

Kurzfristige Abflussschwankungen in Österreich

zu Endbericht

SuREmMa

Sustainable River Management – Energiewirtschaftliche und umweltrelevante
Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen

Wien, Juli 2017



Text und Inhalt

Franz Greimel (*Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement BOKU, alpS*), Bernhard Zeiringer (*Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement BOKU, alpS*), Norbert Höller (*Zentraler Informatikdienst BOKU*), Bettina Grün (*Institut für Angewandte Statistik, Johannes Kepler Universität, Linz*), Stefan Schmutz (*Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement - BOKU*)

Layout

Christin Haida (*alpS*)

Zitiervorschlag

Greimel, F., Zeiringer, B., Höller, N., Grün, B.. & S. Schmutz (2017): Technischer Bericht A - Kurzfristige Abflussschwankungen in Österreich. Ergänzung zu Endbericht: Suremma, Sustainable River Management - Energiewirtschaftliche und umweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen. Forschungsbericht, Wien, Innsbruck, 20 Seiten.

Allgemeine Information

Projekttitle

SuREmMa – **S**ustainable **R**ivermanagement – **E**nergiewirtschaftliche und **u**mweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender **M**aßnahmen

Projektförderung

Das Projekt wurde innerhalb des österreichischen K1 Zentrums „alpS – Centre for Climate Change Adaptation“ durchgeführt. Das K1 Zentrum alpS ist Teil des Förderprogramms COMET – Competence Centers for Excellent Technologies, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMWFW), sowie durch die Länder Tirol und Vorarlberg. Das COMET Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt.

Projektkonsortium

Das Projektkonsortium besteht aus alpS, e3 Consult und der Universität für Bodenkultur mit dem Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement (IHG) sowie dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrobiologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW). Vertreter der Energiewirtschaft waren Kelag, ÖBB Infrastruktur, Österreichs Energie, Salzburg AG, Tiroler Wasserkraft AG, Verbund und Vorarlberger Illwerke AG. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) stand beratend zu Seite.

Projektdate

Projektbeginn: 1.9.2014, Projektende: 31.3.2017

Inhaltliche Leitung: Stefan Schmutz, Jürgen Neubarth, Christoph Hauer, Helmut Habersack

Fachliche Unterstützung: Veronika Koller-Kreimel

Projektkoordination: Christin Haida, Katrin Schneider

Projektbearbeitung: Simon Führer, Martin Fuhrmann, Hansjörg Gober*, Bernhard Gotthardt*, Franz Greimel, Christoph Hauer, Melanie Haslauer, Daniel Hosp*, Patrick Holzapfel, Thomas Höckner*, Silvia Humer*, Fabian Jung, Gundula Konrad, Dieter Kreikenbaum, Gernot Ladinig, Thomas Lusch-nig*, Peter Matt*, Rupert Nocker*, Markus Pflieger*, Jürgen Neubarth*, Otto Pirker, Ludwig Piskernik*, Simon Preuschoff*, Walter Reckendorfer, Robert Reindl*, Hagen Schmöller*, Christoph Wulz*, Bernhard Zeiringer

* Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Energiewirtschaft

Technischer Bericht A – Kurzfristige Abflussschwankungen in Österreich

Autoren:

Franz Greimel¹, Bernhard Zeiringer¹, Norbert Höller², Bettina Grün³ und Stefan Schmutz¹

¹*Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, BOKU, Wien*

²*Zentraler Informatikdienst, BOKU, Wien*

³*Institut für Angewandte Statistik, Johannes Kepler Universität, Linz*

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	2
1 Kurzfristige Abflussschwankungen in Österreich	3
1.1 Gewässerstrecken mit signifikanter Schwallbelastung gemäß nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP) und potentielle Schwall-Einleitestellen	3
1.2 Auftrittshäufigkeit und Intensität kurzfristiger Abflussschwankungen (kurzfristiges Abflussregime) und Selektion spezifischer Abflussschwankungen	5
1.3 Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit von natürlich auftretenden Abflussschwankungen als Schlüssel für einen überregionalen Vergleich der hydrologischen Begebenheiten	13
2 Literatur	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Als signifikant schwallbelastet ausgewiesene Gewässerstrecken und betroffene Fischregionen.	3
Abbildung 2: Verhältnis von maximalem Ausbaudurchfluss (Q_a) und Mittelwasserabfluss (MQ) bei potentiellen Einleitestellen anthropogene erzeugter Abflussschwankungen ($N=84$).	4
Abbildung 3: Unterschiedliche Typen von kurzfristigen Abflussschwankungen.	6
Abbildung 4: Kurzfristiges Abflussregime österreichischer Pegelstellen.	8
Abbildung 5: Mittlere standardisierte jährliche Dauerlinien von unterschiedlichen kurzfristigen Abflussregimen für Abstiegsereignisse und einzelne Parameter.	10
Abbildung 6: Clusterzugehörigkeit einzelner Teileinzugsgebiete gemäß Wasserbilanzmodell	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ereignisbezogene Intensitäts- (Nr. 1-5) und Häufigkeitsparameter (Nr. 6): Definitionen und Einheiten.	7
Tabelle 2: Monatliche Auftrittshäufigkeit von ökologisch relevanten Abstiegsereignissen.	12
Tabelle 3: Grenzwerte (%) bezogen auf die mittlere und maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit	13
Tabelle 4: Modellparameter gemäß Formel 1 zur näherungsweise Bestimmung des zu erwartenden jährlichen Maximums der Abflussänderungsgeschwindigkeiten natürlicher Ereignisse.	14

1 Kurzfristige Abflussschwankungen in Österreich

Im folgenden Kapitel wird die Schwallssituation in Österreich überblicksmäßig dargestellt. Als Datengrundlage werden dabei die gemäß nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan als signifikant schwallbelastet ausgewiesenen Gewässerstrecken sowie das Verzeichnis österreichischer Wasserkraftanlagen gemäß Digitaler Hydrologischer Atlas Österreich [2] und das Wasserinformationssystem Austria (WISA) herangezogen. Andererseits werden sämtliche hochauflösende Pegelstellen Österreichs hinsichtlich der Auftrittshäufigkeit und Intensität kurzfristiger Abflussschwankungen analysiert.

1.1 Gewässerstrecken mit signifikanter Schwallbelastung gemäß nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP) und potentielle Schwall-Einleitestellen

Im nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan sind insgesamt 881 km Fließstrecke in 121 Wasserkörpern als signifikant schwallbelastet eingestuft; das entspricht 2,8 % des Gewässernetzes > 10 km² bzw. rund 20 % des Gewässernetzes mit einer Einzugsgebietsgröße über 1000 km² (BMLFUW, 2015). Vom Schwallbetrieb betroffen sind in Österreich demnach hauptsächlich mittlere bis größere Flüsse in vor- oder inneralpiner Lage wie Drau, Ill, Bregenzerach, Ziller, Salzach, Möll, Enns, Mur, Alpenrhein und Inn, die überwiegend der unteren Forellen- oder Äschenregion bzw. dem Übergang zur Barbenregion zuzuordnen sind (Meta-/Hyporhithral bis Epipotamal) [6, 10] (vgl. Abbildung 1).

