



Universität Kassel
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Retentionspotentialstudie Inn

Endbericht für Teilprojekt C

Potentialermittlung bezüglich Hochwasserrückhaltung bei den Wehrbetriebsordnungen für den Ist-Zustand

Auftraggeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bearbeitung:

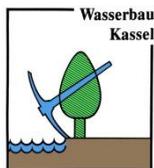
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Universität Kassel

M. Sc. Sarah Dickel

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Kassel, im Oktober 2021

BEARBEITUNG:



Universität Kassel

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Kurt-Wolters-Straße 3

34125 Kassel

Internet: <https://www.uni-kassel.de/fb14bau/institute/institut-fuer-wasser-abfall-umwelt-iwau/wasserbau-und-wasserwirtschaft>

Tel.: +49 (0)561 804-2749

Fax: +49 (0)561 804-3952

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Datengrundlagen.....	3
3	Modellerstellung	9
	3.1 Berechnungsverfahren	9
	3.2 Erstellung von Einzelmodellen der Stauräume	10
	3.3 Aufbau des Kettenmodells.....	14
	3.4 Implementierung der Wehrbetriebsordnungen.....	18
4	Nachrechnung verschiedener Hochwasserereignisse	20
	4.1 Allgemeines zur Nachrechnung.....	20
	4.2 Instationäre Kalibrierung des Kettenmodells.....	21
	4.2.1 Voranalyse und Definition von Zuflüssen	21
	4.2.2 Simulations- und Messergebnisse des Hochwassers 2005.....	25
	4.2.3 Simulations- und Messergebnisse des Hochwassers 2013.....	33
	4.3 Validierung des Kettenmodells anhand der Nachrechnung des HW 2002	42
	4.4 Simulationsergebnisse im Bereich unterstrom des KW Passau-Ingling und an der Donau.....	48
	4.5 Vergleich der Nachrechnung mit Simulationen gemäß WBO.....	52
5	Analyse zum Einfluss einer geänderten Sohltopographie auf das Abflussverhalten	56
	5.1 Auswahl hoher und tiefer Sohlagen und Erstellung neuer Modellgeometrien.....	56
	5.1.1 Ermittlung der mittleren Sohlhöhe aus Querprofilaten	59
	5.1.2 Auswahl von angelandeter und entlandeter Geometrie.....	60
	5.1.3 Erstellung von Kettenmodellen mit angelandeter und entlandeter Geometrie.....	63
	5.2 Simulationen mit den ausgewählten Sohlagen.....	64
	5.2.1 Simulation der abgelaufenen Hochwasserereignisse	64
	5.2.2 Simulation der synthetischen Hochwasserereignisse.....	68
6	Erstabschätzung des Potentials zur Scheitelminderung durch Stauraummanagement..	71
	6.1 Allgemeines zur Erstabschätzung des Potentials des Stauraummanagements	71
	6.2 Stauraummanagement am unteren Inn	73
	6.3 Stauraummanagement am oberen und unteren Inn.....	78
7	Wirkungsanalysen von alleinigem Flutpolderbetrieb und kombiniertem Betrieb mit Stauraummanagement.....	83
	7.1 Zielsetzung und Methodik.....	83
	7.2 Einbinden des Flutpolders Feldkirchen ins HN-Modell.....	84

7.3	Simulationen mit Polderbetrieb Feldkirchen.....	91
7.4	Einbinden des möglichen Flutpolders Ering in das HN-Modell.....	110
7.5	Simulationen mit Polderbetrieb Ering sowie kombiniertem Betrieb	115
8	Weitergehende Untersuchungen zur Ableitung von Steuerungsvorgaben für Stauraummanagement.....	124
8.1	Allgemeines zum Stauraummanagement	124
8.2	Kenngößen des Betriebes gemäß Wehrbetriebsordnung	124
8.3	Auswertung von Vorhersagedaten.....	126
8.4	Entwurf der Steuerung zum Stauraummanagement	129
8.4.1	Übersicht der berücksichtigten Stauanlagen	129
8.4.2	Abstauprozess	130
8.4.3	Aufstauprozess	132
8.4.4	Simulationen der abgelaufenen Hochwasser und stochastischer Ereignisse.....	134
8.4.5	Variantenuntersuchung bei geringerer Abstautiefe am unteren Inn.....	145
8.5	Fazit zur Scheitelminderung durch Stauraummanagement.....	147
8.6	Umsetzungsaspekte des Stauraummanagements.....	147
9	Weitergehende Untersuchungen zum Flutpolderbetrieb Feldkirchen.....	148
9.1	Grundsätzliches zur Flutpoldersteuerung Feldkirchen	148
9.2	Überlastfall im Nahbereich des Flutpolders.....	149
9.3	Überlastfall im Fernbereich des Flutpolders.....	154
9.3.1	Vorgehensweise bei der Flutpolderfüllung	154
9.3.2	Wirkungsanalyse zur Flutpolderfüllung mit Fokus der Abflussreduzierung auf den Fernbereich.....	155
9.3.3	Wirkungsanalyse zur Flutpolderfüllung mit Fokus der Abflussreduzierung auf den Nahbereich.....	159
9.4	Fazit zur vorhersagebasierten Poldersteuerung des Flutpolders Feldkirchen	169
10	Zusammenfassung / Schlussfolgerung / Ausblick.....	171
11	Literatur.....	176

1 Einführung

Große Flusshochwasser können insbesondere in Bereichen dichter Besiedlung zu hohen Schäden führen, sodass es von hohem gesellschaftlichen Interesse ist, das Potential geeigneter Rückhaltemaßnahmen für eine mögliche Abminderung des Hochwasserscheitels zu untersuchen. Das Hochwasser im Jahr 2013 stellte vor allem in Passau an der Donau ein Ereignis mit einer Jährlichkeit größer als ein hundertjährliches Hochwasser (HQ_{100}) dar, das im Stadtbereich Passau zu weitreichenden Überschwemmungen und Schäden geführt hat (BfG 2013, LfU 2014). Der Mündungsbereich des Inns in die Donau ist weiterhin bereits bei Hochwassern kleinerer Jährlichkeit von Überschwemmungen betroffen.

Der Inn ist wie der überwiegende Anteil großer Fließgewässer in Deutschland und Österreich mit Staustufen ausgebaut. Die Betriebsweise der Staustufen folgt festgelegten Vorschriften, auch als Wehrbetriebsordnungen (WBO) bezeichnet, in denen Restriktionen, Toleranzen und Betriebsvorgaben, wie einzuhaltende Oberwasserstände (Stauziele), speziell auch für den Hochwasserfall, festgelegt sind. Insbesondere im Fall sehr großer Hochwasserereignisse ist der sichere Betrieb von entscheidender Bedeutung. Hierbei ist zu beachten, dass der Betrieb der Stauanlagen in jedem Fall hochwasserneutral durchzuführen ist und keine Verstärkung respektive Aufsteilung des Hochwasserabflusses erzeugt wird. Im besten Fall ist eine Dämpfung des Hochwasserscheitels anzustreben.

Der bestehende Ausbau von großen Fließgewässern mit Staustufen in Verbindung mit der Gefährdung, die von großen Hochwassern ausgehen kann, führt zu der zentralen Fragestellung, ob es durch eine Anpassung der Betriebsweise der Staustufen im Hochwasserfall und damit einem geeigneten Stauraummanagement möglich ist, den Scheitel eines Hochwassers zu reduzieren. Das Stauraummanagement stellt im Kontext verschiedener möglicher Maßnahmen zum Hochwasserschutz einen geringfügigen Eingriff in das Gesamtsystem dar, weil eine bestehende bauliche Struktur genutzt wird und keine umfangreichen baulichen Maßnahmen notwendig sind.

Zur Durchführung von Untersuchungen zum angepassten Betrieb von Staustufen sind grundlegende Kenntnisse über das Systemverhalten geregelter Staustufen erforderlich, um die Steuerung der Anlagen unter Einbeziehung der nichtlinearen Systemdynamik des Abflussgeschehens in einer Stauhaltung adäquat abzubilden. Das hier genutzte gekoppelte Modellsystem stellt ein Werkzeug dar, mit dem die komplexen Vorgänge des Betriebes von Stauanlagen modelltechnisch abgebildet werden können. Es wird ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (1D-HN-Modell) genutzt, welches mit Modulen zur Ansteuerung der Kontrollbauwerke und der Bewirtschaftung von Staustufenketten gekoppelt

werden kann. Es ist damit möglich, die Wechselwirkungen zwischen den Zu- und Abflüssen an den Staustufen und den Wasserständen im Stauraum zu berechnen sowie die Betriebsvorgaben an den Staustufen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Wasserstand und Abfluss zu überprüfen. Auch eine Ableitung von praxisnahen Steuerungsvorgaben kann mit dem beschriebenen Modellsystem erfolgreich betrachtet werden.

Im Rahmen der Retentionspotentialstudie Inn erfolgte im Teilprojekt C – Potentialermittlung bezüglich Hochwasserrückhaltung bei den Wehrbetriebsordnungen für den Ist-Zustand – eine Analyse des Potentials hinsichtlich einer Abflussminderung (Hochwasserrückhaltung) durch modifizierte Wehrbetriebsordnungen. Zur Durchführung des Teilprojektes C wurde das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) beauftragt. Das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft verfügt auf dem Gebiet des automatisierten Betriebes von Stauanlagen über langjährige Erfahrung. Das eingesetzte Modellsystem, welches über einen langen Zeitraum am Fachgebiet selbst entwickelt wurde und stetig weiterentwickelt wird, beinhaltet als Kernbaustein ein eindimensionales instationäres HN-Verfahren, welches mit einer umfangreichen Toolbox von Reglern und Steuerungselementen für den Betrieb der Staustufen gekoppelt ist. Durch zahlreiche Projekte für verschiedene Kraftwerksbetreiber, in denen auch eine Umsetzung der vorgeschlagenen Reglerstruktur und eine erfolgreiche Inbetriebnahme erfolgte, ist der Praxisbezug gegeben.

Der zu betrachtende Abschnitt des bayerischen Inns mit insgesamt 15 Stauanlagen bezieht sich auf die Strecke von der Staustufe Oberaudorf bei Inn-km 211,3 bis zur Einmündung in die Donau in Passau sowie den etwa 31 km langen Innkanal von der Staustufe Jettenbach bis oberstrom der Staustufe Neuötting (vgl. Abbildung 2). Das Modell umfasst weiterhin den Donauabschnitt der Stauhaltung Jochenstein. Grundlage der Untersuchungen bildet wie oben beschrieben ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell der gesamten Gewässerstrecke zur Simulation der Abflussverhältnisse und des Betriebes der Stauanlagen.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Arbeitspakete bearbeitet, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln beschrieben werden. Nach der Erstellung des Stauraummodells und der Implementierung der Wehrbetriebsordnungen erfolgte die Nachrechnung von verschiedenen Hochwasserereignissen zur Kalibrierung und Validierung des Modells. Der Einfluss einer geänderten Sohllage (entlandeter und angelandeter Zustand) auf den Betrieb der Anlagen gemäß Wehrbetriebsordnungen wurde analysiert, indem zusätzliche Modellvarianten (angepasste Geometrie) erstellt wurden. Mit dem erstellten Kettenmodell des bayerischen Inns wurde eine Erstabschätzung des Potentials zur Scheitelminderung mit Stauraummanagement durchgeführt. Da die Erstabschätzung ein Potential aufzeigte, wurden weitergehende Untersuchungen zum Stauraummanagement durchgeführt. Diese umfassen

die Untersuchung des realistischen Potentials mit der Entwicklung von praxisnahen Steuerungsvorgaben. In Bezug auf einen Flutpolderbetrieb und die gegenseitige Beeinflussung bei Stauraummanagement wurde zunächst eine Wirkungsanalyse der Scheitelminderung durch Polderbetrieb für zwei mögliche Flutpolderstandorte durchgeführt und der Betrieb des potentiellen Flutpolders Feldkirchen näher betrachtet.

2 Datengrundlagen

Zur Durchführung der Untersuchung und Erstellung des Stauraummodells werden verschiedene Daten benötigt. Diese umfassen lagebezogene Daten zur Erstellung eines GIS-Projektes, topographische Informationen des Gewässersystems zur Abbildung der Geometrie, Informationen zum Wehrbetrieb an den Stauanlagen sowie Mess- und Aufzeichnungsdaten von Pegeln im Untersuchungsgebiet und an den Anlagen.

Im Rahmen von Begehungsterminen, die mit dem Anlagenbetreiber VERBUND AG, der Technischen Universität München (TUM) und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) durchgeführt wurden, konnten unterschiedliche Charakteristika des Inns über die Fließstrecke, sowie auch Flutrinnen, Rutschhänge, Schluchtstrecken und Flachwasserzonen, die im Rahmen der Modellierung adäquat abzubilden und einzubinden sind, in der Realität betrachtet und detailliert besprochen werden (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Unterschiedliche Bereiche des Inns – Blick auf Stauanlage Oberaudorf von Oberwasser (o. l.), Blick von Kraftwerk (KW) Teufelsbruck auf Rutschhang im Bereich des Oberwassers (o. r.), Schluchtstrecke im Stauraum Passau-Ingling (u. l.), Europareservat Unterer Inn im Stauraum Ering-Frauenstein (u. r.)

Topographische Informationen zum Gewässersystem

Zur Erstellung des GIS-Projektes (Abbildung 2) werden Informationen zu Gewässernetz, Gewässerstationierung und Teileinzugsgebieten benötigt. Weiterhin werden lagebezogene Daten zu allen Pegeln, Wasserkraftanlagen und Deichen benötigt. Die benötigten Daten wurden durch das LfU, das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (BMLFUW), die beteiligten österreichischen Landesämter (Tirol, Salzburg und Oberösterreich) sowie die VERBUND AG zur Verfügung gestellt und in das GIS-Projekt eingepflegt. Diese umfassen ebenfalls flächenhafte Daten (DGM1).

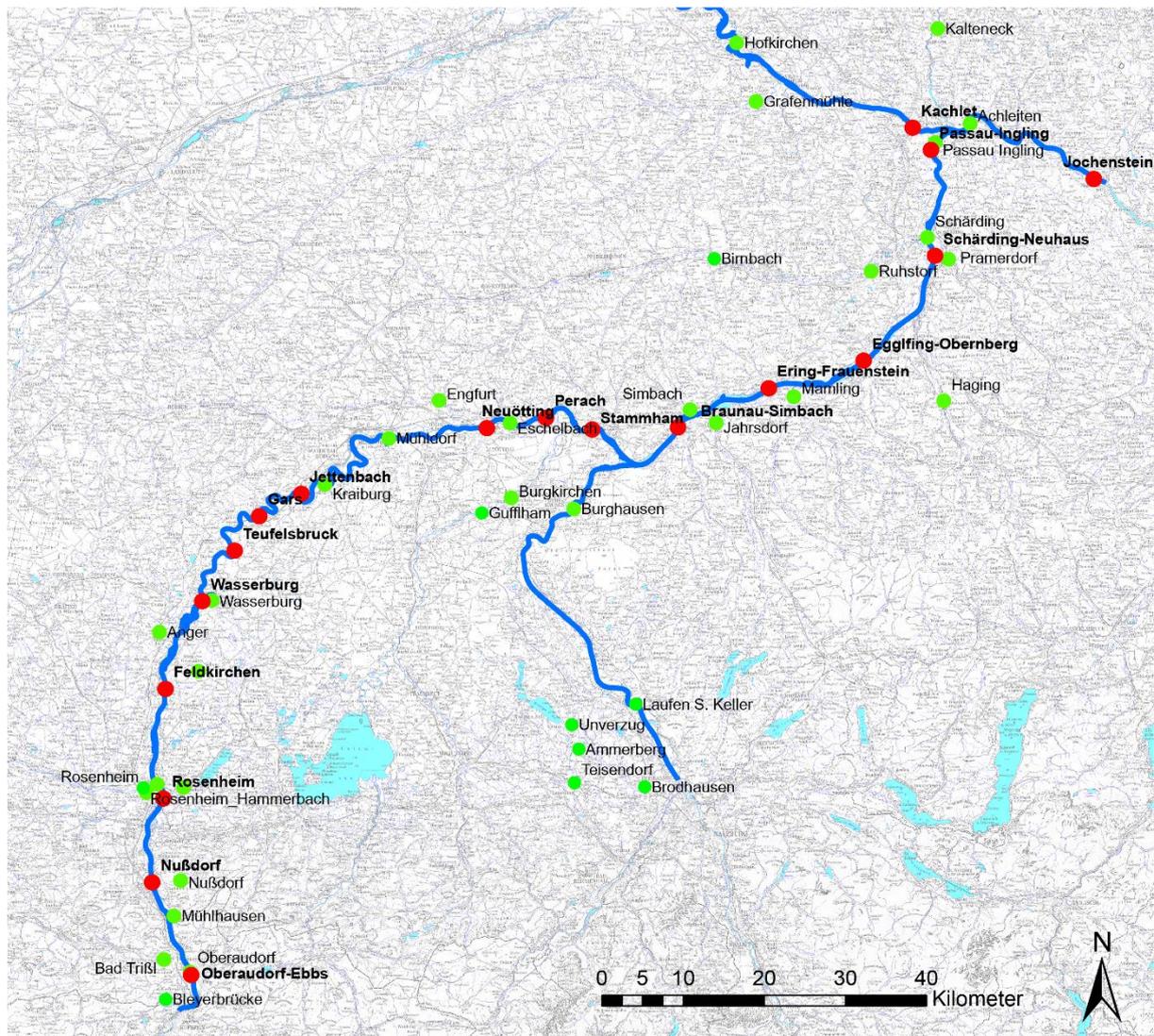


Abbildung 2: Untersuchungsgebiet mit Lage der Staustufen (rot) und Pegel (grün) (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)

Die Übergabe von topographischen Daten des Gewässersystems erfolgte durch das LfU und die VERBUND AG. Die verwendeten Daten umfassen die betrachtete Gewässerstrecke des Inns vom Pegel Oberaudorf bis zur Mündung in die Donau, die Geometrie des Inn-Kanals sowie die Daten des Donauabschnittes unterstrom des Kraftwerks (KW) Kachlet bis zum KW Jochenstein in unterschiedlichen Datenformaten.

Es liegen zahlreiche Peilungen der Stauräume von unterschiedlichen Jahren und insbesondere nach Hochwasserereignissen vor. Ein Gleichgewichtszustand der Sohllage stellt sich abhängig vom Stauraum und dem damit charakteristischen Feststoffeintrag innerhalb weniger Jahre nach einem Hochwasserereignis ein. Die für den Modellaufbau angenommenen Sohlpeilungen sind in Tabelle 1 aufgeführt und entsprechen den von Lahmeyer Hydroprojekt genutzten Sohlen des hydrodynamischen Abflussmodells des bayerischen Inn (Lahmeyer Hydroprojekt, Erläuterungsbericht Juni 2014).

Tabelle 1: Verwendete Gleichgewichtssohlen

Stauhaltung	Gleichgewichtssohle Peilungsjahr
Nußdorf	2011
Rosenheim	2003
Feldkirchen	2009
Wasserburg	2009
Teufelsbruck	2009
Gars	2001
Jettenbach	2010
Neuötting	km 91,1- 99,8: 2009 km 99,8- 127,86: 2007
Perach	2001
Stammham	2001
Braunau-Simbach	2009
Ering-Frauenstein	2010
Egglfing-Obernberg	2010
Schärding-Neuhaus	2009
Passau-Ingling	2009

Die vorliegenden Querprofilaten jeder einzelnen Stauhaltung wurden entsprechend der festgelegten Gleichgewichtssohle (Datum der Sohlpeilung) gefiltert und in das erforderliche Datenformat des 1D-HN-Verfahrens konvertiert. Ausgehend von dieser Datengrundlage wurden die einzelnen Stauraummodelle erstellt.

Die aus Fluss- und Vorlandprofilen bestehenden Geometriedaten liegen im Abstand von 200 m vor. Nicht immer ist dabei das Vorland angehängt. Das Vorland wurde in diesen Fällen, wenn notwendig, aus anderen Querprofilaten ergänzt (siehe Kapitel 0). Insgesamt ergeben sich für den zu bearbeitenden Abschnitt des bayerischen Inns mit einer Länge von rund 211 km etwa 1.050 Querprofile. Die Daten wurden zunächst in das erforderliche Datenformat überführt. Darauffolgend wurde eine Datenausdünnung durchgeführt, mit der die Punktzahl in den einzelnen Querprofilen deutlich reduziert werden konnte, sodass der Arbeitsaufwand bei der Anpassung der Querprofile verringert und das Pre-Processing beschleunigt wird.

Informationen zu den Staustufen am Inn sowie Mess- und Aufzeichnungsdaten

Von der VERBUND AG wurden umfangreiche Daten zu den betrachteten Kraftwerken zur Verfügung gestellt. Dies betrifft Lage- und Bauwerkspläne der Staustufen/Kraftwerke, Kraftwerksdaten und Anlagendetails, Betriebsvorschriften und Wehrbetriebsordnungen (WBO), Lage der Betreiberpegel, kontinuierliche Messdaten (digital) an den Betreiberpegeln

in den Stauräumen sowie aufgezeichnete Daten an den Stauanlagen (Abfluss, Oberwasser- und Unterwasserstände) und ereignisbezogene Hochwasserfixierungen.

Hydrologische Daten

Zur Modellierung werden Abflussdaten von Zuflüssen im Modellgebiet benötigt. Neben Pegeln an den Modellrändern und an seitlich einmündenden Gewässern stehen Kontrollpegel zum Abgleich der Simulationsergebnisse zur Verfügung. Die genutzten Daten, die Pegel an Inn, seitlichen Zuflüssen und an der Donau umfassen, sind in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgelistet. Es stehen darüber hinaus weitere Pegeldaten zur Verfügung, die weiter oberstrom an seitlichen Zuflüssen liegen. Ein Teil der Daten an der Donau wurde auf der Homepage des GKD Bayern abgefragt. Die Tabelle 2 enthält den Pegelnamen, Gewässer, Kategorie des Pegels (modellbezogene Unterscheidung in Modellzulauf und Kontrollpegel), Lage in Bezug auf die Stauhaltung, Inn-km und Fluss-km bei seitlichen Nebenflüssen, Einzugsgebiet des Pegels sowie den Beginn der vorliegenden Zeitreihen unterschieden in Abflussdaten (Q) und Wasserstandsdaten (W).

Neben der Simulation von abgelaufenen Hochwassern, unter Verwendung der aufgeführten Pegeldaten, wurden synthetisch erzeugte Hochwasserganglinien für insgesamt 12 stochastische Hochwasserereignisse betrachtet. Die Abflussdaten dieser stochastischen Ereignisse wurden von der TU Wien im Rahmen des Teilprojektes A – Stochastische Niederschlag-Abflussmodellierung zur Ermittlung des räumlichen Zusammenwirkens der Zubringerwellen – mittels einer Monte-Carlo-Simulation mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell erzeugt. Es handelt sich um 12 Ereignisse, die an den Bezugspegeln Wasserburg, Burghausen und Passau-Ingling jeweils Hochwasserscheitel der Jährlichkeiten 30, 100, 300 und 1.000 Jahre aufweisen und damit ein breites Spektrum an unterschiedlichen Niederschlags- beziehungsweise Abflussverteilungen wiedergeben.

Tabelle 2: Genutzte Pegeldata

Pegelname	Gewässer	Kategorie	Stauhaltung	Inn-km	Einzugsgebiet Pegel [km ²]	Fluss-km	Q_von	W_von
Oberaudorf	Inn	Modellzulauf	obere RB	211	9714,85	211	01.11.1900	10.11.1981
Bad Trißl	Auerbach	Modellzulauf	Nußdorf	209	37,9	2,6	01.11.1948	01.11.1969
Mühlhausen	Euzenauer Bach	Modellzulauf	Nußdorf	203,7	6,16	0,7	01.11.1950	01.11.1969
Nußdorf	Steinbach	Modellzulauf	Nußdorf	199	27,99	3,9	01.11.1950	01.11.1969
Stephanskirchen	Sims	Modellzulauf	Feldkirchen	186	97,48	4	01.11.1950	01.11.1969
Rosenheim o.d. Mangfall	Inn	Kontrollpegel	Feldkirchen	185,5	10180,6	185,5	01.11.1970	26.01.1970
Rosenheim	Mangfall	Modellzulauf	Feldkirchen	184,7	1099,27	1,89	01.11.1965	01.11.1969
Weichselbaum	Murn	Modellzulauf	Wasserburg	171,4	155,18	9,28	01.11.1970	01.11.1976
Anger	Attel	Modellzulauf	Wasserburg	165,4	252,95	2,2	01.11.1950	01.11.1969
Wasserburg	Inn	Kontrollpegel	Teufelsbruck	158,7	11980,4	158,7	01.11.1964	01.07.1964
Kraiburg	Inn	Kontrollpegel	Neuötting	122,4	12278,1	122,4	01.11.1951	01.11.1969
Mühldorf	Inn	Kontrollpegel	Neuötting	104,0	12409,3	104,0	01.11.1951	01.11.1969
Engfurt	Isen	Modellzulauf	Neuötting	92,3	547,03	7,8	01.11.1950	01.11.1969
Eschelbach	Inn	Kontrollpegel	Perach	87,7	13345,9	87,7	01.11.1930	01.11.1969
Burgkirchen	Alz	Modellzulauf	Stammham	80,25	2221,95	15,397	01.11.1950	01.11.1974
Burghausen	Salzach	Modellzulauf	Braunau-Simbach	68,3	6649	11,4	01.11.1900	01.01.1895
Simbach	Simbach	Modellzulauf	Ering-Frauenstein	58	28,57	0,92	01.11.1961	21.12.2000
Jahrsdorf	Mattig	Modellzulauf	Ering-Frauenstein	56	446,9	19,2	01.01.1976	
Mamling	Ach	Modellzulauf	Eggfling-Obernberg	44,5	314,9	1,81	01.01.1976	
Haging	Antiesen	Modellzulauf	Schärding-Neuhaus	26,4	164,9	17,2	01.01.1976	
Ruhstorf	Rott	Modellzulauf	Passau-Ingling	16,8	1051,55	11,16	01.11.1964	01.11.1969
Schärding	Inn	Kontrollpegel	Passau-Ingling	16,5	25520	16,5	01.01.1977	01.01.1921
Pramersdorf	Pram	Modellzulauf	Passau-Ingling	15,9	340,9	5,5	01.01.1976	
Passau Ingling	Inn	Kontrollpegel	Passau-Ingling	3,1	26062,7	3,1	01.11.1920	01.11.1969
Hofkirchen	Donau	Modellzulauf	Donau_1	-	47609,6	2256,86	01.11.1900	10.11.1925
Grafenmühle	Vils	Modellzulauf	Donau_1	-	1439,5	4,8	01.01.2000	01.01.2000
Neustift	Wolfach	Modellzulauf	Donau_1	-	130,5	8,8	01.01.2000	
Hörmannsberg	Gaissa	Modellzulauf	Donau_1	-	211,4	5,5	01.01.2000	
Kalteneck	Ilz	Modellzulauf	Donau_1	-	759,95	18,8	02.01.1900	18.01.1900
Passau/Donau	Donau	Kontrollpegel	Donau_2	-	49737,9	2226,7		01.01.2000
Passau Ilzstadt	Donau	Kontrollpegel	Donau_2	-	76642	2225,25	16.08.2001	31.12.1999
Achleiten	Donau	Kontrollpegel	Donau_2	-	76660,4	2223,05	01.11.1900	01.01.1953

Die vorliegenden Abfluss- und Wasserstandsaufzeichnungen der Pegelstellen sowie der Kraftwerke wurden in eine systeminterne Datenbank (MATLAB) des verwendeten 1D-HN-Modells eingepflegt. Mit dem Kettenmodell des Inns wurden basierend darauf verschiedene historische Abflussereignisse nachgerechnet und an den Beobachtungsdaten der Kontrollpegel und weiteren Wasserstandsaufzeichnungen kalibriert (Kapitel 4).

3 Modellerstellung

3.1 Berechnungsverfahren

Die Untersuchungsmethode muss sich auf ein Modell stützen, das die Wechselwirkung zwischen dem Betrieb der Kontrollbauwerke an der Staustufe und den Strömungsverhältnissen im Stauraum quantifizieren kann. Kernbaustein des fachgebietsinternen Simulationsprogramms Sim1D ist ein eindimensionales, instationäres hydrodynamisch-numerisches Verfahren zur Berechnung der Strömungsverhältnisse in einem Fließgewässer. Die eindimensionalen Saint-Venant-Gleichungen werden mittels eines Finite-Differenzen-Verfahrens nach Preissmann gelöst. Der Gewässerverlauf wird hierzu in Form von Querprofilen abgebildet, das System wird allgemein als hydrodynamisch-numerisches (HN-)Modell bezeichnet. Es ist möglich, verzweigte oder vermaschte Systeme anzulegen und seitliche Zuflüsse anzufügen. Zur Berechnung werden Anfangs- und Randbedingungen eingegeben. Die Anfangsbedingungen dienen zur Initialisierung des Systems, sodass über die Modellstrecke ein stabiler stationärer Strömungszustand erreicht wird. Als Randbedingung wird am oberen Rand ein Abfluss eingesetzt, während am unteren Rand meist ein Wasserstand, seltener ein Abfluss, vorgegeben wird. Seitliche Zuflüsse innerhalb des Systems werden als weitere Abfluss-Randbedingungen eingegeben. Rauheitsverluste werden bei der Simulation mit Sim1D über den Stricklerbeiwert abgebildet. Dabei ist sowohl eine Abhängigkeit vom Wasserstand als auch eine Unterteilung über den Querschnitt möglich. Weiterhin besteht die Möglichkeit, lokale Verluste in der Berechnung abzubilden.

Mit diesem HN-Modell können die Wechselwirkungen zwischen Zufluss, Abfluss und den Wasserständen berechnet sowie die Betriebsvorgaben an den Staustufen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Wasserstand und Abfluss überprüft werden. Das Berechnungsverfahren Sim1D wird mit MATLAB/Simulink® und weiteren Toolboxen gekoppelt und dient damit zur Simulation der Steuerung von wasserbaulichen Anlagen. So ist eine Simulation von Staustufenketten, wie der am Inn betrachteten, möglich. Zur Realisierung der verschiedenen Reglerstrukturen, so beispielsweise Stauzielregelung oder OW/Q-Regelung, die zur Steuerung der Kontrollbauwerke genutzt werden, steht eine Bibliothek verschiedener Module zur Verfügung. Durch den Einsatz dieser Werkzeuge in einer Vielzahl von Projekten liegen umfangreiche Erfahrungen auf dem Themengebiet des automatisierten Betriebes von Stauanlagen vor. (Theobald 1999, Theobald 2008)

3.2 Erstellung von Einzelmodellen der Stauräume

Unter Zuhilfenahme des aufgebauten GIS-Projektes des bayerischen Inns und des vorliegenden DGM sowie der Berichte zu vorausgegangenen Untersuchungen (Lahmeyer Hydroprojekt, AquaSoli) zu den einzelnen Staustufen wurde das Fließverhalten in den Staustufen betrachtet und bewertet, um die in die Berechnung eingehenden Geometrien entsprechend anzupassen. In Querrichtung der Profile wurden die abflusswirksamen Bereiche definiert und die Querprofile wenn nötig händisch modifiziert. Um das Fließverhalten von Flutrinnen nachzubilden, wurden seitliche Stränge (vermaschte Systeme) eingebaut. Die retentionswirksamen Bereiche werden mittels Retentionszellen abgebildet.

Im Stauraum Feldkirchen wurden beispielsweise sowohl links- als auch rechtsseitig Flutrinnen zwischen km 185,2 und km 181,4 angelegt (vgl. Abbildung 3). Hierzu wurden die Querprofile gemäß den Anforderungen des Simulationsprogramms in einzelne Abschnitte aufgeteilt (vgl. Abbildung 4) und seitliche Stränge angelegt, wie schematisch in Abbildung 3 auf der rechten Seite zu sehen ist.

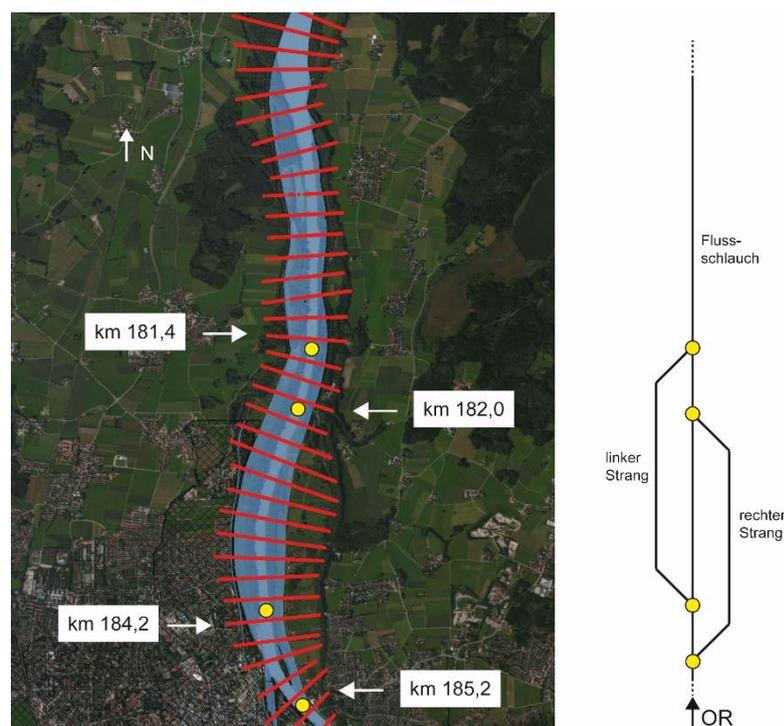


Abbildung 3: Flutrinnen im Stauraum Feldkirchen – Lage im Stauraum (links) und schematische Umsetzung im Modell (rechts) (Kartenhintergrund Bing Maps - © 2017 GeoEye © GeoContent / (p) Intergraph Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)

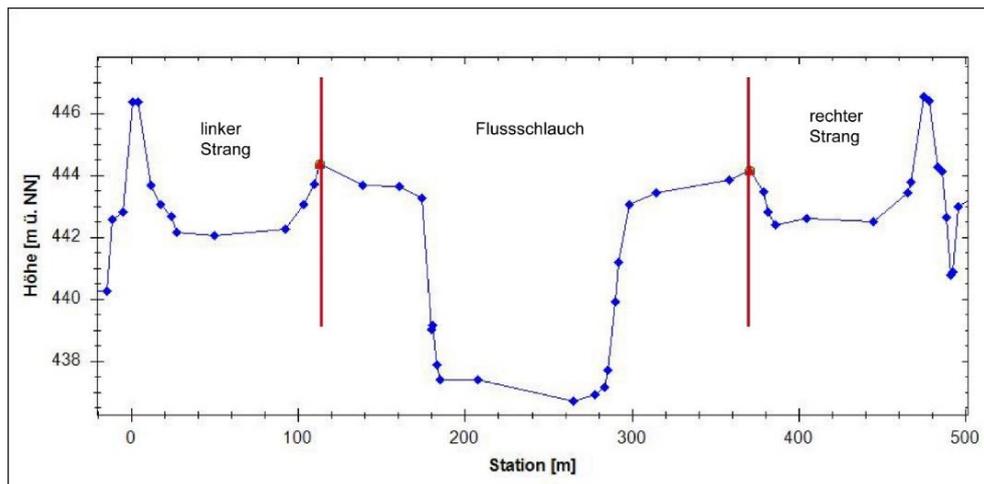


Abbildung 4: Schneiden eines Querprofils zum Anlegen von seitlichen Strängen

Für die Stauräume, in denen an der festgelegten Gleichgewichtssohle kein Vorland angehängt war, wurden diese Vorländer aus den aktuellsten Aufnahmen der Querprofile ergänzt. Anhand der Darstellung des Stauraums Gars in Abbildung 5 ist erkennbar, dass zur Abdeckung der überschwemmten Fläche im Fall eines HQ_{100} die Vorländer entsprechend angehängt werden müssen. Dargestellt sind die Profilmunkte der unbearbeiteten Querprofile von 2001 (magentafarben), in blau die Überschwemmungsgebiete eines HQ_{100} . In der Detailansicht in der Abbildung 5 rechts sind im oberen Bild die Querprofile der Peilung von 2001 zu sehen, im unteren Bild (orangefarben) die Profile der Peilung von 2014. In den dargestellten Bereichen wurden die Vorländer der Peilung von 2014 an die Flussschlauchquerprofile von 2001 angehängt.

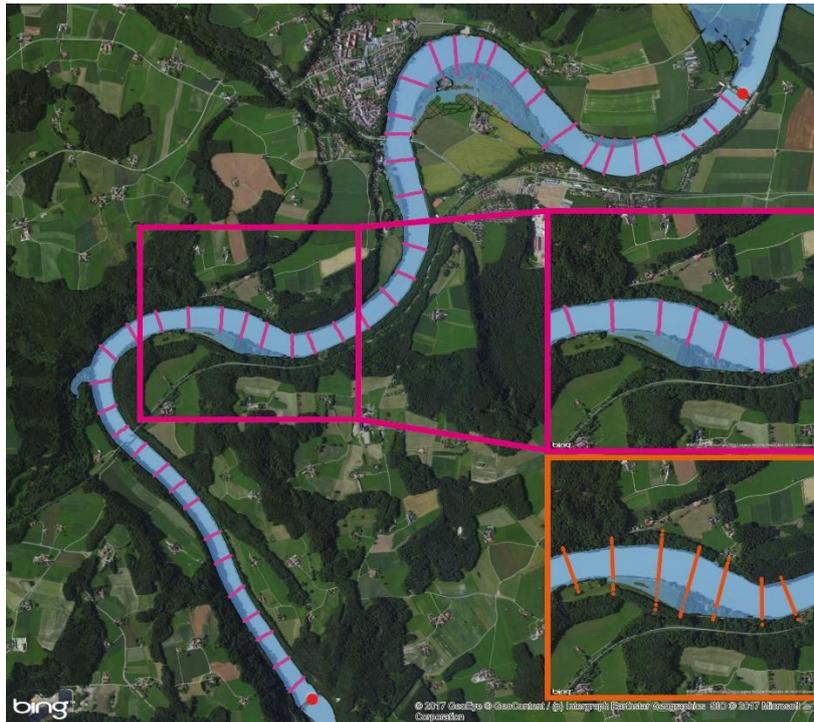


Abbildung 5: Abdeckung des ÜSG durch Querprofile im Stauraum Gars (Kartenhintergrund Bing Maps - © 2017 GeoEye © GeoContent / (p) Intergraph Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)

Zur Modellierung werden das alte bayerische Höhensystem (vorläufiges System) und das DHHN12 als Höhenbezugssystem verwendet. Die Definition erfolgt in Abhängigkeit des Anlagensystems an den jeweiligen Stauanlagen und ist dabei in sich konsistent. Die Höhenwertdifferenzen zwischen altem und neuem System (DHHN 12) liegen je nach Stauhaltung zwischen 3 und 4 cm. Die Differenzen zwischen DHHN12 und DHHN92 betragen nach Angabe der TUM im betrachteten Gebiet zwischen 2 und 5 cm. Zwischen dem alten System und dem Höhensystem DHHN92 ergibt sich damit eine Höhendifferenz zwischen 1 und 4 cm.

Die Rauheit des Fließgewässers und die damit verbundenen Verluste werden über den Stricklerbeiwert k_{st} abgebildet. Zur Definition der Stricklerbeiwerte wurden die Stauhaltungen in Längsrichtung in Abschnitte von drei bis fünf Kilometern unterteilt. Pro Abschnitt wurde ein k_{st} -Wert, teilweise in Abhängigkeit des Wasserstandes, definiert. Die eingesetzten Rauheitsbeiwerte, die zur Berechnung benötigt werden, wurden aus Erfahrungswerten für die Beschaffenheit der Sohle und der Fließstrecke ausgewählt. Die k_{st} -Werte liegen im Bereich zwischen $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ im oberen Abschnitt des Stauraumes und bis zu $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ im unteren Abschnitt (Oberwasser der Stauhaltung).

Retentionswirksame Bereiche, wie Rückstauflächen oberhalb von Brückenprofilen, werden mit Hilfe von Retentionszellen abgebildet. Es handelt sich dabei um einen nachgelagerten Arbeitsschritt im Prozess der Geometrieangepassung, der im Rahmen der Kalibrierung des

Kettenmodells durchgeführt wird. Die Größe der Zelle wird anhand der überfluteten Fläche (Überschwemmungsfläche eines HQ_{100}) im GIS abgeschätzt und über die Beziehung von Wasserstand und Fläche in die Simulation eingegeben.

Mit den Einzelmodellen der 15 Stauhaltungen wurden in einem ersten Schritt stationäre sowie teilweise instationäre Berechnungen (HQ_{100} , $HQ_{1.000}$ wenn gegeben) durchgeführt. Die durchgeführten Simulationen stellen im Prozess der Kalibrierung notwendige Vorberechnungen dar. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen zur Modellverfeinerung im Hinblick auf die Geometrie ein, sodass lokale Besonderheiten eingebunden werden konnten. Zum Vergleich der berechneten Werte wurden sowohl die vorhandenen Fixierungen in den Stauräumen als auch die vorliegenden Berechnungsergebnisse vorhergehender Untersuchungen durch Hydroprojekt, Lahmeyer Hydroprojekt und AquaSoli genutzt.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft das Simulationsergebnis der stationären Betrachtung des Hochwassers (HW) 2005 für den Stauraum Feldkirchen. Für den Stauraum Feldkirchen wurde die Sohlpeilung aus dem Jahr 2009 als Gleichgewichtssohle gewählt. Entsprechend der Analyse des Stauraumes wurde die Geometrie wie oben beschrieben mit Seitensträngen zur Abbildung der Flutrinnen ergänzt. In der folgenden Abbildung 6 sind die berechnete Wasserspiegellage des Hochwassers 2005 sowie die Wasserspiegelfixierungen des Hochwassers dargestellt. Der angegebene maximale Abflusswert am KW Rosenheim beträgt $Q = 2312 \text{ m}^3/\text{s}$, der maximale Zufluss der Mangfall $Q = 206 \text{ m}^3/\text{s}$, sodass sich am KW Feldkirchen ein Abfluss von $Q = 2518 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Mit Ausnahme lokaler Differenzen sind insgesamt geringe Abweichungen und eine gute Übereinstimmung erkennbar.

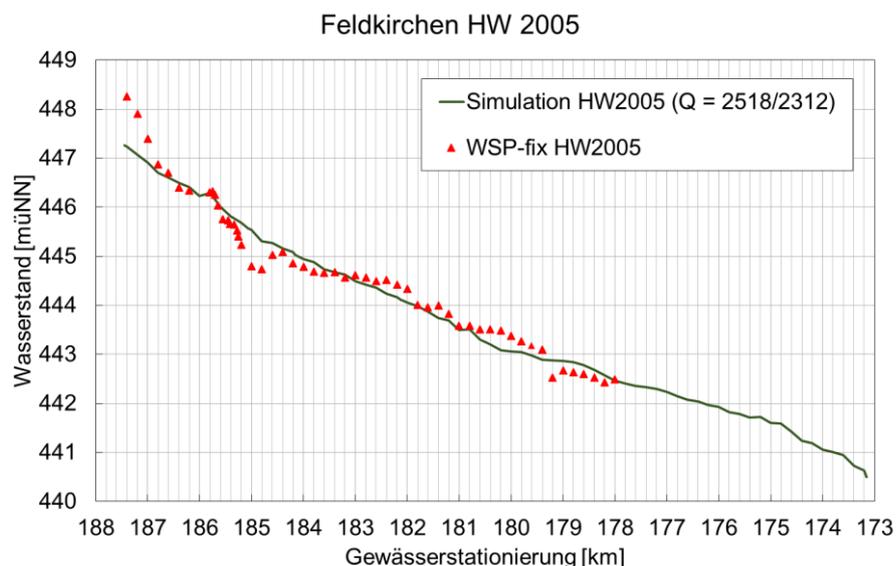


Abbildung 6: Simulationsergebnis HW 2005 (stationär) Stauraum Feldkirchen

3.3 Aufbau des Kettenmodells

Nach der Erstellung der Einzelmodelle und der stationären Kalibrierung wurde die Erstellung des Kettenmodells durch Verknüpfung der Einzelmodelle der Stauhaltungen inkl. Kopplung mit MATLAB/Simulink® durchgeführt. Eine vollumfassende instationäre Kalibrierung erfolgte am Kettenmodell, sodass der Wellenablauf – Ganglinienform sowie Eintrittszeitpunkt und Abflusshöhe des Scheitels – möglichst genau abgebildet wird. Die Ergebnisse der Kalibrierung und Darstellung der Ganglinien erfolgt in Kapitel 4.2.

Das Kettenmodell umfasst damit die 211 km lange Fließstrecke des bayerischen Inns mit insgesamt 15 Stauhaltungen, zuzüglich des Innkanals mit dem KW Töging und der Stauhaltung Jochenstein an der Donau von KW Kachlet bis zum KW Jochenstein (siehe Kapitel 3.4). Die Einzelmodelle der Stauanlagen sind dabei gekoppelt über interne Zu- und Abflüsse.

Das Modell umfasst die Zuflüsse des Inns aus Deutschland und Österreich, für die Pegelaufzeichnungen vorliegen (vgl. Tabelle 3). Insgesamt wurden 16 Zuflüsse berücksichtigt, davon zwölf Pegel des LfU und vier Pegel des BMLFUW. Es erfolgt die Berücksichtigung der Translation (Laufzeit) und eine Skalierung des Pegelabflusses anhand der Einzugsgebietsgröße in Abhängigkeit der Entfernung der Pegelmessstelle zur Einmündung des Gewässers in den Inn. Die Abschätzung der Laufzeit erfolgte mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 3 m/s für den Hochwasserfall. Für den Zufluss der Salzach wurde keine Skalierung des Abflusses vorgenommen, da die am Pegel Burghausen gemessenen Scheitelabflüsse im Vergleich mit den Messwerten unterstrom der Einmündung bei den betrachteten Hochwassern bereits ohne Skalierung relativ hoch liegen. Die Laufzeit wurde nach Detailuntersuchungen und in Abgleich mit den Pegelinformationen des HND Bayern auf 0,72 Stunden festgelegt.

Tabelle 3: Zuflusspegel und Umrechnungsfaktoren

Pegelname	Gewässer	Inn-km	Stauhaltung	Fluss-km	EZG Pegel [km ²]	EZG Nebenfluss [km ²]	Faktor [-]	Laufzeit [h]
Bad Trißl	Auerbach	209	Nußdorf	2,60	37,90	37,90	1,000	0,241
Mühlhausen	Euzenauer Bach	203,7	Nußdorf	0,70	6,16	6,16	1,000	0,065
Nußdorf	Steinbach	199	Nußdorf	3,90	27,99	28,06	1,003	0,361
Stephanskirchen	Sims	186	Feldkirchen	4,00	97,48	98,00	1,005	0,370
Rosenheim	Mangfall	184,7	Feldkirchen	1,89	1099,27	1099,00	1,000	0,175
Weichselbaum	Murn	171,4	Wasserburg	9,28	155,18	179,14	1,154	0,859
Anger	Attel	165,4	Wasserburg	2,20	329,41	330,69	1,004	0,204
Engfurt	Isen	92,3	Neuötting	7,80	547,03	586,40	1,072	0,722
Burgkirchen	Alz	80,25	Stammham	15,40	2221,95	2238,60	1,007	1,426
Burghausen	Salzach	68,3	Braunau-Simbach	11,40	6649,00	6828,62	1,000	0,720
Simbach	Simbach	58	Ering-Frauenstein	0,92	28,57	33,35	1,167	0,085
Jahrsdorf	Mattig	56	Ering-Frauenstein	1,92	446,90	448,00	1,002	0,178
Mamling	Ach	44,5	Eggfling-Obernberg	1,81	314,90	315,10	1,001	0,168
Haging	Antiesen	26,4	Schärding-Neuhaus	17,20	164,90	285,80	1,733	1,593
Ruhstorf	Rott	16,8	Passau-Ingling	11,16	1051,55	1200,01	1,141	1,033
Pramerdorf	Pram	15,9	Passau-Ingling	5,50	340,90	382,30	1,121	0,509

Mit den vorliegenden Pegelinformationen wird zusammengenommen ein Einzugsgebiet des Inns von rund 23.800 km² abgedeckt. Somit ergibt sich beim Abgleich mit dem Gesamteinzugsgebiet des bayerischen Inns von rund 26.000 km² ein Einzugsgebiet von rund 2.200 km², das nicht durch Pegelmessungen abgedeckt wird (vgl. Abbildung 7, gelb dargestellte Flächen). Die fehlenden Teil-Einzugsgebiete (Teil-EZG) wurden durch zusätzliche Zuflüsse in die Stauhaltungen ergänzt. Dabei erfolgt für die Größe der anzuhängenden Teil-Gebiete ein Größenabgleich im erstellten GIS-Projekt (vgl. Abbildung 7). Die Lage der Zuflussstelle wurde ebenfalls durch Abgleich mit dem GIS festgelegt. Die Zugabe des Zuflusses erfolgt in Form einer Ganglinie. Diese wird anhand der Abflussspende [l/s*km²] benachbarter Einzugsgebiete, für die Pegelmessungen vorlagen, berechnet.

