Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 100 (2008)

Heft: 3

Artikel: Modul Hydrologie : Methode zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des Abflussregimes von Fliessgewässern

Autor: Pfaundler, Martin / Scheuner, Thomas / Dübendorfer, Christina

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939709

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Modul Hydrologie: Methode zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des Abflussregimes von Fliessgewässern

Martin Pfaundler, Thomas Scheuner, Christina Dübendorfer

Zusammenfassung

Das Modul Hydrologie-Abflussregime auf Stufe F (flächendeckend), kurz HYDMOD-F, stellt im Rahmen des Modul-Stufen-Konzepts die Methode zur Beschreibung der hydrologischen Verhältnisse einer Region dar. Es werden die wasserwirtschaftlichen Eingriffe erfasst und deren Auswirkungen auf das Abflussregime beurteilt. Es liefert als Ergebnis eine Aussage über den hydrologischen Zustand des Gewässersystems eines Einzugsgebietes mit den einzelnen Gewässerabschnitten als Bezugsobjekte. Beurteilt und klassiert wird der Natürlichkeitsgrad des Abflussregimes anhand von neun Bewertungsindikatoren, welche verschiedene Charakteristika aus den Bereichen Niederwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserregime abdecken.

Ein Entwurf der Methode sowie elektronische Hilfsmittel sind auf den Internetseiten des Modul-Stufen-Konzepts abrufbar: www.modul-stufen-konzept.ch > Hydrologie

Résumé

Le module «Hydrologie – régime d'écoulement» au niveau R (régional), abrégé au HYDMOD-R, représente la méthode mise au point dans le cadre du système modulaire gradué pour décrire les conditions hydrologiques d'une région en y relevant les atteintes liées à la gestion des eaux et en évaluant leurs effets sur le régime d'écoulement. Il donne comme résultat une indication de l'état hydrologique du réseau hydrographique d'un bassin versant en se référant aux différents tronçons de cours d'eau. Le degré de naturalité du régime d'écoulement est apprécié et classé à l'aide de neuf indicateurs d'évaluation couvrant diverses caractéristiques du régime d'étiage, du régime des débits moyens et du régime de crue.

La méthode provisoire ainsi que les programmes d'aide électroniques peuvent être téléchargés sur les sites internet du système-modulaire-gradué: www.systeme-modulaire-gradue.ch > Hydrologie

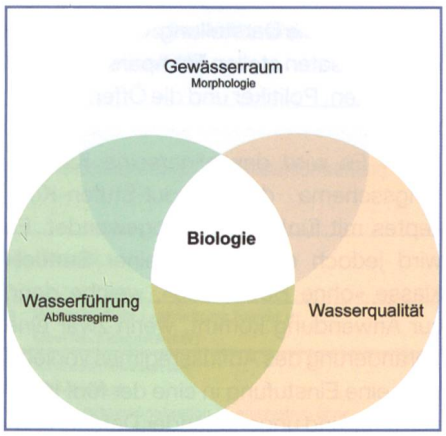

Bild 1. Gesamtheitliche Gewässerbeurteilung als Zusammenschau von abiotischen Einflussfaktoren und biotischen Merkmalen.

1. Einleitung

Der ökologische Zustand der Fliessgewässer wird von vielfältigen menschlichen Nutzungen beeinflusst. Ganz allgemein können diese den Einflussfaktoren Qualität des Wassers, Morphologie und Raumverhältnisse der Gewässer sowie Wasserführung zugeordnet werden. Entsprechend wurden im Leitbild Fliessgewässer (BUWAL und BWG, 2003) auf der Basis der geltenden Gesetzgebung die Entwicklungsziele «ausreichende Wasserqualität», «ausreichender Gewässerraum» und «ausreichende Wasserführung» formuliert. Diese drei abiotischen Einflussfaktoren bestimmen die Bedingungen für die biologischen Verhältnisse. Abiotische Faktoren und biologische Merkmale ergeben ein umfassendes Bild des ökologischen Gewässerzustandes (vgl. *Bild 1*). Das Modul-Stufen-Konzept (BUWAL, 1998) hat schweizweit standardisierte Methoden zur Zustandsbewertung der Fliessgewässer zum Ziel. Neben den bestehenden Modulen, welche die Bereiche Biologie, Morphologie und Chemie abdecken, fehlte für ein umfassendes Bild des Gewässerzustandes bislang ein Modul, welches die Wasserführung resp. die Hydrologie beinhaltet.

Während die stoffliche Belastung durch Abwasser und diffuse Einträge in den letzten Jahrzehnten dank grossen Anstrengungen im Gewässerschutz deutlich reduziert werden konnte, ist die Morphologie vieler Schweizer Fliessgewässer nach wie vor stark beeinträchtigt. Zudem wird die Wasserführung zukünftig durch die aus der Klima- und Energiepolitik resultierende Förderung der Wasserkraft weiter zunehmendem Druck ausgesetzt.

Das Modul Hydrologie-Abflussregime auf Stufe F (kurz HYDMOD-F) wurde daher als Vollzugshilfe für die in der Gewässerschutzgesetzgebung festgelegte Zielsetzung nach naturnahen Verhältnissen des Abflussregimes und zur Beurteilung des im Leitbild Fliessgewässer formulierten Entwicklungszieles «ausreichende Wasserführung» ausgelegt.

Als Zielpublikum wendet sich HYDMOD-F an die betroffenen kantonalen Fachstellen, insbesondere an jene des Gewässerschutzes und der Wassernutzung. Als Anwender der Methode kommen auch spezialisierte Ingenieur- und Gutachterbüros sowie Anlagebetreiber in Frage.

In diesem Artikel möchten wir die Grundzüge und Elemente von HYDMOD-F vorstellen, welche als Entwurf (Pfaundler et al. 2007) auf den Internetseiten des Modul-Stufen-Konzepts (www.modul-stufen-konzept.ch >Hydrologie) veröffentlicht sind.

2. Ausgangslage und Grundsätze

Das Modul-Stufen-Konzept unterscheidet drei Stufen des Bearbeitungsaufwandes. Die drei Stufen F (flächendeckend), S (systembezogen) und A (abschnittsbezogen) beziehen sich auf unterschiedliche räumliche Massstäbe des Untersuchungs-

raums. HYDMOD-F ist für die Stufe F ausgelegt und erfüllt deshalb folgende Anforderungen:

- Flächendeckende Untersuchung aller Fliessgewässer eines grösseren Gebietes (Kanton, Region) ist möglich.
- Untersuchungstiefe und Aufwand pro untersuchten Gewässerabschnitt sind relativ gering.
- Ziel ist ein Überblick über wichtige Aspekte des Zustandes der Gewässer bzw. deren Beeinträchtigungen, abschnittsweise Beurteilung und kartografische Darstellung.
- Adressaten stellen Fachpersonen, Behörden, Politiker und die Öffentlichkeit dar.

