

# Ein Gesamtsicherheitskonzept am Inn, HQ 100, HQ1000, Klimafolgenanpassungen - von der Wehrleistungsfähigkeit bis zu stark variablen Sedimentsohlen

Georg Loy, Florian Pflieger, Roberto Kohane und Johannes Wesemann

## Zusammenfassung

VERBUND betreibt die Kraftwerke am Inn von Oberaudorf-Ebbs Inn km 211 bis Passau bei Inn km 4. Im Verantwortungsbereich liegt die sichere Hochwasserabfuhr für den Bemessungsabfluss sowohl an den Stauanlagen aber auch in den Staugebieten mit beeinflussten Seitengewässern und den zugehörigen Dämmen und Deichen. Nach den Hochwasserereignissen 1985, 2005, 2013, aber auch bedingt durch das Extremereignis in Simbach 2016 wurden, auch mit der Einführung der DIN 19700 Teil 13, umfangreiche Dammanpassungen umgesetzt und die Leistungsfähigkeit der Wehranlagen verifiziert. Durch den stark sedimentführenden Inn und ein praktiziertes, adaptiertes Stauraummanagement kam und kommt es zu gemessenen Veränderungen der Anlandungssedimente die direkt die Wasserspiegellagen und damit die Freiborde an den Dämmen und Deichen sowie die Wasserspiegellagen in den betrachteten Seitengewässern beeinflussen. Durch die Änderung der Bemessungshochwässer nach dem Ereignis 1985 aber auch durch die DIN mit der Betrachtung eines HQ1000 als Bemessungshochwasser wurden Studien beauftragt, die zum einen die Bemessungshochwässer an den Staustufen neu einordneten und zum anderen in der Verifizierung an Wehren und in den Stauräumen zu umfangreichen Maßnahmen führten. Die Ursachen der gemessenen Veränderung der Sedimentsohlen sind vielschichtig, so dass nur durch umfangreiche Analyse des Ist - Zustandes, Modellierung, Variantenuntersuchungen und Prognosen für die Zukunft das vorhandene Sicherheitsmaß an den Dämmen eingeordnet werden kann. Das erlebte Extremereignis in Simbach 2016 führte zu einer weiteren Sensibilisierung bei Betreibern und Behörden, um auch kleine Einzugsgebiete in das Gesamtsicherheitskonzept einzubeziehen. Im Beitrag werden die diskutierten Freiborde mit Bemessungsereignissen in Kombination mit den Hochwasserschutzanforderungen aufgezeigt und das Gesamtsicherheitskonzept aus Anlagensicherheit, laufender Verifizierung und Modellierung mit den gewählten Freiborden und kompetenter Hochwassereinsatzplanung an konkreten Umsetzungsprojekten beleuchtet. Eine Einordnung zu den Herausforderungen der Klimafolgenanpassung für große Einzugsgebiete wie den Inn, soll aus der Sicht des Betreibers - zu den geltenden Bemessungsereignissen - aufgezeigt und diskutiert werden.

## 1 Das Einzugsgebiet und die Sedimentthematik

Der größte Teil des Einzugsgebiets des Inn ist durch einen hochalpinen Charakter mit seinem Basiswinterabfluss und den Schmelzwasser Abflüssen des Frühjahrs, die im Sommer durch die hochalpinen Gletscherabflüsse ergänzt werden geprägt. Zusätzlich ist das Abflussverhalten durch die starken Gewitterniederschläge in den z. Teil steilen Teileinzugsgebieten mit dem sehr schnellen An- und Abswellen der Abflüsse, deren Charakteristik sich auch in den Hochwasserereignissen widerspiegelt, beeinflusst. Extreme Hochwässer sind somit am Inn immer hochalpin geprägt, sei es 1985 und 2005 vom Inn oder 2013 von der Salzach. Das voralpine Einzugsgebiet führt folglich alleine bedingt durch die doch kleineren Seitengewässer zu keinen Extremereignissen im Inn. Dies spiegelt sich auch in den statistisch festgelegten HQ100 Sommer ( $2850 \text{ m}^3/\text{s}$  \*) und HQ100 Winter ( $1250 \text{ m}^3/\text{s}$  \*; \*Pegel Wasserburg) Festlegungen wieder, die ab

September durch die Reduzierung des Regeneinzugsgebietes der alpinen Schneefallgrenzen beeinflusst werden. Die aktuelle Abflussmengenentwicklung könnte natürlich durch das weitere Abschmelzen der Gletscher und Veränderung der Schneefallgrenze verändert werden. Aus einem recht gleichmäßig hohen Schneeschmelzhochwasser zwischen Mai und August wurde in den letzten Jahren ein stark schwankender, aus Schneeschmelze und Niederschlägen gespeister Abfluss, der sehr regelmäßig durch einzelne, meist extremen Abflussspitzen in den Teileinzugsgebieten charakterisiert ist. Aktuelle statistische Analysen zum HQ100 zeigen aber für das große Einzugsgebiet des Inns keine andere Einordnung zum BHQ1 auch unter Einbeziehung der Ereignisse 2005 und 2013; GLOWA, 2009; LFU, 2015.