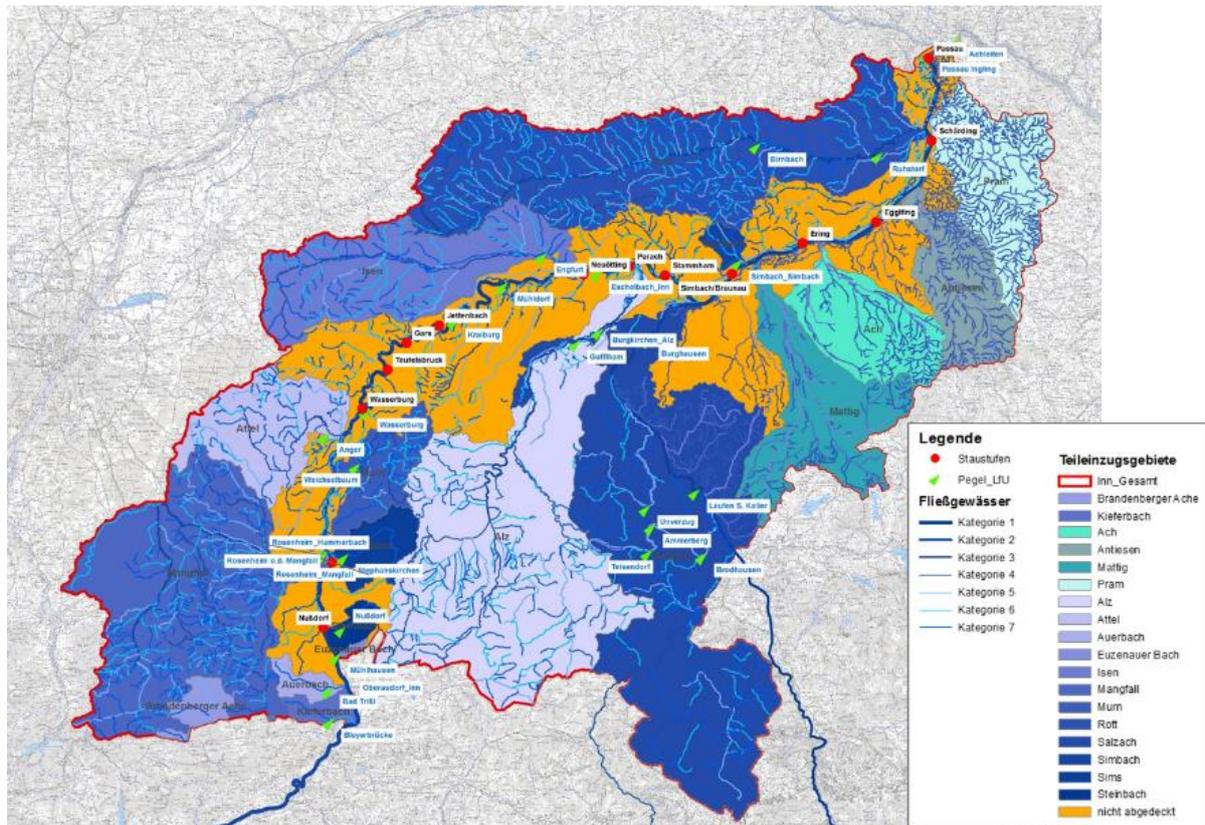


Abbildung 7: Einzugsgebiet des Inns mit Teileinzugsgebieten entlang der Untersuchungsstrecke (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)

In Abbildung 8 ist eine schematische Darstellung des Inns abgebildet, die die abgebildete Fließgewässerstrecke vom Pegel Oberaudorf bis zum Kraftwerk Passau-Ingling zeigt. Mit aufgenommen sind die durch Pegelmessstellen aufgezeichneten Zuflüsse und Pegel des Inns. Aufgetragen sind die Einzugsgebietsgrößen der Inn-Pegel (blau) und der Zuflusspegel (rot). In Gelb unterlegt sind die zusätzlichen Zuflüsse, welche die nicht durch Pegel abgedeckten Einzugsgebiete abdecken. Enthalten ist die Information, in welchen Stauraum der Zufluss einmündet, an welchem Inn-km der Zufluss liegt und wie groß die berücksichtigte Fläche des Teil-EZG ist. Die Definition der Zuflüsse zur Abbildung der fehlenden Teil-EZG anhand der Abflusspende benachbarter Einzugsgebiete bei der Simulation der abgelaufenen Hochwasser wird in Kapitel 4.2.1 erläutert.

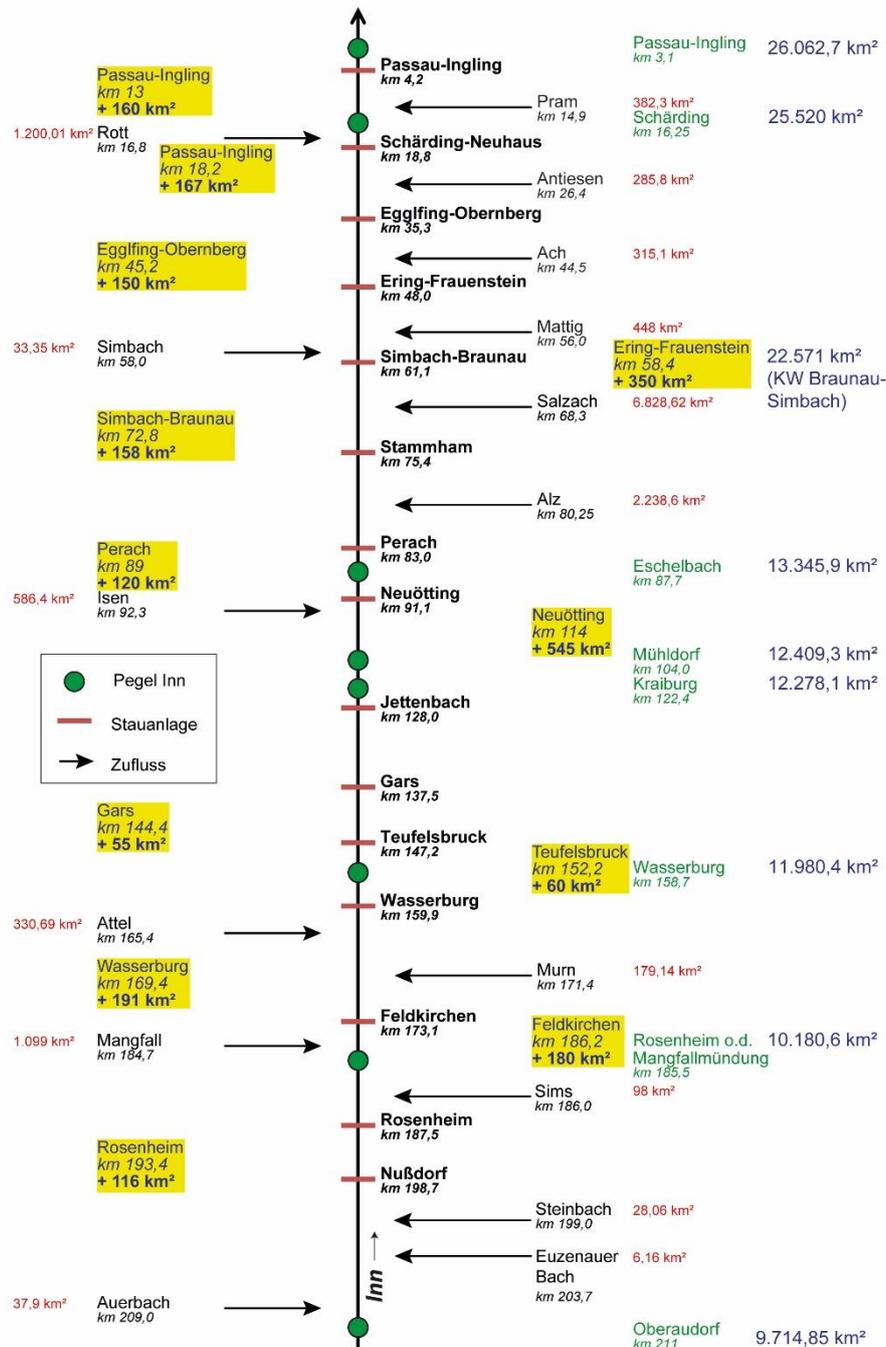


Abbildung 8: Schematische Darstellung der abgebildeten Fließgewässerstrecke mit Einzugsgebietsgrößen

Zusätzlich geht ein konstanter Abfluss von $Q = 87 \text{ m}^3/\text{s}$ in das Modell ein, der den Zufluss des Alzkanals abbildet. Durch die Pegelaufzeichnungen an Alz und Salzach wird das durch den Alzkanal geführte Wasser nicht abgedeckt. Der Zufluss wird zur Zuflussganglinie der Salzach addiert. Der Durchfluss wird von der Firma Wacker Chemie AG mit $Q = 22$ bis $Q = 87 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Vollwasser angegeben (Wacker 2016).

Für die Simulation des HW 2005 wurde, entsprechend dem Hinweis durch die VERBUND AG, eine Anpassung der Geometrie vorgenommen. In der genutzten Sohlpeilung des Jahres 2009, die als Gleichgewichtssohle definiert ist, ist die rechtsseitige Aufweitung des Flussschlauches

um etwa 18 m von Inn-km 182,2 bis 184,6, die 2005 noch nicht bestand, enthalten. Die betroffenen Querprofile wurden unter Berücksichtigung der Sohlpeilung von 2005 angepasst. Für die Nachrechnung der HW 2005 und HW 2013 liegen somit zwei verschiedene Modelle vor.

Die Ergebnisse der instationären Nachkalibrierung des Modells werden in Kapitel 4.2 dargestellt, in Kapitel 4.3 werden die Ergebnisse der Validierung erläutert.

3.4 Implementierung der Wehrbetriebsordnungen

In den Wehrbetriebsordnungen (WBO) ist die Betriebsweise von Stauanlagen festgelegt. Hierin sind die einzuhaltenden Oberwasserstände an den Anlagen festgehalten, gegebenenfalls in Abhängigkeit von Abflüssen und weiteren Vorgaben. Die WBO wird in das 1D-HN-Modell integriert, um die realistische Betriebsweise gemäß WBO bei abgelaufenen, aber auch bei weiteren synthetischen Hochwasserereignissen abzubilden. Der Betrieb nach WBO stellt dabei einen Referenzzustand dar, dessen Anpassung in den weitergehenden Untersuchungen zum Potential der Scheitelminderung durch angepassten Wehrbetrieb betrachtet wird.

Nach der Kopplung der Einzelmodelle zu einem Kettenmodell wurde das HN-Modell in die Umgebung von MATLAB/Simulink® eingebettet. Neben der Möglichkeit, aufgezeichnete Oberwasserstände an den Stauanlagen als interne Randbedingungen anzugeben, worauf in Kapitel 4.2 eingegangen wird, wurden die vorliegenden Betriebsvorgaben unter Nutzung der entsprechenden Strukturen in das Modell implementiert.

Bei den Betriebsvorgaben handelt es sich um eine tabellarische Zusammenfassung der Absenkvorschriften, in der die Oberwasserstände für die Stauanlagen Nußdorf bis Passau-Ingling in Abhängigkeit des Zuflusses festgehalten sind.

In Abbildung 9 sind beispielhaft die Vorgaben für den Oberwasserstand in Abhängigkeit des Zuflusses an den Anlagen Feldkirchen und Wasserburg dargestellt.

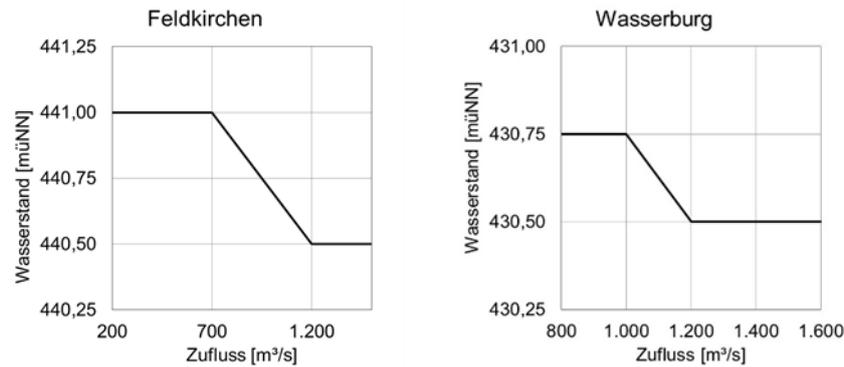


Abbildung 9: Oberwasserstand in Abhängigkeit des Zuflusses - KW Feldkirchen und KW Wasserburg

Für die Anlagen Nußdorf und Passau-Ingling lagen darüber hinaus weitere Angaben zum Betrieb vor, die zum Beispiel Absenkgeschwindigkeit oder Stauzieltoleranzen beinhalten. Bei dem Betrieb der Staustufe Passau-Ingling werden neben Wasserständen der Donau im Mündungsbereich im realen Betrieb zusätzlich auch Abflussprognosen berücksichtigt. Der Betrieb der Staustufe Passau-Ingling ist im Hochwasserfall ebenfalls durch den Rückstau vom Unterwasser her beeinflusst. Um die WBO der Staustufe vollständig zu implementieren, wurden der Innbereich unterstrom des KW Passau-Ingling und der Donauabschnitt vom KW Kachlet (Donau-km 2.230,6) bis zum KW Jochenstein (Donau-km 2.204,0) zum Inn-Modell hinzugefügt (vgl. Abbildung 10). Es werden somit ebenfalls der Pegel Passau-Ingling am Inn sowie die drei Donau-Pegel Passau, Passau Ilzstadt und Achleiten mit dem Modell abgebildet.

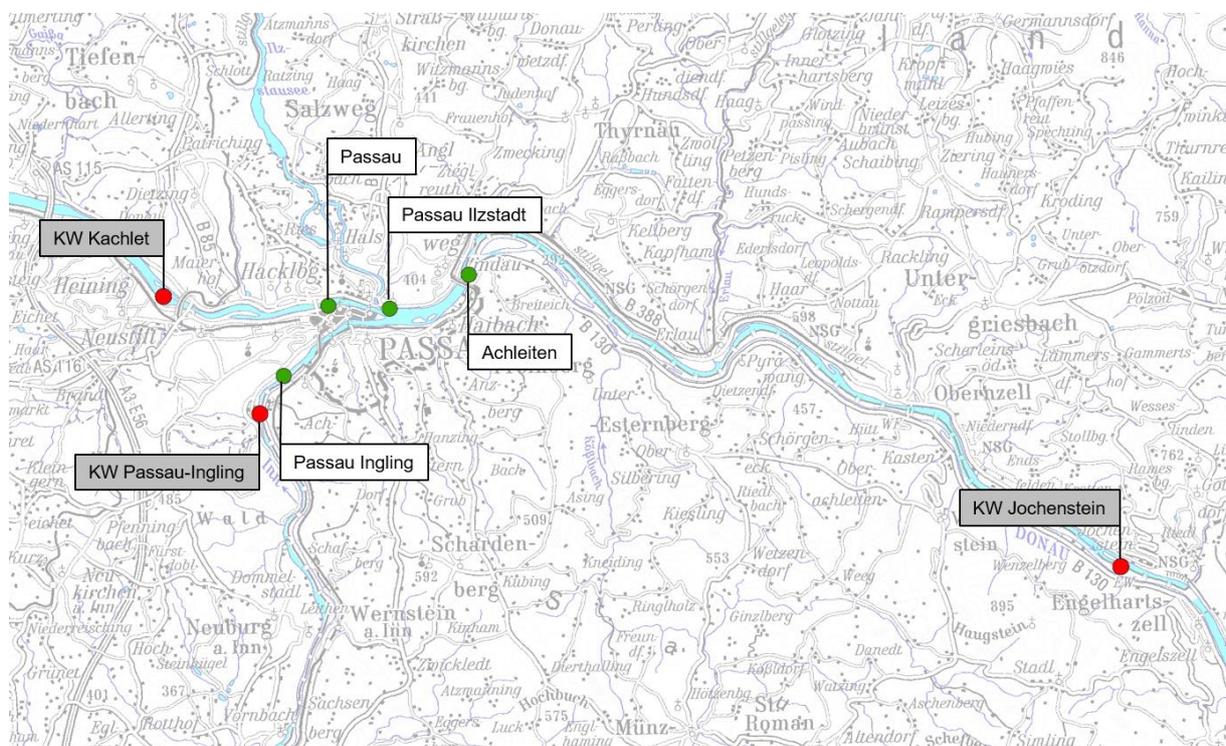


Abbildung 10: Donauabschnitt KW Kachlet bis KW Jochenstein (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)

In der Simulation wird der Einfluss des Unterwasserstandes automatisch überprüft und berücksichtigt, sodass Rückstaueffekte entsprechend abgebildet werden. Mit der Erweiterung des Inn-Modells um den dargestellten Abschnitt der Donau ist somit ebenfalls die Abbildung des Rückstaus am KW Passau-Ingling möglich.

4 Nachrechnung verschiedener Hochwasserereignisse

4.1 Allgemeines zur Nachrechnung

Die Kalibrierung eines Modells dient dazu, gemessene Naturdaten ausreichend genau durch das Modell wiederzugeben und damit ein für den betrachteten Gewässerabschnitt repräsentatives Modell zu erstellen. Nach der stationären Kalibrierung (vgl. Kapitel 0) wurden Simulationen zur instationären Nachkalibrierung des Kettenmodells durchgeführt. Für die Abbildung von Instationarität ist bei der eindimensionalen Untersuchung eine genaue Betrachtung und Einschätzung der hydraulischen Situation durch den Modellierer notwendig. Es wurden weitere Anpassungen der Geometriedaten vorgenommen, sodass abfluss- und retentionswirksame Bereiche entsprechend berücksichtigt werden. Um retentionswirksame Bereiche wie Rückströmzonen oder nicht aktiv durchströmte Altarme abzubilden, werden Retentionszellen genutzt.

Die Kalibrierung des erstellten HN-Modells dient dazu, den Ablauf von historischen Hochwasserereignissen mit dem Modell möglichst genau wiederzugeben. Zum Vergleich der instationären Simulationsergebnisse werden aufgezeichnete Daten von Wasserstandsganglinien an Betreiber- und Landespegeln sowie von Abflussganglinien an Pegeln und Stauanlagen verwendet. Zur Durchführung der Simulationen werden gemessene Abflüsse der Pegelstellen von seitlichen Zuflüssen sowie am oberen Modellrand genutzt. Weiterhin werden synthetische Zuflüsse zur Abbildung nicht bepegelter Teil-EZG aus Abflussspenden benachbarter Einzugsgebiete definiert.

Der Fokus der instationären Kalibrierung liegt auf der möglichst genauen Abbildung der Form der Ganglinien (z. B. Gradienten des ansteigenden und abfallenden Astes) und der Scheitelhöhe des Hochwassers. Es ist ein vertieftes Systemverständnis unter Beachtung auftretender Unsicherheiten und damit Ungenauigkeiten zu erreichen. Diese Unsicherheiten finden sich insbesondere in den gemessenen Zuflussganglinien und bei der Abschätzung des Abflusses von nicht bepegelten Teil-EZG.

Zur instationären Kalibrierung des Kettenmodells wurden die Hochwasserereignisse von 2005 und 2013 nachgerechnet. Die eingehenden Daten und die Simulationsergebnisse werden in Kapitel 4.2 dargestellt. Nach der Kalibrierung wurde das HW 2002 zur Validierung des

Kettenmodells nachgerechnet. Die Ergebnisse dieser Simulation zur Validierung werden in Kapitel 4.3 zusammengefasst.

4.2 Instationäre Kalibrierung des Kettenmodells

4.2.1 Voranalyse und Definition von Zuflüssen

Im Folgenden werden ausgewählte Simulationsergebnisse der Nachrechnung der Hochwasserereignisse 2005 und 2013 dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse und deren Vergleich mit den gemessenen Werten an Pegeln und Stauanlagen ist die unterschiedliche Charakteristik der beiden Hochwasserereignisse zu beachten. Das HW 2005 stellt für den oberen Inn ein HQ₁₀₀-Ereignis dar (Pegel Wasserburg), während am unteren Inn eine Jährlichkeit von 10 Jahren leicht überschritten wird (Pegel Passau-Ingling). Das HW 2013 weist am oberen Inn eine Jährlichkeit von HQ₂₀ (Pegel Wasserburg) auf, am unteren Inn hat das Hochwasser durch den Einfluss der Salzach eine Jährlichkeit von HQ₁₀₀ (Pegel Passau-Ingling) (GKD 2018).

Aus der Vielzahl der vorliegenden Daten wurden Simulationsergebnisse der Kalibrierung an repräsentativen Pegeln für die Flussabschnitte am oberen und unteren Inn nach der Salzaheinmündung ausgewählt und dargestellt. Gezeigt werden nachfolgend für die HW 2005 und 2013 exemplarisch simulierte und aufgezeichnete Ganglinien an drei Pegeln des LfU (Wasserburg, Kraiburg und Eschelbach), die Ergebnisse an drei Stauanlagen (Gars, Ering-Frauenstein und Passau-Ingling) und von zwei Stauräumen am oberen und unteren Inn (Gars und Ering-Frauenstein). Eine zusammenfassende Wertung der Berechnungsergebnisse, auch im Abgleich mit Messwerten an benachbarten Pegeln und Stauanlagen, ist jeweils am Ende der folgenden Kapitel zur Simulation der Hochwasser angeschlossen.

Zur Berechnung der Hochwasserereignisse wurde eine Analyse der oberen Randbedingung, der Abflussaufzeichnung am Pegel Oberaudorf, durchgeführt (Abbildung 11). Bei dem Vergleich der Aufzeichnungen der Pegel Kirchbichl-Bichlwang und Oberaudorf sowie des KW Nußdorf beim HW 2005 (Abbildung 11, links) ist eine deutliche Abweichung der gemessenen Werte am Pegel Oberaudorf von den Werten der anderen beiden Messstellen erkennbar. Zur Simulation des HW 2005 wurde daher eine modifizierte Ganglinie verwendet, die eine Mittelung der Pegel Kirchbichl-Bichlwang und Oberaudorf darstellt. Hierbei wurde der am Pegel Oberaudorf aufgezeichnete Maximalabfluss genutzt. Für das HW 2013 wurde ebenfalls eine Anpassung vorgenommen. Im Simulationsbereich von Stunde 54 bis 56 wurde ein Ausreißer reduziert, der Verlauf vor Anstieg des Hochwassers wurde über einen Zeitraum von 20 Stunden durch die Ganglinie des Kraftwerks Nußdorf ersetzt.

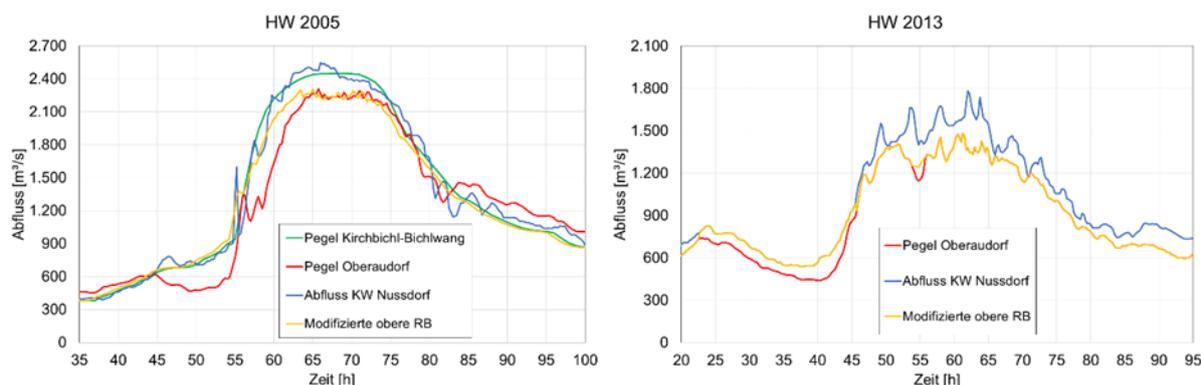


Abbildung 11: Obere Randbedingungen Nachrechnung HW 2005 (links) und HW 2013 (rechts)

Für die Berechnung der Abflussspende aus den nicht mit Pegeln abgedeckten Teil-EZG wurden die aufgezeichneten Abflussganglinien benachbarter Pegel genutzt, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die zur Festlegung der Abflüsse der unbepegelten Teil-EZG genutzten Daten zusammengetragen. Angegeben ist hier der Inn-km, an dem die Zuflüsse einmünden, sowie der zugehörige Stauraum. Darüber hinaus sind die Größe und Lage des Teil-EZG (links- oder rechtsseitig des Inns) festgehalten. Des Weiteren ist der Zufluss eingetragen, auf dessen bekannter Abflussspende die Berechnung der Abflussganglinie des Teil-EZG basiert sowie das EZG des zugehörigen Pegels. Der Faktor zur Multiplikation der Ganglinie ergibt sich aus der Division der Einzugsgebietsgrößen (Größe des Teil-EZG geteilt durch Größe des EZG am gewählten Pegel). Tabelle 4 zeigt die Kenngrößen für das HW 2005.

Tabelle 4: Definition der Abflüsse der unbepegelten Teil-EZG HW 2005

Inn-km	Stauraum	Größe Teil-EZG [km²]	EZG von	Abflussspende von Zufluss	EZG gewählter Pegel [km²]	Faktor [-]
193,4	Rosenheim	116	links	Mangfall	1099,27	0,106
186,2	Feldkirchen	180	rechts	Sims	97,48	1,847
169,4	Wasserburg	191	links	Attel	329,41	0,580
152,2	Teufelsbruck	60	rechts	Murn	155,18	0,387
144,4	Gars	55	links	Isen	547,03	0,101
114,0	Neuötting	545	rechts	Alz	2221,95	0,245
89,0	Perach	120	links	Isen	547,03	0,219
72,8	Braunau-Simbach	158	links	Simbach	28,57	5,530
58,4	Ering-Frauenstein	350	rechts	Mattig	446,90	0,783
45,2	Eggfing-Obernberg	150	links	Simbach	28,57	5,250
18,2	Passau-Ingling	167	links	Rott	1051,55	0,159
13,0	Passau-Ingling	160	links	Rott	1051,55	0,152

Die verwendeten Daten für das HW 2013 sind in Tabelle 5 festgehalten. Lediglich für den Zufluss des Teil-EZG an Inn-km 193,4 ergibt sich ein Unterschied zu den Daten des HW 2005. Für das HW 2013 wird die Abflussspende des Auerbaches anstelle der Mangfall genutzt, da

bei Nutzung des Auerbachs das simulierte Volumen der Ganglinien unterstrom der Einmündung des Teil-EZG besser übereinstimmt.

Tabelle 5: Definition der Abflüsse der unbepegelten Teil-EZG HW 2013

Inn-km	Stauraum	Größe Teil-EZG [km ²]	EZG von	Abflussspende von Zufluss	EZG gewählter Pegel [km ²]	Faktor [-]
193,4	Rosenheim	116	links	Auerbach	37,90	3,061
186,2	Feldkirchen	180	rechts	Sims	97,48	1,847
169,4	Wasserburg	191	links	Attel	329,41	0,580
152,2	Teufelsbruck	60	rechts	Murn	155,18	0,387
144,4	Gars	55	links	Isen	547,03	0,101
114,0	Neuötting	545	rechts	Alz	2221,95	0,245
89,0	Perach	120	links	Isen	547,03	0,219
72,8	Braunau-Simbach	158	links	Simbach	28,57	5,530
58,4	Ering-Frauenstein	350	rechts	Mattig	446,90	0,783
45,2	Eggfing-Obernberg	150	links	Simbach	28,57	5,250
18,2	Passau-Ingling	167	links	Rott	1051,55	0,159
13,0	Passau-Ingling	160	links	Rott	1051,55	0,152

Die mit dem beschriebenen Vorgehen erstellten Ganglinien der Teil-EZG sind in Abbildung 12 zusammengestellt. Die Abflussganglinien des HW 2005 sind auf der linken Seite, die des HW 2013 auf der rechten Seite dargestellt. In der Legende sind die Lage des Zuflusses des Teil-EZG und der Pegel, dessen Abflussspende zur Definition genutzt wird, angegeben. Teil-EZG, die linksseitig des Inns liegen, sind in den oberen beiden Diagrammen aufgeführt, im unteren Diagramm sind die von rechts einmündenden Teil-EZG dargestellt. Die maximalen Abflüsse der hinzugefügten, unbepegelten Teil-EZG betragen für das HW 2005 zwischen $Q = 5$ bis $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei der Simulation des HW 2013 sind die maximalen Abflüsse größer und liegen in einem Bereich von $Q = 20$ bis $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

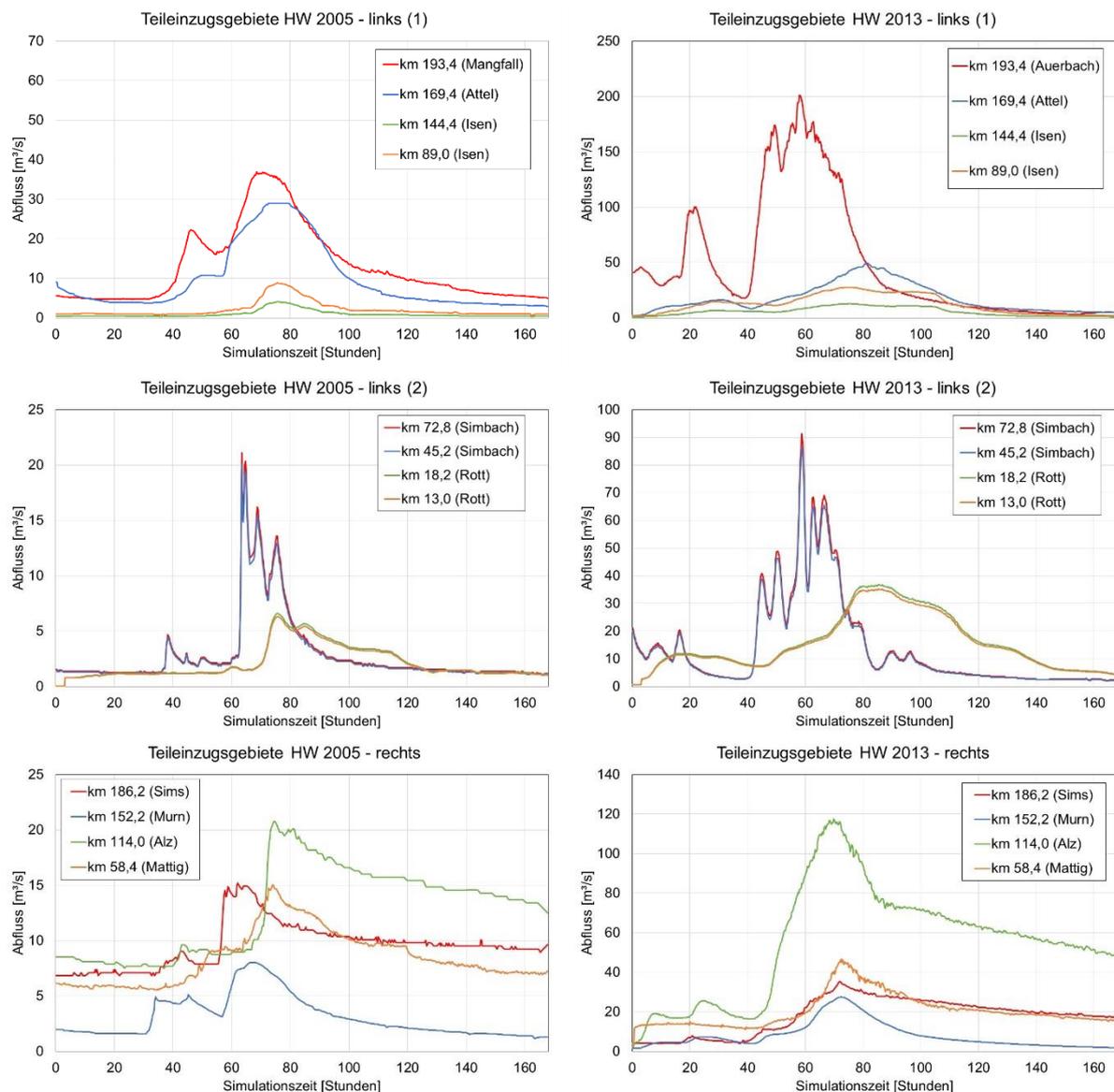


Abbildung 12: Ganglinien der unbepegelten Teil-EZG des HW 2005 (links) und HW 2013 (rechts)

Im Allgemeinen muss bei der Analyse und dem Vergleich von Simulationsergebnissen mit gemessenen Wasserstands- und Abflusswerten beachtet werden, dass die Daten hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu unterscheiden sind. Tendenziell sind Wasserstände auch während eines Hochwasserereignisses relativ gut messbar. Die Bestimmung von Abflüssen an Pegeln, basierend auf gemessenen Wasserständen anhand von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen, ist mit Ungenauigkeiten behaftet. Wasserstands-Abfluss-Beziehungen können auf unterschiedliche Weisen erstellt werden. Eine Möglichkeit besteht in der regelmäßigen Messung von Wasserständen und Abflüssen zur Erstellung der Schlüsselkurven. Für den Bereich hoher und damit selten auftretender Wasserstände wird in der Regel eine Extrapolation vorgenommen, da hier nur wenige oder auch gar keine Messwerte vorliegen. Diese Extrapolation ist mit Unsicherheiten behaftet. Bei der Erstellung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung anhand von numerischen Berechnungen besteht die Ungenauigkeit

allgemein in der Differenz zwischen Natur und Simulation. Wasserstands-Abfluss-Beziehungen sind weiterhin für eine feste Geometrie eines Querschnittes resp. Flussabschnittes gültig. Durch morphologische Veränderungen im Bezugsquerschnitt können bei der Abflussbestimmung Unsicherheiten auftreten. Die Abflussermittlung an Bauwerken weist vergleichsweise größere Ungenauigkeiten von bis zu 10 % bei Wehrbetrieb auf. Zu überprüfen ist aus diesem Grund immer die Konsistenz von Messungen und damit der Abgleich von Messwerten in der direkten Umgebung (z. B. von benachbarten Staustufen), um eine gegebenenfalls nicht korrekte Einzelmessung an einem Pegel insbesondere beim Kalibrierungsprozess nicht überzubewerten.

4.2.2 Simulations- und Messergebnisse des Hochwassers 2005

Aufgrund der Vielzahl von Aufzeichnungsdaten werden im Folgenden exemplarisch die Aufzeichnungen an den Pegeln Wasserburg, Kraiburg und Eschelbach für das HW 2005 mit den Berechnungsergebnissen der Simulationsläufe verglichen. Die gemessenen Abflusswerte an den Pegeln Wasserburg und Kraiburg werden anhand des gemessenen Wasserstandes und zugehöriger Wasserstands-Abfluss-Beziehung berechnet. Für den Pegel Eschelbach wird der Vergleich der gemessenen und simulierten Wasserstände dargestellt, da die am Pegel verfügbare Q-Messung keine verlässlichen Daten lieferte. Zur Nachrechnung werden die gemessenen OW-Stände an den Anlagen als interne Randbedingung eingesetzt.

Abbildung 13 zeigt den aufgezeichneten und simulierten Abfluss des HW 2005 am Pegel Wasserburg im Stauraum Teufelsbruck bei Inn-km 158,7. Es zeigt sich dabei eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen berechneten und simulierten Werten. Im Anstieg sowie im abfallenden Ast ist ein leichter zeitlicher Unterschied bis zu einem Abflusswert von $Q = 2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ erkennbar. Oberhalb dieses Abflusswertes werden Scheitelabfluss und Auftrittszeitpunkt des Scheitels gut getroffen.

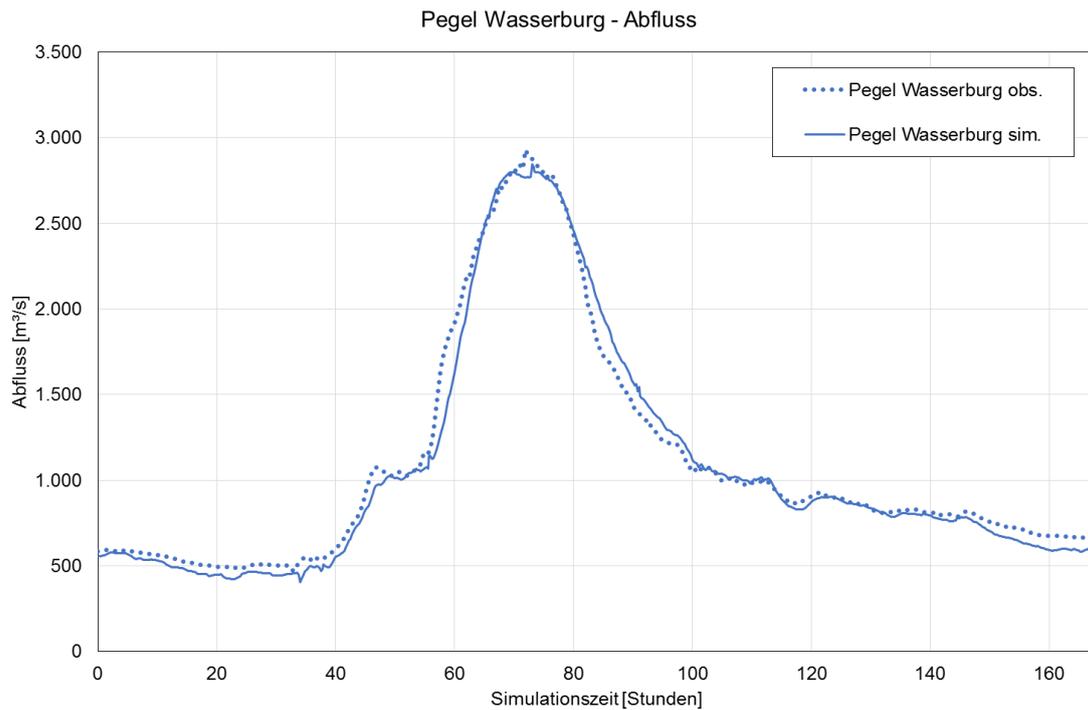


Abbildung 13: Pegel Wasserburg - Abfluss - HW 2005

Der Vergleich zwischen aufgezeichnetem und simuliertem Abfluss am Pegel Kraiburg, der im Stauraum Neuötting bei Inn-km 122,4 liegt, zeigt ein ähnliches Bild. Die Differenz im zeitlichen Verlauf ist etwas stärker ausgeprägt, insgesamt werden der Ablauf und der Scheitel der Ganglinie gut wiedergegeben. Der Pegel Kraiburg liegt in der Ausleitungsstrecke des Inns, sodass der in den Innkanal abgeführte Abfluss zur Beaufschlagung des KW Töging an diesem Pegel nicht erfasst wird.

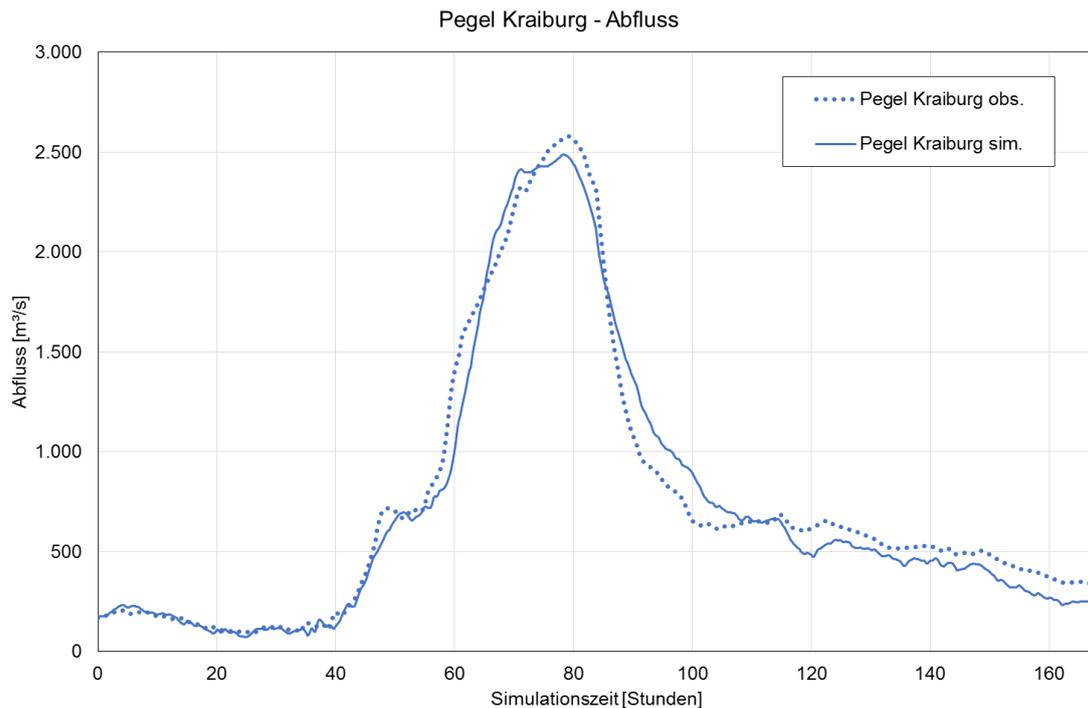


Abbildung 14: Pegel Kraiburg - Abfluss - HW 2005

In Abbildung 15 ist der Vergleich des aufgezeichneten und simulierten Wasserstandes des Pegels Eschelbach aufgetragen, der im Stauraum Perach an Inn-km 87,7 liegt. Die simulierten Wasserstände liegen im Bereich bis 362,0 müNN zu niedrig gegenüber der Aufzeichnung, während die Simulationen im Bereich des Scheitels maximal rund 30 cm zu hoch liegen. Die Form der Ganglinie wird insgesamt gut abgebildet und kurzfristige Wasserstandsänderungen (zum Beispiel bei Simulationsstunde 75) werden durch die Simulation ähnlich wiedergegeben, sodass sich eine insgesamt zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zeigt.

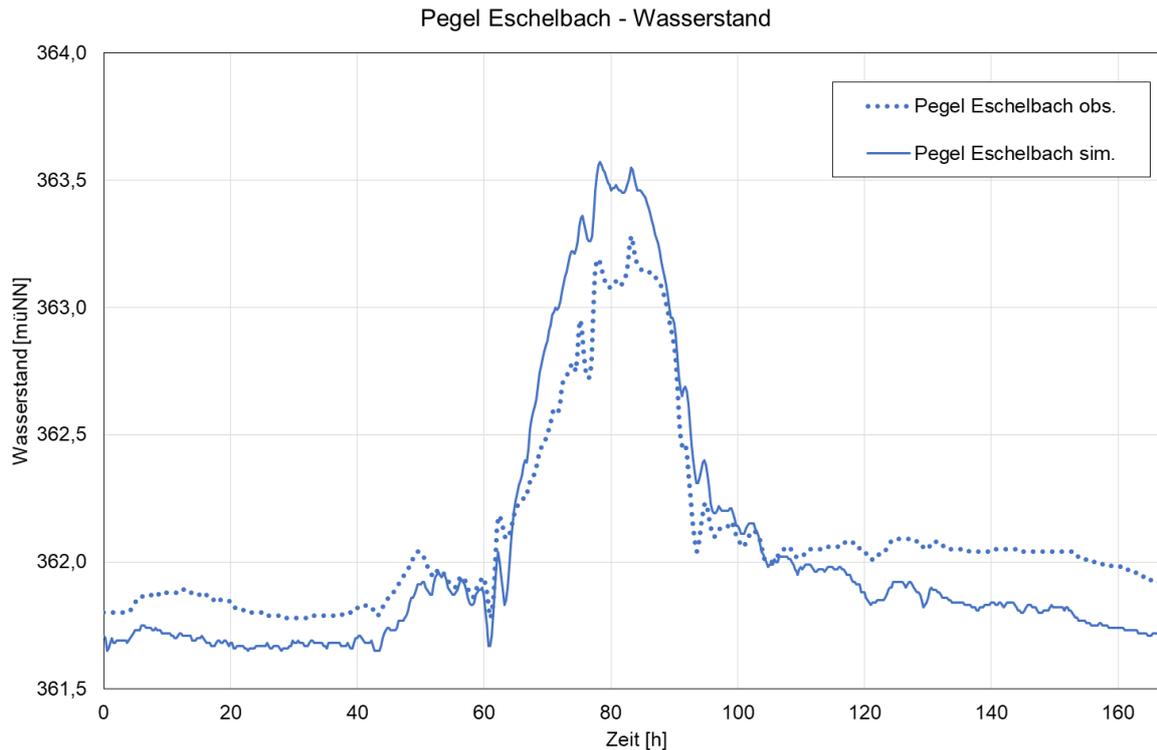


Abbildung 15: Pegel Eschelbach - Wasserstand - HW 2005

Die Simulationsergebnisse an der Stauhaltung Gars, die an Inn-km 137,5 liegt, werden als ein exemplarisches Ergebnis für den oberen Inn dargestellt. Der angegebene, beobachtete Abfluss an den Stauanlagen wird mittels gemessenen Wasserständen, Schützstellungen und Wehrkennlinien berechnet und ist mit Unsicherheiten behaftet.

In der folgenden Abbildung 16 sind der simulierte (rot) und der aufgezeichnete (blau) Abfluss sowie der gemessene OW-Stand (orange) an der Stauanlage Gars aufgetragen. Im ansteigenden Ast des Hochwassers ist eine Differenz zwischen Simulation und Beobachtung zu erkennen. Der Anstieg des Abflusses im Abflussbereich zwischen $Q = 1.000$ bis $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ findet bei der Simulation etwas später statt als bei der Messung. Ab einem Abfluss von $Q = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ist in den aufgezeichneten Werten eine Verringerung des Anstiegsgradienten zu erkennen, die von der Simulation nicht wiedergegeben wird. Dieser verringerte Anstieg ist in den Abflussaufzeichnungen der Kraftwerke ab dem Kraftwerk Wasserburg zu erkennen und ebenfalls im ansteigenden Ast der Ganglinien an den gezeigten Pegeln ersichtlich. Die Differenz zwischen Simulation und Messung im ansteigenden Ast kann auf eine Ungenauigkeit in den Abflussdaten zurückzuführen sein, sodass relevante seitliche Zuflüsse unter- oder überschätzt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass das Abflachen des Anstieges in den Messwerten durch Retentionseffekte am Inn bedingt ist, die bei der Simulation möglicherweise leicht unterschätzt werden. Die Übereinstimmung ist insgesamt zufriedenstellend.

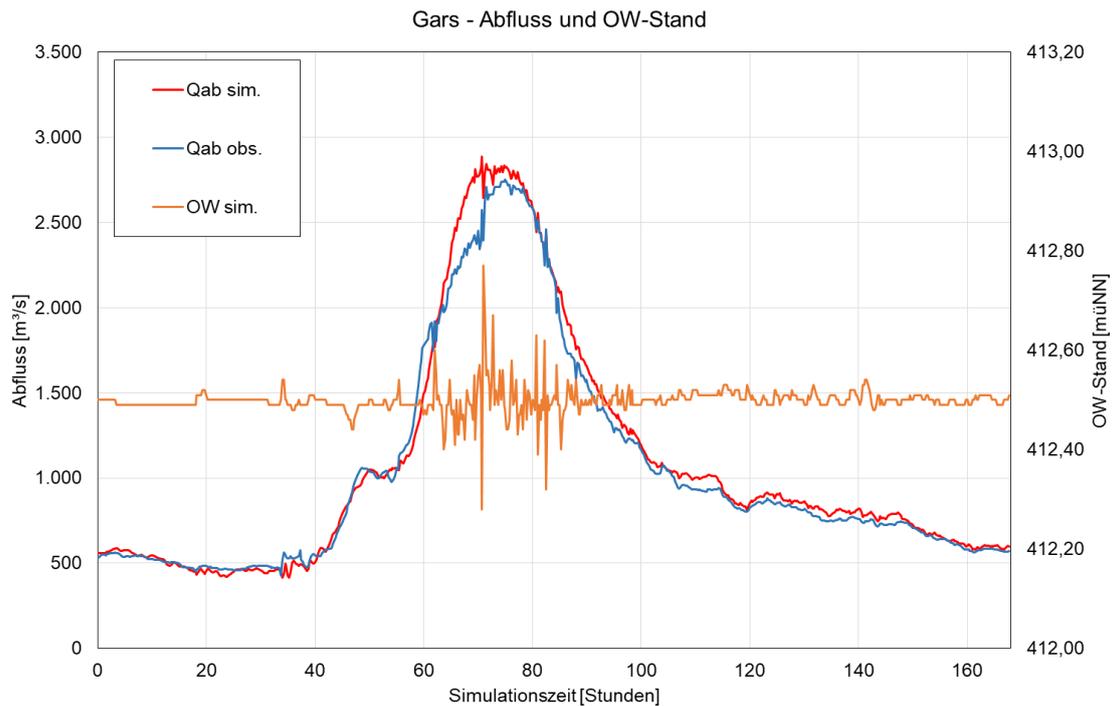


Abbildung 16: Gars - Abfluss und OW-Stand - HW 2005

Bei der Betrachtung des Längsschnittes der Wasserstände für die Stauhaltung Gars (Abbildung 17) ergibt sich ein stimmiges Bild. In der Abbildung sind die Wasserspiegelfixierungen (Geschwemmsellinien, rot), die sich bei der Simulation einstellende maximale Wasserspiegellage (blau) und die Maximalwerte der Wasserstandsaufzeichnungen der Stauraumpegel dargestellt. Die simulierten Maximalwasserstände stimmen sowohl mit den Fixierungen als auch mit den Stauraumpegelaufzeichnungen über den kompletten Bereich des Stauraumes gut überein.

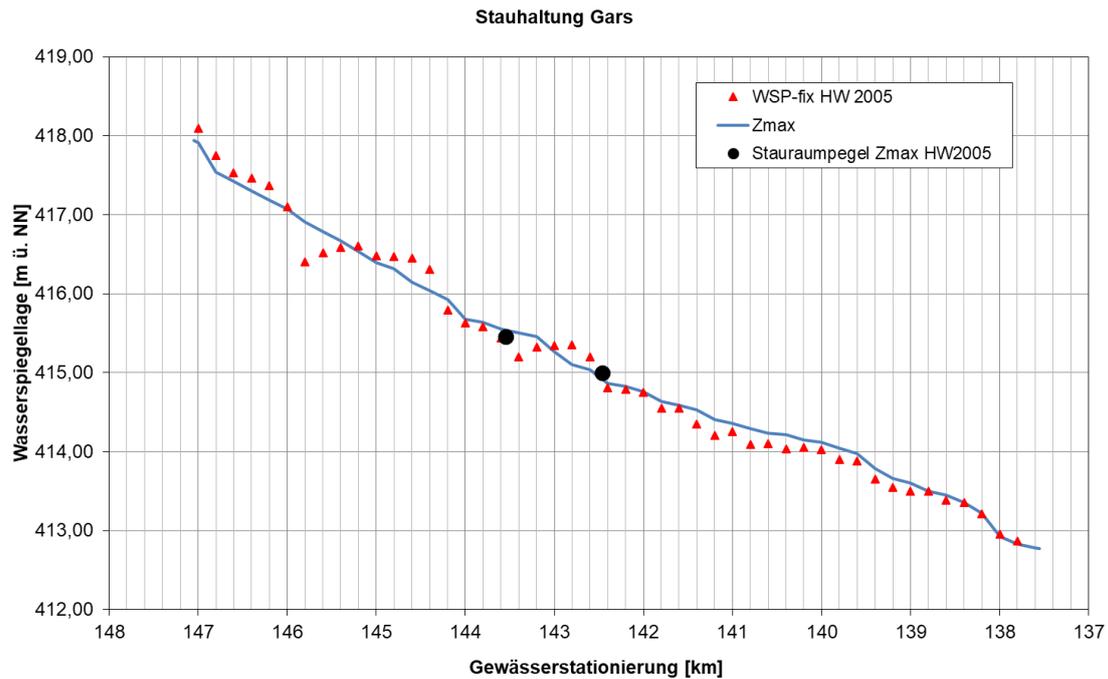


Abbildung 17: Gars - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2005

Die Simulationsergebnisse der Stauanlage Ering-Frauenstein (Inn-km 48) werden exemplarisch für Ergebnisse des unteren Inns dargestellt. In Abbildung 18 sind die simulierten und messtechnisch erfassten Abflussganglinien der Staustufe Ering-Frauenstein dargestellt. Im Anstieg der Ganglinie ist eine Differenz zwischen Berechnung und Simulation in einem Abflussbereich zwischen $Q = 2.000$ bis $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$ erkennbar. Der in der Beobachtung ab einem Abfluss von $Q = 3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ abflachende Anstieg wird durch die Simulation nicht wiedergegeben. Der simulierte Scheitel und die Form der Ganglinie stimmen jedoch gut mit den Messwerten überein.

