glatten Oberfläche von Schwellen und Abstürzen durch Kroneinschnitte (Abb. 5.5.1), Vermeidung von Rundswellen

Kroneinschnitte garantieren eine „Durchströmung“ der Schwelle bei Niedrigwasser und eine Überströmung bei Mittel- und Hochwasser. Zusätzlich erhöhen sie die Strömungsvielfalt an der Schwelle und bauen Strömungshomogenität ab. Als Folge kann sich jedes Individuum den passenden Migrationskorridor suchen, welcher eine Aufwärtsbewegung mit Hilfe seiner nach Art und Alter unterschiedlichen physischen Leistungskapazität erlaubt.

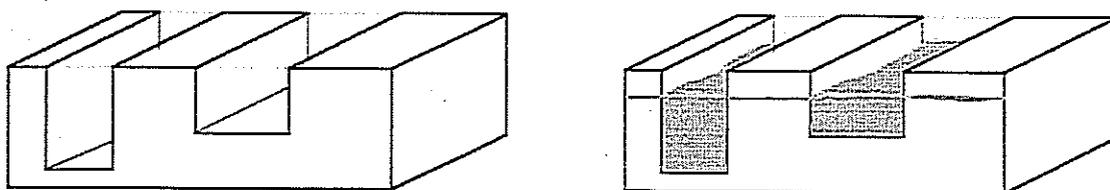


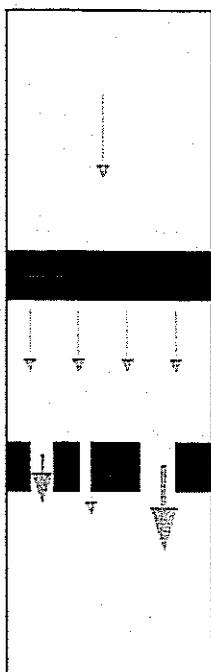
Abb. 5.5.1: Kroneinschnitte bei einer größeren Bodenschwelle (links), „Durchströmung“ einer modifizierten Schwelle bei Niedrigwasser (rechts).

b. Substitution des Baumaterials (Abb. 5.5.2)

Homogen geformte Bodenschwellen aus Holz oder Beton können durch unregelmäßig modellierte Natursteinswellen ersetzt werden. Dabei kann es sich um aufgelockertes, in

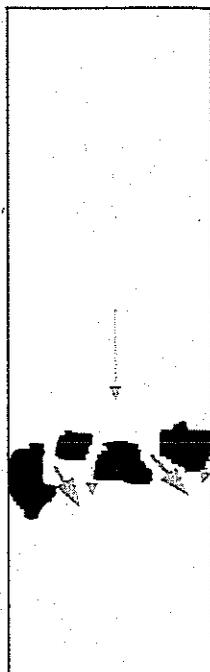
einer Reihe oder Linie eingebrachtes Steinmaterial handeln, welches der Dimension der ursprünglichen Schwelle entspricht. In gleicher Weise kann die Durchgängigkeit an dieser Stelle sowohl für boden- als auch für oberflächenorientierte Wanderformen durch eine kleine raue Rampe wesentlich verbessert werden.

Abb. 5.5.2a:



konventionelle Schwelle (oben),
aufgelöste Schwelle (unten)

Abb. 5.5.2b:



Natursteinschwelle

Abb. 5.5.2c:



Rauhe Rampe

c. Umbau von größeren Abstürzen

Größere Abstürze (ab ca. 40 cm Fallhöhe) lassen sich leider nur durch aufwendige Baumaßnahmen umgestalten. Hier können Umbauten in Form von Sohlgleiten oder rauhen Rampen mit einem Gefälle von mindestens 1:10 (besser 1:15 oder 1:20) vorgenommen werden.

5.5.3 Verbesserung der Durchgängigkeit an Durchlässen oder Verrohrungen

a. Generelle Substitution von Verrohrungen durch großzügig dimensionierte Überbrückungen

Damit kann der natürliche Verlauf des Gerinnes u. U. beibehalten werden und das vorhandene Substrat verbleibt im Gewässerbett. Diese Art des Durchlasses bleibt auch für Unterhaltungsmaßnahmen gut zugänglich. Nachteilig wirkt sich der höhere finanzielle Mittelbedarf aus.

b. Für nicht substituierbare Verrohrungen gilt (Abb. 5.5.3):

Das primäre Profil der Verrohrung sollte so groß wie möglich sein. In dieses kann das Prinzip von *Ökogerinne* (=sekundäres Gerinne im Bodenprofil) und *Entlastungskerinne* (herkömmliches Profil zur Aufnahme von größeren Abflüssen) integriert werden. Als großer Vorteil eines Ökogerinnes erweist sich, daß auch bei Niedrigwasser ein maximaler Befüllungsgrad zur bestmöglichen Erhaltung der Migration gewährleistet und verwirklicht werden kann. Darüber hinaus kann das im Sekundärgerinne ausgebrachte oder verbliebene Sohlsubstrat die Aufgaben als Strömungsinhomogenisator (zur Erhöhung der Strömungsvarianz) und Bildung eines Lückensystems (Refugialraum) voll und ganz erfüllen.

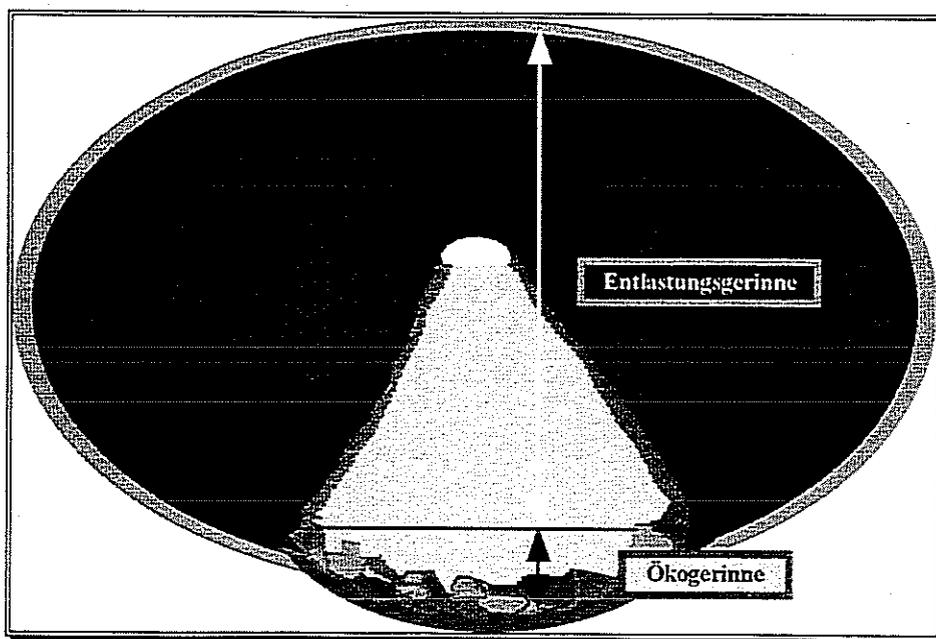


Abb. 5.5.3: Differenzierung einer nicht substituierbaren Verrohrung in Öko- und Entlastungskerinne.

5.6 Anwendbarkeit der Ergebnisse

Aus der Sicht der hydraulischen Gegebenheiten im Versuchsgerinne lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse mühelos auf Gewässer III. Ordnung (Bäche und Gräben) übertragen und können dort bei anstehenden Renaturierungsmaßnahmen auch dementsprechend berücksichtigt werden. Die reine Betrachtung der biologischen Wirkungsweisen bei der quellwärts gerichteten Wanderung der Kleinfische und das spezielle Wissen um die physischen Leistungsgrenzen dieser Arten läßt sogar eine partielle Anwendung und Umsetzung der Ergebnisse auf größere Gewässer (II. Ordnung) zu. Derselbe Aspekt gilt bei einer Nutzung der Ergebnisse für die Gestaltung von Umgehungsgerinnen oder Fischaufstiegsanlagen (Abb. 5.6.1). Unter alleiniger Verwendung der Ergebnisse aus den Versuchen mit unterschiedlicher Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit ist eine bedingte Übertragung auf das Konfliktfeld „Restwasserproblematik“ denkbar.

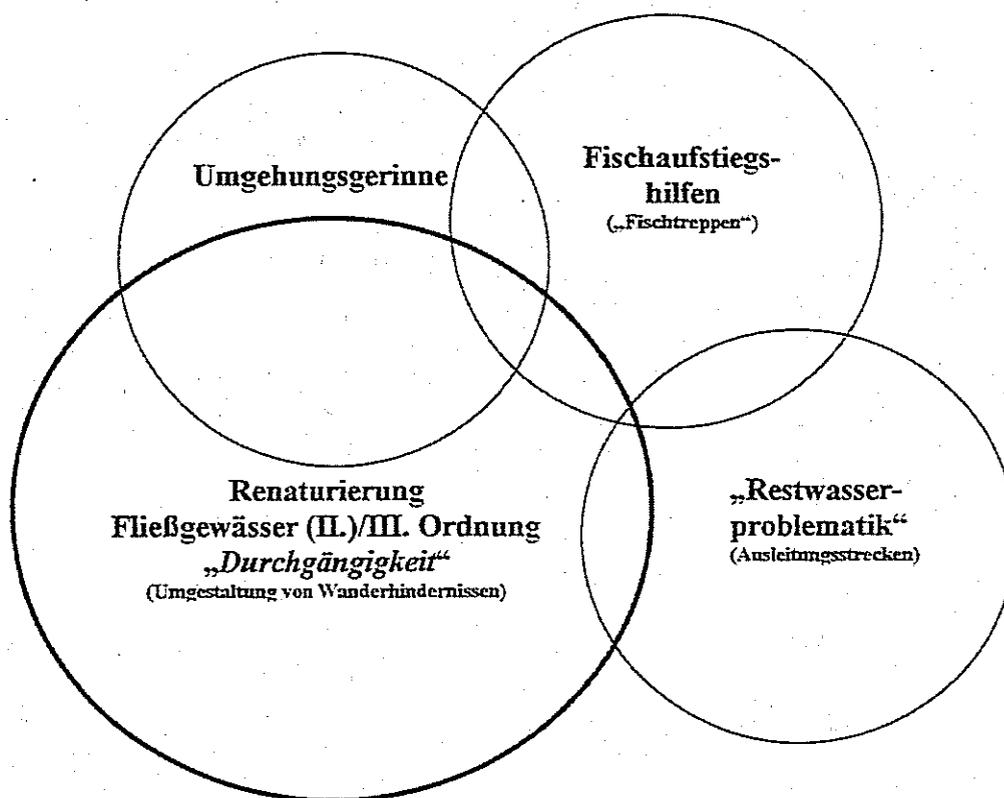


Abb. 5.6.1: Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Konfliktfelder in der Fischerei.

Die potentiellen Zielgruppen für die Umsetzung der Ergebnisse sind die Fischerei, die technische Gewässeraufsicht sowie Planungsbüros bzw. privatwirtschaftlich tätige Sachverständige.

6. Weiterer Forschungsbedarf

Das durchgeführte Forschungsprojekt hat gezeigt, daß im Wanderverhalten von drei Kleinfischarten der Rhithralregion bei der Überwindung von Migrationshindernissen biologische Grenz- und Toleranzwerte bestehen. Eine praktische Umsetzung der Ergebnisse ist erstrebens- und wünschenswert.