## 1.1 Die Staustufen am Inn

Der Inn ist ab Kufstein bis zur Mündung als geschlossene Kraftwerkskette ausgebaut. Am Oberen Inn zwischen Innsbruck und Wasserburg befinden sich auf österreichischer Seite die Staustufen Kirchbichl (TIWAG), Langkampfen (TIWAG) und flussab die VERBUND Kraftwerkskette von Oberaudorf-Ebbs bis Passau-Ingling (Tabelle 1). Als wesentliche Zuflüsse sind Mangfall, Attl, Isen, Alz und schließlich die Salzach zu nennen. Ab der Salzachmündung, die Salzach hat ein ähnlich hochalpines Einzugsgebiet und es verdoppeln sich nahezu die Abflüsse. Die Charakteristik der Staustufen ändert sich auch im Hinblick auf die Wirkung der Sandfrachten in den Stauräumen. Teile der hohen und weiten Stauhaltungen sind in den abseits vom Hauptstrom liegenden Bereichen noch nicht endverlandet und bilden die Basis von Flachwasser- und Sukzessionsbereichen, die diese Staustufen zum RAMSAR Vogelschutzgebiet von internationaler Bedeutung werden hat lassen. Im Hauptstrom, mit den im Fluss liegenden Leitwerken, ist eine ähnlich variable abflussabhängige Sohle zu beobachten wie am Oberen Inn. Die Betrachtung der WSP – Lagen ist von dieser variablen Sohle abhängig, wobei hier dann auch 2d – Effekte in den noch durchströmten Seitenarmen bei den WSP – Berechnungen Berücksichtigung finden. Manche Bereiche am Oberen Inn (Wasserburg – Neuötting) und der untere Bereich von Schärding bis Passau ist dominiert von Schluchtstrecken. Die anderen Stauräume dieser Staustufen sind größtenteils durch Stauhaltungsdämme und Deiche seitlich begrenzt.

**Tab. 1** Wesentliche Daten der Kraftwerke und Bemessungswerte am Inn

	Inn km	HQ 100	HQ 1000	Ausbau- abfluss	Ausbau- fallhöhe	Überstau HQ 1000	Lastfall Wehr HQ 100
		m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m	m	
<b>Oberaudorf/Ebbs</b>	211,3	2250	2800	580	11,6	0,00	(n-a)
<b>Nußdorf</b>	198,7	2270	2850	550	11,6	0,00	(n-1), f* = 0,7
<b>Rosenheim</b>	187,5	2290	2880	575	8,2	0,00	(n-1)
<b>Feldkirchen</b>	173,1	2760	3410	580	8,7	0,50	(n-a)
<b>Wasserburg</b>	159,9	2850	3500	565	7,2	0,50	(n-a)
<b>Teufelsbruck</b>	147,2	2850	3510	450	7,0	0,20	(n-a)
<b>Gars</b>	137,5	2860	3530	550	7,4	0,70	(n-a)
<b>Jettenbach</b>	128,0	2870	3540	75	9,6	0,00	(n-1)
<b>Töging Kanal</b>				410			
<b>Neuötting</b>	91,1	2940	3680	510	6,8	0,00	(n-1)
<b>Perach*</b>	83,0	2950	3700	510	5,4	1,08	(n-1)
<b>Stammham</b>	75,4	3370	4300	510	5,6	0,80	(n-1)
<b>Braunau/Simbach</b>	61,1	6140	7770	1070	10,9	0,00	(n-1)
<b>Ering/Frauenstein</b>	48,0	6280	8020	1010	9,7	0,00	(n-1)
<b>Eggfing/Obernberg</b>	35,3	6360	8160	1080	10,5	0,00	(n-1)
<b>Schärding/Neuhaus</b>	18,8	6700	8700	1060	10,6	0,00	(n-1)
<b>Passau/Ingling</b>	4,2	6800	8800	1050	9,5	0,00	(n-1)

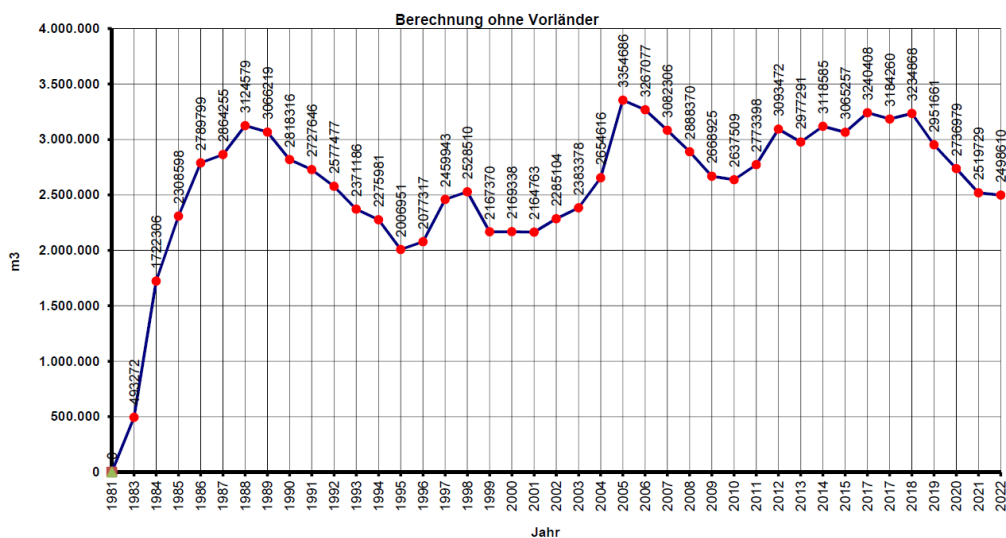
\*Berücksichtigung Abfluss über Vorland und Streichwehr

