Modelle und Analyseschritte zur Erfassung von anthropogenen Einflüssen auf das Abflussregime und hydrologisches Monitoring-Konzept

zu Endbericht

SuREmMa+

Entwicklung einer Methode zur ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen zur Minderung von negativen schwall- und sunkbedingten ökologischen Auswirkungen

Wien, Juni 2021

Text und Inhalt

Franz Greimel (Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement BOKU), Bernhard Zeiringer (Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement BOKU), Norbert Höller (Zentraler Informatikdienst BOKU), Stefan Schmutz (Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement - BOKU)

Zitiervorschlag

Greimel, F., Zeiringer, B., Höller, N. & S. Schmutz (2021): Technischer Bericht I – Modelle und Analyseschritte zur Erfassung von anthropogenen Einflüssen auf das Abflussregime und hydrologisches Monitoringkonzept. Ergänzung zu Endbericht: SuREmMa+ Entwicklung einer Methode zur ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen zur Minderung von negativen schwall- und sunkbedingten ökologischen Auswirkungen, Forschungsbericht, Wien, 48 Seiten.

Präambel

Im Rahmen des 2017 abgeschlossenen SuREmMa Forschungsprojektes wurde auf Basis nationaler und internationaler Forschungsarbeiten das Konzept eines österreichweit anwendbaren Bewertungsinstrumentes zur ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung schwall- und sunkbedingter Auswirkungen entwickelt. In den ergänzenden technischen Berichten A bis C wurden die Grundlagen des entwickelten Bewertungskonzeptes näher beschrieben. Aus hydrologischer Sicht wurden in den technischen Berichte A und B unter anderem folgende Punkte behandelt:

- Definition von kurzfristigen Abflussschwankungen
- Erfassung und Quantifizierung kurzfristiger Abflussschwankungen anhand von hochauflösenden Abflussganglinien,
- Kurzfristige Abflussregime Österreichs
- Longitudinale Intensitätsbetrachtung von Schwallwellen
- Näherungsweise Bestimmung der aus Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen

Der vorliegende technische Bericht baut auf den genannten Kapiteln auf, indem gegebenenfalls Weiterentwicklungen der bereits beschriebenen Modelle und Analyseschritte behandelt werden bzw. basierend auf dem aktuellen Stand des Wissens ein hydrologisches Monitoring-Konzept vorgestellt wird. Das Monitoring-Konzept soll einen detaillierten Wirkungsnachweis direkter bzw. hydrologisch wirksamer Maßnahmen zur Verminderung schwallund sunkbedingter negativer ökologischer Auswirkungen ermöglichen. Die hydrologischen Monitoringdaten stellen außerdem eine wesentliche Grundlage für die Interpretation biologischer Monitoring-Daten dar. Das vorgestellte Monitoring-Konzept wurde im Rahmen von SuREmMa+ bei ausgewählten praxisbezogen Pilot-Fallbeispielen angewandt. Im nächsten Schritt sollte auf Basis einer exemplarischen Anwendung an den wesentlichen schwallbelasteten Gewässern Österreichs ein konsistentes und im Rahmen von Behördenverfahren einheitlich anwendbares Monitoring-Verfahren festgelegt werden.

Aufgrund dieses noch ausstehenden Schrittes ist das im vorliegenden technischen Bericht vorgestellte hydrologische Monitoring-Konzept als Methodenansatz zu sehen, deren österreichweite Anwendbarkeit im Ende 2020 startenden interdisziplinären Projekt ÖkoReSch noch abschließend zu überprüfen ist. Mit ÖkoReSch werden damit die Grundlagen für einen österreichweit anzuwendenden Leitfaden zur

- ökologischen, hydrologischen, wasserbaulichen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen zur Minderung von negativen schwall- und sunkbedingten ökologischen Auswirkungen,
- Erhebung abiotisch/biotischer in situ Monitoring-Daten für die zeitnahe Bewertung von umgesetzten Maßnahmen sowie
- Erstellung von Richtlinien für die Umsetzung von morphologischen Maßnahmen in schwallbelasteten Gewässern bereitgestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einle	eitung und Zielsetzung	2
י ר	Entr	geung von laurzfrietigen Abflussenhungen	
2	Liia		
3	Lagr	ange sche Betrachtungsweise	6
	3.1	Datengrundlage	6
	3.2	Identifikation von assoziierten Ereignissen und longitudinale Intensitätsmodellierung	7
	3.3 Wasser	Näherungsweise Bestimmung der aus Abflussschwankungen resultierenden spiegelschwankungen	
	3.4	Ergebnisse - Quellenspezifisches Monitoring	
	3.4.1	Retentionskurven dQ/dt	
	3.4.2	Retentionskurven dW/dt	
4	Eule	r`sche Betrachtungsweise	14
	4.1	Standardisierte Selektion von Abflussschwankungen	14
	4.2	Absolute und relative Intensität von Abflussschwankungen	17
	4.3	Datengrundlage	19
	4.4	Jährliches Abflussregime und Auswahl von Referenz-Abflussganglinien	
	4.5	Ergebnisse - Quellenunabhängiges Monitoring/kurzfristiges Abflussregime	
	4.5.1	Referenz-Abflussganglinie	
	4.5.2	Kurzfristiges Abflussregime – Pegel 1	
	4.5.3	Kurzfristiges Abflussregime – Pegel 3	
	4.5.4	Kurzfristiges Abflussregime – Pegel 5	
	4.5.5	Zusammenfassung	41
5	Vers	chneidung Euler/Lagrange	43
6	Schl	ussfolgerungen und Ausblick	44
7	Liter	ratur	

1 Einleitung und Zielsetzung

Im vorliegenden technischen Bericht I wird ein hydrologisches Monitoringkonzept vorgeschlagen, welches ermöglichen soll das (kurzfristige) Abflussregime eines Gewässerabschnittes zu erfassen, dessen zeitliche Variabilität zu beschreiben und im Falle von anthropogen beeinflussten Verhältnissen auf den spezifischen Einfluss unterschiedlicher Quellen von kurzfristigen Abflussschwankungen schließen zu können. Die hydrologischen Monitoring-Daten sollen gemeinsam mit der Beschreibung der morphologisch/sedimentologischen Verhältnisse (vgl. Technischer Bericht II) eine Grundlage für die Interpretation der ökologischen Situation eines Gewässerabschnittes (vgl. Technischer Bericht IV) darstellen.

Die Vorgehensweise wird am fiktiven Fallbeispiel (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht Kapitel 2.3) veranschaulicht. Das fiktive Fallbeispiel spiegelt in Bezug auf die abiotischen, ökologischen und energiewirtschaftlichen Standortbedingungen ein typisches schwallbelastetes Teileinzugsgebiet Österreichs wider. Neben dem Kraftwerksdurchfluss werden im fiktiven Fallbeispiel fünf Abflussganglinien aufgezeichnet. Sämtliche Abflussganglinien stellen im Prinzip tatsächlich existierende Abflussganglinien dar, an welchen die beschriebenen Methodenansätze angewandt wurden. Allerdings wurden sowohl die Auftrittshäufigkeit als auch die Intensität der Abflussschwankungen jeweils mit einem gleichbleibenden Faktor multipliziert und die räumliche Lage der Pegelstellen adaptiert, um zu verhindern, dass auf die dahinterliegende reale Situation geschlossen werden kann. **Die dem fiktiven Fallbeispiel zugrundeliegenden Abflussganglinien wurden so gewählt, dass mögliche Grenzen der Modellansätze aufgezeigt werden können, um im vorliegenden technischen Bericht auf Lösungsansätze einzugehen.** Zusammenfassend wird explizit darauf hingewiesen, dass das fiktive Fallbeispiel ausschließlich der Veranschaulichung der Vorgehensweise und der Interpretationsmöglichkeiten der Ergebnisse dient. **Die mit Bezug zum fiktiven Fallbeispiel dargestellten Ergebnisse können aufgrund der Variabilität der übergeordneten Randbedingungen im Einzugsgebiet bzw. des untersuchten Gewässerabschnittes nicht verallgemeinert, oder auf bestimmte reale Pilot-Fallbeispiele übertragen werden.**



Abbildung 1: Übersichtsdarstellung fiktives Fallbeispiel (Speicherkraftwerk 1: fkm 25; rechter Bildrand: fkm 0; P: permanente (Nr. 1, 3 und 5) und temporäre Pegelstellen (Nr. 2 und 4)

Ganglinie	EZG	Lage	MQ	Q95
Тур	(km²)	(fkm)	(m³/s)	(m³/s)
KW-Durchfluss	390	25	17.8	3.4
Pegel 1	400	23.5	18	3.5
Pegel 2 - temporär	500	18	20	4
Pegel 3	650	14	25	5
Pegel 4 - temporär	800	6	32	6
Pegel 5	900	1	35	7

Tabelle 1: Überblick - Abflussganglinien im fiktiven Fallbeispiel

(MQ und Q95 – Abflusskennzahlen gemäß digHAO (BMLFUW, 2007), der Kraftwerksdurchfluss-Ganglinie wurden die Werte bei der Einleitestelle zugewiesen)

2 Erfassung von kurzfristigen Abflussschwankungen

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 (z. B. ausgelöst durch Niederschlagsereignisse) sein oder anthropogen erzeugt werden (z. B. Schwallwellen) und können dementsprechend unterschiedlichen Schwankungs- bzw. Wellentypen zugewiesen werden (Greimel et al. 2016). Die algorithmenbasierte Erfassung und Quantifizierung von kurzfristigen Abflussschwankungen ermöglicht es, die in Abflussganglinien dokumentierte hydrologische Situation automatisiert zu erfassen. Dabei werden Abflussanstiegs- und Abflussabstiegsereignisse unterschieden. Zusammenhängende Abflussanstiege, bzw. Abflussrückgänge (oder Abflussabstiege) werden dabei als ein Ereignis (Sauterleute & Charmasson, 2014; Greimel et al. 2016) oder eine Abflussschwankung bezeichnet (vgl. Abbildung 2). Die Definition des in SuREmMa und SuREmMa+ angewandten Algorithmus wird in Greimel et al. 2016 erläutert und die Erfassung einzelner Abflussan- und Abstiegsereignisse am Beispiel unterschiedlicher in Österreich zu beobachtender Wellentypen dargestellt (vgl. auch Greimel et al. 2017a). Die Ereignisintensität eines An- oder Abstiegsereignisses sowie die Auftrittshäufigkeit wird durch mehrere Parameter quantifiziert (vgl. Tabelle 2). Zudem wird der Auftrittszeitpunkt von jedem Ereignis erfasst. Die maximale Auflösung der Abflussganglinien beträgt bei permanent und österreichweit betriebenen Pegelstellen 15 Minuten, bei temporären Pegelstellen 1 Minute, wobei sich sämtliche Auswertungen im Rahmen des SuREmMa+ Projektes auf 15 Minuten Werte beziehen.



Abbildung 2: Ereignisdefinition und maßgebliche Parameter zu Beschreibung der Ereignisintensität (Q_{max} : Maximalabfluss des Ereignisses; Q_{tsn} Abflusswert eines bestimmten Zeitschrittes während des Ereignisses; Q_{tsn+1} : Abflusswert des darauffolgenden Zeitschrittes während des Ereignisses; Q_{min} : Minimalabfluss des Ereignisses; t_{sb} : Zeitschritt Ereignisbeginn; t_{se} : Zeitschritt Ereignisende).

Tabelle 2: Ereignisbezogene Intensitäts	(Nr. 1-5)	und Häufigkeitsparameter	(z.B. Nr. 6)	: Definitionen und Einheiten.
---	-----------	--------------------------	--------------	-------------------------------

Nr.	Parameter	Acronym	Definition	Einheit
1	Maximale Abflussänderungsge- schwindigkeit	MAFR	$max(abs((Q_{tsn+1}) - (Q_{tsn})))$	m^3/s^2
2	Mittlere Abflussänderungsgeschwin- digkeit	MEFR	Amplitude/Dauer	m^3/s^2
3	Amplitude	AMP	Q _{max} - Q _{min}	m³/s
4	Sunk-Schwall-Verhältnis	RATIO	Q _{max} /Q _{min}	
5	Dauer	DUR	ts _e - ts _b	S
6	Anzahl	CNT	Ereignisanzahl in einer bestimmten Periode	

 $(\overline{t_{sb}}-Zeitschritt Eventbeginn, ts_e - Zeitschritt Eventende, Q_{max} - Maximalabfluss, Q_{min} - Minimalabfluss, Q_{tsn} - Abfluss eines bestimmten Zeitschrittes, Q_{tsn+1} - Abfluss des darauffolgenden Zeitschrittes, max - Maximum, abs - absolut, s - Sekunde (1 ts <math>\triangleq$ 900 Sekunden oder 15 Minuten).

Die aus den Abflussganglinien erhobene Information lässt sich grundsätzlich durch zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen analysieren, darstellen und interpretieren - der Lagrange'schen (vgl. Kapitel 3.4) und der Euler'schen (vgl. Kapitel 3) Betrachtungsweise. Bei der Euler'schen Betrachtungsweise wird die Bewegung eines Körpers von einem raumfesten Punkt aus analysiert. Im Gegensatz dazu wird die Bewegung des Körpers bei der Lagrange'schen Betrachtungsweise von einem seiner materiellen Punkte aus untersucht. Um die hydrologische Situation eines (Teil-)Einzugsgebietes erfassen zu können sind grundsätzlich beide Betrachtungsweisen sinnvoll. Bei der Lagrange'schen Betrachtungsweise werden Abflusswellen ausgehend von einer bestimmten Quelle (beispielsweise einer Schwalleinleitung) flussab verfolgt, um die Intensität der Schwallwellen im longitudinalen Gewässerverlauf bzw. im Längsschnitt eines betrachteten Gewässerabschnittes zu erfassen. Dabei wird eine spezifische Welle an mehreren Pegelstellen identifiziert. Durch die Identifikation einer Vielzahl an "assoziierten Wellen" kann die Veränderung der Wellenform von Pegelstelle zu Pegelstelle erfasst und anhand von Modellen beschrieben werden (Greimel et al., 2017b). Die Lagrange'sche Betrachtungsweise ist dementsprechend anzuwenden, wenn die von einer spezifischen Schwalleinleitung ausgehende ökologische Belastung oder auch die Wirkung bestimmter Maßnahmen zur direkten Schwalldämpfung (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht – Kapitel 2.2.1) longitudinal beschrieben oder auch prognostiziert werden soll (**quellenspezifisches Monitoring**). Die Ergebnisse der Lagrange'schen Betrachtungsweise sind eine wesentliche Grundlage für die Anwendung der SuREmMa+ Bewertungsmethode (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht – Kapitel 3).

