

Der hydromorphologische Index der Diversität

«eine Messlatte für das ökologische Potenzial von Hochwasserschutzprojekten»

Walter Gostner, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Im modernen Flussbau müssen nicht nur schutzwasserbau-liche, sondern auch ökologische Anforderungen berücksichtigt werden. Durch entsprechende Gestaltung ist ein möglichst grosser Strukturreichtum anzustreben, da dieser zweifelsfrei eine der Grundvoraussetzungen für eine hohe Biodiversität in einem Fliessgewässer darstellt.

Im vorliegenden Artikel wird ein neuer hydromorphologischer Index der Diversität (HMID) vorgestellt. Der HMID wurde im Rahmen des Forschungsprojektes «Integriertes Flussgebietsmanagement» mittels umfangreicher Felderhebungen, numerischer Modellierungen und statistischer Analysen an drei Fliessgewässern in der Schweiz entwickelt.

Er enthält in seiner Formulierung die hydraulischen Variablen Fliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe, welche aufgrund der vorhandenen Wechselwirkungen mit anderen hydraulischen und geomorphischen Grössen die Strukturvielfalt eines Fliessgewässers zu charakterisieren vermögen.

Mit dem HMID steht dem Wasserbauer ein Werkzeug zur Verfügung, das es ihm erlaubt, bei Hochwasserschutzprojekten auch den Strukturreichtum zu optimieren und damit möglichst günstige hydromorphologische Voraussetzungen für die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen eines Fliessgewässers zu schaffen.

Résumé

Dans l'ingénierie fluviale moderne, il est non seulement nécessaire de considérer les exigences de protection contre les crues, mais également les demandes écologiques. Avec une configuration du lit optimisée, une richesse structurelle peut être retrouvée. Elle représente sans aucun doute une des conditions de base pour une biodiversité élevée dans un cours d'eau.

Dans le présent article, un nouvel indice hydro-morphologique de diversité (HMID) est présenté. Le HMID a été développé dans le cadre du projet «Gestion intégrale des réseaux fluviaux» à l'aide d'investigations in situ, de modélisations numériques et d'analyses statistiques sur trois cours d'eau situés en Suisse.

Dans sa formulation, il contient les variables hydrauliques, tel que les vitesses d'écoulement et les profondeurs d'eau, qui, suite aux corrélations avec d'autres grandeurs hydrauliques et géomorphiques, sont capables de caractériser la richesse structurelle d'un cours d'eau.

En utilisant le HMID, l'ingénieur hydraulicien dispose d'un outil qui lui permet d'optimiser la richesse structurelle d'un cours d'eau, dans le cadre des projets de protection contre les crues. Par conséquent, il peut générer des conditions hydro-morphologiques optimales pour la restauration de ses fonctions naturelles.

1. Einführung

Fliessgewässer erfüllen wichtige ökologische, wirtschaftliche und soziale Funktionen. Eingriffe an den Fliessgewässern auf verschiedenen Ebenen waren und sind die Voraussetzung für die Entwicklung unserer Zivilgesellschaften. Durch die mannigfaltigen Nutzungs- und Verbauungsformen zählen Fliessgewässer heutzutage jedoch zu den am vielfältigsten und schwersten beeinträchtigten Ökosystemen (Jungwirth et al., 2003). Zudem hat der klassische Hochwasserschutz oft seine gewünschte Wirkung nicht erreicht. Extreme Hochwässer haben gezeigt, dass ein absoluter Schutz nicht möglich ist und die traditionellen Herangehensweisen zu überdenken sind.

Aus diesen Beweggründen heraus hat sich ein Wandel weg von einer sektoriellen Betrachtungsweise hin zu ganzheit-

lichen und integralen Ansätzen vollzogen. In den einschlägigen Gesetzen hat dieser Paradigmenwechsel Eingang gefunden. Demnach müssen die Kantone nicht nur die Gefahrengebiete bezeichnen, sondern auch den Raumbedarf der Gewässer festlegen, der für den Schutz vor Hochwasser und für die Erfüllung der ökologischen Funktionen der Gewässer notwendig ist. Bei Hochwasserschutzprojekten sind also auch die ökologischen Defizite zu ermitteln und zu beheben. Weiters sind die Kantone verpflichtet, die Revitalisierung ihrer Gewässer vorzunehmen, wobei darunter die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen der oberirdischen Fliessgewässer zu verstehen ist.

Der Wasserbauingenieur benötigt demzufolge nicht mehr nur Instrumente zur fachgerechten Auslegung der Hochwasserschutzmassnahmen, vielmehr

muss er imstande sein, die Projekte so zu gestalten, dass auch die Voraussetzungen für das ökologische Potenzial der Fliessgewässer verbessert werden.

Der in diesem Artikel vorgestellte «hydromorphologische Index der Diversität» (HMID) ist aus diesen Anforderungen heraus im Rahmen des Forschungsprojektes «Integriertes Flussgebietsmanagement» entstanden. Er soll als Werkzeug dienen, bei Hochwasserschutzprojekten die hydromorphologischen Eigenschaften des betroffenen Fliessgewässerabschnitts so zu gestalten, dass möglichst gute Voraussetzungen für dessen natürliche Funktionen geschaffen werden. Durch die Ermittlung des HMID für verschiedene Projektvarianten und die Überprüfung weiterer hydromorphologischer Kriterien können die aus gesamtheitlicher Sicht zu priorisierenden Varianten festgelegt werden.



2. Der hydromorphologische Index der Diversität

2.1 Strukturvielfalt als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Gewässerökosysteme

Für die Funktionsfähigkeit der Fließgewässerlebensräume ist eine Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Faktoren abiotischer und biotischer Natur mitbestimmend.

Bei den abiotischen Faktoren spielen die hydromorphologischen Eigenschaften eine tragende Rolle. Stellt man Fließgewässer mit natürlicher und künstlicher Morphologie einander gegenüber, ist in natürlichen Abschnitten (Beispiel in Bild 1, links) in der Regel eine grosse Variabilität der Strömung, d.h. der hydraulischen Variablen, zu erkennen. Zonen mit hoher Fließgeschwindigkeit wechseln sich ab mit Bereichen mittlerer Fließtiefe und -geschwindigkeit und mit Stellen hoher Tiefe und geringer Fließgeschwindigkeit. Weiter gibt es Flachwasserbereiche mit geringer Strömung, Kiesbänke unterschiedlicher Höhe mit dementsprechend verschiedenen Vegetationscharakteristiken und Sukzessionsstadien, Vorkommen von Totholz und ein buntes Muster an verschiedenen Substratgrößen. Auch ist zwischen dem Fließgewässer und dem Umland oft ein breiter Ufergürtel vorhanden. Man stellt also eine hohe Vielfalt an aquatischen und terrestrischen Lebensräumen fest. In kanalisiertem Abschnitten hingegen (Beispiel in Bild 1, rechts) ist eine starke Monotonie mit konstant bleibenden Strömungsmustern sowohl in Längs- als auch in Querrichtung und einem eingeschränkten Angebot an Lebensräumen zu beobachten.

Die hydromorphologische Vielfalt, häufig auch als Strukturvielfalt bezeichnet, ist einerseits bedingt durch die morphologischen Eigenschaften, also durch die räumliche Variabilität, und andererseits durch das hydrologische bzw. abflussdynamische Geschehen, also durch die zeitliche Komponente. Aus dem Zusammenspiel von Morphologie mit dem Abfluss entstehen jene hydraulischen Variablen (Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit, Substrateigenschaften, u.a.), welche das Habitatangebot für aquatische Lebensgemeinschaften bestimmen, aber auch die Randbedingungen für die flussbegleitende Flora und Fauna.

Die Veränderung und vor allem Homogenisierung der physikalischen Habitate mit der damit einhergehenden Verarmung der Strukturvielfalt in den Fließgewässern ist die bedeutsamste Bedrohung für die Biodiversität und führt zu einer Reduzierung von Artenreichtum und Biomasse (Allan & Castillo, 2007). In der Schweiz sind rund 15 000 km der Fließgewässer stark verbaut (BAFU 2010), dort sind verschiedene Fischarten nicht mehr vorhanden bzw. hat sich in den letzten Jahren die Fischbiomasse auf bis zu einem Zehntel dezimiert (Peter A. in Häusler, 2011). Im Umkehrschluss gilt der Grundsatz, dass die Vielfalt der Habitate in verschiedenen räumlichen Massstabsebenen eine der wichtigsten Grundvoraussetzungen für die Entwicklung und Erhaltung artenreicher Lebensgemeinschaften ist (Jungwirth et al., 2003).