## 1.2 Sedimentfrachten

Der ursprünglich am Inn dominante Kiestransport, der das Gewässer optisch und als Lebensraum prägte, wurde mit zunehmender Querverbauung des Gewässers auf den Transport von Feinmaterialfrachten reduziert. Der Transport der Kies- und Schotterfraktionen wird dabei nahezu gänzlich im Oberlauf zurückgehalten. Im Unterhaltsbereich VERBUND stellen nun Glimmersande zentralalpiner Herkunft die dominante Körnungsfraction dar. Dieses Material wird in sehr großen Mengen (Jahresfrachten bis Stammham > 400.000 m<sup>3</sup>; bei Extremereignissen Millionen m<sup>3</sup>) transportiert, so dass über längere Zeiträume hinweg das Wasser trüb ist. Alle Stau-stufen am Oberen Inn, die über keine Absenkvorschriften (Sondersituationen im Bescheid) bei Hochwasser verfügen, sind endverlandet und bilden im unteren Stauabschnitt eine nichtbindige, variable Sandsohle, die je nach Abflussereignissen und Einträgen von Oberstrom variiert. Diese sogenannte „Endverlandungssohle“ wurde schon beim Stau-stufenbau bei der Berechnung der Wasserspiegellagen berücksichtigt und bildet sich auch in den Freiborden an den Dämmen und Deichen mit Rücklaufgewässern ab.

## 1.3 Verlandung der Stauräume

Durch die starke Sedimentführung des Inns verlanden die Stauräume der Innstau-stufen in relativ kurzer Zeit. In der Regel wird wenige Jahre nach Inbetriebnahme der Stau-stufe der Endzustand der Verlandung erreicht. Dieser Verlandungsendzustand kann als dynamisch bezeichnet werden. Die sogenannte „Gleichgewichtssohle“ pendelt innerhalb eines Schwankungsbandes in Abhängigkeit vom Abflussgeschehen. Das oben beschriebene Verhalten lässt sich am Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Anlandevolumen im Stauraum Nußdorf, Abb. 1 beobachten. Im Stauraum Nußdorf sind die größten zeitlichen Sohlschwankungen durch Peilungen bestätigt, die vor allem auf betriebsbedingte Einflüsse wie Stauzielabsenkungen bei Hochwasser oder Stauraumspülungen in den oberliegenden Stau-stufen, zurückzuführen sind. In Abb. 1 ist außerdem die bereits oben erwähnte kurze Dauer des Sedimentverlandungs- und Ausräumungsprozesses im Stauraum Nußdorf zu sehen. Hier war bereits nach weniger als 4 Jahren nach Inbetriebnahme der Stau-stufe der Stauraum verlandet. Die Ereignisse 2005 und 2019 prägen das Bild mit der Wirkung der Absenkung der Stau-stufe Oberaudorf-Ebbs, die zu einer Neuauflage der AG Stauraummanagement und zu Dammanpassungen führten. In 2021 ist real das Volumen vor dem Hochwasserereignis 2005 wieder erreicht.



**Abb. 1** Historische Entwicklung der Anlandevolumina Stau-stufe Nußdorf am Inn

Die Sedimentfrachten des oberen Einzugsgebietes sind durch anthropogene Beeinflussung, z.B. Stauraumpülungen, aber auch durch natürliche Ereignisse wie Bergrutsche und Starkregenereignisse in Teileinzugsgebieten geprägt, die sich in der langjährigen Betrachtung schwer einordnen lassen. Das gilt auch für die Frage, inwieweit die zunehmende Mobilisierung von Material der ursprünglichen Permafrostbereiche oder den Gletscherbereichen der Inn nahen Alpenregionen ausschlaggebend waren. Diese als Ursache der zunehmenden Verlandungsmengen einzuordnen ist schwierig bis unmöglich. Klar ist aber, dass fast an allen Staustufen am Oberen Inn jährliche Fächerecholotpeilungen und die Messung der Wasserspiegellagen durch permanente Aufzeichnung, die Basis für eine jährliche Analyse bilden. Die Wirkung ist in den Anlandesohlen der jeweiligen Stauhaltung erkennbar und die Analyse und Einordnung erfolgt durch Modellierung und Langzeitsimulationen von Sohle und Wasserspiegellagen auch über mehrere Stauhaltungen. Im Hinblick auf die Anlagensicherheit ist es eigentlich nicht wesentlich die Ursache zu ergründen, sondern zeitnah auf Freiborddefizite mit Damm-/und Deichanpassungen oder Baggerung (Bereich Kufstein) von Grobsedimenten zu reagieren. Die Wirkung von temporär starken Absenkvorschriften am Wehr, um bis zur Umsetzung ein größeres Freibord an den Dämmen zu erhalten, ist auf einen meist nur kurzen oberstromigen Bereich begrenzt. Im oberen Bereich der Stauhaltung dominieren die hochwasserbedingten Fließbedingungen. Bei den Staustufen, Kirchbichl und Langkampfen (TIWAG) ist die jährliche Spülung systemrelevant, um zum einen die dort vorhandenen Kieseinträge in die Baggerbereiche oder Ausleitungsstrecken zu spülen aber auch um die Feinsedimente jährlich nach Unterstrom in den Staubereich Oberaudorf-Ebbs zu verfrachten. Die Staustufe Oberaudorf-Ebbs mit dem wesentlichen höheren Stauziel und einer ursprünglichen Absenkvorschrift, die sich an einem Brückenpegel orientiert, stellt dabei einen Systemwechsel dar, der wegen der unterstromigen Staustufen mit kleinen oder konstanten Stauzielen wiederum auf die extremen Einträge vergleichmäßigend reagieren muss. Zu diesem Systemwechsel wurde mit der sogenannten „AG Stauraummanagement“ eine deutsch-österreichische Arbeitsgruppe unter Einbeziehung aller Staustufenbetreiber und Fachbehörden gegründet. Die Ergebnisse, die nach dem Hochwasser 2005 erarbeitet wurden, führten zu Lösungen und prognostizierten Wirkungen; Loy, 2008; Kohane, 2010. Diese wurden jedoch durch die beobachteten Anlandungen und das relativ kleine Ereignis 2019 komplett in Frage gestellt, weswegen neue Ansätze zur Vergleichmäßigung erarbeitet wurden.