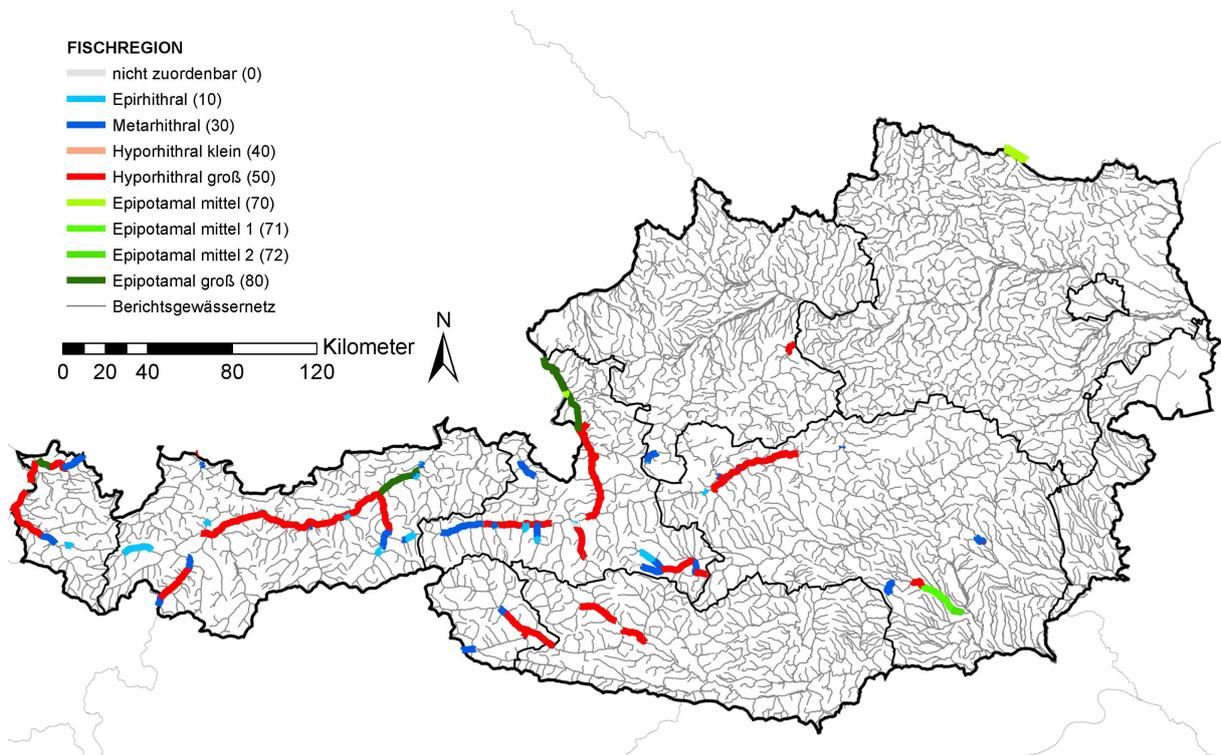


Abbildung 1: Als signifikant schwallbelastet ausgewiesene Gewässerstrecken und betroffene Fischregionen (farbige Linien; 881 km - [3]).

Zur Kartierung der potentiellen Einleitestellen von anthropogenen Abflussschwankungen wurden mehrere Datengrundlagen herangezogen: Einerseits wurde dabei auf das Verzeichnis von Wasserkraftanlagen gemäß Digitaler

lem Hydrologischen Atlas Österreich zurückgegriffen, in welchem österreichweit Kraftwerksstandorte verzeichnet sind (u. A. Kraftwerk mit Schwellbetrieb, Speicher- oder Pumpspeicherkraftwerk) [2]. Andererseits wurden die Schwallstrecken gemäß Nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan [3] herangezogen, um potentielle Einleitstellen anthropogen erzeugter Abflussschwankungen bzw. Kraftwerke zu identifizieren, die im digitalen hydrologischen Atlas nicht verzeichnet werden. Anschließend wurde für sämtliche potentiellen Einleitstellen anhand der online verfügbaren Wasserrechte (Wasserinformationssystem Austria – WISA) bzw. anhand von Auskünften der Wasserrechtsbehörden der maximale Ausbaudurchfluss erhoben und die Lage der Einleitstelle erfasst. Österreichweit konnten 84 potentielle Einleitstellen anthropogener Abflussschwankungen identifiziert werden (vgl. Anhang zum technischen Bericht A - Kapitel 1.1).

Um die jeweilige Schwallintensität bzw. das Verhältnis von Flussgröße und Kraftwerk überblicksmäßig zu erfassen, wird der Mittelwasserabfluss (MQ) des Vorfluters bei der Einleitstelle gemäß Wasserbilanzmodell [2] dem jeweiligen Ausbaudurchfluss (Q_a) des einleitenden Kraftwerks gegenübergestellt. Bei etwa 23% der Einleitstellen ist MQ größer als der Ausbaudurchfluss. Bei gut einem Drittel (36%) der Einleitstellen anthropogener Abflussschwankungen ist der Ausbaudurchfluss des Kraftwerkes etwa ein bis zweimal, bei 18% zwei bis dreimal so groß wie MQ. Bei in Summe rund 24% der Einleitstellen übersteigt der Ausbaudurchfluss den dreifachen Mittelwasserabfluss (vgl. Abbildung 2).

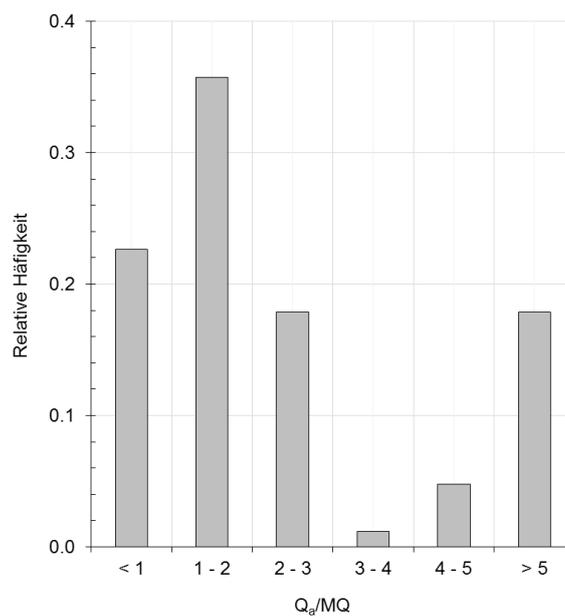


Abbildung 2: Verhältnis von maximalem Ausbaudurchfluss (Q_a) und Mittelwasserabfluss (MQ) bei potentiellen Einleitstellen anthropogene erzeugter Abflussschwankungen (N=84).

1.2 Auftrittshäufigkeit und Intensität kurzfristiger Abflussschwankungen (kurzfristiges Abflussregime) und Selektion spezifischer Abflussschwankungen

Folgendes Kapitel bezieht sich maßgeblich auf die Arbeit von Greimel et al. [5] - „A method to detect and characterize sub-daily flow fluctuations“.

Kurzfristige Abflussschwankungen bezeichnen Abflussänderungen, welche innerhalb eines Zeitraumes von einigen Minuten oder Stunden bis hin zu wenigen Tagen auftreten. Diese kurzfristigen Abflussschwankungen können natürlichen Ursprungs sein (vgl. Abbildung 3 A-D) oder anthropogen erzeugt werden (vgl. Abbildung 3 E-H) und können dementsprechend unterschiedlichen Schwankungstypen zugewiesen werden.

Anthropogene Abflussschwankungen mit generell **hoher Intensität** sowie **hoher Auftrittshäufigkeit** (u. U. mehrere Abflussschwankungen pro Tag – vgl. Abbildung 3 E, F) werden durch Speicherkraftwerke oder Kraftwerke im Schwellbetrieb erzeugt und als **Schwall** bezeichnet. Die Häufigkeit und Intensität von Schwallwellen flussab der Schwall-Einleitestellen ist aufgrund der unterschiedlichen Betriebsweisen der Kraftwerke, der Entfernung zur Einleitestelle (Retentionswirkung) und dem Verhältnis von Kraftwerksgröße und Flussgröße generell als sehr variabel zu bezeichnen.