2.2 Grundlegende Hypothesen

Aus diesen grundsätzlichen Betrachtungen leiten sich die zur Herleitung des hydromorphologischen Indexes der Diversität (HMID) folgendermassen postulierten

Hypothesen ab (Gostner et al., 2011a, Gostner et al., 2011b):

- Die Strukturvielfalt eines Fließgewässerabschnittes lässt sich mit Hilfe der hydraulischen Grössen Fließgeschwindigkeit und Fließtiefe sowie ihrer statistischen Parameter charakterisieren.
- Die statistischen Parameter dieser hydraulischen Grössen können anhand einer mathematischen Definition in einer Masszahl, dem HMID, kombiniert werden. Dieser charakterisiert somit die Strukturvielfalt der aquatischen Lebensräume eines Fließgewässerabschnittes direkt und der flussbegleitenden Lebensräume indirekt.
- Die räumliche Variabilität der aquatischen Habitate ist in einem natürlichen oder naturnahen Fließgewässer höher als in einem künstlichen, während die zeitliche Variabilität in einem künstlichen Fließgewässer höher ist und dort somit eine geringere zeitliche Persistenz der Habitate gegeben ist.

2.3 Anwendungsbereich

Bisher war man in Ermangelung besserer Hilfsmittel bei Hochwasserschutzprojekten auf qualitative und gutachterliche Expertenbeurteilungen angewiesen, wenn es darum ging, auch die Strukturvielfalt zu verbessern. Der HMID (siehe Infobox) trägt den Anforderungen nach einer quantitativen und objektiven Beurteilung Rechnung. Er besitzt nämlich die Fähigkeit zur Vorhersage. Anhand von numerischen Abflussmodellierungen und darauffolgender statistischer Analyse der massgebenden hydraulischen Variablen kann der HMID für einzelne zur Diskussion stehende Varianten auf einfache Weise berechnet werden. Aus dem Vergleich des für die einzelnen

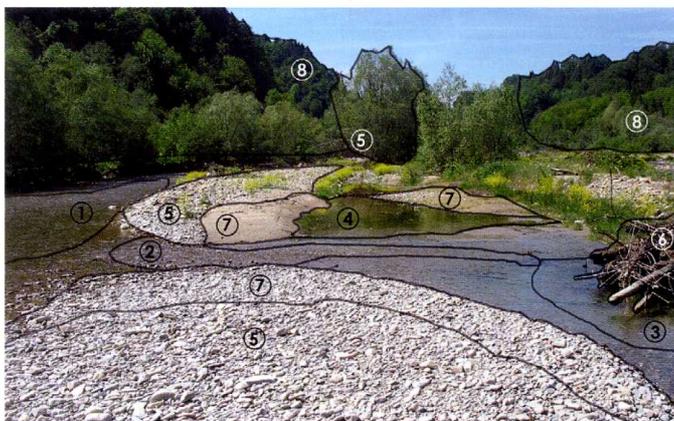


Bild 1. Links: unverbauter, natürlicher Abschnitt an der Sense (Kt. Freiburg) mit Bereichen mittlerer Fließgeschwindigkeit und -tiefe (Rinner) (1), Zonen hoher Fließgeschwindigkeit (Furt) (2), hoher Fließtiefe (Kolk) (3), Flachwasserbereichen (4), Kiesbänken unterschiedlicher Höhe (5), Totholz (6), wechselnden Substrateigenschaften (7) und einem breiten Ufergürtel (8). Rechts: verbauter, kanalartiger Abschnitt an der Bünz (Kt. Aargau) mit stark reduziertem Habitatangebot (aquatisch: Rinner, terrestrisch: Böschung konstanter Neigung mit Grasbewuchs und Sträuchern).

Variante berechneten Wertes für den HMID kann man jene Variante definieren, die das Fließgewässer mit der besten Strukturvielfalt auszustatten imstande ist und deshalb die aus ökologischer Sicht zu priorisierende Variante darstellt. Auch kann eine Abschätzung darüber getroffen werden, inwieweit eine gewählte Variante sich in bezug auf die Strukturvielfalt an den Referenzzustand annähern kann.

In zeitlicher Abfolge betrachtet reiht sich der HMID zwischen den Methoden, welche eine Bewertung des Ist-Zustandes

eines Fließgewässers erlauben (z.B. BUWAL, 1998) und den Anlass zur Lancierung eines Projektes geben können, und den Methoden für die Erfolgskontrolle (z.B. Woolsey, 2005), welche nach Umsetzung des Projekts zur Anwendung kommen, ein. Er füllt damit jene Lücke, die zwischen der Bewertung von Fließgewässern vor und nach Durchführung eines Projektes liegt und schafft eine Möglichkeit, eine a-priori Bewertung vorzunehmen und die Projekte in strukturell-morphologischer Hinsicht zu optimieren.

Der HMID ist an kiesführenden Alpenflüssen, die in ihrem Referenzzustand entweder einen pendelnden bis hin zu einem gewundenen oder verzweigten Verlauf aufwiesen, entwickelt worden. Dieser morphologischer Flusstyp war in den Alpen häufig anzutreffen, weshalb sich für die Anwendung des HMID ein breites Betätigungsfeld ergibt.

3. Herleitung und Entwicklung des HMID

3.1 Durchgeführte Arbeiten

3.1.1 Feldarbeiten

An drei Fließgewässern in der Schweiz wurden umfangreiche Felderhebungen durchgeführt (siehe Bild 2). Bei der Auswahl der Fließgewässer wurde darauf geachtet, dass Abschnitte mit unterschiedlicher morphologischer Ausprägung vorhanden sind, um die Strukturvielfalt am Fließgewässer in Funktion der morphologischen Eigenschaften erfassen zu können.

Die Bünz liegt im Kanton Aargau, hat ein Einzugsgebiet von 111 km² und mündet bei Wildeggen in den Aare. Die Venoge hingegen weist eine Einzugsgebietsgrösse von 238 km² auf und mündet in den Genfer See. Die Sense wiederum entwässert ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von 432 km², sie mündet bei Laupen (Kan-

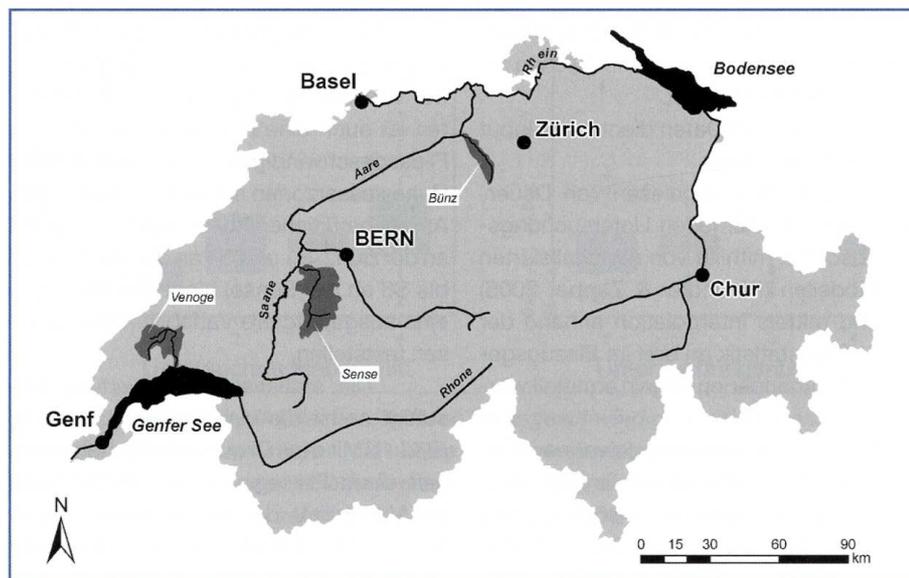


Bild 2. Übersicht der untersuchten Fließgewässer.