Darüber hinaus besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich der folgenden Gesichtspunkte:

- weitergehende Untersuchungen zum Einfluß von Querbauwerken und Strömung auf das Migrationsverhalten rheophiler Fischarten der Hyporhithral- und Potamalregion wie z. B.
 - Gründling (*Gobio gobio*),
 - Hasel (*Leuciscus leuciscus*),
 - Strömer (*Leuciscus souffia*),
 - Schneider (*Alburnoides bipunctatus*) und
 - Steingreßling (*Gobio uranoscopus*).
- Überführung der ermittelten biologischen Grenz- und Toleranzwerte in ökologisch verträgliche Bauwerke (Sohlschwellen, Abstürze mit abgedeckter Absturzkante aus Steinen, rauhe Rampen etc.).
- Effizienzüberprüfung der ermittelten Ergebnisse und Umsetzung derselben in einem kleinen Fließgewässer im Freiland.

7. Zusammenfassung

Keywords: ökologische Durchgängigkeit; Bäche und Gräben; künstliches Fließgerinne; Kleinfische; Barriere; Bodenschwelle; Absturz; Verrohrung.

Die Ausbreitung und Wanderung von Fischen in kleinen Fließgewässern wie Bächen und Gräben betrifft in hohem Ausmaß auch die ansonsten stationär lebenden Arten und hat eine vielfältige ökologische Bedeutung für deren Erhalt und die aquatischen Biozönosen. Die Ursachen dieser funktionalen Wanderungen sind vielfältig.

Durch die verschiedensten wasserbaulichen Maßnahmen und Nutzungsarten ist jedoch oft nur eine mangelhafte Durchgängigkeit in Bächen und Gräben gegeben. Querbauwerke (wie Bodenschwellen und Abstürze) und longitudinale technische Eingriffe (wie Verrohrungen) unterbinden quellwärts gerichtete Fischmigrationen und können zu einer drastischen Verarmung der Fischfauna des Oberlaufes beitragen. Dies führt zu großen ökologischen Schäden im Arteninventar, die oftmals erst nach langer Zeit offenbar werden. Ein hohes Gefährdungspotential besitzen hier die wirtschaftlich nicht genutzten Kleinfische.

In einem künstlichen Fließgerinne wurden deshalb Grundlagen zur Überwindbarkeit von Strömung, definierten Strukturen und Hindernissen für Fische unterschiedlicher Beweglichkeit und Schwimmweise erarbeitet. Als Versuchsfische wurden die Arten Mühlkoppe (*Cottus gobio*), Elritze (*Phoxinus phoxinus*) und Bachschmerle (*Barbatula barbatula*) herangezogen.

In den Versuchen hat sich erwartungsgemäß eine deutliche Abhängigkeit zwischen den Aufwärtswanderungen und der Strömungsgeschwindigkeit gezeigt. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Stromstrich oder im Oberwasser von Schwellen und Abstürzen ($v > 1 \text{ m/s}$) können zur Migrationsbarriere werden. Ähnlich negative Auswirkungen auf das Bewegungsmuster dieser Kleinfischarten haben Abstürze mit einer Fallhöhe $> 5 \text{ cm}$. Die Wanderungsraten durch Verrohrungen werden im wesentlichen durch die darin gegebene Strömungsgeschwindigkeit und den Wasserstand bestimmt. Grobes Bodensubstrat kann bei der aufwärts gerichteten Wanderung der Fische eine Schutzfunktion gegenüber hoher Strömung erfüllen.

Als Ergebnis der Untersuchungen werden für die Kleinfischarten **Mühlkoppe**, **Elritze** und **Bachschmerle** nachvollziehbare Richtwerte vorgelegt, die deren Minimalanforderungen an hydraulische Gegebenheiten in Bächen und Gräben als auch deren maximale physische Leistungskapazität an Migrationsbarrieren aufzeigen und die zur praktischen Umsetzung in den Gewässern im Freiland geeignet sind.

8. Literatur

- ADAM, B. und SCHWEVERS, U. (1997): Aspekte des Schwimmverhaltens rheophiler Fischarten. Österreichs Fischerei, Jg. 50/1997, S. 256 - 260.
- BARANDUN, J. (1990): Auswirkungen von Ausbreitungsbarrieren auf das Vorkommen von Groppen (*Cottus gobio*) - Anregungen für den Artenschutz. Natur und Landschaft, 65. Jg. (1990) Heft 2, S. 66 - 68.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR FISCHEREI (1998): Ergebnisse der Fischartenkartierung in den Fließgewässern Bayerns. Im Druck.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN (1993): Rote Liste gefährdeter Tiere in Bayern.
- BLESS, R. (1981): Untersuchungen zum Einfluß von gewässerbaulichen Maßnahmen auf die Fischfauna in Mittelgebirgsbächen. Natur und Landschaft, Heft 56, S. 243 - 252.
- BLESS, R. (1985): Zur Regeneration von Bächen der Agrarlandschaft. Eine ichthyologische Fallstudie. Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 26, 80 S., Bonn-Bad Godesberg 1985.
- BLESS, R. (1990): Die Bedeutung von gewässerbaulichen Hindernissen im Raum-Zeit-System der Groppe (*Cottus gobio* L.). Natur und Landschaft, 65. Jg. (1990) Heft 12, S. 581 - 585.
- BLESS, R. (1992): Einsichten in die Ökologie der Elritze (*Phoxinus phoxinus* L.). Praktische Grundlagen zum Schutz einer gefährdeten Fischart. Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 35, 57 S., Bonn-Bad Godesberg 1992.
- BOHL, E. (1994): Untersuchungen zur Fischfauna und ihren Lebensgrundlagen in der unteren Salzach und ihren Nebengewässern. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie. Band 48, 1994.
- BORN, O. (1995): Untersuchungen zur Wirksamkeit von Fischeaufstiegshilfen am unterfränkischen Main. Dissertation, TU München Weihenstephan, Institut für Tierwissenschaften - Angewandte Zoologie.
- BORN, O. & STEIN, H. (1995): Fischwanderhilfen. Fischer & Teichwirt, Heft 1/1995, S. 2 - 6.

- BROSIUS, G. & BROSIUS, F. (1995): SPSS Base System und Professional Statistics.
1. Auflage - Bonn.
- BRUNKEN, H. & PELZ, G. R. (1989): Zur Notwendigkeit des ungehinderten Fischwechsels
in kleinen Fließgewässern - die Schunter, ein Beispiel aus Niedersachsen.
FISCHÖKOLOGIE AKTUELL 1 (2) 1989, S. 25 - 29.
- BRUNKEN, H. (1988): Ausbreitungsdynamik von *Noemacheilus barbatulus* (LINNAEUS,
1785). Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig,
Naturwissenschaftliche Fakultät.
- BRUNKEN, H. (1989): Lebensraumsprüche und Verteilungsmuster der Bachschmerle
Noemacheilus barbatulus (LINNAEUS, 1785). FISCHÖKOLOGIE 1 (1):
S. 29 - 45 (1989).
- DVWK (1996): Fischaufstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DVWK-
Merkblätter zur Wasserwirtschaft; Heft 232/1996. Hrsg.: Deutscher Verband
für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Bonn.
- DVWK (1997): Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung. DVWK-Schriften Heft
118/1997. Hrsg.: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.
(DVWK), Bonn.
- EAWAG, BUWAL (1995): Anleitung zur Beurteilung der schweizerischen Fließgewässer -
Ökomorphologie, Hydrologie, Fischbiologie. Entwurf Endbericht.
- GAUMERT, D. und KÄMMEREIT, M. (1994): Fischaufstiegskontrollen an Sohlengleiten.
Wasser & Boden 2; 55 - 59 (1994).
- GEBLER, R. - J. (1989): Fischaufstiege, Bericht zur 1. Untersuchungsphase
(unveröffentlicht). - Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Karlsruhe.
- GEBLER, R. - J. (1991): Sohlrampen und Fischaufstiege. Verlag Rolf - Jürgen Gebler,
Friedhofstr. 6/5, D-75045 Walzbachtal.
- GUNKEL, G. (1996): Renaturierung kleiner Fließgewässer. Hrsg. Günter Gunkel, Verlag
Gustav Fischer, Stuttgart, Jena, 1996.
- HALLE, M. (1993): Beeinträchtigung von Drift und Gegenstromwanderungen des
Makrozoobenthos durch wasserbauliche Anlagen. Studie zur Bewertung
technischer Ein- und Ausbauten von Fließgewässern bezüglich ihrer
Längsdurchgängigkeit (mit *Gammarus* als Leitgattung) im Auftrag des
Landesamtes für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen. Essen, 1993.

- HANSEL, M., BÖHMER, J., KAPPUS, B., & RAHMANN, H. (1997): Rinnenversuche zur Aufstiegsleistung von Kleinfischarten. Abstractband I. Tagung der Gesellschaft für Ichthyologie e. V. (Gfi) vom 9. - 12. Oktober 1997 in Düsseldorf, S. 20.
- HOFFMANN, A. (1996): Auswirkungen von Unterhaltungs- und Gestaltungsmaßnahmen an Fließgewässern auf räumlich und zeitlich verschiedene Nutzungsmuster der Koppe *Cottus gobio*. FISCHÖKOLOGIE 9: S. 49 - 61 (1996).
- HOFFMANN, R. et al. (1995): Fische in Baden-Württemberg - Gefährdung und Schutz. - Ministerium für ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Bad.-Württ., Stuttgart; 92 S.
- JANSEN, W., BÖHMER, J., KAPPUS, B., MÜLLER, A. und RAHMANN, H. (1996): Habitatwahl, Populationsdynamik und Nahrungsspektrum von Gründlingen (*Gobio gobio*) und Bachschmerlen (*Noemacheilus barbatulus*) im Bereich einer naturnahen Wanderhilfe an der Glems (Baden-Württemberg, Deutschland). III. Symposium: Ökologie, Ethologie und Systematik der Fische. Salzburg 1996.
- JENS, G. (1982): Der Bau von Fischwegen. Verlag P. Parey. Hamburg und Berlin 1982.
- JENS, G. et al. (1997): Fischwanderhilfen - Notwendigkeit, Gestaltung, Rechtsgrundlagen. Heft 11 der Schriftenreihe des Verbandes Deutscher Fischereiverwaltungsbeamter und Fischereiwissenschaftler e. V., Offenbach/M, 1997.
- JUNGWIRTH, M. & WINKLER, H. (1983): Die Bedeutung der Flußbettstruktur für Fischgemeinschaften. Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 35 (1983), Heft 9/10: 229 - 234.
- JUNGWIRTH, M. (1995): Funktionsfähigkeit von Umgehungsbächen in der Rhithral-Region von Flüssen. 9. Bad Godesberger SVK-Fischereitagung zum Thema Fließgewässervernetzung vom 24. - 25. Januar 1995.
- JUNGWIRTH, M. et al. (1994): Fischaufstiegshilfen an Gebirgsflüssen. Vergleichende Untersuchung des Fischaufstiegs an drei Fischaufstiegshilfen im Rithralbereich. Herausgegeben vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft. Wien, 1994.
- JUNGWIRTH, M. und PELIKAN, B. (1989): Zur Problematik von Fischaufstiegshilfen. Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 41 (1989), Heft 3/4, S. 80 - 89.