3.1 Datengrundlage

Um ein (Teil-)Einzugsgebiet anhand der Lagrange`sche Betrachtungsweise analysieren zu können, sind neben der Abflussganglinie der zu analysierenden Quelle (z. B. eines schwallerzeugenden Kraftwerks) im flussab gelegenen Einflussbereich der Quelle mindestens zwei weitere Abflussganglinien erforderlich. Diese Mindestanforderung ist darauf zurückzuführen, dass die longitudinale Wellenverformung im Allgemeinen nichtlinearen Trends folgt. Generell gilt jedoch: Je mehr Abflussganglinien zur Verfügung stehen und je besser diese im Untersuchungsgebiet verteilt sind und je höher der Zeitreihenumfang ist, desto exakter kann die Wellenverformung erfasst bzw. modelliert werden. Im fiktiven Fallbeispiel wurden zur Verdüchtung der Datenverfügbarkeit neben den permanent betriebenen Pegelstellen zusätzlich zwei temporäre Pegelstellen installiert (vgl. Abbildung 1, Tabelle 1). Ein weiterer wichtiger Aspekt der Installation von temporären Pegelstellen ist, dass die Daten in einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Minute erfasst werden, während die momentane maximal verfügbare Auflösung der Ganglinien des hydrographischen Dienstes auf 15 Minuten-Werte begrenzt ist. Durch die höhere Auflösung der temporären Pegelsonden kann z. B. eingestuft werden, ob die von einer spezifischen Quelle ausgehenden Schwallwellen anhand der 15 Minuten-Werte korrekt erfasst werden können. Vor allem in den ersten Flusskilometern flussab einer Schwall-Einleitung kann die Installation einer temporären Pegelsonde erforderlich sein, wenn davon auszugehen oder bekannt ist, dass das schwallerzeugendes Kraftwerk innerhalb von wenigen Minuten gesteuert wird.

Soll die Wirkung von direkten Maßnahmen zur Verringerung schwall- und sunkbedingter negativer ökologischer Auswirkungen (direkte/indirekte Maßnahmen - vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht – Kapitel 2.2) anhand der Lagrange`schen Betrachtungsweise evaluiert werden, empfiehlt es sich vor (hydrologisches Prä-Monitoring) und nach Maßnahmenumsetzung (Post-Monitoring) einen Zeitreihenumfang von jeweils mindestens zwei Jahre analysieren zu können.

3.2 Identifikation von assoziierten Ereignissen und longitudinale Intensitätsmodellierung

Assoziierte Ereignisse (AE) sind Abflussschwankungen einer übereinstimmenden Quelle, welche an zwei Pegelstellen ohne Einfluss von anderen Abflussschwankungen oder Messartefakten ungestört aufgezeichnet wurden. Um AE identifizieren zu können, spielt der Auftrittszeitpunkt und – im Zusammenhang mit dem Kontinuitätsgesetz – die Ereignisamplitude eine wesentliche Rolle. Die Identifikation von AE sowie die darauf aufbauende longitudinale Intensitätsmodellierung erfolgte im Rahmen von SuREmMa+ gemäß Greimel et al. 2017b, wobei sich im Zuge der Anwendung des Modellansatzes in SuREmMa+ herausgestellt hat, dass sich bei der Identifikation von assoziierten Ereignissen auch mit einem vereinfachten Modellansatz weitgehend übereinstimmende Ergebnisse erzielen lassen.

Im Rahmen von SuREmMa+ erfolgte die Identifikation von assoziierten Ereignissen ohne a priori Ausschluss von Ereignissen basierend auf lediglich zwei Kriterien:

Kriterium 1: Der Auftrittszeitpunkt eines Ereignisses muss näherungsweise übereinstimmen, wenn die Fließzeit zwischen den Pegelstellen vom Auftrittszeitpunkt bei der flussab gelegenen Zeitreihe subtrahiert wird (vgl. Abbildung 3 - 1).

Kriterium 2: Die Amplitude des Ereignisses muss aufgrund des Kontinuitätsgesetzes näherungsweise übereinstimmen, wenn die Abflusswelle ein ausgeprägtes Plateau aufweist (Plateau > als 1-2 Stunden) (vgl. Abbildung 3-2, 3).



Abbildung 3: Systemskizze zur Identifikation von Assoziierten Abstiegsereignissen (grau) zweier benachbarter Pegelstellen (Q - Abfluss; t - Zeit; oben - Abflusswelle gemessen am flussab gelegenen Pegel; unten - Abflusswelle gemessen am flussab auf gelegenen Pegel; 1 - Fließzeit zwischen den Pegelstellen; 2 - Amplitude des flussauf gemessenen Ereignisses; 3 - Amplitude des flussab gemessenen Ereignisses)

Nachdem eine möglichst hohe Anzahl an AE identifiziert worden ist, kann die Intensitätsveränderung zwischen zwei benachbarten Pegelstellen (bezugnehmend auf einzelnen Intensitätsparameter – vgl. Tabelle 2) anhand von einfachen linearen Regressionsmodellen (basierend auf den AE) beschrieben werden. Anhand der Modellergebnisse von mehreren einzelnen Pegelpaaren kann anschließend der (i. A. nichtlineare) longitudinale Intensitätsverlauf der Abflussschwankungen eines bestimmten schwallerzeugenden Kraftwerks erfasst werden (longitudinale Intensitätsmodellierung). Die longitudinale Intensitätsbetrachtung bezugnehmend auf die Abflussänderungsgeschwindigkeit von An- und Abstiegsereignissen (Retentionskurven dQ/dt) ist eine wesentliche Grundlage für die Anwendung der SuREmMa+ Bewertungsmethode (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht Kapitel 3.1.1.)

3.3 Näherungsweise Bestimmung der aus Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen

Auch die näherungsweise Bestimmung der aus den Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen erfolgte im Rahmen von SuREmMa+ (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht Kapitel 3.1.1.2) gemäß Greimel et al. 2017b, wobei die Vorgehensweise durch eine Kalibrierung des Modells anhand von Pegelschlüsselkurven in frei fließenden Gewässerabschnitten des Untersuchungsgebietes erweitert wurde.

Bei der näherungsweisen Bestimmung der resultierenden Wasserspiegelschwankungen wird davon ausgegangen, dass bei (frei fließenden) Gewässerstrecken mit vergleichbarer Gewässergeometrie die aus übereinstimmenden Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen ähnlich ausfallen müssen. Um vergleichbare Gewässerstrecken in einzelne Gruppen zusammenzufassen, wurden sämtliche Teileinzugsgebiete Österreichs (gemäß BMLFUW, 2007) nach den Variablen "Seehöhe" und "mittlere jährliche Abflussspende" insgesamt 5 Clustern zugewiesen. Anschließend wurden für die einzelnen Cluster, basierend auf sämtlichen Pegelschlüsselkurven von Pegelstellen in freifließenden Gewässerabschnitten, überregionale Regressionsmodelle erstellt, welche anhand der Parameter Einzugsgebietsgröße und Gewässerbreite ermöglichen, die mittlere spezifische vertikale Wasserspiegeländerung bei einer Abflussänderung von 1 m³/s (dW_{spez}) für unterschiedliche Abflussbereiche (Niederwasser-, Mittelwasser und erhöhter Abflussbereich) abzuschätzen (Greimel et al. 2017b).

Bei der Anwendung des Regressionsmodells im Rahmen von SuREmMa+ bzw. der Gegenüberstellung mit den Ergebnissen von hydrodynamisch- numerischen Modellen und/oder den Werten von im Untersuchungsgebiet vorhandenen Pegelschlüsselkurven aus frei fließenden Gewässerabschnitten, wurde ersichtlich, dass in hydromorphologisch ähnlichen Gewässerabschnitten eines bestimmten Gewässers, auch von einem ähnlichen Modellfehler auszugehen ist. Daher ist es grundsätzlich zielführend, das Regressionsmodell zu kalibrieren, wenn die Datenlage dies erlaubt, bzw. im Untersuchungsgebiet repräsentative Pegelschlüsselkurven aus frei fließenden Gewässerabschnitten vorhanden sind. Dazu werden die Ergebnisse des Regressionsmodelles den Werten der Pegelschlüsselkurven gegenübergestellt und der mittlere Modellfehler berechnet. Anschließend kann das Regressionsmodell kalibriert werden, indem die Ergebnisse so angepasst werden, dass der mittlere Modellfehler null beträgt.

Nachdem im fiktiven Fallbeispiel gewässermorphologische und hydrologische Daten grundsätzlich von realen Gewässerabschnitten übertragen wurde, kann der Kalibrierungsvorgang am fiktiven Fallbeispiel dargestellt werden (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht Kapitel 2.3). Im fiktiven Fallbeispiel befinden sich insgesamt fünf repräsentative Pegelstellen in frei fließenden Gewässerabschnitten. In den Pegelprofilen ist dW_{spez} für unterschiedliche

Abflussbereiche bekannt. Die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen des Regressionsmodelles zeigt, dass dW_{spez} in den Pegelprofilen durch das Regressionsmodell im Niederwasserbereich im Mittel um 26% unterschätzt, im Mittelwasser- und im erhöhten Abflussbereich um 5 bzw. 20% überschätzt wird (vgl. Tabelle 3, Abbildung 4 links). Im Rahmen des Kalibrierungsvorganges werden die Modellergebnisse so angepasst, dass der mittlere Modellfehler null beträgt (vgl. Abbildung 4 – rechts)

Tabelle 3: Gegenüberstellung der mittleren spezifischen vertikalen Wasserspiegeldifferenz (dW_{spez}) gemäß Regressionsmodell und Pegelschlüsselkurven in freifließenden Gewässerabschnitten und Berechnung des mittleren Modellfehlers für unterschiedliche Abflussbereiche.

	dW _{spez} Regressionsmodell (m)		dW _{spez} Pegelschlüssel (m)			Verhältnis Pegelschlüssel/Modell			
Pegel-Nr.	NW	MW	HW	NW	MW	HW	NW	MW	HW
1	0.0281	0.0177	0.0126	0.0396	0.0141	0.0098	1.41	0.80	0.78
2	0.0208	0.0133	0.0102	0.0246	0.0105	0.0067	1.19	0.79	0.66
3	0.0220	0.0134	0.0110	0.0280	0.0142	0.0097	1.27	1.06	0.88
4	0.0213	0.0131	0.0107	0.0304	0.0154	0.0094	1.42	1.17	0.88
5	0.0205	0.0124	0.0104	0.0208	0.0114	0.0082	1.02	0.92	0.78
Mittelwert							1 26	0.95	0.80

(NW – Abflussbereich Q_{95PCT} bis 3xQ_{95PCT}, MW – Abflussbereich 3xQ_{95PCT} bis 2xMQ, HW – Abflussbereich 2xMQ bis 5xMQ)



Abbildung 4: Mittlere spezifische vertikale Wasserspiegeldifferenz (dW_{spez}) gemäß Regressionsmodell (Linien) vor (links) und nach Kalibrierung (rechts) und Gegenüberstellung mit den Werten aus repräsentativen Pegelschlüsselkurven in frei fließenden Gewässerabschnitten (Vierecke - Abflussbereich Q95PCT bis 3xQ95PCT (NW), Kreise - Abflussbereich 3xQ95PCT bis 2xMQ (MW), Dreiecke - Abflussbereich 2xMQ bis 5xMQ (MW))

Die beschriebene Kalibrierung wurde in sämtlichen Pilot-Fallbeispielen, welche im Rahmen von SuREmMa+ bearbeitet wurden (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht Kapitel 2.3), durchgeführt, wodurch die Ergebnisse des Regressionsmodelles durchgehend verbessert werden konnten, wie auch eine zusätzliche Validierung mit den Werten der im Untersuchungsgebietes befindlichen hydrodynamisch-numerischen Modellstrecken zeigte.

3.4 Ergebnisse - Quellenspezifisches Monitoring

3.4.1 Retentionskurven dQ/dt

In Abbildung 5 ist der longitudinale Verlauf der Abflussänderungsgeschwindigkeit mit unterschiedlicher Ausgangsintensität (Szenario F bis B3 - vgl. Kapitel 2.2.1) dargestellt (Retentionskurven – dQ/dt). Die Kilometrierung (fkm) bezieht sich dabei – der Vorgehensweise des Modellansatzes folgend – auf die Entfernung zur Schwalleinleitestelle. Die Abflussänderungsgeschwindigkeit der An- und Abstiegsereignisse kann sich im longitudinalen Verlauf unterschiedlich verhalten (vgl. Abbildung 5 – a vs. b). Die Abflussänderungsgeschwindigkeit von Abflussanstiegsereignissen kann über mehrere Flusskilometer weitgehend konstant bleiben, oder sogar zunehmen, während für Abstiegsereignisse im Rahmen der bisherigen Anwendung des Modellansatzes ausnahmslos eine Verringerung der Abflussänderungsgeschwindigkeiten beobachtet wurde.

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der zwischen den benachbarten Pegelstellen angepassten linearen Modelle dargestellt (Punkte), die in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst werden. Die von Speicherkraftwerk 1 (Station 1) ausgehenden Schwallwellen können anhand der herangezogenen Abflussganglinien offensichtlich (nur) rund 12 Flusskilometer, bzw. bis zum Stauraum des Laufkraftwerkes (vgl. Abbildung 1), flussab verfolgt werden. Zwischen Station 3 (Pegel 2) und 4 (Pegel 3) können, sowohl Abflussan- als auch Abstiegsereignisse betreffend, nur noch rund 30 assoziierte Ereignisse (AE) identifiziert werden (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5), womit weiter flussab die Anzahl an AE zu gering ist, um ein aussagekräftiges Modell anpassen zu können und somit den Intensitätsverlauf weiter flussab verfolgen zu können. Anhand der dargestellten "Stützstellen" (Punkte) wird ersichtlich, dass der Kurvenverlauf in der unteren Hälfte des Untersuchungsgebietes – vor allem Abstiegsereignisse betreffend –nicht aussagekräftig extrapoliert werden kann.

Möglicherweise werden im fiktiven Fallbeispiel die von Speicherkraftwerk 1 ausgehenden Abflussschwankungen vom Laufkraftwerk beeinflusst, sodass die Identifikation von AE flussab des Laufkraftwerkes, etwa durch eine Unterbrechung der Ereignisse, erschwert wird. Eine andere Möglichkeit ist, dass die Datenauflösung der Ganglinien (15 Minuten) zu gering ist, um die bei Speicherkraftwerk 1 eingeleiteten Abflussschwankungen akkurat erfassen zu können. Durch die Ergebnisse der Eulersch'en Betrachtungsweise können diesbezüglich weitere Informationen gewonnen werden (vgl. Kapitel 4.5.5).