Bild 3. Aufnahmen der Untersuchungsabschnitte. Bünz (oben): (1) durch Jahrhunderthochwasser 1999 geformtes pendelndes System («Bünzau»), (2) naturbelassen pendelnd, (3) kanalisiert, (4) revitalisiert.

Venoge (Mitte): (1) naturbelassen geradlinig, (2) kanalisiert, (3) kanalisiert, (4) naturbelassen mäandrierend.

Sense (unten): (1) naturbelassen verzweigt, (2) naturbelassen in einer Schlucht pendelnd, (3) naturbelassen verzweigt, geringfügig verbaut, (4) rechtsufrig verbaut, linksufrig naturbelassen, (5) kanalisiert.

ton Bern) in die Saane. Die untersuchten Fließgewässer weisen pluviales bzw. nivo-pluviales Abflussregime auf, wobei sich das hydrologische Regime weitgehend in seinem natürlichen Zustand befindet. Es gibt nämlich keine bedeutenden Wasserableitungen, auch sind keine grösseren Staustufen vorhanden. Die Sense kann auf einem Grossteil ihres Verlaufes als Referenzgewässer bezeichnet werden: sie weist eine nahezu naturbelassene Morphologie auf und ist vom längsten zusammenhängenden Auenwald der Schweiz flankiert.

An jedem Fließgewässer wurden mehrere Untersuchungsabschnitte festgelegt (siehe Bild 3). Entlang von Querprofilen erfolgte in einem Abstand von durchschnittlich 100–150 cm zwischen den einzelnen Messpunkten die Aufnahme der topographischen Lage, der Sohlhöhe, der Wassertiefe und der mittleren Fließgeschwindigkeit (Übersicht über die wichtigsten Kenndaten der Untersuchungsabschnitte und der Messungen in Tabelle 1). An der Sense wurden zudem die Substrateigenschaften, die Höhe des bordvollen Abflusses, die Dichte der Ufervegetation und die Totholzvolumina erhoben, eine detaillierte Geländevermessung mit Erfassung des Talweges, der Kiesbänke, der Uferanschlagslinien und aller anderen markanten Bruchkanten im Gelände gemacht sowie eine Temperaturmesskampagne durchgeführt.

3.1.2 Numerische Modellierung

Die Felderhebungen stellen lediglich einen Schnappschuss der im Jahresverlauf auftretenden Situationen dar. Da auch die zeitliche Variabilität der untersuchten Variablen für die Entwicklung des HMID von Interesse war, wurde für die Untersuchungsabschnitte an der Sense mit der Software Basement eine numerische 2d-Modellierung durchgeführt. Diese bietet auch den Vorteil, dass im Gegensatz zur Aufnahme entlang von Querprofilen in jedem Element des Gitternetzes die hydraulischen Variablen ermittelt werden, damit eine flächige Abbildung gegeben und somit eine bessere Repräsentation der tatsächlichen Situation gewährleistet ist.

Folgenden Daten dienten als Input für die Modellierung:

- Abflusswerte, abgelesen von Dauerkurven, die für jeden Untersuchungsabschnitt mithilfe von regionalisierten Modellen (Pfaundler & Zappa, 2006) und mittels Interpolation anhand der Abflussstatistik an drei im Einzugsgebiet vorhandenen Pegeln ermittelt wurden;
- aus der Vermessung gewonnene x-, y-, z-Koordinaten der Geländepunkte;
- Rauigkeitsbeiwerte, welche anhand der mittels der Pebble-Count Methode (Wolman, 1954) ermittelten charakteristischen Korndurchmesser der Deckschicht berechnet und anhand der Feldmessungen und der Abfluss-

tiefe bei bordvollem Abfluss geeicht wurden.

3.2 Resultate

3.2.1 Räumliche Variabilität

Die Boxplots in Bild 4 zeigen an den jeweiligen Untersuchungsabschnitten die aus den Felderhebungen gewonnenen hydraulischen Grössen Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe, Tabelle 2 (oben) listet jeweils die Mittelwerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen auf. In kanalisierten Abschnitten (S3 an der Bünz, S2 und S3 an der Venoge, S5 an der Sense) ist die Streuung und somit auch Diversität der Variablen gering. In diesen Abschnitten ist auch eine hohe durchschnittliche Fließgeschwindigkeit zu beobachten, Ruhewasserzonen sind kaum vorhanden. An den natürlichen Abschnitten (S1 und S2 an der Bünz, S1 und S4 an der Venoge, S1 bis S3 an der Sense) hingegen lässt sich eine ausgeprägtere Variabilität der Grössen feststellen.

Die statistische Auswertung bestätigt somit die visuelle Wahrnehmung (Bild 1). Mit dem Grad der Naturbelassenheit eines Fließgewässers nimmt auch die Variabilität der hydraulischen Grössen zu. Je natürlicher also ein Gewässer ist, desto grösser ist die Vielfältigkeit der aquatischen Lebensräume.

3.2.2 Formulierung des HMID

Die Standardabweichung σ ist eine statistische Kenngrösse zur Beschreibung der Diversität einer Grösse (Palmer et al., 1997). Deren Aussagekraft hängt allerdings eng mit der Grösse des Mittelwertes μ zusammen. Eine gleich bleibende Standardabweichung hat nämlich bei einem grösseren Mittelwert eine geringeres Gewicht. Um die Standardabweichung als Vergleichsmass heranzuziehen, ist es somit zielführend den Variationskoeffizienten c_v zu verwenden, welcher den Quotienten aus Standardabweichung und Mittelwert darstellt und damit ein relatives Streuungsmass ausdrückt (Schneider, 1994). Daraus lässt sich ein Indikator für die Strukturvielfalt an einem Fließgewässer errechnen (Schleiss, 2005). Die Teilvielfältigkeit für eine einzelne Grösse wird folgendermassen ausgedrückt:

$$V(i) = (1 + c_{v,i})^2 = (1 + \frac{\sigma_i}{\mu_i})^2 \quad (1)$$

Der HMID für einen Abschnitt wird aus dem Produkt der Teilvielfältigkeitsindizes für Fließgeschwindigkeit v und -tiefe t berechnet:

Bünz					
Abschnitt	(S1) verzweigt	(S2) pendelnd	(S3) kanalisiert	(S4) revitalisiert	
Längsneigung (%)	1,5	0,75	0,3	0,15	
Länge Abschnitt [m]	150	115	55	140	
Anzahl Querprofile	15	12	7	10	
Mittlerer Abstand Querprofile [m]	10,7	10,4	9,2	15,6	
Anzahl Messpunkte	436	209	66	177	
Abfluss am Messtag [m³/s]	0,98	0,84	0,84	0,68	
Abflusspende am Messtag [l/s,km]	7,5	7,5	7,5	7,5	
Venoge					
Abschnitt	(S1) gestreckt	(S2) kanalisiert	S3 kanalisiert	(S4) mäandrierend	
Längsneigung (-)	NA	NA	NA	NA	
Länge Abschnitt [m]	60	40	80	120	
Anzahl Querprofile	12	8	8	12	
Mittlerer Abstand Querprofile [m]	5,0	5,0	10,0	10,0	
Anzahl Messpunkte	112	152	113	167	
Abfluss am Messtag [m³/s]	0,69	2,41	2,69	3,99	
Abflusspende am Messtag [l/s,km]	19,0	19,0	19,0	19,0	
Sense					
Abschnitt	(S1) verzweigt	(S2) pendelnd	(S3) verzweigt	(S4) teilverbaut	(S5) kanalisiert
Längsneigung (-)	1,8	1,3	1,2	0,5	0,7
Länge Abschnitt [m]	1850	770	620	685	940
Anzahl Querprofile	19	17	19	14	14
Mittlerer Abstand Querprofile [m]	100	48	25	53	72
Anzahl Messpunkte	310	202	249	135	216
Abfluss am Messtag [m³/s]	2,30	2,93	3,19	5,65	5,81
Abflusspende am Messtag [l/s,km]	19,5	19,5	18,2	17,6	16,3

Tabelle 1. Überblick über die Untersuchungsabschnitte mit den wichtigsten Kenndaten.