Es wird das allgemeine Klassierungsschema des Modul-Stufen-Konzeptes mit fünf Klassen angewendet. Es wird jedoch ergänzt mit einer Sonderklasse «ohne Bewertung», welche dann zur Anwendung kommt, wenn zwar eine Veränderung des Abflussregimes vorliegt, aber eine Einstufung in eine der fünf Klassen aufgrund ungenügender Datengrundlage nicht möglich ist (siehe *Bild 2*).

HYDMOD-F stellt im Rahmen des Modul-Stufen-Konzepts die Methode zur Beurteilung der hydrologischen Verhältnisse einer Region mit der Erfassung der wasserwirtschaftlichen Eingriffe und deren Auswirkungen auf das Abflussregime dar. Es bewertet die Naturnähe des Abflussregimes anhand von Bewertungsindikatoren, welche verschiedene Charakteristika aus den Bereichen Niederwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserregime abdecken. Darunter wird nicht nur eine angemessene Restwassermenge verstanden, sondern weit allgemeiner ein naturnahes Abflussregime einschliesslich der indirekten Auswirkungen auf die Dynamik des Geschiebehaushaltes.

Mit dem Modul HYDMOD-F alleine kann nicht der ökologische Zustand eines Gewässers als solcher bewertet werden. Wie einleitend aufgezeigt, sind dazu auch die Einflussfaktoren Wasserqualität und Morphologie zu beachten. HYDMOD-F kann daher mit der Bewertung des Natürlichkeitsgrads des Abflussregimes nur eine Aussage liefern, wie stark ein Fliessgewässer aus rein hydrologischer Sicht in seiner ökologischen Funktionsfähigkeit gefährdet ist.

HYDMOD-F ist als eingriffsbezogener Ansatz konzipiert. Die Ursachen erheblicher hydrologischer Beeinträchtigungen über die lokale Skala hinaus sind meist punktuelle und direkte wasserwirtschaftliche Eingriffe. Dies hat den Vorteil, dass die Erhebungen gezielt auf die Eingriffe und die davon betroffenen Gewässerabschnitte fokussieren können. Grossteils stammen die Eingriffe aus den Bereichen Wasserkraftnutzung und Siedlungswasserwirtschaft.

Diffuse, indirekte Eingriffe (z.B. Landnutzungsänderungen, Drainagen, usw.) werden nicht berücksichtigt, da sie schwierig zu identifizieren und beurteilen sind. Ebenso werden kleine Eingriffe nicht berücksichtigt, da ihre Wirkung häufig nicht oder nur schwierig quantifizierbar ist. Aus diesen Gründen wird der Aufwand für die Berücksichtigung diffuser sowie kleiner, direkter Eingriffe für eine Methode der Stufe F als unverhältnismässig erachtet. Wegen des Verzichts auf die Berücksichtigung kleiner sowie diffuser Eingriffe wird die Anwendung für Einzugsgebiete meso- (1–1000 km^2) und makroskaliger (>1000 km^2) Grössenordnung empfohlen.

3. Bewertungsindikatoren des Abflussregimes

Unter dem Begriff Abflussregime wird das Abflussverhalten eines Fliessgewässers verstanden. Es wird hauptsächlich durch die Milieufaktoren Klima, Relief, Vegetation und durch den hydrogeologischen Aufbau eines Gebietes gesteuert, wobei das Klima den wichtigsten Einflussfaktor darstellt. Das Abflussregime zeigt sich im Verlauf und der Ausprägung der Abflussganglinien. Aus der Ganglinie lassen sich verschiedene Kenngrössen ableiten, welche die hydrologischen Merkmale eines Gewässers charakterisieren:

- Grösse
- Häufigkeit
- Dauer
- Zeitpunkt (Saisonalität)
- Variabilität (Streuung der Merkmale von Jahr zu Jahr)
- Veränderungsrate

Das Abflussgeschehen lässt sich in drei Teilbereiche gliedern, namentlich das Mittelwasser- (MQ), das Hochwasser- (HQ) und das Niederwasserregime (NQ), deren charakteristische Merkmale eine unterschiedliche ökologische Bedeutung aufweisen und durch Eingriffe verändert werden können. Zusätzlich werden anthropogen verursachte Kurzzeiteffekte betrachtet. Die in HYDMOD-F verwendete Definition des Abflussregimes ist damit deutlich weiter gefasst als die Definition der Abflussregimetypen, welche für die Schweiz von Aschwanden und Weingartner (1985) aufgestellt wurden und Auskunft über den durchschnittlichen Jahresgang der mittleren monatlichen Abflüsse (Stichwort Pardé-Koeffizienten) geben. Diese Abflussregimetypen sind jedoch eine wichtige Grundlage für HYDMOD-F, indem sie bei fehlenden Daten für die Abschätzung des Referenzwertes beigezogen werden.

Die Auswahl der Bewertungsindikatoren, auf denen HYDMOD-F beruht, orientiert sich an verschiedenen Faktoren wie:

- der ökologischen Aussagekraft des Indikators,
- einer breiten Erfassung der Charakteristika des Abflussregimes,
- dem Erfassen der Auswirkungen von in der Schweiz verbreiteten wasserwirtschaftlichen Eingriffen,
- der Machbarkeit und der Aufwandbegrenzung der Auswertung.

Diese Erwägungen führten zu der

Klasse 1	blau	natürlich / naturnah
Klasse 2	grün	wenig verändert
Klasse 3	gelb	wesentlich verändert
Klasse 4	orange	stark verändert
Klasse 5	rot	naturfern
-	grau	ohne Bewertung

Bild 2. Klassierungsschema des Natürlichkeitsgrades des Abflussregimes mit Bezeichnung und Farbcodierung der Klassen.

Bereich	Bewertungsindikatoren	Benötigte hydrologische Kenngrössen
Mittelwasserregime	1 Mittelwasser-Abflussverlauf	Mittlerer jährlicher Abfluss Mittlere monatliche Abflüsse Pardékoeffizienten
Hochwasserregime	2 Hochwasserhäufigkeit 3 Hochwassersaisonalität	Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss Hochwasserschwellenwert Auftretensdatum und –variabiliät Jahreshochwasser
Niederwasserregime	4 Niederwasserabfluss 5 Niederwasser-Saisonalität 6 Dauer Niederwasserperioden	Niederwasserabfluss Variationskoeffizient Niederwasserabfluss Mittlere Dauer der Niederwasserperiode Auftretensdatum und –variabiliät Jahresniederwasser
Kurzzeiteffekte	7 Schwall-Sunk-Phänomen 8 Spülung und Entleerung 9 Regenwassereinleitungen	Schwallabfluss, Schwall-Sunk-Verhältnis Maximaler Spülabfluss Häufigkeit der Spülungen Spitzenabfluss von Einleitungen Mittlere Hochwasserhäufigkeit aus Einleitungen

Tabelle 1. Die vier Teilbereiche des Abflussregimes mit den dazugehörenden Bewertungsindikatoren sowie den benötigten hydrologischen Kenngrössen.

in *Tabelle 1* aufgelisteten Auswahl an Bewertungsindikatoren. Sie decken alle der aufgeführten Teilbereiche des Abflussregimes ab. In die Berechnung der Bewertungsindikatoren fliessen diverse hydrologische Kenngrössen sowie einige Hilfsgrössen ein.