Abbildung 5: Szenarienspezifische Retentionskurven dQ/dt (Wirkungsszenario B3 bis F - vgl. SuREmMa Forschungsbericht Kapitel 2.2.1) im fiktiven Fallbeispiel für An- (a) und Abstiegsereignisse (b) (Punkte entsprechen den Ergebnissen der linearen Modelle zwischen zwei benachbarten Pegelstellen)

Station.x	Station.y	Metric	d	k	Ν	R ²	Def_Metric
S1	S2	Metric_1	0.11	0.97	1737	0.94	AMP
S1	S2	Metric_2	0.42	0.84	1737	0.72	MAFR
S1	S2	Metric_3	0.75	0.66	1737	0.45	MEFR
S1	S2	Metric_4	0.88	0.66	1737	0.37	DUR
S2	S3	Metric_1	-0.25	0.97	646	0.94	AMP
S2	S3	Metric_2	0.19	0.84	646	0.74	MAFR
S2	S3	Metric_3	0.54	0.59	646	0.48	MEFR
S2	S3	Metric_4	0.86	0.79	646	0.48	DUR
S2	S3	Metric_5	0.27	0.74	646	0.94	RATIO
S3	S4	Metric_1	-0.25	0.90	29	0.94	AMP
S3	S4	Metric_2	0.50	0.48	29	0.77	MAFR
S3	S4	Metric_3	0.64	0.23	29	0.61	MEFR
S3	S4	Metric_4	1.85	0.77	29	0.48	DUR
S3	S 4	Metric_5	0.23	0.78	29	0.98	RATIO

Tabelle 4: Fiktives Fallbeispiel - Speicherkraftwerk 1: Lineare Modelle zur Beschreibung der Intensitätsveränderung zwischen benachbarten Pegelstellen für Abflussanstiegsereignisse

 $(Station.x - Oberliegerganglinie (S1 entspricht Kraftwerksdurchfluss), Station.y - Unterliegerganglinie (S4 entspricht Pegel Nr. 3), Def_Metric - vgl. Tabelle 2, d - Achsenabschnitt, k - Steigung, N - Anzahl assoziierter Ereignisse, R² - quadrierter Korrelationskoeffizient)$

Tabelle 5: Fiktives Fallbeispiel - Speicherkraftwerk 1: Lineare Modelle zur Beschreibung der Intensitätsveränderung zu	wi-
schen benachbarten Pegelstellen für Abflussabstiegsereignisse	

Station.x	Station.y	Metric	d	k	Ν	R ²	Def_Metric
S1	S2	Metric_1	0.15	0.96	1782	0.94	AMP
S1	S2	Metric_2	0.45	0.70	1782	0.67	MAFR
S1	S2	Metric_3	0.72	0.46	1782	0.36	MEFR
S1	S2	Metric_4	1.15	0.85	1782	0.29	DUR
S2	S3	Metric_1	-0.27	1.00	721	0.94	AMP
S2	S3	Metric_2	0.30	0.70	721	0.84	MAFR
S2	S3	Metric_3	0.36	0.56	721	0.63	MEFR
S2	S3	Metric_4	-0.05	1.32	721	0.62	DUR
S2	S3	Metric_5	0.04	0.95	721	0.95	RATIO
S3	S4	Metric_1	-0.11	0.94	32	0.98	AMP
S3	S4	Metric_2	0.10	0.68	32	0.92	MAFR
S3	S4	Metric_3	0.19	0.50	32	0.72	MEFR
S3	S4	Metric_4	-0.93	1.74	32	0.82	DUR
S 3	S4	Metric 5	0.01	0.99	32	0.92	RATIO

 $(Station.x - Oberliegerganglinie (S1 entspricht Kraftwerksdurchfluss), Station.y - Unterliegerganglinie (S4 entspricht Pegel Nr. 3), Def_Metric - vgl. Tabelle 2, d - Achsenabschnitt, k - Steigung, N - Anzahl assoziierter Ereignisse, R² - quadrierter Korrelationskoeffizient)$

3.4.2 Retentionskurven dW/dt

Abhängig von den hydromorphologischen Begebenheiten einer Gewässerstrecke (Flussgeometrie, Gefällsverhältnisse, Rauhigkeitsverhältnisse) und den jeweiligen Abflussverhältnissen resultieren aus den Abflussschwankungen Wasserspiegelschwankungen in sehr variablem Ausmaß. Deshalb ist es erforderlich die zu erwartenden resultierenden Wasserspiegelschwankungen im longitudinalen Verlauf näherungsweise zu bestimmen (vgl. Kapitel 3.3). Die Retentionskurven dW/dt (vgl. Abbildung 6) werden durch die Multiplikation der Retentionskurven dQ/dt (vgl. Abbildung 5) mit dW_{spez} (vgl. Abbildung 4) berechnet, wobei die Flusskilometrierung hier der orographischen Kilometrierung im Donaueinzugsgebiet folgt (um in weiterer Folge die Retentionskurven mehrerer Schwalleinleitungen einfacher in einem Diagramm zusammenfassen zu können). Die Retentionskurven dW/dt stellen die Grundlage zur Einstufung des Drift- und Strandungsrisikos für Gewässerorganismen dar (vgl. Su-REmMa+ Forschungsbericht Kapitel 3.2).

Anhand der Retentionskurven dW/dt wird ersichtlich, dass die Intensität der durch den Schwallbetrieb ausgelösten Wasserspiegelschwankungen in erheblichem Ausmaß von den Abflussbedingungen im Gewässer abhängig ist (Abbildung 6 - a, d vs. b, e vs. c, f). Der sprunghafte Trend bei fkm 20 resultiert aus der punktuellen Veränderung der dem Regressionsmodell zugrundeliegenden Modellparameter bei der Mündung des ersten rechtsufrigen Zubringers flussab der Schwalleinleitung (vgl. auch Abbildung 4).



Abbildung 6: Szenarienspezifische (Szenarien-Beschriftung – siehe a, d) Retentionskurven dW/dt (Wirkungsszenario B3 bis F - vgl. SuREmMa Forschungsbericht Kapitel 2.2.1) im fiktiven Fallbeispiel bei niedrigen (NW - a, d), mittleren (MW - b, e) und erhöhten Abflussbedingungen (HW - c, f) für Ablussan- (a, b, c) und Abstiegsereignisse (d, e, f)

4 Euler`sche Betrachtungsweise

Bei der Euler'schen Betrachtungsweise werden an einem bestimmten Pegelprofil mehrere Abflusswellen unabhängig von ihrer Quelle erfasst. Dementsprechend ermöglicht es die Euler'sche Betrachtungsweise, das kurzfristige Abflussregime bezugnehmend auf diverse räumliche Skalenebenen (z. B. Land, Region, Einzugsgebiet, Teileinzugsgebiet, Gewässerabschnitt) anhand der verfügbaren Abflussganglinien zu erfassen und – wenn der Zeitreihenumfang dies zulässt – die Verhältnisse unterschiedlicher Perioden gegenüberzustellen. Die Euler'sche Betrachtungsweise ist somit anzuwenden, wenn eine hydrologische Beeinflussung unabhängig von der/den Quelle(n) erfasst werden soll (**quellenunabhängiges Monitoring**). Die durch die Euler'sche Betrachtungsweise gewonnene hydrologische Information ist eine essentielle Grundlage, um das kurzfristige Abflussregime eines Gewässerabschnittes erfassen und aus ökologischer Sicht interpretieren zu können.

4.1 Standardisierte Selektion von Abflussschwankungen

Bei der Euler'schen Betrachtungsweise ist es im Allgemeinen das Ziel, die in einer oder mehreren Abflussganglinien dokumentierte hydrologische Information (z. B. Auftrittshäufigkeit und Intensität bestimmter Abflussschwankungen) zu analysieren und zu interpretieren. Dazu ist eine standardisierte (d. h. in einem eindeutig definierten und übereinstimmenden Intensitätsbereich) Selektion von (bezugnehmend auf die jeweilige Forschungsfrage relevanten) Abflussschwankungen erforderlich. Wenn mehrere Abflussganglinien untersucht werden sollen, ist es aufgrund der bei regionalen und überregionalen Analysen im Allgemeinen sehr unterschiedlichen Flussgrößen meist nicht zielführend, eine Selektion bestimmter Abflussschwankungen auf absolute Werte zu beziehen. Wenn man beispielsweise sämtliche Abflussschwankungen mit einer Amplitude über 1 m³/s selektieren würde, erfasst man bei einem kleinen Gewässer sehr wenige Ereignisse, während bei einem sehr großen Gewässer unter Umständen sämtliche aufgezeichneten Abflussschwankungen selektiert werden würden. Auch eine Standardisierung im Verhältnis zur Einzugsgebietsgröße oder im Verhältnis zum mittleren Abfluss (MQ) ist nicht zielführend, wenn aus mehreren Abflussganglinien Abflussschwankungen mit vergleichbarer Intensität selektiert werden sollen, da auch die dementsprechend standardisierten Werte sehr stark von der Flussdimension abhängig sind. Zum Beispiel kann es bei einem Gewässer im Wienerwald (i. A. Einzugsgebiete mit hohem Abflussbeiwert) vorkommen, dass die Abflussänderungsgeschwindigkeit eines auf ein natürliches Starkniederschlagsereignis zurückzuführenden Abflussanstieges innerhalb von 15 min mehr als 350 % von MQ beträgt, während dieser Wert in der Donau bei einem natürlichen Ereignis mit hoher Intensität lediglich in der Größenordnung von rund 5 % von MQ liegt. Zur standardisierten Selektion von Abflussschwankungen ist daher ein überregionaler "Vergleichsmaßstab" erforderlich, der sowohl bei unbeeinflussten als auch bei anthropogen beeinflussten Abflussganglinien herangezogen werden kann, um aus den einzelnen Ganglinien Abflussschwankungen in einem vergleichbaren Intensitätsbereich selektieren und damit die Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen in Abhängigkeit der jeweiligen Intensität analysieren zu können (Greimel et al. 2016).

Eine Lösung dieses Problems verspricht ein Bezug zur Intensität natürlicher Abflussschwankungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Flussgröße. Die zu erwartende Intensität natürlicher Ereignisse kann im Falle einer anthropogen unbeeinflussten hydrologischen Situation direkt aus der zu analysierenden Abflussganglinie abgeleitet werden, oder, wenn zu erwarten ist, dass die in einer Abflussganglinie aufgezeichneten Abflussschwankungen weitgehend auf anthropogene Ursachen zurückzuführen oder zumindest maßgeblich anthropogen beeinflusst sind (z. B. bei Abflussganglinien aus schwallbelasteten Gewässern) von unbeeinflussten Abflussganglinien übertragen werden (Greimel et al. 2016, 2017a). Als "Vergleichsmaßstab" zur standardisierten Selektion von Ereignissen bietet sich die zu erwartende jährliche Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen an (GW₁₀₀). Um die zu erwartende Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen unter Berücksichtigung der Flussgröße flächendeckend (und somit auch für anthropogen beeinflusste Abflussganglinien) abschätzen zu können, wurden im SuREmMa Projekt sämtliche in Österreich verfügbaren hochauflösenden Abflussganglinien analysiert, bei welchen davon auszugehen ist, dass die jährlich auftretende Maximalintensität auf ein natürliches Ereignis zurückzuführen ist. Aus den Jahresmaxima der Jahre 2004-2008 wurde für jede Zeitreihe das Fünfjahresmittel berechnet, bevor für Gebirgs- und Alpenvorlandflüsse (Cluster-Variablen: mittlere jährliche Abflussspende, Seehöhe) jeweils ein Regressionsmodell in Abhängigkeit von MQ und Einzugsgebietsgröße angepasst wurde, um die zu erwartende jährlich auftretende Ereignisse näherungsweise bestimmen zu können (Greimel et al. 2017a).

Bei der Anwendung der Ergebnisse der Regressionsmodelle zur näherungsweisen Bestimmung der jährlich auftretenden natürlichen Maximalintensität zeigte sich im Rahmen von SuREmMa+, dass die getrennte Betrachtung von Gebirgs- und Alpenvorlandflüsse bei Untersuchungsgebieten in welchen die Clustergrenzen überschritten werden, aufgrund der bei der Clustergrenze potentiell auftretenden sprunghaften Trends, die durch die Anwendung der clusterspezifischen Modelle zustande kommen können, zu Komplikationen führt. Daher wurde im Rahmen von SuREmMa+ für ganz Österreich <u>ein</u> Regressionsmodell angepasst, wobei sich GW₁₀₀ auf das zu erwartende jährliche natürliche Maximum (Einheiten: MAFR/MEFR - m³/s 15min; AMP – m³/s) und MQ auf den anthropogen unbeeinflussten mittleren Abfluss in (m³/s) bezieht (vgl. Formel 1). Zudem wurde der Zeitreihenumfang, aus welchen das zu erwartende Jahresmaxima berechnet wird, auf die gesamte verfügbare Zeitreihe der Pegelstellen (i. A. ab 1976) ausgedehnt und neben der mittleren und maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeit auch die jährlich zu erwartende maximale Amplitude natürlicher Ereignisse modelliert. Die Modellparameter gemäß Formel 1 sind getrennt für An- und Abstiegsereignisse in Tabelle 6 zusammengefasst, womit das zu erwartende jährliche natürliche Intensitätsmaximum als Vergleichsmaßstab zur Euler'schen Betrachtungsweise kurzfristiger Abflussregime für sämtliche Teileinzugsgebiete Österreichs (gemäß BMLFUW, 2007) abgeschätzt werden kann. Abbildung 7 zeigt die den einzelnen Modellen zugrundeliegenden Streudiagramme.