- KAPPUS, B., BÖHMER, J., JANSEN, W., MÜLLER, T., BEITER, T. und RAHMANN, H. (1995): Fischwanderungen im Bereich von naturnahen Aufstiegshilfen im Neckareinzugsgebiet. In: Extended Abstracts der DGL 1995 (Berlin), Band 2, S. 813 - 817.
- LIEBSCH, H. und WEDEMEYER, A. (1994): Fischpassagen für Wehre in stehenden und periodisch fließenden Gewässern. Wasser & Boden 2; 23 - 29 (1994).
- PELZ, G. R. (1989): Zur Verwendung der Begriffe „fish movements“ und „fish migrations“ in der deutschsprachigen Literatur. FISCHÖKOLOGIE AKTUELL 1 (2) 1989, S. 20 - 24.
- PETER, A. (1995): Lebensraumveränderungen in Fließgewässern - eine fischbiologische Perspektive. GAIA Ecological Perspectives in Science, Humanities and Economics 4 (1995) No. 3, S. 159 - 165. Verein GAIA - Konstanz, St. Gallen, Zürich.
- QUAST, J., KRÜGER, F., GÖRLACH, J., RITZMANN, A. & STEIDL, J. (1997): Fischaufstiegsanlagen und ökomorphologischer Zustand der Hauptfließgewässer in Brandenburg. ZALF-Bericht Nr. 29, Müncheberg, 1997.
- QUAST, J., RITZMANN, A., THIELE, V. & TRÄBING, K. (1997): Ökologische Durchgängigkeit kleiner Fließgewässer. -Biologische und ingenieurwissenschaftliche Grundlagen für nachhaltig wirkende Fischaufstiegsanlagen. Handbuch Angewandte Limnologie - 4. Erg. Lfg. 11/97.
- RINGLER, A., REHDING, G. und BRÄU, M. (1994): Lebensraumtyp Bäche und Bachufer. - Landschaftspflegekonzept Bayern, Band II.19 (Projektleiter A. Ringler); Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) und Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL), 340 Seiten; München.
- SCHUMANN, U. (1994): Faunistisch-ökologische Untersuchungen an den Fischen in den Gräben und Tümpeln des NSG Federsee, unter besonderer Berücksichtigung der Schmerlen (Cobitidae). Diplomarbeit an der Fakultät für Biologie der Universität Tübingen.
- SEIFERT, K. und HARTMANN, F. (1995): Gestaltungskriterien für Umleitungsbäche und ihre ökologische/fischereiliche Ausgleichsfunktion. Wertermittlungforum WF 2/95, S. 48 - 53. Herausgeber: Sachverständigenkuratorium, SVK-Verlag Wilsdorf.

- STAHLBERG, S. & PECKMANN, P. (1987): The critical swimming speed of small Teleost fish species in a flume. *Archiv für Hydrobiologie* 110/2, p. 179 - 193. Stuttgart, 1987.
- STAHLBERG-MEINHARDT, S. (1994): Verteilung, Habitatansprüche und Bewegungen von Mühlkoppe (*Cottus gobio* L., 1758) und Bachforelle (*Salmo trutta* L., 1758) in zwei unterschiedlichen Fließgewässern im Vorharz. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig.
- TRÄBING, K., HERING, D., KILIAN, T. und KORTE, E. (1997): Nachhaltige Durchwanderbarkeit von Fließgewässern als wasserwirtschaftliche Aufgabe. *Wasser & Boden*, 49. Jahrg., 11/1997, S. 46 - 50.
- VANNOTE, R. L., MINSHALL, G. W., CUMMINS, K. W., SEDELL, J. R. & CUSHING, C. E. (1980): The river continuum concept. - *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37, p 130 - 137.
- WATERSTRAAT, A. (1989): Einfluß eines Gewässerausbaus auf eine Population des Bachneunauges *Lampetra planeri* (BLOCH, 1784) in einem Flachlandbach im Norden der DDR. *FISCHÖKOLOGIE* 1 (2): S. 29 - 44 (1989).
- WATERSTRAAT, A. (1992): Populationsökologische Untersuchungen an *Cottus gobio* L. und anderen Fischarten aus zwei Flachlandbächen Norddeutschlands. *Limnologica* 22 (1992) 2: 137 - 149.
- WINESTONE, A. J., GEE, A. S. and VARALLO, P. V. (1985): The assessment of flow characteristics at certain weirs in relation to the upstream movement of migratory salmonids. *Journal of Fish Biology* (1985) 27 (Supplement A), p 75 - 83.
- ZERRATH, H. (1996): Sprintleistungen einheimischer Klein- und Jungfische in Sohlgleitenmodellen - Daten zur Bewertung von Fischaufstiegshilfen. *Fischökologie* 9; 27 - 48 (1996).

9. Anhang

9.1 Abbildungen

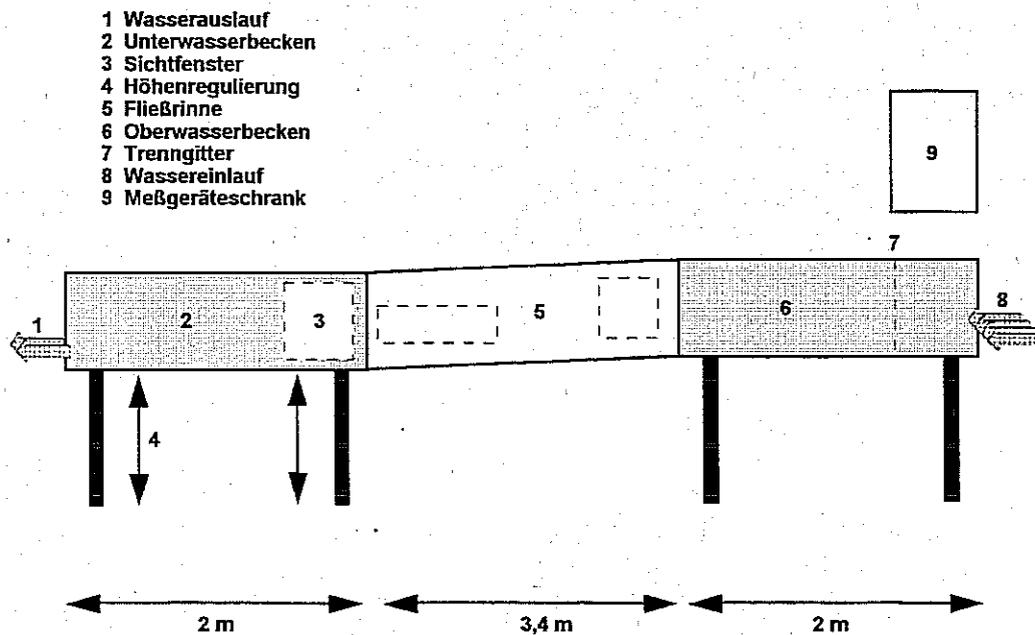


Abb. A 2.1.1: Seitenansicht der Versuchsanlage (nicht maßstabsgetreu) mit Fließrinne (5), Unter- (2) und Oberwasserbecken (6).

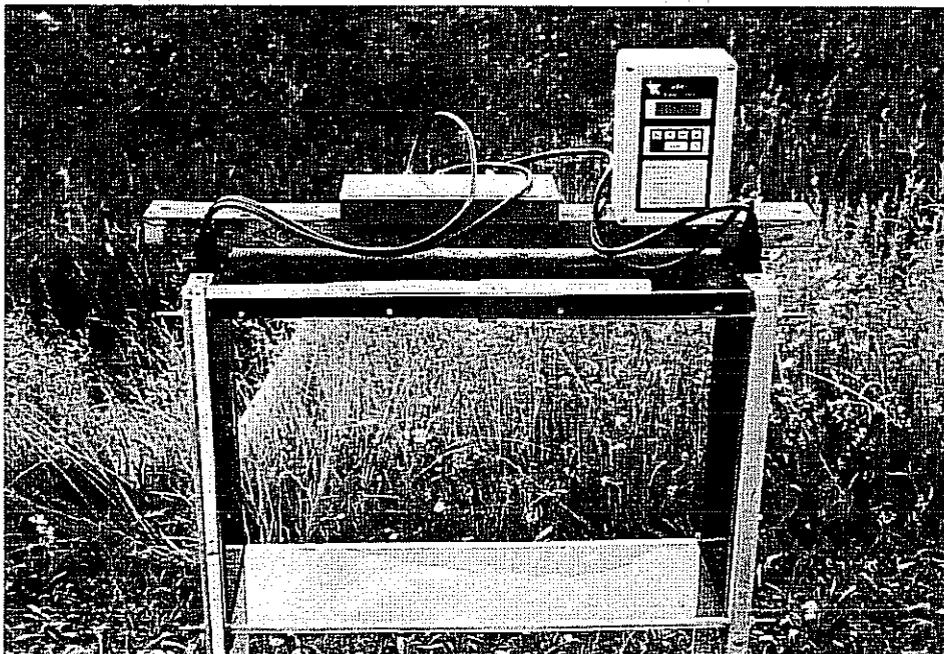


Abb. A 2.1.2: VAKI-River Stock Monitor mit Scannerplatten und Control Unit (rechts oben).

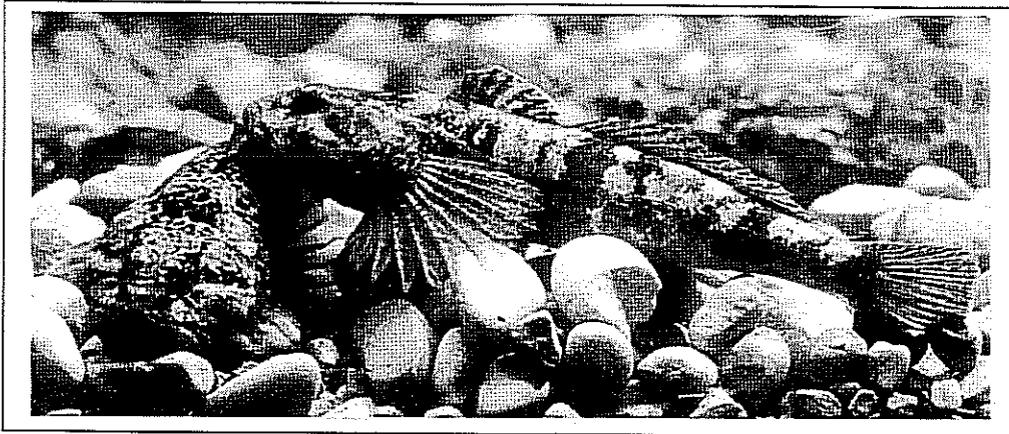


Abb. A 2.4.1: Mühlkoppe (*Cottus gobio*)
Photo: Bayerische Landesanstalt für Fischerei, Starnberg

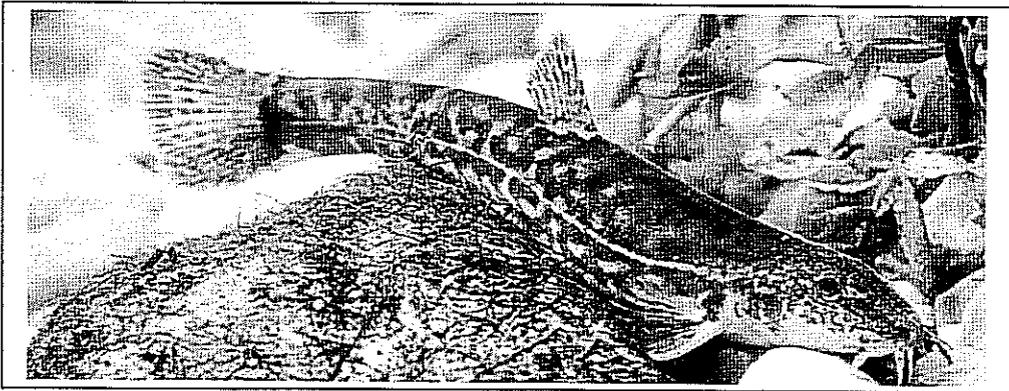


Abb. A 2.4.2: Bachschmerle (*Barbatula barbatula*)
Photo: Bayerische Landesanstalt für Fischerei, Starnberg