Die Bewertungsindikatoren berücksichtigen bei ihrer Berechnung sowohl den beeinflussten Zustand wie auch den Referenzzustand, also den natürlichen, unbeeinflussten Zustand, und seine natürliche Variabilität.

Weiter spielt es eine Rolle, ob sich der veränderte Zustand einer hydrologischen Kenngrösse in der Nähe des natürlichen Erwartungswertes (Mittelwert), innerhalb der natürlich vorkommenden Streuung (natürliche Variabilität) oder ausserhalb davon bewegt. Diese relative Lage des veränderten Abflussregimes im Verhältnis zu Lage und Streubereich des Referenzzustandes bildet die Basis für die Einteilung in die Zustandsklassen.

Das Grundprinzip der Bewertung ist in *Bild 3* schematisch illustriert. Die Bewertung von Beispiel 1 fällt besser aus als von Beispiel 2, trotz der gleichen absoluten Lage des Erwartungswerts im beeinflussten Zustand. Ausschlaggebend ist dessen Abweichung vom Erwartungswert des Referenzzustands im Vergleich zum Bereich der natürlichen Variabilität. Die natürliche Variabilität wird je nach Charakteristik des Bewertungsindikators und in Abhängigkeit des Vorliegens etablierter ökologischer Kriterien direkt in der Definition des Indikators oder in der Klassierungsregel berücksichtigt.

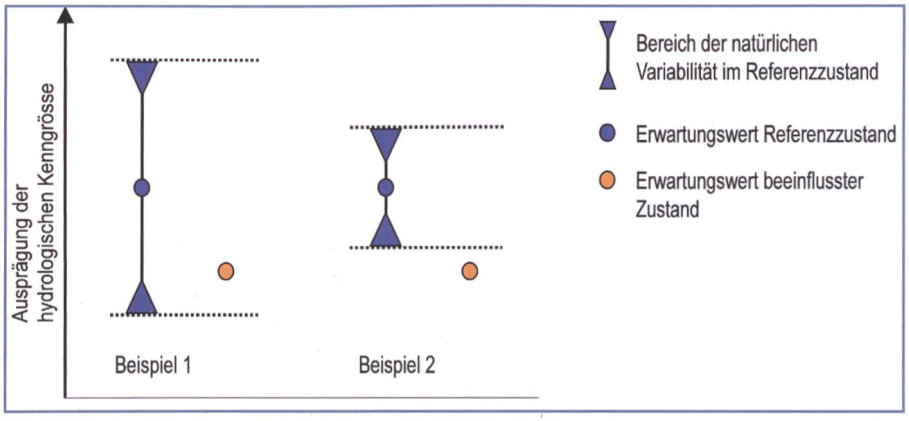

Bild 3. Grundprinzip der Bewertung: Gegenüberstellung des beeinflussten zum Referenzzustand unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität.

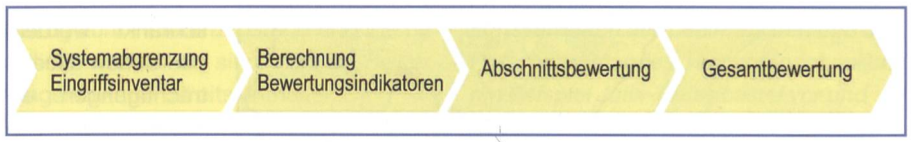

Bild 4. Hauptarbeitsschritte der HYDMOD-F-Methodik.

A) Wasserentnahme (aus Oberflächengewässer)	**B) Wasserzufuhr / -einleitung (direkt in Oberflächengewässer)**
A1 Ab-/Über-/Umleitung zur Wasserkraftnutzung A2 Trinkwasser-/Brauchwasserentnahme (kommunale, industrielle Nutzung) A3 Kühlwasserausleitung A4 Beschneiungsanlage A5 Landwirtschaftliche Bewässerung A6 Für fischereiwirtschaftliche Zwecke	B1 Strassenentwässerung B2 ARA-Auslauf B3 Regenwasserkanalisation (Trennsystem ohne Regenrückhaltebecken) B4 Regenüberlaufbecken (Misch-/Trennsystem) B5 Kühlwassereinleitung B6 Überleitung aus anderen Einzugsgebieten B7 Schwallbetrieb bei Wasserkraftwerken B8 Rückgabe turbiniertes Wasser (Triebwasser) aus Wasserkraftwerken (aber nicht Typ B7)
C) Wasserspeicherung und Regulierung (Änderung des zeitlichen Ablaufes)	**D) Grundwasserbezogene Massnahmen**
C1 Speicherseen für die Wasserkraft (Tages-/Wochen-/Jahresspeicher) C2 Mehrzweck- und andere Speicherseen (Bewässerung, Erholung, Beschneiung, etc.) C3 Ausflussregelungen von natürlichen Seen (Seeausflussregulierungen) C4 Hochwasser-Rückhaltebecken	D1 Entnahmen aus Quellen D2 Entnahmen von gepumpten Grundwasser D3 Grundwasser-Anreicherung **E) Spülungen und Entleerungen (Sedimentbewirtschaftung)** E1 Stauraumspülungen E2 Entsanderspülungen (Wasserfassungen, ARA, etc.)

Tabelle 2. Eingriffstypisierung.

4. Methodik

Die Anwendung der Bewertungsmethodik erfolgt in vier Hauptarbeitsschritten wie in *Bild 4* dargestellt.

4.1 Systemabgrenzung und Eingriffsinventar

Ausgangspunkt ist die Festlegung des Untersuchungsraumes. Dieser sollte sich idealerweise auf ein hydrologisch definiertes Einzugsgebiet beziehen, welches sich auch über politisch-administrative Grenzen hinweg ziehen kann. Grund dafür ist, dass das Einzugsgebiet den Wirkungsraum von Eingriffen auf das Abflussregime darstellt. Die eigentliche räumliche Bezugseinheit für die Bewertung ist aber das Gewässernetz, aufgeteilt in einzelne Abschnitte.

Für das Erstellen des Eingriffsinventars werden in einem nächsten Schritt alle Eingriffe mit potenziellen Auswirkungen auf das Abflussregime identifiziert und erfasst. Im Rahmen von HYDMOD-F werden unter Eingriffen anthropogene Massnahmen baulicher oder betrieblicher Natur verstanden, welche Auswirkungen auf das Abflussregime haben. Die Mehrheit der Eingriffe sind Massnahmen aus den Bereichen Wasserkraftnutzung und Siedlungswasserwirtschaft. Aus diesen beiden Sektoren der Wasserwirtschaft resultieren in der Schweiz die grössten Veränderungen des Abflussregimes. HYDMOD-F schlägt gemäss *Tabelle 2* eine Typisierung der Eingriffe vor, welche sich an der Art und dem primären Zweck des Eingriffs orientiert. Die später folgenden Arbeitsschritte gehen von dieser Kategorisierung aus.