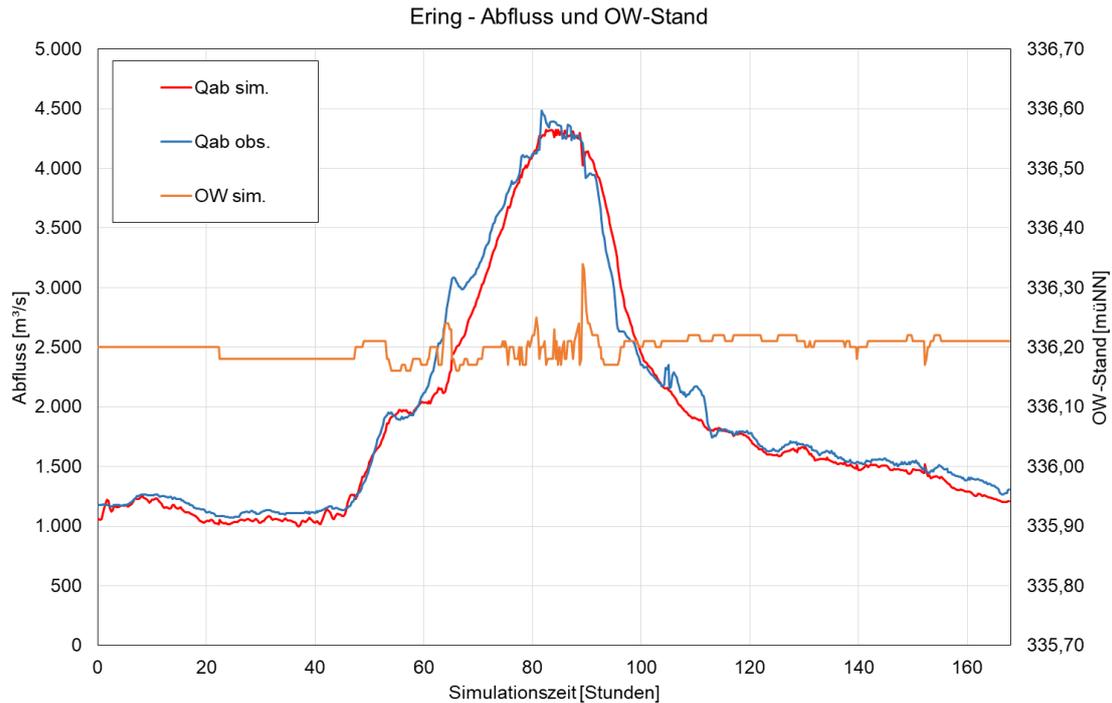


Abbildung 18: Ering - Abfluss und OW-Stand - HW 2005

Der Vergleich von simulierter maximaler Wasserspiegellage mit Wasserspiegelfixierungen stellt für den Stauraum Ering-Frauenstein ein Beispiel dar, bei dem die Übereinstimmung weniger gut ist (vgl. Abbildung 19). Zwischen Wasserspiegellage und Fixierungen ergeben sich vor allem im unteren Bereich des Stauraums Unterschiede von bis zu 50 cm. Die Fixierungsdaten weisen teilweise ein starkes Wasserspiegelgefälle auf, das in sich nicht konsistent ist und auf Fehler respektive Ungenauigkeiten der gemessenen Wasserstände hindeutet. Zu beachten ist, dass sich die Stauraumpegel zum Teil im Vorland befinden und somit gegebenenfalls nur bedingt repräsentativ für das Abflussgeschehen im Flussschlauch sind.

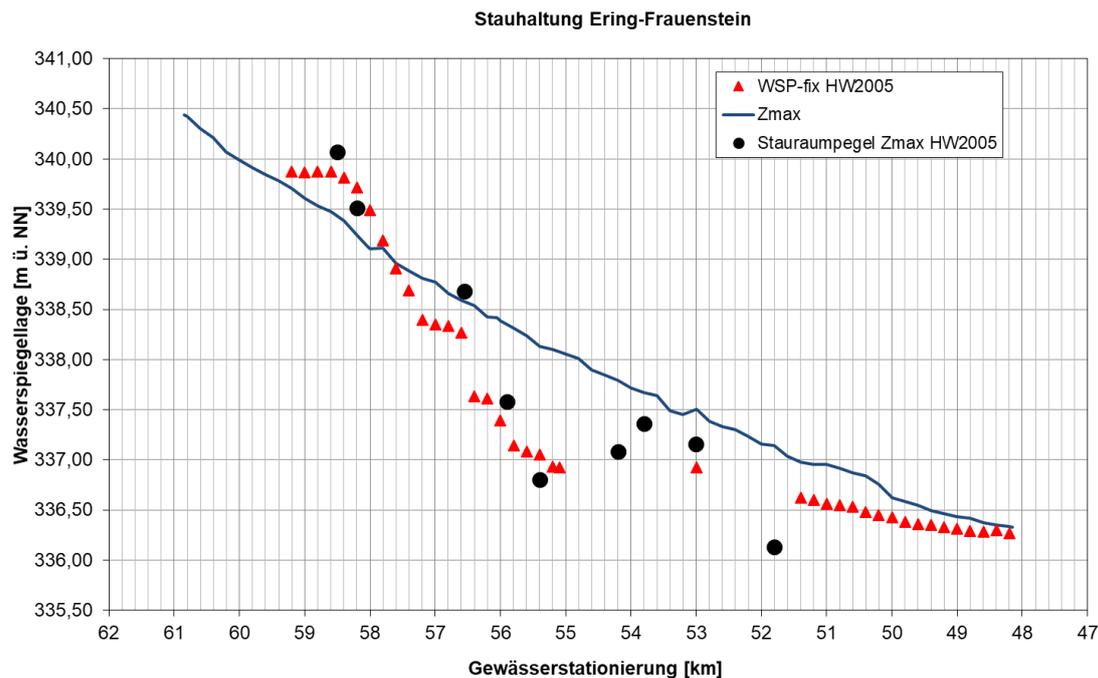


Abbildung 19: Ering - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2005

In Abbildung 20 sind der simulierte (rot) und der aufgezeichnete (blau) Abfluss sowie der OW-Stand (orange) am Kraftwerk Passau-Ingling und der Abfluss am Pegel Passau-Ingling (grün) aufgetragen. Die Staustufe Passau-Ingling liegt an Inn-km 4,2, der Pegel Passau-Ingling liegt 1,1 km unterhalb der Staustufe an Inn-km 3,1. Der angegebene gemessene Abfluss an der Stauanlage Passau-Ingling wird mittels Wehrkennlinien bestimmt. Der Abfluss am Pegel Passau-Ingling wird anhand des gemessenen Wasserstandes und der Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Pegels berechnet und ist durch den Rückstau der Donau beeinflusst. Zwischen dem gemessenen Abfluss an der Staustufe Passau-Ingling und dem messtechnisch erfassten Abfluss am Pegel Passau-Ingling besteht eine Differenz des zeitlichen Verlaufs des Anstieges. Die Scheitel der beiden Aufzeichnungen weisen den gleichen Maximalwert auf. Im abfallenden Ast haben die Aufzeichnungen einen annähernd gleichen Verlauf bis zu einem Abfluss von $Q = 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$, unterhalb weichen die Ganglinien voneinander ab. Beim Vergleich der simulierten Daten mit den Aufzeichnungen des Pegels Passau-Ingling ist im ansteigenden Ast eine gute Übereinstimmung erkennbar. Der Scheitelwert wird durch die Simulation gut wiedergegeben, im abfallenden Ast ist eine Zeitverzögerung der Simulation zu erkennen. Durch die Unterschiede der aufgezeichneten Daten an Staustufe und Pegel und der guten Übereinstimmung mit den Pegelwerten gibt es zwischen gemessener Abflussganglinie am Kraftwerk und Simulation größere Abweichungen.

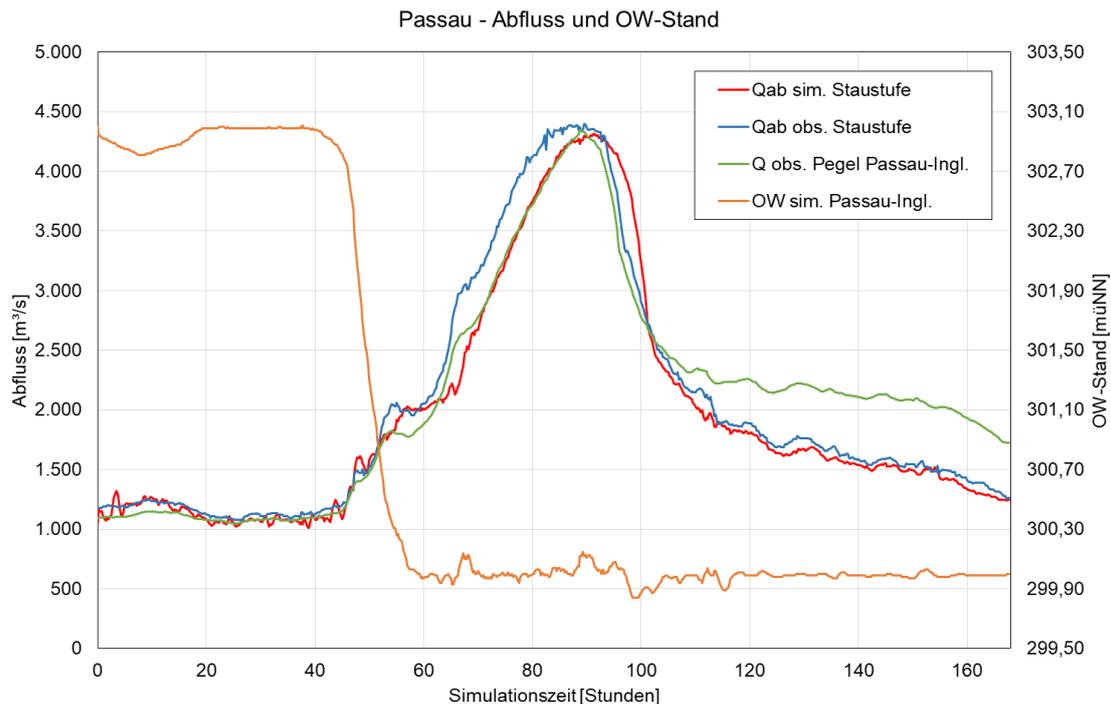


Abbildung 20: Passau-Ingling - Abfluss, OW-Stand und Pegel Passau-Ingling - HW 2005

Zusammenfassend ergibt sich für die Nachrechnung des HW 2005 an den Pegeln des LfU eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten. An den Stauanlagen ist im Bereich des oberen Inns ein zu hoher Abflusswert in der Simulation zu erkennen. Ab der Stauanlage Wasserburg ist im Anstieg der Hochwasserganglinie, vor allem an den Stauanlagen, ein Abweichen zwischen Simulation und Berechnung zu erkennen. Hier flacht der Anstieg der gemessenen Ganglinie ab einem bestimmten Abfluss deutlich ab. Die Differenz zwischen Messung und Simulation kann hierbei durch Ungenauigkeiten in den gemessenen Abflussganglinien seitlicher Zubringer und damit synthetischer Zuflüsse oder durch unterschätzte Retentionseffekte bedingt sein. Die Übereinstimmung ist trotz der beschriebenen Abweichungen gesamthaft als gut und ausreichend genau einzuschätzen.

4.2.3 Simulations- und Messergebnisse des Hochwassers 2013

Zur Nachrechnung des HW 2013 wurde für die Definition des Salzachzuflusses zunächst die gemessene Ganglinie des Pegels Burghausen genutzt, deren Scheitelwert $Q = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Hierbei stellten sich in der Simulation an den Anlagen und Pegeln unterstrom der Salzacheinmündung zu hohe Abflüsse ein. Nach einer Rücksprache mit dem LfU wurde eine simulierte Ganglinie für den Pegel Burghausen zur Verfügung gestellt, die einen geringeren Scheitelabfluss von $Q = 3.600 \text{ m}^3/\text{s}$ aufweist. Für die hier gezeigten Simulationen wurde die simulierte, niedrigere Ganglinie für die Definition des Salzachzuflusses genutzt.

Ein Vergleich des gemessenen und berechneten Abflusses am Pegel Wasserburg (Abbildung 21) zeigt eine gute Übereinstimmung im Verlauf des Hochwassers. Im Scheitel liegt eine Differenz von maximal rund $\Delta Q = 130 \text{ m}^3/\text{s}$ vor, bei der die Simulation gegenüber der Aufzeichnung zu niedrig liegt. Im Anstieg der Ganglinie ist eine leichte zeitliche Verschiebung im Abflussbereich von rund $Q = 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ erkennbar. Die Form der aufgezeichneten Ganglinie wird durch die Simulation gut abgebildet.

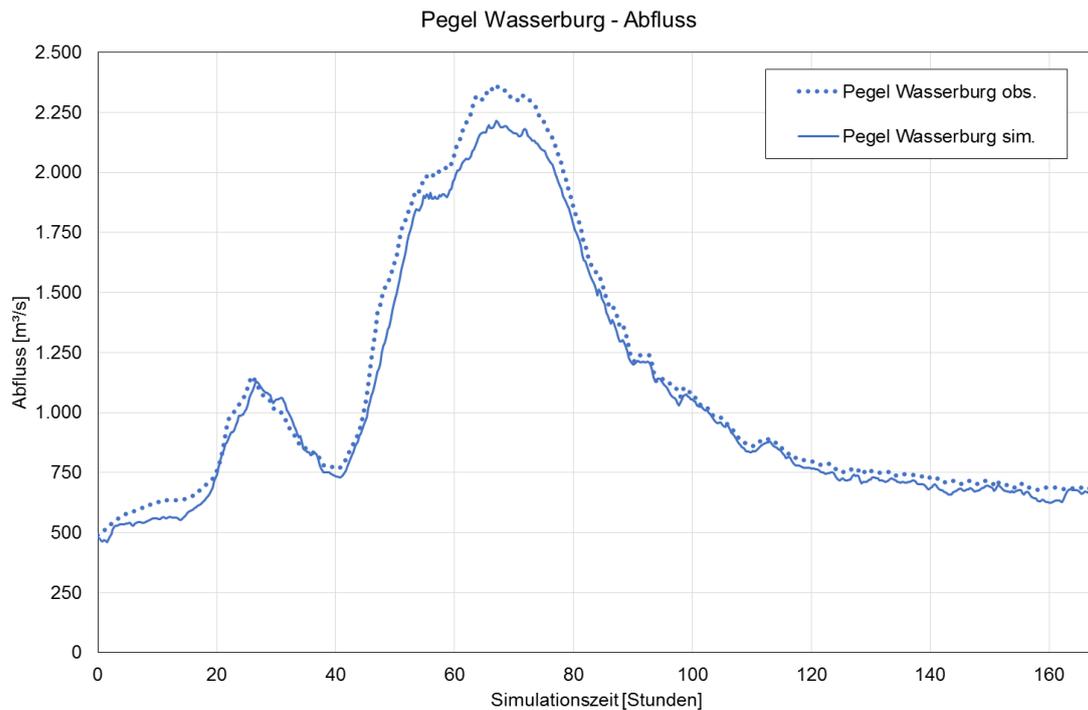


Abbildung 21: Pegel Wasserburg - Abfluss - HW 2013

Am Pegel Kraiburg werden der gemessene Ganglinienscheitel und die Ganglinienform durch die Simulation gut wiedergegeben (Abbildung 22). Im Abflussbereich von $Q = 600$ bis $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$ ist eine geringfügige zeitliche Verschiebung im ansteigenden Ast erkennbar, während die Abflusswerte oberhalb von $Q = 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ gut abgebildet werden.

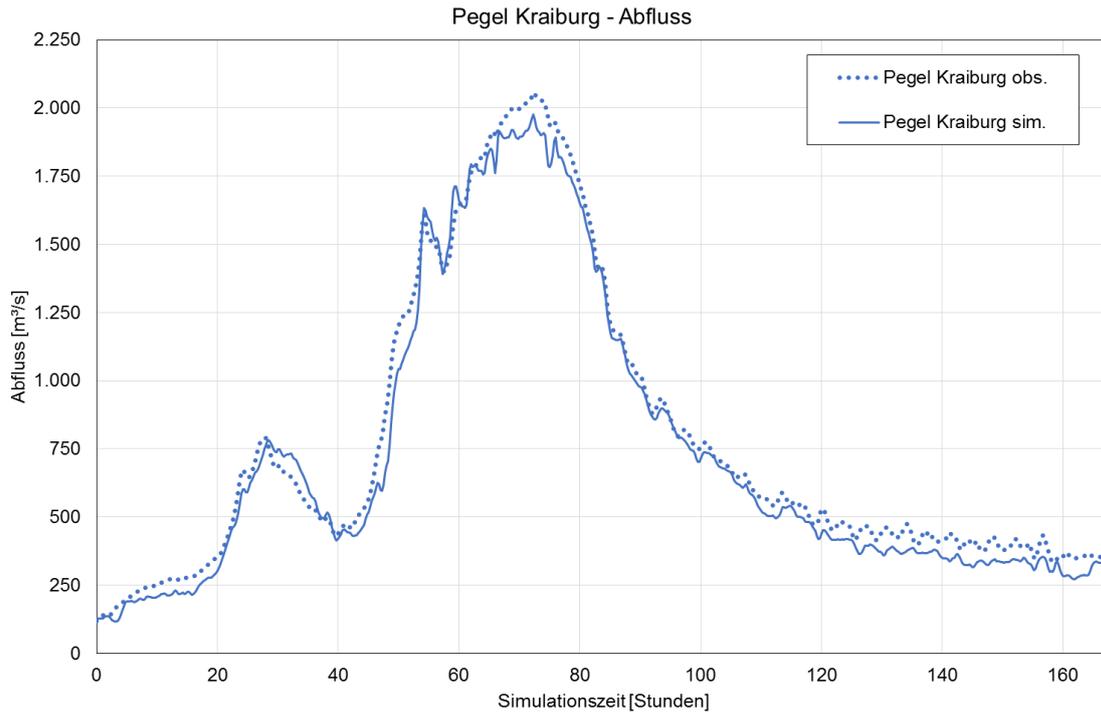


Abbildung 22: Pegel Kraiburg - Abfluss - HW 2013

Der gemessene Wasserstand am Pegel Eschelbach wird für das HW 2013 sehr gut wiedergegeben (Abbildung 23). Insbesondere im Bereich des Scheitels der Ganglinie oberhalb von 362,2 müNN werden Form und Maximum der Aufzeichnungen durch die Simulation gut getroffen. Kurzfristige Wasserstandsschwankungen der aufgezeichneten Ganglinie werden durch die Simulation über den gesamten Wasserstandsbereich gut abgebildet.

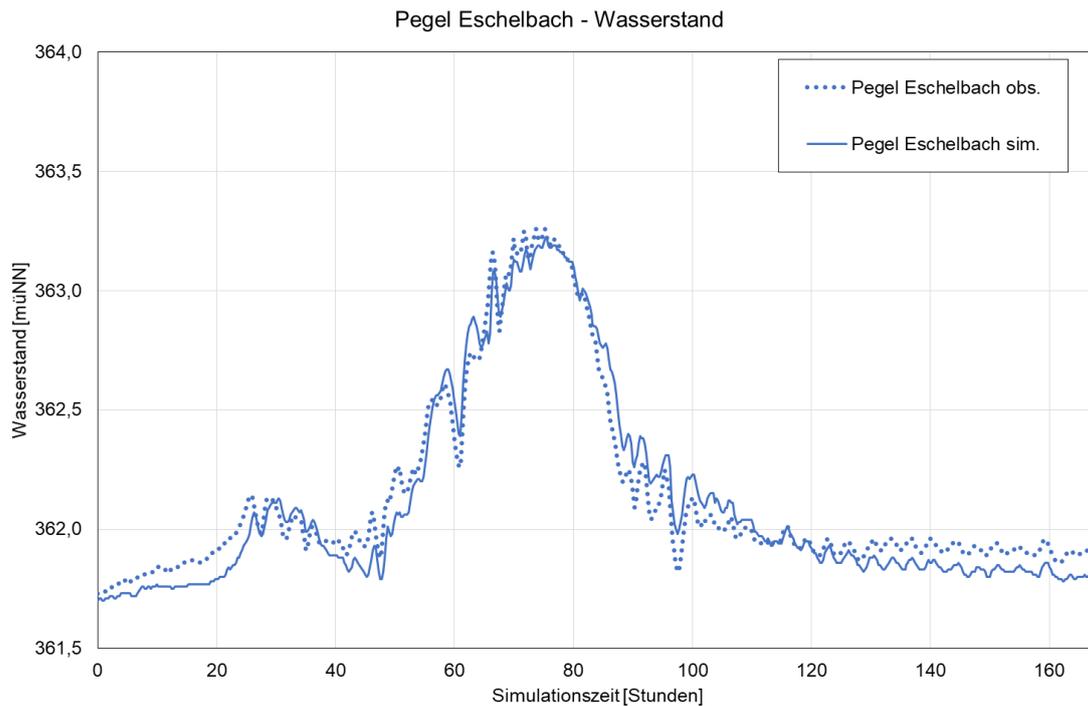


Abbildung 23: Pegel Eschelbach - Wasserstand - HW 2013

An der Stauanlage Gars (Abbildung 24) wird der gemessene (blau) Abfluss durch die Simulation (rot) leicht unterschätzt, es besteht eine Differenz von rund $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Im ansteigenden Ast des Hochwassers ist eine leicht unterschiedliche Ausprägung im Abflussbereich von $Q = 1.000$ bis $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ erkennbar. Die Wiedergabe der gemessenen Werte durch die Simulation ist insbesondere in Bezug auf die Form der Abflussganglinie dennoch zufriedenstellend.

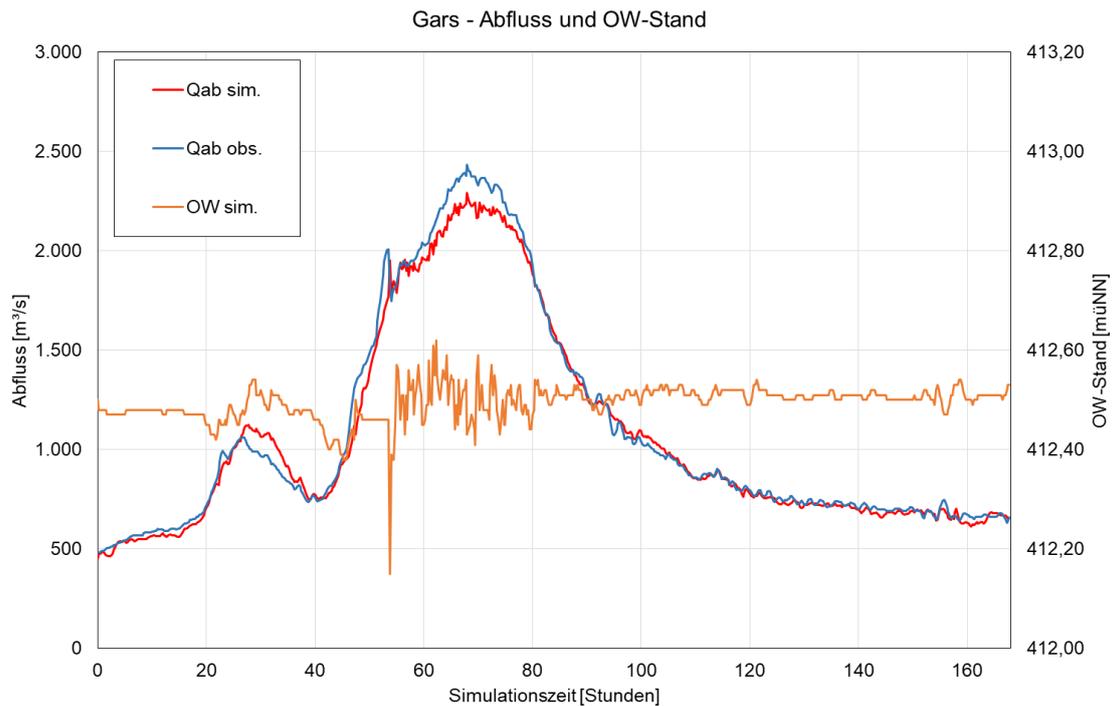


Abbildung 24: Gars - Abfluss und OW-Stand - HW 2013

Zwischen der im Stauraum Gars ermittelten maximalen Wasserspiegellage und den gemessenen Daten ergeben sich nur geringe Differenzen (Abbildung 25). Die berechnete maximale Wasserspiegellage gibt vor allem die Maximalaufzeichnungen der Stauraumpegel sehr gut wieder.

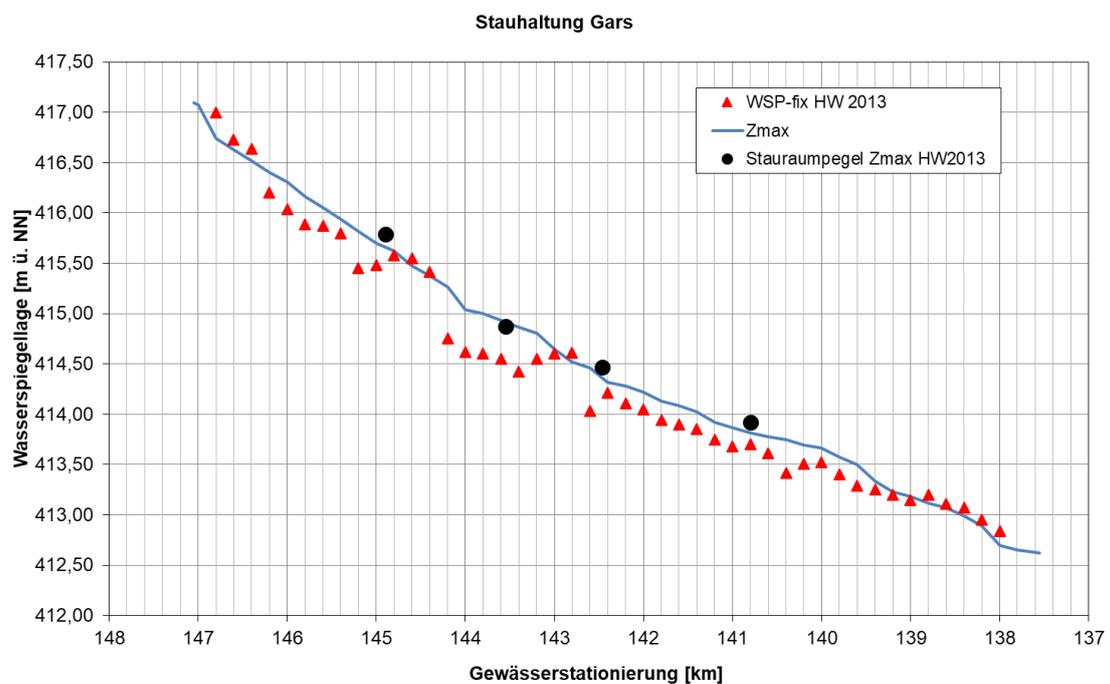


Abbildung 25: Gars - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2013

Die Simulation gibt den ansteigenden Ast der Ganglinie an der Stauanlage Ering-Frauenstein bis zur Simulationsstunde 50 gut wieder (Abbildung 26). Im Abflussbereich von $Q = 2.000$ bis $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ steigt der simulierte Abfluss etwas später an als die gemessene Abflussganglinie. Bei den aufgezeichneten Werten ist oberhalb des Abflusses von etwa $Q = 3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ ein deutliches Abflachen des Anstieges erkennbar. Diese Verringerung des Anstieges ist in den Abflussaufzeichnungen der Kraftwerke ab dem Kraftwerk Braunau-Simbach sowie an den darauffolgenden Kraftwerken zu erkennen. Die Abflussganglinie der Salzach sowie der gemessene Abfluss am Pegel Burghausen haben entscheidenden Einfluss auf die Abflusssituation unterstrom der Einmündung. Die Form der Salzachganglinie wird deutlich durch die Retentionseffekte an der Salzach geprägt. Weist die Messung des Abflusses am Pegel Burghausen Unsicherheiten auf, die diese Retentionseffekte beispielsweise nicht adäquat wiedergeben, werden die Simulationsergebnisse unterstrom der Einmündung entsprechend negativ beeinflusst. Die beschriebene Abweichung von Simulation und Messung im Anstieg des Hochwassers kann somit auf eine mögliche Ungenauigkeit der gemessenen Salzachganglinie zurückzuführen sein.

Der simulierte maximale Abflusswert liegt höher als der gemessene Maximalwert von $Q = 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Vergleich der aufgezeichneten Maximalwerte an dem Oberlieger-Kraftwerk Braunau-Simbach ($Q = 5.900 \text{ m}^3/\text{s}$) und dem unterstrom liegenden Kraftwerk Eggfing-Obernberg ($Q = 6.500 \text{ m}^3/\text{s}$) zeigt einen ähnlichen Wertebereich der Aufzeichnungen wie am KW Ering-Frauenstein. Am Kraftwerk Passau-Ingling ($Q = 6.800 \text{ m}^3/\text{s}$) stimmen Messung und Simulation jedoch gut überein. Ein Grund für die unterschiedlich gute Übereinstimmung könnte in der Unsicherheit der Zuflussdaten, jedoch auch generell in den Unsicherheiten von Messdaten liegen. Der Eintrittszeitpunkt des maximalen Scheitelwertes wird durch die Simulation gut wiedergegeben.

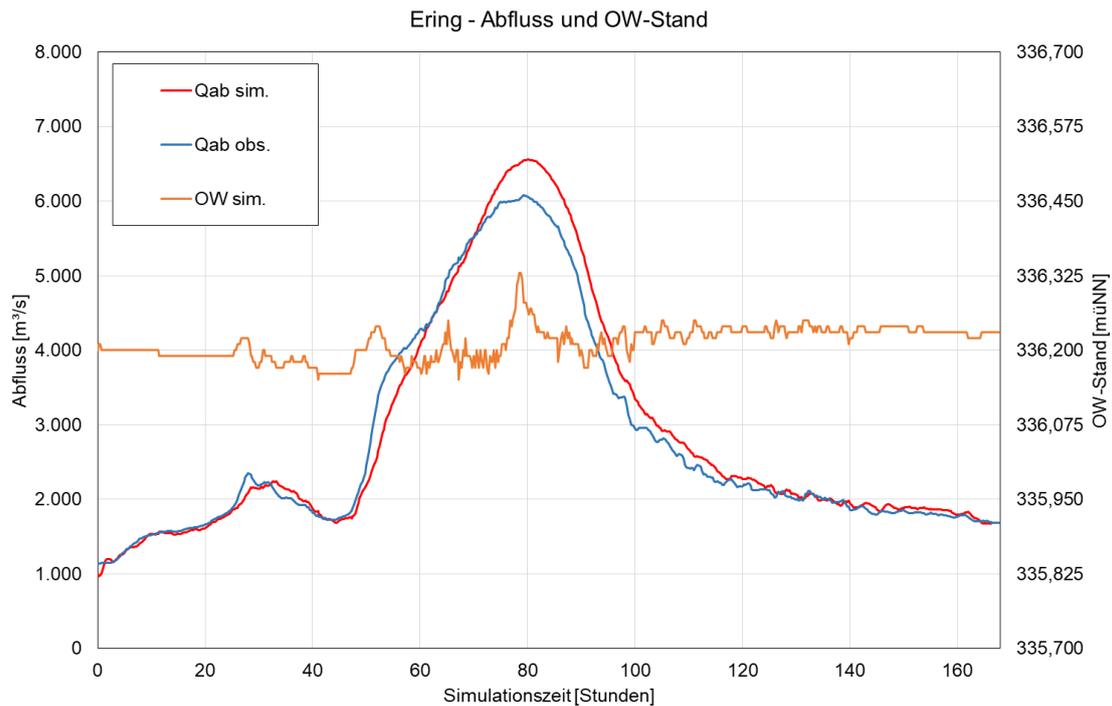


Abbildung 26: Ering - Abfluss und OW-Stand - HW 2013

Im Längsschnitt des Stauraums Ering-Frauenstein ist für das HW 2013 eine bessere Übereinstimmung der simulierten maximalen Wasserspiegellage mit den Fixierungen und Stauraumpegelaufzeichnungen erkennbar als für das HW 2005 (Abbildung 27). Es ist eine zufriedenstellende Abbildung der maximalen aufgezeichneten Wasserspiegel durch die Simulation ersichtlich. Vor allem in der oberen Hälfte des Stauraums werden die gemessenen Daten sehr gut wiedergegeben. Im unteren Drittel liegt die simulierte Wasserspiegellage höher als die Fixierungen. Das genutzte Modell für den Stauraum Ering-Frauenstein ist bei den Simulationen der HW 2005 und 2013 das gleiche Modell. Damit unterstützt diese Auswertung die Annahme, dass die Aufzeichnungsdaten des HW 2005 fehlerhaft beziehungsweise aufgrund ihrer Lage im Vorland nicht für alle Abflusssituationen (insbesondere niedrigere Hochwasser) repräsentativ sind.

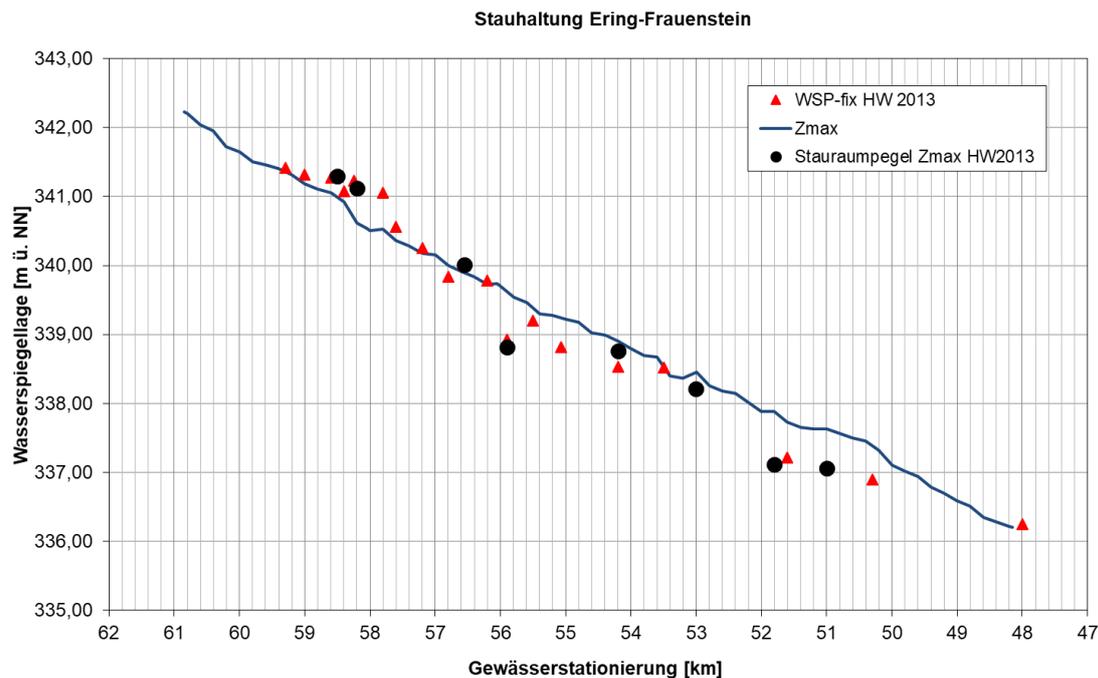


Abbildung 27: Ering - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2013

In der nachfolgenden Abbildung 28 ist der Vergleich des berechneten Abflusses mit den an Kraftwerk und Pegel Passau-Ingling gemessenen Werten aufgetragen. Der Rückstau der Donau führt an der Anlage Passau-Ingling mit einem Ansteigen des Unterwassers zu einem Ansteigen des Oberwasserstandes im Bereich des Scheitels über das abgesenkte Stauziel. Bei einem Vergleich der Aufzeichnungen an Pegel und Kraftwerk fällt der unterschiedlich ausgeprägte ansteigende Ast der Ganglinien auf. Der Scheitelwert der Pegelaufzeichnung liegt etwas höher als der an der Staustufe aufgezeichnete. Im abfallenden Ast ist eine Differenz zwischen Pegel- und Staustufenaufzeichnung erkennbar. Bei dem Vergleich von Simulation und Aufzeichnung am Pegel Passau-Ingling sind leichte Abweichungen im Anstieg des Hochwassers erkennbar. Der Anstieg findet in der Simulation später statt als bei den gemessenen Naturdaten. Dabei ist die zeitliche Differenz bei Anlaufen der Ganglinie und im Scheitelbereich geringer als im Abflussbereich von $Q = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Hier beträgt die maximale zeitliche Verschiebung etwa 5 Stunden. Bei einem Abflusswert von $Q = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ flacht der Anstieg des Hochwassers in der Messung ebenfalls leicht ab. Die aufgezeichnete Ganglinie ist in ihrer Form insgesamt breiter als die simulierte. Der Scheitel wird durch die Simulation gut getroffen. Entsprechend den Differenzen der Aufzeichnungen an Pegel und Staustufe sind die Unterschiede zwischen Simulation und Aufzeichnung an der Staustufe größer.

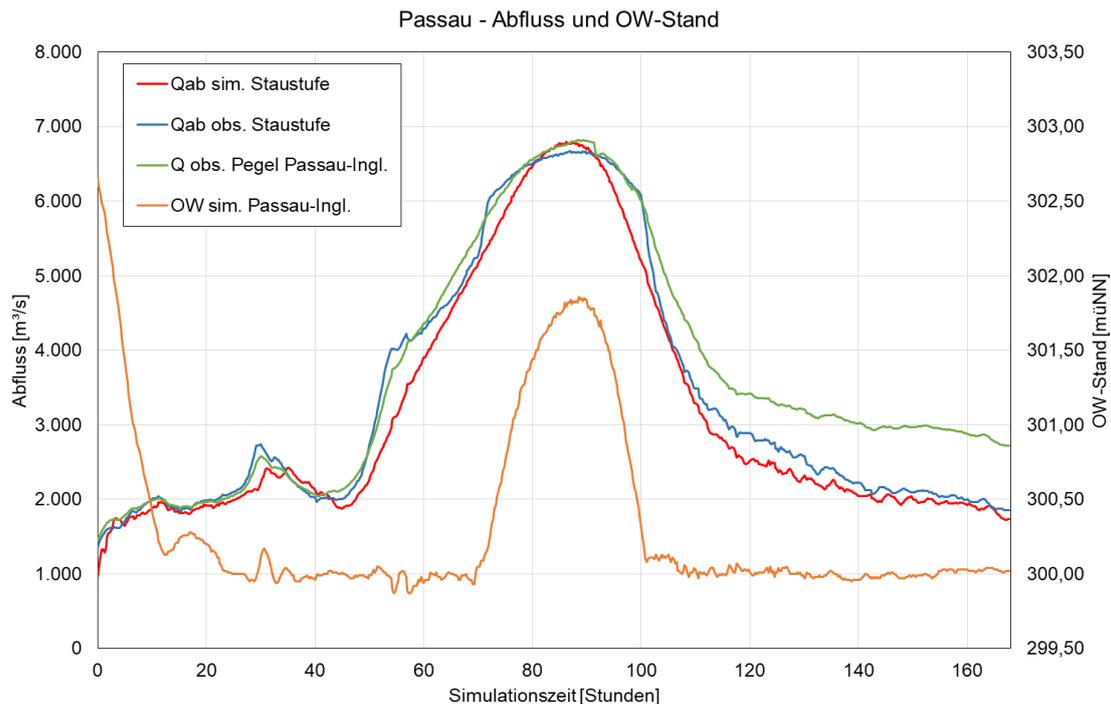


Abbildung 28: Passau-Ingling - Abfluss, OW-Stand und Pegel Passau-Ingling - HW 2013

Bei der Nachrechnung des HW 2013 ergibt sich an den Pegeln des LfU eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung. Die Abflusswerte werden im Verlauf gut getroffen, am oberen Inn sind die simulierten Maximalwerte etwas zu niedrig im Vergleich mit den Messwerten. Die Abflusswerte sind dabei stark von den zur Abbildung der Teil-EZG gewählten Zuflüssen abhängig. Bei dem Vergleich der Werte an den Stauanlagen ergibt sich ein ähnliches Bild. Der Abgleich des gemessenen und simulierten Abflusses zeigt bis zur Stauanlage Teufelsbruck eine sehr gute Übereinstimmung im Ablauf und des Scheitels. Auch beim HW 2013 ist in Richtung unterstrom ein Abflachen des ansteigenden Astes in den Aufzeichnungen erkennbar, der in dieser Form durch die Simulation nicht wiedergegeben wird. Im direkten Einflussbereich der Salzachmündung (Braunau-Simbach, Ering-Frauenstein) sind die simulierten Scheitelwerte tendenziell zu hoch, im weiteren Verlauf stimmen die Maximalwerte jedoch überein.

Für die Ganglinienform und die Höhe des Scheitels am unteren Inn ist die Abflussganglinie der Salzach entscheidend. Dies gilt insbesondere bei Hochwasserereignissen wie dem HW 2013, das ein salzachtbetontes Hochwasser darstellt. An der Einmündung der Salzach ist hierbei der Maximalabfluss der Salzach größer als der des Inns. Bei dem Vergleich von Simulations- und Messwerten unterstrom der Salzacheinmündung muss aus diesem Grund die gemessene Ganglinie der Salzach kritisch als mögliche Ursache für Abweichungen bei der Betrachtung berücksichtigt werden.

4.3 Validierung des Kettenmodells anhand der Nachrechnung des HW 2002

Nach erfolgter instationärer Kalibrierung wurde zur Validierung das HW 2002 nachgerechnet. Hierzu wurde das Modell genutzt, das zur Nachrechnung des HW 2005 eingesetzt wurde, da die Geometrie ebenfalls für das HW 2002 gültig ist. Die Definition der Teil-EZG erfolgt ebenfalls wie im Fall des HW 2005 (vgl. Tabelle 4). Das HW 2002 weist am oberen Inn eine Jährlichkeit von etwa HQ_5 (Pegel Wasserburg) auf, am unteren Inn entspricht das Ereignis einem 20-50-jährlichen Hochwasser (Pegel Passau-Ingling) (GKD 2018).

Als obere Randbedingung geht der am Pegel Oberaudorf aufgezeichnete Abfluss in die Berechnung ein. Ein Abgleich der Daten des Pegels Oberaudorf und der Aufzeichnung am Kraftwerk Nußdorf zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 29).

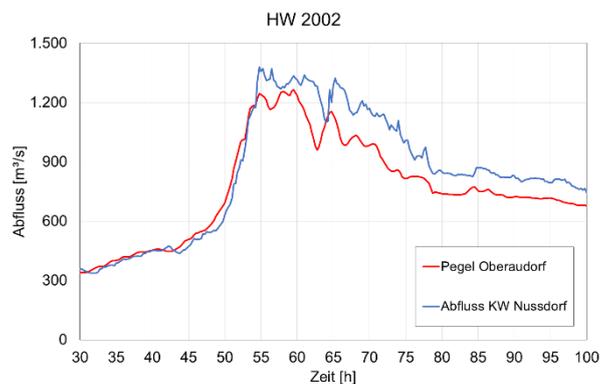


Abbildung 29: Obere Randbedingung Nachrechnung HW 2002

Nachfolgend wird, analog zur Ergebnisdarstellung der HW 2005 und 2013, der Vergleich von Beobachtungsdaten und Simulationsergebnissen an den LfU-Pegeln Wasserburg, Kraiburg und Eschelbach und den Staustufen Gars, Ering-Frauenstein und Passau-Ingling dargestellt.

Der Vergleich des gemessenen und simulierten Abflusses am Pegel Wasserburg (Abbildung 30) zeigt eine gute Übereinstimmung des Anstieges, sowohl im Verlauf als auch im zeitlichen Eintritt des Scheitels. Oberhalb des Abflusswertes von etwa $Q = 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen die simulierten Abflusswerte gegenüber der Aufzeichnung etwas zu niedrig.

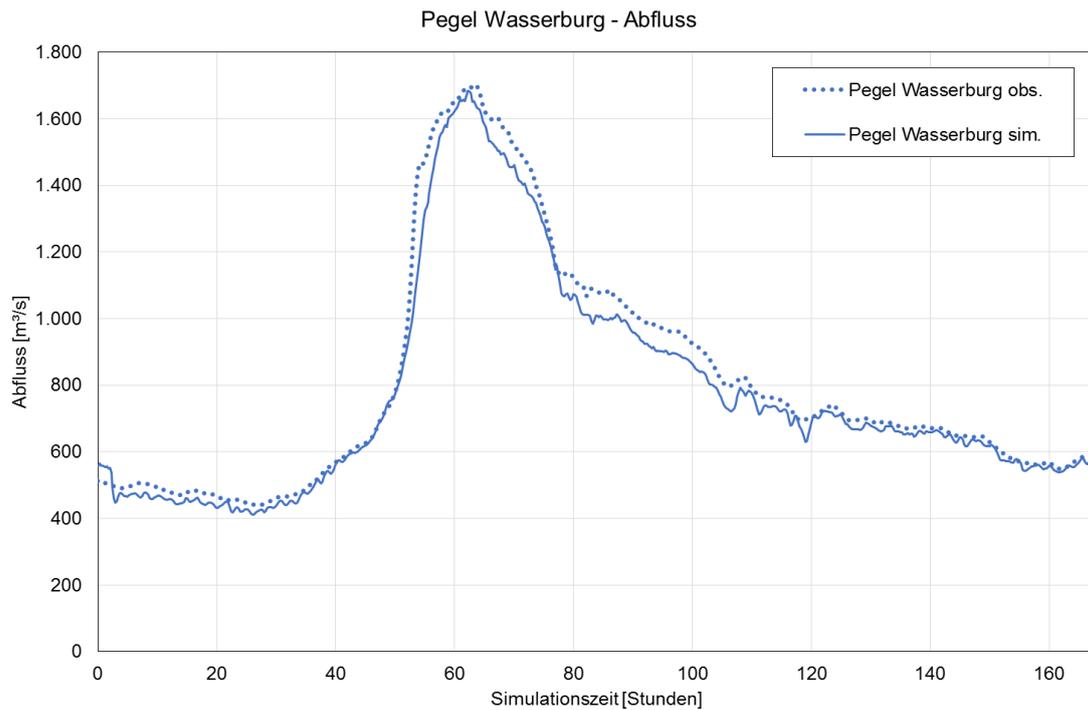


Abbildung 30: Pegel Wasserburg - Abfluss - HW 2002

Bei dem Vergleich am Pegel Kraiburg ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung des Ganglinienanstieges, der -form und des Scheitels von Beobachtung und Simulation erkennbar (Abbildung 31). Auch an diesem Pegel liegen die simulierten Abflusswerte etwas geringer als die Aufzeichnung. Dies betrifft den Abflussbereich oberhalb von etwa $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Form der Ganglinie wird insgesamt gut wiedergegeben.

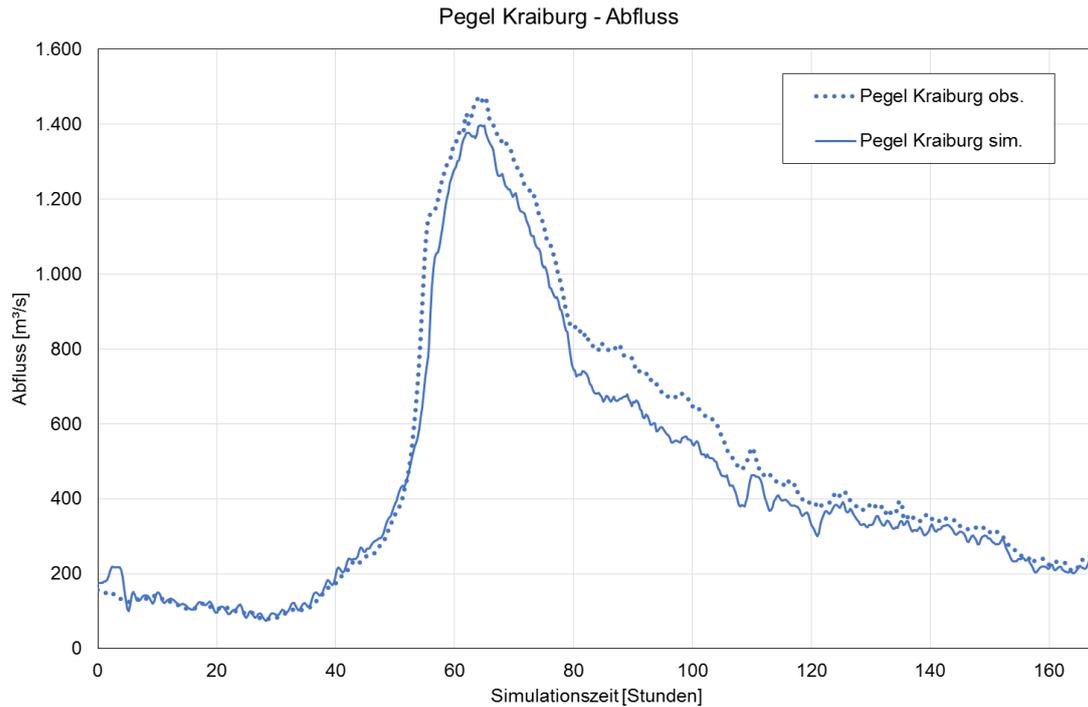


Abbildung 31: Pegel Kraiburg - Abfluss - HW 2002

Der am Pegel Eschelbach simulierte Wasserstand liegt, außer im Bereich des Scheitels, etwas niedriger als der aufgezeichnete (Abbildung 32). Die Abweichungen sind dabei maximal 10 cm groß. Insbesondere der Scheitelbereich und der ansteigende Ast der Ganglinie werden gut wiedergegeben. Im Bereich des Scheitels werden kurzfristige Wasserstandsschwankungen durch die Simulation gut abgebildet.