Anthropogene Abflussschwankungen mit im Vergleich zu Schwallwellen eher **niedriger**, generell aber ebenfalls sehr variabler **Intensität** und ähnlich **hoher Auftrittshäufigkeit** werden als „**Hydro Fibrillation**“ bezeichnet (Abbildung 3 G). Dieser Abflussschwankungstyp ist vor allem flussab von Laufkraftwerken sowie in Ausleitungsstrecken zu beobachten. Vereinzelt kann die Intensität dieser Schwankungen auch so hoch sein, dass Pegelstellen als schwallbeeinflusst kategorisiert werden, die sich nicht im Einflussbereich von Speicherkraftwerken bzw. von Laufkraftwerken im Schwellbetrieb befinden (vgl. Abbildung 4). Zeitliche Verzögerungen bei der Durchflussteuerung von Kraftwerken, die Teilnahme am Regelenergiemarkt einzelner Lauf- und Ausleitungskraftwerke, oder andere anthropogene Ursachen wie beispielsweise Pumpen, Kläranlagen, Kühlwassereinleitungen/entnahmen sowie Messartefakte (Abbildung 3 H, D – Tag 1, 2, 6, 7) kommen prinzipiell als Ursache für diesen Schwankungstyp in Frage.

Als **natürliche** Ursachen für **kurzfristige Abflussschwankungen** kommen im Wesentlichen **Schmelzereignisse** von **Schnee** (Abbildung 3 A) und **Gletschereis** (Abbildung 3 B), **Niederschlagsereignisse** (Abbildung 3 D) sowie die **Kombinationen** aus diesen Ereignissen (Abbildung 3 C) in Frage. Ein wesentliches Merkmal natürlicher Abflusswellen ist ihre Ähnlichkeit mit rechtsschiefen Verteilungen (Abbildung 3 A-D). Abflussschwankungen aufgrund von Niederschlagsereignissen dauern im Regelfall einige Stunden bis zu rund einem Tag und sind in Österreich mit einer grundsätzlich sehr variablen Intensität an etwa 10-50 Tagen pro Jahr (i. d. R. im Frühling, Sommer oder Herbst) zu beobachten. Die in Österreich hinsichtlich Amplitude und Abflussänderungsgeschwindigkeit intensivsten natürlichen Abflussschwankungen sind generell auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen (Das jährliche Maximalereignis wird – vor allem hinsichtlich Abflussanstiege – auch in den schwallbeeinflussten Strecken fast immer durch ein natürliches Ereignis ausgelöst.). Schmelzereignisse zeigen einen ausgeprägten Tagesgang, meistens über eine Zeitspanne von mehreren aufeinanderfolgenden Tagen (Schönwetterperioden mit dementsprechenden Temperaturverhältnissen). Gletscherschmelzen treten vor allem in den Sommermonaten auf und weisen im Vergleich zu Schneeschmelzen im Frühling generell eine höhere Häufigkeit und Intensität auf. Abflussschwankungen durch Schmelzereignisse treten in nicht gletscherbeeinflussten Gewässern an bis zu 50 Tagen, bei Gletschereinfluss an etwa 50-150 Tagen pro Jahr auf. Zusammenfassend kann davon ausgegangen

werden, dass bei den anthropogen unbeeinflussten Gewässern an maximal 50-70 Tagen bzw. mit Gletschereinfluss an bis zu 150-170 Tagen pro Jahr maßgebliche kurzfristige Abflussschwankungen auftreten.

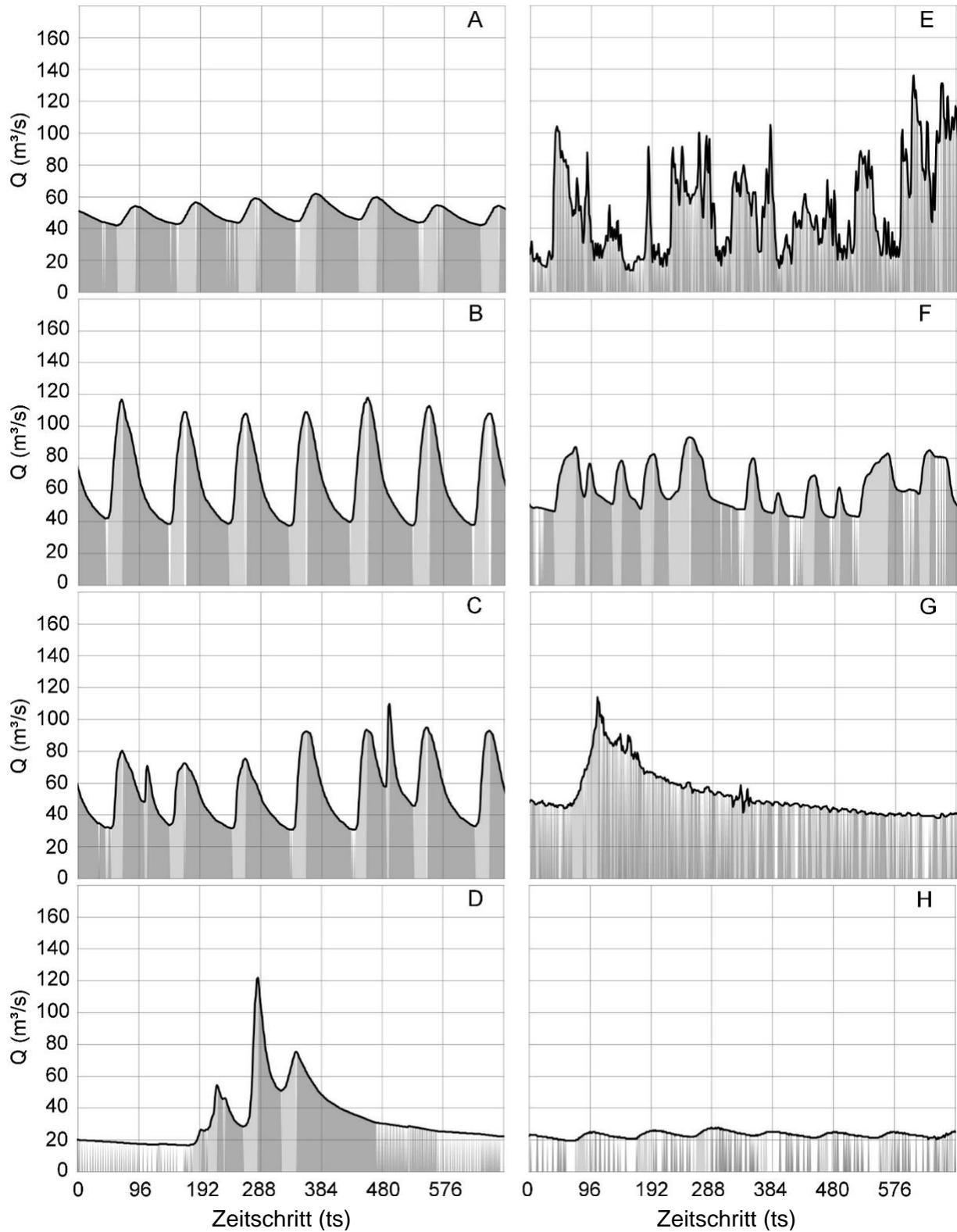


Abbildung 3: Unterschiedliche Typen von kurzfristigen Abflussschwankungen ($96 \text{ ts} \cong 1 \text{ Tag}$; Hellgrau – Anstiegsereignis; Dunkelgrau – Abstiegsereignis; A – Schneeschmelze; B – Gletscherschmelze; C – Kombination Gletscherschmelze/Niederschlagsereignis; D – Niederschlagsereignis; E – Schwall mit hoher Intensität/Häufigkeit; F – Schwall mit mittlerer Intensität/Häufigkeit; G – Kombination Niederschlagsereignis/Hydro Fibrillation; H – Kombination Schneeschmelze/Messartefakt).

Die Erfassung und Beschreibung einzelner Abflussschwankungen durch bestimmte Parameter ermöglicht es, die hydrologische Situation bezüglich kurzfristiger Abflussschwankungen zu quantifizieren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Ereignisbezogene Intensitäts- (Nr. 1-5) und Häufigkeitsparameter (Nr. 6): Definitionen und Einheiten.