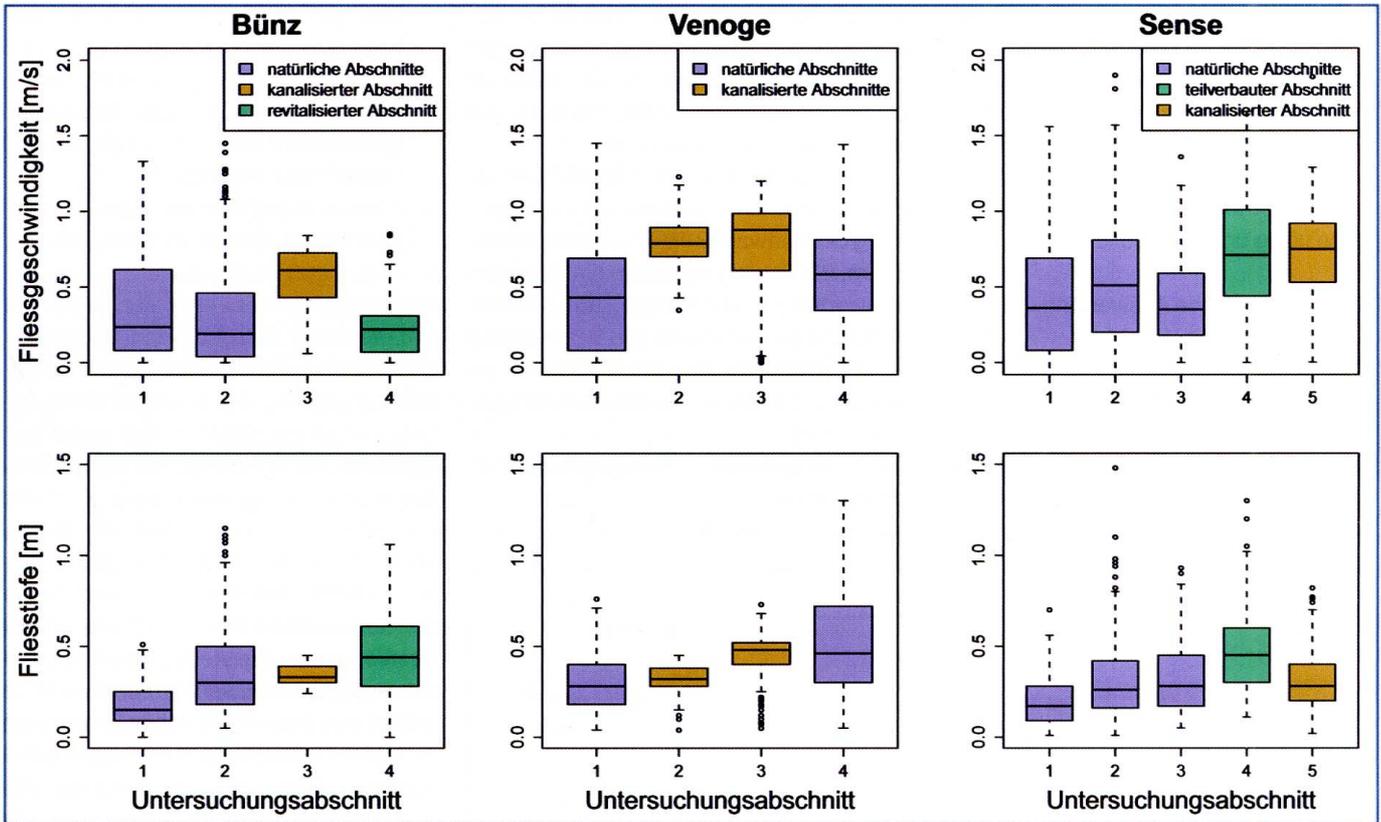


Bild 4. Boxplots der hydraulischen Grössen Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe. Die Boxplots geben jeweils den Medianwert (horizontale schwarze Linie) an, die untere und obere horizontale Begrenzung der Box zeigt das 25 bzw. 75% Perzentil der Daten (d.h. 50% der Daten liegen innerhalb dieses Bereiches), die vertikalen strichlierten Linien decken jenen Bereich ab, der ca.zwei Standardabweichungen entspricht. Ausserhalb dieses Bereiches liegende Messdaten sind Ausreisser und werden als Einzelpunkte dargestellt.

$$\begin{aligned}
 \text{HMID}_{\text{Abschnitt}} &= \prod_i V(i) = V(v) \cdot V(t) = \\
 &= \left(1 + \frac{\sigma_v}{\mu_v}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_t}{\mu_t}\right)^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

Bei jedem der untersuchten Fließgewässer weisen die kanalisiert Abschnitte (S3 bei der Bünz, S2 und S3 bei der Venoge, S5 bei der Sense) den niedersten HMID auf (Tabelle 2, unten). Es folgen Abschnitte, die bis zu einem gewissen Grad revitalisiert (S4 bei der Bünz) bzw. teilverbaut (S4 bei der Sense) sind. Den höchsten HMID weisen naturbelassene Abschnitte (S1 und S2 bei der Bünz, S1 und S2 bei der Venoge, S1 bis S3 bei der Sense) auf. Diese Feststellungen lassen den Schluss zu, dass der HMID die Strukturvielfalt eines Fließgewässers in geeigneter Art und Weise zu charakterisieren vermag.

3.2.3 Vergleich mit einer visuellen Bewertungsmethode

Um die Aussagekraft des vorgeschlagenen Indexes weiter validieren zu können, ist den errechneten Werten für den HMID eine multimetrische Methode gemäss den Bewertungsprotokollen der

		Abschnitt	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Bünz	v	[m/s]	0,37±0,34	0,32±0,35	0,56±0,21	0,22±0,18	
	t	[m]	0,18±0,11	0,38±0,26	0,34±0,06	0,46±0,22	
Venoge	v	[m/s]	0,45±0,38	0,79±0,16	0,77±0,31	0,57±0,33	
	t	[m]	0,30±0,16	0,32±0,08	0,44±0,14	0,49±0,26	
Sense	v	[m/s]	0,44±0,41	0,56±0,45	0,39±0,27	0,72±0,42	0,71±0,29
	t	[m]	0,20±0,13	0,32±0,22	0,31±0,18	0,46±0,22	0,31±0,15
		Abschnitt	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Bünz	V_v		3,74	4,43	1,88	3,16	
	V_t		2,66	2,85	1,35	2,22	
	HMID		9,92	12,61	2,55	7,01	
Venoge	V_v		3,37	1,46	1,98	2,52	
	V_t		2,41	1,55	1,76	2,35	
	HMID		8,12	2,26	3,50	5,93	
Sense	V_v		3,71	3,23	2,84	2,50	1,99
	V_t		2,79	2,88	2,51	2,17	2,21
	HMID		10,32	9,29	7,13	5,42	4,41

Tabelle 2. Mittelwerte und Standardabweichung (±) der hydraulischen Variablen Fließgeschwindigkeit v und Fliesstiefe t (oben). Berechnung der Vielfältigkeitsindizes und des HMID (unten).

USEPA (Barbour et al., 1999) gegenübergestellt worden. Bei diesem Verfahren zur Habitatbewertung wird für zehn Kriterien eine visuelle Bewertung abgegeben und auf einer Skala von 1–20 ein

Wert zugewiesen. Durch Summieren der einzelnen Werte ergibt sich eine Gesamtpunkteanzahl für jeden bewerteten Abschnitt, wobei maximal 200 Punkte erreicht werden können. Die berücksich-

tigten Kriterien betreffen dabei den allgemeinen morphologischen Zustand des Abschnittes sowie die Situation an der Fliessgewässersohle und an den Ufern. Aus Bild 5 ist ersichtlich, dass sich eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden ergibt, obwohl die Ansätze völlig unterschiedlich sind.

3.2.4 Statistische Auswertung der erhobenen Variablen

Ein Fliessgewässer und seine Komponenten sind niemals sektoriell zu betrachten. Die abiotischen und biotischen Faktoren beeinflussen sich nämlich auf mannigfaltige Weise, was zu verschiedenen Formen von Wechselwirkungen führt. Ob der Kom-

plexität der in einem Fliessgewässer sich abspielenden Interaktionen könnte man versucht sein, angesichts der Einfachheit seiner Formulierung die Repräsentativität des HMID in Frage zu stellen.