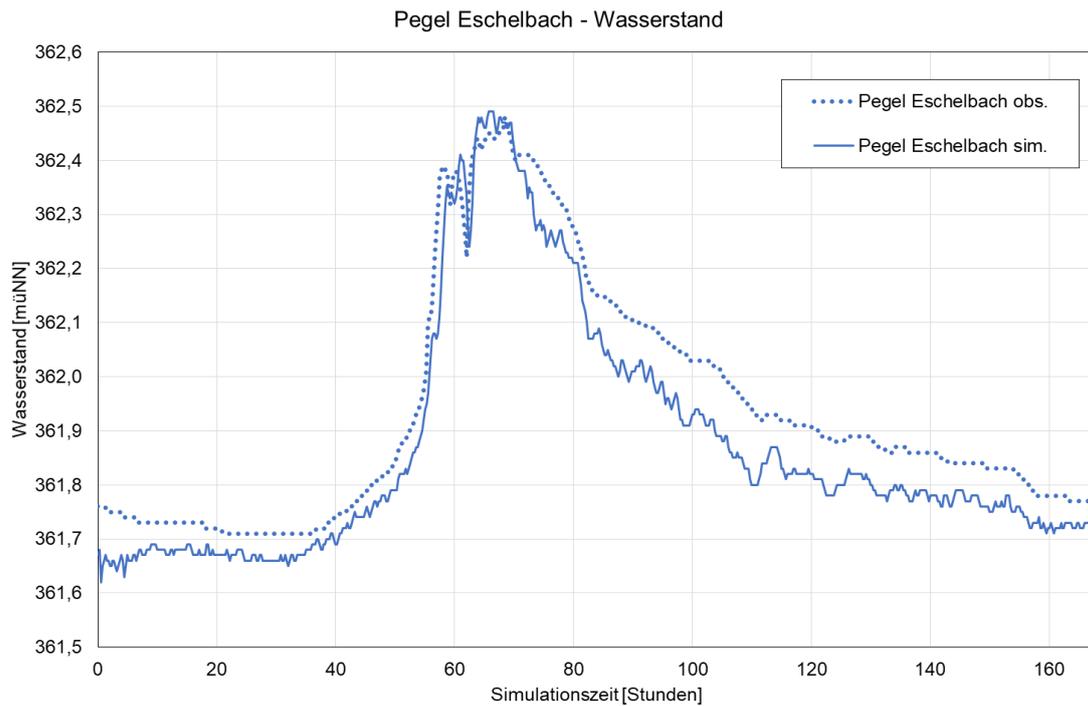


Abbildung 32: Pegel Eschelbach - Wasserstand - HW 2002

Für den Abfluss am Kraftwerk Gars ergibt sich ein mit den Abflussaufzeichnungen der Pegel vergleichbares Bild (Abbildung 33). Im abfallenden Ast ist der simulierte Abfluss etwas kleiner als der beobachtete. Der gemessene Abfluss des ansteigenden Astes und des Scheitels werden durch die Simulation gut wiedergegeben.

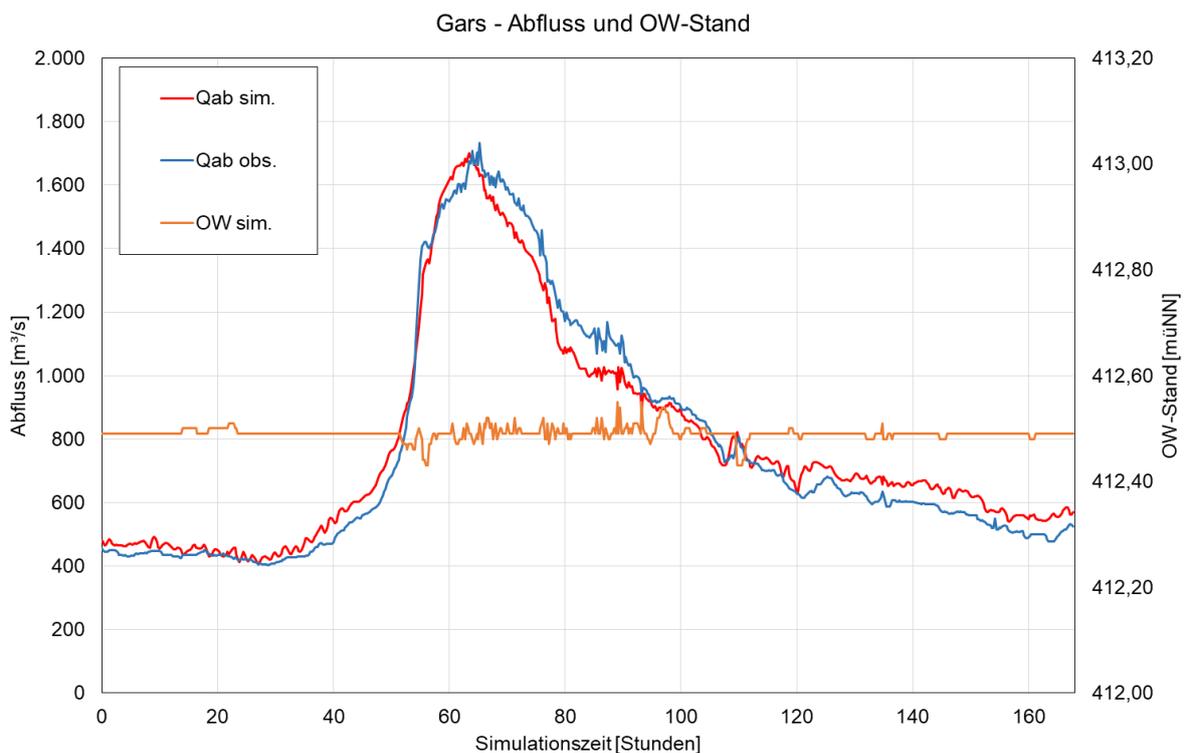


Abbildung 33: Gars - Abfluss und OW-Stand - HW 2002

An der Stauanlage Ering-Frauenstein liegt der simulierte Scheitelwert etwa $\Delta Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ niedriger als der beobachtete (Abbildung 34). Der gemessene maximale Abfluss am Kraftwerk Braunau-Simbach direkt oberstrom beträgt etwa $Q = 4700 \text{ m}^3/\text{s}$, während der gemessene Maximalabfluss am KW Ering-Frauenstein etwa $Q = 5700 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Die beiden in den Stauraum Ering-Frauenstein einmündenden seitlichen Zubringer weisen hingegen vergleichsweise geringe Scheitelabflüsse von maximal $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Damit erscheint die Messung am KW Ering-Frauenstein deutlich zu hoch.

Die einfache Summation der Maximalabflüsse der vier bepegelten seitlichen Zubringer zwischen KW Ering-Frauenstein und KW Passau-Ingling ergibt einen Maximalabfluss von etwa $Q = 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Die unterschiedlichen Auftrittszeitpunkte der Maximalabflüsse werden nicht berücksichtigt, sodass der summierte Gesamtwert in jeden Fall zu hoch liegt. Der Vergleich der gemessenen Abflüsse an den Anlagen Braunau-Simbach ($Q = 4.700 \text{ m}^3/\text{s}$) und Passau-Ingling ($Q = 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$) unter Berücksichtigung der seitlichen Zubringer ist konsistent. Auch der simulierte Abfluss am Kraftwerk Passau-Ingling gibt die Aufzeichnung gut wieder (Abbildung 35). Somit ist festzuhalten, dass die Aufzeichnung am KW Ering-Frauenstein im Abgleich mit den weiteren Aufzeichnungen in diesem Bereich des Inns deutlich zu hoch liegt.

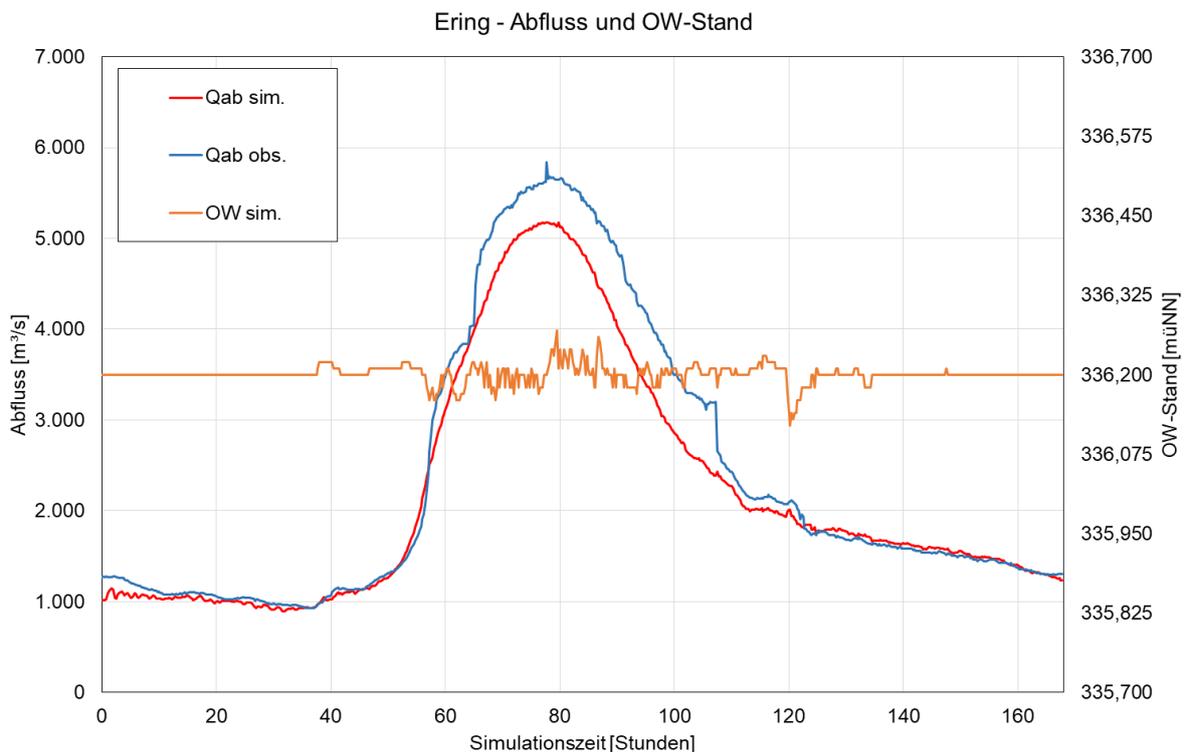


Abbildung 34: Ering - Abfluss und OW-Stand - HW 2002

Die Abbildung 35 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den aufgezeichneten Abflusswerten an der Stauanlage und am Pegel Passau-Ingling. Die aufgezeichneten Werte von Staustufe und Pegel stimmen im Anstieg gut überein. Am Kraftwerk Passau-Ingling liegt

oberhalb von $Q = 4.500 \text{ m}^3/\text{s}$ keine Abflussaufzeichnung und damit vermutlich ein Aufzeichnungsfehler vor. Werden die Pegelaufzeichnungen mit den Simulationsergebnissen verglichen, lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten Ganglinie mit der Aufzeichnung des Pegels erkennen. Im abfallenden Ast gibt die Simulation bis zu einem Abfluss von $Q = 3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ die Aufzeichnung des Pegels Passau-Ingling gut wieder.

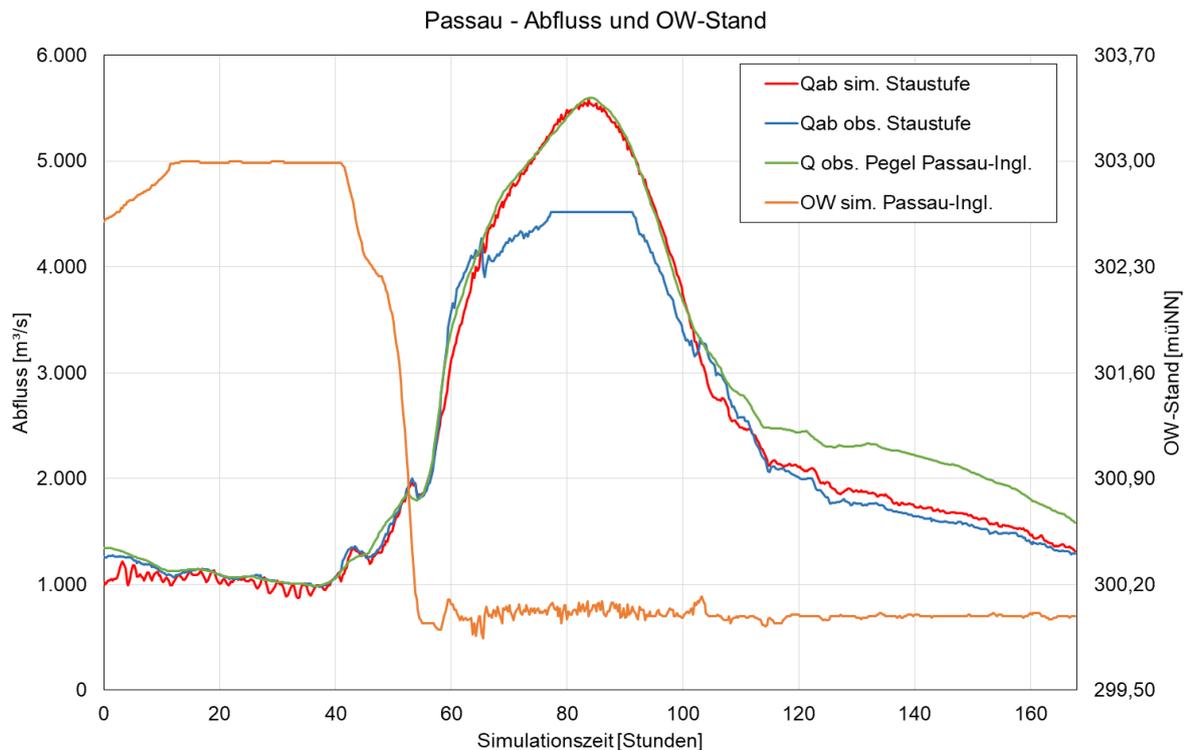


Abbildung 35: Passau-Ingling - Abfluss, OW-Stand und Pegel Passau-Ingling - HW 2002

Für das HW 2002 ist insgesamt eine gute Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung erkennbar. Am oberen Inn liegen die berechneten Abflüsse sowohl an den LfU-Pegeln als auch den Stauanlagen im absteigenden Ast tendenziell unter den beobachteten, während Ganglinienanstieg und -scheitel gut durch die Simulation wiedergegeben werden. Am unteren Inn werden die Abflüsse durch die Simulation eher überschätzt. Ausnahmen sind hier die Stauanlagen Ering-Frauenstein und Eggfing-Obernberg, an denen der berechnete Abfluss niedriger liegt als die Beobachtung. Diese Aufzeichnungen sind jedoch wie zuvor beschrieben im Vergleich mit den weiteren Messungen in diesem Bereich kritisch zu betrachten.

Die Auswertungen der Simulationen der Hochwasserereignisse 2005 und 2013, die zur Kalibrierung genutzt wurden, sowie des HW 2002 zur Validierung zeigen, dass das Systemverhalten insgesamt gut wiedergegeben wird. Es ist zu beachten, dass allgemein Messungenauigkeiten der Abflussaufzeichnungen an seitlichen Zubringern vorliegen sowie für die Abdeckung nicht bepegelter Einzugsgebiete synthetische Zuflüsse hinzugefügt wurden. Bessere Übereinstimmungen wären zu erhalten, wenn die Zuflussganglinien seitlicher

Zubringer nach entsprechender Überprüfung modifiziert würden. Dies ist jedoch bei der Betrachtung der erreichten guten Übereinstimmung nicht zielführend und würde keinen weitergehenden Erkenntnisgewinn erbringen. Der Ablauf der Hochwasser wird mit dem erstellten Kettenmodell über den gesamten Bereich des Inns ausreichend genau wiedergegeben.

4.4 Simulationsergebnisse im Bereich unterstrom des KW Passau-Ingling und an der Donau

Zur vollständigen Implementierung der WBO des KW Passau-Ingling wurde wie in Kapitel 3.4 beschrieben der Inn-Abschnitt unterstrom des KW Passau-Ingling bis zur Einmündung in die Donau sowie der Donau-Abschnitt von KW Kachlet bis zum Kraftwerk Jochenstein (Stauhaltung Jochenstein) in das Modell integriert. Für die Simulation der Donau wurden als obere Randbedingung die aufgezeichneten Pegeldata der Pegel Grafenmühle (Vils), Neustift (Wolfach), Hörmannsberg (Gaissa) und Hofkirchen (Donau) genutzt. Diese wurden mit der jeweiligen Laufzeit, basierend auf einer Abschätzung der Fließgeschwindigkeit von 2 m/s, am KW Kachlet eingefügt. Am KW Jochenstein wurde als untere Randbedingung für die Nachrechnungen der aufgezeichnete Oberwasserstand des HW 2013 verwendet, der aus vorhergehenden Untersuchungen vorlag. Für das HW 2002 wurde am KW Jochenstein die Betriebsvorgabe entsprechend WBO genutzt.

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse des Validierungsereignisses Hochwasser 2002 für die Pegel Passau-Ingling, Passau und Achleiten dargestellt. Die Ganglinie des Abflusses am Pegel Passau-Ingling an Inn-km 3,1 stimmt gut mit den gemessenen Daten überein (vgl. Abbildung 36). Das zeitliche Verhalten sowohl des Anstieges als auch des Scheitels wird sehr gut abgebildet, der Maximalwert des Abflusses in der Simulation ist etwas geringer als die Aufzeichnung. In Abbildung 37 sind der simulierte und aufgezeichnete Verlauf des Wasserstandes am Pegel Passau, Donau-km 2.226,7, abgebildet. Der Wasserstand des Pegels Passau geht in die Betriebsvorschrift der Anlage Passau-Ingling mit ein. Der aufgezeichnete Wasserstand wird gut wiedergegeben und liegt maximal 20 cm niedriger als die Aufzeichnung. Der am Pegel Achleiten, Donau-km 2.223, simulierte Abfluss (vgl. Abbildung 38) liegt im ansteigenden Ast des Hochwassers zeitlich später als die Aufzeichnung bis zu einem Abflussbereich von $Q = 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Oberhalb dieses Abflusswertes gibt die Simulation die Aufzeichnung im Anstieg sehr genau wieder und liegt im Scheitel zeitlich nur geringfügig früher. Es ist insgesamt eine gute Übereinstimmung der Verläufe von Simulation und Messung ersichtlich.

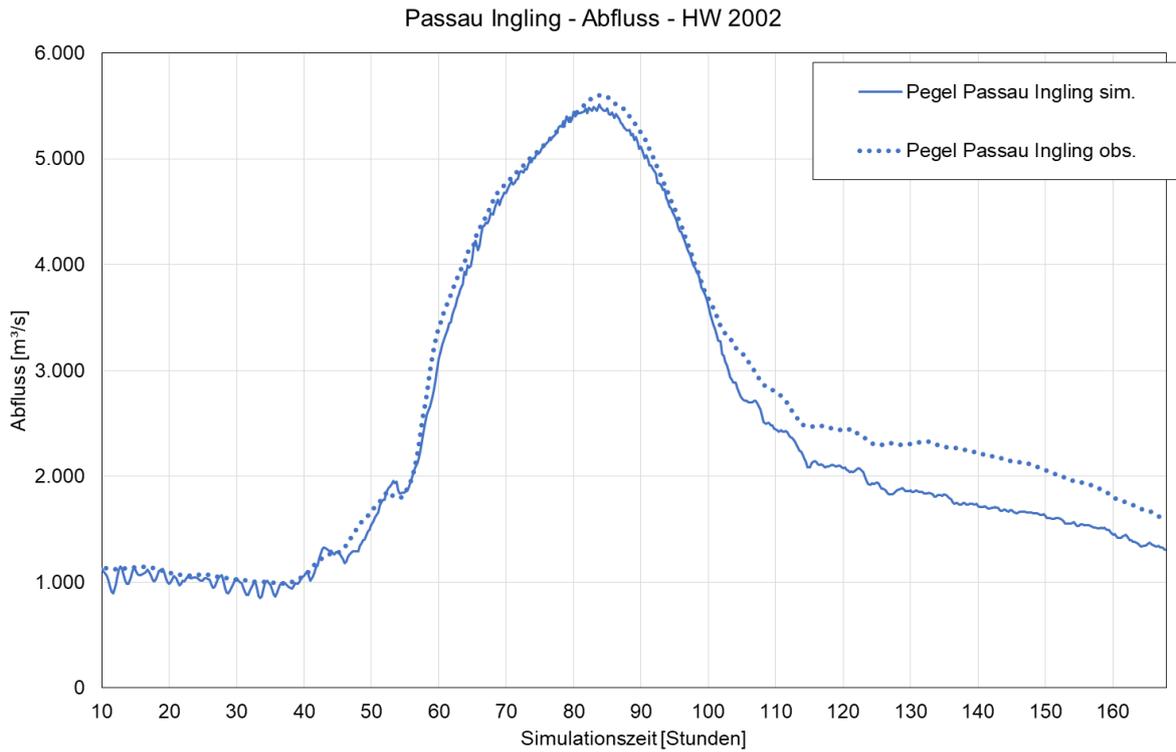


Abbildung 36: Pegel Passau-Ingling - Abfluss - HW 2002

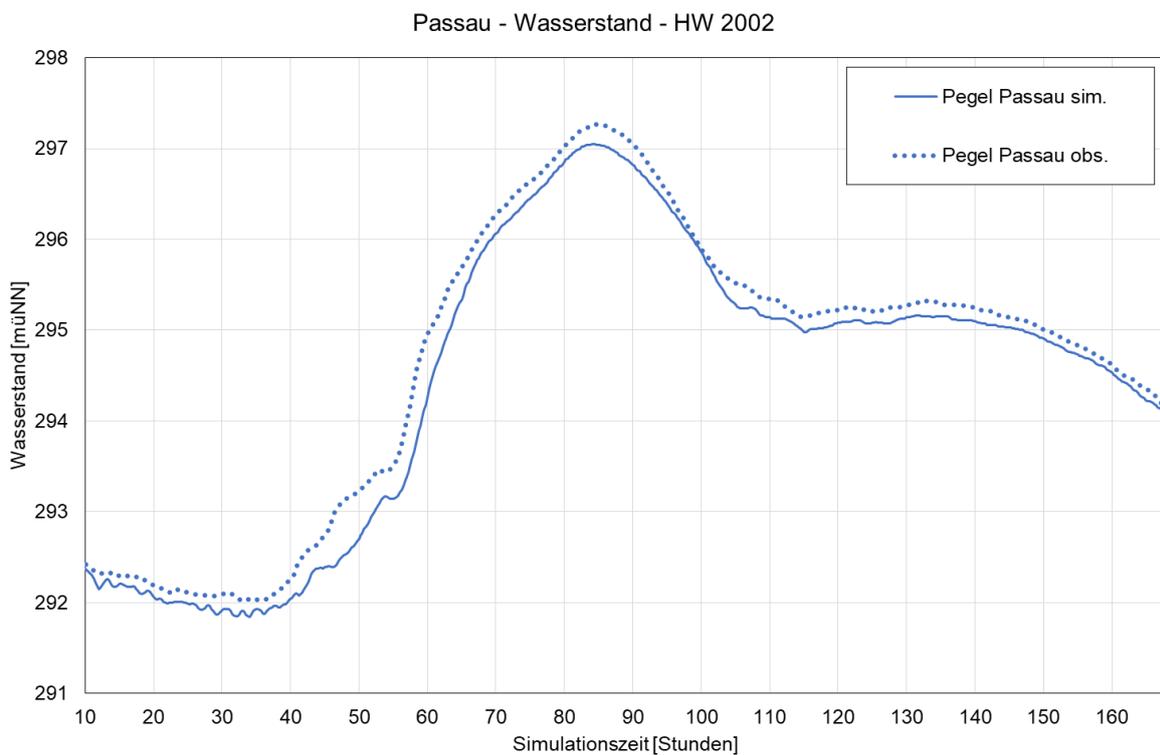


Abbildung 37: Pegel Passau - Wasserstand - HW 2002

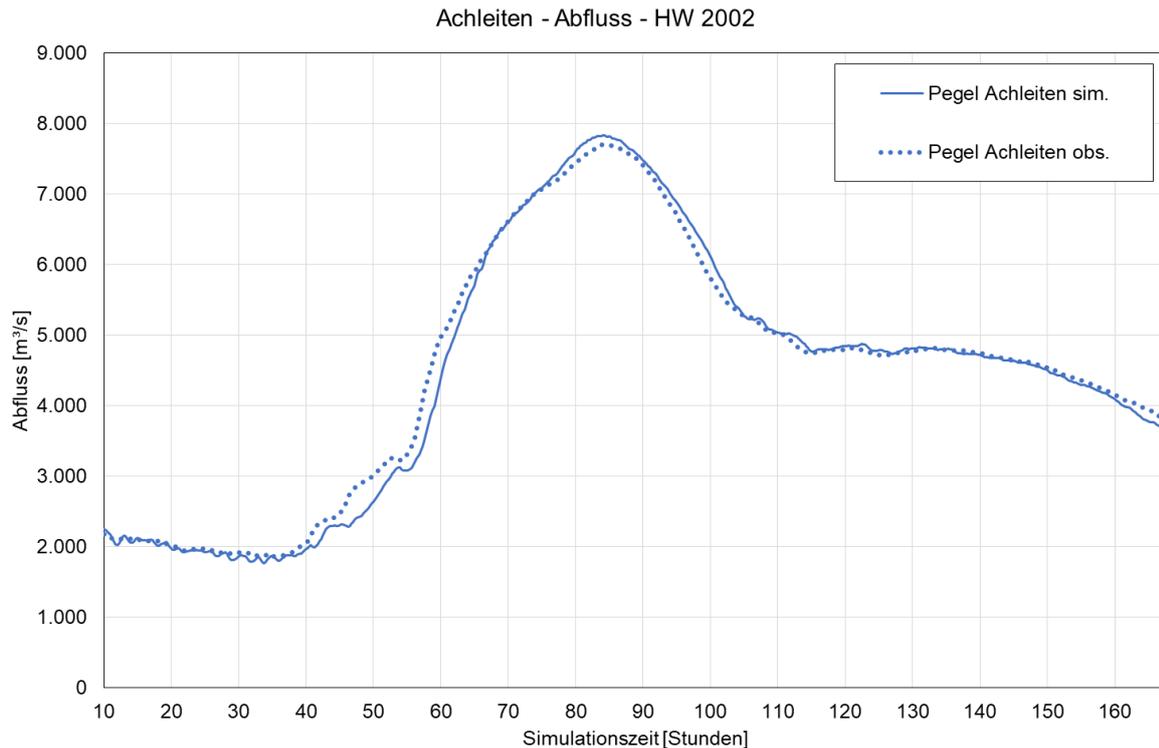


Abbildung 38: Pegel Achleiten - Abfluss - HW 2002

Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen in gleicher Weise die Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen des HW 2013 mit aufgezeichneten Ganglinien. Am Pegel Passau-Ingling (Abbildung 39) lässt sich beim Vergleich der simulierten und observierten Abflussdaten im ansteigenden Ast eine zeitliche Verschiebung erkennen. Der maximale Scheitelwert wird gut wiedergegeben. Der Wasserstand am Pegel Passau (Abbildung 40) liegt in der Simulation maximal 40 cm zu niedrig gegenüber der Aufzeichnung. Die Differenz ist dabei über die Simulationszeit und damit die unterschiedlichen Wasserstandsbereiche gleichmäßig groß. Der Abfluss am Pegel Achleiten (Abbildung 41) wird durch die Simulation sowohl im zeitlichen Verlauf als auch im Bereich des Scheitelmaximums gut wiedergegeben.

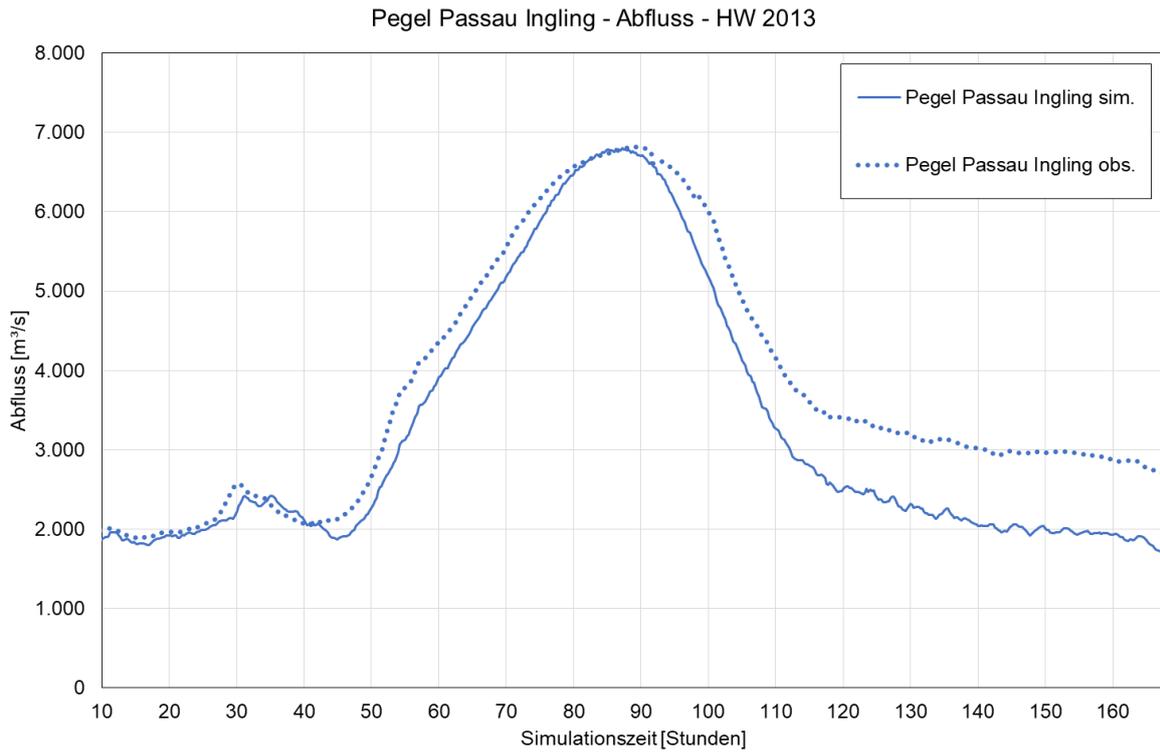


Abbildung 39: Pegel Passau-Ingling - Abfluss - HW 2013

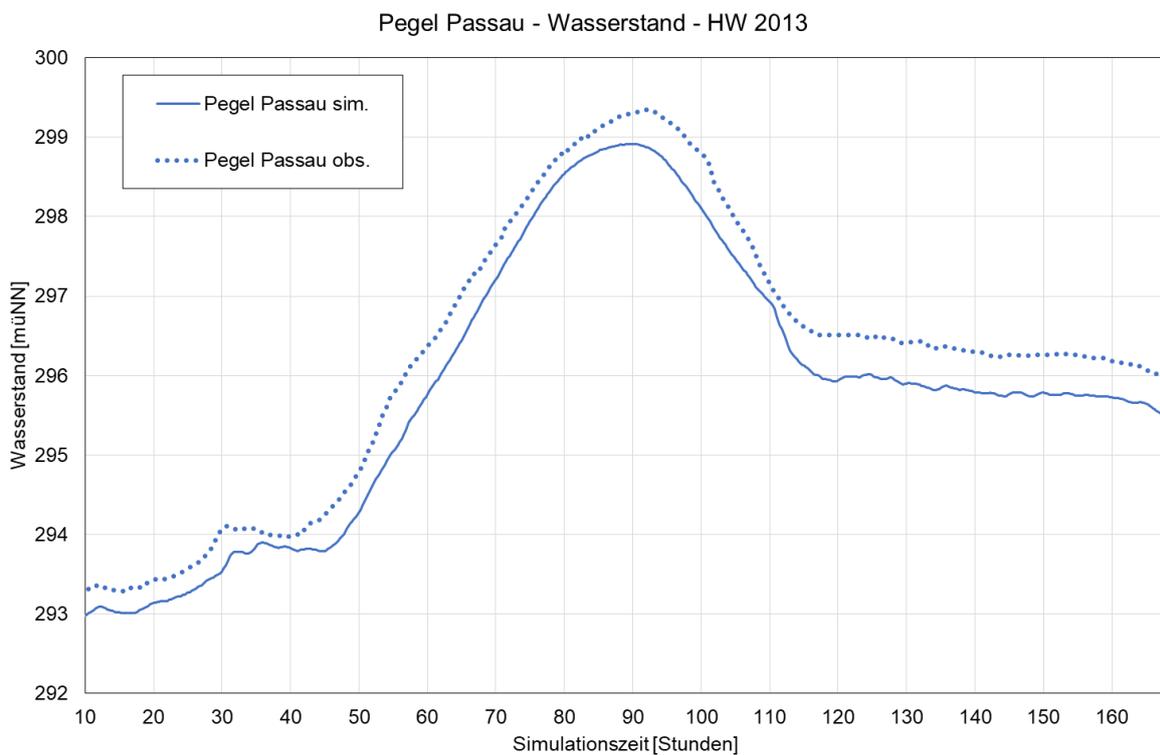


Abbildung 40: Pegel Passau - Wasserstand - HW 2013

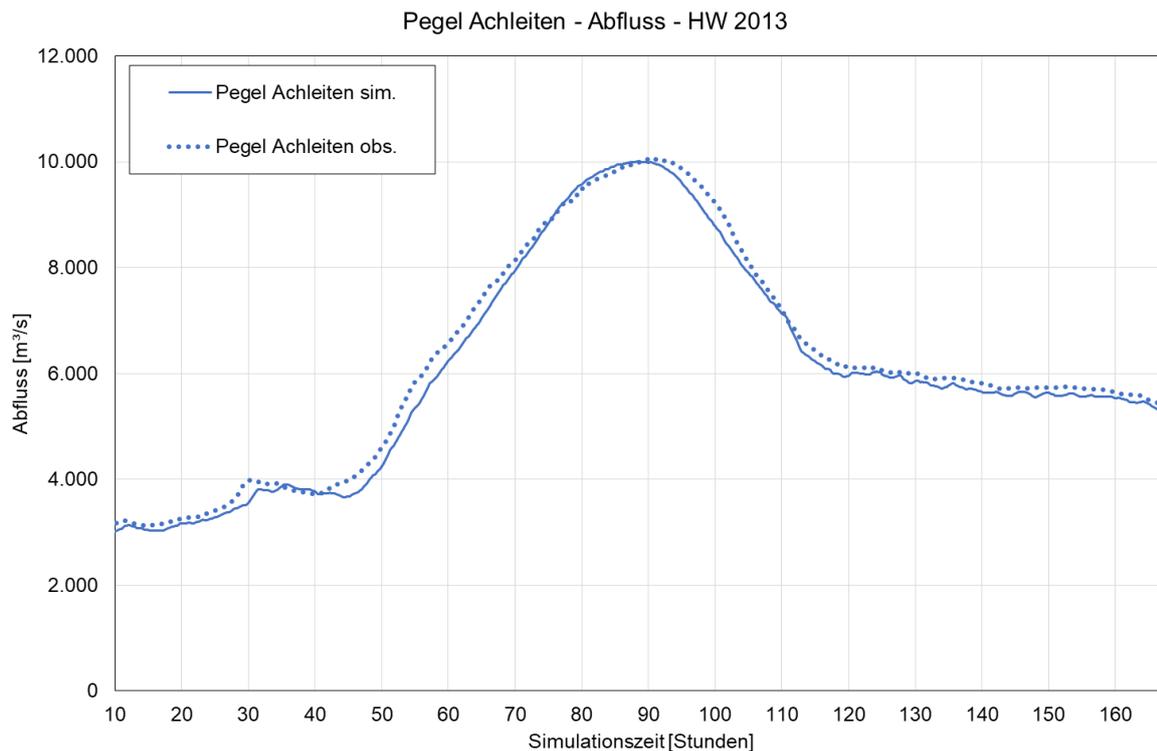


Abbildung 41: Pegel Achleiten - Abfluss - HW 2013

4.5 Vergleich der Nachrechnung mit Simulationen gemäß WBO

Anhand des Vergleichs von Nachrechnungen der Hochwasserereignisse unter Nutzung aufgezeichneter Oberwasserstandsdaten mit Simulationen, die gemäß den Betriebsvorgaben der WBO durchgeführt werden, ist die Bewertung der realen Betriebsweise und damit der Einhaltung der Betriebsvorgaben möglich.

Im Folgenden werden Simulationsergebnisse gezeigt, bei denen sich die internen Randbedingungen in der Simulation unterscheiden. Jeweils rot dargestellt sind die Simulationsergebnisse der Nachrechnungen, bei denen die aufgezeichneten OW-Stände verwendet werden. In Schwarz sind die Ergebnisse der Berechnung gemäß WBO dargestellt. Die Umsetzung erfolgt dabei zentimetergenau, entsprechend der Vorgabe durch die WBO. Diese zentimetergenaue Umsetzung ist in der Realität nicht möglich, da beim Betrieb von Staustufen, insbesondere im Hochwasserfall, der OW-Stand nur in bestimmten temporären Toleranzen (zum Beispiel ± 15 cm) einzuhalten ist.

Dargestellt werden die Ergebnisse an den LfU-Pegeln Wasserburg und Passau-Ingling für das HW 2002 (Abbildung 42 und Abbildung 43), HW 2005 (Abbildung 44 und Abbildung 45) und HW 2013 (Abbildung 46 und Abbildung 47).

Bei dem Vergleich der Nachrechnung der Ereignisse mit den Simulationen gemäß WBO sind nur marginale Unterschiede der Abflussganglinien erkennbar. Die Scheitelwerte sowie der

Verlauf unterscheiden sich an den Pegeln und Staustufen sowohl für das HW 2002, HW 2005 als auch für das Ereignis 2013 kaum voneinander. Die Auswertung der durchgeführten Simulationen zeigt, dass die WBO beim realen Betrieb eingehalten wurde. Die Differenzen zwischen dem simulierten Abfluss bei Nachrechnung der Hochwasser mit aufgezeichneten Oberwasserständen und den Simulationen gemäß WBO sind simulationstechnisch bedingt und sehr gering.

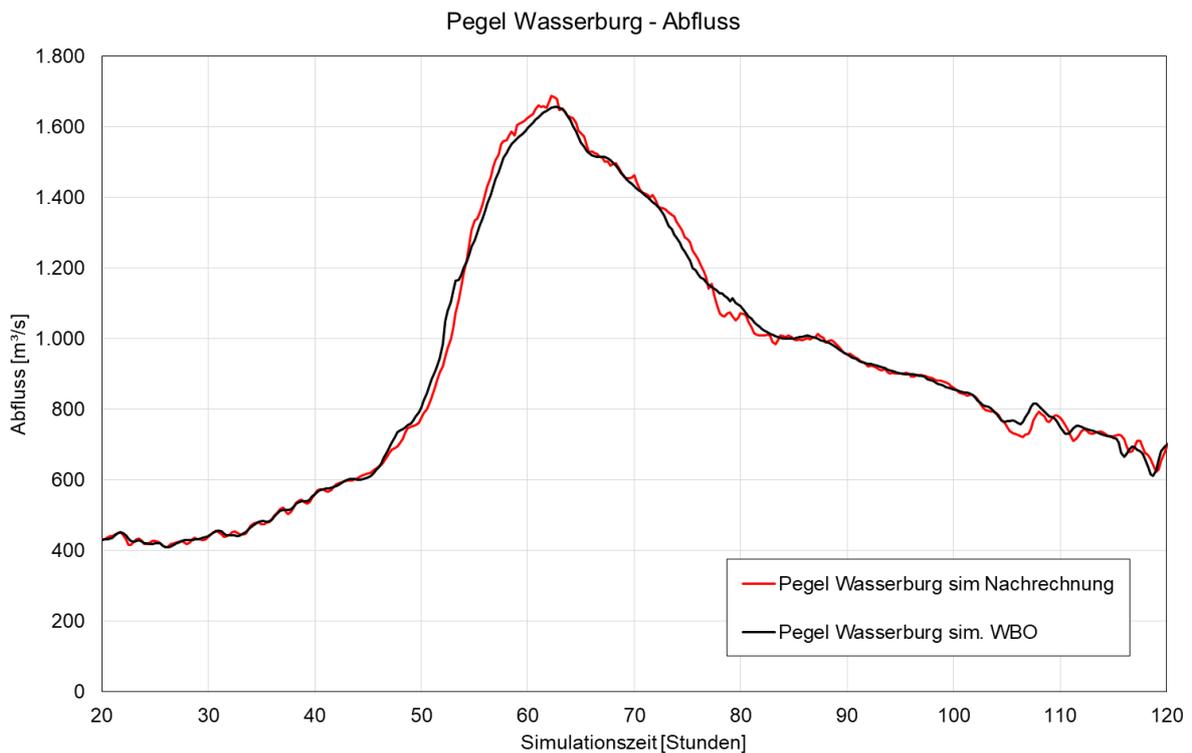


Abbildung 42: Wasserburg, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2002

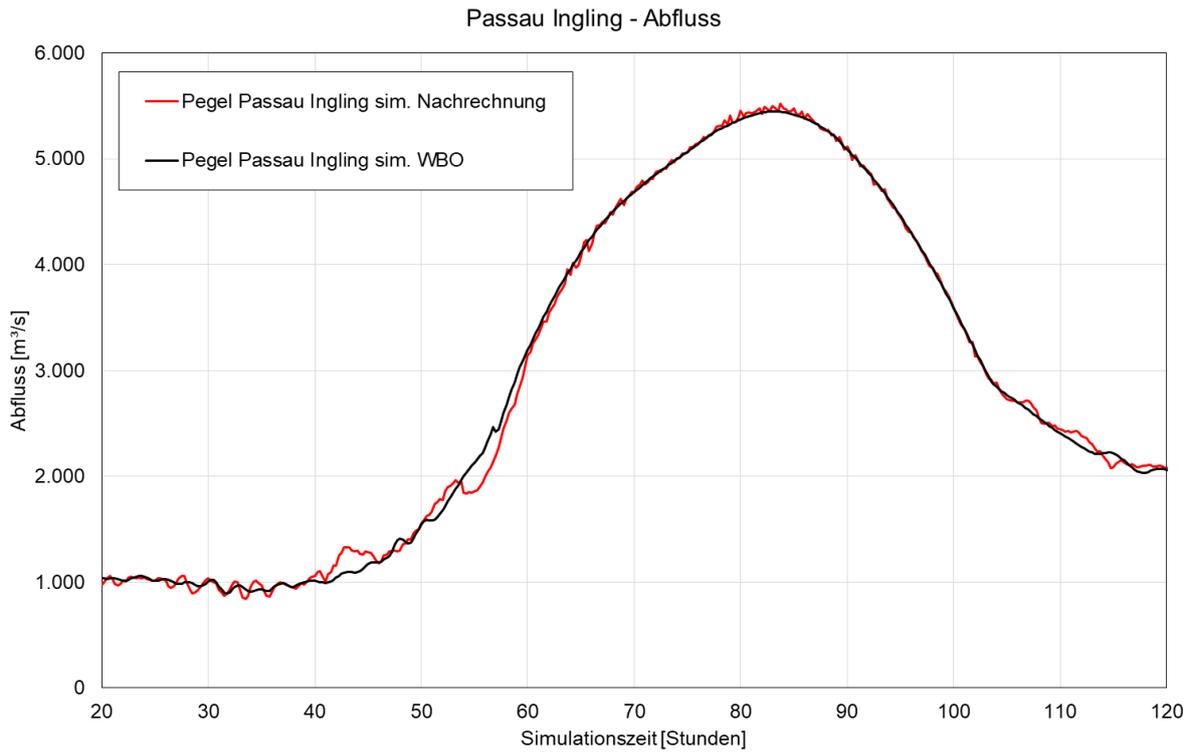


Abbildung 43: Passau-Ingling, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2002

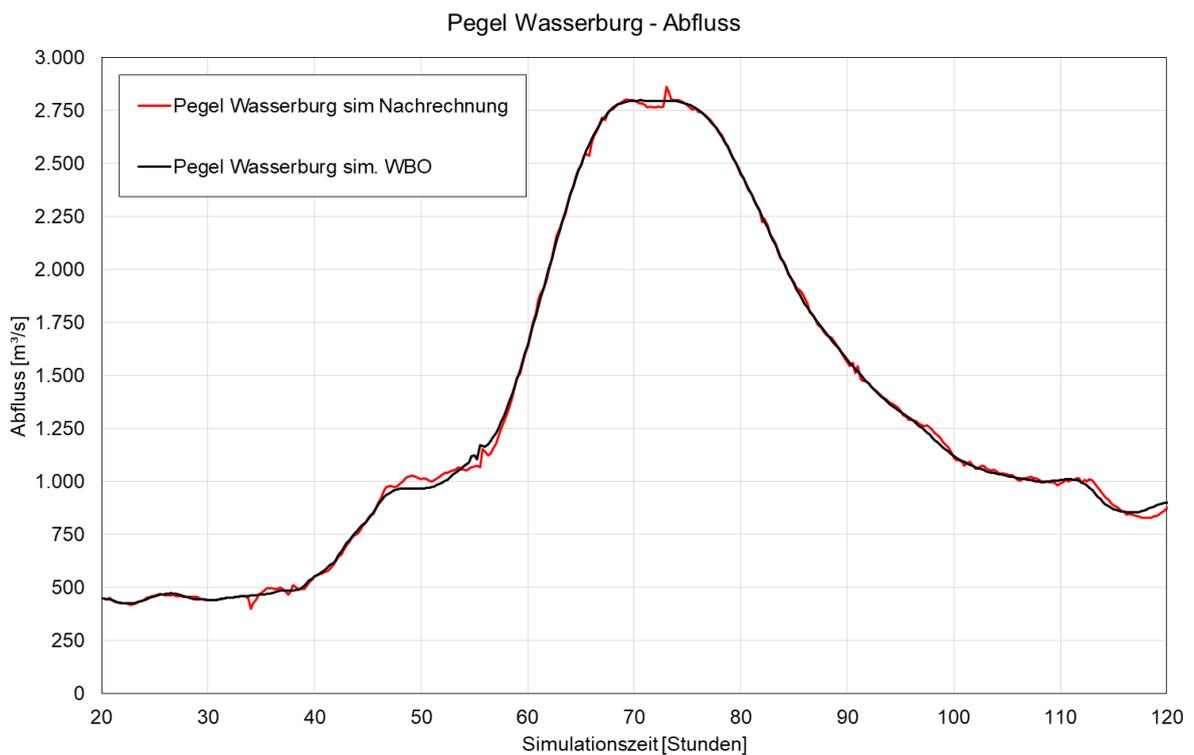


Abbildung 44: Wasserburg, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2005

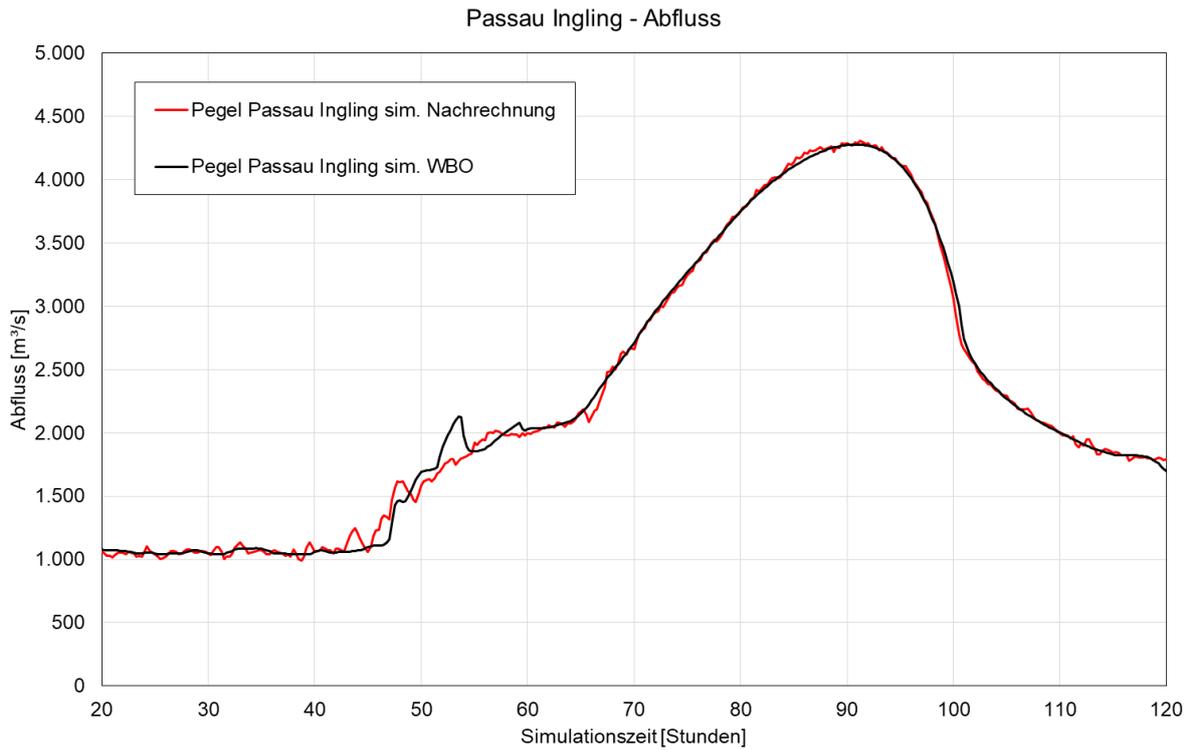


Abbildung 45: Passau-Ingling, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2005

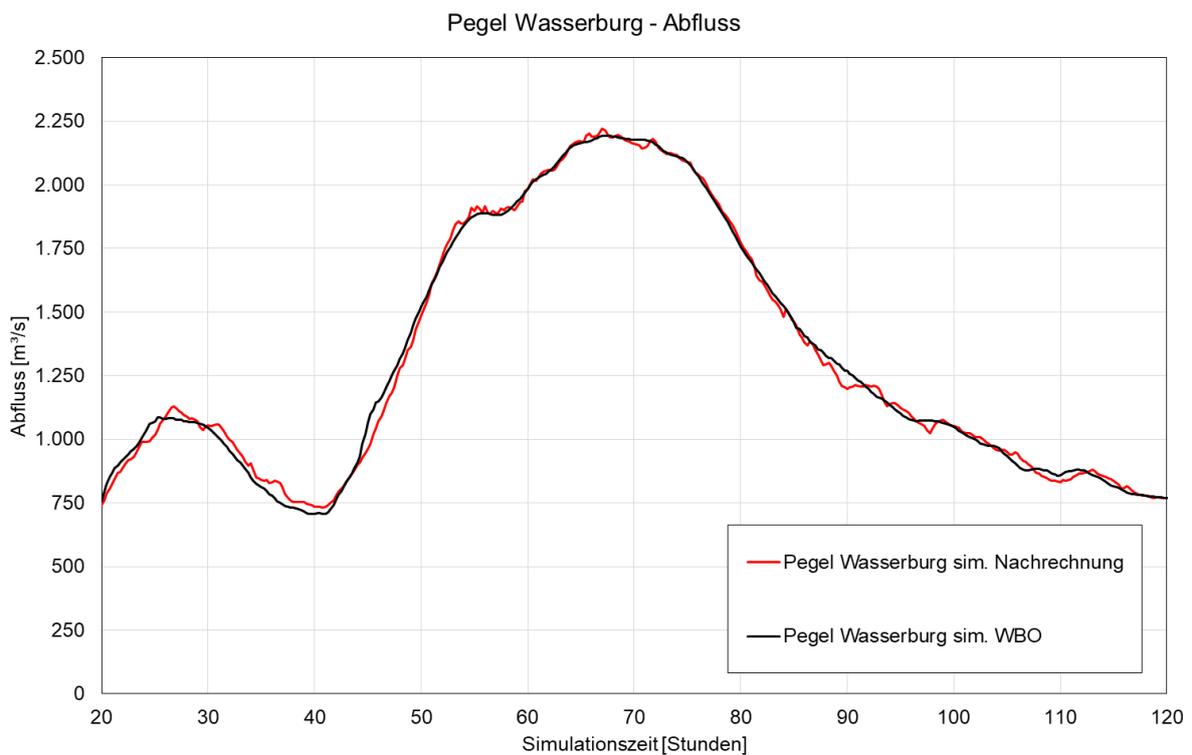


Abbildung 46: Wasserburg, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2013

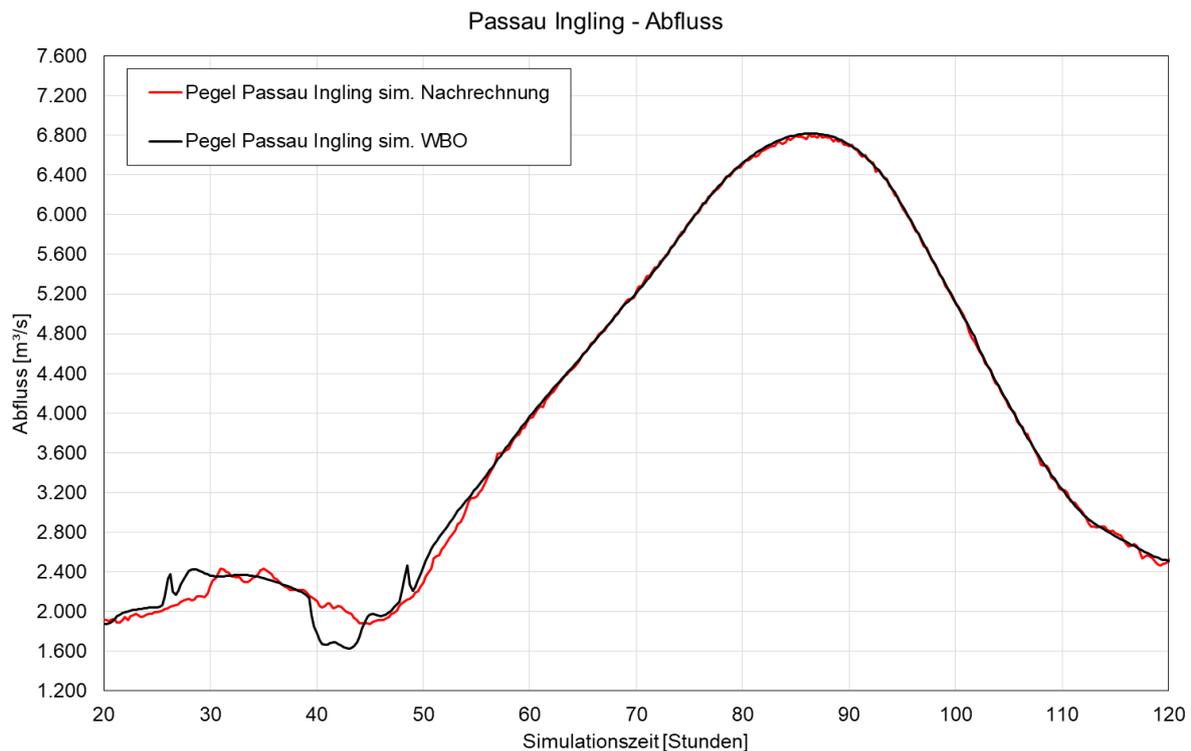


Abbildung 47: Passau-Ingling, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2013

5 Analyse zum Einfluss einer geänderten Sohltopographie auf das Abflussverhalten

5.1 Auswahl hoher und tiefer Sohlagen und Erstellung neuer Modellgeometrien

Durch Hochwasserereignisse und die damit einhergehenden Umlagerungsprozesse sowie bestimmte Betriebsweisen (z. B. Stauraumpülungen) kommt es zu teilweise deutlichen Veränderungen der Sohlhöhen in den Stauräumen. Diese Veränderungen umfassen die Erosion und die Anlandung von Sohlmaterial (Fiedler 2008). Je nach Stauraum stellt sich nach wenigen Jahren wieder ein Gleichgewichtszustand (GG) ein. Die Höhenlage der Sohle und die Geometrie der Querprofile wirken sich auf die Strömungsverhältnisse in den verschiedenen Stauräumen aus. Aus diesem Grund wird untersucht, ob eine geänderte Sohlage den Ablauf eines Hochwassers so stark beeinflusst, dass eine Modifikation der WBO notwendig ist. Um die maximalen Auswirkungen der Sohlvariation zu untersuchen, wurden Kettenmodelle mit entlandetem (tiefem) und angelandetem (hohem) Zustand erstellt und die Simulationsergebnisse mit denen des Gleichgewichtszustands verglichen.