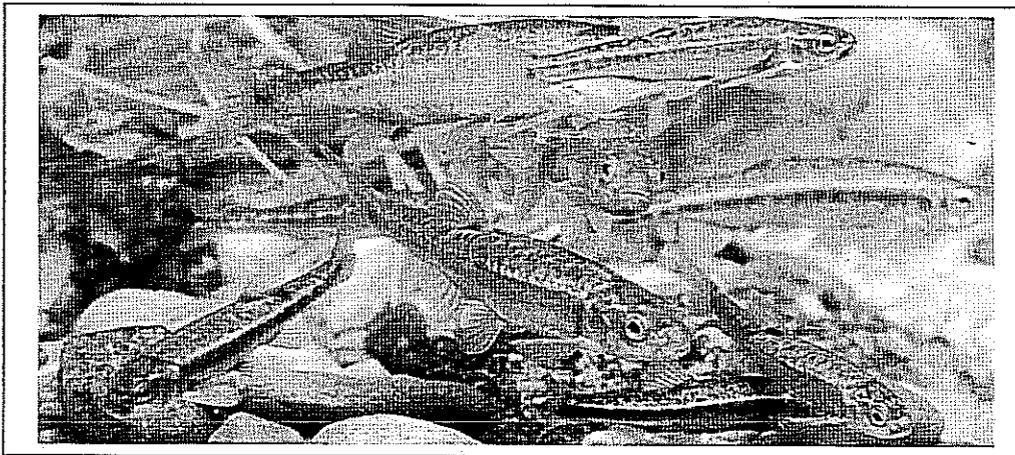


Abb. A 2.4.3: Elritze (*Phoxinus phoxinus*)
Photo: Bayerische Landesanstalt für Fischerei, Starnberg

9.2 Tabellen

9.2.1 VAKI-River Stock Monitor (RSM)

Tab. A3.1.1: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm)								
	[m/s]	0,1	0,1	0,5	0,5	0,75	0,75	0,9	0,9
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		230	227	227	207	168	171	20	36
Stück [%]		92,4	91,2	91,2	83,1	67,5	68,7	8	14,5
GG abzügl. Mortalität		249	- 249	249	249	228	228	227	225
Zählerstand „auf“ [n]		191	129	241	168	40	28	18	1
„auf“ [%]		76,7	51,8	96,8	67,5	17,5	12,3	7,9	0,4
Abweichung „auf“ [%]		-17,0	-43,2	6,2	-18,8	-76,2	-83,6	-10,0	-97,2
Zählerstand „ab“ [n]		246	140	322	271	48	57	26	5
Netto-„aufwärts“ [n]		-55	-11	-81	-103	-8	-29	-8	-4
Ges. Abweichung [%]		-23,9	-4,8	-35,7	-49,8	-4,8	-17,0	-40,0	-11,1

GG..... Grundgesamtheit der Versuchsfische

Tab. A3.1.2: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20	40	40
erfolgreich aufwärts gewandert:											
Stück [n]		166	162	156	184	221	209	217	216	236	234
Stück [%]		69,5	68,1	63,9	76,3	90,2	85,3	87,1	86,7	94,8	94
GG abzügl. Mortalität		238	236	241	239	245	244	245	245	249	245
Zählerstand „auf“ [n]		2	3	13	2	12	10	78	48	304	153
„auf“ [%]		0,8	1,3	5,4	0,8	4,9	4,1	31,8	19,6	122,1	62,4
Abweichung „auf“ [%]		-98,8	-98,1	-91,7	-98,9	-94,6	-95,2	-64,1	-77,8	-28,8	-34,6
Zählerstand „ab“ [n]		7	17	6	5	27	44	110	99	216	302
Netto-„aufwärts“ [n]		-5	-14	7	-3	-15	-34	-32	-51	88	-149
Ges. -Abweichung [%]		-3,0	-8,6	4,5	-1,6	-6,8	-16,3	-14,7	-23,6	37,3	-63,7

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische

Tab. A3.1.3: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und einer Körnung des Bodensubstrates von 16 mm.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,5*	0,5*	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:							
Stück [n]		227	207	149	134	71	86
Stück [%]		91,2	83,1	87,6	78,8	43,3	52,4
GG abzügl. Mortalität		249	249	170	164	164	163
Zählerstand „auf“ [n]		241	168	24	18	8705	427
„auf“ [%]		96,8	67,5	14,1	11,0	5307,9	262,0
Abweichung „auf“ [%]		6,2	-18,8	-83,9	-86,6	12160,6	396,5
Zählerstand „ab“ [n]		322	271	38	34	10104	587
Netto-„aufwärts“ [n]		-81	-103	-14	-16	-1399	-160
Ges. -Abweichung [%]		-35,7	-49,8	-9,4	-11,9	-1970,4	-186,0

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische; * ohne Substrat/Mächtigkeit des Wasserfilms = 25 cm

Tab. A3.1.4: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und einer Körnung des Bodensubstrates von 32 mm.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)							
	[m/s]	0,9*	0,9*	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0
erfolgreich aufwärts gewandert:								
Stück [n]		20	36	137	140	154	98	59
Stück [%]		8	14,5	83,5	85,4	93,9	60,1	36,4
GG abzügl. Mortalität		227	225	164	164	164	162	162
Zählerstand „auf“ [n]		18	1	20	33	49	420	6546
„auf“ [%]		7,9	0,4	12,2	20,1	29,9	259,3	4040,7
Abweichung „auf“ [%]		-10,0	-97,2	-85,4	-76,4	-68,2	328,6	10994,9
Zählerstand „ab“ [n]		26	5	41	51	100	93	690
Netto-„aufwärts“ [n]		-8	-4	-21	-18	-51	327	5856
Ges. Abweichung [%]		-40,0	-11,1	-15,3	-12,9	-33,1	333,7	9925,4

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische; *ohne Substrat/Mächtigkeit des Wasserfilms = 25 cm

Tab. A3.1.5: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Höhe der Bodenschwelle.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Höhe der Bodenschwelle [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm)												
	[cm]	5	5	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30
erfolgreich aufwärts gewandert:													
Stück [n]		209	194	202	210	188	198	176	179	147	156	171	146
Stück [%]		92,9	87,4	91,8	96,3	87,4	92,5	83	87,7	72,4	78,8	86,4	74,5
GG abzügl. Mortalität		222	220	218	215	214	212	204	203	198	198	196	196
Zählerstand „auf“ [n]		28	28	27	21	43	37	39	25	31	24	29	38
„auf“ [%]		12,6	12,7	12,4	9,8	20,1	17,5	19,1	12,3	15,7	12,1	14,8	19,4
Abweichung „auf“ [%]		-86,6	-85,6	-86,6	-90,0	-77,1	-81,3	-77,8	-86,0	-78,9	-84,6	-83,0	-74,0
Zählerstand „ab“ [n]		64	86	62	41	108	93	74	58	87	59	65	67
Netto-„aufwärts“ [n]		-36	-58	-35	-20	-65	-56	-35	-33	-56	-35	-36	-29
Ges. Abweichung [%]		-17,2	-29,9	-17,3	-9,5	-34,6	-28,3	-19,9	-18,4	-38,1	-22,4	-21,1	-19,9

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische

Tab. A3.1.6: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle [cm]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s)								
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20
erfolgreich aufwärts gewandert:									
Stück [n]		56	42	83	101	109	94	202	210
Stück [%]		32,6	24,4	48,3	58,7	63	54,7	91,8	96,3
GG abzügl. Mortalität		172	172	172	172	172	172	218	215
Zählerstand „auf“ [n]		22	39	42	45	69	42	27	21
„auf“ [%]		12,8	22,7	24,4	26,2	40,1	24,4	12,4	9,8
Abweichung „auf“ [%]		-60,7	-71	-49,4	-55,4	-36,7	-55,3	-86,6	-90,0
Zählerstand „ab“ [n]		49	46	94	95	83	85	62	41
Netto-„aufwärts“ [n]		-27	-7	-52	-50	-14	-43	-35	-20
Ges. -Abweichung [%]		-48,2	-16,7	-62,7	-49,5	-12,8	-45,7	-17,3	-9,5

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische

Tab. A3.1.7: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle [m/s]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm)											
	[m/s]	0,25	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75	1,0	1,0	1,25	1,25	1,25
erfolgreich aufwärts gewandert:												
Stück [n]		109	94	86	98	90	94	75	68	28	27	31
Stück [%]		63	54,7	50	57	52,6	55	43,9	39,8	16,4	15,8	18,1
GG abzügl. Mortalität		172	172	172	171	171	171	171	171	171	171	171
Zählerstand „auf“ [n]		69	42	45	32	49	19	60	65	78	54	43
„auf“ [%]		40,1	24,4	26,2	18,7	28,7	11,1	35,1	38,0	45,6	31,6	25,1
Abweichung „auf“ [%]		-36,7	-55,3	-47,7	-67,3	-45,6	-79,8	-20,0	-4,4	178,6	100,0	38,7
Zählerstand „ab“ [n]		83	85	83	70	55	49	77	93	93	72	86
Netto-„aufwärts“ [n]		-14	-43	-38	-38	-6	-30	-17	-28	-15	-18	-43
Ges. -Abweichung [%]		-12,8	-45,7	-44,2	-38,8	-6,7	-31,9	-22,7	-41,2	-53,6	-66,7	-138,7

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische

Tab. A3.1.8: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm)												
	[cm]	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5
erfolgreich aufwärts gewandert:													
Stück [n]	12	40	62	22	11	31	4	4	4	1	5	1	
Stück [%]	6,9	23,1	35,8	12,7	6,4	17,9	2,3	2,3	2,3	0,6	2,9	0,6	
GG abzügl. Mortalität	173	173	173	173	173	173	173	173	173	170	170	170	
Zählerstand „auf“ [n]	81	84	117	99	119	109	154	60	98	98	73	65	
„auf“ [%]	46,8	48,6	67,6	57,2	68,8	63,0	89,0	34,7	56,6	57,6	42,9	38,2	
Abweichung „auf“ [%]	-575,0	-110,0	-88,7	-350,0	-981,8	-251,6	-3750,0	-1400,0	-2350,0	-9700,0	-1360,0	-6400,0	
Zählerstand „ab“ [n]	73	144	134	111	109	129	162	76	111	125	86	106	
Netto-„aufwärts“ [n]	8	-60	-17	-12	10	-20	-8	-16	-13	-27	-13	-41	
Ges. Abweichung [%]	66,7	-150,0	-27,4	-54,5	90,9	-64,5	-260,0	-400,0	-325,0	-2700,0	-260,0	-4100,0	

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische

Tab. A3.1.9: Abweichung von Zählimpulsen eines elektronischen Fischzählers zu tatsächlich aufwärts gewanderten Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und Mächtigkeit der Wassersäule in einer Verrohrung.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/Mächtigkeit der Wassersäule [cm]/Verrohrung“													
	[m/s]	0,1*	0,1*	0,5*	0,5*	0,1**	0,1**	0,1**	0,5**	0,5**	0,75**	0,75**	0,9**	0,9**
erfolgreich aufwärts gewandert:														
Stück [n]	76	80	22	24	49	92	89	76	81	53	52	20	20	
Stück [%]	38,8	41	11,3	12,5	25,7	48,4	48,4	40,4	43,3	28,3	28,1	10,8	10,9	
GG abzügl. Mortalität	195	194	192	191	190	188	173	187	187	185	185	184	184	
Zählerstand „auf“ [n]	57	117	87	76	54	46	58	67	54	36	21	91	69	
„auf“ [%]	29,2	60,3	45,3	39,8	28,4	24,5	33,5	35,8	28,9	19,5	11,4	49,5	37,5	
Abweichung „auf“ [%]	-25,0	-46,3	-295,5	-216,7	-10,2	-50,0	-34,8	-11,8	-33,3	-32,1	-59,6	-355,0	-245,0	
Zählerstand „ab“ [n]	65	130	56	58	61	54	42	57	53	28	18	76	56	
Netto-„aufwärts“ [n]	-8	-13	31	18	-7	-8	16	10	1	8	3	15	13	
Ges. Abweichung [%]	-10,5	-16,3	-140,9	-75,0	-14,3	-8,7	18,0	13,2	1,2	15,1	5,8	-75,0	65,0	