 $GW_{100} = 10^{\log(MQ) \times k + d}$

Formel 1

Tabelle 6: Modellparameter gemäß Formel 1 zur näherungsweisen Bestimmung der jährlich zu erwartenden Maximalintensität natürlicher Ereignisse (GW₁₀₀) bezugnehmend auf die Parameter maximale (MAFR – m^3/s 15min) und mittlere (MEFR – m^3/s 15min) Abflussänderungsgeschwindigkeit sowie Amplitude (AMP – m^3/s) für Abflussan- (IC) und Abstiegsereignisse (DC)

Parameter	k	d	R²
MAFR - IC	0.55	0.38	0.55
MEFR - IC	0.58	0.03	0.61
AMP - IC	0.69	1.10	0.68
MAFR - DC	0.56	0.13	0.57
MEFR - DC	0.63	-0.21	0.67
AMP - DC	0.62	1.03	0.57



Abbildung 7: Streudiagramme (Kreuze entsprechen Ganglinien, in welchen davon auszugehen ist, dass das jährliche Intensitätsmaximum auf ein natürliches Ereignis zurückzuführen ist) und Modelle (vgl. Tabelle 6) zur flächendeckenden näherungsweisen Bestimmung der jährlich auftretenden natürlichen Maximalintensität (GW100) in Abhängigkeit des mittleren unbeeinflussten Abflusses (MQ) für die Intensitätsparameter maximale (MAFR – links) und mittlere (MEFR – Mitte) Abflussänderungsgeschwindigkeit sowie Amplitude (AMP – rechts) für An- (IC – oben) und Abstiegsereignisse (DC – unten)

Die standardisierte Selektion von Abflussschwankungen durch die natürlich zu erwartende Maximalintensität kann bezugnehmend auf die unterschiedlichen Intensitätsparameter (Tabelle 2) der jeweiligen Forschungsfrage angepasst werden. Zum Beispiel unterscheiden sich anthropogen beeinflusste Abflussganglinien von weitgehend unbeeinflussten Abflussganglinien im Allgemeinen durch eine vergleichsweise hohe Anzahl an Abflussschwankungen mit hoher Abflussänderungsgeschwindigkeit, während beispielsweise gletscherbeeinflusste Abflussganglinien von einer hohen Anzahl an Abflussschwankungen mit vergleichsweise hoher Amplitude gekennzeichnet sind (Greimel et al., 2016). Wenn es das Ziel ist, anthropogen erzeugte Abflussänderungsgeschwindigkeit an, während ein Bezug zum Parameter Amplitude gut geeignet ist, um Abflussschwankungen zu selektieren, die mehrheitlich auf einen Gletschereinfluss zurückzuführen sind (Graf et al., 2020).

Zur Analyse von kurzfristigen Abflussregimen mit Schwalleinfluss werden als grundlegenden Schritt sämtliche Abflussschwankungen anhand der maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeit (MAFR) in Relation zur erwarteten jährlichen natürlichen Maximalintensität (vgl. Tabelle 7) sortiert. Dieser Schritt ermöglicht die standardisierte Selektion von Abflussschwankungen in einem eindeutig definierten und vergleichbaren Intensitätsbereich aus mehreren Abflussganglinien: Beispielsweise können sämtliche Abflussschwankungen selektiert werden deren Intensität die erwartete jährliche Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen übersteigt (>GW₁₀₀), wenn es das Ziel sein sollte, ausschließlich extreme Ereignisse zu untersuchen. Ein anderes Beispiel wäre die Selektion aller Abflussschwankungen deren Intensität 20% der erwarteten jährlichen Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen übersteigt (>GW₂₀) oder auch nicht erreicht (<GW₂₀). Auch können Abflussschwankungen im Bereich zwischen 20 und 40% der erwarteten jährlichen Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen selektiert werden (>GW₂₀ <GW₄₀), oder ausschließlich Ereignisse kleiner 10% der erwarteten jährlichen Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen (<GW₁₀), wenn es das Ziel sein sollte, ausschließlich Abflussschwankungen mit geringer Intensität zu analysieren. Die standardisierte Selektion von Abflussschwankungen kann zusammenfassend bestimmten Forschungsfragen oder auch der bei einer Pegelstelle erwarteten Intensität einer bestimmten Quelle (welche durch die Lagrange'sche Betrachtungsweise erfasst werden kann – vgl. Kapitel 3) angepasst werden. Zudem kann die Selektion in Abhängigkeit des verfügbaren Zeitreihenumfanges auf unterschiedliche Perioden (bestimmte Jahre, Quartale, Monate, Tage, Stunden oder auch Tag/Nacht) angewandt werden.

Tabelle 7: Zu erwartende jährliche maximale natürliche Abflussänderungsgeschwindigkeit (GW₁₀₀ - MAFR) bei den Abflussganglinien im fiktiven Fallbeispiel (vgl. Formel 1 und Tabelle 6)

Ganglinie	MAFR - IC	MAFR - DC
Тур	(m³/s ts)	(m³/s ts)
KW-Durchfluss	11.69	6.69
Pegel 1	11.76	6.74
Pegel 2 - temporär	12.46	7.15
Pegel 3	14.08	8.09
Pegel 4 - temporär	16.12	9.29
Pegel 5	16.93	9.77

 $(IC-Anstiegs ereign is,\, DC-Abstiegs ereign is,\, ts-$

timestep, 1 ts entspricht 15 min)

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise werden in vorliegendem technischer Bericht sämtliche Abflussschwankungen selektiert, deren Intensität 20% der zu erwartenden jährlichen maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 7) übersteigt (>GW₂₀). Für die einzelnen Abflussganglinien werden die Kennzahlen Auftrittshäufigkeit, Dauer, Abflussänderungsgeschwindigkeit und Amplitude (vgl. Tabelle 2) in einer monatlichen Auflösung dargestellt, wobei das Ziel verfolgt wird, die monatliche Spannweite der Intensitätswerte zu erfassen (5, 25, 50, 75 und 95% Perzentil der insgesamt verfügbaren Zeitreihe) und exemplarisch den Verhältnissen eines bestimmten Jahres (Median, 2018) gegenüber zu stellen.

4.2 Absolute und relative Intensität von Abflussschwankungen

Die Selektion von Abflussschwankungen in einem eindeutig definierten und übereinstimmenden Intensitätsbereich ermöglicht es, die Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen in Abhängigkeit ihrer Intensität einer standardisierten Methode folgend zu analysieren bzw. die Verhältnisse mehrerer Abflussganglinien gegenüberzustellen. Dabei kann die Ereignisintensität grundsätzlich in absoluter (vgl. Tabelle 2) oder relativer Form ausgedrückt werden, wobei die Ausdrucksform von den Randbedingungen und vom Zweck der Analyse sowie vom zu vergleichenden Intensitätsparameter abhängig ist, wie folgende Beispiele aufzeigen sollen:

Eine Gegenüberstellung der Intensität von Abflussschwankungen in absoluter Form bietet sich an, wenn unterschiedliche Perioden <u>einer</u> Abflussganglinie gegenübergestellt werden: "In Periode A lag die maximal aufgezeichnete Ereignisamplitude bei 12 m³/s, während dieser Wert in Periode B 17 m³/s betrug." Auch wenn die aus <u>mehreren Abflussganglinien</u> selektierten Abflussschwankungen eindeutig <u>einer bestimmten Quelle</u> zugeordnet werden können oder es das Ziel ist auf den <u>Einfluss einer bestimmten Quelle</u> zu schließen, kann die Angabe absoluter Werte aussagekräftig sein: "In Periode A wurde die Abflussänderungsgeschwindigkeit der bei Kraftwerk x eingeleiteten Schwallwellen von ursprünglich bis zu 6 m³/s min auf maximal 3 m³/s min begrenzt. Diese Maßnahme führte im von Kraftwerk x beeinflussten Gewässerabschnitt zu einer durchschnittlichen Verminderung der Abflussänderungsgeschwindigkeiten um 1,5 m³/s min (Pegelstelle 1) bzw. 0,5 m³/s min (Pegelstelle 2)."

Sollen die hydrologischen Verhältnisse mehrerer Abflussganglinien aus Gewässern mit unterschiedlichen Flussgrößen gegenübergestellt werden, sind Absolutwerte meist nicht sehr aussagekräftig: "Im einem Gewässer des Wienerwaldes lag die maximal aufgezeichnete Abflussänderungsgeschwindigkeit eines Anstiegsereignisses in Periode A bei 300 l/s min, während dieser Wert in der Donau 7,5 m³/s min betrug." Die Interpretation der Absolutwerte ist aufgrund der unterschiedlichen Gewässerdimensionen nicht ohne weiteres möglich. Hier kann eine Gegenüberstellung in relativer Form aufschlussreicher sein: "Innerhalb von 15 Minuten stieg der Abfluss im Wienerwaldgewässer um mehr als das dreifache MQ an, während in der Donau die Abflussänderung innerhalb von 15 Minuten lediglich rund 5 % von MQ betrug. In beiden Gewässern liegt die Abflussänderungsgeschwindigkeit der Ereignisse in der Größenordnung des jährlich zu erwartenden natürlichen Maximalereignisses." Im Gegensatz zum Parameter Abflussänderungsgeschwindigkeit, kann die Ereignisdauer aber auch bei sehr unterschiedlicher Flussgröße in absoluter Form gegenübergestellt werden: "Das Anstiegsereignis im Wienerwald dauerte eine Stunde, während der Abflussscheitel in der Donau erst nach über 40 Stunden erreicht war, womit die Dauer des zugrundeliegenden Anstiegsereignisses hier knapp zwei Tage betrug."

Soll die Intensität von Abflussschwankungen aus ökologischer Sicht interpretiert werden, ist zudem meist die Intensität der aus den Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen gefragt (vgl. Su-REmMa+ Forschungsbericht – Kapitel 3.2): "In Periode A ging von vier Abstiegsereignissen ein maßgebliches Strandungsrisiko für Fischlarven und frühe Juvenilstadien aus, nachdem die Abstiegsgeschwindigkeit dieser Ereignisse mehr als 0,4 cm/min betrug." Informationen zu den aus Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen können grundsätzlich aus den Pegelschlüsselkurven, in welchen die Beziehung zwischen Abfluss und Wasserstand bekannt ist, abgeleitet werden. Um die Information aus den Pegelschlüsselkurven auf ganze Gewässerabschnitte übertragen zu können, müssen allerdings bestimmte Voraussetzungen, wie z. B. ein vergleichbares Energieliniengefälle, gegeben sein. Bei Pegelprofilen in frei fließenden Gewässerabschnitten ist das Energieliniengefälle, etwa im Vergleich zu Pegelprofilen im Rückstaubereich von Querbauwerken, wenig beeinflusst. Wenn auch das Pegelprofil im Vergleich zu den Profilformen eines bestimmten Gewässerabschnittes als repräsentativ angesehen werden kann, kann auch die im Pegelschlüssel definierte Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss übertragen werden (vgl. Abbildung 4). Im Falle von Pegelprofilen in frei fließenden Gewässerstrecken wurde im Rahmen von SuREmMa+ daher basierend auf der jeweiligen Pegelschlüsselkurve eine abflussabhängige Funktion für dWspez angepasst. Anhand dieser Funktion kann dWspez für unterschiedliche Abflussbereiche berechnet werden, womit durch Multiplikation mit der Amplitude oder der Abflussänderungsgeschwindigkeit einer bestimmten Abflussschwankung die resultierende Wasserspiegelschwankung bzw. die davon abgeleiteten Intensitätskennzahlen ermittelt werden können. Im Falle von Pegelprofilen mit nicht repräsentativem Energieliniengefälle (z. B. Abflussganglinien von Messwehren) oder bei Durchflussganglinien, die nicht anhand eines Pegelschlüssels erhoben werden, kann die abflussabhängige Funktion von d W_{spez} geschätzt werden, indem diese anhand der Ergebnisse der überregionalen Regressionsmodelle zur näherungsweisen Bestimmung resultierender Wasserspiegelschwankungen (Greimel et al. 2017b) angepasst wird. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich um Schätzwerte handelt, die nach Möglichkeit kalibriert werden sollten (vgl. Kapitel 3.3).

Wie die Intensität von kurzfristigen Abflussschwankungen dargestellt werden soll, ist zusammenfassend im Vorfeld einer Analyse zu definieren. Bezugnehmend auf die Intensitätsparameter mittlere und maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit und Amplitude können unter den beschriebenen Randbedingungen folgende Ausdrucksformen zielführend sein:

- Absolute Form zur Gegenüberstellung der hydrologischen Verhältnisse von <u>unterschiedlichen Perioden</u> <u>einer Abflussganglinie</u> oder zur Beschreibung der in <u>mehreren Abflussganglinien</u> dokumentierten <u>zeitli-</u> <u>chen Variabilität</u>, sofern die aufgezeichneten Abflussschwankungen eindeutig <u>einer bestimmten Quelle</u> zuordenbar sind oder der Einfluss einer bestimmten Quelle untersucht werden soll.
- Relative Form in Relation zur Flussgröße (z. B. in Relation zu Einzugsgebietsgröße oder in Relation zu MQ) zur Gegenüberstellung der hydrologischen Verhältnisse <u>mehrerer Abflussganglinien aus Ein-</u> zugsgebieten mit ähnlicher Beschaffenheit und/oder vergleichbaren abflussbestimmenden Faktoren.
- Relative Form in Relation zur Intensität natürlicher Abflussschwankungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Flussgröße (z. B. in Relation zur erwarteten jährlichen Maximalintensität natürlicher Abflussschwankungen – vgl. Kapitel 4.1) zur Gegenüberstellung der hydrologischen Verhältnisse mehrerer Abflussganglinien aus Einzugsgebieten mit sehr heterogener Beschaffenheit und/oder sehr heterogenen abflussbestimmenden Faktoren.
- In Relation zur Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen <u>zur ökologischen Interpreta-</u> tion der kurzfristigen hydrologischen Verhältnisse.

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise werden die Intensitätsparameter maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit und Amplitude in vorliegendem technischer Bericht sowohl in absoluter Form, in Relation zur Einzugsgebietsgröße als auch in Relation zu den resultierenden Wasserspiegelschwankungen dargestellt. Ereignisanzahl und Dauer werden in absoluter Form ausgedrückt.

4.3 Datengrundlage

Auch bei der Euler'schen Betrachtungsweise gilt: Je mehr Abflussganglinien in einem Untersuchungsgebiet zur Verfügung stehen und je höher der Zeitreihenumfang ist, desto höher ist die erzielbare Detailschärfe bei der Erfassung und Beschreibung der hydrologischen Situation. In einem Untersuchungsgebiet sollte je Abschnitt mit vergleichbarer hydrologischen Situation (z. B. einem Gewässerabschnitt mit ähnlicher anthropogener Beeinflussung) zumindest eine Abflussganglinie zur Verfügung stehen. Eine Erhöhung der Datenverfügbarkeit durch die zusätzliche Einrichtung von temporären Pegelstellen kann z. B. in Gewässerabschnitte aus welchen keine Abflussganglinien zur Verfügung stehen, in besonders relevanten Zubringern oder in Gewässerabschnitten mit besonderer ökologischer Relevanz (z. B. Gewässerstrecken mit repräsentativen natürlichen morphologischen Verhältnissen, Zubringer-Mündungen etc.) zielführend sein.