Aus diesem Grund wurden die im Feld erhobenen Variablen unter Anwendung der Software R (R Development Core Team, 2009) umfangreichen statistischen Auswertungen unterzogen, um Korrelationen zu erkennen und die Verwendung von lediglich zwei Variablen zur Charakterisierung der Strukturvielfalt rechtfertigen zu können.

Folgende Fragen standen dabei im Vordergrund:

- Wie hängen die hydraulischen mit

den geomorphischen Grössen (geomorphische Variabilität in Längs- und Querrichtung, Regimebreite, Breite bei bordvollem Abfluss, Substrateigenschaften, usw.) und vor allem deren Variabilität zusammen?

- Welche Korrelationen bzw. Interdependenzen bestehen innerhalb der hydraulischen Grössen?

Als Beispiel für diese Analysen sei der Zusammenhang zwischen den Substrateigenschaften und der Fliessgeschwindigkeit dargestellt. Die Korngrössenverteilung der Deckschicht hängt statistisch signifikant mit dem Verbauungsgrad eines Abschnittes zusammen (Bild 6, links), während unter Heranziehen der Variationskoeffizienten eine eindeutige Korrelation zwischen der Fliessgeschwindigkeits- und der Substratvariabilität (Bild 6, rechts) zu erkennen ist. Die Vielfalt in der Fliessgeschwindigkeit repräsentiert somit auch die Vielfalt der für die aquatischen Lebewesen und deren Lebenszyklen wichtigen Sohlsubstrate. Bild 7 fasst die Ergebnisse der durchgeführten Analysen zusammen. Die hydraulischen Grössen Fliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe sind imstande, die Strukturvielfalt eines Abschnittes ausreichend zu charakterisieren, da sie aufgrund der inneren Zusammenhänge wichtige geomorphische Grössen und andere komplexe hydraulische Variablen, die auch oft für die Charakterisierung aquatischer Habitate Anwendung finden, repräsentieren.

3.2.5 Zeitliche Variabilität

Mittels numerischer 2d-Modellierung wurde die zeitliche Variabilität der hydraulischen Grössen untersucht. Wenn man ein Querprofil eines natürlichen Abschnittes einem Querprofil eines verbauten Abschnittes gegenüberstellt, lässt sich feststellen, dass bei gleicher Zunahme des Abflusses Fliessgeschwindigkeit und -tiefe in einem verbauten Abschnitt aufgrund der behinderten Seitenausdehnung ungleich schneller ansteigen als in einem natürlichen Abschnitt (Bild 8). Dies hat zur Folge, dass in natürlichen Abschnitten an jeder einzelnen Stelle im Fliessgewässer eine grössere zeitliche Konstanz der hydraulischen Variablen vorhanden ist.

In einem Fliessgewässer mit natürlicher Morphologie finden die aquatischen Lebewesen also zwar eine grosse räumliche Vielfalt der Habitate vor, diese bleiben aber über einen längeren Zeitraum hinweg erhalten. Erst bei grösseren, bettbildenden Hochwasserabflüssen verlieren die Habitate ihre Stabilität. Es ist aber zu be-

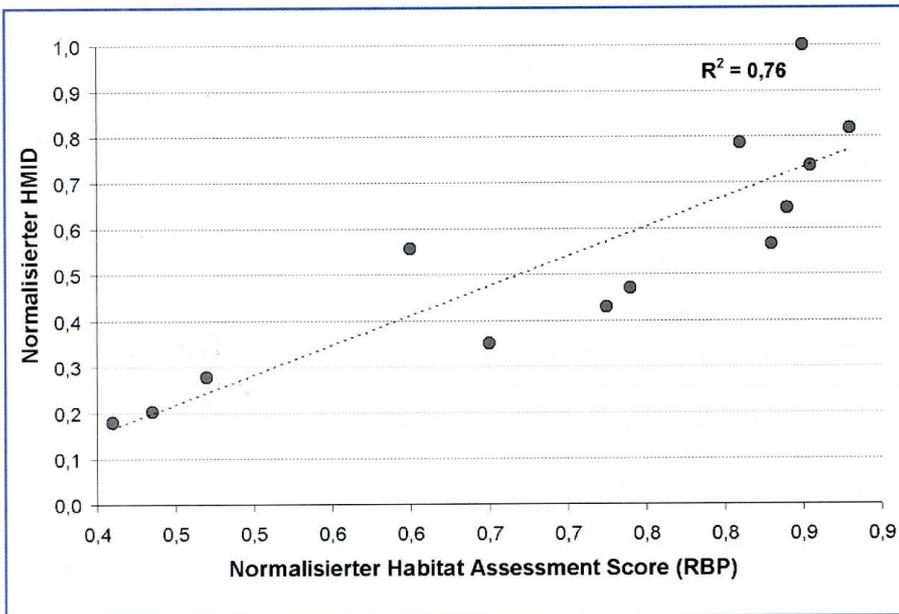


Bild 5. Gegenüberstellung des HMID mit einem multimetrischen, visuell bestimmten Habitatsindex.

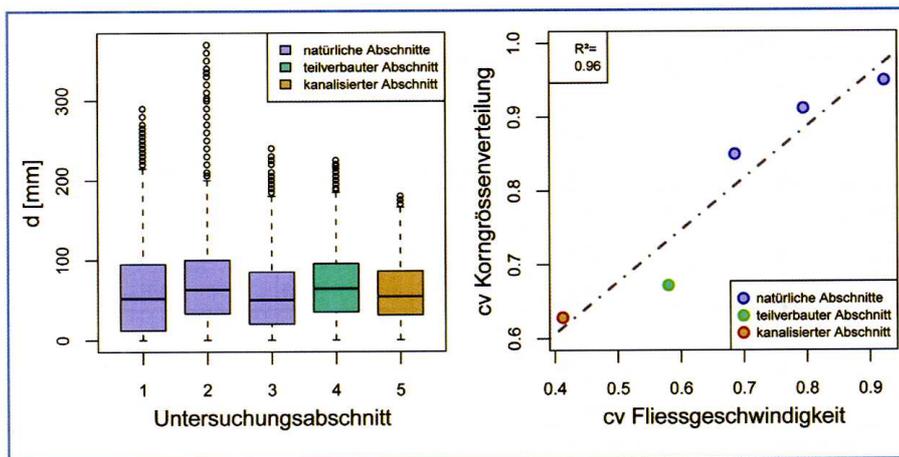


Bild 6. Links: Boxplots der Korngrössenverteilung des Sohlsubstrates in den fünf Untersuchungsabschnitten an der Sense. Ein Kruskal-Wallis Test (McDonald, 2009), die nicht parametrische Version einer ANOVA, zeigte signifikante Effekte ($p < 2,2e-16$), die durch einen post hoc paarweise durchgeführten Mann Whitney Test bestätigt wurden (p durchwegs $< 0,0272$), mit Ausnahme zwischen Abschnitt 1 und 3 ($p = 0,96$). Rechts: Zusammenhang zwischen dem Variationskoeffizienten der Korngrössenverteilung und der mittleren Fliessgeschwindigkeit in den fünf Untersuchungsabschnitten der Sense.

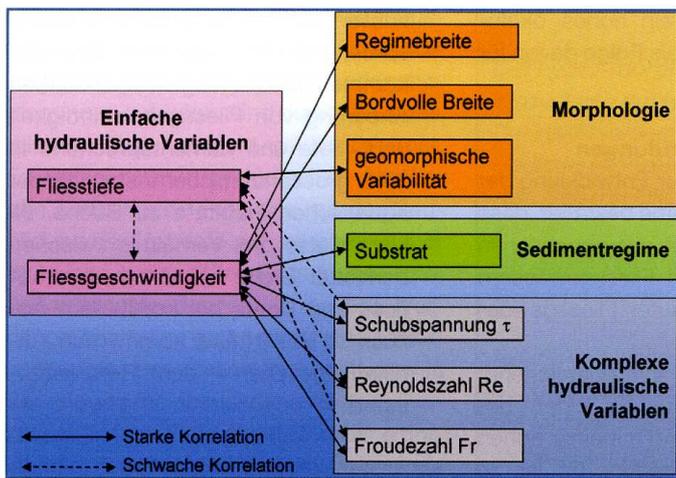


Bild 7. Interdependenzen zwischen morphologischen und hydraulischen Größen.