Nr.	Parameter	Akronym	Definition	Einheit
1	Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit	MAFR	$\max(\text{abs}((Q_{\text{tsn}+1}) - (Q_{\text{tsn}})))$	m^3/s^2
2	Mittlere Abflussänderungsgeschwindigkeit	MEFR	Amplitude/Dauer	m^3/s^2
3	Amplitude	AMP	$Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}$	m^3/s
4	Sunk-Schwall-Verhältnis	FR	$Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$	
5	Dauer	DUR	$ts_e - ts_b$	s
6	Anzahl	CNT	Tägliche Ereignisanzahl	

ts_b – Zeitschritt Ereignisbeginn, ts_e – Zeitschritt Ereignisende, Q_{max} – Maximalabfluss, Q_{min} – Minimalabfluss, Q_{tsn} – Abfluss eines bestimmten Zeitschrittes, $Q_{\text{tsn}+1}$ – Abfluss des darauf folgenden Zeitschrittes, max – Maximum, abs – Absolutbetrag, s – Sekunde (1 ts \cong 900 Sekunden oder 15 Minuten).

In Österreich sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt hochauflösende Zeitreihen (Viertelstundenwerte) von 542 Pegelstellen verfügbar (zur Verfügung gestellt vom Hydrographischen Dienst Österreich). Für den Vergleich von hydrologischen Verhältnissen einer hohen Anzahl an Pegelstellen - jeweils basierend auf einer Zeitreihe von mehreren Jahren - ist die Darstellung anhand von mittleren jährlichen Dauerlinien gut geeignet [12]. Da bei einer österreichweiten Analyse sehr heterogene Flussgrößen gegenübergestellt werden, werden die Dauerlinien zudem im Verhältnis zum jährlichen Maximalereignis der jeweiligen Zeitreihe zwischen 0 und 1 standardisiert. Auf Basis des Verlaufs der Dauerlinien (bzw. der Berechnung der Flächen unterhalb der Kurven) kann ein multivariates statistisches Verfahren (Lineare Diskriminanzanalyse) angewandt werden. Dadurch wird ermöglicht, die Zuordnung der jeweiligen Zeitreihen zu bestimmten Abflussregimen mithilfe eines standardisierten statistischen Verfahrens vorzunehmen. Dabei werden insgesamt **4** unterschiedliche **Regime** unterschieden (vgl. Abbildung 4 und Anhang zum technischen Bericht Kapitel 1.2): **1) Anthropogener Einfluss hoher Intensität** bzw. Schwall (HP), **2) Anthropogener Einfluss niedriger Intensität** (HF), **3) Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen hoher Intensität** (GI) und **4) Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen niedriger Intensität** (NGI). Die statistische Pegelzuweisung wurde im Falle von nicht nachvollziehbaren Zuweisungen (vgl. Abbildung 4 – Schmelzereignisse hoher Intensität fernab von Gletscherflächen oder hoch gelegenen Schneefeldern, Schwallbeeinflussung außerhalb des Einflussbereichs von Speicherkraftwerken bzw. Kraftwerken im Schwellbetrieb) im Einzelfall überprüft. Dabei hat sich herausgestellt, dass es sich bei den irrtümlich als unbeeinflusst mit Schmelzereignissen hoher Intensität ausgewiesenen Zeitreihen offensichtlich um Zeitreihen mit anthropogenem Einfluss handelt bzw. die als schwallbeeinflusst ausgewiesenen Zeitreihen tatsächlich überwiegend vergleichsweise häufige Abflussschwankungen mit hoher Intensität verzeichneten, deren Ursachen im Detail untersucht werden sollten.

Zusammenfassend wird durch diese Analyse aufgezeigt, dass mehr als die Hälfte der österreichischen Pegelstellen durch anthropogene Abflussschwankungen beeinflusst sind, deren Ursachen nicht immer eindeutig erklärbar sind (vor allem beim Regime „Anthropogener Einfluss niedriger Intensität“). Auch unabhängig von Speicher-

kraftwerken oder Laufkraftwerken mit Schwellbetrieb können anthropogen erzeugte Abflussschwankungen mit teilweise vergleichsweise hoher Intensität auftreten, deren potentielle ökologische Auswirkungen bisher nicht näher analysiert wurden, vor allem in Restwasserstrecken aber erhebliche negative ökologische Folgen nach sich ziehen könnten.

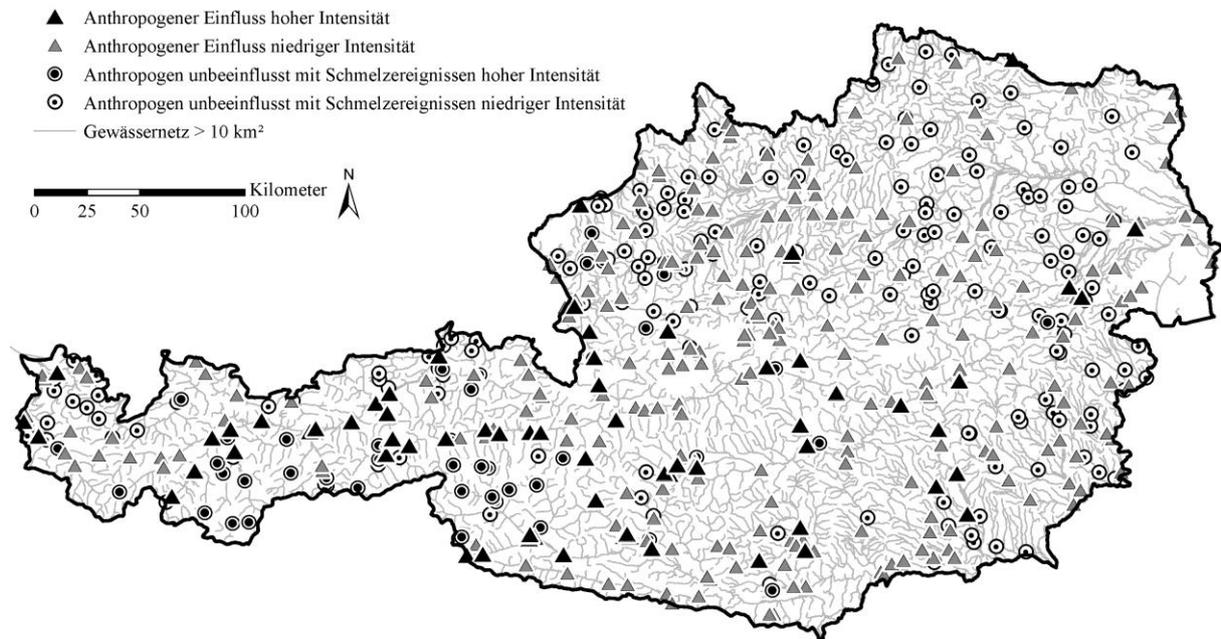


Abbildung 4: Kurzfristiges Abflussregime österreichischer Pegelstellen (Anthropogener Einfluss hoher Intensität - N=71; Anthropogener Einfluss niedriger Intensität - N=250; Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen hoher Intensität - N=44; Anthropogener unbeeinflusst mit Schmelzereignissen niedriger Intensität - N=177; basierend auf Zeitreihen von jeweils 01.01.2004 bis 31.12.2008).

Neben einem großräumigen österreichweiten Überblick bzw. einem ersten potentiellen Ansatz zu einem österreichweiten Monitoring kurzfristiger Abflussschwankungen ermöglicht das Modell die statistische Zuweisung von Abflussregimen, unbeeinflusste Pegelstellen standardisiert zu identifizieren und in weiterer Folge den Verhältnissen beeinflusster Pegelstellen gegenüber zu stellen. Die hydrologische Situation der einzelnen Regime kann z.B. durch die mittlere Dauerlinie des jeweiligen Regimes sowie deren Konfidenzintervall im Detail analysiert werden (vgl. Abbildung 5). Wenn die Konfidenzintervalle der anthropogen unbeeinflussten Abflussregime (hellgrauer Bereich) und des Regimes mit anthropogenem Einfluss hoher Intensität (Schwall – dunkelgrauer Bereich) gegenübergestellt werden, zeigen Lücken signifikant unterschiedliche bzw. Überschneidungen ähnliche hydrologische Verhältnisse an.