## **2 Änderung der Bemessungsereignisse, Normen und Merkblätter**

Seit der Inbetriebnahme haben sich bei den meisten Anlagen am Oberen Inn die Bemessungshochwasserabflüsse erhöht. Für die Stauanlage Nußdorf beispielsweise ergab sich zwischen 1981 und 1994 eine Erhöhung des HQ100 von 1950 m<sup>3</sup>/s auf 2250 m<sup>3</sup>/s d.h. ca. 15%. Mit dem stärkeren Einfluss des Voralpenraumes nimmt diese Zunahme anteilig statistisch ab und am Unteren Inn, ab Zusammenfluss mit der Salzach, sind die ursprünglichen Bemessungsereignisse aus der Bauzeit größer als die mit den neuen Messdaten ermittelten Werte. Darüber hinaus hat sich in einigen Stauräumen die Verlandung anders entwickelt als prognostiziert. Die höheren Bemessungsabflüsse und die größere Stauraumverlandung haben zur Folge, dass die im Wasserrechtsbescheid fixierten und geforderten Höchstwasserspiegellagen und Freibordmaße der Stauhaltungsdämme nicht überall eingehalten werden konnten. Vorhandene zum Teil bereits bekannte und analysierte Defizite an den Hochwasserschutzeinrichtungen wurden beim Extremhochwasser vom August 2005 bestätigt, weiter analysiert und Maßnahmen ergriffen, um diese zu beseitigen. Hinzu kamen die in der DIN 19700 Teil 13 (2004) beinhaltete Einführung des HQ1000 als Bemessungsereignis bei der Berücksichtigung der Anlagensicherheit: Wehrleistungsfähigkeit, statischen Betrachtung der Stauhaltungsdämme, Dichtungslänge und Freiborde

und die vom Betreiber berücksichtigte Wirkung in die Seitengewässer im Hinblick auf die Gesamtanlagensicherheit. Dadurch wurde der ursprüngliche Bemessungsansatz mit HQ100 und HQ 100 (n-1) verlassen und das HQ1000 als zusätzlichen Bemessungswert für die Stauhaltung mit Wehren eingeführt. Aufgrund fehlender Grundlagen wurde bereits 2005 eine Studie der TU München zur Ermittlung der HQ1000 Werte am Inn und zu einer Einordnung der Wehrleistungsfähigkeit an allen Staustufen des Inn für das neue Bemessungsereignis durchgeführt. Im Vorfeld wurden an allen Staustufen eine Defizitanalyse im Hinblick auf den (n-1) Fall durch die Erhöhung des HQ 100 erstellt und Nachweise zum (n-a), (n-1) nach DVWK Merkblatt 216/1990 durchgeführt. Es wurden neben den Naturereignissen auch Modellversuche und Modellierungen zur Vervollständigung der Sicherheitsbetrachtung durchgeführt. Bei der (n-a) Betrachtung gab es je nach ursprünglichen Bemessungswert und Defizit unterschiedlichste Lösungen, die die Gesamtanlagensicherheit im Fokus hatten. Ein wesentlicher Sicherheitsaspekt der eindeutig sommerdominierten Extremhochwässer war, geplante Revisionen in die abflussärmere Zeit zu legen. Zusätzlich wurden zum Teil redundante Antriebe für die Wehrverschlüsse installiert und Portalkräne mit Gleichlauf ausgestattet, so dass der Unterschütz zusätzlich gehoben werden kann. Betrachtet wurden meist das festgelegte Stauziel aus dem Bescheid, das auch bei der (n-a) Betrachtung einzuhalten war. Die Nachweise konnten alle geführt werden bzw. befinden sich in der Aktualisierung. Wesentliche Themen bei der Gesamtsicherheitsbetrachtung an den Wehren sind zu dem:

- Das dokumentiert seltenes Auftreten von Störungen der Wehre,
- ein Besetzen der Kraftwerke bei Hochwasser um Treibholz gezielt abzuführen und um eine Steuerung vor Ort im Mehrschichtbetrieb zu gewährleisten,
- Regelmäßige Übungen von (n-a)-Lösungen, das einmalige Fahren aller Verschlüsse im Jahresverlauf und Heizung der Verschlüsse (Dichtungen) im Winter,
- eine gelebte Fehlerkultur, die alle beobachteten Störungen meldet, behebt und Änderungen bei allen Anlagenteile am Inn einfordert,
- Ersatzteilverhaltungen für wesentliche Bauteile, um das Zusammentreffen Extremhochwasser und Ersatzteilbeschaffung (Lieferzeiten) durch zeitnahe Reparatur auszuschließen,
- Änderung der historischen Wehrbetriebsordnung um Verklausungen zu reduzieren und OW – Hindernisse wie Dammbalkenlager wurden höher gesetzt,
- Ausgeleuchtete Kamerabeobachtung von Pegeln und Wehren von der Warte aus.