GG.....Grundgesamtheit der Versuchsfische

*Wasserstand in der Verrohrung \cong 12,5 cm

**Wasserstand in der Verrohrung \cong 25 cm

9.2.2 Chemisch-physikalische Parameter

Tab. A3.2.1.1: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 25 cm)							
	[m/s]	0,1	0,1	0,5	0,5	0,75	0,75	0,9
Datum	19.03.97	20.03.97	24.03.97	25.03.97	28.04.97	29.04.97	30.04.97	01.05.97
O₂ [mg/l]								
\bar{x}	9,3	9,9	9,6	10,0	12,8	14,4	10,8	10,6
s	0,578	0,459	0,602	0,560	1,287	0,831	0,463	0,514
Minimum	7,8	9,2	8,7	9,0	9,7	12,4	10,2	9,5
Maximum	10,4	10,7	10,7	11,1	14,1	15,5	12,0	11,8
LF [uS/cm]								
\bar{x}	1207	1338	1347	1360	1335	1350	1165	1237
s	20,035	6,541	5,985	7,714	8,318	7,457	40,330	12,914
Minimum	1156	1328	1332	1348	1322	1338	1107	1214
Maximum	1209	1350	1358	1376	1350	1362	1215	1262
pH								
\bar{x}	7,9	7,7	7,7	7,6	7,6	7,7	7,7	7,7
s	0,086	0,047	0,050	0,055	0,068	0,071	0,051	0,080
Minimum	7,7	7,6	7,6	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6
Maximum	8,0	7,8	7,8	7,8	7,7	7,8	7,8	7,9
Wassertemp. [°C]								
\bar{x}	8,0	6,9	8,2	8,4	10,4	9,7	9,1	9,5
s	0,659	0,337	0,362	0,212	0,577	0,481	0,242	0,564
Minimum	7,1	6,2	7,7	8,0	9,2	8,9	8,7	8,7
Maximum	8,9	7,4	8,8	8,7	11,3	10,4	9,4	10,6
Fließgeschw. [m/s]								
\bar{x}	0,110	0,117	0,501	0,504	0,715	0,762	0,889	0,900
s	0,003	0,004	0,008	0,009	0,066	0,008	0,010	0,023
Minimum	0,103	0,105	0,494	0,495	0,417	0,740	0,874	0,852
Maximum	0,116	0,122	0,510	0,512	0,740	0,773	0,902	0,916

Tab. A3.2.1.2: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s)									
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20	40
Datum	22.04.97	23.04.97	15.04.97	21.04.97	10.04.97	14.04.97	08.04.97	09.04.97	26.03.97	02.04.97
O₂ [mg/l]										
\bar{x}	11,0	10,3	10,2	11,1	9,0	11,2	9,5	8,9	9,5	10,1
s	0,383	0,870	0,662	0,560	0,641	0,663	0,576	0,581	0,607	0,703
Minimum	10,2	8,6	9,0	9,5	7,9	10,1	7,8	7,5	8,3	8,9
Maximum	11,8	11,6	11,0	11,9	10,2	12,5	10,7	10,1	10,6	11,5
LF [uS/cm]										
\bar{x}	1296	1400	1117	1102	1140	1167	1200	1177	1349	1215
s	7,702	8,871	22,320	42,206	34,148	26,352	37,231	23,585	6,148	26,994
Minimum	1282	1382	1085	1040	1088	1111	1124	1135	1334	1178
Maximum	1312	1414	1145	1167	1192	1207	1263	1216	1364	1260
pH										
\bar{x}	7,7	7,5	8,0	7,9	8,1	7,9	7,7	7,9	7,6	7,8
s	0,089	0,080	0,087	0,105	0,103	0,101	0,133	0,092	0,063	0,062
Minimum	7,6	7,3	7,8	7,7	7,9	7,7	7,5	7,7	7,5	7,7
Maximum	7,9	7,7	8,2	8,1	8,3	8,1	8,0	8,1	7,8	8,0
Wassertemp. [°C]										
\bar{x}	8,5	9,3	7,5	7,9	9,6	8,9	8,1	8,6	9,1	9,4
s	0,715	0,416	0,710	1,496	1,127	0,892	0,955	0,862	0,683	0,694
Minimum	6,9	8,6	6,1	5,8	7,7	7,4	5,9	7,0	8,2	8,3
Maximum	9,6	10,1	8,3	10,2	11,1	10,2	9,6	9,7	10,6	10,7
Fließgeschw. [m/s]										
\bar{x}	*	*	0,260	0,279	0,355	0,256	0,270	0,230	0,243	0,192
s	*	*	0,011	0,009	0,008	0,008	0,019	0,013	0,008	0,009
Minimum	*	*	0,225	0,265	0,338	0,245	0,234	0,204	0,228	0,174
Maximum	*	*	0,287	0,295	0,366	0,285	0,291	0,253	0,261	0,206

* keine permanente Messung der Fließgeschwindigkeit

Tab. A3.2.1.3: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und einer Körnung des Bodensubstrates von 16 mm.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)						
	[m/s]	0,5'	0,5'	0,5	0,5	1,0	1,0
Datum		24.03.97	25.03.97	07.08.97	11.08.97	19.08.97	20.08.97
O₂ [mg/l]							
\bar{x}		9,6	10,0	9,0	9,3	9,0	8,3
s		0,602	0,560	0,614	1,097	0,895	0,811
Minimum		8,7	9,0	7,8	7,9	7,3	6,8
Maximum		10,7	11,1	10,0	11,7	10,3	9,8
LF [uS/cm]							
\bar{x}		1347	1360	1397	1433	1387	1384
s		5,985	7,714	11,090	25,527	18,178	20,136
Minimum		1332	1348	1370	1394	1358	1354
Maximum		1358	1376	1416	1473	1414	1417
pH							
\bar{x}		7,7	7,6	8,0	7,6	7,5	7,5
s		0,050	0,055	0,172	0,061	0,071	0,075
Minimum		7,6	7,5	7,7	7,5	7,4	7,4
Maximum		7,8	7,8	8,3	7,7	7,6	7,6
Wassertemp. [°C]							
\bar{x}		8,2	8,4	11,4	13,5	12,4	12,3
s		0,362	0,212	0,292	0,579	0,394	0,512
Minimum		7,7	8,0	11,0	12,6	11,7	11,5
Maximum		8,8	8,7	11,8	14,5	13,0	13,1
Fließgeschw. [m/s]							
\bar{x}		0,528	0,562	0,547	0,534	1,084	1,088
s		0,066	0,008	0,012	0,029	0,020	0,023
Minimum		0,517	0,540	0,518	0,508	1,045	1,043
Maximum		0,540	0,573	0,570	0,560	1,120	1,128

* ohne Substrat/Mächtigkeit des Wasserfilms = 25 cm

Tab. A3.2.1.4: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und einer Körnung des Bodensubstrates von 32 mm.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömung [m/s]/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)							
	[m/s] Datum	0,9 ^a 30.04.97	0,9 ^a 01.05.97	0,5 12.08.97	0,5 13.08.97	0,5 14.08.97	1,0 21.08.97	1,0 25.08.97
O₂ [mg/l]								
\bar{x}		10,8	10,6	9,2	8,9	8,6	8,6	8,9
s		0,463	0,514	0,946	0,544	0,813	0,801	0,798
Minimum		10,2	9,5	7,8	8,1	7,0	7,4	7,6
Maximum		12,0	11,8	11,2	9,9	10,7	10,1	10,5
LF [uS/cm]								
\bar{x}		1165	1237	1422	1409	1391	1390	1390
s		40,330	12,914	26,253	19,861	24,472	29,222	20,539
Minimum		1107	1214	1382	1382	1340	1351	1363
Maximum		1215	1262	1462	1442	1439	1486	1426
pH								
\bar{x}		7,7	7,7	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
s		0,051	0,080	0,076	0,052	0,069	0,071	0,069
Minimum		7,6	7,6	7,5	7,4	7,3	7,4	7,4
Maximum		7,8	7,9	7,7	7,6	7,7	7,6	7,7
Wassertemp. [°C]								
\bar{x}		9,1	9,5	12,8	11,9	12,9	12,3	12,5
s		0,242	0,564	0,512	0,397	0,592	0,837	0,472
Minimum		8,7	8,7	12,0	11,3	11,7	11,3	11,6
Maximum		9,4	10,6	13,6	12,8	14,1	15,2	13,2
Fließgeschw. [m/s]								
\bar{x}		0,912	0,925	0,572	0,563	0,535	1,013	1,031
s		0,010	0,023	0,010	0,052	0,013	0,052	0,056
Minimum		0,893	0,865	0,545	0,548	0,503	0,940	0,915
Maximum		0,928	0,945	0,588	0,575	0,570	1,145	1,095

^a ohne Substrat/Mächtigkeit des Wasserfilms = 25 cm

Tab. A3.2.1.5: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Höhe der Bodenschwelle.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Höhe der Bodenschwelle [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm)												
	[cm]	5	5	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30
Datum	05.05.97	06.05.97	07.05.97	08.05.97	12.05.97	13.05.97	14.05.97	15.05.97	26.05.97	27.05.97	02.06.97	03.06.97	
O₂ [mg/l]													
\bar{x}	9,0	9,2	10,3	10,1	10,0	9,6	9,7	8,3	10,0	10,4	10,7	9,1	
s	0,649	0,631	0,681	0,574	0,602	1,073	0,531	1,328	0,783	0,953	1,285	1,254	
Minimum	7,6	8,0	8,9	9,1	9,1	5,4	8,4	5,4	8,4	8,8	9,0	6,6	
Maximum	9,9	10,5	11,7	11,2	10,9	11,1	10,9	10,1	11,7	12,4	13,2	11,4	
LF [uS/cm]													
\bar{x}	1217	1188	1126	1113	1346	1337	1373	1375	1336	1375	1321	1287	
s	25,002	48,864	17,508	21,315	45,691	20,575	6,407	23,043	10,348	9,228	7,566	29,866	
Minimum	1171	1115	1096	1081	1153	1305	1358	1338	1322	1360	1308	1224	
Maximum	1253	1264	1162	1184	1378	1370	1386	1411	1355	1390	1340	1320	
pH													
\bar{x}	8,0	8,0	7,9	7,9	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,7	7,8	7,8	
s	0,090	0,080	0,084	0,138	0,083	0,088	0,082	0,084	0,081	0,077	0,090	0,079	
Minimum	7,8	7,9	7,7	7,3	7,5	7,4	7,5	7,5	7,4	7,6	7,7	7,6	
Maximum	8,1	8,1	8,0	8,0	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	8,0	7,9	
Wassertemp. [°C]													
\bar{x}	11,1	10,7	9,1	8,1	11,2	11,9	11,9	12,1	11,3	12,2	12,8	12,2	
s	0,736	1,052	0,640	0,596	0,427	0,570	0,613	0,638	0,408	0,652	0,803	0,438	
Minimum	9,8	9,1	8,2	7,3	10,6	10,9	10,4	11,1	10,7	11,2	11,3	11,7	
Maximum	12,1	12,3	10,1	9,9	11,8	12,7	12,8	13,2	12,0	13,2	13,9	12,9	
Fließgeschw. [m/s]													
\bar{x}	0,256	0,256	0,241	0,270	0,253	0,254	0,195	0,234	0,278	0,271	0,233	0,270	
s	0,005	0,012	0,013	0,028	0,015	0,012	0,034	0,018	0,029	0,072	0,022	0,009	
Minimum	0,248	0,227	0,210	0,243	0,231	0,226	0,131	0,203	0,227	0,176	0,139	0,253	
Maximum	0,266	0,269	0,263	0,395	0,285	0,278	0,256	0,284	0,355	0,460	0,280	0,297	