In einem weiteren Schritt werden die Erheblichkeit und Signifikanz der identifizierten Eingriffe geprüft. Für HYDMOD-F ist ein Eingriff erheblich, wenn er ein bestimmtes, festgelegtes Mindestmass überschreitet. Damit wird verhindert, dass für kleine, oft schlecht dokumentierte Eingriffe in den folgenden Arbeitsschritten grosser Aufwand betrieben werden muss. In einem nächsten Arbeitsschritt wird im Sinne einer Immissionsbetrachtung festgestellt, ob das Ausmass des Eingriffs im relativen Bezug zu den natürlichen hydrologischen Bedingungen am untersuchten Gewässer signifikant ist. Die Signifikanzkriterien sind so aufgebaut, dass sie eine Grösse, welche den Eingriff charakterisiert, mit einer hydrologischen Kenngrösse des natürlichen Abflussregimes am Ort des Eingriffs ins Verhältnis setzen. Wird das festgesetzte Signifikanzkriterium unterschritten, so wird angenommen, dass der Eingriff zu keiner signifikanten Beeinflussung des Abflussregimes führt und somit der Zustand des Abschnitts als natürlich oder naturnah eingestuft werden kann.

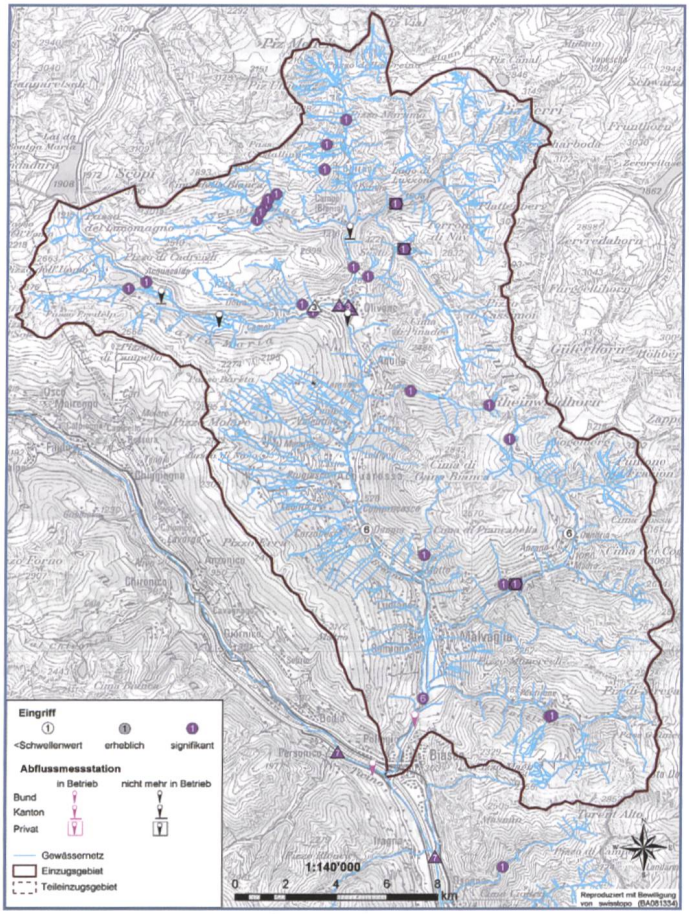

Bild 5 (links). Kartografische Darstellung des Eingriffsinventars, Fallbeispiel Bleniotal, Kanton Tessin.

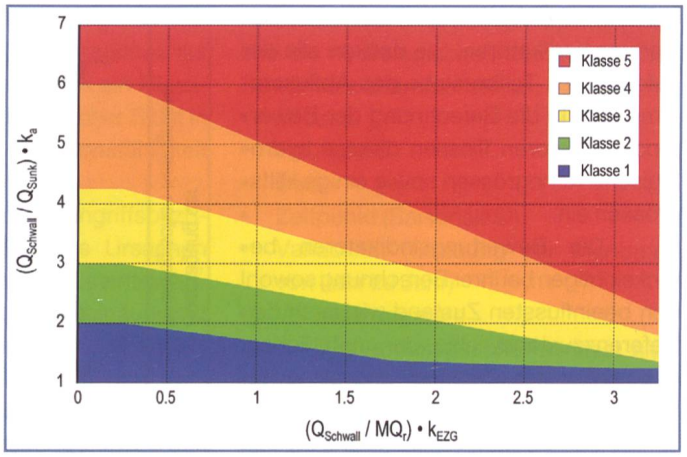

Bild 6. Klassierungsregel Schwall-Sunk-Phänomen.

Mit dieser Vorausscheidung wird der Aufwand der Methodenanwendung reduziert und stellt somit eine Konzession an die Anwendbarkeit der Methode dar.

In *Bild 5* ist ein Eingriffsinventar anhand des Fallbeispieles Bleniotal, Kanton Tessin, veranschaulicht, wie es als kartografische Darstellung mit dem Hilfsmittel HYDMOD-GIS (Symbolbaukasten, GIS-Applikation) resultiert. In diesem Beispiel überwiegen die Wasserentnahmen (symbolisiert durch Kreise) und im Speziellen der Eingriffstyp A1 Ab-/Über-/Umleitung zur Wasserkraftnutzung. Zudem sind praktisch alle Eingriffe signifikant (violett), nur vereinzelt liegen sie unter dem Erheblichkeits-Schwellenwert (weiss).

4.2 Berechnung Bewertungsindikatoren

Im zweiten Arbeitsschritt werden für jeden Eingriff die neun Bewertungsindikatoren angewendet und die zutreffende Zustandsklasse ermittelt. Je nach Eingriffsart müssen nicht alle neun Bewertungsindikatoren berechnet werden. Manche Eingriffe verändern nur einzelne Merkmale des Abflussregimes. Um den Aufwand bei der Anwendung von HYDMOD-F zu beschränken, kann deshalb die Bewertung auf die Auswertung derjenigen Indikatoren eingeschränkt werden, bei denen Beeinträchtigungen erwartet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Bewertung der übrigen Bewertungsindikatoren in der Zustandsklasse 1 «natürlich/naturnah» liegt. Indikative Angaben, welche Indikatoren für spezifische Eingriffstypen (der Eingriffstypologie von *Tabelle 2* folgend) zur Berechnung empfohlen werden, sind in der Methode beschrieben.

Nachfolgend werden zwei Bewertungsindikatoren näher vorgestellt. Dabei wird der Fokus auf die Herleitung und Definition, Berechnung sowie Klassifikation gelegt.