Mit der HQ1000 Betrachtung kam hinzu, dass ein Überstau am Wehr zulässig ist und der n – Fall betrachtet wird. Der Abfluss der Kraftwerke wurde, wie auch beim HQ100, nicht im Hinblick auf die Gesamtleistungsfähigkeit berücksichtigt. Das Verhältnis HQ1000/HQ100 beträgt am Inn 1,26. In einer Arbeitsgruppe Kraftwerksbetreiber, Umweltministerium und Fachbehörden war man sich sehr schnell einig, dass es keine unterschiedlichen Sicherheitsmaße bei Dämmen und Deichen sowohl bzgl. Freibordbetrachtung als Nachweisführung der Anlagensicherheit am Inn geben sollte, siehe auch Merkblatt des LfU, 2009. Mit der HQ1000 Betrachtung und dem Überstau am Wehr wurden systematisch alle Freiborde und Dichtungsfreiboarde angepasst, so dass nunmehr für folgende Lastfälle ein ausreichender Freibord  $f$  oder reduziertes Freibord  $f^*$  vorliegt:

**Lastfälle BHQ 1 (HQ100):** n- Fall, n-1, n-a, mit Freibord 1,2 m, bzw. 1 m und 0,7 m für  $f^*$

**Lastfälle BHQ 2 (HQ1000):**  $f = 0,3$  m aber meist wesentlich für Dichtungshöhe

Mindestfreibord an den Mündungen der Seitengewässer BHQ 2 = 0,3 m und Berücksichtigung HQ100-Inn und HQ100-Seitengewässer ( $f = 1,0$  m bis 0,8 m (Mündung und staubeeinflusster Bereich kleinerer Gewässer)).

### 3 Gesamtsicherheitsbetrachtung

Durch die kurzen Vorwarnzeiten (um 8 h) am Inn bis zum Extremereignis gibt es Hochwasseranweisungen für den Kraftwerks- und Wehrbetrieb aber auch für die Damm- und Deichkontrolle mit Meldeköpfen und Krisenkommunikation, die jährlich geübt und zu denen Schulungen extern und intern durchgeführt werden. Diese Organisation wird laufend optimiert und verbessert, so dass aus den Erfahrungen zu den Hochwassern 2005 und 2013 wesentliche Positionen ergänzt und erweitert wurden. Der Personalbedarf z.B. der externen Dammgeher und die zugehörigen Schulungen wurden erhöht, um dem eigenen Personal mehr Raum für Koordination und Überprüfung der Meldungen und Beobachtungen zu geben. Auch die Rahmenverträge mit lokalen Baufirmen, die ein zentrales Element bei lokalen Sickerwasser-austritten oder bei Defiziten an Pumpwerken waren, wurden ergänzt. Klar ist, dass bei jedem Extremereignis andere Defizite erkannt werden, die in eine Analyse zur Anpassung und Überprüfung von Bauwerken oder der Organisation führen; Loy, 2006. Die Defizite werden zeitnah behoben, die Erkenntnisse dokumentiert und auf andere Staugebiete übertragen.

In der Gesamtsicherheitsbetrachtung sind sowohl das BHQ1 mit Ausfallszenarien am Wehr als auch das HQ1000 berücksichtigt. In den Staugebieten mit variablen Sohlen wurden mit den Behörden die Bemessungsohlen mit der jeweils zugehörigen Wasserspiegellage im Detail betrachtet und eingeordnet. Die Sandsohlen zeigen dabei große Variabilität in Lage und Menge, so dass fast für jedes Staugebiet andere Kriterien bei ähnlicher Gesamtsicherheitsbetrachtung gesucht wurden. Die oberen Stufen zeigen dabei größere Variabilität, so dass jeweils die höchste jemals gemessene Sohle (mit Lage) mit der einhüllenden Wasserspiegellage als Dimensionierungsgrundlage für das Freibord und die Dichtungserhöhung gewählt wurde. Nach dem kleinen Hochwasser 2019 mit der Ausräumung in Oberaudorf-Ebbs reagierten Nußdorf und Feldkirchen auffällig stark auf den Sedimenteintrag, während die dazwischen liegende Stufe Rosenheim durch den geraden Verlauf eher unauffällig blieb. Die Priorität wurde folglich auf die genannten zwei Staustufen mit beeinflussten Seitengewässern und besiedelten Bereichen gelegt. Von den Erkenntnissen nach dem Hochwasser **2019**, der Analyse, der Genehmigung bis zum Abschließen der Dammerhöhungen **2022** wurden alle oben genannten Kriterien eingehalten. Auch für die beeinflussten Seitengewässer wurden zeitnah lokale Lösungen erarbeitet, die sich in 2023 in der Umsetzung oder Detailplanung befinden. Die höchsten gemessenen Sohlen mit den zugehörigen WSP – Berechnungen unterschritten in manchen Bereichen das Mindest-freibord zum HQ1000 und zum HQ100 wesentlich.

Vom Freistaat Bayern wird derzeit an der Mangfall ein Polder errichtet, der Resilienzen bei Extremereignissen liefern soll. Auch am Inn wurde eine Studie vom STMUV beauftragt und auch hier gibt es Potenziale wie z.B. einen unbesiedelten Bereich, der für besiedelte Bereiche eine zusätzliche Retention und damit Abmilderung eines Extremereignisses liefern kann. Bei großen Flüssen wie dem Inn ist aus Sicht des Kraftwerksbetreibers, mit den kurzen Vorwarnzeiten, der steilen alpinen Einzugsgebiete, wenig zeitlicher Spielraum durch Absenkung am Wehr eine messbare Retentionswirkung tatsächlich zu realisieren. Der im Ereignisfall zu erwartende Spitzenabfluss bleibt auch heute noch aus verschiedensten Gründen nicht prognostizierbar.