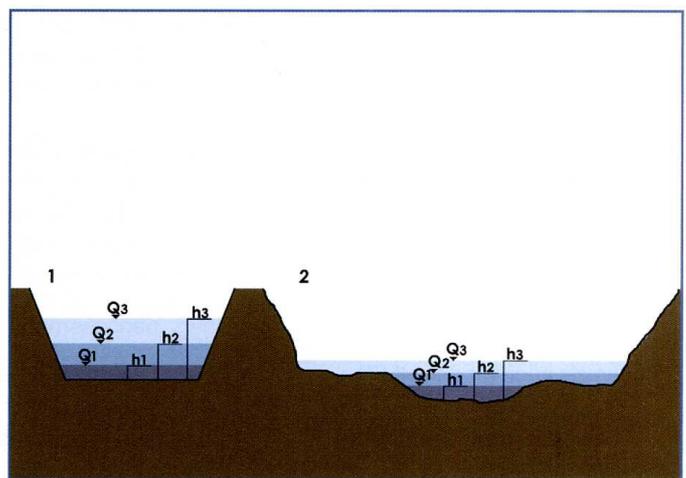


Bild 8. Änderung der Fliesstiefe bei gleicher Zunahme des Abflusses in einem verbauten (links) und in einem natürlichen (rechts) Abschnitt.

obachten, dass in Fließgewässern natürlicher Morphologie der prozentuelle Anteil eines Habitats am Gesamthabitatangebot immer ähnlich bleibt, bei bettbildenden Prozessen finden lediglich räumliche Umlagerungen mit Neubildung der Habitate statt (s. auch Arscott et al., 2002).

In einem künstlichen Fließgewässer hingegen sind die aquatischen Lebewesen einem grösseren Stress ausgesetzt. Sich ändernde Abflüsse bedeuten immer auch eine Änderung der hydraulischen Randbedingungen und somit der Habitate. Deshalb haben sich Lebewesen in einem künstlichen Fließgewässer nicht nur mit einem verarmten Lebensraum auseinandersetzen, sondern auch mit sich ständig wandelnden Lebensbedingungen.

In Bild 9 sind die Zeitreihen für den HMID am Beispiel der Sense dargestellt. Es lassen sich mehrere Beobachtungen anstellen:

- In natürlichen Abschnitten (Abschnitt 1 bis Abschnitt 3) bleibt der HMID für den gesamten Jahresverlauf annähernd konstant. Erst bei einem Abfluss mit einer Überschreitungsdauer von ein bis zwei Tagen, also bei einem Abfluss, der mindestens einem Jahreshochwasser entspricht und an dem grössere bettbildende Prozesse stattfinden, fällt der HMID stark ab.
- Bereits eine leichte Verbauung (in Abschnitt 2 verläuft in einer Schlucht) führt dazu, dass die Strukturvielfalt geringer ist als in Fließgewässern im Referenzzustand (Abschnitt 1).
- In teilverbauten oder gänzlich kanalisierten Fließgewässerabschnitten

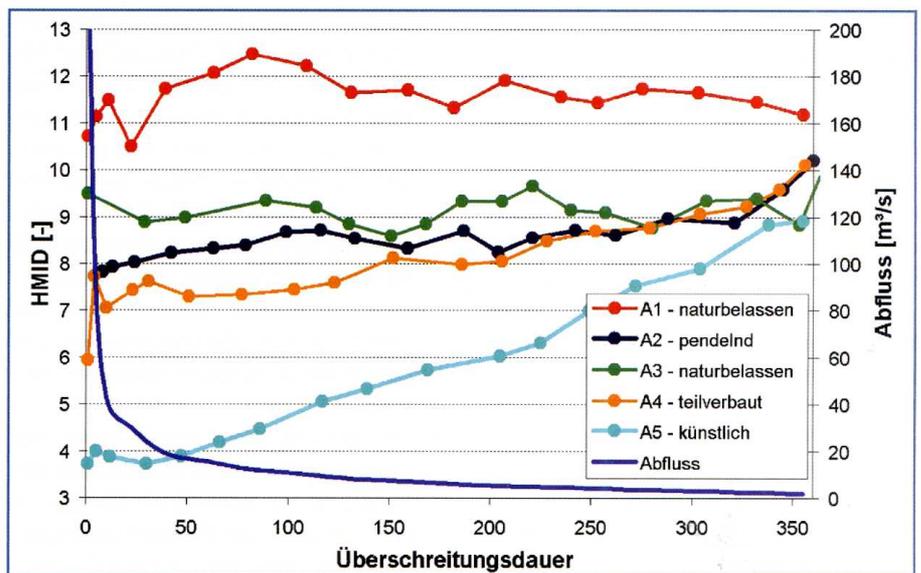


Bild 9. Zeitreihen für den HMID für verschiedene Verbauungsgrade am Beispiel der Sense.

Abschnitt		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Fließgeschwindigkeit	μ	0,50	0,86	0,55	0,82	0,98
	σ	0,20	0,28	0,18	0,35	0,50
	c_v	0,40	0,33	0,32	0,43	0,51
Fliesstiefe	μ	0,16	0,31	0,19	0,42	0,35
	σ	0,05	0,13	0,08	0,19	0,24
	c_v	0,33	0,41	0,41	0,45	0,68
HMID	μ	11,55	8,45	9,16	7,97	5,80
	σ	0,48	0,45	0,34	0,89	1,79
	c_v	0,04	0,05	0,04	0,11	0,31

Tabelle 3. Zeitreihenvariabilität der Fließgeschwindigkeit und -tiefe sowie des HMID für verschiedene Verbauungsgrade am Beispiel der Sense.

ten nimmt der HMID kontinuierlich mit steigendem Abfluss ab. Diese Tendenz verstärkt sich mit dem Verbauungsgrad des Abschnittes: man kann beobachten, dass beim teilverbauten Abschnitt 4 die Neigung der HMID-Linie

geringer ist als beim kanalisierten Abschnitt 5.

- Bei kleineren Abflüssen (in der Graphik im rechten Bereich) nähern sich die Werte für den HMID einander an, während bei Mittelwasserabflüssen

der HMID jene Werte annimmt, welche die Strukturvielfalt des Fliessgewässerabschnittes am besten zu charakterisieren vermögen.

Zieht man nun wiederum den Variationskoeffizienten heran, um auch die Variabilität der Zeitreihen zu analysieren, werden diese Feststellungen bestätigt (Tabelle 3). Je natürlicher der Abschnitt, desto geringer ist die zeitliche Variabilität sowohl für die separat gesehenen hydraulischen Grössen als auch für den HMID.

4. Anwendung des HMID

4.1 Vorgehensweise

Der HMID soll vor allem dazu dienen, dem Wasserbauer ein Instrument für die Optimierung von Hochwasserschutzprojekten in strukturell-morphologischer Hinsicht in die Hand zu geben.

Da bei einem Hochwasserschutzprojekt die Durchführung von 2d-Modellierungen zur Untersuchung des Hochwasserungsverhaltens für verschiedene Varianten heutzutage Standard ist, bedeutet die Berechnung des HMID keinen wesentlichen Mehraufwand.

Für einzelne zur Diskussion stehende Projektvarianten wird der HMID nun folgendermassen ermittelt:

- Durchführung einer numerischen 2D-Modellierung für den Mittelwasserabfluss. Als Eingabedaten für die Modellierung dienen das digitale Höhenmodell (inklusive Rauheitsbeiwerte) der einzelnen Varianten und der Mittelwasserabfluss, der entweder zu berechnen ist oder aus einer für den betroffenen Fliessgewässerabschnitt vorliegenden Abflussdauerkurve abgelesen werden kann;
- Auslesen der Fliessgeschwindigkeiten und -tiefen in den einzelnen Zellen des Gitternetzes des 2d-Modells für den Mittelwasserabfluss, wobei bei stark unterschiedlichen Zellengrössen eine Gewichtung der Werte über die Fläche empfehlenswert ist;
- Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen und Berechnung des HMID gemäss Formel in Kapitel 3.2.2.