4.2.1 Schwall-Sunk-Phänomen

Von Schwall-Sunk wird bei regelmässigen Abflussschwankungen in kurzen Abständen mit raschem Abflussanstieg und -abfall gesprochen. Schwallgeprägte Abflussganglinien folgen meist einem ein- oder mehrfachen Tagesrhythmus und sind überwiegend auf den Betrieb bedarfsorientiert gefahrener Speicherkraftwerke zurückzuführen. Die ökologische Erheblichkeit des Schwall-Sunk-Phänomens liegt im durch den Schwallabfluss verursachten hydraulischen Stress (Stärke der Strömung, Trübung, Verdriftung, Feststofftransport usw.) sowie den ständig wechselnden Lebensraumbedingungen begründet. Eine Schwall-Sunk-Erscheinung kann als Impuls aufgefasst werden. Zur Beschreibung des Abflussimpulses können fünf Indikatoren verwendet werden:

- Amplitude: maximale Differenz Schwall- zu Sunkabfluss.
- Relatives Ausmass bzw. Intensität: Verhältnis Amplitude zu Sunkabfluss oder Verhältnis Schwall zu Sunk.
- Die Grösse des Schwallabflusses im Verhältnis zum Mittelwasserregime (MQ) oder zum mittleren jährlichen Hochwasserabfluss (Tagesabfluss bzw. MHQ), als Indiz für den hydraulischen Stress des Schwallabflusses.
- Zeitliche Schärfe: Rate bzw. Geschwindigkeit des Schwallanstieges und -rückganges.
- Häufigkeit der Impulse: Anzahl an Wechsel zwischen Schwall und Sunk.

Der letzte Punkt wird für die Bewertung nicht berücksichtigt, weil von einer Grundhäufigkeit von einem oder mehreren Impulsen pro Tag ausgegangen wird, welche zumindest über eine gewisse Jahreszeit hinweg regelmässig auftritt. Trifft dies nicht zu, so ist der Bewertungsindikator «Spülung und Entleerung» anzuwenden.

Der Bewertungsindikator Schwall-Sunk-Phänomen wird durch folgende zwei Grössen definiert:

- Das Verhältnis Schwallabfluss ($Q_{Schwall}$) zu Sunkabfluss (Q_{Sunk}) ergänzt mit einem Korrekturfaktor (k_a) für die Anstiegs- und Rückgangsrate des Pegelstandes während der Schwallereignisse als Indikator für die Intensität des Schwallimpulses.
- Das Verhältnis Schwallabfluss ($Q_{Schwall}$) zu mittlerem jährlichem Abfluss des Referenzzustands (MQ_r) ergänzt mit einem Korrekturfaktor (k_{EZG}) für die Einzugsgebietsgrösse als Masszahl für den hydraulischen Stress auf den Gewässerlebensraum.

Mit diesen beiden Indikatorwerten wird die Zustandsklasse grafisch aus dem Diagramm in *Bild 6* bestimmt. Für die Festlegung der Klassierungsregel fliessen folgende Feststellungen ein:

- Das «ökologisch kritische» Schwall-Sunk-Verhältnis liegt im Bereich von 3:1 bis 4:1 (BUWAL, 2003). Eine signifikante Belastung liegt ab einem Verhältnis von 5:1 vor (BMLF, 2004).
- Die Auswirkungen des Schwall-Sunk-Verhältnisses werden durch langsame Anstiegs- und Rückgangsraten abgemindert (→ Korrekturfaktor k_a).
- Das Verhältnis des natürlichen mittleren jährlichen Hochwasserabflusses MHQ (Tagesabflüsse) zu MQ liegt im Schweizer Mittel im Bereich 6–8. Je näher das Verhältnis Schwallabfluss zu MQ in diesen Wertebereich kommt, umso eher bewegt sich der Schwallabfluss in Richtung eines Hochwassers und verursacht damit den entsprechenden hydraulischen Stress bereits bei einem Einzelimpuls.
- In der Schweiz liegt das Verhältnis Schwallabfluss zu MQ meistens im Bereich 0.5–2. Dieser Bereich steht deshalb im Zentrum des Bewertungsschemas.
- Gewässer kleiner Einzugsgebiete sind gegenüber den Auswirkungen von Schwall-Sunk-Phänomenen in der Regel etwas weniger empfindlich, da sie im Vergleich zu grösseren Gewässern auch natürlicherweise eine grössere Schwankung der hydrologisch-hydraulischen Bedingungen aufweisen und die Biozönose sich besser darauf einstellen kann (→ Korrekturfaktor k_{EZG}).

4.2.2 Hochwasser-Saisonalität

Unter der Hochwasser-Saisonalität wird das zeitliche Auftreten des jährlich maximalen Tagesabflusses verstanden. Die Saisonalität wird durch die Parameter des mittleren Auftretensdatums (Erwartungswert) sowie der Variabilität des Auftretensdatums erfasst. Die Saisonalität eines Gewässers kann als Punkt in einem Saisonalitätsraum (vgl. *Bild 7*) eingezeichnet werden. Der Punkt repräsentiert die Spitze eines Vektors, dessen Winkel das mittlere Auftretensdatum ausdrückt und dessen Länge ein Mass für die Variabilität des Auftretensdatums ist, siehe auch Pfaundler und Wüthrich, 2006.

Die ökologische Bedeutung der Hochwasser-Saisonalität resp. ihrer Verschiebung hängt mit dem durch Hochwasserereignisse ausgelösten Geschiebetrieb zusammen. So wird z.B. der Forellennachwuchs beeinträchtigt, wenn sich die Hochwasser-Saison in die Reproduktions- und Brütlingsperiode verschiebt.

Der Bewertungsindikator beurteilt die Verschiebung im Saisonalitätsverhalten zwischen Referenz- und beeinflusstem Zustand. Die Verschiebung kann den zeitlichen Erwartungswert bei gleicher Variabilität, eine reine Änderung der Variabilität bei gleich gebliebenem mittlerem Auftretensdatum oder eine Veränderung von Erwartungswert und Variabilität betreffen.

Der eigentliche Bewertungsindikator ist eine dimensionslose Masszahl $Dist_{r,b}$ für die Distanz der beiden Saisonalitätspunkte im Referenz- und beeinflussten Zustand, welche die beiden Aspekte der Saisonalität, den Erwartungswert und die Variabilität, berücksichtigt (vgl. *Bild 7*, illustriert anhand eines Beispieles). Der Bezug zum Referenzzustand und die natürliche Variabilität sind also im Bewertungsindikator bereits enthalten.

Die Klassierungsregel (vgl. *Bild 8*) basiert auf der Grösse von $Dist_{r,b}$, welche theoretisch Werte zwischen 0 und 2 annehmen kann, da der Saisonalitätskreis einen Einheitskreis darstellt, d.h., den Radius 1 besitzt. Ist dabei die Referenz durch eine grosse zeitliche Variabilität charakterisiert und liegt somit im Bereich des Ursprungs des Saisonalitätskreises, so kann $Dist_{r,b}$ nur maximal Werte um 1 annehmen. Ist hingegen die Referenz durch eine ausgeprägte Saisonalität charakterisiert und weist somit eine Lage nahe am Einheitskreis auf, so sind auch Werte von $Dist_{r,b} > 1$ bis maximal 2 möglich.