Mit der Einführung des HQ1000 hat aus Sicht des Betreibers die Sicherheit sowohl am Wehr als auch bei den Dämmen und Deichen (Sicherheitskonzept Inn) ein über die (n-1) Betrachtung hinaus gehendes höheres Sicherheitsmaß erhalten, als es bei den ursprünglichen Dimensionierungsgrundlagen vorhanden war. Gerade bei Wehren mit angepasstem BHQ1 hat der Überstau beim HQ1000 zu Freibordanpassungen und Dichtungserhöhungen geführt die insgesamt das Sicherheitsniveau erhöht haben. In Anbetracht einer Klimafolgenbetrachtung mit Messwerten und Pegelmarken an den historischen Städten Wasserburg und Passau fußt die Prognose der HQ1000 Werte auf einer langjährigen Beobachtung. In Bayern wird ein pauschaler Klimafaktor von 15% für das HQ100 gewählt. In Baden-Württemberg gibt es einzugsgebietsbezogene differenziertere Klimaänderungsfaktoren die bei bis zu 25% liegen können. Bei Betrachtungen für Jährlichkeiten  $T > 1000$  ist der Klimafaktor = 1,0; LfU, BW 2005.

**Tab. 2** Auszug aus Tabelle 4 Klimaänderungsfaktoren  $f_{T,K}$  in Baden-Württemberg LfU, BW 2005

T [Jahre]	2	5	10	20	50	<b>100</b>	200	500	<b>1000</b>
$f_{T,K}$	1,25	1,24	1,23	1,21	1,18	<b>1,15</b>	1,12	1,06	<b>1,00</b>

Bemerkung: für Jährlichkeit  $T > 1000$  a ist der Faktor gleich 1,0

Das Gesamtsicherheitskonzept am Inn schließt somit v.a. unter Einbeziehung der Staugebiete und der variablen Sohlen für alle Bemessungsereignisse inkl.  $T = 1000$  a ein Versagen aus und schließt aus Sicht VERBUND die Klimafolgenanpassungen mit ein. Dies gilt natürlich nur dann, wenn wie dargestellt, die Messungen, Analyse, Schlussfolgerung und Adaption zeitnah erfolgen und Teil des Sicherheitskonzepts sind. Ein reduziertes Freibord  $f^*$  beim reinen (n-1)-Fall nach DIN 19700 Teil 13 ist folglich keine Reduzierung der Sicherheit, wenn Restfreiborde und Dichtungshöhen ein Versagen auch bei diesen seltenen Ereignissen bei einem verantwortungsvollen Betrieb ausschließen und der Störfall in die Größenordnung eines  $T = 1000$  a einzuordnen ist. Ein real verifiziertes, hydraulisch nachgewiesenes Freibord am Wehr (n-1, n-a, n) mit Dämmen und Deichen gibt dem Betreiber die Sicherheit auch bei Extremereignissen ein Überströmen und damit Versagen sicher zu vermeiden.

#### 4 Beeinflusste Seitengewässer und HQ 100, HQ 1000 Schutz

Das lokale Extremereignis des Simbaches 2016 mit in der Folge in den Einzugsgebieten mit 7 Toten hat bei der Betrachtung der kleinen Einzugsgebiete v.a. am Unteren Inn eine Überprüfung der Szenarien gefordert. In Simbach hatte nur das Seitengewässer ein Extremereignis mit der Flutung der Stadt auf verschiedensten Wegen. Der Inn selbst hatte eher mittlere Abflüsse. In der Folge wurde das Bemessungsereignis für den Simbach erhöht und folglich auch die Durchlässe und Deiche im Unterhaltsbereich VERBUND angepasst.

So zeigt sich am Beispiel von Weitbach und Westerndorfer Graben in Perach, die unterstrom der Staustufe Perach in den Inn münden, dass polderartige Vorlandflächen durch Hochwasserereignisse des Inn aufgrund der Fülle und zeitlichen Ausdehnung der Ganglinie vollständig gefüllt werden können. Die bei Hochwasserereignissen der im Bereich der Polder einmündenden Seitengewässer jedoch deutlich geringere Einstauhöhen erfahren. So konnte am Westerndorfer Graben durch einen Querdeich mit Sicherung durch eine Rückstauklappe ein gefährdeter Polderbereich gegen den Rückstau aus dem Inn bis zum HQ1000 gesichert werden.

Am Oberen Inn zeigt das Beispiel des Einödbachs im Stauraum Nußdorf weitere Facetten der Sicherheitsbetrachtung unter Einbeziehung von einmündenden Seitengewässern auf. Der Einödbach wird aus den Hängen des Inntals in Dammlage durch das linke Vorland in den Staubereich des Stauraums Nußdorf geführt. Innerhalb des aufgesattelten Gewässerabschnitts quert der Einödbach zudem in einem Düker die Autobahn. Die Mündungssituation führt dazu, dass die Sicherheitsbetrachtung für den rückstaubeinflussten Teil des Einödbachs folgende zusätzliche Komponenten einbezogen und folgende Sicherheitskonzepte diskutiert werden:

- Ansatz von Geschiebezuschlägen (Hydrologie) bzw. Rückhalt von Geschiebe in zwei Geschiebefallen am Einödbach -> zeitnahe Entnahme und Beobachtung,
- Verklausungsszenarien am Düker des Einödbachs unter der Autobahn -> führt Treibgut (Schwimmteile) am Düker zu einer direkten Verklausung? Geringe Fließgeschwindigkeiten (Rückstau) nicht erwartet und historisch nicht beobachtet.
- Kontrollierte Entlastungsmöglichkeit in den Vorfluter zum Inn, um ein mögliches Bauwerksversagen entlang des aufgesattelten Gewässerverlaufs vor dem Düker durch kontrollierte Überströmung zu verhindern (Verklausung und Extremereignis).