Durch die Anwendung des HMID eröffnet sich die Möglichkeit, Hochwasserschutzprojekte hinsichtlich der Verbesserung der Strukturvielfalt zu optimieren. Je höher der HMID, desto höher ist die Vielfalt der aquatischen Habitats, die im Projektabschnitt geschaffen werden. Durch die Erlangung eines hohen Strukturreichtums schafft man günstige morphologisch-strukturelle

Voraussetzungen für ein hohes ökologisches Potenzial und als Folge davon für eine hohe Biodiversität.

4.2 Weitere Überprüfungen

Die Untersuchungen zur Entwicklung der HMID haben die Annahme bestätigt, dass die zeitliche Variabilität der aquatischen Habitats in natürlichen Fliessgewässern niedriger ist als in verbauten Fliessgewässern.

Deshalb ist es nicht ausreichend, ein Fliessgewässer nur für einen bestimmten Projektzustand mit einer hohen Strukturvielfalt auszustatten. Es ist zu überprüfen, ob die zeitliche Stabilität der Strukturvielfalt gewährleistet bleibt.

Dazu stehen zwei Möglichkeiten, die sich ergänzen können, zur Auswahl:

- Überprüfung des HMID für mehrere Abflüsse. Der HMID soll auch für Abflüsse, die höher oder niedriger als der Mittelwasserabfluss sind, einen ähnlichen Wert wie für den Mittelwasserabfluss aufweisen. Diese Überprüfung kann die zeitliche Stabilität der Habitats bestätigen. Eine Ausnahme bilden Abflüsse mit starken Geschiebeumlagerungen. Bei diesen nimmt der HMID auch in Fliessgewässern, die dem Referenzzustand nahe kommen, stark ab.
- Überprüfung des Verhältnisses der benetzten Breite bei Mittelwasserabfluss und bei bordvollem Abfluss. In ihrem natürlichen Zustand beanspruchen Fliessgewässer grosse Flächen. Innerhalb des so genannten parafluvialen Bereiches (Lorang & Hauer, 2006) entwickelt sich die volle Dynamik mit Erosions- und Auflandungsprozessen, der Laufverlagerung und der darauffolgenden Neubildung der Habitats bei Geschiebeumlagernden Prozessen. Die von kiesführenden, verzweigten Alpenflüssen in ihrem Referenzzustand beanspruchte Breite liegt um ein Vielfaches höher als die bei verbauten Flüssen noch vorhandene Breite. An der Sense zum Beispiel weist die aktive Flusssohle am natürlichen Abschnitt 1 eine Breite von ca. 150 m auf. Bei Hochwasser wird die gesamte Breite beansprucht, während bei Mittel- und Niederwasser lediglich ca. 20% der Fläche des parafluvialen Bereiches benetzt sind (Gostner et al., 2010). Im kanalisiertem Abschnitt 5 hingegen beträgt die Breite bei bordvollem Abfluss ca. 30 m. Die benetzte Breite bleibt für alle Abflüsse annähernd konstant. Bei steigenden Ab-

flüssen kann es kaum zu einer Beanspruchung nicht benetzter Bereiche kommen. Dies schlägt in einer starken Änderung von Fliessgeschwindigkeit und -tiefe und dementsprechend in einer grossen zeitlichen Instabilität der aquatischen Habitats zu Buche. Je kleiner also das Verhältnis zwischen benetzter Breite bei Mittelwasserabfluss und Breite bei bordvollem Abfluss ist, desto näher kommt man – indikativ gesehen – dem Referenzzustand.

4.3 Einschränkungen

Es besteht kein Zweifel darüber, dass die hydromorphologische Strukturvielfalt eine notwendige Bedingung für eine reiche Biodiversität am Fliessgewässer darstellt. Dass die Erfüllung dieser Bedingung aber nicht immer hinreichend ist, bringen unterschiedliche Untersuchungen klar zum Ausdruck (Gostner & Schleiss, 2010, Alp et al., 2011).

Damit eine strukturmorphologische Gewässersanierung nicht zum Selbstzweck verkommt bzw. einen rein ästhetischen Wert erhält, ist es notwendig, den Fokus nicht nur auf lokale Defizite zu beziehen, sondern auch ausserhalb des Projektperimeters liegende Prozesse mit einzubeziehen (Rau & Peter, 2011).

In erster Linie ist bei Projekten im Flussbau ein Leitbild mit klar definierten Zielen zu erarbeiten und dementsprechend die Frage zu beantworten, ob die strukturell-morphologischen Eigenschaften tatsächlich eine relevante Hürde auf dem Weg zu diesem Leitbild darstellen. Sind nämlich andere Elemente massgebend für eine verarmte Biodiversität (z.B. Nährstoff- und Sedimenteinträge durch intensive landwirtschaftliche Nutzung bis an den Gewässerrand, chemische Belastung des Fliessgewässers, Fragmentierung des betroffenen Fliessgewässers, durch Wassernutzungen verändertes Abflussregime, usw.) und wird dieser Frage nicht auf den Grund gegangen, können Massnahmen zur Verbesserung der Strukturvielfalt eventuell ohne positive Effekte bleiben und damit den erwarteten Erfolg des Projektes nicht erreichen.

Ein Kernthema in diesem Zusammenhang bildet die Vernetzung des Fliessgewässers und seiner Umgebung. Die longitudinale, laterale und vertikale Vernetzung sind grundlegende Voraussetzung dafür, dass mit der Verbesserung der Strukturvielfalt eine höhere Biodiversität einhergeht.

Auch ist das Wechselspiel zwi-

schen Morphologie und Geschiebehaushalt zu beleuchten. Fliessgewässer, die langfristig positive strukturelle Lebensbedingungen anbieten, sind durch ein dynamisches Gleichgewicht gekennzeichnet. Es treten zwar in periodischen Abständen bettbildende Prozesse mit der Neubildung der Habitate auf, es kommt aber zu keinen irreversiblen Eintiefungs- bzw. Auflandungstendenzen. Um diese Vorgänge beurteilen zu können, sind Untersuchungen des Geschiebehaushaltes in Verbindung mit abflussdynamischen Prozessen auf der Einzugsgebietsebene notwendig. Zum Beispiel kann eine mangelnde Geschiebezufuhr aus dem Oberlauf in Verbindung mit anthropogen veränderten und häufiger auftretenden Hochwasserspitzen dazu führen, dass die Verbesserung oder Wiederherstellung der Strukturvielfalt nur kurzfristig wirksam ist, da sich der Hauptarm durch die Aufnahme von Geschiebe aus der Sohle eintieft und sich auf lange Sicht wiederum ein Gewässer mit Verödungsflächen und einem verarmten Lebensraumangebot bildet. Deshalb ist bei Hochwasserschutzprojekten nicht nur eine Verbesserung der Strukturvielfalt notwendig. Die Erreichung eines ausgeglichenen Geschiebehaushalts kann nicht nur die Dauerhaftigkeit der Schutzmassnahmen gewährleisten, sondern auch dafür sorgen, dass die Ökosystemleistungen des Fliessgewässers von Dauer sind.

5. Zusammenfassung

Fliessgewässer sind komplexe Systeme. Mit dem HMID steht dem Wasserbauer ein Werkzeug zur Verfügung, einzelne Projektvarianten im Hinblick auf die Verbesserung der Strukturvielfalt vergleichen und bewerten zu können.

Der Formel zur Berechnung des HMID enthält die hydraulischen Variablen Fliessgeschwindigkeit und -tiefe. Diese können gewissermassen als repräsentativ für die Strukturvielfalt eines Fliessgewässers angesehen werden, da sie aufgrund der vorhandenen Wechselwirkungen stark mit anderen hydraulischen und morphologischen Variablen korrelieren.

Bei einem vorhandenen 2d-Modell, was heutzutage bei der Ausarbeitung von Hochwasserschutzprojekten zum Standard gehört, kann der HMID mit wenig Zusatzaufwand für die zur Diskussion stehenden Projektvarianten berechnet werden. Durch zusätzliche Überprüfungen (Berechnung des HMID für mehrere Abflüsse, Untersuchung der Regimebreite im Vergleich zur Breite bei bordvollem Abfluss) ist die zeitliche Stabilität der Habitate

Infobox

Der hydro-morphologische Index der Diversität – Wichtigste Merkmale

Was ist neu am HMID?