Für die Modellierung stehen Sohlpeilungen verschiedener Jahre zur Verfügung. Diese Peilungen unterscheiden sich, wie Abbildung 48 zeigt, deutlich in der Höhe der mittleren

Sohllagen. Zusätzlich zu den Peilungsdaten der Stauräume wurden von Lahmeyer-HPI, VERBUND und AquaSoli Auswertungen zur mittleren Sohllage der einzelnen Querprofile in den Stauhaltungen zur Verfügung gestellt. Diese Auswertungen liegen teilweise im EXCEL-Format vor, teilweise als Abbildung im PDF-Format (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Auswertung der mittlere Sohlen - Vorliegende Daten

Nr	Stauhaltung	Lahmeyer-HPI	VERBUND	AquaSoli	VERBUND - Flächenberechnung
1	Nußdorf	Excel	Excel	---	---
2	Rosenheim	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
3	Feldkirchen	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
4	Wasserburg	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
5	Teufelsbruck	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
6	Gars	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
7	Jettenbach	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
8	Neuötting	Excel	Längsschnitt, PDF	---	---
9	Perach	---	Längsschnitt, PDF	Längsschnitt, PDF	---
10	Stammham	---	Längsschnitt, PDF	Längsschnitt, PDF	---
11	Braunau-Simbach	---	Excel	---	Excel
12	Ering-Frauenstein	---	Excel	Längsschnitt, PDF	---
13	Eggfing-Obernberg	---	Excel	Längsschnitt, PDF	Excel
14	Schärding-Neuhaus	---	Excel	---	Excel
15	Passau-Ingling	---	Excel	---	Excel

Mit den im EXCEL-Format vorliegenden Daten war es möglich, eine hohe und tiefe Sohllage für die Stauhaltungen zu bestimmen. Es liegen hierbei nicht bei allen Stauhaltungen Auswertungen zu den gesamten Peilungsjahren vor, aus den Querprofilinformationen ab 2009 mussten ergänzend mittlere Sohllagen berechnet werden. Für die im PDF-Format vorliegenden Längsschnitte der mittleren Sohllage ist keine quantitative Auswertung möglich. Qualitativ ist über den visuellen Vergleich keine eindeutige Festlegung auf eine hohe und eine tiefe Sohllage möglich, da die einzelnen Linien nur schwer zu unterscheiden sind (vgl. Abbildung 48, beispielhafte Darstellung der Problematik für die Stauhaltung Perach). Im Stauraum Perach stellt die Sohlpeilung von 2001 den Gleichgewichtszustand dar. Im Nahbereich der Staustufe bis ungefähr Inn-km 86 ist ein markanter Höhenunterschied der mittleren Sohlen erkennbar. Die Sohllage von 1924, 53 Jahre vor Inbetriebnahme der Staustufe aufgenommen, weicht deutlich über die gesamte Stauhaltungslänge von den anderen Sohllagen ab.

Mittlere Sohlen Staugebiet Perach

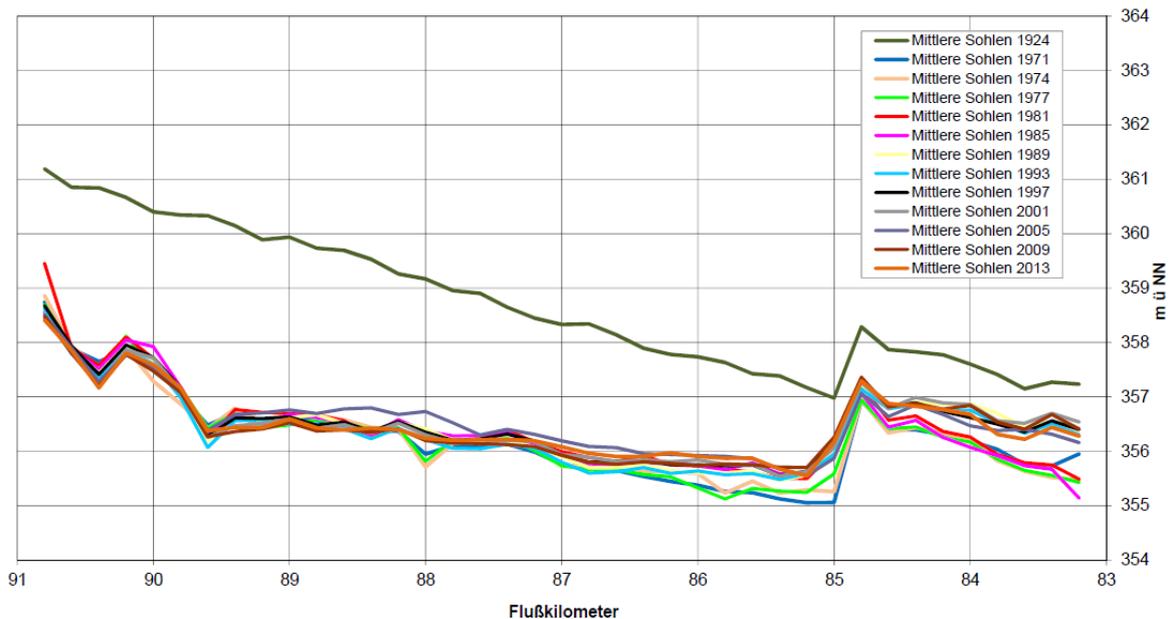


Abbildung 48: Mittlere Sohlen Stauraum Perach (Quelle: VERBUND)

Für die Stauräume Perach und Stammham liegen ausschließlich Auswertungen zur mittleren Sohlage der einzelnen Peilungsjahre als Abbildung im PDF-Format vor. Aus diesen Darstellungen ist die exakte Höhe der Sohle an jedem einzelnen Querprofil nicht ersichtlich, wie oben beschrieben. Weiterhin umfassen die Auswertungen (Excel-Dateien anderer Stauhaltungen) zum Teil nicht alle vorliegenden Peilungen. Insbesondere die Peilungen ab 2009 waren hier nicht enthalten. Da die Sohlhöhe der mittleren Sohlage für die Ermittlung einer hohen und tiefen Sohlage benötigt wird, wird ein Verfahren angewendet, um aus den gegebenen Querprofilgeometrien eines Peilungsjahres eine mittlere Sohlhöhe als Referenzwert zum Gleichgewichtszustand zu berechnen.

Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt an einem beispielhaften Querprofil, wie stark die Geometrien unterschiedlicher Peilungsjahre voneinander abweichen können. In Schwarz ist die Sohlpeilung des Gleichgewichtszustandes (GG) aufgetragen. Die gestrichelten Linien geben jeweils die Höhe der mittleren Sohle des entsprechend Querprofils an. Innerhalb des betrachteten Querprofils ist die hohe Sohlage (rot) nicht in allen Bereichen die höchstgelegene oder die tiefe Sohlage (grün) die tiefste. Die mittlere Sohle der tiefen Sohle liegt hier 41 cm unterhalb der mittleren Sohle des GG-Zustandes, die der hohen Sohle 52 cm höher.

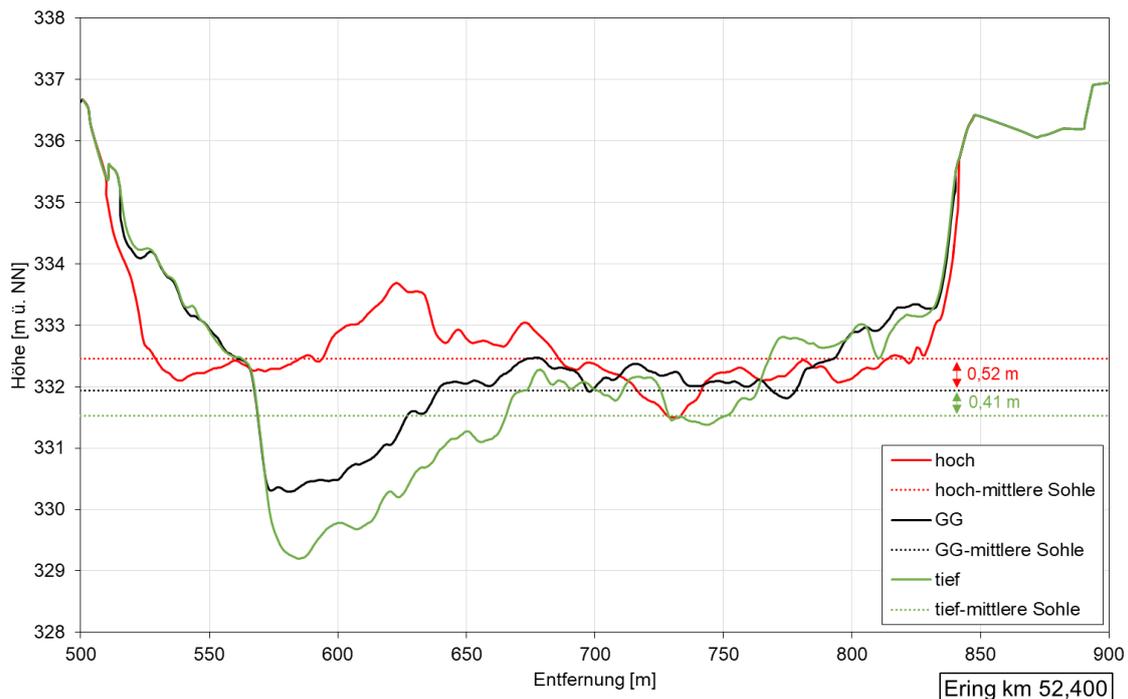


Abbildung 49: Verschiedene Peilungen eines Querprofils

5.1.1 Ermittlung der mittleren Sohlhöhe aus Querprofilaten

Lagen für Stauhaltungen keine oder unvollständige Daten zu den mittleren Sohlen vor, wurden diese aus den gegebenen Querprofilgeometrien bestimmt. Zur Berechnung der mittleren Sohle wurde eine fachgebietsinterne Software verwendet. Für die Stauhaltungen im Untersuchungsgebiet wurden die Querprofilgeometrien der einzelnen Peilungsjahre ausgewertet. Somit wurden für die Bestimmung der mittleren Sohlagen insgesamt 2.606 Querprofilgeometrien betrachtet.

In Abbildung 50 ist die Bestimmung der mittleren Sohle graphisch anhand des Querprofils an Inn-km 84,8 im Stauraum Perach dargestellt. Im Bereich der Uferfußpunkte wird der auszuwertende Querprofilabschnitt seitlich (links und rechts) begrenzt. Es erfolgt die Bestimmung der Fläche A, die von den seitlichen Begrenzungen, der Sohle und einer fest definierten Bezugshöhe des Wasserstandes umschlossen wird. Die mittlere Wassertiefe bei Bezugshöhe wird durch Division der Fläche A und der Breite B zwischen den seitlichen Begrenzungen bestimmt. Durch Subtraktion der mittleren Wassertiefe von der Bezugshöhe errechnet sich die mittlere Sohle für das dargestellte Querprofil. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der mittleren Sohle wird damit analog zu dem im 1. Zwischenbericht von AquaSoli zur Wasserspiegellagenberechnung im Stauraum Perach beschriebenen Verfahren durchgeführt (AquaSoli 2009).

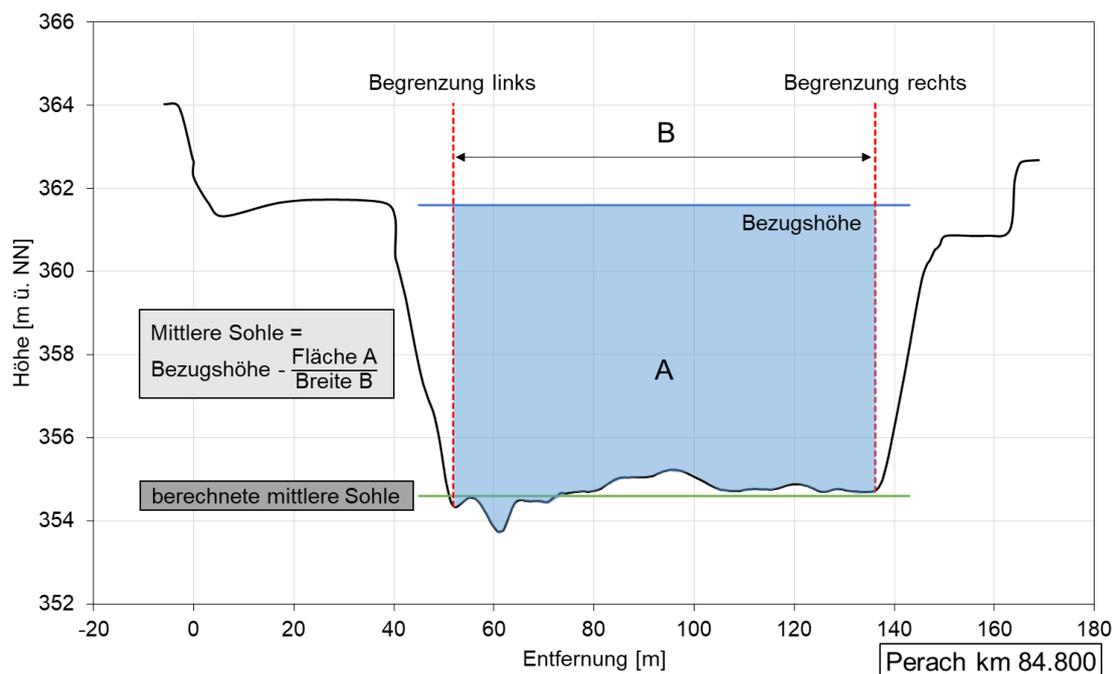


Abbildung 50: Ermittlung der mittleren Sohle

5.1.2 Auswahl von angelandeter und entlandeter Geometrie

Für die oben genannten Stauhaltungen wurden Berechnungen zur Sohlhöhendifferenz durchgeführt und verglichen. Abbildung 51 zeigt am Beispiel der Stauhaltung Perach den Vorgang zur Auswahl der hohen und tiefen Sohlage. Im linken Diagramm sind die Höhendifferenzen von Sohlpeilungen verschiedener Jahre zum Gleichgewichtszustand (2001) an jedem Querprofil dargestellt (Differenz aus mittlerer Sohle Bezugsjahr minus Gleichgewichtssohle). Es ist erkennbar, dass die Peilungen vor Inbetriebnahme der Staustufe im Jahr 1977 in der Nähe des Kontrollbauwerks die größten Abweichungen im Vergleich mit der Gleichgewichtssohle aufweisen. Die Peilungen vor Inbetriebnahme der Staustufe blieben bei der Ermittlung der hohen und tiefen Sohlagen unberücksichtigt. Die Höhendifferenzen der Sohle sind im Allgemeinen nicht über die gesamte Länge der Stauhaltung höher oder niedriger als die Gleichgewichtssohle, sondern variieren. Durch Mittelwertbildung der Höhendifferenzen für jede Peilung wurde festgelegt, welche Sohlage als hohe oder tiefe definiert wird (Abbildung 51, Tabelle rechts). Als tiefe Sohle wird in diesem Fall die Peilung von 1985 ausgewählt (grün), die im Mittel 30,8 cm unterhalb des Gleichgewichtszustands liegt. Als hohe Sohle wird die Peilung von 2006 festgelegt. Diese liegt im Mittel 10,72 cm höher als der Gleichgewichtszustand.

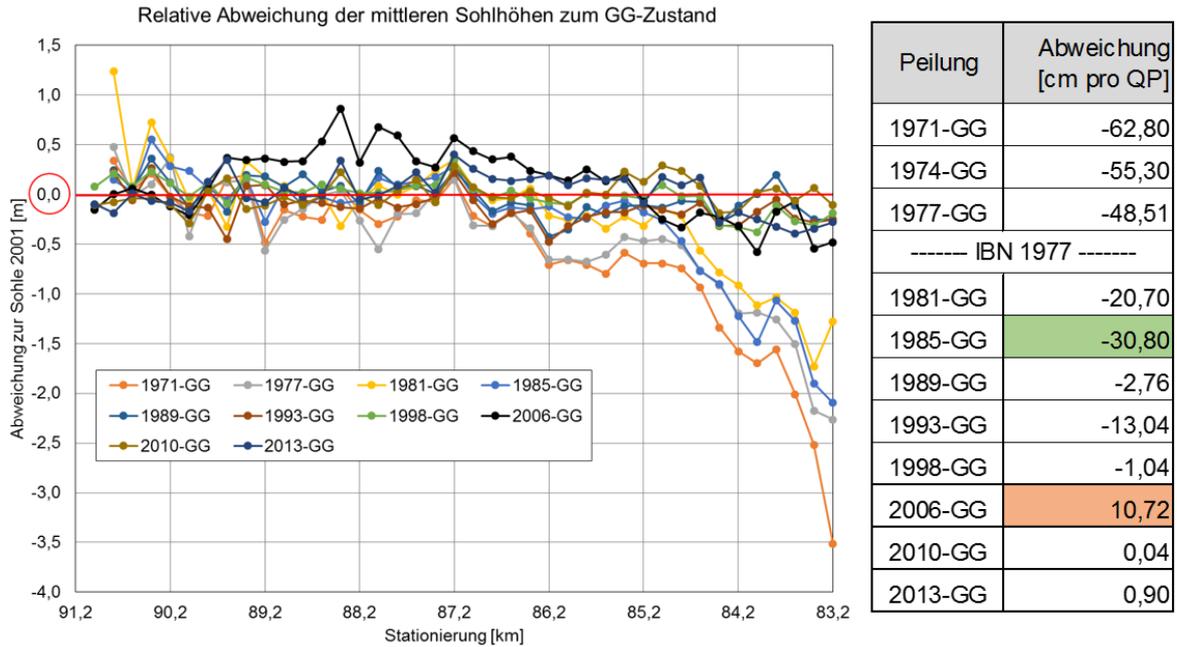


Abbildung 51: Beispielhafte Auswertung der hohen und tiefen Sohle für die Stauhaltung Perach

Tabelle 7 zeigt die Auswahl und Auswertung der mittleren Sohlage für die Stauräume. Der Stauraum Neuötting ist hierbei in zwei Abschnitte unterteilt, für beide Abschnitte wurde separat eine hohe und eine tiefe Sohlage bestimmt. Es sind die Peilungsjahre der Gleichgewichtssohle sowie die der ermittelten hohen und tiefen Sohlagen enthalten. Zusätzlich ist die mittlere Höhendifferenz der mittleren Sohlen von tiefer, beziehungsweise hoher und Gleichgewichtssohle (entsprechend Abbildung 51) dargestellt. Für einzelne Stauräume ergab die Auswertung, dass die Gleichgewichtssohle die höchste oder niedrigste Sohlage darstellt. Ist dies der Fall, wurde die Gleichgewichtssohle verwendet (grau hinterlegt in Tabelle 7). Die Höhendifferenz der hohen und tiefen Sohle zur Gleichgewichtssohle ist neben dem gewählten Peilungsjahr dargestellt und liegt zwischen (-) 1,27 m bei der tiefen Sohle in Wasserburg bis zu (+) 1,21 m bei der hohen Sohle in Rosenheim.

Tabelle 7: Ausgewählte hohe und tiefe Sohlen und Höhendifferenzen zum Gleichgewichtszustand

Stauhaltung	Stauraumlänge [km]	Gleichgewichtssohle Peilungsjahr	tiefe Sohle Peilungsjahr	Höhendifferenz tief-GG [cm]	hohe Sohle Peilungsjahr	Höhendifferenz hoch-GG [cm]
Nußdorf	12,65	2011	2001	-55,68	2006	64,43
Rosenheim	11,2	2003	1985	-25,45	1981	121,98
Feldkirchen	14,4	2009	1985	-25,76	2009	0,00
Wasserburg	13,2	2009	1985	-127,17	2014	65,11
Teufelsbruck	9,35	2009	1985	-27,86	2014	6,69
Gars	9,7	2001	1981	-17,16	2014	9,32
Jettenbach	9,5	2010	2005	-11,76	1997	10,38
Neuötting	28,76	km 91,1- 99,8: 2009	1989	-20,45	2013	9,99
		km 99,8- 127,86: 2007	2007	0,00	1984	36,45
Perach	8,1	2001	1985	-30,80	2006	10,72
Stammham	7,6	2001	2009	-11,92	1974	17,04
Braunau-Simbach	8,5	2009	2013	-13,82	2009	0,00
Ering-Frauenstein	13	2010	2005	-3,00	2014	9,44
Eggfing-Obernberg	12,7	2010	2014	-14,55	2010	0,00
Schärding-Neuhaus	16,5	2009	2002	-13,31	2009	0,00
Passau-Ingling	14,6	2009	2005	-21,66	2013	17,34

Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt einen zeitlichen Überblick über die vorliegenden Sohlpeilungen der verschiedenen Stauhaltungen am Inn. Die Zahlen entsprechen dem Monat des Jahres, in dem in der Stauhaltung eine Sohlpeilung durchgeführt wurde. Graue Felder markieren den Gleichgewichtszustand, grüne Felder die ausgewählte entlandete Geometrie und rote Felder die angelandete Geometrie. Umgibt ein roter oder grüner Rahmen ein graues Feld, bedeutet dies, dass hier die Gleichgewichtssohle gleichzeitig die hohe beziehungsweise tiefe Sohle ist. Die gelben Felder markieren die Inbetriebnahme der Staustufe. Die Monate, in denen laut bayerischem Landesamt für Umwelt (Hochwassernachrichtendienst Bayern) ein Hochwasserereignis stattgefunden hat, sind in der untersten Zeile vermerkt und die entsprechenden Spalten des Jahres wurden blau hinterlegt. Ein Hochwasserereignis wird in der Tabelle angegeben, wenn an einem Pegel ein Abfluss erreicht wurde, der in der Statistik unter den fünf höchsten Ereignissen im Beobachtungszeitraum aufgeführt ist (HND Bayern, 2019). Ist ein solcher Wert an einem Pegel erreicht, wird für den Abschnitt, in dem sich der Pegel befindet (oberer oder unterer Inn) ein Hochwasserereignis angenommen. Diese Einschätzung dient als Entscheidungshilfe, ob eine Sohlveränderung und damit die Sohlauflnahme durch ein Hochwasserereignis beeinflusst sein kann.

Tabelle 8: Zeitlicher Überblick vorliegender Peilungen, Definition als Gleichgewichtssohle, hohe und tiefe Sohle

	1971	1974	1977	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1989	1991	1993	1994	1995	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Oberer Inn	Nußdorf			10		3											2/9		1	2	2	1/11	9	10	10	9	11	10	11	8	9	11			
	Rosenheim	8	11	11	11			9		8		8			10				2	11		11				8					11				
	Feldkirchen	9	11	10	11				1	9		11			10				10				10				10					9			
	Wasserburg	9	11	10	11					1	10		3		10					3			10										1		
	Teufelsbruck	9	9	11	10					1	10		11		12						3			2			11						1		
	Gars	9	9	9	10				3	10	10	10			11			9					2			11							1		
	Jettenbach	9	9	9	10					5	10	10			11			9					2		3			4						2	
	Neuötting (km 91.2 - 99.8)	9	10	9	9				9		11		10			3						1		11			12						8		
	Neuötting (km 100 - 127.8)	9	9	9	9	3		4		11	3		4				7					5	6		11										
	Perach	9	12	9	9				9	11	10	10				3			12				3					2			10				
	Stammham	9	10	9	9				9	11		9				2			12				3			12					8				
	Unterer Inn	Braunau-Simbach																					8		9		9						7		
		Ering-Frauenstein																		1	11				3			3				7	4		
		Eggfing-Obernberg																		11	11	10	11	2	3				3			7	3		
Schärding-Neuhaus																				8	8			9			10				7				
Passau-Ingling																								10			10					7			
HW				7				8		8				6	7							8		7/8			6		6	6					

5.1.3 Erstellung von Kettenmodellen mit angelandeter und entlandeter Geometrie

Für die Erstellung der Querprofile mit hoher und tiefer Sohlage wird das Vorland des Gleichgewichtszustands an die Flussschlauchgeometrie der hohen und tiefen Sohle angeknüpft. Auf diese Weise wird lediglich die Flussschlauchgeometrie ausgetauscht. Wie Abbildung 52 zeigt, ist diese Verschneidung nicht immer ohne weiteres möglich und bedarf in jedem Fall einer Überprüfung und gegebenenfalls einer manuellen Anpassung. Die Oberkante der Flussschlauchgeometrie fügt sich in den meisten Fällen nicht versatzlos an das Vorland an, sodass der Übergang händisch angeglichen werden muss. Wie in Abbildung 52 dargestellt, muss bei der blauen Flussschlauchgeometrie eine geringfügige Anpassung zum Anschluss an das Vorland der Gleichgewichtssohle (grau) vorgenommen werden, während bei der roten Flussschlauchgeometrie keine Anpassung notwendig ist.

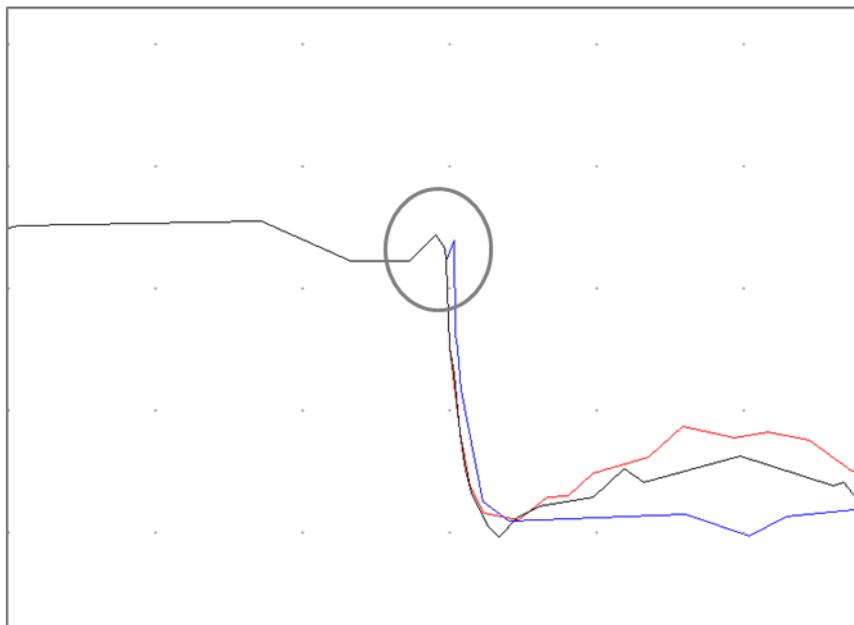


Abbildung 52: Anschluss eines Vorlandes an die Sohlpeilung des Flussschlauches

5.2 Simulationen mit den ausgewählten Sohlagen

5.2.1 Simulation der abgelaufenen Hochwasserereignisse

Unter Verwendung der Kettenmodelle mit hoher und tiefer Sohlage wurden für die abgelaufenen Hochwasserereignisse 2002, 2005 und 2013 Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind für die Pegel Wasserburg und Passau-Ingling in Abbildung 53 bis Abbildung 58 dargestellt. Diese exemplarischen Simulationsergebnisse an den ausgewählten Pegeln am oberen und unteren Inn sind als stellvertretend für den gesamten untersuchten Bereich des bayerischen Inns zu betrachten. In den Abbildungen ist, in Anlehnung an Tabelle 8, der simulierte Abfluss des Modells mit hoher Sohlage rot, mit tiefer Sohlage grün und der Gleichgewichtssohle schwarz abgebildet. Die Detailansichten in der unteren rechten Ecke zeigen den Bereich des Abflussmaximums. Das Maximum der jeweiligen Abflussganglinie ist dabei durch einen Punkt markiert. Durch den Vergleich der Abbildungen lässt sich zusammenfassen: Die Abflussganglinie der tiefen Sohlage (grün) verläuft zeitlich vor der des Gleichgewichtszustands (schwarz), welche vor der der hohen Sohlage (rot) kommt. In einigen Fällen liegen die Ergebnisse für die Gleichgewichtssohle und für die hohe Sohle nah beisammen. Das Abflussmaximum bei tiefer Sohlage tritt bei jedem Hochwasserereignis sowohl am Pegel Wasserburg als auch am Pegel Passau-Ingling zuerst auf. Das Maximum der hohen Sohle tritt am Pegel Wasserburg 2002 und 2005 annähernd zeitgleich mit dem der Gleichgewichtssohle auf. Die Verzögerung beträgt hierbei weniger als 5 Minuten. Auch in den übrigen Fällen tritt der Scheitel der hohen Sohle nach dem der Gleichgewichtssohle auf. Die größten Laufzeitverschiebungen gegenüber dem Gleichgewichtszustand sind mit bis zu 66 Minuten bei Simulationen mit tiefer Sohle zu beobachten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich die Hochwasserwelle bei tiefer Sohlage (grün) schneller ausbreitet und bei hoher Sohlage (rot) langsamer als im Gleichgewichtszustand. Der maximale Abfluss bei tiefer Sohlage liegt bei jedem Hochwasserereignis sowohl am Pegel Wasserburg als auch am Pegel Passau-Ingling höher als bei Simulationen mit der Gleichgewichtssohle. Bei der Simulation mit hoher Sohlage liegt das Abflussmaximum bis auf die Hochwasserereignisse 2005 und 2013 am Pegel Passau-Ingling niedriger als das der Gleichgewichtssohle. Die Veränderungen beim Durchfluss sind mit weniger als 1 % des maximalen Abflusses vernachlässigbar gering. Die Werte zu Laufzeiten der Hochwasserwellen, zeitlicher Verschiebung und der Veränderung des maximalen Durchflusses sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

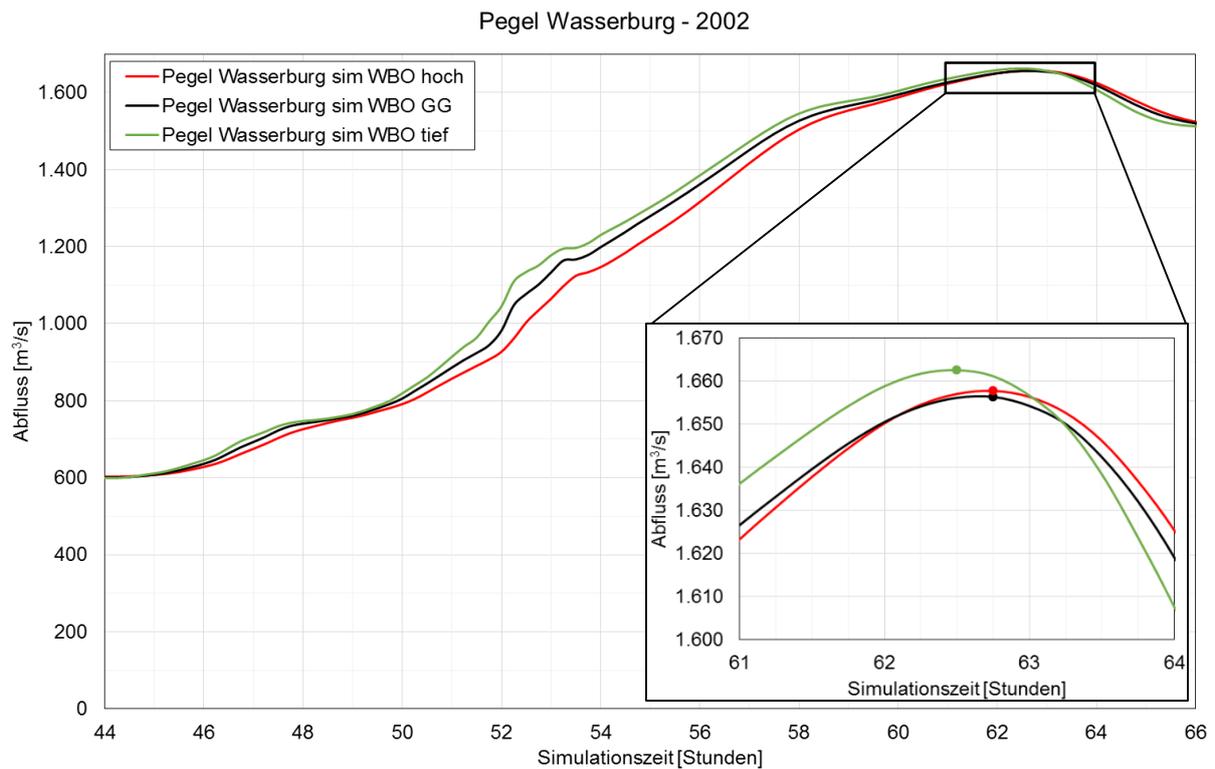


Abbildung 53: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Wasserburg – HW 2002

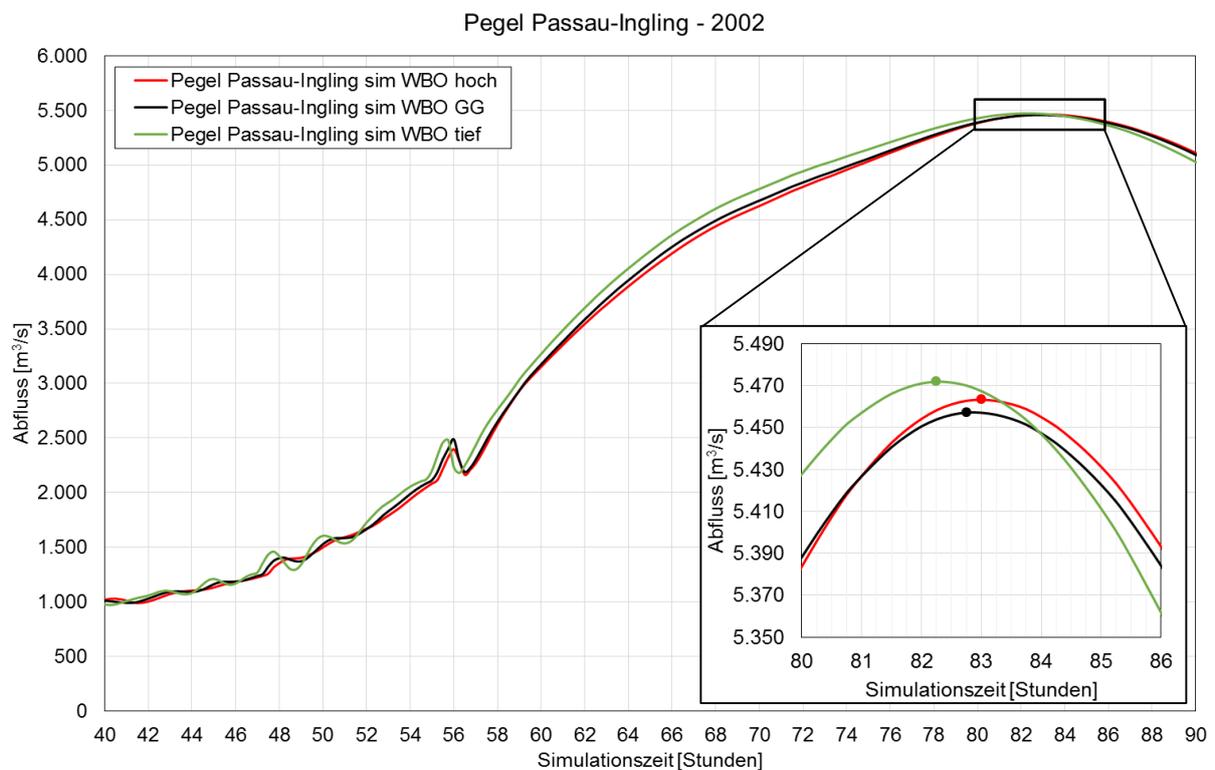


Abbildung 54: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Passau-Ingling – HW 2002

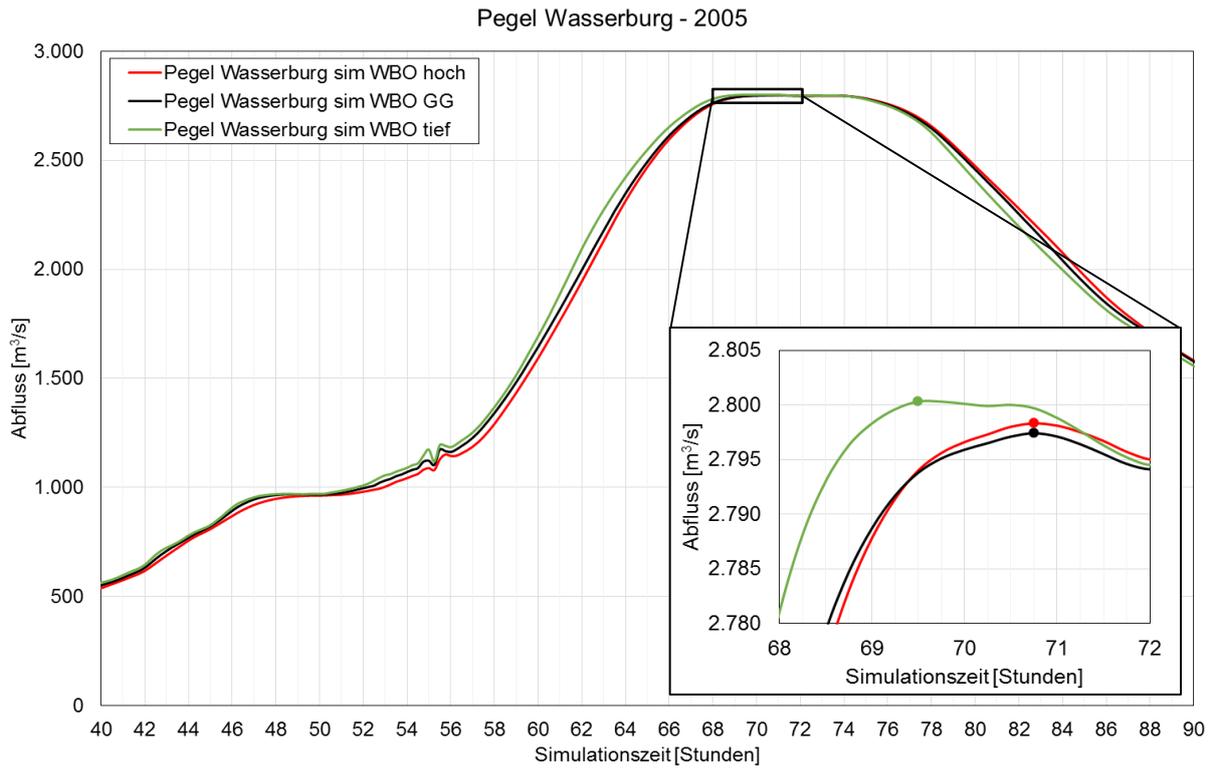


Abbildung 55: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Wasserburg – HW 2005

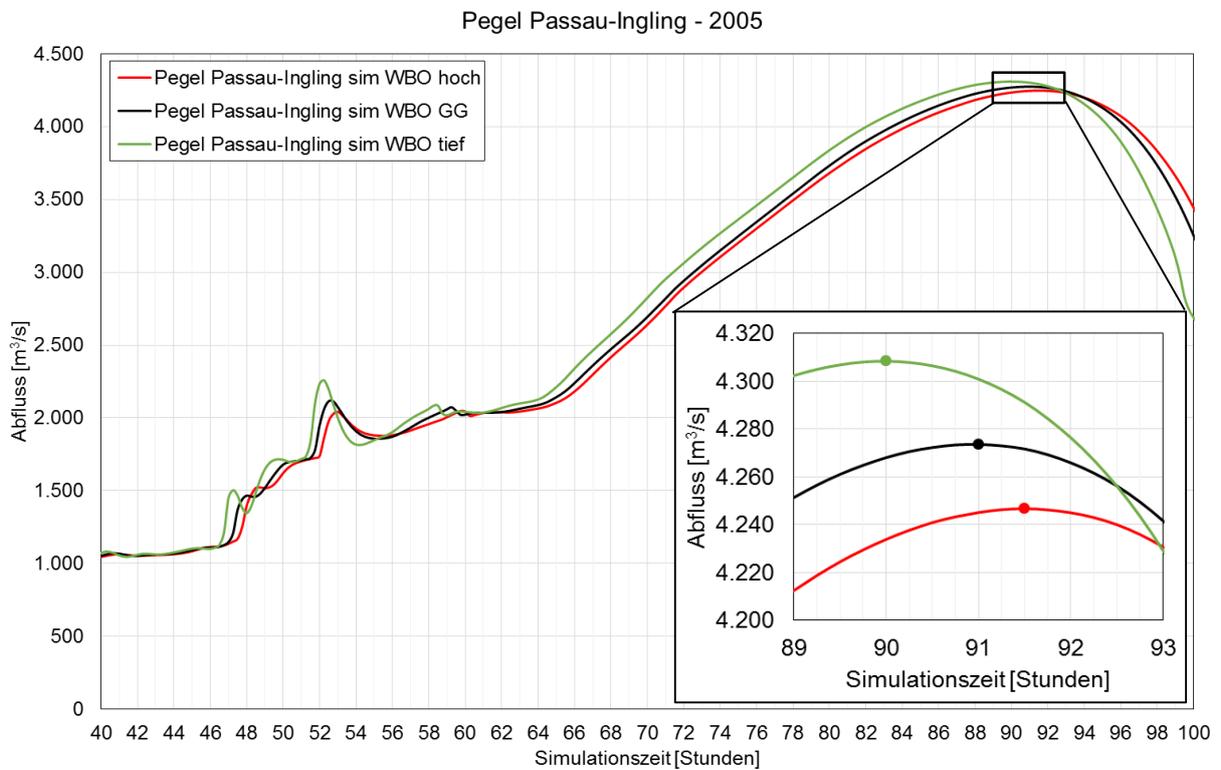


Abbildung 56: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Passau-Ingling – HW 2005

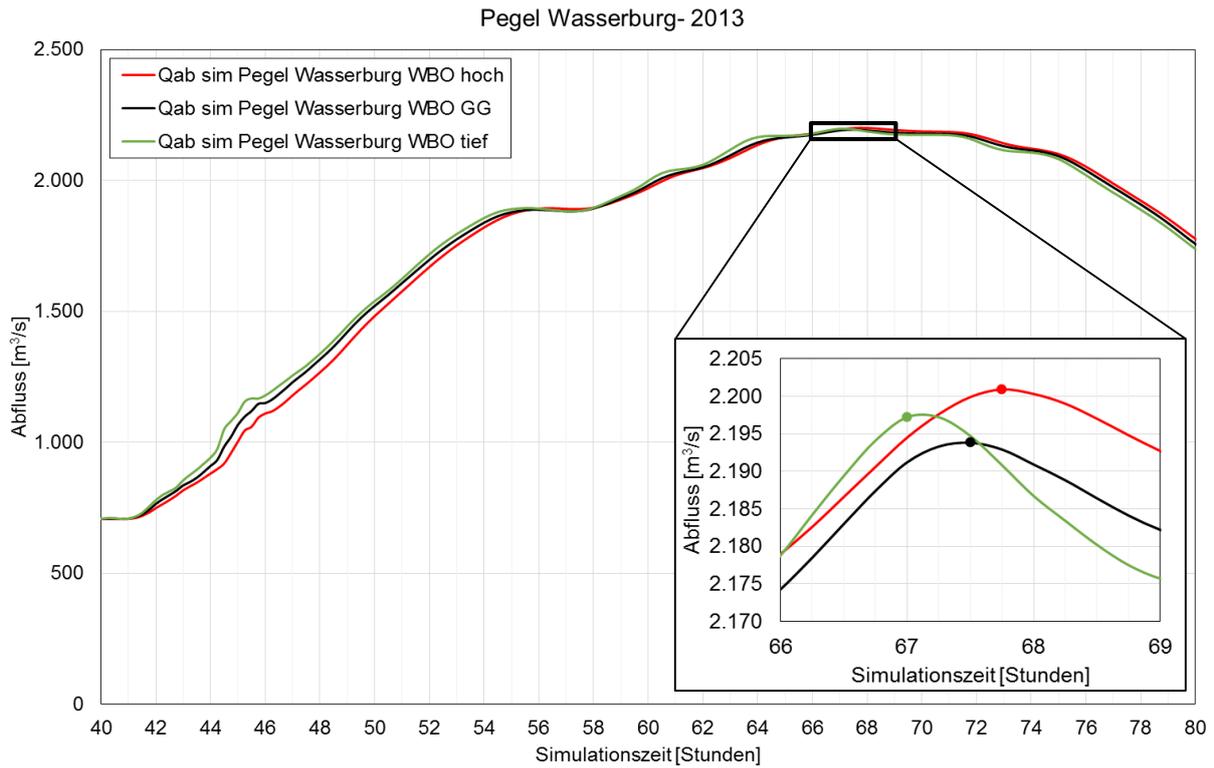


Abbildung 57: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohllagen – Pegel Wasserburg – HW 2013

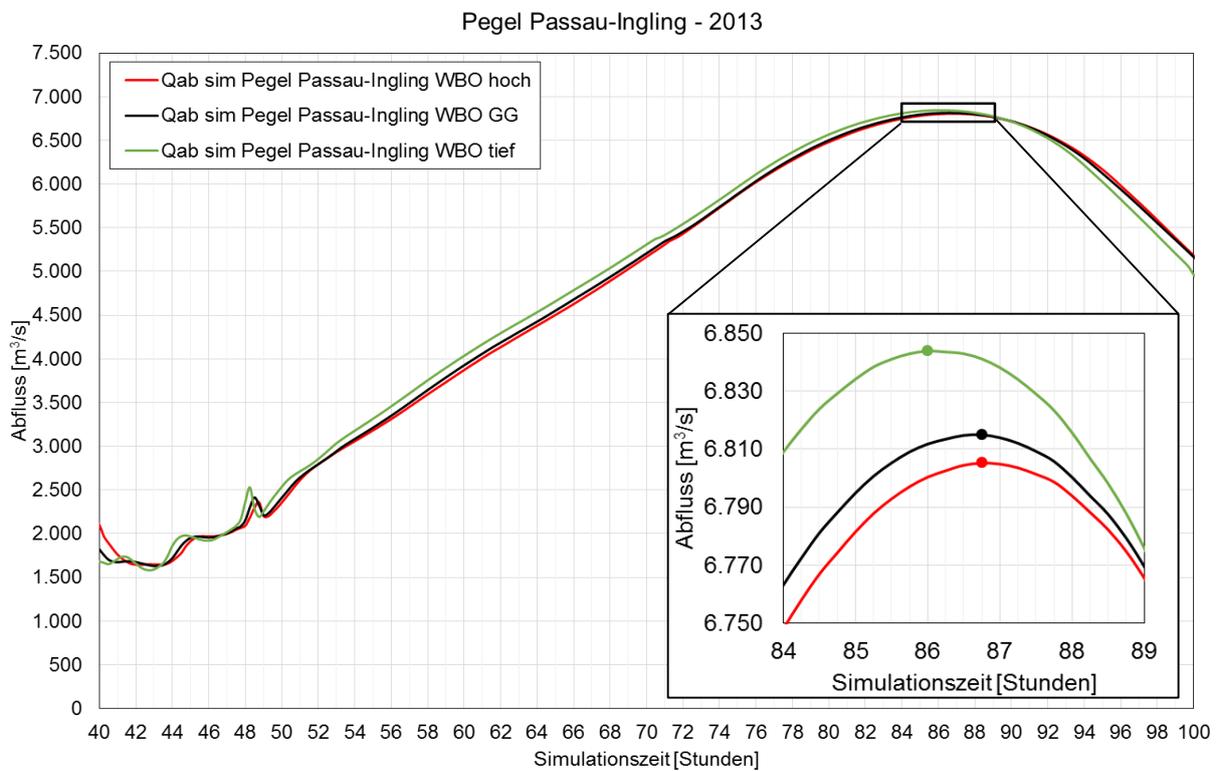


Abbildung 58: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohllagen – Pegel Passau-Ingling – HW 2013

Wie in Tabelle 9 dargestellt, beträgt die Laufzeit zwischen den Pegeln Wasserburg und Passau-Ingling bei den betrachteten abgelaufenen Hochwasserereignissen etwa 20 Stunden. Die maximalen Abflüsse an den Pegeln Wasserburg und Passau-Ingling (Q_{\max}) sowie die Laufzeit zwischen den beiden Pegeln sind für den Gleichgewichtszustand als absolute Werte dargestellt. Die Veränderungen durch die Sohlvariationen mit hohen und tiefen Sohlagen sind als Abweichung vom Gleichgewichtszustand definiert und dargestellt (ΔQ_{\max} , Δt). Positive ΔQ_{\max} besagen, dass das Abflussmaximum der veränderten Sohle an einem Pegel höher liegt als das der Gleichgewichtssohle. Eine negative Laufzeitverschiebung ($\Delta t(Q_{\max})$) bedeutet, dass der maximale Abfluss am betrachteten Pegel bei der Sohlvariation früher eintritt als beim Gleichgewichtszustand, die Ganglinie sich also schneller ausbreitet. Die Veränderungen des maximalen Abflusses (ΔQ_{\max}) sind mit maximal 0,81 % des Spitzenabflusses im Gleichgewichtszustand vernachlässigbar. Die maximale Zeitverschiebung des Scheitels liegt bei 1,1 Stunden.