Tab. A3.2.1.6: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle [cm]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s)								
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20
Datum	21.07.97	22.07.97	16.07.97	17.07.97	14.07.97	15.07.97	07.05.97	08.05.97	
O₂ [mg/l]									
\bar{x}	7,7	8,1	8,3	7,5	8,1	7,7	10,3	10,1	
s	0,867	1,167	1,205	1,042	0,855	0,805	0,681	0,574	
Minimum	6,4	6,5	6,4	6,2	6,7	6,3	8,9	9,1	
Maximum	9,3	10,3	9,9	9,5	10,2	9,3	11,7	11,2	
LF [uS/cm]									
\bar{x}	1218	1317	1290	1294	1308	1263	1126	1113	
s	5,453	33,834	13,810	50,320	30,303	21,908	17,508	21,315	
Minimum	1204	1245	1270	1218	1264	1224	1096	1081	
Maximum	1228	1373	1316	1352	1362	1288	1162	1184	
pH									
\bar{x}	7,6	7,6	7,6	7,5	7,5	7,5	7,9	7,9	
s	0,057	0,141	0,066	0,107	0,076	0,042	0,084	0,138	
Minimum	7,5	7,1	7,4	7,3	7,4	7,4	7,7	7,3	
Maximum	7,7	7,8	7,7	7,7	7,7	7,6	8,0	8,0	
Wassertemp. [°C]									
\bar{x}	13,2	15,0	14,5	14,4	13,1	13,6	9,1	8,1	
s	0,305	1,006	0,647	0,695	0,465	0,657	0,640	0,596	
Minimum	12,6	12,8	13,6	13,7	11,9	12,8	8,2	7,3	
Maximum	13,7	16,2	15,5	16,8	14,0	15,3	10,1	9,9	
Fließgeschw. [m/s]									
\bar{x}	0,264	0,244	0,258	0,245	0,258	0,257	0,241	0,270	
s	0,002	0,008	0,003	0,004	0,003	0,003	0,013	0,028	
Minimum	0,259	0,230	0,251	0,238	0,252	0,252	0,210	0,243	
Maximum	0,268	0,254	0,264	0,258	0,264	0,261	0,263	0,395	

Tab. A3.2.1.7: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlköppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle [m/s]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm)											
	[m/s]	0,25	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75	1,0	1,0	1,25	1,25	1,25
Datum	14.07.97	15.07.97	23.07.97	24.07.97	28.07.97	29.07.97	30.07.97	31.07.97	01.08.97	02.08.97	03.08.97	
O₂ [mg/l]												
\bar{x}	8,1	7,7	8,5	8,5	8,8	9,3	9,2	9,1	8,9	8,9	9,0	
s	0,855	0,805	0,816	1,192	0,852	0,692	0,822	0,666	0,572	0,564	0,687	
Minimum	6,7	6,3	7,3	6,8	7,4	7,3	7,9	7,9	7,6	7,9	7,7	
Maximum	10,2	9,3	10,1	10,3	10,4	10,7	11,2	10,4	10,2	10,1	10,1	
LF [uS/cm]												
\bar{x}	1308	1263	1317	1351	1372	1391	1391	1416	1412	1402	1405	
s	30,303	21,908	10,218	19,319	8,601	19,009	8,005	8,876	6,447	4,632	4,325	
Minimum	1264	1224	1298	1326	1356	1361	1376	1398	1396	1394	1398	
Maximum	1362	1288	1336	1382	1390	1420	1404	1428	1422	1412	1414	
pH												
\bar{x}	7,5	7,5	7,6	7,7	7,4	7,5	7,4	7,3	7,3	7,5	7,5	
s	0,076	0,042	0,074	0,088	0,049	0,073	0,081	0,081	0,041	0,053	0,056	
Minimum	7,4	7,4	7,5	7,5	7,4	7,3	7,3	7,2	7,3	7,4	7,4	
Maximum	7,7	7,6	7,8	7,8	7,6	7,6	7,6	7,5	7,4	7,6	7,6	
Wassertemp. [°C]												
\bar{x}	13,1	13,6	13,3	14,4	13,0	13,0	13,1	11,8	11,1	11,5	12,3	
s	0,465	0,657	0,308	0,737	0,569	0,489	0,618	0,604	0,168	0,249	0,449	
Minimum	11,9	12,8	12,7	13,4	12,3	12,2	12,2	10,9	10,8	11,1	11,6	
Maximum	14,0	15,3	13,9	15,5	14,5	13,7	14,0	12,6	11,4	11,9	12,9	
Fließgeschw. [m/s]												
\bar{x}	0,258	0,257	0,532	0,525	0,773	0,749	0,986	1,022	1,243	1,314	1,267	
s	0,003	0,003	0,015	0,034	0,028	0,009	0,009	0,046	0,008	0,021	0,010	
Minimum	0,252	0,252	0,511	0,483	0,648	0,728	0,970	0,957	1,228	1,278	1,235	
Maximum	0,264	0,261	0,554	0,568	0,795	0,765	1,003	1,223	1,260	1,350	1,299	

Tab. A3.2.1.8: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser.

Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm)												
	[cm]	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5
Datum	01.07.97	03.07.97	04.07.97	05.07.97	06.07.97	08.07.97	09.07.97	10.07.97	11.07.97	04.08.97	05.08.97	06.08.97	
O₂ [mg/l]													
\bar{x}	9,0	9,0	8,5	7,9	8,0	8,6	7,9	8,6	8,2	8,2	8,7	8,9	
s	1,259	1,177	0,734	0,625	0,503	0,728	1,090	0,846	0,913	1,203	1,451	1,538	
Minimum	7,0	7,2	6,6	6,9	7,1	7,4	5,8	7,1	6,7	6,8	6,7	6,8	
Maximum	11,1	11,0	9,9	8,8	8,9	9,9	10,1	10,3	9,8	10,7	11,6	11,6	
LF [uS/cm]													
\bar{x}	1245	1281	1358	1196	1281	1338	1269	1321	1293	1359	1432	1328	
s	8,466	8,309	12,651	34,961	11,196	10,257	14,116	23,735	17,796	8,125	26,791	7,426	
Minimum	1230	1268	1338	1142	1260	1320	1248	1286	1264	1342	1394	1316	
Maximum	1258	1298	1378	1240	1294	1362	1290	1352	1320	1382	1472	1340	
pH													
\bar{x}	7,9	7,8	7,6	7,6	7,4	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6	7,8	7,8	
s	0,118	0,106	0,064	0,064	0,045	0,074	0,053	0,072	0,049	0,078	0,077	0,144	
Minimum	7,7	7,6	7,5	7,5	7,3	7,3	7,5	7,4	7,5	7,5	7,6	7,6	
Maximum	8,1	8,0	7,7	7,7	7,5	7,6	7,7	7,6	7,7	7,7	7,9	8,1	
Wassertemp. [°C]													
\bar{x}	14,4	14,6	12,8	12,4	11,1	12,3	14,3	13,0	13,4	14,5	15,6	15,6	
s	0,771	0,651	0,305	0,253	0,185	0,620	0,798	0,485	0,710	0,675	0,788	1,107	
Minimum	13,1	13,6	12,2	12,0	10,5	11,2	12,8	12,1	11,5	13,7	14,5	14,0	
Maximum	16,0	15,6	13,2	12,9	11,3	13,3	15,5	13,8	14,5	15,5	16,7	18,8	
Fließgeschw. [m/s]													
\bar{x}	0,496	0,503	0,492	0,491	0,499	0,505	0,511	0,488	0,500	0,534	0,505	0,516	
s	0,004	0,005	0,004	0,003	0,019	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,008	0,006	
Minimum	0,490	0,493	0,485	0,485	0,475	0,488	0,500	0,480	0,493	0,525	0,493	0,508	
Maximum	0,503	0,513	0,500	0,498	0,583	0,513	0,520	0,503	0,508	0,540	0,525	0,530	

Tab. A3.2.1.9: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Mühlkoppen (*Cottus gobio*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und Mächtigkeit der Wassersäule in einer Verrohrung.

		„Strömung [m/s]/Mächtigkeit der Wassersäule [cm]/Verrohrung“																		
Mühlkoppe (<i>Cottus gobio</i>)	[m/s]	0,1'	0,1'	0,5'	0,5'	0,1''	0,1''	0,1''	0,1''	0,5''	0,5''	0,5''	0,5''	0,75''	0,75''	0,75''	0,75''	0,9''	0,9''	
	Datum	04.06.97	09.06.97	10.06.97	11.06.97	13.06.97	14.06.97	14.06.97	14.06.97	11.06.97	13.06.97	13.06.97	14.06.97	14.06.97	17.06.97	17.06.97	18.06.97	21.06.97	21.06.97	22.06.97
O₂ [mg/l]																				
\bar{x}		9,3	6,9	8,7	8,1	7,9	7,7	8,4	8,4	8,8	8,8	8,8	8,6	9,0	9,2	9,0	9,2	9,0	9,0	8,2
s		1,117	1,124	1,130	1,511	1,401	1,382	1,034	1,034	1,368	1,368	1,368	1,088	0,928	0,705	0,930	0,705	0,930	0,930	0,498
Minimum		7,3	5,2	6,7	5,9	5,7	6,0	6,9	6,9	6,6	6,6	6,6	6,9	7,8	7,7	7,3	7,7	7,3	7,3	7,3
Maximum		11,2	8,8	10,5	10,5	10,6	9,7	10,3	10,3	11,0	11,0	11,0	10,6	10,9	10,5	10,6	10,5	10,6	10,6	9,1
LF [uS/cm]																				
\bar{x}		1285	1271	1434	1429	1301	1307	1203	1203	1400	1400	1400	1411	1378	1337	1341	1337	1341	1341	1280
s		18,945	10,163	36,921	31,306	10,583	8,480	16,554	16,554	24,641	24,641	24,641	33,028	14,991	19,213	17,495	19,213	17,495	17,495	22,706
Minimum		1251	1254	1382	1374	1278	1294	1180	1180	1368	1368	1368	1285	1353	1312	1306	1312	1306	1306	1251
Maximum		1321	1288	1495	1468	1318	1320	1232	1232	1456	1456	1456	1457	1408	1371	1365	1371	1365	1365	1313
pH																				
\bar{x}		7,8	7,8	7,7	7,8	7,8	7,8	8,0	8,0	7,7	7,7	7,7	7,7	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
s		0,074	0,100	0,098	0,166	0,113	0,123	0,121	0,121	0,073	0,073	0,073	0,084	0,064	0,075	0,090	0,075	0,090	0,090	0,046
Minimum		7,7	7,6	7,5	7,3	7,6	7,7	7,8	7,8	7,5	7,5	7,5	7,6	7,4	7,4	7,5	7,4	7,5	7,5	7,5
Maximum		8,0	8,0	7,9	8,0	8,1	8,1	8,2	8,2	7,8	7,8	7,8	7,9	7,7	7,7	7,8	7,7	7,8	7,8	7,6
Wassertemp. [°C]																				
\bar{x}		14,1	16,6	16,9	16,3	15,6	15,2	13,5	13,5	13,8	13,8	14,8	14,8	12,5	11,8	12,3	11,8	12,3	12,3	11,0
s		0,907	1,299	1,375	0,909	0,932	0,976	0,821	0,821	0,806	0,806	0,869	0,869	0,395	0,452	0,527	0,452	0,527	0,527	0,334
Minimum		12,7	14,6	15,1	15,0	14,0	13,6	12,5	12,5	12,7	12,7	13,6	13,6	11,7	11,0	11,5	11,0	11,5	11,5	10,4
Maximum		15,3	18,5	19,0	17,5	17,2	16,4	14,9	14,9	15,4	15,4	17,1	17,1	13,2	12,4	13,1	12,4	13,1	13,1	11,5
Fließgeschw. [m/s]																				
\bar{x}		0,100	0,100	0,540	0,529	0,101	0,103	0,121	0,121	0,566	0,566	0,555	0,555	0,764	0,727	0,932	0,727	0,932	0,932	0,936
s		0,004	0,004	0,008	0,008	0,001	0,002	0,005	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,011	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,005
Minimum		0,093	0,095	0,523	0,510	0,099	0,097	0,103	0,103	0,555	0,555	0,543	0,543	0,735	0,718	0,913	0,718	0,913	0,913	0,925
Maximum		0,105	0,107	0,558	0,543	0,104	0,106	0,126	0,126	0,580	0,580	0,565	0,565	0,780	0,748	0,943	0,748	0,943	0,943	0,943