4.4 Jährliches Abflussregime und Auswahl von Referenz-Abflussganglinien

Das wesentliche Ziel der Eulersch'en Betrachtungsweise ist es, das in mehreren Abflussganglinien dokumentiere kurzfristige Abflussregime gegenüber zu stellen. Um die anthropogene Beeinflussung einer Abflussganglinie einordnen zu können, ist die Gegenüberstellung mit einer unbeeinflussten Ganglinie sinnvoll. Allerdings muss dazu eine repräsentative unbeeinflusste Abflussganglinie identifiziert werden.

Als grundlegenden Schritt empfiehlt es sich, das in einem anthropogen beeinflussten Gewässerabschnitt zu erwartende natürliche Abflussregime im Jahresverlauf zu erheben. Das ursprüngliche Abflussregime kann durch das Wasserbilanzmodell des Digitalen Hydrologischen Atlas Österreichs (digHAO) (BMLFUW, 2007) näherungsweise bestimmt werden. Informationen des digHAO liegen für das gesamte Bundesgebiet vor, wobei u. A. für sämtliche Teileinzugs- bzw. Bilanzierungsgebiete die Größen der einzelnen Wasserbilanzkomponenten (Niederschlag, Verdunstung, Abfluss, Speicheränderung) in einer monatlichen Auflösung abgefragt werden können. Das im Untersuchungsgebiet zu erwartende natürliche jährliche Abflussregime kann dementsprechend ermittelt werden, indem die monatlichen Abflussspenden gemäß Wasserbilanzmodell für die relevanten Teileinzugsgebiete des zu untersuchenden Flussabschnittes dargestellt werden. Eine Gegenüberstellung mit den an Pegelstellen im Untersuchungsgebiet gemessenen tatsächlichen Werten lässt erste Schlüsse auf potentielle anthropogenen Einflüsse zu (vgl. Abbildung 8).

Im fiktiven Fallbeispiel ist von einem ursprünglich nivoglazial geprägten Abflussregime mit einer ausgeprägten Niederwasserperiode von Dezember bis März (Abflussspende < 10 l/s km²) und einem Abflussmaximum im Hochsommer auszugehen. Die maximal zu erwartende monatlichen Abflussspende lag im unbeeinflussten Zustand etwa im Bereich zwischen 90 und 120 l/s km². Die an den Pegelstellen gemessenen tatsächlichen Abflusswerte lassen darauf schließen, dass das Untersuchungsgebiet im fiktiven Fallbeispiel maßgeblich von Jahresspeichern beeinflusst wird, durch deren Betrieb ein wesentlicher Anteil der Abflussfracht von den abflussreichen Monaten im Sommer in den Winter verlagert wird (vgl. Abbildung 8). Im Falle von anthropogen unbeeinflussten und anthropogen beeinflussten Einzugsgebieten mit geringem Speicherpotential (z. B. ausschließlich Tagesspeicher) ist zu erwarten, dass die Gegenüberstellung der Abflusswerte gemäß digHAO Wasserbilanzmodell und der an den Pegelstellen gemessenen Werten einen weitgehend übereinstimmenden Verlauf zeigt.



Abbildung 8: Mittlere monatliche Abflussspende (Mq) gemäß Wasserbilanzmodell Digitaler Hydrologischer Atlas Österreich (BMLFUW, 2007) für die relevanten Teileinzugsgebiete des fiktiven Fallbeispiels (grau) und an ausgewählten Pegelstellen (schwarz - Pegel 1, 3 und 5 vgl. Abbildung 1)

Um detailliertere Informationen zur anthropogenen Beeinflussung der hydrologischen Situation zu erhalten, können (eine oder mehrere) weitgehend unbeeinflusste Referenz-Abflussganglinien identifiziert werden. Dabei sind folgende Voraussetzungen zu berücksichtigen:

- Abflussganglinien, die als Referenz herangezogen werden, sollten aus Gewässerabschnitten stammen, die anthropogen unbeeinflusst sind (z. B. nicht von Wasserentnahmen beeinflusst, keine Schwalleinleitungen im Oberliegereinzugsgebiet, nicht im unmittelbaren Einflussbereich von Laufkraftwerken etc.).
- Das in den Referenz-Abflussganglinien dokumentierte jährliche Abflussregime sollte mit dem ursprünglichen Regime des beeinflussten Gewässerabschnittes weitgehend übereinstimmen.
- Die Größenordnung und Beschaffenheit (Morphologie, Geologie, Niederschlagsverhältnisse, Bewuchs usw.) des Referenz-Einzugsgebietes sollte mit dem beeinflussten Einzugsgebiet weitgehend übereinstimmen.

Bei der Identifikation von Referenz-Abflussganglinien wurde im Rahmen von SuREmMa+ zusammenfassend folgendermaßen vorgegangen:

 Von sämtlichen in Österreich verfügbaren hochauflösenden Abflussganglinien (N>1000) wurden alle Pegelstellen ausgeschlossen, die gemäß Nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan (BMLFUW, 2017) in von Wasserentnahmen oder Schwall beeinflussten Gewässerabschnitten liegen, oder in Greimel et al. 2016 als schwallbeeinflusst ausgewiesen wurden.

- Aus den verbleibenden Pegelstellen kann eine Auswahl potentieller Referenz-Pegelstellen selektiert werden, wobei die räumliche Lage (je näher, desto besser) sowie Einzugsgebietsgröße und -beschaffenheit (je ähnlicher, desto besser) zu berücksichtigten ist.
- Anschließend wurde das ursprüngliche j\u00e4hrliche Abflussregime im beeinflussten Gew\u00e4sserabschnitt mit den Abflussregimen der Pegelauswahl gegen\u00fcbergestellt (Abbildung 9).
- 4) Somit kann für das Untersuchungsgebiet bzw. für einzelne Gewässerabschnitte im Untersuchungsgebiet die am besten geeignete Referenz-Abflussganglinie selektiert werden.
- 5) Abschließend wird empfohlen, die ausgewählte(n) Ganglinie(n) stichprobenartig (z. B. einzelne Jahre) visuell hinsichtlich der vorausgesetzten unbeeinflussten hydrologischen Verhältnisse zu überprüfen.

Im Rahmen des fiktiven Fallbeispiels wird für das gesamte Untersuchungsgebiet eine Referenz-Abflussganglinie definiert (pot. Referenz 1, EZG: 517 km², MQ: 20 m³/s – vgl. Abbildung 9).



Abbildung 9: Mittlere monatliche Abflussspende (Mq) gemäß Wasserbilanzmodell Digitaler Hydrologischer Atlas Österreich (BMLFUW, 2007) für die relevanten Teileinzugsgebiete des fiktiven Fallbeispiels (grau) und an 5 potentiellen Referenz-Pegelstellen (schwarz)

4.5 Ergebnisse - Quellenunabhängiges Monitoring/kurzfristiges Abflussregime



4.5.1 Referenz-Abflussganglinie

Abbildung 10: Referenz-Abflussganglinie – Monatliche Anzahl von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀ (oben) und Ereignis-Dauer (unten) in Monaten in welchen im langjährigen Mittel mind. ein Ereignis pro Jahr auftritt (Zeitreihe 1991-2016 – hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median)

Ereignisanzahl

In der Referenzganglinie des fiktiven Fallbeispiels werden von Oktober bis Mai gemäß den Selektionskriterien (vgl. Kapitel 4.1) keine relevanten Abflussschwankungen selektiert. Im Juni sind im Mittel 1 bis 2 An- und Abstiegsereignisse zu erwarten, bevor im Juli von 5 bis 10 Ereignissen auszugehen ist. In Ausnahmefällen wird im Juli schon eine ähnlich hohe Anzahl an Abflussschwankungen erfasst, wie im August. Im Hochsommer wird i. A. das Maximum erreicht, wobei im Mittel mit 10 bis 15 An- und Abstiegsereignisse zu rechnen ist. In Jahren, in welchen Abflussschwankungen mit überdurchschnittlich hoher Intensität auftreten die auf Gletscher-Schmelzereignisse zurückzuführen sind, können im August mehr als 30 Ereignisse die Abflussänderungsgeschwindigkeit GW₂₀ überschreiten. Im September fällt die Anzahl an Ereignissen rapide ab, bevor der Wert im Oktober i. A. null erreicht. Das Jahr 2018 entspricht im Wesentlichen dem beschriebenen Jahresgang, wobei es sich im Vergleich zur gesamten Zeitreihe um ein Jahr mit einer außergewöhnlich hohen Anzahl an Abflussschwankungen handelt (vgl. Abbildung 10 - oben).

Ereignisdauer

Die Dauer der selektierten Ereignisse zeigt bei An- und Abstiegsereignisse einen unterschiedlichen Verlauf (vgl. Abbildung 10 - unten). Die Dauer der Anstiegsereignisse beträgt von Juni bis September im Mittel verhältnismäßig gleichmäßig rund 300 bis 400 Minuten bzw. etwa 5 bis 6 Stunden, wobei die Spannweite von 45 Minuten bis zu 700 Minuten (11 Stunden) reicht. Abstiegsereignisse dauern mit 10 bis 11 Stunden (600 bis 700 Minuten) generell länger, wobei bis zu 1100 Minuten (ca. 18 Stunden) erreicht werden können. Ein weiterer Unterschied zu Anstiegsereignissen ergibt sich dadurch, dass die Dauer von Abstiegsereignissen ab Juni verlaufend ansteigt, bis im September die maximalen Werte erreicht werden. Das Jahr 2018 entspricht hinsichtlich Ereignisdauer weitgehend den mittleren Verhältnissen der gesamten Zeitreihe, wobei die Dauer von Anstiegsereignissen im Juli überraschend gering ausgefallen ist.

Interpretation anhand von Auftrittshäufigkeit und Ereignisdauer

Das kurzfristige Abflussregime der Referenz-Abflussganglinie wurde hinsichtlich Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen mit hohen Abflussänderungsgeschwindigkeiten erwartungsgemäß nicht von anthropogen erzeugten Abflussschwankungen geprägt. Sowohl die Dauer als auch die Auftrittshäufigkeit der Abflussschwankungen lässt darauf schließen, dass die aus der Referenz-Abflussganglinie selektierten sommerlichen Abflussschwankungen, neben Abflussschwankungen welche durch sommerliche Niederschlagsereignisse ausgelöst werden, zum Großteil auf Gletscher-Schmelzereignisse zurückzuführen sind (vgl. auch Graf et al., 2020).



Abbildung 11: Referenzpegel – Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit (MAFR) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀ in Monaten in welchen im langjährigen Mittel mind. ein Ereignis pro Jahr auftritt: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der resultierenden Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2016 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median)

Abflussänderungsgeschwindigkeit

Die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der selektierten Abflussschwankungen liegt bei <u>Anstiegsereignissen</u> in einem Bereich von 0,16 bis 0,76 m³/s min (Median: 0,2 bis 0,27 m³/s min, vgl. Abbildung 11 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 0,32 und 1,5 l/s km² min (Median: 0,39 bis 0,52 l/s km min, vgl. Abbildung 11 – Mitte links). Die Geschwindigkeit der daraus resultierenden Wasserspiegelschwankungen liegt in einer Größenordnung zwischen 0,15 und 0,94 cm/min (Median: 0,21 bis 0,41 cm/min, vgl. Abbildung 11 – unten links), wobei von Juni bis September ein Anstieg der Abflussänderungsgeschwindigkeiten zu beobachten ist. Das Jahr 2018 entspricht in etwa den mittleren Verhältnissen der gesamten Zeitreihe.

Die Abflussänderungsgeschwindigkeit der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> liegt mit 0,1 bis 0,4 m³/s min (Median: 0,12 bis 0,14 m³/s min, vgl. Abbildung 11 – oben rechts), bzw. 0,2 bis 0,76 l/s km² min (Median: 0,23 bis

0,27 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte links) und 0,1 bis 0,66 cm/min (Median: 0,12 bis 0,2 cm/min, vgl. Abbildung 11 – unten links) im Mittel bei rund 50% der selektierten Anstiegsereignisse. Das Jahr 2018 entspricht in etwa den mittleren Verhältnissen der gesamten Zeitreihe.



Abbildung 12: Referenzpegel - Amplitude (AMP) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median 2018)

Amplitude

Die Amplitude der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegt in einem Bereich von 6 bis 75 m³ (Median 33 bis 41,1 m³/s, vgl. Abbildung 12 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 12 und 145 l/s km² (Median 64 bis 79 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte links). Die daraus resultierenden Wasserspiegelschwankungen liegen in einer Größenordnung zwischen 5 und 85 cm (Median 35 bis 55 cm, vgl. Abbildung 12 – unten links), wobei die

höchsten Amplituden zwischen Juli und September zu beobachten sind. Im Jahr 2018 wurden im Vergleich zur gesamten Zeitreihe unterdurchschnittliche Amplitudenwerte erfasst. Dies betrifft insbesondere den Juli 2018.

Die Amplituden der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> unterschreiten mit 3 bis 72 m³ (Median 20 bis 39,5 m³/s, vgl. Abbildung 12 – oben rechts), bzw. 6 bis 140 l/s km² (Median 37 bis 74 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte rechts) oder 3 bis 100 cm (Median 20 bis 55 cm, vgl. Abbildung 12 – unten rechts) die Größenordnung der Anstiegsereignisse.

4.5.2 Kurzfristiges Abflussregime – Pegel 1

Pegel 1 befindet sich 1,5 Flusskilometer (fkm) flussab der Schwalleinleitung von Speicherkraftwerk 1 (vgl. Abbildung 1, Tabelle 1).



Abbildung 13: Pegel 1 – Monatliche Anzahl (oben) und Dauer (DUR - unten) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀ (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Anzahl (oben), Median (unten))

Ereignisanzahl

Von Oktober bis April werden anhand der Selektionskriterien (vgl. Kapitel 4.1) etwa 50 bis 250 An- und Abstiegsereignisse selektiert, wobei im langjährigen Mittel mit 110 Anstiegs- bzw. 140 Abstiegsereignissen jeweils im Dezember das Minimum zu erwarten ist. Von Mai bis September wird eine erhöhte Anzahl an Abflussschwankungen selektiert, wobei im langjährigen Mittel mit rund 200 Anstiegs- bzw. 250 Abstiegsereignissen im Hochsommer das Maximum erreicht wird (vgl. Abbildung 13 - oben). Im Vergleich zur Referenzganglinie, in welcher im Winter keine Abflussschwankungen und im August maximal bis zu rund 40 Ereignisse dokumentiert werden (vgl. Abbildung 10), ist die Anzahl an Abflussschwankungen ganzjährig deutlich erhöht. Im Jahr 2018 ist die Ereignisanzahl mit Ausnahme des Monats Dezember überdurchschnittlich hoch.