Tabelle 9: Auswirkung der Sohlvariation auf die Abflussganglinien (Auswertung des Scheitelabflusses) – Abgelaufene Hochwasserereignisse

		Q_{\max} [m ³ /s]	Laufzeit [h]	ΔQ_{\max} [%]		$\Delta t(Q_{\max})$ [min]	
		GG		hoch-GG	tief-GG	hoch-GG	tief-GG
HW 2002	Pegel Wasserburg	1.656	20,20	0,07	0,36	4	-10
	Pegel Passau-Ingling	5.457		0,11	0,27	7	-33
HW 2005	Pegel Wasserburg	2.797	20,20	0,03	0,11	2	-66
	Pegel Passau-Ingling	4.274		-0,63	0,81	33	-58
HW 2013	Pegel Wasserburg	2.194	19,13	0,32	0,17	19	-20
	Pegel Passau-Ingling	6.815		-0,15	0,42	8	-33

5.2.2 Simulation der synthetischen Hochwasserereignisse

Zusätzlich zu den abgelaufenen Hochwasserereignissen 2002, 2005 und 2013 wurden Simulationen von drei stochastischen Hochwasserszenarien durchgeführt. Diese Szenarien wurden von der TU Wien im Rahmen des Teilprojekts A – Stochastische Niederschlag-Abflussmodellierung zur Ermittlung des räumlichen Zusammenwirkens der Zubringerwellen – erstellt. An den Pegeln Wasserburg, Burghausen und Passau-Ingling weisen die synthetischen Ereignisse Maximalabflüsse unterschiedlicher festgelegter Jährlichkeit auf. Die Ganglinien ausgewählter Pegel werden in Kapitel 6.1 dargestellt.

Szenario 3 weist, wie in Tabelle 10 dargestellt, am Pegel Wasserburg eine Jährlichkeit von 300 Jahren auf. An der Salzach (Pegel Burghausen) und am unteren Inn (Pegel Passau-Ingling) hat das Hochwasserereignis eine Jährlichkeit von 30 Jahren. Szenario 9 ist ebenfalls vom Inn beeinflusst, weist aber im Vergleich zu Szenario 3 auch am unteren Inn eine höhere Jährlichkeit auf (HQ_{300}). Szenario 11 ist von der Salzach beeinflusst und tritt am Pegel Burghausen an der Salzach statistisch einmal in 1.000 Jahren auf.

Tabelle 10: Ausgewählte synthetische Szenarien und Jährlichkeiten

Szenario	Jährlichkeit am Pegel		
	Wasserburg	Burghausen	Passau-Ingling
3	300	30	30
9	800	20	300
11	20	1000	150

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 59 und Abbildung 60) sind exemplarisch die Ergebnisse der Simulation des Szenarios 3 mit hoher, tiefer und Gleichgewichtssohle dargestellt. Wie bei den Hochwasserereignissen von 2002, 2005 und 2013 zeigt sich bei den stochastischen Hochwasserszenarien, dass sich die Hochwasserwelle bei der tiefen Sohllage (grün) schneller ausbreitet als bei der Gleichgewichtssohle (schwarz). Der Ganglinienscheitel der hohen Sohle (rot) tritt tendenziell zuletzt auf. Der höchste Abfluss tritt, mit Ausnahme von Szenario 9 am Pegel Wasserburg, bei der tiefen Sohllage auf, gefolgt von der Gleichgewichtssohle und der hohen Sohllage. Die Abflussänderung ist wie bei den abgelaufenen Hochwasserereignissen sehr gering.

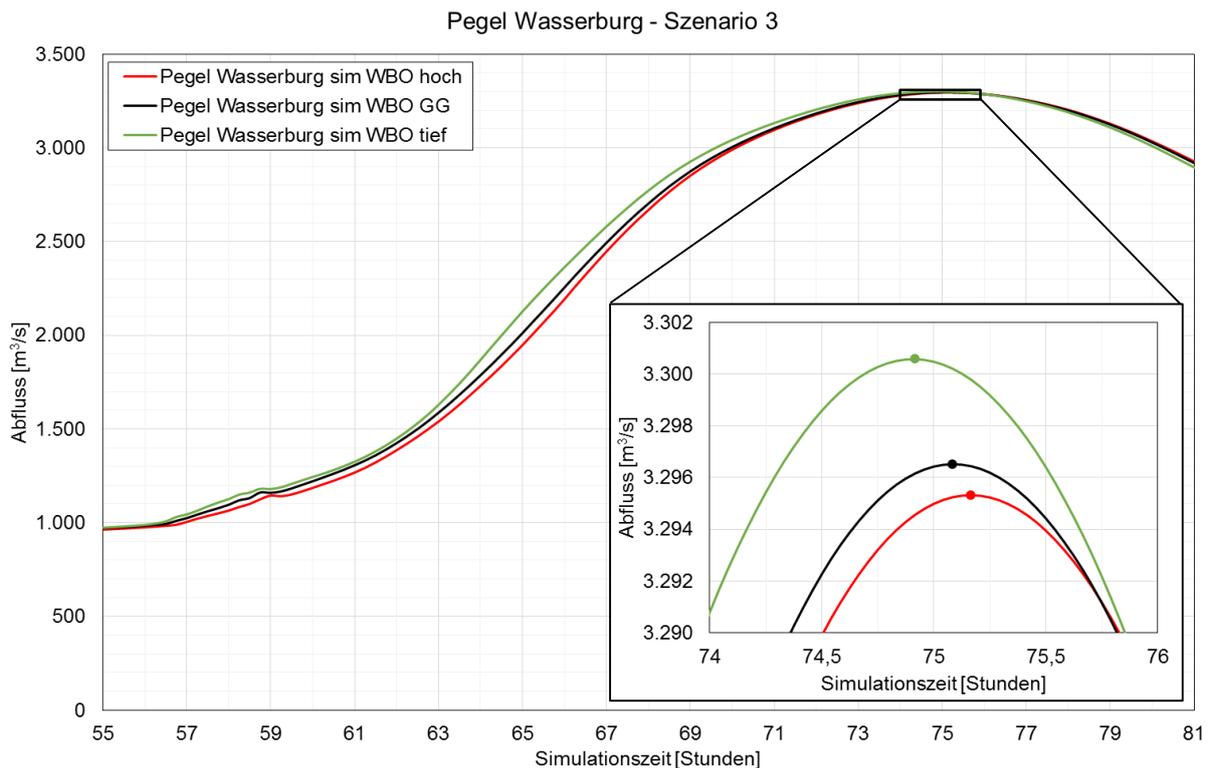


Abbildung 59: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohllagen – Pegel Wasserburg – Szenario 3

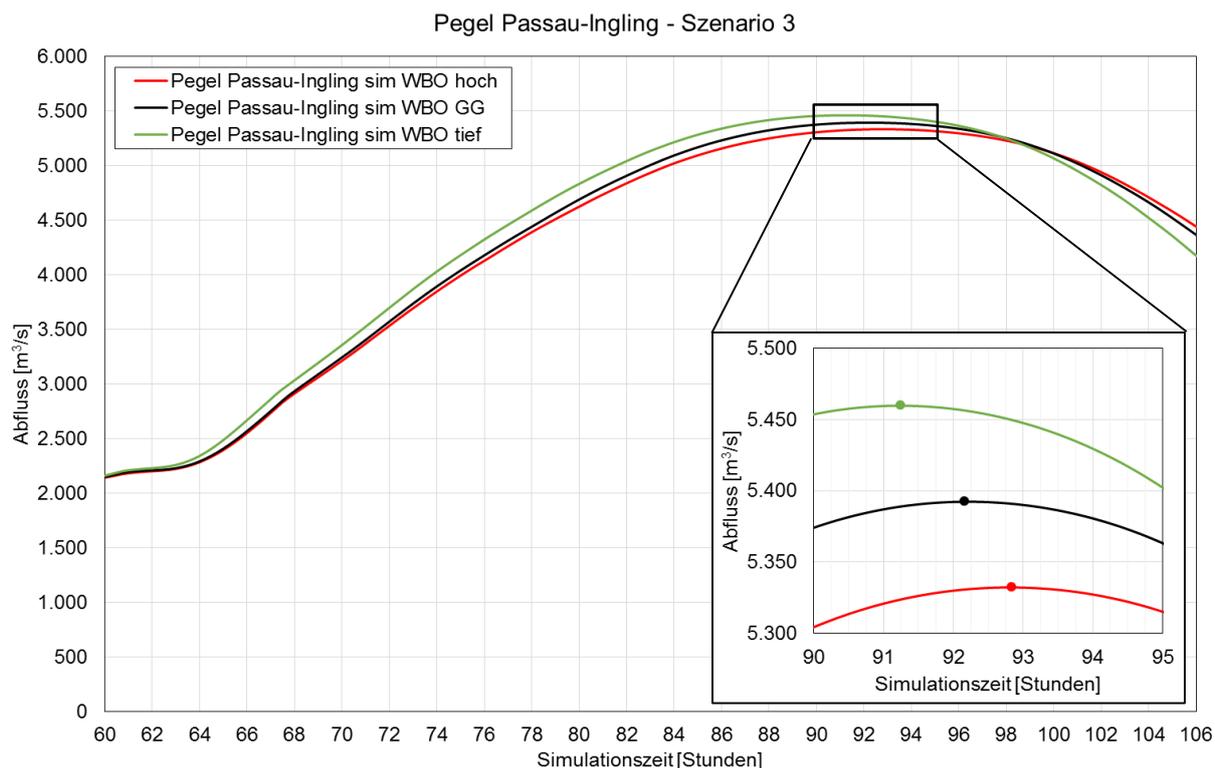


Abbildung 60: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Passau-Ingling – Szenario 3

In Tabelle 11 sind die Laufzeiten zwischen den Pegeln Wasserburg und Passau-Ingling und die Änderung der Scheitelabflüsse an den beiden Pegeln für die Simulationen mit unterschiedlichen Sohlagen dargestellt. Für die unterschiedlichen Szenarien ergeben sich Laufzeiten zwischen 15 und 22 Stunden. Analog zur Betrachtung der Hochwasserereignisse von 2002, 2005 und 2013 zeigt sich, dass die Veränderungen des maximalen Abflusses (ΔQ_{\max}) mit bis zu 1,25 % des Spitzenabflusses im Gleichgewichtszustand vernachlässigbar sind. Die Zeitverschiebung des Scheitels beträgt bis zu 55 Minuten.

Tabelle 11: Auswirkung der Sohlvariation auf die Abflussganglinien (Auswertung des Scheitelabflusses) – Stochastische Szenarien

		Q_{\max} [m ³ /s]	Laufzeit [h]	ΔQ_{\max} [%]		$\Delta t(Q_{\max})$ [min]	
		GG		hoch-GG	tief-GG	hoch-GG	tief-GG
Szenario 3	Pegel Wasserburg	3.297	17,08	-0,04	0,12	5	-10
	Pegel Passau-Ingling	5.391		-1,12	1,25	40	-55
Szenario 9	Pegel Wasserburg	3.565	22,25	0,02	0,07	0	-10
	Pegel Passau-Ingling	7.386		-0,40	0,43	10	-20
Szenario 11	Pegel Wasserburg	2.290	15,08	-0,52	0,41	20	-25
	Pegel Passau-Ingling	6.978		-0,59	0,87	10	-25

Da der Einfluss der unterschiedlichen Sohlhöhen von hohem und tiefem Sohlzustand, sowohl bei den abgelaufenen Hochwassern als auch bei der Simulation der stochastischen Ereignisse, insbesondere auf den Scheitelabfluss und die Ganglinienform relativ gering ist,

besteht kein Erfordernis, die Wehrbetriebsordnung als Reaktion auf Sohlveränderungen zu ändern.

6 Erstabschätzung des Potentials zur Scheitelminderung durch Stauraummanagement

6.1 Allgemeines zur Erstabschätzung des Potentials des Stauraummanagements

Bei Nutzung eines Stauraumes zur Scheitelminderung eines Hochwassers wird Volumen zum Rückhalt geschaffen, indem der Oberwasserstand an der Anlage frühzeitig vor dem Hochwasser abgesenkt wird. Bei Durchgang des Scheitels wird der Oberwasserstand auf das festgelegte Stauziel erhöht. Damit wird Volumen in der Stauhaltung zurückgehalten und die Hochwasserwelle entsprechend gekappt. Der Vorgang des zeitlich abgestimmten Ab- und Aufstauens wird als Stauraummanagement bezeichnet und nachfolgend detailliert erläutert.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen stellen Voruntersuchungen zur Erstabschätzung eines möglichen Potentials durch Stauraummanagement dar. Das Ziel dieser Erstabschätzung war es, das Systemverständnis zu vertiefen und festzustellen, ob ein Potential zur Abflussminderung besteht. Da diese erste Abschätzung ein solches Potential aufzeigte, wurden in einer weitergehenden Untersuchung konkrete Steuerungsvorgaben analysiert und entwickelt. Die Beschreibung dieser weitergehenden Arbeiten zur Ableitung von Steuerungsvorgaben erfolgt in Kapitel 8.

Die Durchführung des Stauraummanagements ist in die Prozesse des Ab- und Aufstaus unterteilt. Die folgende Abbildung 61 veranschaulicht den beschriebenen Vorgang des Absenkens und Aufstauens graphisch. Dargestellt sind die Simulationsergebnisse gemäß WBO und bei Stauraummanagement am Kraftwerk Eggfling-Obernberg für das HW 2002. Der Zufluss in die Stauhaltung ist in der hier gezeigten beispielhaften Simulation in beiden Berechnungen identisch (grün). Der OW-Stand ist auf der Sekundärachse aufgetragen. Bei der Simulation gemäß WBO (orange) wird der OW-Stand konstant auf 325,90 müNN gehalten. Im Fall des Stauraummanagements wird von 325,90 auf 323,90 müNN abgesenkt (schwarz). Zum Eintrittszeitpunkt des Ganglinienscheitels wird der OW-Stand auf das reguläre Stauziel gemäß WBO von 325,90 müNN erhöht. Der Einfluss der unterschiedlichen Betriebsweisen wird anhand der simulierten Ganglinien des Abflusses deutlich, die im Diagramm aufgetragen sind (blau WBO, gelb Stauraummanagement). Im Zeitbereich von Simulationsstunde 20 bis 40 findet der Abstauprozess statt und hat eine Abflusserhöhung zur Folge. Diese findet rechtzeitig vor dem Ansteigen des Hochwassers bei einem geringeren Abfluss statt. Im Falle

der Simulation mit Stauraummanagement (gelb) liegt der Maximalabfluss durch die Einlagerung des Volumens während des Aufstauprozesses von Stunde 71 bis 83 im Stauraum um $\Delta Q = 89 \text{ m}^3/\text{s}$ geringer als der Abflussscheitel gemäß WBO (blau). Bei der Durchführung des Stauraummanagements muss der Einfluss des Unterwasserstandes beachtet werden, der in der Simulation entsprechend berücksichtigt wird.

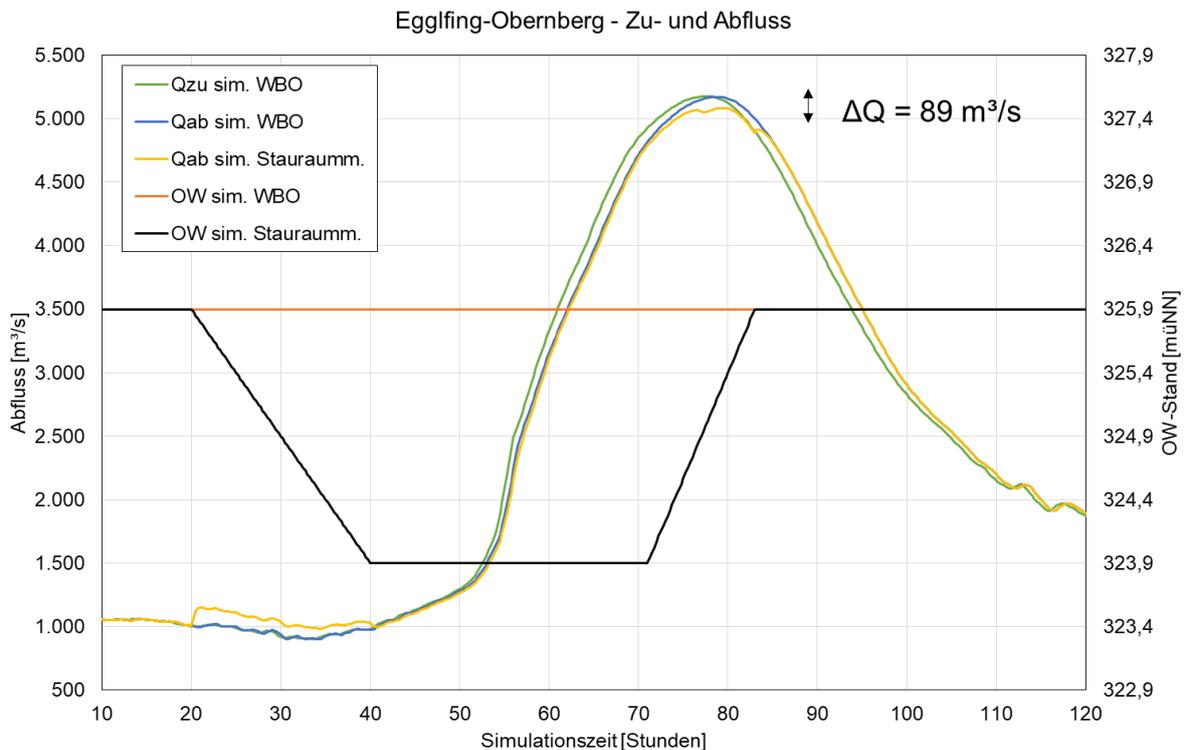


Abbildung 61: Scheitelminderung am Kraftwerk Egglfing-Obernberg - HW 2002 - Variante 1 – Stauraummanagement am unteren Inn

Die erzielbare Scheitelminderung hängt maßgeblich von den Parametern der Definition des Ab- und Aufstaus ab. Im Rahmen der Erstabstschätzung wurden realistische Kenngrößen für die Parameter gewählt. Die Parameter Abstautiefe, Zeitpunkt des Aufstaus und Aufstaugradient wurden bei der Untersuchung in einem internen Iterationsprozess unter Kenntnis der Abflussganglinien variiert, es wurde jedoch keine Optimierung durchgeführt. Diese Erstabstschätzung des Potentials zur Scheitelminderung entspricht damit nicht einer maximal möglichen Abminderung. Die Untersuchungen wurden unter der Annahme von idealisierten Verhältnissen durchgeführt, da die Parameter des Ab- und Aufstauprozesses basierend auf der als bekannt angenommenen Zuflussganglinie gewählt wurden. Im Rahmen der weitergehenden Untersuchungen und Ableitung von Steuerungsvorgaben werden Abhängigkeiten für die Festlegung der Parameter von Ab- und Aufstauprozess definiert und erläutert.

Die Erstabschätzung des Potentials durch Stauraummanagement wurde für die drei abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013 sowie für zwölf stochastische Hochwasserszenarien durchgeführt. Die stochastischen Szenarien wurden wie oben beschrieben von der TU Wien im Rahmen des Teilprojekts A – Stochastische Niederschlag-Abflussmodellierung zur Ermittlung des räumlichen Zusammenwirkens der Zubringerwellen – mittels einer Monte-Carlo-Simulation mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell erstellt und weisen für die Pegel Wasserburg, Burghausen und Passau-Ingling Maximalabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit auf. Für jeden der drei Pegel liegen vier Szenarien vor, die HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300} und HQ_{1000} entsprechen. Die zur Verfügung gestellten Zuflussinformationen von seitlichen Zubringern und Teil-EZG, die zur Definition der Randbedingungen bei der Simulation benötigt werden, decken das gesamte Einzugsgebiet des Inns ab.

6.2 Stauraummanagement am unteren Inn

Bei der Potentialermittlung zur Scheitelminderung wurde der Fokus der Betrachtung zunächst auf die fünf Stauhaltungen Braunau-Simbach bis Passau-Ingling am unteren Inn gelegt, da in diesen Stauhaltungen potentiell die größten Volumina zur Verfügung stehen. An den drei Anlagen Ering-Frauenstein, Egglfing-Obernberg und Schärding-Neuhaus wird der Oberwasserstand im Hochwasserfall nicht abgesenkt. In Braunau-Simbach wird der Oberwasserstand ab einem Zufluss von $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ von 349,00 müNN auf das Absenkziel von 348,50 müNN um 50 cm linear abgesenkt. In Passau-Ingling wird ab einem Zufluss von $Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ von 303,00 auf das Absenkziel von 300,00 müNN abgesenkt. Das Absenkziel wird definiert als das Stauziel, das während des Hochwassers einzuhalten ist. Bei Anlagen, an denen während eines Hochwassers gemäß WBO kein Abstau durchgeführt wird, entspricht dieses Absenkziel dem regulären Stauziel.

Bei den Voruntersuchungen zur Erstabschätzung der Abminderung durch Stauraummanagement wurde der Abstau jeweils in einem Zeitbereich von etwa 20 Stunden mit einer Abstaugeschwindigkeit von etwa 10 cm/h vorgenommen. Der Abstauprozess wird frühzeitig vor dem eigentlichen Hochwasser durchgeführt und mit einem geringen Gradienten, sodass es nicht zu Schäden an Deichen und Dämmen kommt. Der Aufstaugradient ist höher gewählt und liegt in einem Bereich von 15 bis 30 cm/h. Der Abstau wird bei den folgend dargestellten Untersuchungsergebnissen um maximal 2 m (Ering-Frauenstein und Egglfing-Obernberg) bis 2,5 m (Braunau-Simbach und Schärding-Neuhaus) durchgeführt, am KW Passau-Ingling wird um 4,5 m abgestaut, da gemäß WBO bereits um 3 m abgesenkt wird. Somit wird je nach Anlage zusätzlich zum regulären Abstau um maximal weitere 1,5 bis 2,5 m abgestaut. Es wurde eine Vielzahl von Simulationen durchgeführt, bei denen die Zeitpunkte und Gradienten des Aufstaus sowie die Abstautiefen variiert wurden. Die Analyse dieser Untersuchungen hat hierbei aufgezeigt, dass bei dem angesetzten Abstau von rund 2 m ein

guter Rückhalt erzielt werden kann. Das generierbare Rückhaltevolumen ist abhängig von der Abstautiefe respektive der zulässigen Aufstauhöhe sowie der Abflusssituation im System. Bei höheren Abflüssen im Stauraum nimmt das verfügbare Rückhaltevolumen ab und das zusätzliche Volumen eines tieferen Abstaus ist vergleichsweise gering. Größere Abstautiefen gehen zusätzlich mit größerer Erosion und Trockenfallen weiterer Bereiche einher.

Die Untersuchungen im Rahmen der Erstabschätzung dienen dazu, ein vertieftes Systemverständnis zu erlangen und eine Größenordnung der möglichen Reduzierung zu ermitteln; während im Rahmen der anschließenden, weitergehenden Untersuchungen eine Steuerstrategie mit Festlegung von entsprechenden Regeln entwickelt wurde.

Es wurden drei Varianten betrachtet, die sich in der Höhe des Wiederaufstaus zum Zeitpunkt des Scheitels unterscheiden. Diese Untersuchung von unterschiedlichen Varianten dient dazu, ein besseres Prozessverständnis zur Beurteilung des Systemverhaltens zu erlangen.

Die Varianten 1, 2a und 2b sind definiert wie nachfolgend aufgeführt:

1 – Aufstau bis auf die in den WBO festgelegten Stauziele bei Hochwasser (z. T. spezielles Absenkziel bei Hochwasser, ansonsten reguläres Stauziel)

2a – Aufstau in Braunau-Simbach bis auf reguläres Stauziel (d. h. 0,5 m über Absenkziel bei Hochwasser), Passau-Ingling bis auf 301 müNN (d. h. 1 m über Absenkziel bei Hochwasser), andere bis reguläres Stauziel

2b – Aufstau aller Stauanlagen bis auf reguläres Stauziel (d. h. Braunau-Simbach 0,5 m über Absenkziel, Passau-Ingling 3 m über Absenkziel bei Hochwasser)

Für Variante 1, bei der die bescheidsgemäßen Stauziele nicht überschritten werden, ergibt sich durch den Aufstau, der im Rahmen der Vorgaben der WBO durchgeführt wird, nicht die Gefahr von überhöhten Wasserständen im Vergleich zum Betrieb gemäß WBO. Aus diesem Grund stellt die Variante 1 die Hauptvariante dar. Falls die Varianten 2a und 2b in Betracht gezogen würden, wäre der Einfluss des Höherstaus auf die Wasserspiegellagen im Stauraum detailliert zu untersuchen.

In Abbildung 62 sind beispielhaft die simulierten Abflüsse am Kraftwerk Passau-Ingling am Inn, am Pegel Achleiten an der Donau unterstrom des Inn-Zuflusses und der simulierte Abfluss der Donau am Pegel Passau (blau) für das HW 2002 aufgetragen. Am Kraftwerk Passau-Ingling ist bei dem Vergleich von simuliertem Abfluss am Kraftwerk Passau-Ingling gemäß WBO (rot) und Stauraummanagement nach Variante 1 (schwarz) eine Abminderung des Scheitelabflusses von $\Delta Q = 291 \text{ m}^3/\text{s}$ erzielbar. Die Abflussganglinien der Simulation liegen

am Pegel Achleiten in einem Abflussbereich von etwa $Q = 7.500 \text{ m}^3/\text{s}$ für das Stauraummanagement und $Q = 7.800 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Betriebsweise gemäß WBO. Bei der Simulation mit Stauraummanagement (grün) ergibt sich demnach am Pegel Achleiten gegenüber der Betrachtung gemäß WBO (gelb) eine Scheitelreduzierung von $\Delta Q = 284 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abminderung entspricht in etwa der Minderung am Kraftwerk Passau-Ingling. Durch den Abstau bei Stauraummanagement kommt es zu einer Abflusserhöhung im Zeitbereich von etwa Stunde 20 bis 40, während der Abfluss bei der Simulation gemäß WBO bis etwa Stunde 57 aufgrund der festgelegten Absenkung gemäß WBO höher liegt als bei Stauraummanagement. Des Weiteren ist ersichtlich, dass durch das Stauraummanagement keine Beschleunigung oder Verzögerung der Hochwasserwelle auftritt und sich die Änderung der Ganglinienform und deren Abminderung auf den Bereich des Scheitels bezieht.

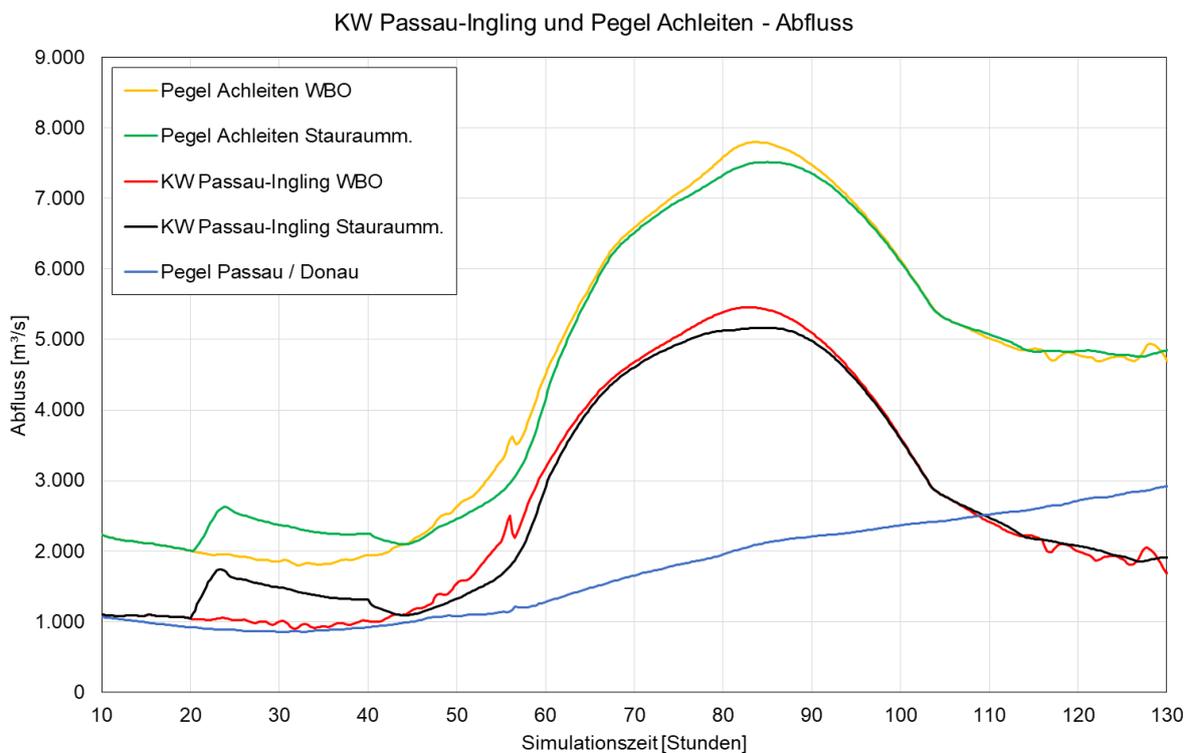


Abbildung 62: Scheitelminderung am Pegel Achleiten - HW 2002 - Variante 1 - Stauraummanagement am unteren Inn

In den folgenden Abbildungen sind die ermittelten Werte der Potentialermittlung durch Stauraummanagement am unteren Inn für die drei abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013 und die zwölf Szenarien graphisch dargestellt. In Abbildung 63 ist die absolute Scheitelminderung des Abflusses für Variante 1 wiedergegeben. Zusätzlich sind in der Abbildung graue Linien eingefügt, die den prozentualen Bezug der Scheitelminderung zum Maximalabfluss darstellen. Ebenfalls markiert sind die Abflüsse von Hochwasserereignissen mit den Jährlichkeiten 10, 20 und 100 Jahren für den Pegel Passau-Ingling. Es lassen sich maximale Abminderungen für das Hochwasser 2005 und Szenario 5 von bis zu $\Delta Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$

im Abflussbereich von $Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{10}) erzielen. Mit steigendem Maximalabfluss der Hochwasser nimmt die Scheitelminderung ab und beträgt beispielsweise für das Hochwasser 2002 $\Delta Q = 291 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{max}} = 5.456 \text{ m}^3/\text{s}$) und für das Hochwasser 2013 $\Delta Q = 167 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{max}} = 6.815 \text{ m}^3/\text{s}$).

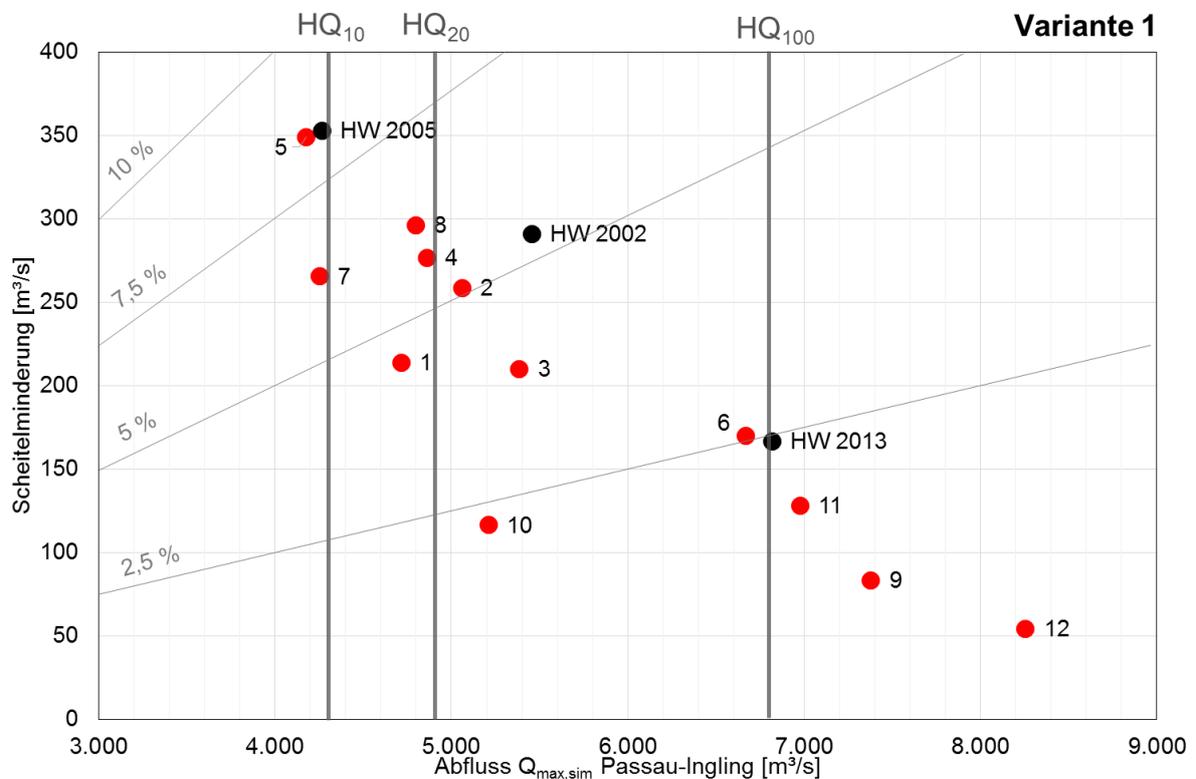


Abbildung 63: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1 - Stauraummanagement am unteren Inn

Abbildung 64 zeigt die absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling über dem maximalen Abfluss am Pegel Passau-Ingling bei der Berechnung gemäß WBO für die betrachteten Varianten 1, 2a und 2b. Dargestellt sind sowohl die Ergebnisse von Szenarien und abgelaufenen Hochwasserereignissen, eine Zuordnung der Nummerierung der Szenarien beziehungsweise Hochwasser erfolgt in dieser Abbildung aufgrund der Übersichtlichkeit nicht. Die Minderung in Variante 2b ist fast immer größer als in 2a sowie immer größer als in Variante 1. Vor allem im Abflussbereich von $Q = 4.000$ bis $Q = 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ sind zusätzliche Abminderungen durch den höheren Aufstau in den Varianten 2a und 2b erkennbar. In diesem Abflussbereich beträgt die maximale Abminderung in Variante 2a zwischen 3 und 10 %, in Variante 2b zwischen 4 und 12,5 %. Mit höherem Scheitelabfluss des Hochwassers nimmt die Differenz der Varianten ab.

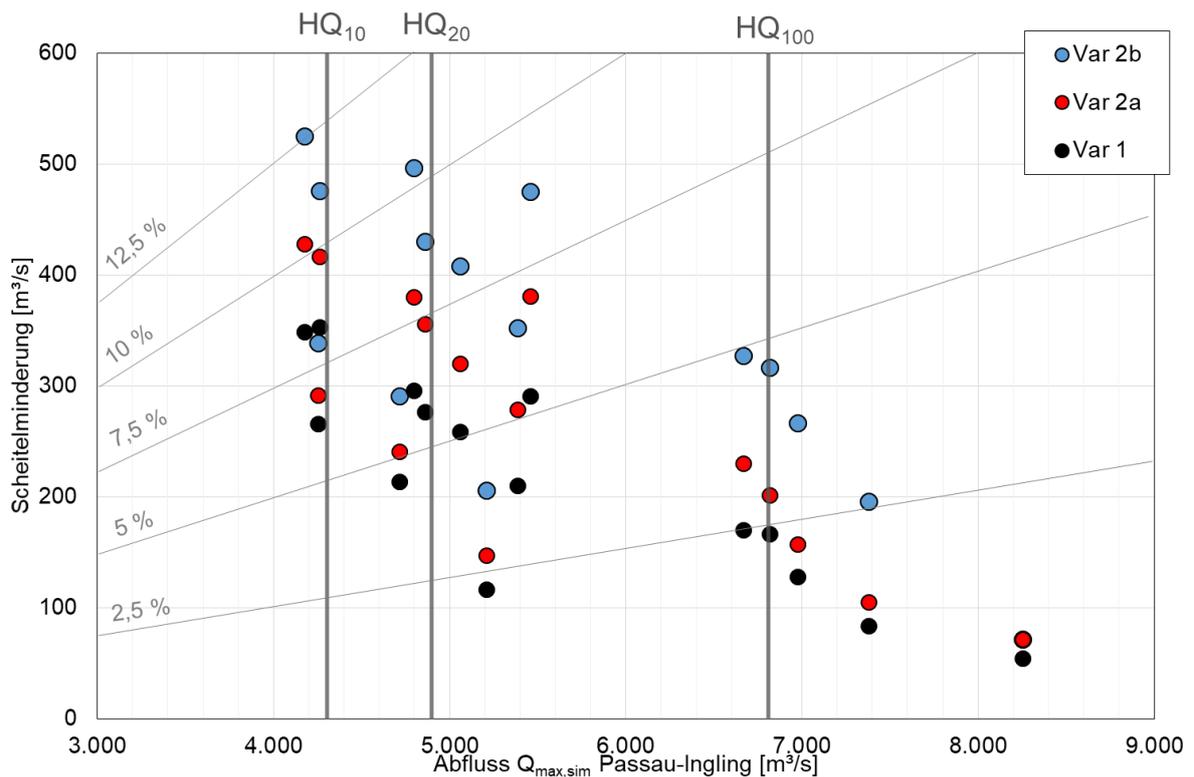


Abbildung 64: Prozentuale Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1, 2a und 2b - Stauraummanagement am unteren Inn

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die erreichbare Scheitelminderung für Variante 1 in einem Abflussbereich von $\Delta Q = 50$ bis $\Delta Q = 350$ m³/s liegt, was 0,7 bis 8,4 % des Scheitelabflusses entspricht. Die Maximalabflüsse, die am Pegel Passau-Ingling nach WBO simuliert wurden, liegen zwischen $Q = 4.176$ und $Q = 8.253$ m³/s.

Durch den höheren Aufstau und damit einem größeren zur Verfügung stehenden Volumen sind die Abminderungen in den Varianten 2a und 2b größer als bei Variante 1. Bei größeren Hochwassern ist der Effekt des zusätzlichen Volumens für die erzielbare Scheitelminderung geringer als bei kleineren Hochwassern. Da bei der Variante 1 die bescheidsgemäßen Stauziele nicht überschritten werden und somit auch nicht die Gefahr von überhöhten Wasserständen im Vergleich mit dem Betrieb gemäß WBO besteht, wird diese Variante als Hauptvariante angesehen. Falls die Varianten 2a und 2b in Betracht gezogen würden, ist der Einfluss des Höherstaus auf die Wasserspiegellagen im Stauraum detailliert zu untersuchen. Bei den Simulationen wurden Rückstauereffekte durch die Überprüfung des UW-Standes berücksichtigt. Am KW Passau-Ingling kommt es wie zuvor beschrieben bei höheren Abflüssen zu merklichen Rückstauereffekten.

6.3 Stauraummanagement am oberen und unteren Inn

Das Untersuchungsprogramm wurde analog zur Erstabschätzung des Potentials an den Anlagen am unteren Inn, Braunau-Simbach bis Passau-Ingling, auch um einen Teil der Anlagen am oberen Inn erweitert. In der folgenden Tabelle 12 sind die Anlagen am bayerischen Inn, von Nußdorf bis Passau-Ingling, aufgetragen. Weiterhin ist das reguläre Stauziel aufgeführt sowie die Information, ob die Wehrbetriebsordnung ein Absenken des Oberwasserstandes im Hochwasserfall vorsieht. Im Falle einer vorgesehenen Absenkung (Absenken WBO ja) ist das Absenkziel aufgeführt. In der rechten Spalte der Tabelle ist vermerkt, an welchen Anlagen das Stauraummanagement durchgeführt wird. Die Anlagen Braunau-Simbach bis Passau-Ingling gehen wie oben beschrieben ebenfalls in die folgend beschriebenen Untersuchungen ein (blau hinterlegt). Am oberen Inn wird an drei Anlagen (Nußdorf, Teufelsbruck und Gars) aufgrund morphologischer Prozesse und rutschgefährdeter Hänge kein Stauraummanagement durchgeführt (orange hinterlegt). In Nußdorf ist eine Absenkvorschrift definiert, da in diesem Stauraum während eines Hochwassers starke morphologische Prozesse (Geschiebeumlagerungen) stattfinden. In Teufelsbruck und Gars, wo kein Absenken gemäß WBO vorgesehen ist, befinden sich nach Angabe der VERBUND AG in den Stauräumen rutschgefährdete Hänge. Der Abstau an den anderen Anlagen am oberen Inn wird auf maximal 1,5 bis 2,0 m durchgeführt. Das KW Jettenbach bildet hierbei eine Ausnahme. Der maximale Abstau beträgt 1,25 m aufgrund des Anschlusses des Kraftwerkskanals des KW Töging.

Tabelle 12: Erweiterung der Betrachtung des Stauraummanagements - Übersicht der Anlagen

Anlage	Reguläres SZ	Absenken WBO	Absenkziel	Stauraummanagement
Nußdorf	464,00	ja	462,50	nein
Rosenheim	451,30	nein	---	ja
Feldkirchen	441,00	ja	440,50	ja
Wasserburg	430,75	ja	430,50	ja
Teufelsbruck	420,50	nein	---	nein
Gars	412,50	nein	---	nein
Jettenbach	403,35	ja	402,50	ja
Neuötting	368,80	nein	---	ja
Perach	361,60	ja	361,00	ja
Stammham	355,10	nein	---	ja
Braunau-Simbach	349,00	ja	348,50	ja
Ering-Frauenstein	336,20	nein	---	ja
Eggfing-Obernberg	325,90	nein	---	ja
Schärding-Neuhaus	314,90	nein	---	ja
Passau-Ingling	303,00	ja	300,00	ja

Für die Betrachtung des gesamten Inns wurde der Fokus auf Variante 1 als Hauptvariante gelegt. In Variante 1 wird der Aufstau an allen berücksichtigten Anlagen bei Stauraummanagement auf die bescheidsgemäßen Stauziele bei Hochwasser (z. T. spezielles

Absenzziel bei Hochwasser, ansonsten reguläres Stauziel) geführt. Auf diese Weise besteht bei Durchgang der Hochwasserwelle nicht die Gefahr von überhöhten Wasserständen, da der Betrieb in den vorgegebenen Grenzen der WBO durchgeführt wird. In Variante 2a wird der Aufstau an den betrachteten Anlagen des oberen und unteren Inns, außer Staustufe Passau-Ingling, auf das reguläre Stauziel geführt. In Passau-Ingling wird in Variante 2a auf 301 müNN aufgestaut (vgl. Seite 74). In Variante 2b wird an allen Anlagen, auch in Passau-Ingling, auf das reguläre Stauziel aufgestaut (vgl. dazu Tabelle 12). Für die Varianten 2a und 2b bleibt für die betreffenden Stauräume zu überprüfen, ob die Erhöhung der Wasserstände durch den Aufstau über die Absenzziele nach WBO eine Gefährdung darstellt.

Die Scheitelminderung am oberen Inn wurde am Pegel Wasserburg, an Inn-km 158,7 ausgewertet und wird in Abbildung 65 als absolute Scheitelminderung des Abflusses für abgelaufene Hochwasserereignisse und Szenarien dargestellt. Für die Szenarien 5 und 8 wurde keine Betrachtung am oberen Inn durchgeführt, da der Abfluss am Pegel Wasserburg zu gering und keine Ausprägung einer Hochwasserwelle erkennbar ist (Vorgabe einer Jährlichkeit von 1 am Pegel Wasserburg). Die Abminderung liegt bei bis zu etwa $\Delta Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ (entsprechend 6 % bei HW 2002). Auch hier ist bei größeren Abflüssen eine Verringerung der Scheitelminderung erkennbar.