4.3 Abschnittsbewertung

Nach der Berechnung der Bewertungsindikatoren liegt eine punktuelle Bewertung an den Eingriffsstellen vor. Diese punktuelle Information muss in einem nächsten Schritt auf das Gewässernetz umgelegt werden, welches dazu in Gewässerabschnitte (GA) mit vergleichbaren hydrologischen Bedingungen unterteilt wird. Für die Abgrenzung der GA wird beim ersten flussaufwärts gelegenen signifikanten Eingriff begonnen und in Fliessrichtung die Abschnittsausweisung unternommen. Die Auswirkungen der Eingriffe verändern sich flussabwärts mit dem Einfluss der Zuflüsse.

Für die Bewertung der flussabwärts von Eingriffen gelegenen Gewässerabschnitte wird ein gewichtetes Mittel aus den Bewertungsergebnissen der flussauf gelegenen signifikanten Eingriffe berücksichtigt, in das auch unbeeinflusste Teileinzugsgebiete einfliessen. Dabei wird den unbeeinflussten Teilflächen die Zustandsklasse 1 zugewiesen. Als Gewichte dienen die jeweiligen Einzugsgebietsflächen.

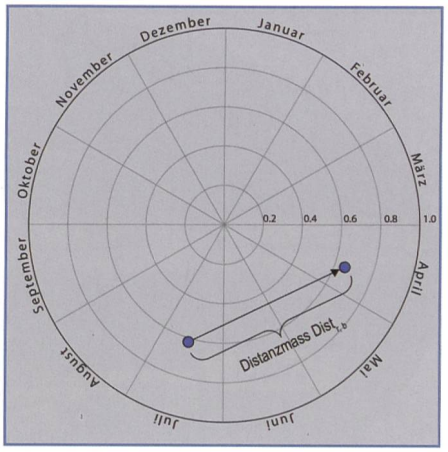

Bild 7. Die dimensionslose Masszahl $Dist_{r,b}$ als Distanz zwischen dem Saisonalitätsverhalten des beeinflussten und des Referenzzustandes. Hier veranschaulicht am Beispiel Julia-Tiefencastel vor und nach der Inbetriebnahme des Stausees Marmorera. Die Verschiebung betrifft hier nur den zeitlichen Erwartungswert der HQ-Saisonalität (Juli zu April) bei annähernd gleich bleibender Variabilität.

Klasse 1	$Dist_{r,b} \leq 0.3$
Klasse 2	$0.3 < Dist_{r,b} \leq 0.6$
Klasse 3	$0.6 < Dist_{r,b} \leq 0.9$
Klasse 4	$0.9 < Dist_{r,b} \leq 1.2$
Klasse 5	$Dist_{r,b} > 1.2$

Bild 8. Klassierungsregel Hochwasser-Saisonalität.

4.4 Gesamtbewertung

Nach der Abschnittsbewertung liegen für alle ausgewiesenen Gewässerabschnitte die Bewertungen der neun Bewertungsindikatoren als Einzelbewertungen vor. Das Modul-Stufen-Konzept verlangt jedoch eine Gesamtbewertung pro Modul, die einen raschen Überblick über den Zustand ermöglicht. Durch eine Aggregation der neun Einzelbewertungen muss also eine Gesamtbewertung pro Gewässerabschnitt erreicht werden. Die Definition der Aggregationsregel beruht auf folgenden Überlegungen:

- Die Bildung eines Mittelwerts aus allen Einzelbewertungen ist nicht zulässig, da sie unterschiedliche Aspekte bewerten, zwischen denen keine Kompensationseffekte erwartet werden.
- Da bereits ein schlechter Zustand bezüglich eines oder weniger Bewertungsindikatoren das Ökosystem beeinträchtigen kann, muss die Gesamtbewertung in Richtung «worst case» gehen.
- Die Erfahrungen von den Pilot-Anwendungen im Bleniotal und an der Sitter

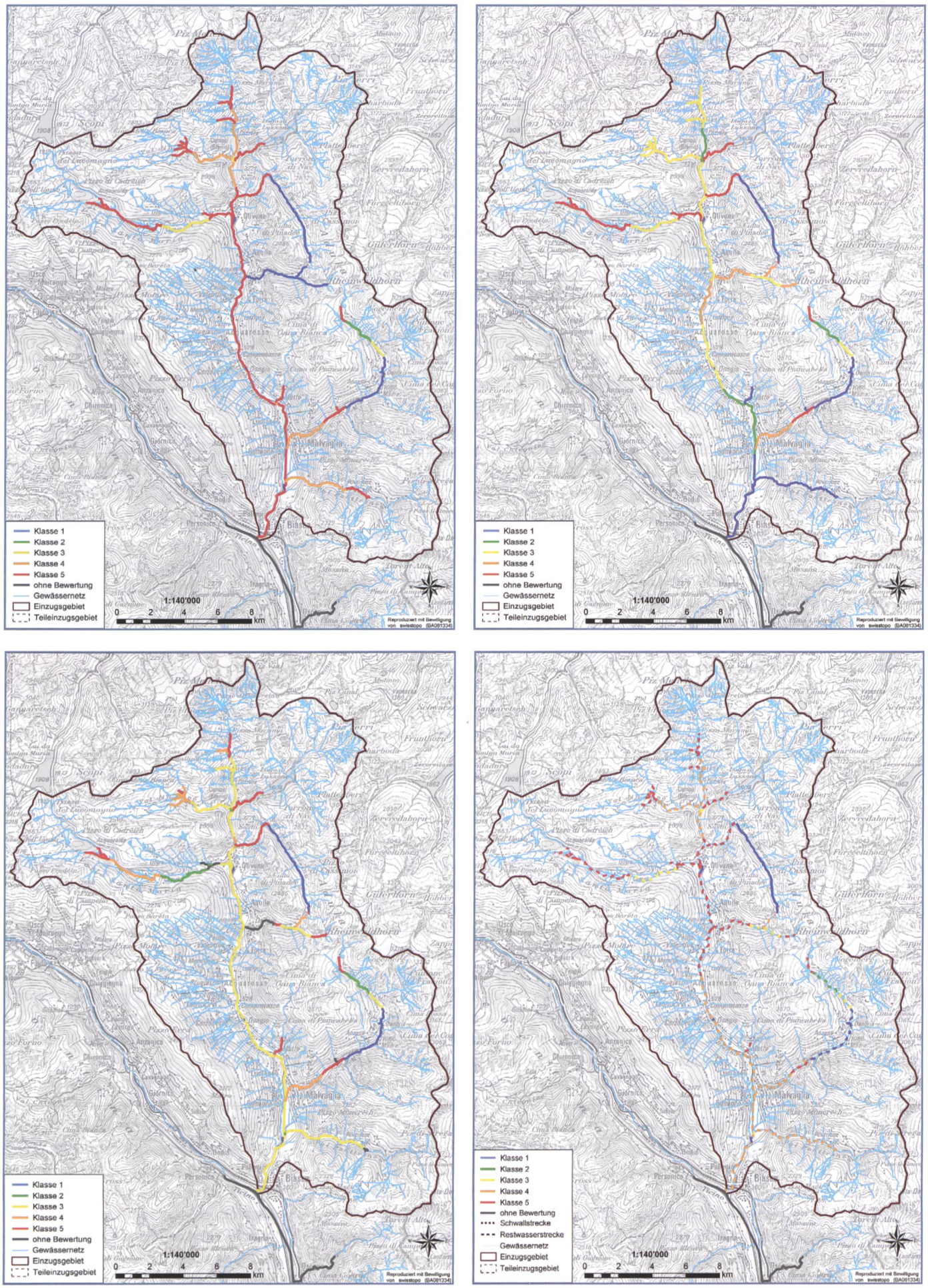

Bild 9. Fallbeispiel Brenno im Bleniotal, Kanton Tessin. Ergebnisse für einzelne Bewertungsindikatoren von HYDMOD-F. Links oben: Niederwasserabfluss. Rechts oben: Niederwasser-Saisonalität. Links unten: Hochwasser-Häufigkeit. Rechts unten: Gesamtbewertung.