Ereignisdauer

Betrachtet man die Dauer der selektierten Ereignisse, zeigen An- und Abstiegsereignisse ganzjährig einen verhältnismäßig gleichmäßigen Verlauf. Im Mittel beträgt die Dauer der An- und Abstiegsereignisse 45 Minuten (also drei Zeitschritte), wobei die Spannweite bei Abstiegsereignissen mit bis zu 165 Minuten im Vergleich zu Anstiegsereignissen (bis zu 105 Minuten) etwas höher ist. Im Vergleich zur Referenzganglinie wird die Ereignisdauer von An- und Abstiegsereignisse deutlich unterschritten (vgl. Abbildung 10). Das Jahr 2018 entspricht im Wesentlichen den mittleren Verhältnissen der gesamten Zeitreihe, wobei im Dezember die Dauer von Abstiegsereignisse überdurchschnittlich ausgefallen ist (vgl. Abbildung 13 - unten).

Interpretation anhand von Auftrittshäufigkeit und Ereignisdauer

Das kurzfristige Abflussregime bei Pegel 1 wurde hinsichtlich Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen mit hohen Abflussänderungsgeschwindigkeiten in erster Linie von anthropogen erzeugten Abflussschwankungen geprägt. Sowohl die Dauer als auch die Auftrittshäufigkeit der Abflussschwankungen lässt darauf schließen, dass beinahe alle selektierten Abflussschwankungen auf einen anthropogenen Ursprung zurückzuführen sind (Anmerkung: Durch angepasste Selektionskriterien (vgl. Kapitel 4.1), kann der verbleibende Einfluss natürlicher Abflussschwankungen untersucht werden.). Nachdem im fiktiven Fallbeispiel im Oberliegereinzugsgebiet von Speicherkraftwerk 1 keine weiteren schwallerzeugenden Kraftwerke vorhanden sind, ist davon auszugehen, dass sämtliche der bei Pegel 1 aufgezeichneten Schwallwellen von Speicherkraftwerk 1 ausgehen. (Anmerkung: Die Gegenüberstellung mit der Kraftwerksdurchfluss-Ganglinie ermöglicht eine Überprüfung dieser Aussage.)



Abbildung 14: Pegel 1 – Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit (MAFR) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median)

Abflussänderungsgeschwindigkeit

Die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegt im Bereich von 0,09 bis 0,78 m³/s min (Median: 0,19 bis 0,25 m³/s min, vgl. Abbildung 14 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 0,25 und 1,95 l/s km² min (Median: 0,48 bis 0,68 l/s km² min, vgl. Abbildung 14 – Mitte links). Die Geschwindigkeit der daraus resultierenden Wasserspiegelschwankungen liegt in einer Größenordnung zwischen 0,08 und 1,17 cm/min (Median: 0,22 bis 0,36 cm/min, vgl. Abbildung 14 – unten links). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 0,39 bis 0,52 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte links) werden die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße damit überschritten (Anmerkung: Ein direkter Vergleich der absoluten Größen zwischen der Referenzganglinie und Pegel 1 ist aufgrund der unterschiedlichen Flussgröße nicht aussagekräftig und entfällt daher.

Dasselbe gilt für Pegel 3 und 5.). Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.

Die Abflussänderungsgeschwindigkeit der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> liegt im Bereich von 0,06 bis 0,62 m³/s min (Median: 0,15 bis 0,21 m³/s min, vgl. Abbildung 11 – oben rechts), bzw. 0,15 bis 1,55 l/s km² min (Median: 0,36 bis 0,54 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte rechts) und 0,6 bis 7,4 cm/min (Median: 0,8 bis 2,2 cm/min, vgl. Abbildung 11 – unten rechts). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 0,26 bis 0,27 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte rechts) werden die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse damit in Relation zur Einzugsgebietsgröße überschritten. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.



Abbildung 15: Pegel 1 - Amplitude (AMP) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median 2018)

Amplitude

Die Amplituden der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegen in einem Bereich von 2 bis 28 m³/s (Median: 5,33 bis 6,92 m³/s, vgl. Abbildung 15 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 5 bis 72 l/s km² (Median: 13,37 bis 17,29 l/s km², vgl. Abbildung 15 – Mitte links). Daraus resultieren Wasserspiegelschwankungen in einer Größenordnung zwischen 2 und ca. 40 cm (Median: 6 bis 9 cm, vgl. Abbildung 15 – unten links). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 63,8 bis 79,4 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte links) werden die Amplituden der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße deutlich unterschritten, wobei hohe Amplituden-Werte in der Referenzsituation ausnahmslos in den Monaten Juni bis September vorkommen. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.

Die Amplituden der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> betragen 1 bis 24 m³/s (Median: 4,41 bis 6,01 m³/s, vgl. Abbildung 15 – oben rechts), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße 3 bis 61 l/s km² (Median: 11 bis 15,2 l/s km², vgl. Abbildung 15 – Mitte rechts). Daraus resultieren Wasserspiegelschwankungen in einer Größenordnung von 1 bis ca. 35 cm (Median: 5 bis 8 cm, vgl. Abbildung 15 – unten rechts). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 34,8 bis 76,4 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte rechts) werden die Amplituden der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße deutlich unterschritten, wobei hohe Amplituden-Werte in der Referenzsituation ausnahmslos in den Monaten Juni bis September vorkommen. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.

4.5.3 Kurzfristiges Abflussregime – Pegel 3

Pegel 3 befindet sich 11 Flusskilometer (fkm) flussab der Schwalleinleitung von Speicherkraftwerk 1 (vgl. Abbildung 1, Tabelle 1).



Abbildung 16: Pegel 3 – Monatliche Anzahl (oben) und Dauer (DUR - unten) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀ (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Anzahl (oben), Median (unten))

Ereignisanzahl

Anhand der Selektionskriterien (vgl. Kapitel 4.1) werden etwa 50 bis 240 Anstiegsereignisse und 50 bis 280 Abstiegsereignisse selektiert, wobei im langjährigen Mittel in den Monaten Dezember bis April die minimalen Auftrittshäufigkeiten zu erwarten sind. Mit 180 Anstiegs- bzw. 210 Abstiegsereignissen wird im Hochsommer die maximale Auftrittshäufigkeit erreicht (vgl. Abbildung 16 - oben). Im Vergleich zu Pegel 1 liegt die Auftrittshäufigkeit selektierter Abflussschwankungen in einer übereinstimmenden Größenordnung (vgl. Abbildung 13 - oben). Im Vergleich zur Referenzganglinie ist die Auftrittshäufigkeit von Abflussschwankungen dementsprechend auch bei Pegel 3 ganzjährig deutlich erhöht. Auch bei Pegel 3 ist die Ereignisanzahl im Jahr 2018 mit Ausnahme des Monats Dezember überdurchschnittlich hoch.

Ereignisdauer

Betrachtet man die Dauer der selektierten Ereignisse, zeigen vor allem die Anstiegsereignisse ganzjährig einen sehr gleichmäßigen Verlauf. Im Mittel beträgt die Dauer der Anstiegsereignisse 45 Minuten (also drei Zeitschritte). Im Vergleich zu Pegel 1 (vgl. Abbildung 13 – unten) zeigt sich, dass sich die Dauer von Anstiegsereignissen ganzjährig nicht erhöht, während die Dauer von Abstiegsereignissen in den abflussärmeren Monaten leicht ansteigt. Im Vergleich zur Referenzganglinie (vgl. Abbildung 10 – unten) wird die Ereignisdauer von An- und Abstiegsereignissen auch bei Pegel 3 deutlich unterschritten. Das Jahr 2018 entspricht im Wesentlichen den mittleren Verhältnissen der gesamten Zeitreihe, wobei die Dauer von Abstiegsereignissen im Dezember wie bei Pegel 1 überdurchschnittlich hoch ausgefallen ist.

Interpretation anhand von Auftrittshäufigkeit und Ereignisdauer

Wie bei Pegel 1 lässt die Dauer und die Auftrittshäufigkeit der Abflussschwankungen auch bei Pegel 3 darauf schließen, dass beinahe alle selektierten Abflussschwankungen auf einen anthropogenen Ursprung zurückzuführen sind. Auffällig ist, dass sich die Dauer der selektierten Ereignisse in den 9,5 Flusskilometern zwischen Pegel 1 und Pegel 3 kaum verändert und auch die Ereignisanzahl stabil bleibt.



Abbildung 17: Pegel 3 – Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit (MAFR) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median)

Abflussänderungsgeschwindigkeit

Die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegt im Bereich von 0,1 bis 0,76 m³/s min (Median: 0,19 bis 0,25 m³/s min, vgl. Abbildung 17 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 0,14 und 1,2 l/s km² min (Median: 0,29 bis 0,38 l/s km² min, vgl. Abbildung 17 – Mitte links). Die Geschwindigkeit der daraus resultierenden Wasserspiegelschwankungen liegt in einer Größenordnung zwischen 0,1 und 1,6 cm/min (Median: 0,3 bis 0,5 cm/min, vgl. Abbildung 17 – unten links). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 0,39 bis 0,52 l/s km² min, vgl. Abbildung 11Abbildung 11 – Mitte links) werden die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße damit leicht unterschritten, wobei eine dementsprechende Intensität in der Referenzsituation ausnahmslos auf die Monate Juni bis September beschränkt ist. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe, mit Ausnahme des Monats Dezember, einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.

Die Abflussänderungsgeschwindigkeit der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> liegt im Bereich von 0,06 bis 0,5 m³/s min (Median: 0,11 bis 0,19 m³/s min, vgl. Abbildung 17 – oben rechts), bzw. 0,45 bis 0,8 l/s km² min (Median: 0,18 bis 0,29 l/s km² min, vgl. Abbildung 17 – Mitte rechts) und 0,1 bis 1 cm/min (Median: 0,24 bis 0,3 cm/min, vgl. Abbildung 17 – unten rechts). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 0,26 bis 0,27 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte rechts) werden die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse damit in Relation zur Einzugsgebietsgröße leicht überschritten. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.



Abbildung 18: Pegel 3 - Amplitude (AMP) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median 2018)

Amplitude

Die Amplituden der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegen in einem Bereich von 2 bis 31 m³/s (Median: 5,33 bis 6,92 m³/s, vgl. Abbildung 18 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 5 bis 72 l/s km² (Median: 13,37 bis 17,29 l/s km², vgl. Abbildung 18 – Mitte links). Daraus resultieren Wasserspiegelschwankungen in einer Größenordnung zwischen 3 und ca. 50 cm (Median: 10 bis 15 cm, vgl. Abbildung 18 – unten links). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 63,8 bis 79,4 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte links) werden die Amplituden der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße deutlich unterschritten, wobei hohe Amplituden-Werte in der Referenzsituation ausnahmslos in den Monaten Juni bis September vorkommen. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.

Die Amplituden der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> betragen 1 bis 25 m³/s (Median: 5 bis 6,3 m³/s, vgl. Abbildung 18 – oben rechts), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße 2 bis 38 l/s km² (Median: 7,5 bis 9,7 l/s km², vgl. Abbildung 18 – Mitte rechts). Daraus resultieren Wasserspiegelschwankungen in einer Größenordnung von 2 bis ca. 50 cm (Median: 8 bis 13 cm, vgl. Abbildung 18 – unten rechts). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 34,8 bis 76,4 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte rechts) werden die Amplituden der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße deutlich unterschritten, wobei hohe Amplituden-Werte in der Referenzsituation ausnahmslos in den Monaten Juni bis September vorkommen. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe einem leicht unterdurchschnittlichen Jahr.

4.5.4 Kurzfristiges Abflussregime – Pegel 5



Abbildung 19: Pegel 5 – Monatliche Anzahl (oben) und Dauer (DUR - unten) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit maximalen Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀ (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Anzahl (oben), Median (unten))

Ereignisanzahl

Von Oktober bis April werden anhand der Selektionskriterien (vgl. Kapitel 4.1) etwa 10 bis 145 Anstiegsereignisse und 2 bis 180 Abstiegsereignisse selektiert, wobei im langjährigen Mittel auch bei Pegel 5 zwischen Dezember und April die minimalen Auftrittshäufigkeiten zu erwarten sind. Mit im Mittel etwa 120 Anstiegs- und 160 Abstiegsereignissen wird die maximale Auftrittshäufigkeit auch hier im Hochsommer erreicht (Abbildung 19 - oben). Die Auftrittshäufigkeit selektierter Abflussschwankungen ist im Vergleich zu Pegel 1 und 3 geringer (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 16 - oben), im Vergleich zur Referenzganglinie (Abbildung 10) allerdings immer noch deutlich erhöht.

Ereignisdauer

Betrachtet man die Dauer der selektierten Ereignisse, zeigt sich, dass die Ereignisdauer von An- und Abstiegsereignissen im Vergleich zu Pegel 1 (vgl. Abbildung 13) und 3 (vgl. Abbildung 16) höher ist. Die bei Pegel 5 dokumentierten Anstiegsereignisse dauern 45 bis 210 Minuten, Abstiegsereignisse bis zu 375 Minuten (vgl. Abbildung 19 - unten). Die Ereignisdauer von natürlichen Abflussschwankungen wird auch bei Pegel 5 deutlich unterschritten (vgl. Abbildung 10 – unten). Das Jahr 2018 entspricht im Wesentlichen den mittleren Verhältnissen der gesamten Zeitreihe.

Interpretation anhand von Auftrittshäufigkeit und Ereignisdauer

Wie bei Pegel 1 und 3 lässt Dauer und Auftrittshäufigkeit der Abflussschwankungen auch bei Pegel 5 darauf schließen, dass beinahe alle selektierten Abflussschwankungen auf einen anthropogenen Ursprung zurückzuführen sind. Im Gegensatz zu Pegel 1 und 3 nimmt die Ereignisdauer der An- und Abstiegsereignisse zwischen Pegel 3 und 5 zu. Es ist davon auszugehen, dass die geringere Anzahl selektierter Abflussschwankungen auf die Retentionswirkung im Gewässer zurückzuführen ist, nachdem aufgrund der geringer werdenden An- und Abstiegsgeschwindigkeit immer weniger Abflussschwankungen die Selektionskriterien ($>GW_{20}$) erfüllen. Auch die von Speicherkraftwerk 2 ausgehenden Schwallwellen erhöht die Anzahl selektierter Abflussschwankungen offenbar nicht wesentlich, womit davon auszugehen ist, dass die Intensität der von Speicherkraftwerk 2 ausgehenden Abfluss-schwankunge: Durch die Lagrange'sche Analyse der von Speicherkraftwerk 2 ausgehenden Schwallwellen (vgl. Kapitel 3) kann dieser Umstand überprüft werden.)