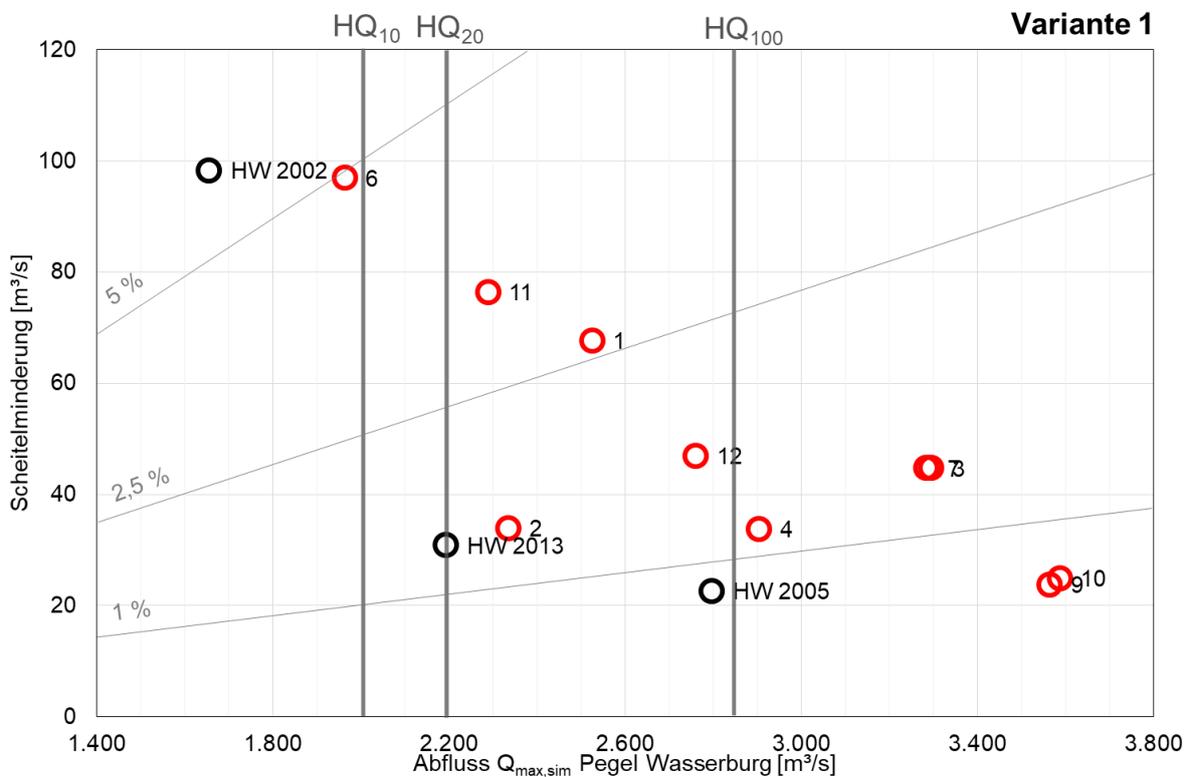


Abbildung 65: Prozentuale Scheitelminderung des Abflusses Pegel Wasserburg - Variante 1 - Stauraummanagement am oberen und unteren Inn

In Abbildung 66 ist die absolute Scheitelminderung des Abflusses in Passau-Ingling für das oben beschriebene Stauraummanagement am unteren Inn (ausgefüllte Punkte) sowie die Ergebnisse des Stauraummanagements am oberen und unteren Inn (unausgefüllte Punkte) dargestellt. Die Pfeile dienen zur Orientierung durch Verbinden der Ergebnisse für ein Szenario beziehungsweise abgelaufenes Hochwasser. Die Erhöhung der Scheitelminderung durch die Berücksichtigung der in Tabelle 12 aufgeführten Anlagen am oberen Inn ist für die betrachteten Ereignisse unterschiedlich groß und beträgt maximal $\Delta Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$ für Szenario 6, was einer Verbesserung der absoluten Minderung von $\Delta Q = 170$ auf $\Delta Q = 278 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht, sowie einer prozentualen Minderung von 2,5 % auf 4,2 %. Tendenziell sind die zusätzlichen Abminderungen bei Ereignissen mit hohem Scheitelabfluss am oberen Inn (beispielsweise 7, 9 und 10) geringer als bei kleineren Abflüssen. Einfluss auf die mögliche Abminderung hat neben der Ganglinienform die Überlagerung mit seitlichen Zubringern. In Abbildung 67 sind die Ergebnisse für das Stauraummanagement am oberen und unteren Inn noch einmal einzeln aufgetragen. Für die abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013 sind Abminderungen von $\Delta Q = 356$, $\Delta Q = 398$ und $\Delta Q = 221 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Stauraummanagement am oberen und unteren Inn erkennbar.

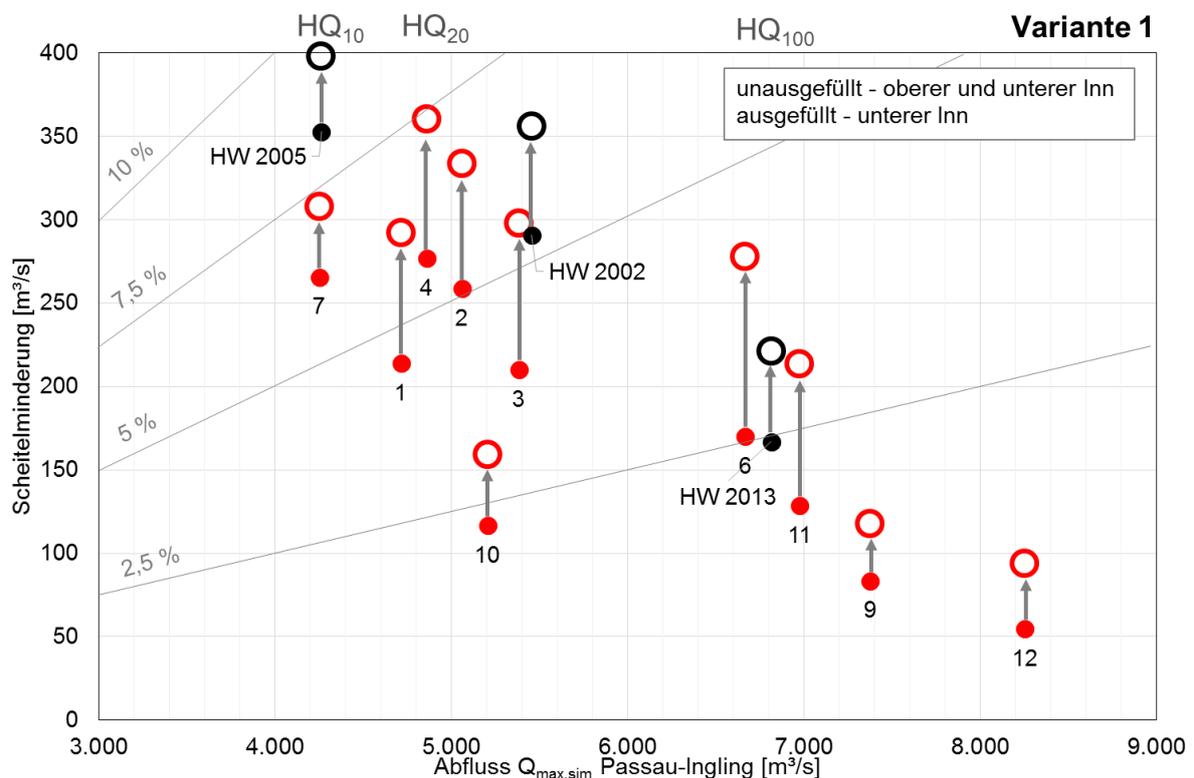


Abbildung 66: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1 - Stauraummanagement für oberen sowie oberen und unteren Inn

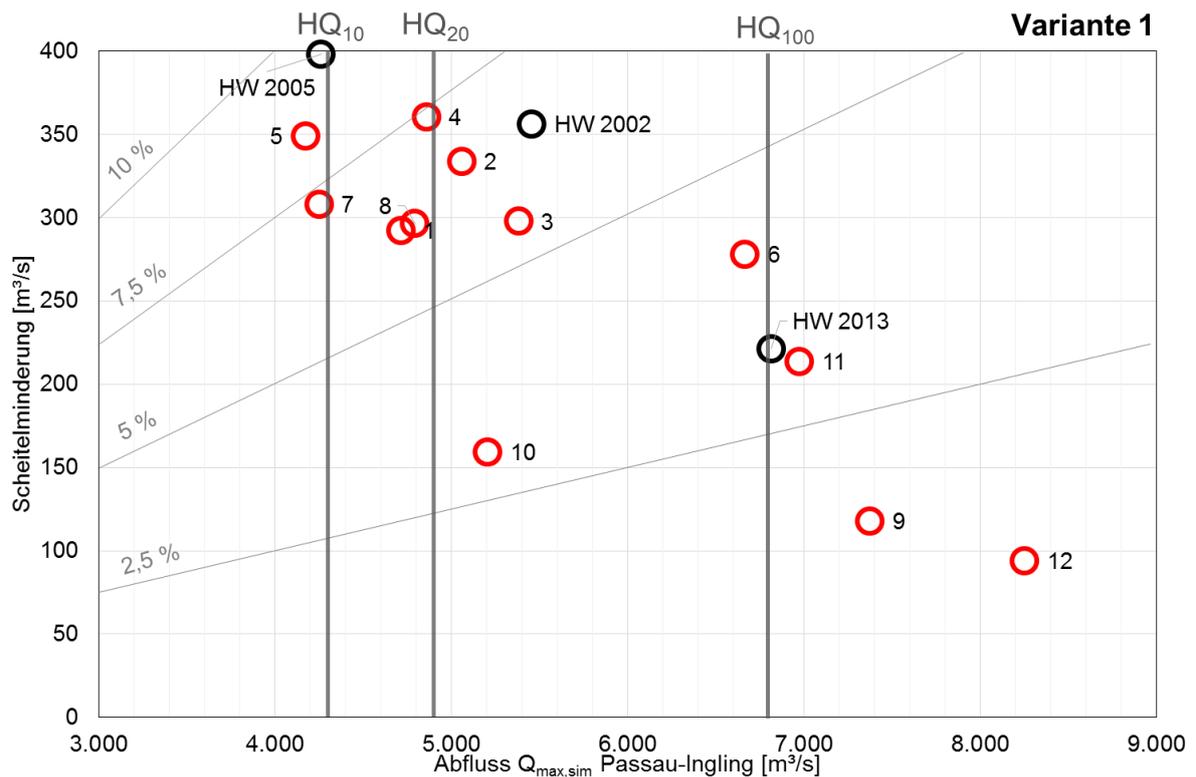


Abbildung 67: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1 - Stauraummanagement am oberen und unteren Inn

Für die abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013 wurden ebenfalls die Varianten 2a und 2b bei Stauraummanagement am oberen und unteren Inn betrachtet. In Abbildung 68 ist die absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling für die unterschiedlichen Varianten bei Stauraummanagement am unteren Inn (ausgefüllte Punkte) sowie am gesamten Inn (oberer und unterer Inn, unausgefüllte Punkte) dargestellt. Es wird zwischen den Ergebnissen der Berechnungen der Varianten 1 (schwarz), 2a (rot) und 2b (blau) unterschieden.

Für die betrachteten Ereignisse sind deutliche Verbesserungen zu erkennen. Die maximal erzielbare Abminderung in Variante 2b beträgt für die abgelaufenen Hochwasser $\Delta Q = 510 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta Q = 551 \text{ m}^3/\text{s}$ und $\Delta Q = 403 \text{ m}^3/\text{s}$. Wie zuvor beschrieben wird der Aufstau in Variante 1 entsprechend der WBO bis auf das Stauziel bei Hochwasser (z. T. Absenktziel, ansonsten reguläres Stauziel) geführt, sodass bei Durchgang großer Abflüsse keine Gefährdung durch erhöhte Wasserstände im Stauraum im Vergleich mit dem Betrieb gemäß WBO auftreten kann.

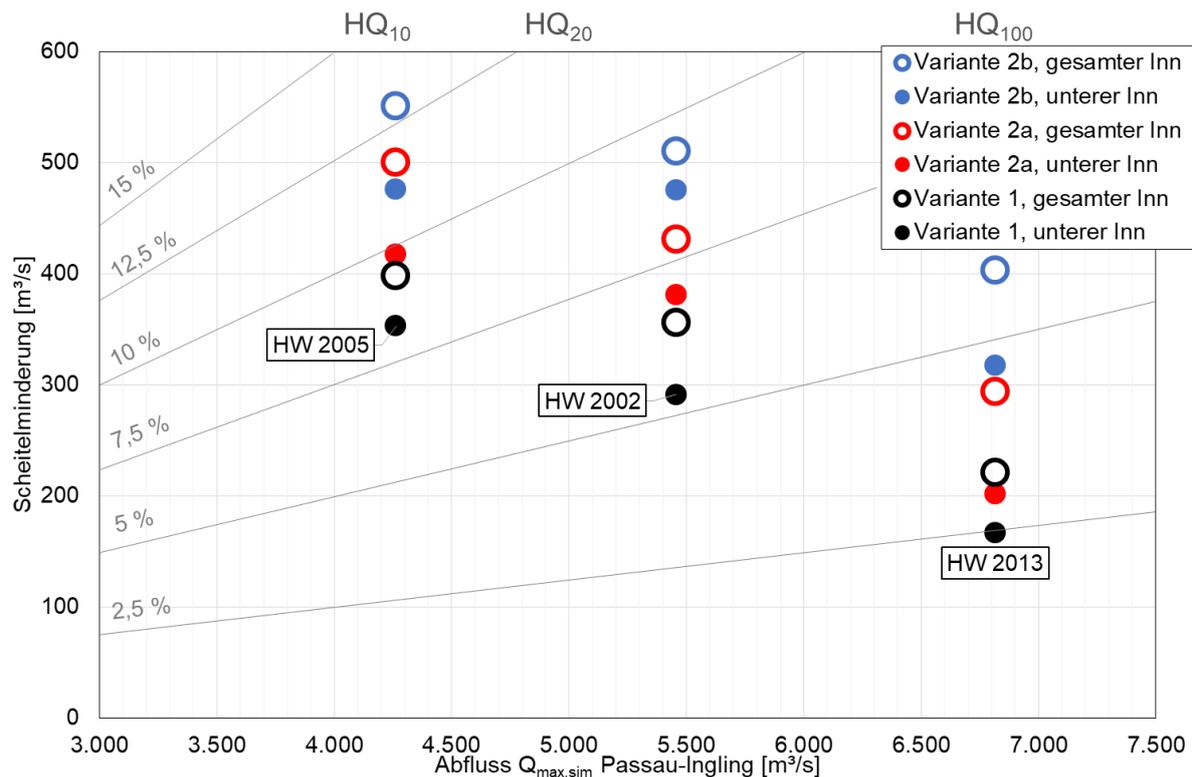


Abbildung 68: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Pegel Passau-Ingling - Variante 1, 2a und 2b - Hochwasser 2002, 2005 und 2013

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Möglichkeit zur Scheitelminderung bei niedrigeren Abflüssen, in einem Abflussbereich von HQ_{10} bis HQ_{30} , größer ist als bei höheren Abflüssen. Bei Maximalabflüssen im Bereich des HQ_{1000} ist die Wirkung gering. Als weiterer Faktor ist die Form der Hochwasserwelle entscheidend. Im Fall eines spitzen Scheitels ist die mögliche Scheitelminderung höher als bei einem breiten Scheitel. In Variante 1 können bei Stauraummanagement des gesamten bayerischen Inns prozentuale Abflussminderungen von 1 bis zu 9,3 % erreicht werden (2002: 6,5 %, 2005: 9,3 %, 2013: 3,2 %). Aufgrund des zusätzlich zur Verfügung stehenden Volumens, das zur Scheitelreduktion genutzt werden kann, sind die erzielbaren Abminderungen in den Varianten 2a und 2b größer als in Variante 1.

Die hier beschriebenen Ergebnisse zur Erstabschätzung des Potentials durch Stauraummanagement zeigen auf, dass ein Potential zur Scheitelabminderung besteht. Eine weitergehende Analyse mit dem Entwurf von konkreten Steuerungsvorgaben ist damit sinnvoll. Die Ergebnisse dieser weitergehenden Analyse und den Umsetzungsaspekten bezüglich des Betriebsreglements, das konkrete Absenk- und Aufstauziele sowie eine Steuerstrategie in Bezug auf Zeitpunkte umfasst, werden in Kapitel 8.4 vorgestellt. Dies umfasst die Beschreibung der Kriterien, anhand derer die Parameter von Absenkung und Aufstau festgelegt wurden, und weitergehende Auswertungen zu Wasserstandsunterschieden und zurückgehaltenen Volumina, die bei Stauraummanagement unter Nutzung der Steuerstrategie

erzielt werden. Im Kontext der entwickelten, konkreten Steuerungsvorgaben werden in Kapitel 8 ebenfalls Einschränkungen und Umsetzungsaspekte sowie notwendige weitergehende Untersuchungen thematisiert, die vor einer Umsetzung durchzuführen sind. Diese Detailuntersuchungen betreffen beispielsweise morphodynamische und ökologische Aspekte, wie den Abstau an Flachwasserbereichen.

7 Wirkungsanalysen von alleinigem Flutpolderbetrieb und kombiniertem Betrieb mit Stauraummanagement

7.1 Zielsetzung und Methodik

Flutpolder sind Hochwasserrückhaltebecken im Nebenschluss und werden als Bestandteil des technischen Hochwasserschutzes eingesetzt, um eine Scheitelminderung eines Hochwassers zu erzielen und damit den Schutz der Anlieger unterstrom des Flutpolders zu verbessern. Bei den Betriebsweisen von Flutpoldern wird zwischen ungesteuertem und gesteuertem Betrieb unterschieden. Bei einem gesteuerten Polderbetrieb sind unterschiedliche Betriebsstrategien möglich, von der Steuerung nach fester und ereignisunabhängiger Vorgabe bis hin zu einer adaptiven Steuerung, bei der Vorgaben im laufenden Polderbetrieb angepasst werden können (DWA 2014).

Zur Ermittlung der gegenseitigen Beeinflussung des Betriebes von Flutpoldern und dem Stauraummanagement wurde das erstellte Kettenmodell des Inns um den Flutpolder Feldkirchen, für den bereits Planungsüberlegungen vorliegen, und um einen möglichen Flutpolderstandort unterstrom der Salzachmündung, Flutpolder Ering, erweitert. Das Einbinden der Flutpolder in das HN-Modell erfolgte unter Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung und des vorhandenen Rückhaltevolumens. Anhand der Untersuchung unterschiedlicher Schwellenwerte für die Beaufschlagung der Flutpolder wurde eine vereinfachte Wirkungsanalyse des Flutpolderbetriebes durchgeführt, um ein vertieftes Systemverständnis für den Einfluss des Betriebs im Nah- und Fernbereich zu erlangen. Bezogen auf den Flutpolder Feldkirchen wird auch die Wirkung im Fernbereich am Pegel Passau-Ingling, der etwa 170 km entfernt liegt, analysiert; es wird jedoch kein überregionaler Einsatz des Flutpolders mit Fokus auf den Fernbereich unterhalb der Salzachmündung betrachtet. Zwischen dem Polder Ering und dem Pegel Passau-Ingling beträgt die Entfernung etwa 47 km. Im Gegensatz zu den Wirkungsanalysen im Teilprojekt D erfolgt in der hier dargestellten Wirkungsanalyse keine spezielle Berücksichtigung lokaler oder überregionaler Einsatzkriterien. Im Rahmen der Wirkungsanalyse werden keine realen und umsetzbaren Steuerungsvorgaben definiert, die auf operationell zur Verfügung stehenden Daten basieren. Der Fokus zur Definition der Polderfüllung liegt bei den betrachteten Hochwassern

unterschiedlicher Jährlichkeit jeweils auf dem Nahfeld des Flutpolders. Es wird analysiert, wie sich die Füllprozesse und die zurückgehaltenen Volumina im Nah- und Fernbereich unter den angenommenen vereinfachten Einsatzszenarien auswirken. Es wurde eine Grobparametrierung der Steuerungsfunktion der Flutpolder durchgeführt, um Betriebsvorgaben (zum Beispiel maximaler Zufluss) und physikalische Gegebenheiten realistischer abzubilden. Die Vorschrift zur Füllung des Polders bezieht sich auf den Abfluss an einem Ort, der sich oberstrom beziehungsweise in der direkten Nähe des Polders befindet. In Bezug auf diesen Referenzabfluss wird ein Schwellenwert festgelegt. Die Definition des Schwellenwertes erfolgt in Abhängigkeit des Maximalabflusses am Referenzort, welcher als exakt bekannt angenommen wird. Das Volumen der Ganglinie oberhalb des Schwellenwertes wird in den Polder eingelagert, indem die Abflusssdifferenz zwischen Ganglinie des Referenzortes und Schwellenwert zur Beaufschlagung des Polders genutzt wird. Die Definition der Polderfüllung und der Restriktionen wird in Kapitel 7.2 detailliert erläutert. In Kapitel 9 werden aufbauend auf der Wirkungsanalyse des Flutpolderbetriebes Steuerungsoptionen für den Betrieb des Flutpolders Feldkirchen diskutiert.

7.2 Einbinden des Flutpolders Feldkirchen ins HN-Modell

Lage und Größe des Flutpolders Feldkirchen

Die Polderfläche des geplanten Flutpolders Feldkirchen befindet sich rechtsseitig des Inns im Stauraum Feldkirchen (Abbildung 69). Der geplante Einlaufbereich des Einlaufbauwerkes liegt zwischen Inn-km 176,04 bis 176,1 und damit etwa 3 km oberhalb des Kraftwerks Feldkirchen (vgl. Abbildung 71). Die geplante Lage und Umgrenzung des Polders sowie Informationen zur geplanten Betriebsweise wurden ebenfalls von der TUM zur Verfügung gestellt.

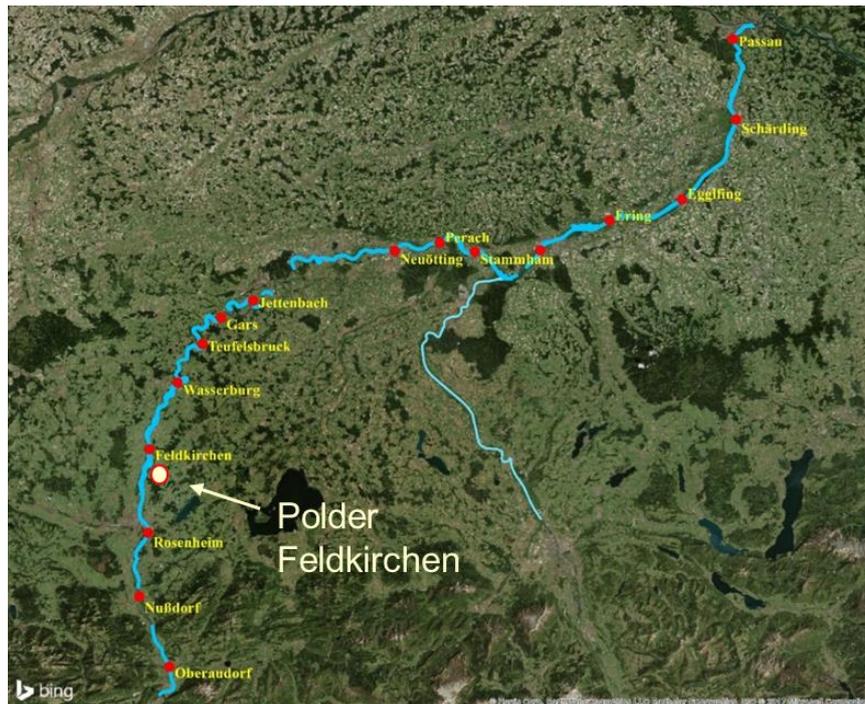


Abbildung 69: Lage des Polders Feldkirchen (Kartenhintergrund BING Maps – © Harris Corp, Earthstar Geographics LLC Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)

Aus dem vorliegenden DGM1 wurde der Bereich des Polders zur weiteren Bearbeitung ausgeschnitten (Abbildung 71 links). Hier sind in dunklerem Grün die Vertiefungen innerhalb der Polderfläche sowie in Gelb- und Rottönen die seitlichen Begrenzungen der Polderfläche zu sehen. Der Flussschlauch des Inns wird im Nahbereich der Staustufe Feldkirchen und damit auch im Bereich des Flutpolders von Stauhaltungsdämmen begrenzt. In Abbildung 70 ist das Querprofil an Inn-km 176,0 dargestellt. Die Stauhaltungsdämme auf der linken sowie rechten Seite sind deutlich zu erkennen. Die roten Punkte kennzeichnen den Bereich des Flussschlauches, der zur Erstellung des 1D-HN-Modells genutzt wurde. Das Gelände der Polderfläche rechts des Flussschlauches liegt auf einem niedrigeren Höhenniveau als die Flusssohle.

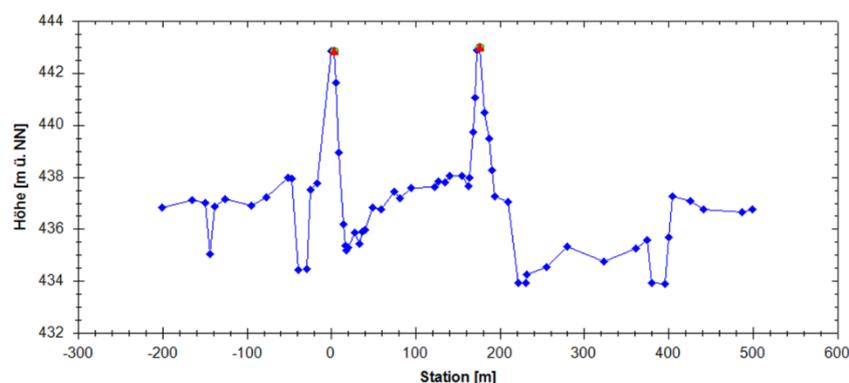


Abbildung 70: Querprofil an km Inn-176,0 im Stauraum Feldkirchen

Zur modelltechnischen Abbildung des Polders im Kettenmodell wurde die überflutete Polderfläche und das zugehörige Volumen in Abhängigkeit des Wasserstandes ermittelt. Hierzu wurde zunächst das DGM1 des Polderbereichs mit der gegebenen Umgrenzung verschnitten, darauffolgend die überfluteten Flächen und zugehörige Volumina verschiedener Wasserstände als Differenz berechnet. Die sich so ergebenden überfluteten Flächen bei den in der Legende angegebenen Wasserständen sind in Abbildung 71 rechts zu sehen. Auch hier treten die Vertiefungen in Blautönen hervor.

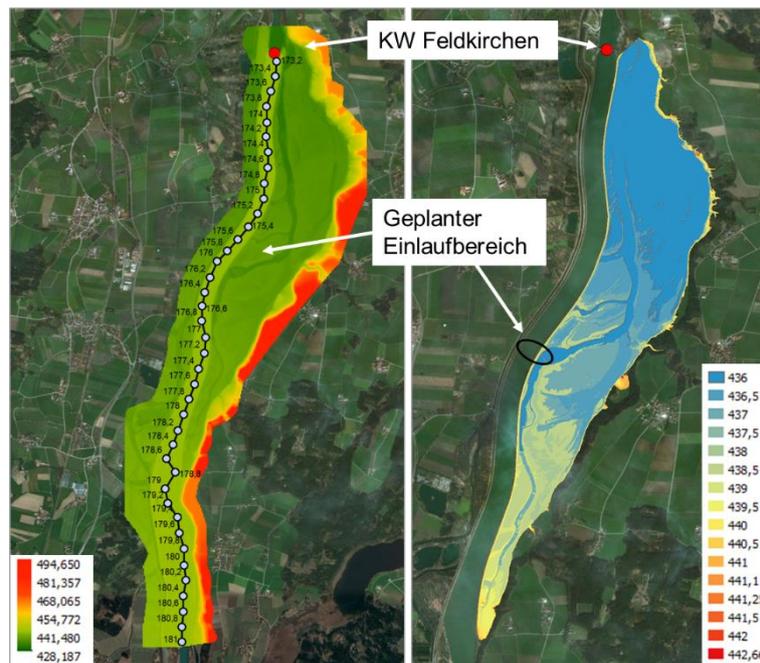


Abbildung 71: DGM des Polderbereichs Feldkirchen (links) und überflutete Flächen bei ausgewählten Höhenlinien (rechts) (Kartenhintergrund BING Maps – © 2020 Microsoft Corporation © 2020 Maxar © CNES (2020) Distribution Airbus DS)

Die auf die beschriebene Weise im GIS ermittelten Flächen (sekundäre x-Achse, schwarz) und zugehörigen Volumina (primäre x-Achse, rot) sind in Abbildung 72 in Abhängigkeit des Wasserstandes dargestellt. Flächen und Volumina wurden im Abstand von 0,5 m ausgewertet, zusätzlich detaillierter im Bereich des maximalen Wasserstandes von 441,1 müNN (schwarze Punkte als Markierung). Laut der von der TUM weitergegebenen Unterlagen beträgt das Poldervolumen 17,4 Mio. m³ bei einer Stauhöhe von 441,1 müNN. Dies wird durch die durchgeführte Auswertung wiedergegeben.

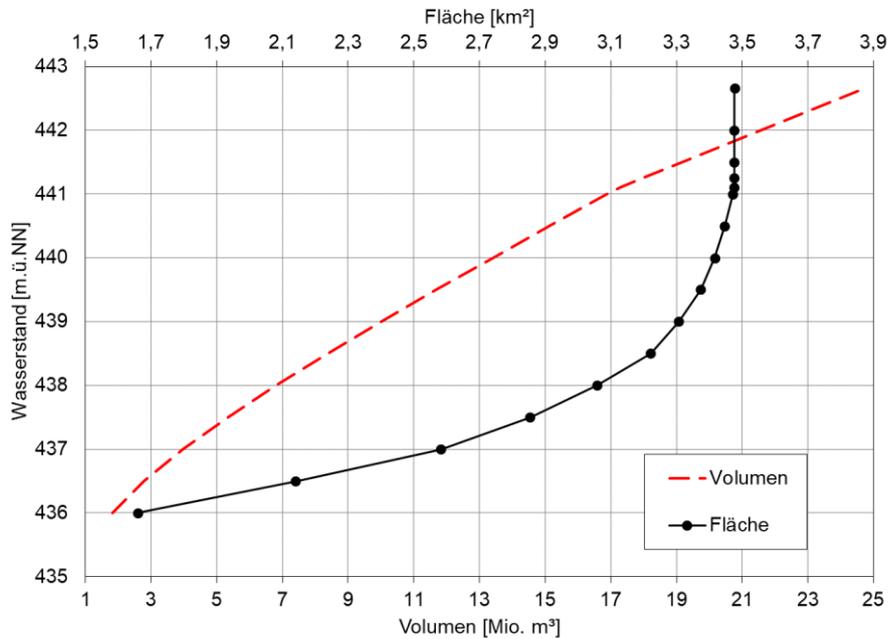


Abbildung 72: Überflutete Fläche und Rückhaltevolumen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Polder Feldkirchen

In Abbildung 73 ist eine Schemaskizze der modelltechnischen Abbildung des Stauraumes Feldkirchen mit Anbindung des Flutpolders Feldkirchen dargestellt. Die Längenverhältnisse sind dabei nicht maßstäblich. Der Poldereinlauf befindet sich an Inn-km 176, die Polderfläche wird über eine Retentionszelle mit hinterlegten Größenverhältnissen abgebildet. Sowohl der Zulauf des Polders als auch der Ablauf sind als regelbare Elemente implementiert.

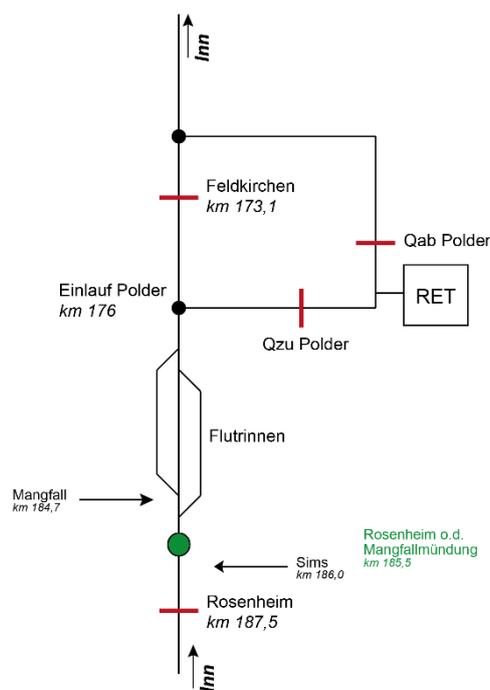


Abbildung 73: Schema des Stauraumes und des Flutpolders Feldkirchen

Implementierung und Grobparametrierung der Steuerungsfunktion des Flutpolders Feldkirchen

Der Flutpolder wurde wie beschrieben in das 1D-HN-Kettenmodell integriert. Da zwischen 2005 und 2009 (Peilung als Gleichgewichtszustand definiert) eine Aufweitung im Stauraum Feldkirchen durchgeführt wurde, liegen zwei Kettenmodelle vor, die den Zustand vor und nach der Aufweitung abbilden. Beide Kettenmodelle wurden um den Flutpolder Feldkirchen erweitert. Das Kettenmodell, das den Zustand vor der Erweiterung abbildet, wurde zur Simulation der Hochwasser 2002 und 2005 genutzt. Für das HW 2013 und die stochastischen Ereignisse wurde die Geometrie genutzt, die die Aufweitung enthält.

Der Zufluss in den Polder $Q_{zu,Polder}$ wird basierend auf dem Zufluss des Inns in die Stauhaltung Feldkirchen, der Abgabe am Kraftwerk Rosenheim, $Q_{ab,Rosenheim}$, definiert. Dieses $Q_{ab,Rosenheim}$ wird um einen konstanten Betrag Q_{const} verringert und als Polderzufluss festgelegt. Der Abfluss oberhalb dieses Schwellenwertes Q_{const} wird in den Polder eingelagert. Bei den Simulationen wird angenommen, dass der Maximalabfluss des Hochwassers am KW Rosenheim durch eine Vorhersage bekannt ist. Q_{const} wird in Abhängigkeit des Maximalabflusses definiert, sodass das zur Verfügung stehende Poldervolumen nahezu vollständig genutzt wird. Die Abflussweitergabe unterstrom des Polders am KW Feldkirchen erfolgt nicht immer konstant, da die Mangfall zwischen KW Rosenheim und Poldereinlauf einmündet und zunächst nicht bei der Definition der Füllvorschrift berücksichtigt wird.

Da das Augenmerk der Untersuchungen auf der Reduzierung des Hochwasserscheitels und somit auf dem Füllvorgang des Polders liegt, wird die Entleerung des Polders nicht simuliert.

Bei den durchgeführten Untersuchungen handelt es sich wie zuvor erläutert um theoretische Betrachtungen, basierend auf der Annahme, dass der Abfluss exakt vorausgesagt und gemessen wird, was in der Realität nicht der Fall ist.

Die Vorschrift zur Füllung des Polders Feldkirchen lautet:

$$Q_{zu,Polder} = Q_{ab,Rosenheim} - Q_{const}$$

Für den Betrieb des Flutpolders Feldkirchen wurden weiterhin verschiedene Nebenbedingungen der Steuerung definiert. Diese dienen dazu, Beschränkungen und hydraulische Randbedingungen einzubeziehen und die Betriebsweise realistischer abzubilden.

- I. Der maximale Zufluss zum Polder beträgt $Q_{zu,Polder,max} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ laut der von der TUM weitergegebenen Informationen.

- $Q_{zu,Polder,max} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$
- II. Der maximale Füllstand des Polders beträgt 441,10 müNN, das heißt, dass bei diesem Wasserstand der Zufluss zum Polder $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Um eine allzu plötzliche Änderung des Zuflusses auf $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ zu vermeiden, werden die folgenden Begrenzungen bezüglich des maximalen Polderzuflusses vorgegeben. Zwischen den Stützpunkten wird der maximale Zufluss linear interpoliert.
- $y_{Polder,max} = 441,00 \text{ müNN} \rightarrow Q_{zu,Polder,max} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $y_{Polder,max} = 441,05 \text{ müNN} \rightarrow Q_{zu,Polder,max} = 350 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $y_{Polder,max} = 441,10 \text{ müNN} \rightarrow Q_{zu,Polder,max} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
- III. Die Änderung des Zuflusses in den Polder (Gradient) wird begrenzt. Bei einsetzender Polderfüllung bis zu einem Füllstand von $y_{Polder} = 436,00 \text{ müNN}$ wird die Abflussänderung auf $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 10 Minuten zum Schutz vor Erosion begrenzt. Im allgemeinen Betrieb beträgt die maximale Abflussänderung $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 1 Minute sowohl für zunehmendes als auch abnehmendes $Q_{zu,Polder}$.
- Bei einsetzender Polderfüllung bis zu $y_{Polder} = 436,00 \text{ müNN}$ (Erosion)
 - $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 10 Minuten
 - Allgemeiner Betrieb: Bei Polderfüllung ab $y_{Polder} = 436,00 \text{ müNN}$ (zunehmendes $Q_{zu,Polder}$)
 - $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 1 Minute
 - Bei Verringern des Zuflusses (abnehmendes $Q_{zu,Polder}$)
 - $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 1 Minute
- IV. Es erfolgt eine Prüfung, ob die Füllung des Polders hydraulisch möglich ist. Um die Füllung des Polders zu gewährleisten, muss ein Gefälle zwischen den Wasserständen im Inn und im Polder vorhanden sein. Verringert sich das Gefälle und es liegt rückgestauter Abfluss vor, wird der maximale Zufluss begrenzt. Ist die nachfolgende Bedingung erfüllt, liegt rückgestauter Abfluss vor: $y_u - y_s > \frac{2}{3} \cdot (y_o - y_s)$

Der maximale Polderzufluss $Q_{zu,max,Polder}$ wird anhand der folgenden Formel berechnet:

$$Q = \mu \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot (y_u - y_s) \cdot (y_o - y_u)^{1/2} \quad (1)$$

Die folgende Abbildung 74 dient zur Veranschaulichung der in der Formel angegebenen Größen. Die Sohle des Inns ergibt sich aus dem Querprofil an Inn-km 176 und beträgt im Mittel $y = 438,00$ müNN. Unter der Annahme, dass die Einlaufschwelle des seitlichen Bauwerkes 1 m oberhalb der Sohle liegt, beträgt $y_s = 439,00$ müNN.

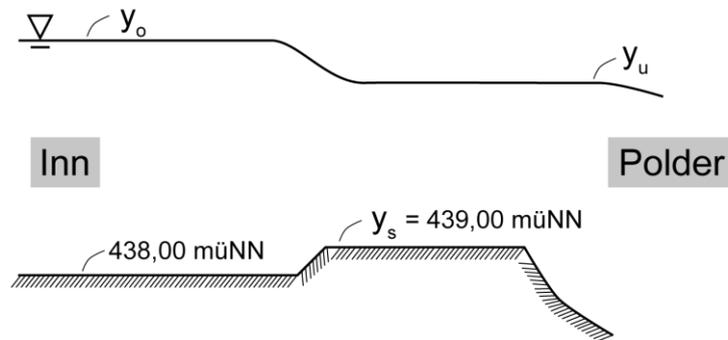


Abbildung 74: Rückgestauter Abfluss – Polder Feldkirchen

Nachfolgend wird beispielhaft die Abflussleistungsfähigkeit bei rückgestautem Abfluss bei einem Innwasserstand von $y_o = y_{\text{Inn}} = 441,30$ müNN gemäß Formel 1 betrachtet. Für Wasserstände im Polder y_u zwischen 440,60 bis 441,30 müNN wurden die Differenzen der Wasserstände von Inn und Polder, $y_o - y_u = \Delta y$ sowie der zugehörige maximale Zufluss $Q_{\text{zu,max,Polder}}$ berechnet (vgl. Tabelle 13). Als abflusswirksame Breite des Bauwerkes wird $B = 45$ m angenommen.

Tabelle 13: $Q_{\text{zu,Polder,max}}$ in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz – Polder Feldkirchen

Δy [m]	$Q_{\text{zu,Polder,max}}$ [m³/s]
0,70	133,41
0,60	131,24
0,50	126,85
0,40	119,76
0,30	109,17
0,25	102,15
0,20	93,60
0,15	82,99
0,10	69,34
0,05	50,14
0,00	0,00

Zur Ermittlung des Abflusses bei Rückstau wird während der Simulation die Differenz der Wasserstände im Inn und Polder bestimmt (Δy) und der maximale Zufluss entsprechend der in Tabelle 13 dargestellten Werte ermittelt. Die Zuordnung des Zuflusses in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz gemäß Tabelle 13 stellt eine Vereinfachung dar, ist jedoch bezüglich der vorliegenden Bearbeitungstiefe zulässig.

Die hier angenommenen Kenngrößen dienen dazu, das hydraulische Verhalten eines Einlaufbauwerkes in der Simulation grob abzuschätzen. Die Kenngrößen sind dabei nicht als Vorschlag einer möglichen Dimensionierung anzusehen, sondern es werden simulationsbedingt Annahmen getroffen, um Zuflussgrößen und Rückstaueffekte abzuschätzen.

7.3 Simulationen mit Polderbetrieb Feldkirchen

Simulation der abgelaufenen Hochwasserereignisse HW 2002, 2005 und 2013

Es wurden Simulationen der abgelaufenen Hochwasserereignisse mit unterschiedlichen Q_{const} als Vorgabe in der Steuerungsvorschrift durchgeführt. Diese dienen wie oben erläutert zur Untersuchung der Sensitivität des Systems und vermitteln ein Prozessverständnis im Hinblick auf die Wirkung des Polderbetriebs. Der Zufluss der Mangfall wird zunächst nicht in der Poldervorschrift berücksichtigt. Im zweiten Schritt wurde die Mangfall mitbetrachtet, die Darstellung dieser Ergebnisse erfolgt später.

Es werden im Folgenden zunächst die Simulationsergebnisse des HW 2005 dargestellt, das am Pegel Wasserburg ein Ereignis von $H_{Q_{100}}$ darstellt. Abbildung 75 zeigt den Zufluss in den Stauraum Feldkirchen ($Q_{\text{ab Rosenheim}}$, blau) sowie den Abfluss am KW Feldkirchen gemäß WBO ohne Polderbetrieb (gelb). Der Zufluss der Mangfall, der hier nicht in die Steuerungsvorschrift eingeht, ist mit aufgetragen (orange gestrichelt) und beträgt maximal $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$. Der maximale Abfluss am Kraftwerk Rosenheim beträgt beim HW 2005 etwa $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Wird eine Abflussdifferenz von $\Delta Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, bezogen auf den Maximalabfluss am KW Rosenheim, angesetzt, die durch den Polderbetrieb verringert werden soll, ergibt sich ein Q_{const} von $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abfluss oberhalb dieses Schwellenwertes Q_{const} , der in der Abbildung 75 grau gestrichelt dargestellt ist, wird in den Polder eingelagert (grün).

Der um die Abgabe in den Polder verringerte Abfluss am KW Feldkirchen ist in Rot dargestellt. Trotz der Nichtberücksichtigung der zufließenden Nebengewässer, insbesondere der Mangfall, ist die Abflussweitergabe zumindest ab Simulationsstunde 67 nahezu konstant. Ab diesem Zeitpunkt steigt der Zufluss der Mangfall nicht weiter an. Da die Mangfall bei den gezeigten Simulationen nicht in die Füllvorschrift einbezogen wird, beeinflusst der seitliche Zufluss wie oben beschrieben die Abflussweitergabe unterstrom des Polders und führt in der ersten Phase der Polderfüllung zu einem zu frühen und zu hohen Zufluss in den Polder. Auf der Sekundärachse (rechte y-Achse) sind weiterhin der Wasserstand im Polder (schwarz) und der Wasserstand an Inn-km 177 (lila), 1 km oberhalb des Poldereinlaufes, dargestellt. Der Maximalwasserstand im Polder von 441,1 müNN wird durch die Polderbeaufschlagung nahezu erreicht und somit wird eine komplette Polderfüllung erzielt.

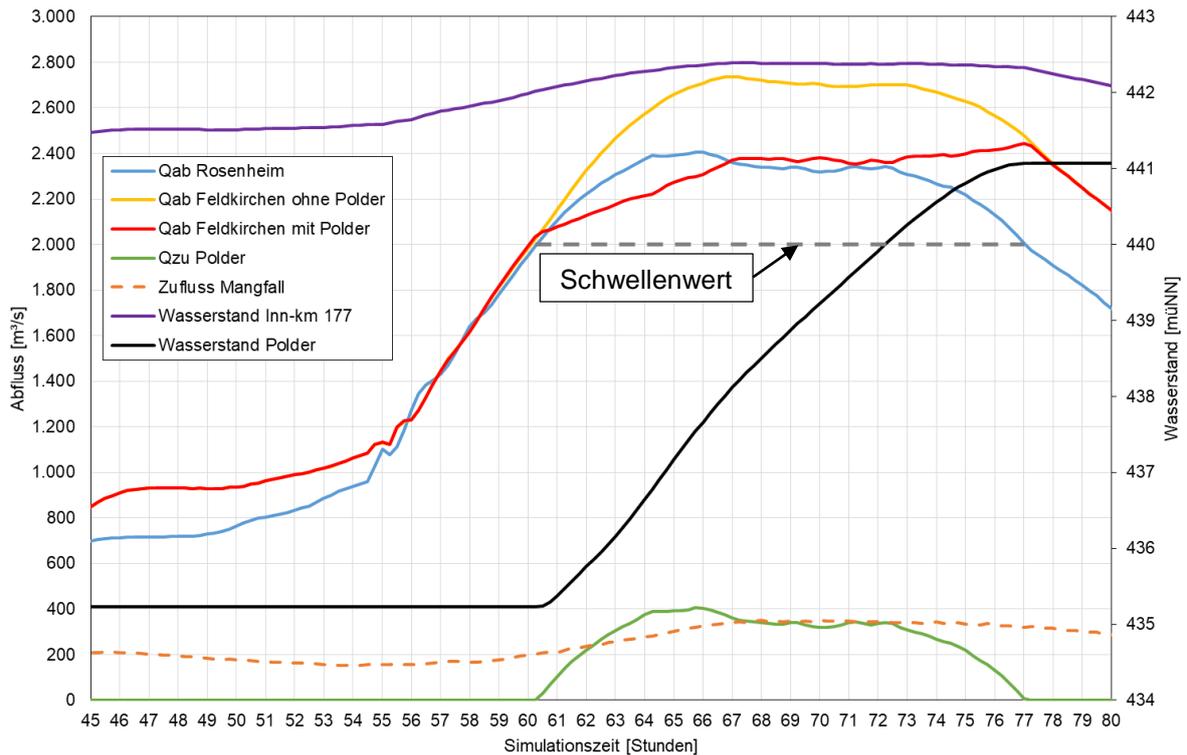


Abbildung 75: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Abbildung 76 zeigt die Scheitelminderung, die durch den Polderbetrieb erreicht wird, an verschiedenen Orten des Inns für das HW 2005. Durch die Abgabe in den Polder (hellgrün) wird eine deutliche Verringerung am Kraftwerk Feldkirchen von $\Delta Q = 292 \text{ m}^3/\text{s}$ (gelb/rot) erreicht. Am Kraftwerk Stammham (grün/braun), vor Zusammenfluss des Inns mit der Salzach, ist eine Veränderung der Ganglinienform und eine ähnlich große Reduzierung wie am KW Feldkirchen erkennbar. Am Pegel Passau-Ingling (orange/blau) ergibt sich eine Reduzierung des Scheitelabflusses von $\Delta Q = 247 \text{ m}^3/\text{s}$.

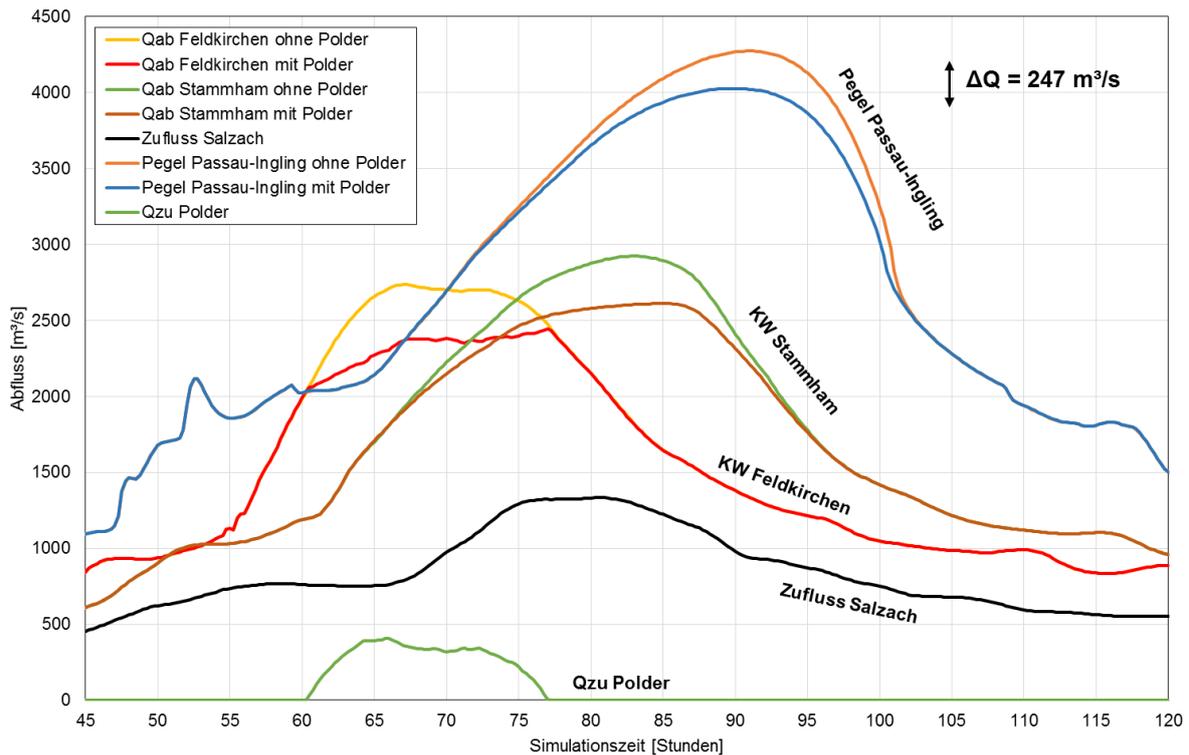


Abbildung 76: HW 2005, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{\text{const}} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Für das HW 2005 wurden zwei weitere Varianten zur Analyse des Systemverhaltens in Bezug auf die Wirkung im Nah- und Fernbereich untersucht, die sich in der Vorgabe von Q_{const} unterscheiden. Sollen $\Delta Q = 650 \text{ m}^3/\text{s}$ bezogen auf den Maximalabfluss am KW Rosenheim im Polder zurückgehalten werden, ergibt sich ein $Q_{\text{const}} = 1750 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Kappung findet unter Vorgabe des geringeren Q_{const} bereits deutlich früher und mit einem größeren Zufluss in den Polder statt (Abbildung 77). Nach etwa 10 Stunden ist der maximale Füllstand des Polders erreicht und der maximale Zufluss zum Polder wird entsprechend der beschriebenen Nebenbedingungen reduziert. Durch die Verringerung des Polderzuflusses um $\Delta Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ in etwa 45 Minuten ergibt sich ein schlagartiger Anstieg des Abflusses am KW Feldkirchen (rot). Der Polder wird für das angenommene Q_{const} zu früh gefüllt. Die Scheitelreduzierung am Pegel Passau-Ingling liegt für diese Simulation bei $\Delta Q = 174 \text{ m}^3/\text{s}$.