zeigen, dass eine reine «worst case»-Regel eine zu pessimistische Gesamtbewertung bewirkt, insbesondere in Situationen, wo nur ein einziger Bewertungsindikator sehr schlecht abschneidet und alle anderen einen guten Zustand aufweisen.

- Eine allgemeingültige Gewichtung zwischen den Bewertungsindikatoren ist fachlich nicht begründbar.

Die aus diesen Erwägungen abgeleitete pragmatische Aggregationsregel bezieht sowohl die schlechteste der neun Einzelbewertungen («worst case») als auch einen Summenwert aller Einzelbewertungen ein.

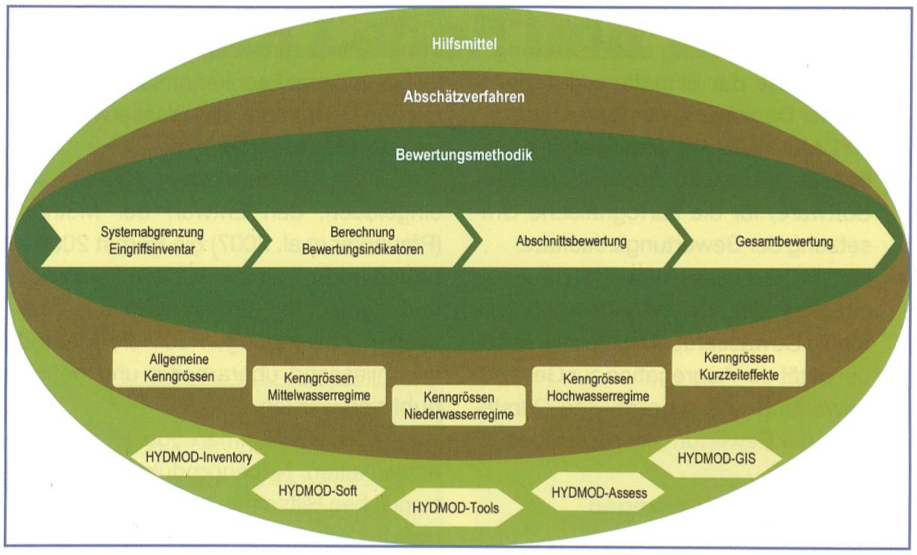

Bild 10. Aufbau des Moduls Hydrologie-Abflussregime Stufe F.

5. Fallbeispiel Blenio

Die Methode HYDMOD-F wurde während der Entwicklung an der Sitter (Kt. SG. und beide Appenzell) und am Brenno im Bleniotal (Kt. TI) angewendet und getestet. Hier werden einige Ergebnisse für das Bleniotal (Salvetti und Pfaundler, 2006) illustriert, welches eine Vielzahl von Eingriffen für die Wasserkraftnutzung (Wasserableitungen, -umleitungen und Wasserkraftanlagen) aufweist. In *Bild 9* sind die Ergebnisse sowohl für die Gesamtbewertung als auch zu ausgewählten Einzelindikatoren als kartografische Darstellungen aufgeführt, wie sie aus der Anwendung mit dem Hilfsmittel HYDMOD-GIS (Symbolbaukasten, GIS-Applikation) resultierten.

Bei den meisten Gewässerstrecken ist der Einfluss der Wasserkraftnutzung auf den Bewertungsindikator Niederwasserabfluss sehr massiv, es dominieren die Zustandsklassen 3 bis 5. Nur beim Fluss Orino im Malvaglia-Tal ist die Bewertung besser. Kurz flussab der Fassung im oberen Tal wird die Strecke in Klasse 5 eingestuft. Der Einfluss der Fassung vermindert sich aber relativ schnell und der Fluss weist bei der Mündung in den Malvaglia-See bereits wieder einen natürlichen Zustand auf. Die negative Auswirkung des Stausees ist dagegen eindeutig und erstreckt sich bis zum Zusammenfluss in den Brenno bei Malvaglia. Der Einfluss der Wasserfassungen in Valsoi auf die Bewertung des Indikators Q_{347} ist nicht gross, und die ganze Gewässerstrecke wird zur Klasse 1 zugeordnet, weil der Valsoi-Bach keine permanente Wasserführung hat ($Q_{347} = 0$ auch im natürlichen Zustand). Trotzdem beeinflussen die Wasserfassungen das Niederwasserregime, was bei den Indikatoren Niederwasser-Saisonalität und -Dauer zum Ausdruck kommt.

Beim Bewertungsindikator Niederwasser-Saisonalität sieht das Muster grundsätzlich ähnlich wie beim Niederwasserabfluss aus, obwohl der Einfluss etwas geringer ist. Der Grund dafür liegt darin, dass beim natürlichen Regime die Niederwasserperioden meistens zwischen Januar und März auftraten, mit der Wasserkraftnutzung sich diese Periode nun auf bis zu sechs Monate erstreckt (Oktober bis März), sowohl bei den Wasserfassungen ohne Dotierwassermenge als auch bei den Fassungen mit Dotation.

Bei der Hochwasser-Saisonalität erhält man ein ganz anderes Resultat. Praktisch alle bewerteten Strecken gehören hier zur Klasse 1, was einem natürlichen oder naturnahen Zustand entspricht. Dieser Umstand kann damit erklärt werden, dass einerseits bei allen Eingriffen die maximale Kapazität der Fassungen beschränkt ist, d.h., ausserhalb der Dimensionierungskapazität fliesst das Wasser beim Hochwasser im natürlichen Flussbett, und andererseits von den Speicherseen keine künstlichen Hochwasser generiert werden, die die Saisonalität der Hochwasser verändern könnten.

Der Einfluss der Wasserfassungen auf das Hochwasserregime wird in diesem Fallbeispiel jedoch durch den Indikator der Hochwasser-Häufigkeit erfasst. Die Bewertung sieht hier so aus, dass der Einfluss am Ort des Eingriffs noch stark ist, sich aber dank den natürlichen Zubringern flussab schneller verbessert. Der Hauptfluss Brenno wird der Klasse 3 zugeordnet.