Abbildung 20: Pegel 5 – Maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit (MAFR) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median)

Abflussänderungsgeschwindigkeit

Die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegt im Bereich von 0,1 bis 0,72 m³/s min (Median: 0,18 bis 0,23 m³/s min, vgl. Abbildung 20 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 0,12 und 0,8 l/s km² min (Median: 0,21 bis 0,26 l/s km² min, vgl. Abbildung 20 – Mitte links). Die Geschwindigkeit der daraus resultierenden Wasserspiegelschwankungen liegt in einer Größenordnung zwischen 0,1 und 1,4 cm/min (Median: 0,25 bis 0,5 cm/min, vgl. Abbildung 20 – unten links). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 0,39 bis 0,52 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte links) werden die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße damit unterschritten, wobei eine dementsprechende Intensität in der Referenzsituation ausnahmslos auf die Monate Juni bis September beschränkt ist. Im Vergleich zu Pegel 3 (vgl. Abbildung 17 – links) verringert sich die Abflussänderungsgeschwindigkeit leicht. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe, in etwa den mittleren Verhältnissen.

Die Abflussänderungsgeschwindigkeit der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> liegt im Bereich von 0,06 bis 0,3 m³/s min (Median: 0,09 bis 0,14 m³/s min, vgl. Abbildung 20 – oben rechts), bzw. 0,7 bis 0,34 l/s km² min (Median: 0,1 bis 0,16 l/s km² min, vgl. Abbildung 20 – Mitte rechts) und 0,08 bis 0,5 cm/min (Median: 0,16 bis 0,25 cm/min, vgl. Abbildung 20 – unten rechts). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 0,26 bis 0,27 l/s km² min, vgl. Abbildung 11 – Mitte rechts) werden die Abflussänderungsgeschwindigkeiten der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße damit unterschritten, wobei hohe Abflussänderungsgeschwindigkeit der Abstiegsereignisse nimmt im Vergleich zu Pegel 3 ab. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe, in etwa den mittleren Verhältnissen.



Abbildung 21: Pegel 5 - Amplitude (AMP) von Abflussan- und Abstiegsereignissen mit Abflussänderungsgeschwindigkeiten >GW₂₀: absolut (oben), in Relation zur Einzugsgebietsgröße (Mitte) und näherungsweise Bestimmung der Intensität resultierender Wasserspiegelschwankungen (unten) (Zeitreihe 1976-2018 - hellgrau: 5-95% Perzentil, dunkelgrau: 25-75% Perzentil, dunkelgraue Linie: Median; Zeitreihe 2018 – schwarze Linie: Median 2018)

Amplitude

Die Amplituden der selektierten <u>Anstiegsereignisse</u> liegen in einem Bereich von 3 bis 33 m³/s (Median: 7,3 bis 9,1 m³/s, vgl. Abbildung 21 – oben links), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße zwischen 3 bis 36 l/s km² (Median: 8 bis 10 l/s km², vgl. Abbildung 21 – Mitte links). Daraus resultieren Wasserspiegelschwankungen in einer Größenordnung zwischen 4 und ca. 50 cm (Median: 10 bis 18 cm, vgl. Abbildung 21 – unten links). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 63,8 bis 79,4 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte links) werden die Amplituden der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße deutlich unterschritten, wobei hohe Amplituden-Werte in der Referenzsituation ausnahmslos in den Monaten Juni bis September vorkommen. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe den mittleren Verhältnissen.

Die Amplituden der selektierten <u>Abstiegsereignisse</u> betragen 2 bis 26 m³/s (Median: 6,5 bis 8,2 m³/s, vgl. Abbildung 21 – oben rechts), bzw. in Relation zur Einzugsgebietsgröße 2 bis 28 l/s km² (Median: 7,2 bis 9,1 l/s km², vgl. Abbildung 21 – Mitte rechts). Daraus resultieren Wasserspiegelschwankungen in einer Größenordnung von 2 bis ca. 50 cm (Median: 9 bis 18 cm, vgl. Abbildung 21 – unten rechts). Im Vergleich zur Referenz-Abflussganglinie (Median: 34,8 bis 76,4 l/s km², vgl. Abbildung 12 – Mitte rechts) werden die Amplituden der natürlichen Ereignisse in Relation zur Einzugsgebietsgröße deutlich unterschritten, wobei hohe Amplituden-Werte in der Referenzsituation ausnahmslos in den Monaten Juni bis September vorkommen. Das Jahr 2018 entspricht im Vergleich zur gesamten Zeitreihe den mittleren Verhältnissen.

4.5.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Euler'sche Betrachtungsweise zeigen, dass die überwiegende Mehrzahl der im Untersuchungsgebiet erfassten kurzfristigen Abflussschwankungen auf anthropogene Aktivitäten, insbesondere auf den Betrieb von Speicherkraftwerk 1, zurückzuführen ist. Durch die Gegenüberstellung mit der Referenzganglinie wird ersichtlich, dass die Auftrittshäufigkeit selektierter Abflussschwankungen im gesamten Untersuchungsgebiet deutlich erhöht ist. In der Referenzsituation werden gemäß den Selektionskriterien (vgl. Kapitel 4.1) in selten Ausnahmefällen im August bis zu 40 Abflussschwankungen erfasst, während im Untersuchungsgebiet 250 Abflussschwankungen pro Monat keine Seltenheit sind. In den Wintermonaten werden in der Referenzsituation keine Abflussschwankungen selektiert. Im Untersuchungsgebiet werden im Winter im Mittel 150 bis 200 (Pegel 1), 100 bis 150 (Pegel 3) bzw. rund 50 Abflussschwankungen pro Monat (Pegel 5) selektiert. Im oberen Bereich des Untersuchungsgebietes (Pegel 1) übersteigt die maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit der anthropogenen Abflussschwankungen (in Relation zur Einzugsgebietsgröße) die Intensität der natürlichen Ereignisse in der Regel leicht. Im mittleren Bereich (Pegel 3) liegt die Abflussänderungsgeschwindigkeit der Schwallwellen in einer ähnlichen Größenordnung wie die im Hochsommer zu erwartenden natürlichen Ereignisse. Im unteren Bereich (Pegel 5) wird die Intensität der sommerlichen natürlichen Ereignisse um rund 50% unterschritten. Die Amplituden der Schwallwellen liegen im gesamten Untersuchungsgebiet in einer übereinstimmenden Größenordnung und übersteigen (in Relation zur Einzugsgebietsgröße) die Intensität natürlicher Ereignisse nicht.

Die Gegenüberstellung von Pegel 1 und 3 zeigt, dass sich die Dauer der selektierten Abflussschwankungen in einer Gewässerstrecke von 9,5 Flusskilometern nicht wesentlich erhöht. Im Fall der <u>Anstiegsereignisse</u> ist das prinzipiell möglich, nachdem sich die maximale Abflussänderungsgeschwindigkeit unter bestimmten Voraussetzungen (sehr hohes Sohlgefälle, sehr hoher Unterschied der Rauigkeit zwischen Sunk und Schwall) mit steigender Entfernung zur Schwall-Einleitestelle erhöhen kann. In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass auch die Dauer des Ereignisses nicht wesentlich zunimmt.

Im Fall der <u>Abstiegsereignisse</u> kann die Abflussänderungsgeschwindigkeit mit steigender Entfernung zur Schwall-Einleitestelle im Gegensatz zu den Anstiegsereignissen allerdings nicht zunehmen (wenn Überlagerungen mit Abflussschwankungen anderer Quellen ausgeschlossen werden können). Die Abflussänderungsgeschwindigkeit anthropogener Abstiegsereignisse fällt in den ersten Kilometern flussab der Schwall-Einleitestelle in der Regel vergleichsweise stark ab (vgl. Abbildung 5), womit sich mit steigender Entfernung auch die Ereignisdauer tendenziell erhöhen sollte, wenn die Ereignisse nicht von einer weiteren Quelle kurzfristiger Abflussschwankungen beeinflusst werden. Zwischen Pegel 1 und 3 ist eine Erhöhung der Dauer von Abstiegsereignissen allerdings ausschließlich in den Wintermonaten zu beobachten.

Die – insbesondere im Sommerhalbjahr – gleichbleibende Ereignisdauer und die unveränderte Abflussänderungsgeschwindigkeit lässt darauf schließen, dass die Anzahl und Intensität der bei Speicherkraftwerk 1 eingeleiteten Schwallwellen flussauf von Pegel 3 aufgrund einer zu geringen Datenauflösung (15 Minuten) nicht akkurat erfasst werden kann (Anmerkung: Dieser Umstand kann durch die bei den temporären Pegelsonden verfügbare Datenauflösung (1 Minute) einfach überprüft werden.).

5 Verschneidung Euler/Lagrange

Die Ergebnisse der Eulersch'en Betrachtungsweise deuten im fiktiven Fallbeispiel darauf hin, dass Anzahl und Intensität der bei Speicherkraftwerk 1 eingeleiteten Abflussschwankungen im Gewässerabschnitt flussauf von Pegel 3 anhand von 15 Minuten-Werten nicht akkurat erfasst werden können (vgl. Kapitel 4.5.5). Bei der Interpretation von Abflussganglinien mit einer zu geringen zeitlichen Auflösung ist zu berücksichtigen, dass die wahre Intensität und Auftrittshäufigkeit der Abflussschwankungen nicht ermittelt werden kann, insofern keine höhere temporäre Auflösung verfügbar ist. Festzuhalten ist, dass in solchen Fällen sowohl die Auftrittshäufigkeit als auch die Intensität der kurzfristigen Abflussschwankungen systematisch unterschätzt wird. Flussab von Pegel 3 führen die Ergebnisse der Lagrange`schen und Euler`schen Betrachtung zu keinen widersprüchlichen Ergebnissen. In diesem Abschnitt kann davon ausgegangen werden, dass die Retentionswirkung des Gewässers dazu führt, dass der Großteil der Abflussschwankungen anhand der 15 Minuten-Werte akkurat erfasst werden kann.

Neben einer Plausibilitätsüberprüfung kann eine weitere Verschneidung der Lagrange'sche und Euler'schen Ergebnisse zielführend sein, wenn der Einfluss einer spezifischen Schwalleinleitung sehr detailliert untersucht werden soll. Zum Beispiel könnte anhand der Lagrange'sche Betrachtungsweise die maximale Intensität der von Speicherkraftwerk 2 ausgehenden Wellen bestimmt werden. Anhand dieser Ergebnisse kann bei Pegel 4 und 5 ein Intensitätsbereich definiert werden, der von Speicherkraftwerk 2 nicht überschritten werden kann. Diese Information ermöglicht bei Pegel 4 und 5 sämtliche Abflussschwankungen zu selektieren, die aufgrund ihrer hohen Intensität kaum von Speicherkraftwerk 2 stammen können und im fiktiven Fallbeispiel somit auf den Betrieb von Speicherkraftwerk 1 und/oder natürliche Abflussschwankungen zurückzuführen sind.

Zusammenfassend kann eine Verschneidung der Lagrange'schen und Euler'schen Ergebnisse auf die jeweiligen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet abgestimmt werden. Die parallele Anwendung der Modellansätze ermöglicht es, das kurzfristige Abflussregime mit einer wesentlich höheren Detailschärfe zu analysieren bzw. den Einfluss unterschiedlicher Quellen besser abzuschätzen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorliegende hydrologische Monitoring-Konzept ermöglicht es, das (kurzfristige) Abflussregime eines Gewässerabschnittes zu erfassen, dessen zeitliche Variabilität zu beschreiben, die Verhältnisse mehrere Abflussganglinien gegenüberzustellen und im Falle von anthropogen beeinflussten Verhältnissen auf den spezifischen Einfluss unterschiedlicher Quellen von kurzfristigen Abflussschwankungen zu schließen.

Die Ergebnisse der Lagrange`schen Betrachtungsweise können herangezogen werden, um die hydrologische Wirkung einer spezifischen Schwalleinleitung, oder auch einer direkten Maßnahme zur Verringerung negativer schwall- und sunkbedingter ökologischer Auswirkungen zu beschreiben (vgl. SuREmMa+ Forschungsbericht). Die Ergebnisse der Euler`schen Betrachtungsweise können zur in situ Bewertung von Maßnahmen als Prä-Monitoring-Daten herangezogen werden und stellen gemeinsam mit der Beschreibung der morphologisch/sedimentologischen Verhältnisse (vgl. Technischer Bericht II) eine wesentliche Grundlage für die Interpretation von ökologischen Monitoring-Daten (vgl. Technischer Bericht IV) dar.

Zudem erlaubt das vorliegende Monitoring-Konzept die Bearbeitung einer Reihe von wissenschaftlichen Fragestellungen. Beispielsweise lässt sich von den bisherigen Anwendungen des Monitoring-Konzeptes ableiten, dass die Differenz der Abflussänderungsgeschwindigkeit der von einer übereinstimmenden anthropogenen Quelle ausgehenden An- und Abstiegsereignisse aufgrund des unterschiedlichen Retentionsverhaltens mit steigender Entfernung zur Quelle zunimmt (vgl. Abbildung 14 vs. Abbildung 17 vs. Abbildung 20). Wenn in einer Abflussganglinie Abflussschwankungen von mehreren Quellen dokumentiert sind, könnte sich anhand der Differenz der Abflussänderungsgeschwindigkeiten der An- und Abstiegsereignisse möglicherweise Informationen über die Entfernung zur Quelle ableiten lassen, womit Abflusswellen potentiell automatisiert einer bestimmten Quelle zugeordnet werden könnten. Eine Anwendung der Eulersch'schen Betrachtungsweise könnte das Ziel verfolgen, die in Österreich vorkommenden jährlichen Abflussregime detaillierter zu beschreiben.

Zur Finalisierung der Monitoring-Methode ist es erforderlich, das vorliegende Konzept an den wesentlichen Belastungssituationen Österreichs exemplarisch anzuwenden. Der Modellansatz zur Lagrange'schen Betrachtungsweise kurzfristiger Abflussschwankungen wird aktuell durch eine Anwendung in mehreren Einzugsgebieten evaluiert und soll inklusive der zugrundeliegenden R-Codes für die Identifikation assoziierter Ereignisse und die longitudinale Intensitätsmodellierung demnächst publiziert werden (Greimel et al. in Bearbeitung a). Auch der Modellansatz zur näherungsweisen Bestimmung der aus den Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegelschwankungen wird momentan durch eine Gegenüberstellung mit zweidimensionalen, tiefengemittelten hydrodynamisch-numerischen Modellen in einer überregionalen Skalenebene evaluiert (Greimel et al. in Bearbeitung b).