Dabei wird ersichtlich, dass sich der Unterschied zwischen den unbeeinflussten hydrologischen Regimen und dem Regime mit Schwallenfluss besonders gut durch die Parameter mittlere und maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit beschreiben lässt, da die Lücke jeweils beinahe über das gesamte Diagramm reicht (vgl. Abbildung 5). Dies ist durch die unterschiedliche Anzahl an Tagen, an welchen Ereignisse mit vergleichsweise hoher Abflussänderungsgeschwindigkeit auftreten, erklärbar: Während bei unbeeinflussten Regimen lediglich an bis zu 50-70 Tagen pro Jahr (ohne Gletschereinfluss) bzw. an bis zu 150-170 Tagen pro Jahr (mit Gletschereinfluss)

Ereignisse mit relevanten Abflussänderungsgeschwindigkeiten auftreten (bei höherer Überschreitungsdauer liegen die Kurven im Nahbereich von 0), trifft das bei Schwallbeeinflussung auf etwa 300-365 Tage pro Jahr zu. Zudem sind die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse in Relation zum Jahresmaximum (i.A. ausgelöst durch ein Starkregenereignis) durchwegs gering, wodurch die unbeeinflussten Dauerlinien so steil abfallen, dass sich kein Überlappungsbereich der Konfidenzintervalle ergibt. Wenn man im Vergleich dazu beispielsweise den Parameter Amplitude unter die Lupe nimmt, wird ersichtlich, dass die unbeeinflussten Dauerlinien zwar wie bei der Abflussänderungsgeschwindigkeit bei einer Überschreitungsdauer größer 50-70 (ohne Gletschereinfluss) bzw. größer 150-170 (mit Gletschereinfluss) im Nahbereich von 0 liegen (weil an diesen Tagen aufgrund von stabilen Abflussverhältnissen auch keine Ereignisse mit relevanten Amplituden beobachtet werden können). Allerdings führen beim Parameter Amplitude im Gegensatz zur Abflussänderungsgeschwindigkeit die Dauerlinien von anthropogen unbeeinflussten Zeitreihen mit Gletschereinfluss bei geringen Überschreitungsdauern zu einer ausgeprägten Überschneidung mit dem schwallbeeinflussten Regime. Dies kann durch die Abflussschwankungen infolge von Gletscherschmelzen erklärt werden. Die durch Gletscherschmelzen ausgelösten Abflussschwankungen weisen im Vergleich zum Jahresmaximum (im Gegensatz zur Abflussänderungsgeschwindigkeit) vergleichbar hohe Amplituden auf, wodurch die gletscherbeeinflussten Dauerlinien hinsichtlich dem Parameter Amplitude nicht so steil wie beim Parameter Abflussänderungsgeschwindigkeit abfallen und somit zur Überschneidung führen.

Zusammenfassend besteht aus hydrologischer Sicht der größte Unterschied zwischen schwallbeeinflussten und anthropogen unbeeinflussten Regimen in der Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen mit relevanter Intensität. Bei anthropogen unbeeinflussten Abflussverhältnissen ohne Gletschereinfluss treten Ereignisse mit sehr hoher Abflussänderungsgeschwindigkeiten und hohen Amplituden generell nur sehr selten auf. Bei gletscherbeeinflussten Gewässern führen die Schmelzereignisse zu einer vermehrten Anzahl an Abflusswellen mit vergleichsweise hoher Amplitude, aber lediglich geringer bis maximal mittlerer Abflussänderungsgeschwindigkeit. Aus ökologischer Sicht ist als nächster Schritt eine detaillierte Analyse des Auftrittszeitpunktes (Saisonal, Tageslicht/Nacht) von Abflussschwankungen in Abhängigkeit der jeweiligen Intensität relevant [10]. Dazu ist eine standardisierte Selektion bestimmter Abflussschwankungen erforderlich (s.u.).

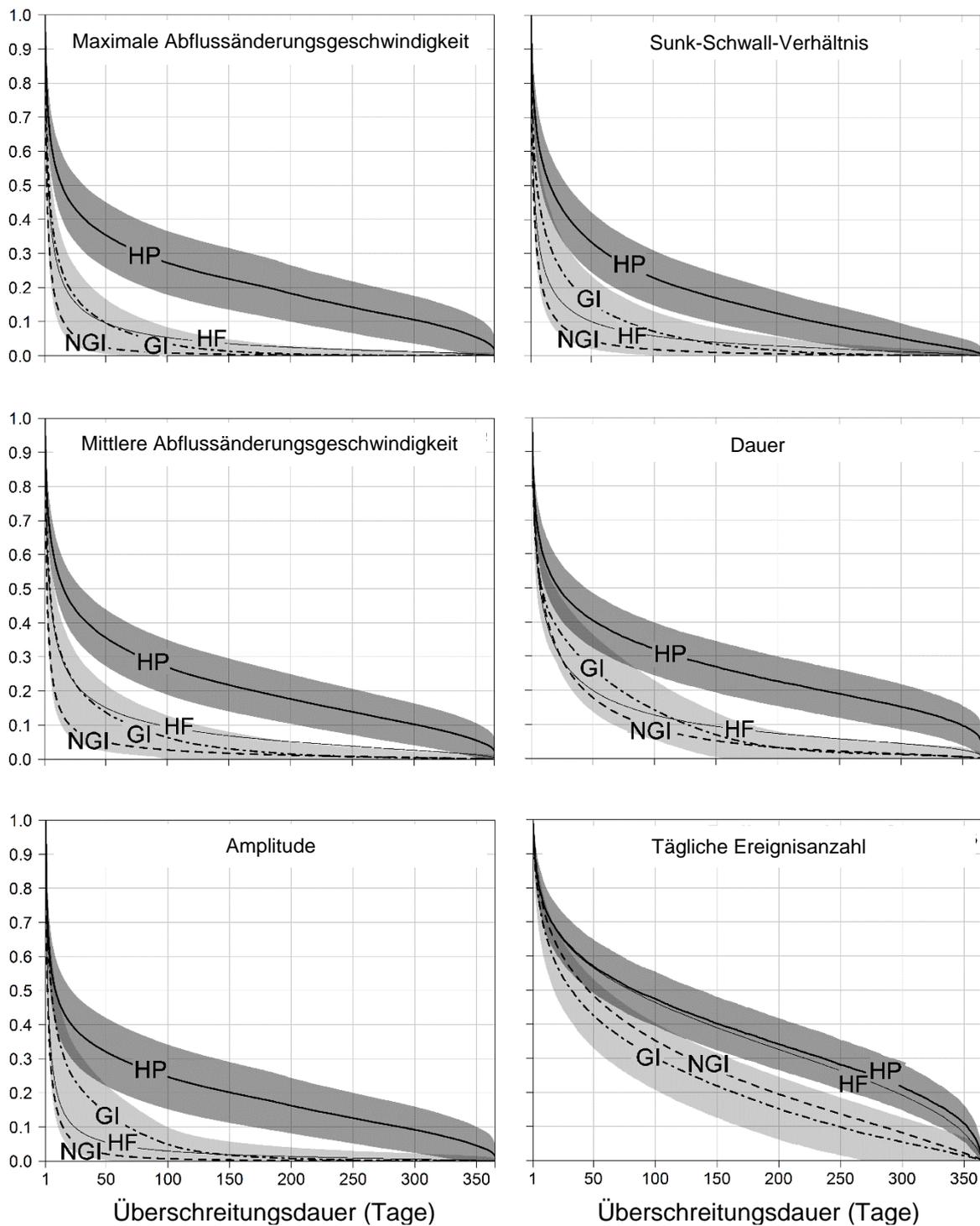


Abbildung 5: Mittlere standardisierte jährliche Dauerlinien von unterschiedlichen kurzfristigen Abflussregimen für Abstiegseignisse und einzelne Parameter (Anthropogener Einfluss hoher Intensität (HP), Anthropogener Einfluss niedriger Intensität (HF), Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzeignissen hoher Intensität (GI), Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzeignissen niedriger Intensität (NGI); Hellgrau – 95% Konfidenzintervall von unbeeinflusstem Regime; Mittelgrau – 95% Konfidenzintervall – Regime HP; Dunkelgrau – Konfidenzintervall Überlappung).