Die Gesamtbewertung gibt schliesslich einen Überblick über den Zustand im Einzugsgebiet und ist in diesem Fall geprägt durch die Indikatoren des Niederwasserregimes, deren Bewertungsergebnisse das Gesamtbild bestimmen. Unterhalb von Wasserfassungen weisen die Fliessgewässer die massivsten Abweichungen vom natürlichen Abflussregime auf. Dieses «Störsignal» wird zwar flussab durch Zufluss von unbeeinflussten Gewässern etwas gemildert, ist aber auch noch im Unterlauf des Brenno bei der Mündung in den Ticino als stark verändert (Klasse 4) klassiert.

Daneben werden in der Darstellung der Gesamtbewertung alle Gewässerabschnitte, welche als Restwasserstrecken zu klassieren sind, durch eine spezielle Schraffur ausgewiesen.

6. Das «Paket» HYDMOD-F

Die Anwendung von HYDMOD-F benötigt verschiedene hydrologische Kenngrössen. In vielen Fällen ist aber davon auszugehen, dass die verfügbare Datenlage spärlich ist. Deswegen wurden parallel zur eigentlichen Bewertungsmethodik auch eine Reihe hydrologischer Grundlagen und Abschätzverfahren erarbeitet, welche Bestandteil des Berichts sind. Schliesslich wurden auch einige elektronische Hilfsmittel zur IT-gestützten Anwendung, Standardisierung und Verringerung des Anwendungsaufwands entwickelt. HYDMOD-F ist demzufolge als Paket zu verstehen.

Die elektronischen Hilfsmittel können über die Internetseiten des Modul-Stufen-Konzepts (www.modul-stufen-konzept.ch > Hydrologie) gratis bezogen werden. Sie umfassen:

- HYDMOD-Soft: Berechnung von ausgewählten hydrologischen Kenngrössen aus Rohdaten, namentlich aus Abfluss-Tagesmittelwerten.
- HYDMOD-Tools: Berechnung und Klassierung der Bewertungsindikatoren sowie indirekte Abschätzung von hydrologischen Kenngrössen.
- HYDMOD-Inventory: Inventarvorlage

für die Erfassung der Eingriffe sowie für die Speicherung der Bewertungsergebnisse der Eingriffe inkl. tabellarischer Darstellung der Bewertung.

- HYDMOD-GIS: Datenmodell, Symbolbaukasten und GIS-Applikation (ESRI-Software) für die kartografische Umsetzung der Bewertungsresultate.
- HYDMOD-Assess: Vorlage zur Speicherung der Bewertungsergebnisse für die Gewässerabschnitte inkl. Funktionalität der Aggregation zur Gesamtbewertung und tabellarische Darstellung der Bewertungen.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Modul Hydrologie-Abflussregime beleuchtet verschiedene Aspekte von Veränderungen des Abflussregimes und gibt damit ein sehr differenziertes Bild über die Naturnähe der Wasserführung. Mit seinem regionalen Fokus (Stufe F hat den regionalen Überblick zum Ziel) erhält man für ein ganzes Einzugsgebiet einen Überblick über die Abflussregime-relevanten Eingriffe. Deren Auswirkungen werden quantifiziert und die daraus resultierenden Defizite des Gewässerzustandes werden aus hydrologischer Perspektive beurteilt und dargestellt. HYDMOD-F beinhaltet aber keine Massnahmenplanung.

Die Anwendung der Methode HYDMOD-F erfordert einen Anfangsaufwand, um sich mit der Methode, dem Vorgehen und den verschiedenen Hilfsmitteln vertraut zu machen. Anschliessend hängt der Aufwand stark ab von der Anzahl und Komplexität der Eingriffe (Erfassung und Informationsbeschaffung) im Einzugsgebiet und der Datenverfügbarkeit (Ableitung der benötigten hydrologischen Kenngrössen). Die zur Verfügung gestellten elektronischen Hilfsmittel sollen den Anwendungsaufwand verringern. Die Methode selber verlangt Fachkenntnisse in den Bereichen Hydrologie, der Wasserwirtschaft und der Gewässerökologie.

Die interessierten Kreise sind eingeladen, den Entwurf der Methode (Pfaundler et al. 2007) bis Herbst 2009 zu prüfen und zu testen. Mit den Feedbacks und gemachten Erfahrungen aus praktischen Anwendungen soll die Methode anschliessend überarbeitet und definitiv publiziert werden.

Die im Rahmen von HYDMOD-F entwickelten Nebenprodukte und elektronischen Hilfsmittel können auch für andere hydrologische Fragestellungen angewendet und nützlich sein. Gemeinsam mit dem Methodenentwurf sind sie gratis über www.modul-stufen-konzept.ch > Hydrologie beziehbar.

Danksagung

Andrea Salvetti vom Kanton Tessin und Beat Müller vom Kanton St. Gallen für die Bereitschaft und Unterstützung bei der Erprobung der Methode an Brenno und Sitter.

Literatur

Aschwanden, H. und *Weingartner, R.*, 1985: Die Abflussregimes der Schweiz. Geographisches Institut der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 65. Bern, 237 Seiten.

BMLF, 2004: Methodik zum Bericht der Ist-Bestandesaufnahme für die österreichischen Anteile der Flussgebietseinheiten Donau, Rhein und Elbe. Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft und Umwelt. Wien.

BUWAL, 2003: Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes – Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen zur Fischerei Nr. 75. Bern, 112 Seiten.

BUWAL und BWG (Hrsg.), 2003: Leitbild Fliessgewässer Schweiz – Für eine nachhaltige Gewässerpolitik. Bern, 12 Seiten.

BUWAL, 1998: Modul-Stufen-Konzept – Methoden zur Untersuchung und Beurteilung von Fliessgewässer. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26. Bern, 43 Seiten.

Pfaundler, M., Dübendorfer, C., Pfammatter, R. und *Zysset, A.*, 2007: Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer – Hydrologie-Abflussregime. Umwelt-Vollzug. Entwurf vom Oktober 2007. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern, 104 Seiten.

Pfaundler, M. und *Wüthrich, T.*, 2006: Saisonalität hydrologischer Extreme – Das zeitliche Auftreten von Hoch- und Niederwasser in der Schweiz. In: Wasser Energie Luft, Jg. 98, Heft 2. S. 77–82.

Salvetti, A. und *Pfaundler, M.*, 2006: Erprobung des Moduls Hydrologie (HYDMOD-F) am Brenno (Bleniotal). Interner Bericht. Dipartimento del Territorio, Ufficio dei corsi d'acqua del Cantone Ticino und Bundesamt für Umwelt, Bellinzona/Bern.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Martin Pfaundler* und *Thomas Scheuner*
Abteilung Wasser
Bundesamt für Umwelt (BAFU)
CH-3003 Bern-Ittigen
martin.pfaundler@bafu.admin.ch und
thomas.scheuner@bafu.admin.ch

Christina Dübendorfer
Ernst Basler + Partner AG
Zollikerstr. 65
CH-8702 Zollikon
christina.duebendorfer@ebp.ch