- BMLFUW (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung 2003. 2. Lieferung 2005. 3. Lieferung 2007. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMLFUW (2017). Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015. Internationale und Bilaterale Koordinierung, Wien.
- Graf, W., Leitern, P., Moritz, C., Hubmann, M., Greimel, F., Dossi, F. (2020): Grundlagenerhebung zur Entwicklung eines Bewertungssystems von Fließgewässern mit glazialem Einzugsgebiet auf Basis des Makrozoobenthos - Projekt "Glazass" 101307, Forschungsbericht, Wien.
- 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.
- Greimel, F., Zeiringer, B., Höller, N., Grün, B. & S. Schmutz (2017a): Technischer Bericht A Kurzfristige Abflussschwankungen in Österreich. Ergänzung zu Endbericht: Suremma, Sustainable River Management -Energiewirtschaftliche und umweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen. Forschungsbericht, Wien, Innsbruck, 15 Seiten.
- Greimel, F., Zeiringer, B., Hauer, C., Holzapfel, P., Fuhrmann, M., Haslauer, M., Führer, S., Höller, N., Grün, B., Habersack, H. & S. Schmutz (2017b): Technischer Bericht B - Ökologische Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen sowie weiterführende Analysen und Modelle. Ergänzung zu Endbericht: Suremma, Sustainable River Management - Energiewirtschaftliche und umweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen. Forschungsbericht, Wien, Innsbruck, 68 Seiten.
- Greimel F., Grün B., Zeiringer B., Führer S., Holzapfel P., Fuhrmann M., Höller N., Hauer C., Schmutz S. (in Bearbeitung a) Longitudinal assessment of hydropeaking intensity and frequency based on multiple hydrograph curves a method proposal.
- Greimel F., Zeiringer B., Führer S., Holzapfel P., Fuhrmann M., Höller N., Schmutz S., Hauer C., (in Bearbeitung b) Large scale assessment of anthropogenic caused water level fluctuations.

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ÜBERSICHTSDARSTELLUNG FIKTIVES FALLBEISPIEL (SPEICHERKRAFTWERK 1: FKM 25; RECHTER BILDRAND: FKM 0; P: PERMANENTE (NR. 1, 3 UND 5) UND TEMPORÄRE PEGELSTELLEN (NR. 2 UND 4) 3 ABBILDUNG 2: EREIGNISDEFINITION UND MAßGEBLICHE PARAMETER ZU BESCHREIBUNG DER EREIGNISINTENSITÄT (Q _{MAX} : MAXIMALABFLUSS DES EREIGNISSES; Q _{TSN} ABFLUSSWERT EINES BESTIMMTEN ZEITSCHRITTES WÄHREND DES EREIGNISSES; Q _{TSN+1} : ABFLUSSWERT DES DARAUFFOLGENDEN ZEITSCHRITTES WÄHREND DES EREIGNISSES; Q _{MIN} : MINIMALABFLUSS DES EREIGNISSES; TS _B : ZEITSCHRITT EREIGNISBEGINN; TS _E :
ZEITSCHRITT EREIGNISENDE). 4
ABBILDUNG 3: SYSTEMSKIZZE ZUR IDENTIFIKATION VON ASSOZIIERTEN
– ZEIT; OBEN – ABFLUSSWELLE GEMESSEN AM FLUSSAB GELEGENEN PEGEL; UNTEN - ABFLUSSWELLE GEMESSEN AM FLUSSAUF GELEGENEN PEGEL; 1 – FLIEßZEIT ZWISCHEN DEN PEGELSTELLEN; 2 – AMPLITUDE DES FLUSSAUF GEMESSENEN EREIGNISSES; 3 -
AMPLITUDE DES FLUSSAB GEMESSENEN EREIGNISSES) 7
ABBILDUNG 4: MITTLERE SPEZIFISCHE VERTIKALE WASSERSPIEGELDIFFERENZ (DW _{SPEZ})
GEMAß REGRESSIONSMODELL (LINIEN) VOR (LINKS) UND NACH KALIBRIERUNG (RECHTS)
UND GEGENUBERSTELLUNG MIT DEN WERTEN AUS KEPKASENTATIVEN DEGELSCHLÜSSELKUDVEN IN EDELELIEØENDEN GEWÄSSEDADSCHNITTEN (VIEDEGKE
A DELLISSDEDEICH O DIS 2XO (NW) K DEISE A DELLISSDEDEICH 2XO DIS 2XMO
(MW) DREIECKE - A BELUSSBEREICH 2XMO BIS 5XMO (MW))
ABBILDING 5: SZENARIENSPEZIFISCHE RETENTIONSKURVEN DO/DT (WIRKUNGSSZENARIO B3
BIS F – VGL, SUREMMA FORSCHUNGSBERICHT KAPITEL $2.2.1$) IM FIKTIVEN FALLBEISPIEL
FÜR AN- (A) UND ABSTIEGSEREIGNISSE (B) (PUNKTE ENTSPRECHEN DEN ERGEBNISSEN
DER LINEAREN MODELLE ZWISCHEN ZWEI BENACHBARTEN PEGELSTELLEN) 11
ABBILDUNG 6: SZENARIENSPEZIFISCHE (SZENARIEN-BESCHRIFTUNG – SIEHE A, D)
RETENTIONSKURVEN DW/DT (WIRKUNGSSZENARIO B3 BIS F – VGL. SUREMMA
FORSCHUNGSBERICHT KAPITEL 2.2.1) IM FIKTIVEN FALLBEISPIEL BEI NIEDRIGEN (NW - A,
D), MITTLEREN (MW - B, E) UND ERHÖHTEN ABFLUSSBEDINGUNGEN (HW - C, F) FÜR
ABLUSSAN- (A, B, C) UND ABSTIEGSEREIGNISSE (D, E, F) 13
ABBILDUNG 7: STREUDIAGRAMME (KREUZE ENTSPRECHEN WERTEN GANGLINIEN, IN
WELCHEN DAVON AUSZUGEHEN IST, DASS DAS JÄHRLICHE INTENSITÄTSMAXIMUM AUF EIN NATÜRLICHES EREIGNIS ZURÜCKZUFÜHREN IST) UND MODELLE (VGL. TABELLE 6) ZUP ELÄCHENDECKENDEN NÄHEPUNGSWEISEN DESTIMATING DER LÄURLICH
ZUK FLACHENDECKENDEN NAHEKUNGSWEISEN BESTIMMUNG DEK JAHKLICH
MITTI EREN UNREEINEI USSTEN AREI USSES (MO) EÜR DIE INTENSITÄTSPARAMETER
MATTLEREN ONBEENTE LOSSTEN ADTE USSES (MQ) FOR DIE INTENSTATSTARAMETER MAXIMALE (MAFR $_$ LINKS) LIND MITTLERE (MFFR $_$ MITTE)
ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT SOWIE AMPLITUDE (AMP – RECHTS) FÜR AN- (IC
– OBEN) UND ABSTIEGSEREIGNISSE (DC – UNTEN)
ABBILDUNG 8: MITTLERE MONATLICHE ABFLUSSSPENDE (MO) GEMÄß
WASSERBILANZMODELL DIGITALER HYDROLOGISCHER ATLAS ÖSTERREICH (BMLFUW,
2007) FÜR DIE RELEVANTEN TEILEINZUGSGEBIETE DES FIKTIVEN FALLBEISPIELS (GRAU)
UND AN AUSGEWÄHLTEN PEGELSTELLEN (SCHWARZ - PEGEL 1, 3 UND 5 VGL. ABBILDUNG
1) 21
ABBILDUNG 9: MITTLERE MONATLICHE ABFLUSSSPENDE (MQ) GEMÄß
WASSERBILANZMODELL DIGITALER HYDROLOGISCHER ATLAS ÖSTERREICH (BMLFUW,
2007) FÜR DIE RELEVANTEN TEILEINZUGSGEBIETE DES FIKTIVEN FALLBEISPIELS (GRAU)
UND AN 5 POTENTIELLEN REFERENZ-PEGELSTELLEN (SCHWARZ) 22
ABBILDUNG 10: REFERENZ-ABFLUSSGANGLINIE – MONATLICHE ANZAHL VON ABFLUSSAN-
UND ABSTIEGSEKEIGNISSEN MIT MAXIMALEN
ABFLUSSANDEKUNGSGESCH WINDIGKEITEN >GW20 (UBEN) UND EKEIGNIS-DAUER (LINITEN) INI MONIATEN INI WEI CHEN IM LANGLÄHDIGEN MITTEL MIND, EINI EDEICNIG DDO
(UNTER) IN MURATEN IN WELCHEN IM LANGJAHRIGEN MITTEL MIND. EIN EREIGNIS PRO IAHD ALIETDITT (ZEITDEIHE 1001-2016 HELLODAH, 5-050/ DEDZENTH DUNKELODAH, 25
JAHR AUFTRITT (ZEHREINE 1991-2010 – HELLUKAU: J-93% PEKZENTIL, DUNKELUKAU: 23-

75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 – SCHWARZE LINIE: MEDIAN)

23

ABBILDUNG 11: REFERENZPEGEL – MAXIMALE ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT (MAFR) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20 IN MONATEN IN WELCHEN IM LANGJÄHRIGEN MITTEL MIND. EIN EREIGNIS PRO JAHR AUFTRITT: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER RESULTIERENDEN WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2016 -HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN) 25 ABBILDUNG 12: REFERENZPEGEL - AMPLITUDE (AMP) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN 2018) 26 ABBILDUNG 13: PEGEL 1 - MONATLICHE ANZAHL (OBEN) UND DAUER (DUR - UNTEN) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT MAXIMALEN ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20 (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 – SCHWARZE LINIE: ANZAHL (OBEN), MEDIAN (UNTEN)) 27 ABBILDUNG 14: PEGEL 1 – MAXIMALE ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT (MAFR) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 -HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN) 29 ABBILDUNG 15: PEGEL 1 - AMPLITUDE (AMP) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN 2018) 30 ABBILDUNG 16: PEGEL 3 - MONATLICHE ANZAHL (OBEN) UND DAUER (DUR - UNTEN) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT MAXIMALEN ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20 (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 – SCHWARZE LINIE: ANZAHL (OBEN), MEDIAN (UNTEN)) 32 ABBILDUNG 17: PEGEL 3 – MAXIMALE ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT (MAFR) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 -HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN) 34 ABBILDUNG 18: PEGEL 3 - AMPLITUDE (AMP) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN 2018) 35 ABBILDUNG 19: PEGEL 5 - MONATLICHE ANZAHL (OBEN) UND DAUER (DUR - UNTEN) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT MAXIMALEN ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20 (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-

95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: ANZAHL (OBEN), MEDIAN (UNTEN)) 37 ABBILDUNG 20: PEGEL 5 – MAXIMALE ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT (MAFR) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 -HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN) 38 ABBILDUNG 21: PEGEL 5 - AMPLITUDE (AMP) VON ABFLUSSAN- UND ABSTIEGSEREIGNISSEN MIT ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEITEN >GW20: ABSOLUT (OBEN), IN RELATION ZUR EINZUGSGEBIETSGRÖßE (MITTE) UND NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER INTENSITÄT RESULTIERENDER WASSERSPIEGELSCHWANKUNGEN (UNTEN) (ZEITREIHE 1976-2018 - HELLGRAU: 5-95% PERZENTIL, DUNKELGRAU: 25-75% PERZENTIL, DUNKELGRAUE LINIE: MEDIAN; ZEITREIHE 2018 - SCHWARZE LINIE: MEDIAN 2018) 40

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ÜBERBLICK – ABFLUSSGANGLINIEN IM FIKTIVEN FALLBEISPIEL	. 3
TABELLE 2: EREIGNISBEZOGENE INTENSITÄTS- (NR. 1-5) UND HÄUFIGKEITSPARAMETER (Z.B.	
NR. 6): DEFINITIONEN UND EINHEITEN.	. 5
TABELLE 3: GEGENÜBERSTELLUNG DER MITTLEREN SPEZIFISCHEN VERTIKALEN	
WASSERSPIEGELDIFFERENZ (DW _{SPEZ}) GEMÄß REGRESSIONSMODELL UND	
PEGELSCHLÜSSELKURVEN IN FREIFLIEßENDEN GEWÄSSERABSCHNITTEN UND	
BERECHNUNG DES MITTLEREN MODELLFEHLERS FÜR UNTERSCHIEDLICHE	
ABFLUSSBEREICHE	. 9
TABELLE 4: FIKTIVES FALLBEISPIEL - SPEICHERKRAFTWERK 1: LINEARE MODELLE ZUR	
BESCHREIBUNG DER INTENSITÄTSVERÄNDERUNG ZWISCHEN BENACHBARTEN	
PEGELSTELLEN FÜR ABFLUSSANSTIEGSEREIGNISSE	11
TABELLE 5: FIKTIVES FALLBEISPIEL - SPEICHERKRAFTWERK 1: LINEARE MODELLE ZUR	
BESCHREIBUNG DER INTENSITÄTSVERÄNDERUNG ZWISCHEN BENACHBARTEN	
PEGELSTELLEN FÜR ABFLUSSABSTIEGSEREIGNISSE	11
TABELLE 6: MODELLPARAMETER GEMÄß FORMEL 1 ZUR NÄHERUNGSWEISEN BESTIMMUNG	
DER JÄHRLICH ZU ERWARTENDEN MAXIMALINTENSITÄT NATÜRLICHER EREIGNISSE	
(GW100) BEZUGNEHMEND AUF DIE PARAMETER MAXIMALE (MAFR – M3/S 15MIN) UND	
MITTLERE (MEFR – M³/S 15MIN) ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT SOWIE	
AMPLITUDE (AMP – M3/S) FÜR ABFLUSSAN- (IC) UND ABSTIEGSEREIGNISSE (DC)	15
TABELLE 7: ZU ERWARTENDE JÄHRLICHE MAXIMALE NATÜRLICHE	
ABFLUSSÄNDERUNGSGESCHWINDIGKEIT (GW100 - MAFR) BEI DEN ABFLUSSGANGLINIEN	
IM FIKTIVEN FALLBEISPIEL (VGL. FORMEL 1 UND TABELLE 6)	17