Der HMID verwendet die statistischen Parameter von hydraulischen, die aquatischen Habitate kennzeichnenden Grössen. Im Gegensatz zu Bewertungsmethoden (wie zum Beispiel Ökomorphologie des Modul-Stufen-Konzepts), die auf teilweise subjektiven Einschätzungen des Betrachters im Feld aufbauen, basiert der HMID damit auf objektiven Kriterien.

Was sind die Vorteile des HMID?

Die Verwendung von numerischen, zweidimensionalen Abflussmodellen zur Beurteilung von wasserbaulichen Projekten im Hochwasserfall ist heutzutage Standard. Mit geringem Zusatzaufwand können diese Modelle dazu verwendet werden, auch die Mittelwasserabflüsse zu modellieren und aus den daraus resultierenden hydraulischen Kenngrössen den HMID zu berechnen.

Welche Lücke schliesst der HMID?

Der HMID hat die Fähigkeit zur Vorhersage. Durch Anwendung des HMID in wasserbaulichen Projekten können Projektvarianten im Hinblick auf die Verbesserung der Strukturvielfalt quantitativ verglichen werden. Der HMID soll also weder ein neues Instrument zur Beurteilung des IST-Zustandes eines Fliessgewässers noch zur Erfolgskontrolle nach der Durchführung von Projekten sein, sondern sich, in zeitlicher Abfolge gesehen, dazwischen einreihen.

und somit des Lebensraumes der aquatischen Flora und Fauna zu verifizieren. Natürliche Fliessgewässer befinden sich in einem dynamischen Gleichgewicht und sind durch eine hohe zeitliche Stabilität der Lebensräume charakterisiert. Deshalb ist dies auch bei Hochwasserschutzprojekten als Ziel anzustreben. Ist man imstande, ein Fliessgewässer mit einem hohen HMID auszustatten und gleichzeitig dessen zeitliche Stabilität bis zum Eintreten von Schwellenereignissen, d.h. von Ereignissen mit intensiven Geschiebeumlagerungsprozessen, zu gewährleisten, schafft man die für ein hohes ökologisches Potenzial notwendigen hydromorphologischen Voraussetzungen.

Ob ein Projekt schlussendlich erfolgreich im Hinblick auf die Verbesserung der Biodiversität ist, hängt damit zusammen, ob auch andere wichtige Faktoren (z.B. Nährstoff- und Sedimenteinträge, chemische Belastung, Fragmentierung, verändertes Abflussregime, usw.) auf der Einzugsgebietsebene richtig erkannt und analysiert werden und nicht einer oder mehrere dieser Faktoren einen Erfolg von vorneherein verhindern können.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. William K. Annable (University of Waterloo/Kanada) für die grosse fachliche und praktische Hilfe bei der Durchführung der Feldarbeiten, bei Prof. Piotr Parasiewicz (Rushing Rivers Institute, Massachusetts/USA) für wertvolle wissenschaftliche Unterstützung, bei Laura Vigne für die Datenerhebung und -analyse an der Venoge, bei Fabri Haldi für

die Durchführung der 2D-Modellierungen an der Sense und beim Team der Ingenieure Patscheider & Partner GmbH (Südtirol/Italien) für den unermüdlichen Einsatz bei den Feldarbeiten und der Ausarbeitung der Graphiken.

Das gegenständliche Projekt ist im Rahmen des Forschungsprojektes «Integrales Flussgebietsmanagement» ausgearbeitet worden. Den Kollegen der EAWAG, WSL und VAW, insbesondere Maria Alp und Patric Rousselot, sind wir Dank schuldig für die sehr wertvolle und konstruktive interdisziplinäre Zusammenarbeit. An das BAFU und die Autonome Provinz Bozen/Südtirol geht der Dank für die Finanzierung des Projektes.

Literatur

- Allan J.D., Castillo M.M. 2007. Stream Ecology. Structure and Function of Running Waters. Second Edition. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Alp, M., Karpati, Th., Werth, S., Gostner, W., Scheidegger, Ch., Peter, A. 2011. Erhaltung und Förderung der Biodiversität von Fliessgewässern. Wasser Energie Luft. Heft 3: 216–223
- Arcott, D. B., Tockner, K., Nat, D., van der Ward, J.V. 2002. Aquatic Habitat Dynamics along a Braid Alpine River Ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy). Ecosystems 5: 802–814.
- Barbour M.T., Gerritsen J., Snyder B.D., Stribling J.B. 1999. «Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish», Second Edition, EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water, Washington, D.C., 337 S.
- BAFU (Hrsg.) 2010. Strukturen der Fliessgewässer



ser in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. Umwelt Zustand Nr. 0926. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 S.

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft). 1998. Ökomorphologie Stufe F. Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 27, 51 S.

Gostner, W., Schleiss, A.J. 2010. «Der hydraulisch-morphologische Index der Diversität: Ein Indikator für die ökologische Funktionsfähigkeit von Fliessgewässern». Beiträge zum 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich, vol. 124, pp. 1–10.

Gostner, W., Schleiss, A. J., Annable, W. K., Paternolli, M. 2010 «Gravel bar inundation frequency: an indicator for the ecological potential of a river». Proceedings of the River Flow International Conference on Fluvial Hydraulics in Braunschweig, pp. 1485–1494.

Gostner, W., Alp, M., Schleiss, A.J., Robinson, C.T. 2011a. The hydro morphological index of diversity: a tool for river restoration planning. Eingereicht bei Hydrobiologia.

Gostner, W., Parasiewicz, P., Schleiss, A.J. 2011b. Spatial and temporal hydraulic variability

in an Alpine gravel bed river with changing morphological characteristics. In Einreichung bei Ecohydrology.

Häusler, Th. 2011. Bahn frei für die Flüsse. Wissenschaftssendung Kontext, ausgestrahlt am 14.09.2011 auf DRS2.

Jungwirth M., Haidvogel G., Moog O., Muhar S., Schmutz S. 2003. Angewandte Fischökologie an Fliessgewässern. Facultas Universitätsverlag, Wien, 547 S.

Lorang, M.S., Hauer, F.R. 2006. Fluvial Geomorphic Processes. Hauer F.R. and Lamberti G.A. (Eds.) *Methods in Stream Ecology*, 2nd edition Elsevier Academic Press, 877 pp.

McDonald, J.H. 2009. *Handbook of Biological Statistics*, 2nd ed. Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland.

Palmer, M.A., Hakenkamp, C.C., Nelson Baker, K. 1997. Ecological heterogeneity in streams: why variance matters. *Journal of the North American Benthological Society* 16: 189–202.

Pfaundler, M., Zappa, M. 2006. Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz Ein optimierter Datensatz im 500×500 m Raster. *Wasser Energie Luft*. Heft 4: 291–298.

Rau, Ch., Peter, A. 2011. Fliessgewässerrevitalisierungen – das grosse Potenzial kleiner Bäche. *Wasser Energie Luft*. Heft 1: 43–48.

R Development Core Team. 2009. R: A language

and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Schleiss, A.J. 2005. Flussbauliche Hochwasserschutzmassnahmen und Verbesserung der Gewässerökologie – Vorschlag eines hydraulisch – morphologischen Vielfältigkeitsindexes. *Wasser Energie Luft*. Heft 7/8: 195–199

Schneider, D.C. 1994. *Quantitative ecology: spatial and temporal ecology*. Academic Press: San Diego.

Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse bed material. *American Geophysical Union, Transactions*, 35: 951–956.

Woolsey, S., Weber, C., Gonser, T., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., Roulier, C., Schweizer, S., Tiegs, S., Tockner, K., Peter, A. 2005. *Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen*. Publikation des Rhone Thur Projektes. Eawag, WSL, LCH EPFL, VAW ETHZ, 112 S.

Anschrift der Verfasser
Walter Gostner, Anton Schleiss, Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale del Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne, secrétariat.lch@epfl.ch, <http://lch.epfl.ch>