Die Bemessung im rückstaubeinflussten Bereich des Einödbachs bildet somit einen Ansatz ab, der an mehreren Stellen bereits ungünstige Kombinationen von zu berücksichtigenden Ereignissen beinhaltet. Die Eintretenswahrscheinlichkeit des beschriebenen Bemessungsereignisses am Seitengewässer liegt damit in der Gesamtbetrachtung niedriger als der Standardansatz am Inn mit HQ100 (n-1)-Fall mit hohen Sohlen Inn als Unterwasserrandbedingung. Das HQ 1000 Inn darf zu keiner Überströmung der Entlastungsmöglichkeit führen.

## **5 Berücksichtigung Wasserspiegellagen und Sedimenttransport**

Die Berechnung der Wasserspiegellagen im Hochwasserfall in den Stauhaltungen am Oberen Inn wird auf einer guten Datengrundlage durchgeführt. Diese Daten erlauben eine instationäre Betrachtung der Kalibrierungs- und Bemessungsereignisse im Zeitverlauf. Zur numerischen Modellierung des Strömungs- und Feststofftransports wird das Softwaresystem HEC-RAS eingesetzt, welches die maßgebenden Prozesse der Sedimentausträumung und -anlandung sowie der Veränderung des Fließwiderstands infolge der Sohlverformung während des Hochwassers berücksichtigt. Dieser Modellansatz wurde für die Staustufenkette von Langkampfen bis Neuötting sowie für die Staustufen Braunau-Simbach und Schärding-Neuhaus jeweils an den historischen Ereignissen kalibriert und die Wasserspiegellagen für alle Bemessungsereignisse ermittelt. Jedes Staubegebiet wurde getrennt kalibriert und aufgrund der Besonderheit der Sedimentausträumung nicht die Wasserspiegellage beim maximalen Abfluss, sondern die Einhüllende der Wasserspiegellagen als Bemessungswert für das Freibord verwendet. Der Spitzenabfluss spiegelt folglich mit dem sehr steilen Anstieg des Abflusses selten die minimale Freibordsituation dar. Mit dem Augusthochwasser 2005, das in weiten Bereichen des Inn dem HQ100 entsprach, konnten die mit dem Modell prognostizierten Höchstwasser-spiegellagen für den Bemessungshochwasserabfluss BHQ1 (HQ100) verifiziert und weiter präzisiert werden. Auch die zeitliche und räumliche Entwicklung der Sohllagen in den einzelnen Stauräumen konnte mittels Modellierung rechnerisch erfasst und verifiziert werden.

## **6 Stauraummanagement**

Nach dem Augusthochwasser 2005 wurde erkannt, dass sich die Sedimentbewirtschaftung in der oberen Innstauflächen Langkampfen und Oberaudorf-Ebbs stark auf die Stauraumverlandung in den unterliegenden Staustufen auswirkt und, dass eine Vergleichmäßigung der Sediment-



transports durch die Staustufenkette anzustreben sei. Die Betrachtung richtete sich damals von Langkampfen bis Rosenheim; Kohane, 2010. Nach dem Hochwasser 2019, das ungefähr einem 10-jährigen Ereignis glich, wurden große Anlandungen zuerst in den Stauräumen Nußdorf und Feldkirchen und später im Stauraum Wasserburg beobachtet, die zu einem unmittelbaren Handlungsbedarf zur Freibordanpassung in Nußdorf und Feldkirchen führte. Die Analyse zeigte, dass die Absenkvorschriften in den Staustufen aus verschiedensten Gründen nicht wie ursprünglich von der Arbeitsgruppe konzipiert, umgesetzt werden konnte. Des Weiteren wurde klar, dass die Steuerung nach dem Pegel Staumarke an der Autobahnbrücke im Stauraum Oberaudorf-Ebbs zu hohen Stauzielabsenkungen am Wehr Oberaudorf-Ebbs und somit zu großen Austrägen von Ablagerungsfeinsedimenten führt. Aus den vorhandenen Modellen der einzelnen Staustufen wurde ein Gesamtmodell der Staustufenkette vom Unterwasser des Wehrs Kirchbichl bis zum Unterwasser des Kraftwerks Teufelsbruck erstellt und anhand von Messdaten der letzten 20 Jahre einschließlich des extremen Hochwassers 08/2005 kalibriert und validiert. Mit Hilfe von Langzeitsimulationen konnten mit dem Modell die gemessenen Veränderungen der Sohllagen in den einzelnen Stauräumen und die dazugehörigen Wasserspiegellagen zeitlich und räumlich gut abgebildet werden. In einer ersten Analyse stellte sich heraus, dass die Wirkung der oberstromigen Kraftwerke der TIWAG Langkampfen und Kirchbichl mit ihrer jährlichen Stauraumspülung nicht wesentlich für die beobachteten Anlandungen in den unterliegenden Stauräumen sind. In einer Variantenuntersuchung zur Absenkvorschrift Oberaudorf-Ebbs und Nußdorf mit über 20 entwickelten Vorschriften konnte festgestellt werden, dass die Unterschiede in der Wirkung nur durch Betrachtung eines längeren Modellierungszeitraums von etwa 20 Jahren auf Basis der gemessenen Daten erkennbar sind und die Absenkvorschrift Oberaudorf anzupassen sei. Die Lösung ist nun erkennbar, jedoch die Wirkung einer Vergleichmäßigung der jährlichen Sedimentausträge wird in den unterliegenden Staustufen erst in einem Jahrzehnt zu erfahren sein. Freibordanpassungen und Lösungen an den Seitengewässern zur Einhaltung des Sicherheitsniveaus sind daher ebenso geboten. Es ist in Nußdorf bereits erkennbar, dass zukünftig das frühere Niveau der Stauraumverlandung wieder erreicht wird, siehe Abb 1. Für die anderen Staustufen ergeben sich unterschiedliche Bewertungen aus der Langzeitprognose.