Eine standardisierte Selektion bestimmter Abflussschwankungen (in einem eindeutig definierbaren Intensitätsbereich) bei einer Vielzahl an Pegelstellen mit heterogenen hydrologischen Bedingungen (anthropogen beeinflusst/unbeeinflusst, Flussdimension etc.) wird durch die Standardisierung im **Verhältnis** zum jeweiligen **natürlich auftretenden Jahresmaximum** ermöglicht, wie folgende Beispiele zeigen sollen:

Die im Verhältnis zum Jahresmaximum standardisierten Dauerlinien von unbeeinflussten Verhältnissen mit/ohne Gletschereinfluss zeigen hinsichtlich der Intensitätsparameter beispielsweise generell einen unterschiedlichen Kurvenverlauf bei Überschreitungsdauern etwa im Bereich zwischen 15 bis 150 Tagen (Lückenbereich - vgl. Abbildung 5). Der unterschiedliche Verlauf kommt hauptsächlich aufgrund der Gletscherschmelzen zustande, da Niederschlagsereignisse in beiden Abflussregimen vorkommen. Der unterschiedliche Kurvenverlauf kann daher genutzt werden, um den Großteil der auftretenden Schmelzereignisse zu selektieren. Dazu können beispielsweise jene Abflussschwankungen abgefragt werden, deren maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit im Bereich zwischen Schwellenwert 0,01 ($>GW_1$ - größer als 1% des natürlich auftretenden Jahresmaximums) und Schwellenwert 0,4 ($<GW_{40}$ - kleiner als 40% des natürlich auftretenden Jahresmaximums) liegt (Lückenbereich). Anschließend können die selektierten Abflussschwankungen weiter im Detail untersucht werden (Auftrittszeitpunkt - Saison, Monat, Uhrzeit, Lichtverhältnisse; Temperaturverhältnisse, Niederschlagsverhältnisse, Identifikation von Ausreißern etc.).

Eine ähnliche Vorgehensweise kann auch angewandt werden, um Abflussschwankungen zu selektieren, welche einen bestimmten Schwellenwert überschreiten: Gewässerorganismen sind generell an die natürlichen hydrologischen Verhältnisse angepasst [4, 8]. Trotzdem können auch natürliche Ereignisse zu Beeinträchtigungen führen, vor allem dann, wenn die Ereignisintensität außergewöhnlich hoch und/oder der Auftrittszeitpunkt ungewöhnlich ist [7, 11]. Natürliche Abflussschwankungen mit sehr hoher Intensität können daher generell als ökologisch relevant bezeichnet werden. Wenn man Abflussschwankungen beispielsweise als ökologisch relevant bezeichnet, wenn deren Abflussänderungsgeschwindigkeit im Bereich über 0,4 liegt ($>GW_{40}$ - größer als 40% des natürlich auftretenden Jahresmaximums; trifft bei unbeeinflussten Verhältnissen im Mittel auf etwa 3-15 Ereignisse pro Jahr zu - vgl.(Tabelle 3), können diese Abflussschwankungen standardisiert erfasst und im Detail untersucht werden, wenn das unbeeinflusste Jahresmaximum der jeweiligen Pegelstelle bekannt ist. Das trifft auf alle unbeeinflussten Zeitreihen jedenfalls zu. Im Falle von beeinflussten Pegelstellen muss erst geprüft werden, ob das Jahresmaximum durch eine natürliche Ursache (Niederschlagsereignis) verursacht wird, oder eine anthropogen beeinflusste Situation darstellt. Im Falle einer anthropogen beeinflussten Situation kann das natürliche Jahresmaximum von unbeeinflussten Pegelstellen übertragen werden, wobei hierfür die hydrologischen Verhältnisse grundsätzlich vergleichbar sein müssen (zB ähnliche Einzugsgebietsgröße, ähnliche Einzugsgebietsverhältnisse). Diese Methodik zur standardisierten Selektion bestimmter Abflussschwankungen wurde zur Gegenüberstellung fischökologischer Daten und kurzfristiger hydrologischer Verhältnisse in vereinfachter Form (einfachere Modellsätze und geringere Anzahl an Pegelstellen), aber prinzipiell übereinstimmend bereits im Vorgängerprojekt „Schwallproblematik an Österreichs Fließgewässern – Ökologische Folgen und Sanierungsmöglichkeiten“ (vgl. Schmutz et al. [1] – Kapitel 3.3, 7.4) und in weiterer Folge in der Arbeit Schmutz et al. [9] angewandt. Der herangezogene Schwellenwert wurde in der „Vorgängerversion“ als GK_6 bezeichnet und entspricht etwa der heutigen Schwellenwertdefinition GW_{40} .

Zur Veranschaulichung der erläuterten Methodik sind die monatlichen Auftrittshäufigkeiten von Ereignissen mit einer Abflussänderungsgeschwindigkeit über 40% des natürlich auftretenden Jahresmaximum (GW_{40}) in Tabelle

2 gegenübergestellt. Dazu wurde als erster Schritt stellvertretend für jedes kurzfristige Abflussregime beispielhaft ein Pegel ausgewählt (übereinstimmende Einzugsgebietsgröße und ähnliche Einzugsgebietsverhältnisse). Als zweiter Schritt wurden 40% der jährlich zu erwartenden maximalen natürlichen Intensität von den unbeeinflussten Pegelstellen auf die beeinflussten Pegelstellen übertragen, wodurch Ereignisse mit vergleichbarer Intensität nach einer standardisierten Methodik selektiert und gegenübergestellt werden können.

Tabelle 2: Monatliche Auftretshäufigkeit von ökologisch relevanten Abstiegsereignissen im Jahr 2008 (Je eine Pegelstelle pro kurzfristigem Abflussregime mit übereinstimmender Einzugsgebietsgröße; Grenzwert: 40% des zu erwartenden natürlichen Jahresmaximums (GW40)).

Kurzfristiges Abflussregime	Monat											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Anthropogener Einfluss hoher Intensität (Schwall)	113	189	142	84	165	269	327	262	124	115	107	75
Anthropogener Einfluss niedriger Intensität (Hydro Fibrillation)		1		1			7					
Unbeeinflusst mit Gletscher					1	1	4	2	1			
Unbeeinflusst ohne Gletscher						3	6	1				

Zusammenfassend ermöglicht der Bezug zum natürlich auftretenden Jahresmaximum einen standardisierten Vergleich zwischen beliebigen Pegelstellen. Dafür muss die jeweilige Intensität des natürlich auftretenden Jahresmaximums näherungsweise bekannt sein. Die natürlich zu erwartende Maximalintensität kann bei Zeitreihen, bei welchen das Jahresmaximum kein natürliches Ereignis darstellt, zB aus einem benachbarten unbeeinflussten Einzugsgebiet übertragen oder auch flächendeckend modelliert werden (vgl. Kapitel 1.3). Die angewandten Schwellenwerte (zB GW_1 , GW_{40} etc.) können dabei grundsätzlich der jeweiligen Forschungsfrage angepasst werden, wobei der Bezug zu den Parametern mittlere oder maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 1 - Nr. 1, 2) empfohlen wird, da sich durch diese Parameter der Unterschied zwischen natürlichen und anthropogen beeinflussten Situationen im Allgemeinen sehr gut darstellen lässt. In Tabelle 3 ist die jährliche zu erwartende natürliche Überschreitungshäufigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Grenz- bzw. Schwellenwerte aufgelistet.