*Wasserstand in der Verrohrung $\approx 12,5$ cm**Wasserstand in der Verrohrung ≈ 25 cm

Tab. A3.2.2.1a: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen* (*Phoxinus phoxinus*) aus der Grundgesamtheit I bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)								
	[m/s]	0,5	0,5	0,9	0,9	1,5	1,5	1,7	1,7
Datum		22.09.1997	23.09.1997	19.09.1997	20.09.1997	25.09.1997	26.09.1997	17.09.1997	18.09.1997
O₂ [mg/l]									
\bar{x}		9,3	9,1	8,3	9,1	9,1	9,3	9,5	9,6
s		1,018	0,795	1,390	0,576	0,716	0,930	0,837	0,764
Minimum		8,0	7,7	5,8	7,9	8,0	8,0	7,3	8,2
Maximum		11,4	10,7	10,6	10,4	10,3	10,9	11,1	10,6
LF [uS/cm]									
\bar{x}		1274	1271	1296	1319	1379	1333	1343	1340
s		32,820	27,473	55,085	9,003	81,446	92,277	29,984	19,906
Minimum		1233	1233	1222	1306	1142	1142	1303	1314
Maximum		1328	1315	1400	1336	1476	1476	1456	1374
pH									
\bar{x}		7,7	7,7	7,8	7,6	7,6	7,8	7,6	7,5
s		0,078	0,069	0,101	0,071	0,074	0,173	0,078	0,074
Minimum		7,6	7,6	7,6	7,5	7,5	7,5	7,4	7,4
Maximum		7,9	7,9	7,9	7,7	7,7	8,0	7,7	7,6
Wassertemp. [°C]									
\bar{x}		11,2	10,9	13,6	11,3	10,6	11,1	11,5	11,3
s		0,783	0,703	1,094	0,439	0,439	1,021	1,102	0,520
Minimum		10,1	9,8	12,4	10,7	10,0	9,6	10,4	10,5
Maximum		12,3	12,0	16,5	12,0	11,5	12,7	16,3	12,1
Fließgeschw. [m/s]									
\bar{x}		0,550	0,544	0,968	0,930	1,519	1,548	1,772	1,711
s		0,016	0,007	0,008	0,016	0,008	0,017	0,017	0,011
Minimum		0,558	0,530	0,945	0,921	1,505	1,513	1,753	1,685
Maximum		0,583	0,568	0,985	0,955	1,528	1,568	1,808	1,728

* Die Werte der Tabellen A3.2.2.1 bis A3.2.2.9 zur Wasserbeschaffenheit treffen sowohl auf Elritzen als auch auf Bachschmerlen zu, da beide Fischarten gemeinsam in der jeweiligen Versuchsanstellung eingesetzt wurden.

Tab. A3.2.2.1b: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) aus der Grundgesamtheit II bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)							
	[m/s]	0,1	0,1	0,5	0,5	0,75	0,75	1,2
Datum	27.10.1997	28.10.1997	25.10.1997	26.10.1997	22.10.1997	23.10.1997	14.10.1997	21.10.1997
O₂ [mg/l]								
\bar{x}	10,1	10,9	10,0	10,0	9,6	9,5	9,4	9,0
s	0,576	1,032	0,942	0,665	0,947	0,831	1,035	0,713
Minimum	9,0	9,5	8,5	8,8	7,6	7,9	7,4	7,4
Maximum	11,4	13,4	11,7	11,3	11,5	11,6	11,1	10,2
LF [uS/cm]								
\bar{x}	1066	1044	1072	1109	1139	1134	1050	1115
s	33,364	19,217	41,907	11,265	10,423	12,314	24,064	15,782
Minimum	1003	1006	995	1097	1108	1116	1002	1083
Maximum	1108	1071	1119	1134	1149	1154	1085	1137
pH								
\bar{x}	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	8,0	7,9	7,9
s	0,055	0,068	0,070	0,069	0,075	0,088	0,096	0,080
Minimum	7,8	7,8	7,8	7,7	7,8	7,8	7,7	7,7
Maximum	8,0	8,1	8,1	8,0	8,1	8,2	8,1	8,0
Wassertemp. [°C]								
\bar{x}	6,0	4,5	7,5	7,7	8,6	8,2	8,7	9,4
s	1,252	0,549	0,443	0,261	0,413	0,447	0,392	0,429
Minimum	3,8	3,7	6,5	7,2	6,8	7,6	8,1	8,5
Maximum	7,5	5,4	8,1	8,2	8,9	9,0	9,5	10,0
Fließgeschw. [m/s]								
\bar{x}	0,139	0,146	0,550	0,544	0,762	0,775	1,222	1,159
s	0,007	0,005	0,008	0,012	0,004	0,031	0,068	0,019
Minimum	0,125	0,137	0,530	0,520	0,721	0,730	1,170	1,073
Maximum	0,160	0,158	0,565	0,570	0,778	0,873	1,330	1,170

Tab. A3.2.2.2: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit = 0,25 m/s)									
	[cm]	2,5	2,5	5	5	10	10	20	20	40
Datum	05.01.98	06.01.98	29.12.97	30.12.97	27.12.97	28.12.97	17.12.97	18.12.97	15.12.97	16.12.97
O₂ [mg/l]										
\bar{x}	10,2	10,0	10,7	10,6	9,9	10,6	12,3	11,7	11,6	12,5
s	0,550	0,399	0,563	0,720	0,666	0,749	0,610	0,781	0,502	0,393
Minimum	9,2	9,2	9,8	9,4	8,7	9,3	11,4	10,4	10,6	11,8
Maximum	11,1	10,8	12,0	12,1	11,0	12,1	13,6	12,8	12,3	13,1
LF [uS/cm]										
\bar{x}	843	791	883	892	918	902	839	874	843	820
s	40,548	22,272	5,331	4,831	4,981	9,903	11,371	6,859	12,136	3,832
Minimum	769	762	874	881	911	886	826	861	823	812
Maximum	894	832	892	900	929	916	858	885	857	828
pH										
\bar{x}	7,8	7,6	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,1	8,0	8,1
s	0,175	0,043	0,045	0,060	0,054	0,055	0,047	0,066	0,044	0,035
Minimum	7,5	7,5	7,9	7,9	7,9	7,8	8,0	8,0	7,9	8,1
Maximum	8,0	7,7	8,1	8,2	8,1	8,1	8,1	8,2	8,1	8,2
Wassertemp. [°C]										
\bar{x}	3,8	4,1	3,3	3,1	4,4	4,2	1,1	2,7	3,1	1,4
s	0,302	0,102	0,379	0,252	0,231	0,365	0,433	0,334	0,639	0,433
Minimum	3,0	3,8	2,7	2,6	4,2	3,4	0,3	1,8	1,9	0,6
Maximum	4,2	4,2	3,9	3,7	4,9	4,7	1,8	3,0	4,0	2,1
Fließgeschw. [m/s]										
\bar{x}	*	*	0,252	0,271	0,249	0,263	0,245	0,284	0,228	0,229
s	*	*	0,032	0,007	0,007	0,006	0,012	0,014	0,002	0,003
Minimum	*	*	0,192	0,259	0,234	0,243	0,235	0,260	0,226	0,222
Maximum	*	*	0,311	0,283	0,255	0,270	0,289	0,313	0,230	0,234

* keine permanente Messung der Fließgeschwindigkeit

Tab. A3.2.2.3: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und einer Körnung des Bodensubstrates von 16 mm.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]/kleine Körnung des Bodensubstrates [16 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)				
	[m/s]	0,5	0,5	1,0	1,0
Datum		03.09.1997	04.09.1997	08.09.1997	09.09.1997
O₂ [mg/l]					
\bar{x}		8,7	9,0	8,9	8,9
s		0,809	0,987	0,741	0,675
Minimum		7,2	7,4	7,2	7,3
Maximum		9,9	10,8	10,1	10,1
LF [uS/cm]					
\bar{x}		1378	1381	1352	1355
s		13,225	26,397	22,947	20,692
Minimum		1361	1345	1319	1313
Maximum		1401	1425	1391	1390
pH					
\bar{x}		7,5	7,6	7,6	7,7
s		0,079	0,075	0,072	0,060
Minimum		7,4	7,4	7,5	7,6
Maximum		7,7	7,7	7,7	7,8
Wassertemp. [°C]					
\bar{x}		12,4	12,7	11,7	12,0
s		0,336	0,463	0,455	0,513
Minimum		11,8	11,8	10,9	11,1
Maximum		12,9	13,4	12,3	12,8
Fließgeschw. [m/s]					
\bar{x}		0,544	0,540	1,004	1,067
s		0,007	0,011	0,054	0,049
Minimum		0,515	0,508	0,828	0,990
Maximum		0,550	0,560	1,060	1,160

Tab. A3.2.2.4: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und einer Körnung des Bodensubstrates von 32 mm.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömung [m/s]/große Körnung des Bodensubstrates [32 mm]“ (Mächtigkeit der Wassersäule = 10 cm)				
	[m/s]	0,5	0,5	1,0	1,0
Datum		15.09.1997	16.09.1997	10.09.1997	11.09.1997
O₂ [mg/l]					
\bar{x}		9,6	9,9	9,3	9,3
s		0,830	0,559	0,981	0,651
Minimum		8,0	8,8	7,4	8,1
Maximum		11,3	10,8	11,1	10,5
LF [uS/cm]					
\bar{x}		1310	1333	1327	1337
s		32,077	20,780	22,738	20,826
Minimum		1224	1295	1291	1311
Maximum		1358	1361	1358	1372
pH					
\bar{x}		7,6	7,5	7,6	7,5
s		0,133	0,067	0,060	0,093
Minimum		7,5	7,4	7,5	7,3
Maximum		8,1	7,6	7,7	7,7
Wassertemp. [°C]					
\bar{x}		11,4	11,2	11,3	11,4
s		0,676	0,747	0,557	0,535
Minimum		9,9	10,0	10,2	10,6
Maximum		12,3	11,9	12,2	12,1
Fließgeschw. [m/s]					
\bar{x}		0,526	0,548	1,077	1,080
s		0,017	0,049	0,075	0,023
Minimum		0,463	0,473	0,895	1,023
Maximum		0,548	0,628	1,190	1,125