## **Schlussfolgerungen**

Als Fazit aller Betrachtungen kann man aus Sicht eines Betreibers klar feststellen, dass ein umfangreiches Messen mit Fächerecholot, verifizierte Wasserspiegelfixierung der Extremereignisse aber auch die Stauraumpegel wesentlich sind um Aussagen zu dem Gesamtsicherheitsniveau der Stauhaltungen zu erarbeiten. Des Weiteren stellt der Betreiber geschultes Personal zur Beobachtung, Messung, Steuerung und zur Umsetzung von Sofortmaßnahmen bei Hochwasser zur Verfügung. Die Gewährleistung der Anlagensicherheit benötigt zeitnahe Bereitstellung von finanziellen Mitteln, Projektleiter:innen und Personal mit Betriebserfahrung um eine zeitnahe Realisierung von gewonnen Erkenntnissen in Projekten zu gewährleisten. Klar ist auch, dass historische Analysen mit real gemessenen Ereignissen laufend verifiziert, Defizite angesprochen und zeitnah beseitigt werden müssen. Mit den hier vorgestellten Ansätzen ist ein Sicherheitsniveau für alle Bemessungsereignisse an einem komplexen System wie dem Inn sichergestellt. Durch die Extrembetrachtung zum HQ1000 mit einer zeitnahen Verifizierung der zugehörigen Wasserspiegellagen und Freiborde mittels numerischer Strömungs- und Feststoffmodellierung wurde eine adaptive Vorgehensweise gewählt um auf Extremereignisse vorbereitet zu sein und folglich mögliche Klimafolgeanpassungen einschließt. Am großen Einzugsgebiet des Inn sind aus der Hydrologie bisher keine messbaren Änderungen ableitbar und die Bemessungsereignisse nahe an den ursprünglichen Werten. Beim Sedimenttransport am Inn, mit seiner Komplexität sowohl

vom Eintrag aus dem hohen Einzugsgebiet und dem Stauraummanagement, ist die adaptive Vorgehensweise und das Ernstnehmen von beobachteten Veränderungen, mit zeitnaher Umsetzung von Freibordanpassungen, mit der Einordnung der Wirkung in die Zukunft, ein schlüssiger Weg. Resilienzen finden sich klar in den Annahmen zum (n-1) Fall, die Einordnung zu dessen Eintrittswahrscheinlichkeit und der Annahme der Gleichzeitigkeit von Spitzenabfluss Inn und Seiten-gewässern. Zusätzlich enthält der Spitzenabfluss zum HQ1000 bedingt durch die rein hydrologischen Betrachtungen keine Analyse der Ausuferungen in Österreich, wo den Inn in großen Bereichen keine Deiche begleiten Retentionseffekten auftreten werden.

## Literatur

- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, (2009), Folgen des Klimawandels, GLOWA – DANUBE
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, (2015) Hydrologischer Gewässerlängsschnitt Inn
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, (2009) Merkblatt Nr. 5.2/5, Staugeregelte Flüsse – Anlagensicherheit und Hochwasserschutz Nachweis und Lastfälle nach DIN 19700 und DIN 19712
- Kohane, R. (2010). Stauraummanagement am Bayerischen Inn, „Wasserbau in Bewegung ... von der Statistik zur Dynamik“, 15. Gemeinschaftssymposium TU München, TU Graz und ETH Zürich, Tagungsband S. 233-244.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), (2005) Leitfaden Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes
- Loy, G. (2006) Erfahrungen eines Wasserkraftbetreibers beim Katastrophenschutz während der letzten Hochwasserereignisse; Fachtagung Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern, Wallgau 2006.
- Loy, G. (2008) Die neu berechneten Wasserspiegellagen am Inn und die dadurch notwendigen Maßnahmen zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit im Bereich Rosenheim, Neue Anforderungen an den Wasserbau, Internationales Symposium ETH Zürich, 2008

## Anschrift der Verfasser

Georg Loy und Johannes Wesemann  
 VERBUND Innkraftwerke GmbH  
 Werkstrasse 1  
 84583 Töging am Inn  
 Georg.Loy@Verbund.com; Johannes.Wesemann@Verbund.com

Roberto Kohane  
 Tractebel Hydroprojekt GmbH  
 GB Weimar - Geschäftsstelle Bad Vilbel  
 Friedberger Straße 173  
 61118 Bad Vilbel  
 roberto.kohane@tractebel.engie.com

Florian Pflieger  
 cfLab GmbH  
 Nußbaumweg 30a  
 83224 Grassau  
 pflieger@cflab.eu