Tabelle 3: Grenzwerte (%) bezogen auf die mittlere und maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 1 - Nr. 1, 2) zur Selektion bestimmter Abflussschwankungen in Relation zum natürlichen Jahresmaximum sowie korrespondierende Überschreitungshäufigkeiten natürlicher Ereignisse (Tage – Die angegebene Schwankungsbreite bezieht sich auf das 95% Konfidenzintervall – vgl. Abbildung 5 am Beispiel der Abstiegsereignisse).

GW	Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit		Mittlere Abflussänderungsgeschwindigkeit	
	IC	DC	IC	DC
100	1 - 1	1 - 1	1 - 1	1 - 1
90	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2
80	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2
70	2 - 3	2 - 3	2 - 3	2 - 3
60	2 - 4	2 - 5	2 - 5	2 - 5
50	2 - 6	2 - 8	2 - 7	2 - 9
40	3 - 11	3 - 14	3 - 11	3 - 15
30	4 - 19	4 - 26	4 - 21	4 - 28
20	6 - 39	6 - 51	7 - 43	7 - 57
10	11 - 86	11 - 114	13 - 99	14 - 124

GW – Grenz- bzw. Schwellenwert; IC – Anstiegsereignis, DC – Abstiegsereignis

1.3 Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit von natürlich auftretenden Abflussschwankungen als Schlüssel für einen überregionalen Vergleich der hydrologischen Begebenheiten

Aus hydrologischer Sicht, besteht der größte Unterschied zwischen schwallbeeinflussten und anthropogen unbeeinflussten Regimen in der Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen mit relevanter Intensität. Dem Parameter Abflussänderungsgeschwindigkeit kann als Intensitätskennzahl eine wesentliche Bedeutung unterstellt werden, da sich die unterschiedlichen Typen kurzfristiger Abflussschwankungen durch Intensitätsschwellenwerte bezogen auf diesen Parameter sowie anschließenden Detailanalysen sehr gut quantifizieren lassen. Der Bezug zum Jahresmaximum natürlicher Ereignisse ermöglicht zudem eine standardisierte Selektion von bestimmten Ereignissen aus beliebigen Zeitreihen, wenn die jeweilige Intensität der natürlich auftretenden Ereignisse näherungsweise bekannt ist. Die natürlich zu erwartende Intensität kann zB aus einem benachbarten unbeeinflussten Einzugsgebiet übertragen oder flächendeckend modelliert werden (vgl. Kapitel 1.2). In diesem Kapitel wird darauf aufbauend ein potentieller Weg zur näherungsweise flächendeckenden Ermittlung der jährlich zu erwartenden maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeiten als Schlüssel für einen überregionalen Vergleich kurzfristiger hydrologischer Bedingungen beschrieben.

Bei den anthropogen unbeeinflussten Abflussregimen werden die maximalen jährlich auftretenden Abflussänderungsgeschwindigkeiten jedenfalls durch ein natürliches Ereignis initiiert und können daher direkt aus der Zeitreihe entnommen werden. Bei den anthropogen beeinflussten Abflussregimen kann grundsätzlich ebenfalls davon ausgegangen werden, dass das jährliche Maximalereignis durch ein natürliches Ereignis ausgelöst wird, wenn sich der Pegel nicht unmittelbar flussab einer Einleitestelle anthropogener Abflussschwankungen mit sehr hoher Intensität befindet, da sich die Abflussänderungsgeschwindigkeit anthropogener Ereignisse durch die Retentionswirkung im Fluss rasch verringert (vgl. Technischer Bericht B 1.2). Vor allem bei von Wochen, Monats und Jahresspeichern beeinflussten Pegelstellen ist jedoch davon auszugehen, dass natürliche Abfluss-

schwankungen aufgrund der Retentionswirkung des Speichers hinsichtlich Intensität und Auftretshäufigkeit in Abhängigkeit der vom Speicher beeinflussten Einzugsgebietsfläche wesentlich beeinflusst werden. Zur flächendeckenden Analyse der Abflussänderungsgeschwindigkeit natürlicher Ereignisse werden daher keine Pegelstellen herangezogen, welche als „mit hoher Intensität anthropogen beeinflusst“ (bzw. als schwallbeeinflusst) ausgewiesen wurden (vgl. Kapitel 1.2). Ebenso ausgeschlossen wurden Seepegel sowie Pegel in Restwasserstrecken. Die verbleibenden Pegelstellen wurden hinsichtlich mittlerer und maximaler Abflussänderungsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 1 - Nr. 1, 2) näher analysiert. Aus den Jahresmaxima der Jahre 2004-2008 wurde für jede Zeitreihe das Fünfjahresmittel berechnet. Zusätzlich wird für jede Pegelstelle die mittlere jährliche Abflusspende (Mittlerer Abfluss/Einzugsgebietsgröße) sowie die Seehöhe ermittelt. Diese Parameter werden herangezogen, weil sie österreichweit (für einzelne Teileinzugsgebiete gemäß Wasserbilanzmodell [2]) und diversen digitalen Höhenmodellen flächendeckend verfügbar sind.

Anschließend werden sämtliche Pegelstellen anhand der Variablen Seehöhe und Abflusspende zwei Clustern zugewiesen. Dadurch wurde erreicht, dass Gebirgsflüsse und Alpenvorlandflüsse getrennt voneinander analysiert werden können (vgl. Abbildung 6). Dann wurde anhand der an den Pegelstellen bekannten Werte folgendes Regressionsmodell angepasst, wobei sich y auf das zu erwartende jährliche natürliche Maximum der Abflussänderungsgeschwindigkeit in $((\text{m}^3/\text{s})/15\text{min})$, EZG auf die Einzugsgebietsgröße in (km^2) , MQ auf den mittleren Abfluss in (m^3/s) und ε auf den Modellfehler bezieht. Nach der Log-Transformation wurde für das Verhältnis von y zu MQ eine Normalverteilung angenommen und für die Regressionskoeffizienten wurden gruppenspezifische zufällige Effekte geschätzt:

$$\log(y/MQ) = \text{Intercept}_{\text{cluster}} + \text{Coefficient}_{\text{cluster}} \times \log(\text{EZG}) + \varepsilon \quad \text{Formel 1}$$

Die Modellparameter gemäß Formel 1 sind für die unterschiedlichen zu erwartenden Parameter (maximale/mittlere Abflussänderungsgeschwindigkeit) sowie getrennt für An- und Abstiegseignisse in Tabelle 4 zusammengefasst. Abbildung 6 zeigt einen österreichweiten Überblick der Clusterzugehörigkeit (Variablen Seehöhe/Abflusspende) einzelner Teileinzugsgebiete gemäß Wasserbilanz [2].

Tabelle 4: Modellparameter gemäß Formel 1 zur näherungsweisen Bestimmung des zu erwartenden jährlichen Maximums der Abflussänderungsgeschwindigkeiten natürlicher Ereignisse.

Parameter	R ²	Cluster	Intercept	Coefficient
MAFR - IC	0.74	1	0.11	-0.39
		2	0.85	-0.72
MAFR - DC	0.80	1	-0.52	-0.38
		2	0.24	-0.64
MEFR - IC	0.81	1	-0.65	-0.35
		2	-0.01	-0.66
MEFR - DC	0.80	1	-1.11	-0.34
		2	-0.54	-0.55

MAFR – Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit, MEFR – Mittlere Abflussänderungsgeschwindigkeit, IC – Anstiegseignis, DC – Abstiegseignis.