Tab. A3.2.2.5: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Höhe der Bodenschwelle.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Höhe der Bodenschwelle [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule über der Schwelle = 20 cm)						
	[cm]	5	10	15	20	25	30
Datum		20.11.1997	21.11.1997	22.11.1997	23.11.1997	28.11.1997	29.11.1997
O₂ [mg/l]							
\bar{x}		10,6	10,3	10,6	10,0	9,5	10,2
s		0,917	0,856	0,962	0,658	0,898	1,159
Minimum		9,2	9,0	8,8	8,6	8,0	8,7
Maximum		12,3	12,3	12,3	11,3	11,7	12,8
LF [uS/cm]							
\bar{x}		1097	1103	1090	1099	1121	1143
s		11,498	26,200	6,936	4,505	14,043	7,990
Minimum		1059	1066	1072	1090	1085	1124
Maximum		1107	1142	1106	1105	1134	1157
pH							
\bar{x}		7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
s		0,057	0,081	0,077	0,049	0,080	0,061
Minimum		7,8	7,7	7,8	7,8	7,7	7,8
Maximum		8,0	8,0	8,0	7,9	8,0	8,0
Wassertemp. [°C]							
\bar{x}		5,7	6,1	5,7	5,8	6,7	7,5
s		0,388	0,765	0,213	0,147	0,588	0,270
Minimum		4,4	4,9	5,1	5,4	5,2	6,6
Maximum		6,2	7,2	6,0	6,1	7,3	7,9
Fließgeschw. [m/s]							
\bar{x}		0,252	0,270	0,238	0,239	0,246	0,245
s		0,005	0,012	0,007	0,002	0,003	0,005
Minimum		0,240	0,230	0,223	0,235	0,241	0,234
Maximum		0,268	0,282	0,253	0,241	0,253	0,254

Tab. A3.2.2.6: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Mächtigkeit der Wassersäule über der Bodenschwelle [cm]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,25 m/s)				
	[cm]	2,5	5	10	20
Datum		02.12.1997	01.12.1997	30.11.1997	21.11.1997
O₂ [mg/l]					
\bar{x}		9,9	9,4	9,8	10,3
s		0,702	0,778	0,596	0,856
Minimum		8,6	7,1	8,4	9,0
Maximum		11,1	10,4	11,0	12,3
LF [µS/cm]					
\bar{x}		1047	1097	1123	1103
s		22.220	20.520	9.791	26.200
Minimum		1005	1068	1099	1066
Maximum		1074	1123	1139	1142
pH					
\bar{x}		8,0	7,9	7,8	7,9
s		0,052	0,054	0,055	0,081
Minimum		7,9	7,8	7,7	7,7
Maximum		8,1	8,0	7,9	8,0
Wassertemp. [°C]					
\bar{x}		5,6	6,7	7,4	6,1
s		0,257	0,398	0,274	0,765
Minimum		5,2	6,1	6,9	4,9
Maximum		6,1	7,3	7,9	7,2
Fließgeschw. [m/s]					
\bar{x}		0,255	0,255	0,232	0,270
s		0,002	0,006	0,008	0,012
Minimum		0,251	0,235	0,218	0,230
Maximum		0,259	0,263	0,245	0,282

Tab. A3.2.2.7: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Strömungsgeschwindigkeit über der Bodenschwelle [m/s]“ (Höhe der Bodenschwelle = 10 cm; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 10 cm)							
	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,25	1,25
Datum	30.11.1997	03.12.1997	04.12.1997	08.12.1997	09.12.1997	10.12.1997	11.12.1997	
O₂ [mg/l]								
\bar{x}	9,8	10,6	11,0	11,3	11,1	11,1	10,6	
s	0,596	0,875	0,689	0,672	0,574	0,552	0,498	
Minimum	8,4	7,8	9,5	10,4	10,1	10,1	9,4	
Maximum	11,0	11,8	13,1	12,7	12,1	12,1	11,6	
LF [uS/cm]								
\bar{x}	1123	971	994	1059	1036	1037	1033	
s	9,791	15,481	15,087	13,795	14,435	16,024	26,941	
Minimum	1099	945	968	1022	1004	1003	972	
Maximum	1139	994	1010	1078	1053	1057	1066	
pH								
\bar{x}	7,8	8,0	8,1	7,9	8,0	8,0	7,9	
s	0,055	0,054	0,077	0,059	0,059	0,076	0,097	
Minimum	7,7	7,9	7,9	7,8	7,9	7,8	7,7	
Maximum	7,9	8,1	8,2	8,0	8,1	8,2	8,1	
Wassertemp. [°C]								
\bar{x}	7,4	3,8	4,1	5,2	5,4	5,6	7,1	
s	0,274	0,581	0,321	0,445	0,545	0,584	0,434	
Minimum	6,9	2,9	3,6	4,2	3,9	4,4	6,2	
Maximum	7,9	4,7	4,8	5,8	6,0	6,2	7,6	
Fließgeschw. [m/s]								
\bar{x}	0,252	0,532	0,742	1,095	1,214	1,299	1,275	
s	0,000	0,008	0,009	0,004	0,009	0,009	0,010	
Minimum	0,252	0,521	0,723	1,093	1,198	1,280	1,250	
Maximum	0,252	0,545	0,770	1,113	1,228	1,310	1,291	

Tab. A3.2.2.8: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Elritzen (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser.

Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	„Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser [cm]“ (Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser = 0,5 m/s; Mächtigkeit der Wassersäule im Oberwasser = 8 cm)										
	[cm]	2,5	2,5	5	5	7,5	7,5	10	10	12,5	12,5
Datum	18.11.97	19.11.97	09.11.97	10.11.97	11.11.97	12.11.97	13.11.97	14.11.97	16.11.97	17.11.97	7
O₂ [mg/l]											
\bar{x}	8,9	10,9	8,1	8,5	8,6	8,4	8,3	8,7	8,2	8,4	
s	0,632	0,965	0,743	1,097	0,724	0,848	0,901	0,992	0,749	0,672	
Minimum	7,5	9,3	6,9	6,9	7,0	7,2	6,8	6,6	6,8	7,3	
Maximum	10,5	13,4	9,7	10,4	9,8	10,0	9,5	10,5	9,7	9,7	
LF [uS/cm]											
\bar{x}	1096	1056	1132	1139	1140	1131	1123	1114	1134	1131	
s	23,747	6,857	15,428	18,538	15,353	14,176	14,966	14,612	6,957	9,233	
Minimum	1051	1043	1105	1114	1112	1110	1097	1090	1114	1115	
Maximum	1124	1067	1158	1168	1162	1151	1141	1130	1144	1143	
pH											
\bar{x}	7,9	7,9	7,8	7,9	7,8	7,9	7,9	7,9	7,8	7,8	
s	0,059	0,083	0,066	0,068	0,078	0,080	0,055	0,080	0,045	0,062	
Minimum	7,8	7,8	7,7	7,7	7,7	7,8	7,8	7,7	7,7	7,7	
Maximum	8,0	8,1	7,9	8,0	8,0	8,1	8,0	8,0	7,9	8,0	
Wassertemp. [°C]											
\bar{x}	6,0	4,7	7,0	7,1	7,1	6,9	6,8	6,5	7,3	6,9	
s	0,661	0,244	0,473	0,661	0,502	0,559	0,438	0,883	0,213	0,371	
Minimum	4,7	4,3	6,1	6,1	6,4	6,2	6,0	5,4	6,6	6,2	
Maximum	6,7	5,1	7,7	8,1	8,1	7,8	7,5	10,0	7,5	7,4	
Fließgeschw. [m/s]											
\bar{x}	0,538	0,531	0,533	0,547	0,553	0,543	0,545	0,547	0,541	0,546	
s	0,007	0,004	0,014	0,004	0,008	0,004	0,010	0,003	0,019	0,005	
Minimum	0,528	0,523	0,487	0,540	0,535	0,535	0,535	0,540	0,530	0,530	
Maximum	0,565	0,540	0,550	0,555	0,563	0,550	0,585	0,553	0,580	0,555	

Tab. A3.2.2.9: Statistische Kennzahlen der chemisch-physikalischen und hydraulischen Parameter zu den durchgeführten Migrationsversuchen (jeweils 24 Std.) mit Eiltritz (*Phoxinus phoxinus*) bei unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit und Mächtigkeit der Wassersäule in einer Verrohrung.

		»Strömung [m/s]/Mächtigkeit der Wassersäule [cm]/Verrohrung«										
Eiltritz (<i>Phoxinus phoxinus</i>)		0,25"	0,5"	0,75"	1,0"	1,0"	1,0"	0,25"	0,5"	0,75"	1,0"	
[m/s]		29.10.1997	30.10.1997	31.10.1997	01.11.1997	02.11.1997	03.11.1997	04.11.1997	05.11.1997	06.11.1997	07.11.1997	
Datum												
O₂	[mg/l]											
\bar{x}		10,8	10,4	10,3	10,2	10,4	9,9	10,2	10,2	9,7	9,4	
s		1,059	0,808	1,013	0,985	0,780	0,656	0,710	0,702	0,914	0,693	
Minimum		8,9	9,2	9,1	8,2	9,2	8,8	8,9	8,6	8,4	8,2	
Maximum		13,3	11,9	12,3	12,3	11,7	11,5	11,7	11,2	11,5	10,8	
LF	[uS/cm]											
\bar{x}		1051	1054	1054	1061	1080	1092	1094	1141	1207	1204	
s		11,709	20,246	16,192	15,619	12,442	10,152	21,888	17,997	19,180	17,032	
Minimum		1038	1025	1033	1044	1064	1080	1066	1118	1180	1183	
Maximum		1095	1089	1084	1116	1102	1110	1147	1187	1244	1234	
pH												
\bar{x}		7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,8	7,9	
s		0,088	0,060	0,071	0,071	0,062	0,062	0,068	0,095	0,042	0,065	
Minimum		7,7	7,8	7,7	7,8	7,8	7,8	7,7	7,7	7,7	7,8	
Maximum		8,1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,1	8,0	8,1	7,9	8,0	
Wassertemp.	[°C]											
\bar{x}		4,6	4,9	5,0	5,3	5,7	5,9	5,9	7,3	9,2	9,3	
s		0,381	0,445	0,442	0,599	0,581	0,338	0,706	0,425	0,537	0,452	
Minimum		4,1	4,3	4,4	4,7	4,9	5,3	4,9	6,6	8,3	8,4	
Maximum		5,4	5,8	5,7	7,2	6,7	6,4	7,3	8,5	10,0	10,1	
Fließgeschw.	[m/s]											
\bar{x}		0,242	0,521	0,760	1,016	1,000	1,011	0,244	0,580	0,792	1,022	
s		0,006	0,006	0,010	0,033	0,094	0,060	0,027	0,039	0,067	0,036	
Minimum		0,232	0,504	0,743	0,995	0,793	0,877	0,196	0,485	0,740	1,003	
Maximum		0,255	0,530	0,778	1,170	1,060	1,068	0,274	0,638	0,908	1,190	

*Wasserstand in der Verrohrung $\approx 12,5$ cm**Wasserstand in der Verrohrung ≈ 25 cm