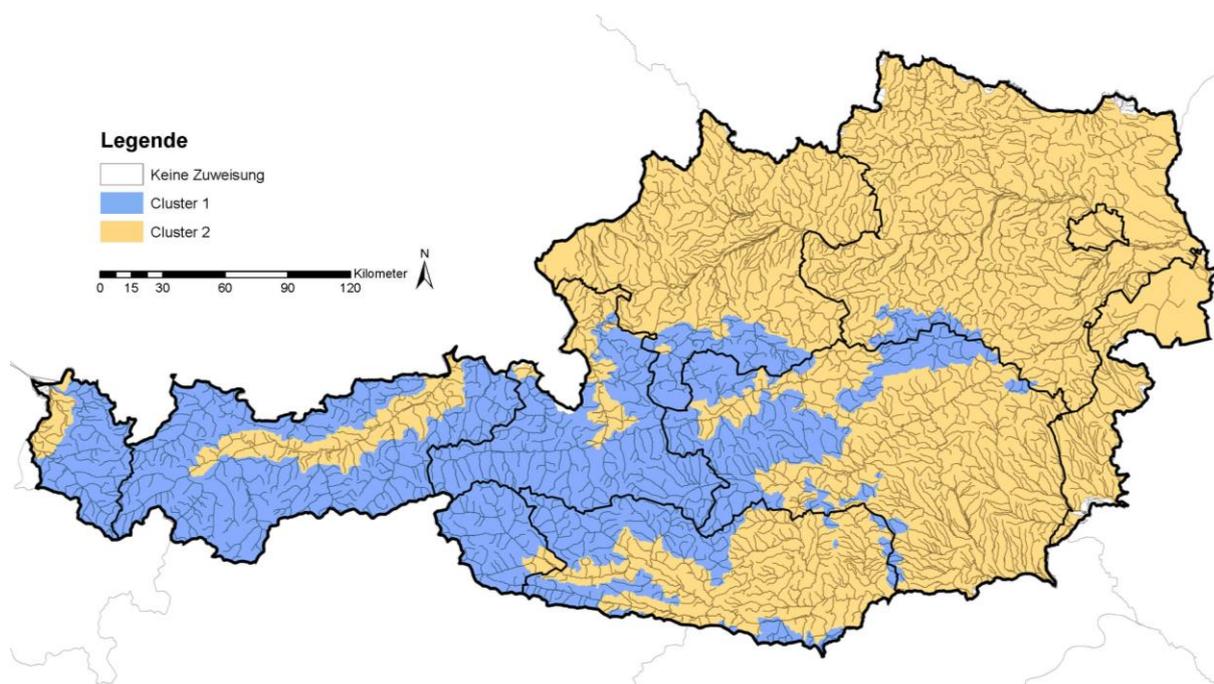


Abbildung 6: Clusterzugehörigkeit (Variablen: Seehöhe/Abflusspende) einzelner Teileinzugsgebiete gemäß Wasserbilanzmodell [2] (Cluster 1 – Gebirgsflüsse; Cluster 2 – Alpenvorlandflüsse).

Basierend auf den empirischen Modellen und der Clusterzugehörigkeit kann somit das zu erwartende jährliche natürliche Maximum der Abflussänderungsgeschwindigkeit flächendeckend für beliebige Teileinzugsgebiete gemäß Wasserbilanzmodell [2] abgeschätzt werden.

Dadurch wird ermöglicht, die Auftrittshäufigkeit und den Auftrittszeitpunkt von Abflussschwankungen einzelner kurzfristiger Abflussregime in Abhängig der jeweiligen Intensität österreichweit (oder darüber hinaus) im Detail zu analysieren: Anthropogene sowie natürliche Einflüsse können näher untersucht werden, um zB genauere Informationen hinsichtlich potentieller Quellen von kurzfristigen Abflussschwankungen zu erhalten. Aus technischer Sicht könnten unter Umständen zB Pegelstellen mit Messartefakten automatisch identifiziert werden. Aus gewässerökologischer Sicht kann eine detailliertere Beschreibung unbeeinflusster und anthropogen beeinflusster kurzfristiger hydrologischer Verhältnisse zu einem tiefer gehenden Verständnis von Fließgewässerökosystemen und zur Einrichtung eines zielgerichteten und effizienten Monitoringprogramms beitragen. Der Detaillierungsgrad von Einzugsgebietsanalysen im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie könnte durch die flächendeckende Analyse kurzfristiger hydrologischer Verhältnisse maßgeblich erhöht werden.

Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass es sich bei der erläuterten Vorgehensweise um eine Variante einer Methodik handelt, dessen Ziel es ist, einen „mittleren Bewertungsmaßstab“ zu definieren und nicht die Intensität von auftretenden natürlichen Ereignissen eines bestimmten Jahres exakt zu modellieren oder gar zu prognostizieren. Dies dürfte aufgrund der komplexen hydrologischen, meteorologischen und geologischen Randbedingungen Österreichs sowie aufgrund von zu erwartenden jährlichen Schwankungen aus heutiger Sicht lediglich mit weit-aus größerem Modellierungsaufwand möglich sein. Eine standardisierte, großräumig anwendbare Vorgangsweise zur detaillierten Beschreibung und Gegenüberstellung kurzfristiger hydrologischer Verhältnisse kann aller-

dings im umgekehrten Sinn in Zukunft wesentlich dazu beitragen, solche Phänomene im Detail zu untersuchen und genauer zu verstehen. Zusammenfassend ist es erforderlich, die erläuterte methodische Vorgehensweise mit dem Ziel eines standardisierten regionalen, nationalen und/oder internationalen Vergleichs kurzfristiger hydrologischer Abflussverhältnisse anzuwenden, weiter gehende Erfahrungen zu sammeln, gegebenenfalls zu erweitern und zu modifizieren.

2 Literatur

1. Auer S., Fohler N., Zeiringer B., Führer S., Schmutz S. (2014) Experimentelle Untersuchungen zur Schwallproblematik - Drift und Stranden von Äschen und Bachforellen während der ersten Lebensstadien. Forschungsbericht
2. BMLFUW (2007) Digitaler Hydrologischer Atlas Österreichs., Wien
3. BMLFUW (2015) Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015, Wien
4. Bunn S., Arthington A. (2002) Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4):492–507
5. Greimel F., Zeiringer B., Höller N., Grün B., Godina R., Schmutz S. (2016) A method to detect and characterize sub-daily flow fluctuations. *Hydrological Processes* 30:2063–2078
6. Illies J., Botosaneanu L. (1963) Problemes et methodes de la classification et de la zonation ecologique des eaux courantes, considerees surtout du point de vue faunistique. *Mitteilungen Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie* 12:1–57
7. Nagrodski A., Raby G., Hasler C., Taylor M., Cooke S. (2012) Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation. *Journal of Environmental Management* 103:133–141
8. Poff L., Allan D., Bain M., Karr J., Prestegard K., Richter B., Sparks R., Stromberg J. (1997) The Natural Flow Regime. *BioScience* 47:769–784
9. Schmutz S., Bakken T., Friedrich T., Greimel F., Harby A., Jungwirth M., Melcher A., Unfer G., Zeiringer B. (2015) Response of fish communities to hydrological and morphological alterations in hydropeaking rivers of Austria. *River Research and Applications* 31:919–930
10. Schmutz S., Fohler N., Friedrich T., Fuhrmann M., Graf W., Greimel F., Höller N., Jungwirth M., Leitner P., Moog O., Melcher A., Müllner K., Ochsenhofer G., Salcher G., Steidl C., Unfer G., Zeiringer B. (2013) Schwallproblematik an Österreichs Fließgewässern – Ökologische Folgen und Sanierungsmöglichkeiten, Wien
11. Unfer G., Hauer C., Lautsch E. (2011) The influence of hydrology on the recruitment of brown trout in an Alpine river, the Ybbs River, Austria. *Ecology of Freshwater Fish* 20:438–448
12. Vogel R., Fennessey N. (1994) Flow-duration curves. New interpretation and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management* 120:485–504