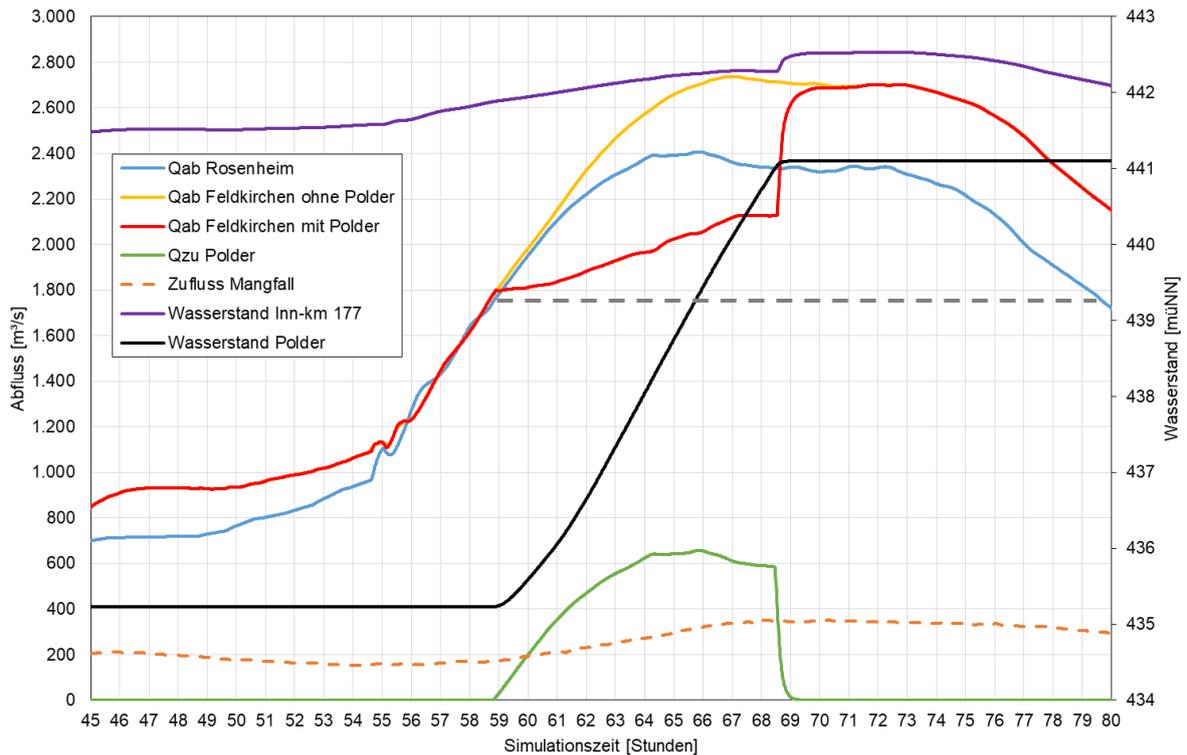


Abbildung 77: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{\text{const}} = 1.750 \text{ m}^3/\text{s}$

Weiterhin wurde eine Simulation durchgeführt, bei der als Vorgabe $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, bezogen auf den Maximalabfluss am KW Rosenheim, zurückgehalten werden soll, sodass $Q_{\text{const}} = 2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt (Abbildung 78). In diesem Fall ist die Abgabe in den Polder deutlich geringer, als es möglich wäre, der Polder ist lediglich zu rund 36 % gefüllt. Die Scheitelreduzierung am Pegel Passau-Ingling ist geringer und liegt bei $99 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Simulationsergebnisse für die Simulationen mit unterschiedlichen Q_{const} sind für den Pegel Wasserburg in Tabelle 14 und für den Pegel Passau-Ingling in Tabelle 15 dargestellt.

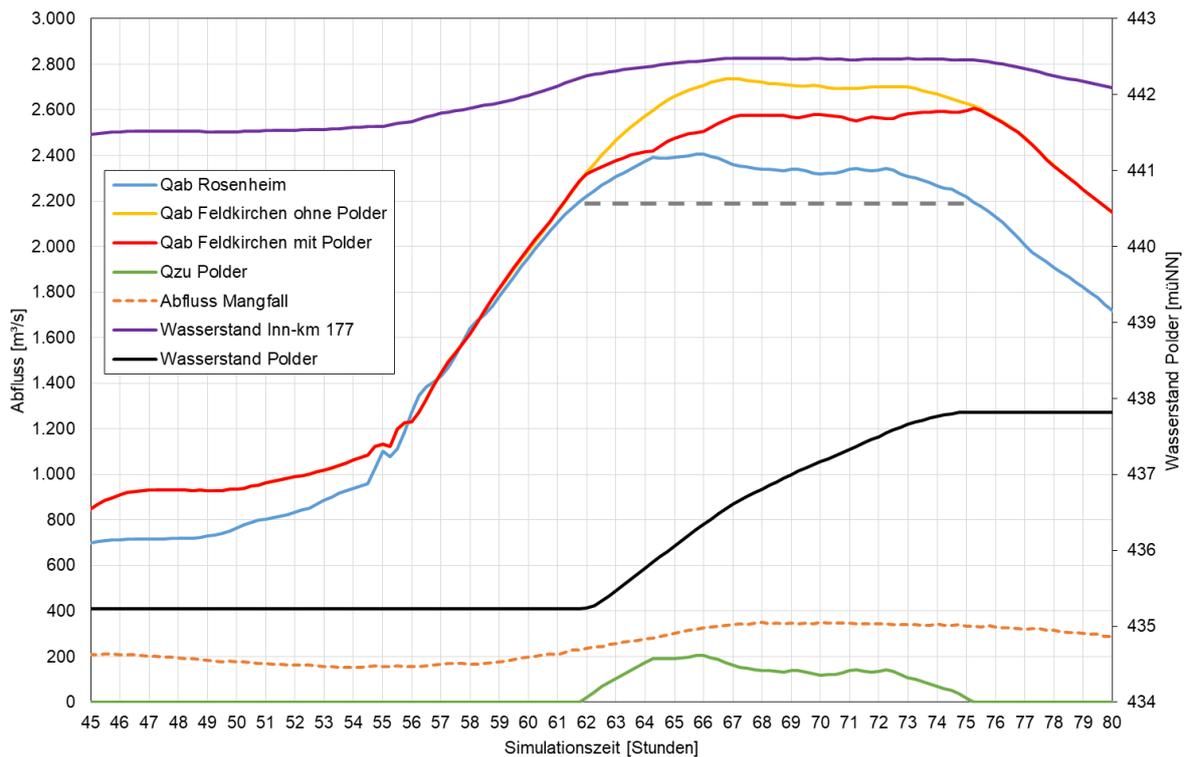


Abbildung 78: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{\text{const}} = 2.200 \text{ m}^3/\text{s}$

Im Nachfolgenden sind ausgewählte Simulationsergebnisse für das HW 2002 in Abbildung 79 und Abbildung 80 dargestellt. Der Maximalabfluss am KW Rosenheim beträgt für das HW 2002 etwa $Q = 1.350 \text{ m}^3/\text{s}$ und stellt damit in diesem Abschnitt des Inns keinen Überlastfall dar. Ein lokaler Einsatzfall wäre somit eigentlich nicht gegeben, gleichwohl wurde ein entsprechender Flutpolderbetrieb hier zum Verständnis und Analyse der Systemreaktionen durchgeführt. Bei einer Vorgabe von $\Delta Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, die bezogen auf den Maximalabfluss am KW Rosenheim in den Polder eingelagert werden sollen, beträgt der Schwellenwert $Q_{\text{const}} = 950 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abbildung 79). Insbesondere durch den Einfluss der Mangfall und die Laufzeit zwischen KW Rosenheim und dem Poldereinlauf ist die Abflussweitergabe unterstrom des Polders am KW Feldkirchen nicht konstant. Der maximale Füllstand des Polders wird nicht erreicht, der Polder ist zu rund 95 % gefüllt. Am Pegel Passau-Ingling ergibt sich eine Scheitelreduzierung von $\Delta Q = 177 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abbildung 80).

Für das HW 2002 wurden ebenfalls zwei weitere Untersuchungen für $Q_{\text{const}} = 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie $Q_{\text{const}} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Wird für die Poldersteuerung ein niedrigeres Q_{const} eingesetzt und die Polderfüllung beginnt zu früh und mit zu hohem Zufluss, beträgt die Reduzierung am Pegel Passau-Ingling $\Delta Q = 165 \text{ m}^3/\text{s}$. Wird die Polderfüllung unter Vorgabe eines höheren Q_{const} durchgeführt und damit mit einem geringeren Zufluss, ist die Reduzierung am Pegel Passau-Ingling geringer und beträgt $Q = 134 \text{ m}^3/\text{s}$, der Polder ist zu 74 % gefüllt.

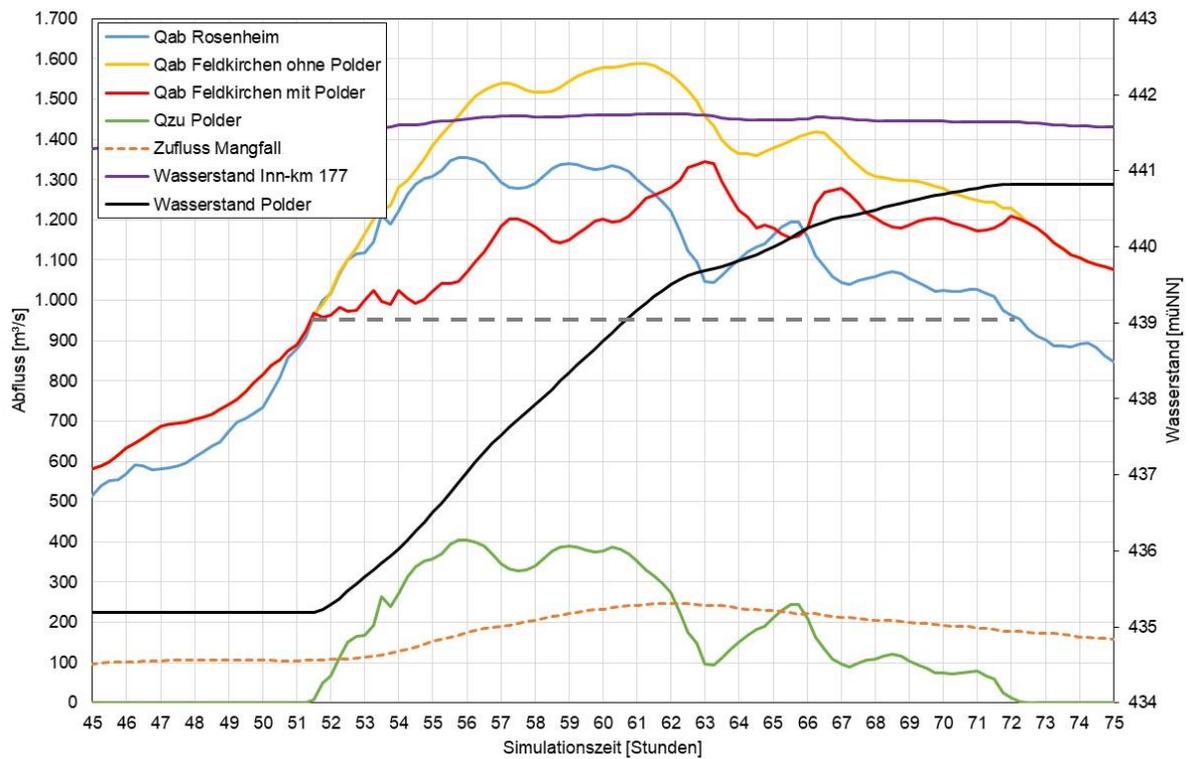


Abbildung 79: HW 2002, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 950 \text{ m}^3/\text{s}$

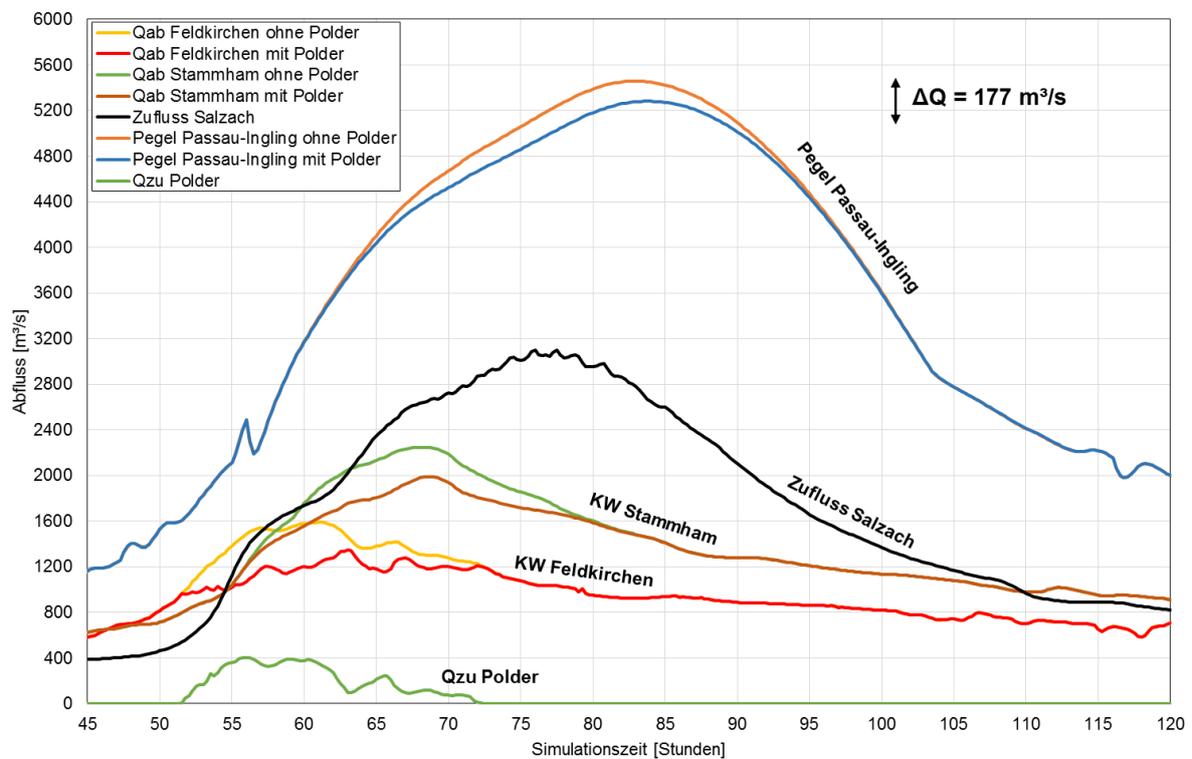


Abbildung 80: HW 2002, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 950 \text{ m}^3/\text{s}$

Für das HW 2013 wurden ebenfalls verschiedene Abflüsse Q_{const} zur Vertiefung des Systemverständnisses simuliert (die oben beim HW 2002 beschriebenen Hinweise gelten

entsprechend) und nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Der maximale Abfluss am Kraftwerk Rosenheim beträgt etwa $Q = 1.700 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Falle des HW 2013 wird eine möglichst große Scheitelkappung erzielt unter der Vorgabe, dass $\Delta Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, bezogen auf den Maximalabfluss am KW Rosenheim, in den Polder abgegeben werden soll. Der Schwellenwert beträgt demnach $Q_{\text{const}} = 1.400 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Simulationsergebnisse am KW Feldkirchen (Abbildung 81) und für den Verlauf des Inns (Abbildung 82) sind in den beiden nachfolgenden Diagrammen für $Q_{\text{const}} = 1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ dargestellt. Das HW 2013 weist am Pegel Wasserburg eine Jährlichkeit von 20-50 Jahren auf. An der Mangfall wurde ein maximaler Abflusswert von $Q = 470 \text{ m}^3/\text{s}$ aufgezeichnet, der den höchsten Abflusswert im Beobachtungszeitraum darstellt. Da der Zufluss der Mangfall bei der Simulation nicht in die Steuerungsvorschrift des Polders eingeht, wird das durch den Zufluss der Mangfall hinzukommende Volumen nicht gekappt. Der Kraftwerksabfluss des KW Feldkirchen steigt zum Ende der Polderbeaufschlagung, ab Simulationsstunde 62, an. Nach dem Zusammenfluss mit der Salzach, deren Abfluss am Pegel Burghausen einer Jährlichkeit von etwa 500 Jahren entspricht, kann mit dem Polderbetrieb in dieser Simulation eine Scheitelreduzierung am Pegel Passau-Ingling von $\Delta Q = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden. Der Polder ist in dieser Simulation zu rund 85 % gefüllt. Wird die Polderfüllung früher und mit einem höheren Zufluss durchgeführt, für ein $Q_{\text{const}} = 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$, ist der Polder maximal gefüllt, die Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling beträgt $\Delta Q = 125 \text{ m}^3/\text{s}$.

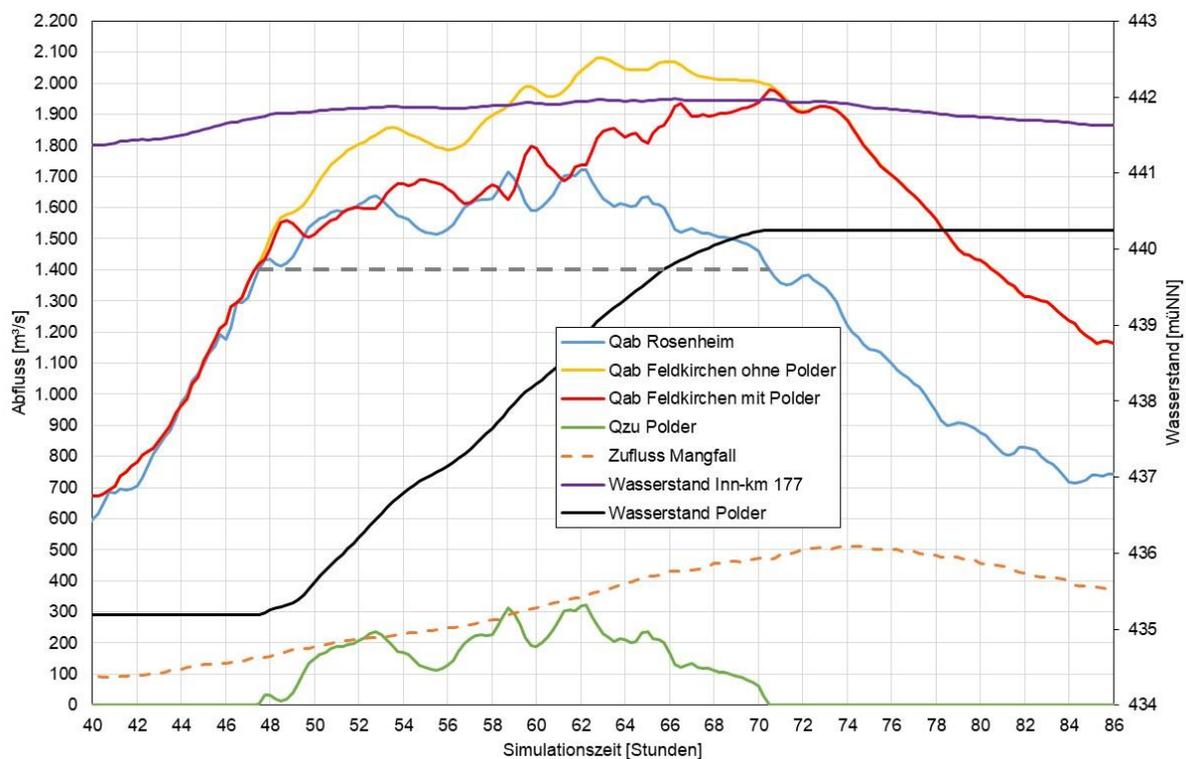


Abbildung 81: HW 2013, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{\text{const}} = 1.400 \text{ m}^3/\text{s}$

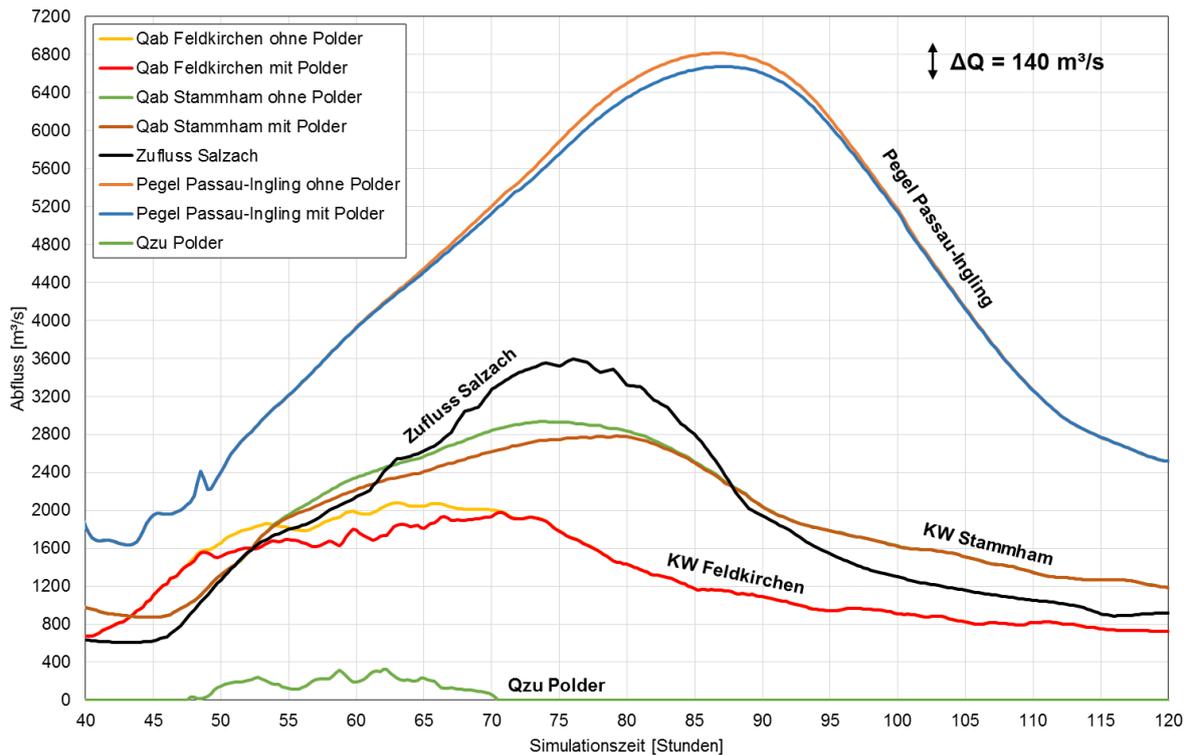


Abbildung 82: HW 2013, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{\text{const}} = 1.400 \text{ m}^3/\text{s}$

In Tabelle 14 sind die oben beschriebenen Simulationsergebnisse zum Vergleich des Betriebes gemäß WBO und bei Flutpolderbetrieb für den Pegel Wasserburg, 17 km unterhalb des Flutpolders, zusammenfassend aufgeführt. Für die drei betrachteten Hochwasser wurden verschiedene Q_{const} zur Untersuchung des Einflusses auf die mögliche Scheitelminderung durch Polderbeaufschlagung genutzt. Die blau hinterlegte Zeile markiert jeweils das Q_{const} , mit dem die höchste Scheitelminderung an den betrachteten Pegeln erzielbar ist. Insbesondere beim HW 2005 ist bei der Wahl einer zu großen Reduzierung des Maximalabflusses des KW Rosenheim und damit zu niedrigem Q_{const} eine deutlich geringere Abminderung am Pegel Wasserburg erkennbar, von 1,0 % gegenüber 10,2 %. Es ist weiterhin ersichtlich, dass bei höchster Reduzierung (Delta Q) nicht immer der maximale Füllstand des Polders erreicht wird.

Wenn der Fokus auf den Abfluss am KW Rosenheim gelegt wird, ist aufgrund des Zuflusses der Mangfall nicht immer eine nahezu horizontale Abflussweitergabe unterstrom des Polders möglich. Für eine Verbesserung der lokalen Wirkung ist damit die Untersuchung des Bezuges auf das KW Feldkirchen (unterstrom der Einmündung der Mangfall) sinnvoll, die in weiteren Sensitivitätsuntersuchungen für die HW 2005 und 2013 betrachtet wurde. Im Rahmen der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen wird der Fokus auf den lokalen Einsatz des Polders gelegt, die damit einhergehende Wirkung im Fernbereich wird anhand der Abminderung am Pegel Passau-Ingling ermittelt. Ein überregionaler Fokus für den Betrieb des Flutpolders Feldkirchen wird in Kapitel 9 betrachtet. Die durchgeführten Untersuchungen der

Wirkungsanalyse dienen zum Verständnis des Systems und der Systemreaktionen, auch in Bezug auf die Fernwirkung des Flutpolderbetriebes.

Die erzielte Scheitelminderung bei alleinigem Polderbetrieb liegt am Pegel Wasserburg bei 16,7 % für das HW 2002, 10,2 % für das HW 2005 und 4,1 % für das HW 2013.

Tabelle 14: Simulationsergebnisse am Pegel Wasserburg bei alleinigem Polderbetrieb Feldkirchen und unterschiedlichen Q_{const} – Abgelaufene Hochwasser

HW	Q_{const} [m³/s]	Q_{max} WBO [m³/s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
			[m³/s]	prozentual		
2002	950	1656	276	16,7%	440,82	95,16%
	1000	1656	229	13,8%	439,78	73,95%
	900	1656	274	16,6%	441,10	100,00%
2005	2000	2797	286	10,2%	441,07	99,96%
	2200	2797	113	4,0%	437,82	36,12%
	1750	2797	28	1,0%	441,10	100,00%
2013	1400	2194	90	4,1%	440,25	83,54%
	1300	2194	25	1,1%	441,10	100,00%

Am Pegel Wasserburg ist der Effekt der Polderbeaufschlagung sehr groß, weiter unterstrom ergibt sich, beispielsweise durch den Zufluss großer seitlicher Nebengewässer, eine Reduzierung des Effekts. Es ist eine maximale Reduzierung am Pegel Passau-Ingling von 5,8 % für das HW 2005, 3,2 % für das HW 2002 und 2,1 % für das HW 2013 bei den markierten Q_{const} erkennbar, wie in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei alleinigem Polderbetrieb Feldkirchen und unterschiedlichen Q_{const} – Abgelaufene Hochwasser

HW	Q_{const} [m³/s]	Q_{max} WBO [m³/s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
			[m³/s]	prozentual		
2002	950	5457	177	3,2%	440,82	95,16%
	1000	5457	134	2,5%	439,78	73,95%
	900	5457	165	3,0%	441,10	100,00%
2005	2000	4274	247	5,8%	441,07	99,96%
	2200	4274	99	2,3%	437,82	36,12%
	1750	4274	174	4,1%	441,10	100,00%
2013	1400	6815	140	2,1%	440,25	83,54%
	1300	6815	125	1,8%	441,10	100,00%

Es wurden danach Simulationen durchgeführt, die sowohl den Flutpolderbetrieb als auch das Stauraummanagement am oberen und unteren Inn entsprechend Kapitel 0 umfassen, um die gegenseitige Beeinflussung zu untersuchen. Durch den Einsatz des Polders verringert sich der Hochwasserscheitel, das zeitliche Abflussverhalten wird gering beeinflusst. Aus diesem Grund wurden die Ab- und Aufstauvorgänge des Stauraummanagements für die gleichen Zeitpunkte und Gradienten wie bei der Erstabschätzung des Potentials durch Stauraummanagement (Kapitel 6) durchgeführt. Die Ab- und Aufstauhöhen wurden ebenfalls entsprechend der vorausgehenden Untersuchung angenommen. Untersucht wurde die

Hauptvariante 1 für die Kombination von Polderbetrieb und Stauraummanagement. In Abbildung 83 ist beispielhaft das Simulationsergebnis des HW 2005 von Polderbetrieb mit Stauraummanagement über den Verlauf des Inns dargestellt. Am Pegel Passau-Ingling ergibt sich eine Reduzierung von $\Delta Q = 616 \text{ m}^3/\text{s}$. Die durch den Abstauvorgang des Stauraummanagements erhöhte Abflussabgabe ist nicht dargestellt, da sie im Zeitbereich bis Simulationsstunde 40 durchgeführt wird. Im Zeitbereich bis Simulationsstunde 60 liegt die Abflussganglinie am Pegel Passau-Ingling ohne Polderbetrieb höher, da hier der Abstauvorgang gemäß WBO durchgeführt wird. Es ergibt sich eine leichte zeitliche Beeinflussung des ansteigenden Astes bei kombiniertem Betrieb durch den verringerten Oberwasserstand bei Stauraummanagement.

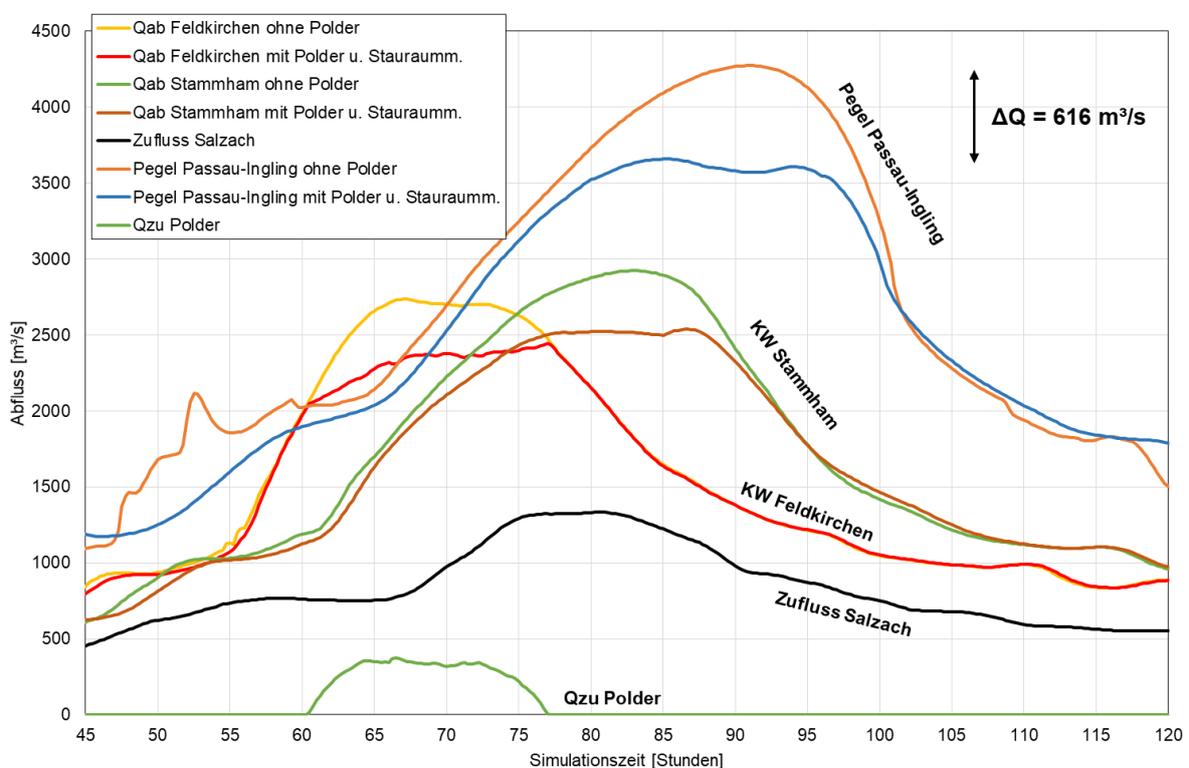


Abbildung 83: HW 2005, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, Polderbetrieb Feldkirchen und Stauraummanagement, $Q_{\text{const}} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Am Pegel Wasserburg, 17 km unterstrom des Polders, ergeben sich durch den Polderbetrieb, wie in Abbildung 84 dargestellt, höhere Scheitelminderungen als bei Stauraummanagement Variante 1. Insbesondere für das HW 2002 liegt die Abminderung durch Polderbetrieb bei $\Delta Q = 276 \text{ m}^3/\text{s}$ (16 %) gegenüber $\Delta Q = 98 \text{ m}^3/\text{s}$ (6 %) bei Stauraummanagement sowie beim HW 2005 (etwa HQ_{100}) bei $\Delta Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$ (10 %) gegenüber $\Delta Q = 23 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 %). Bei Polderbetrieb mit Stauraummanagement Variante 1 liegt die zusätzliche Abminderung gegenüber dem alleinigen Polderbetrieb am Pegel Wasserburg geringfügig höher.

Hierbei ist zu beachten, dass eine Entfernung von 17 km zwischen dem Polder Feldkirchen und Pegel Wasserburg vorliegt, sodass die Polderbeaufschlagung an diesem Pegel aufgrund der größeren Nähe einen großen Effekt aufweist. Weiterhin ist die Wirkung des Stauraummanagements aufgrund des geringeren Gesamtvolumens der Stauräume Rosenheim, Feldkirchen und Wasserburg geringer als am unteren Inn.

Der Polder wurde damit auch für Ereignisse eingesetzt, die am Standort des Polders Feldkirchen und am Pegel Wasserburg einen geringen Abfluss als HQ_{100} aufweisen. Am Pegel Wasserburg ist der Scheitel des HW 2002 geringer als ein HQ_{10} , das Ereignis HW 2013 weist eine Jährlichkeit von 20 Jahren auf.

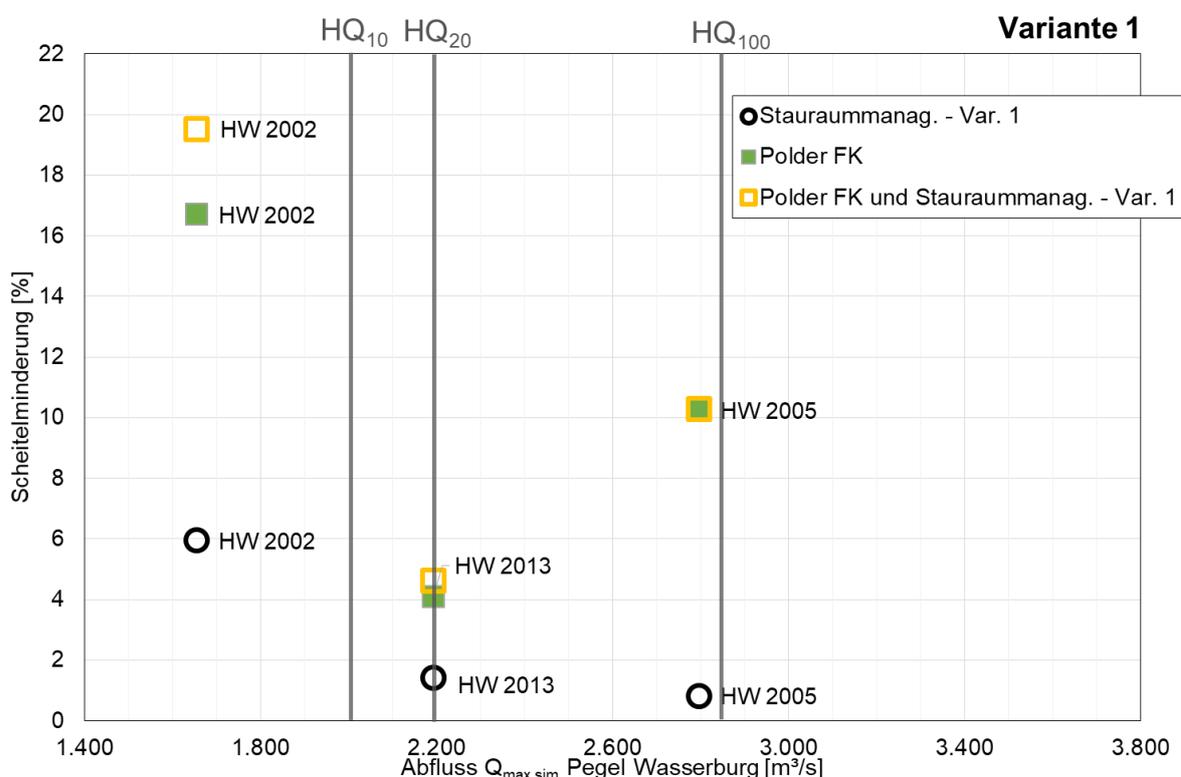


Abbildung 84: Absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Abgelaufene HW

Abbildung 85 zeigt die Ergebnisse der absoluten Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling für die Varianten 1, 2a und 2b des alleinigen Stauraummanagements (Punkte) sowie des alleinigen Polderbetriebes (grün) und des Polderbetriebes mit Stauraummanagement gemäß Variante 1 (gelb) für die abgelaufenen HW. Die Scheitelminderung bei alleinigem Polderbetrieb ist gegenüber den Abminderungen bei Stauraummanagement geringer. Bei gleichzeitigem Polderbetrieb mit Stauraummanagement wurden deutlich höhere Reduzierungen berechnet, die sich im Bereich der Ergebnisse des Stauraummanagements - Variante 2b befinden. In Variante 2a und 2b wurde bei den berücksichtigten Stauanlagen über das reguläre Absenkeziel während eines Hochwassers, auf das reguläre Stauziel, aufgestaut (Überstau). Die

Einzelwirkungen von Polderbetrieb und Stauraummanagement der Variante 1 überlagern sich bei gemeinsamem Betrieb in Bezug auf die Abminderung am Pegel Passau-Ingling annähernd additiv. In Tabelle 16 sind die Werte der absoluten und prozentualen Scheitelminderung, die in Abbildung 85 dargestellt sind, zusammenfassend aufgeführt. Die simulierten Scheitelminderungen bei Polderbetrieb und Stauraummanagement liegen bei 9,6 % für das HW 2002, 14,4 % für das HW 2005 und 5,4 % für das HW 2013.

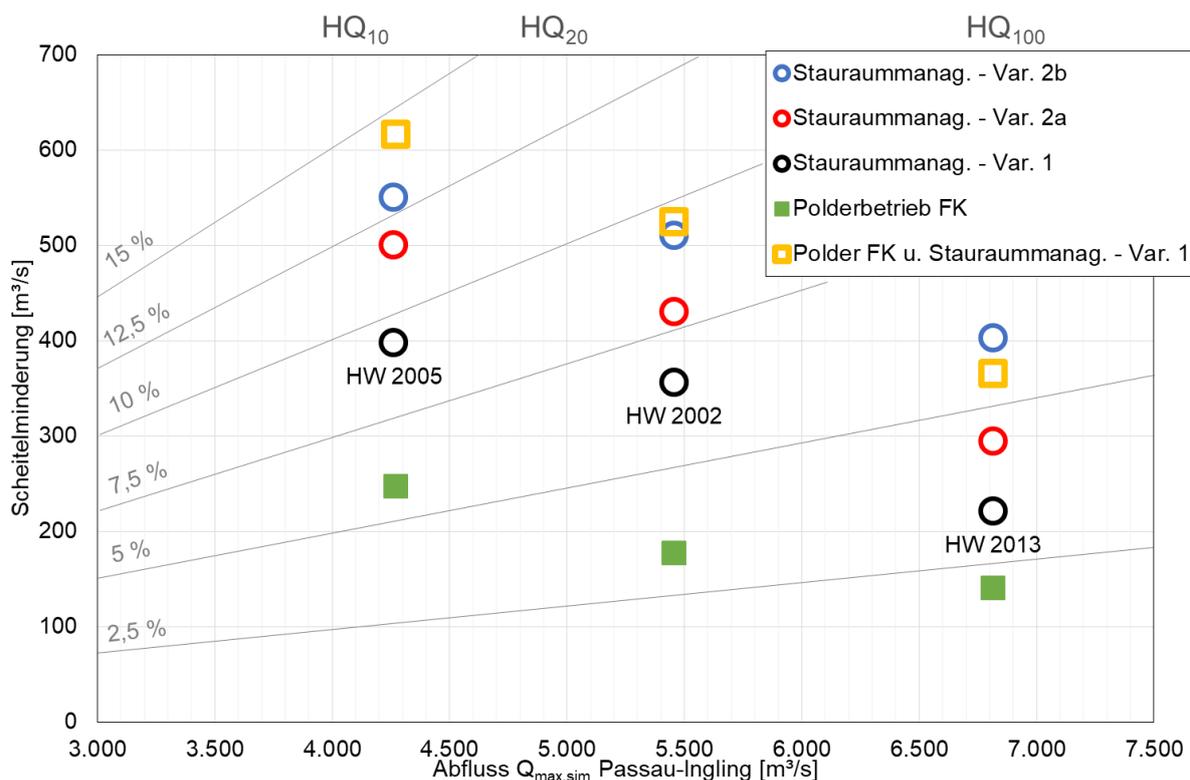


Abbildung 85: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Abgelaufene HW

Tabelle 16: Absolute und prozentuale Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Abgelaufene HW

HW	Q _{max} WBO [m ³ /s]	Scheitelminderung, absolut [m ³ /s] und prozentual [-]									
		Stauraummanagement, Variante						Polderbetrieb		Stauraummanagement Variante 1 und Polder	
		1		2a		2b					
2002	5.457	356	6,5%	431	7,9%	510	9,3%	177	3,2%	524	9,6%
2005	4.274	398	9,3%	500	11,7%	551	12,9%	247	5,8%	616	14,4%
2013	6.815	221	3,2%	294	4,3%	403	5,9%	140	2,1%	365	5,4%

Simulation der synthetischen Hochwasserereignisse

Zur Simulation der synthetischen Hochwasser wurden aus den zwölf von der TU Wien übergebenen Ereignissen drei Hochwasser ausgewählt. Die ausgewählten Szenarien sind mit Angabe der Jährlichkeiten an den maßgebenden Pegeln in Tabelle 17 dargestellt. Es wurden zwei Ereignisse ausgewählt, Szenarien 3 und 9, die am Pegel Wasserburg ein Überlastereignis (> HQ₁₀₀) darstellen. Szenario 9 entspricht auch am Pegel Passau-Ingling

einem Überlastereignis mit einer Jährlichkeit von 300 Jahren. Das dritte Ereignis, Szenario 11, entspricht am oberen Inn einem HQ_{20} , ist salzachtbetont und weist am unteren Inn eine Jährlichkeit von 150 Jahren auf.

Tabelle 17: Ausgewählte stochastische Szenarien und Jährlichkeiten

Szenario	Jährlichkeit am Pegel		
	Wasserburg	Burghausen	Passau-Ingling
3	300	30	30
9	800	20	300
11	20	1000	150

Abbildung 86 und Abbildung 87 zeigen beispielhaft für die Betrachtung der Szenarien das Simulationsergebnis des Szenarios 3 bei alleinigem Polderbetrieb. Der maximale Abfluss am KW Rosenheim beträgt $Q = 3.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Es wurden auch hier unterschiedliche Abflüsse Q_{const} betrachtet. Bei Vorgabe, dass $\Delta Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ bezogen auf den Maximalabfluss am KW Rosenheim in den Polder abgegeben werden sollen ($Q_{\text{const}} = 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$), ist – nicht zuletzt auch aufgrund des gleichmäßigeren Verlaufs der synthetisch erzeugten Ganglinien gegenüber den abgelaufenen Hochwassern – eine verhältnismäßig konstante Abflussweitergabe am KW Feldkirchen möglich. Der Polder ist in diesem Szenario nahezu gefüllt, der Füllstand beträgt 98 %. Am Pegel Passau-Ingling ist eine Reduzierung von $\Delta Q = 139 \text{ m}^3/\text{s}$ möglich.

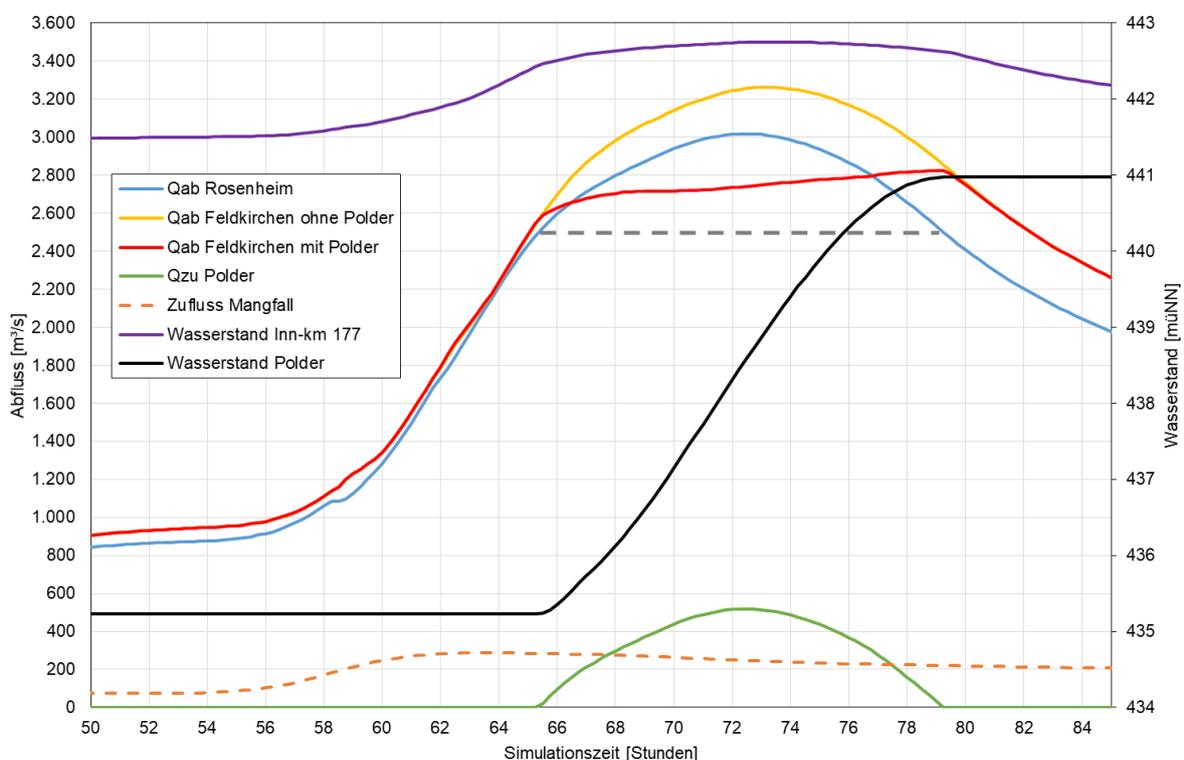


Abbildung 86: Szenario 3, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{\text{const}} = 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$

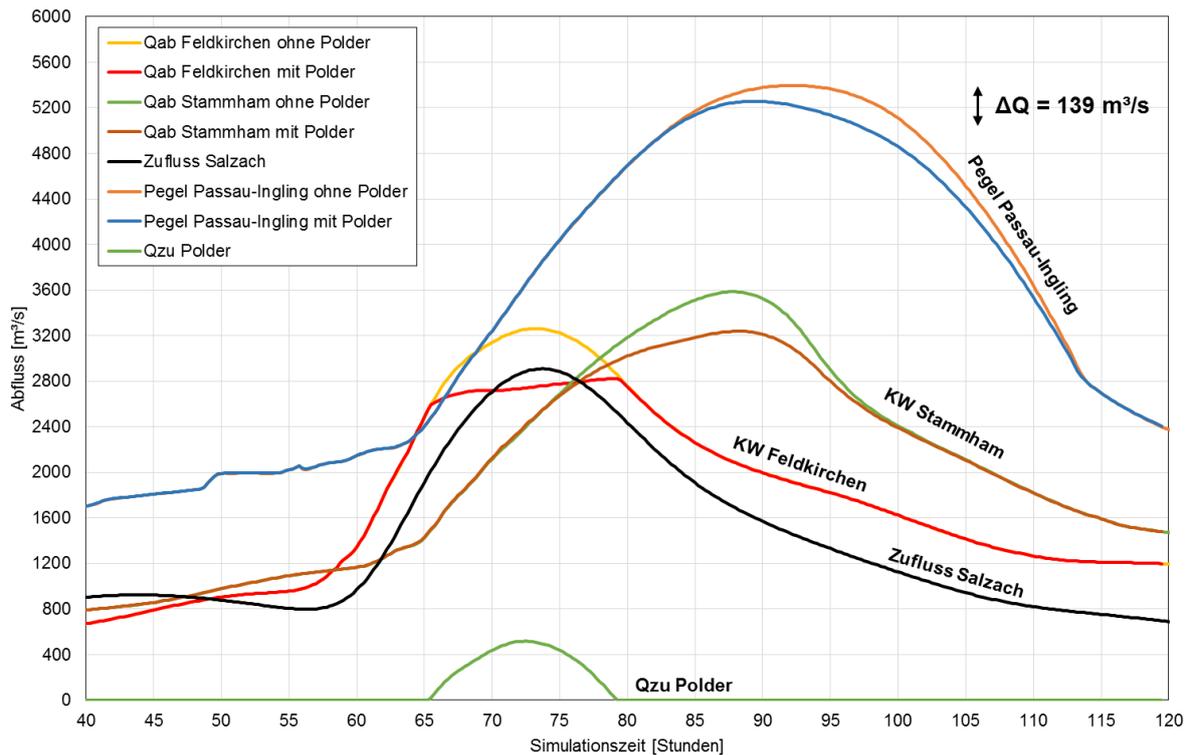


Abbildung 87: Szenario 3, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen

Am Pegel Wasserburg ist durch den Polderbetrieb, ähnlich wie bei den abgelaufenen Hochwassern, eine größere Scheitelreduzierung gegenüber dem Stauraummanagement möglich (vgl. Abbildung 88). Bei Polderbetrieb liegt die Abminderung für das Szenario 3 bei $\Delta Q = 436 \text{ m}^3/\text{s}$ (13,2 %) gegenüber $\Delta Q = 45 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,4 %) (Stauraummanagement), für das Szenario 9 bei $\Delta Q = 320 \text{ m}^3/\text{s}$ (9,0 %) gegenüber $\Delta Q = 24 \text{ m}^3/\text{s}$ (0,7 %) und bei Szenario 11 bei $\Delta Q = 359 \text{ m}^3/\text{s}$ (15,7 %) anstelle von $\Delta Q = 76 \text{ m}^3/\text{s}$ (3,3 %). Die zusätzliche Abminderung bei Polderbetrieb und Stauraummanagement liegt maximal rund 1 % höher.

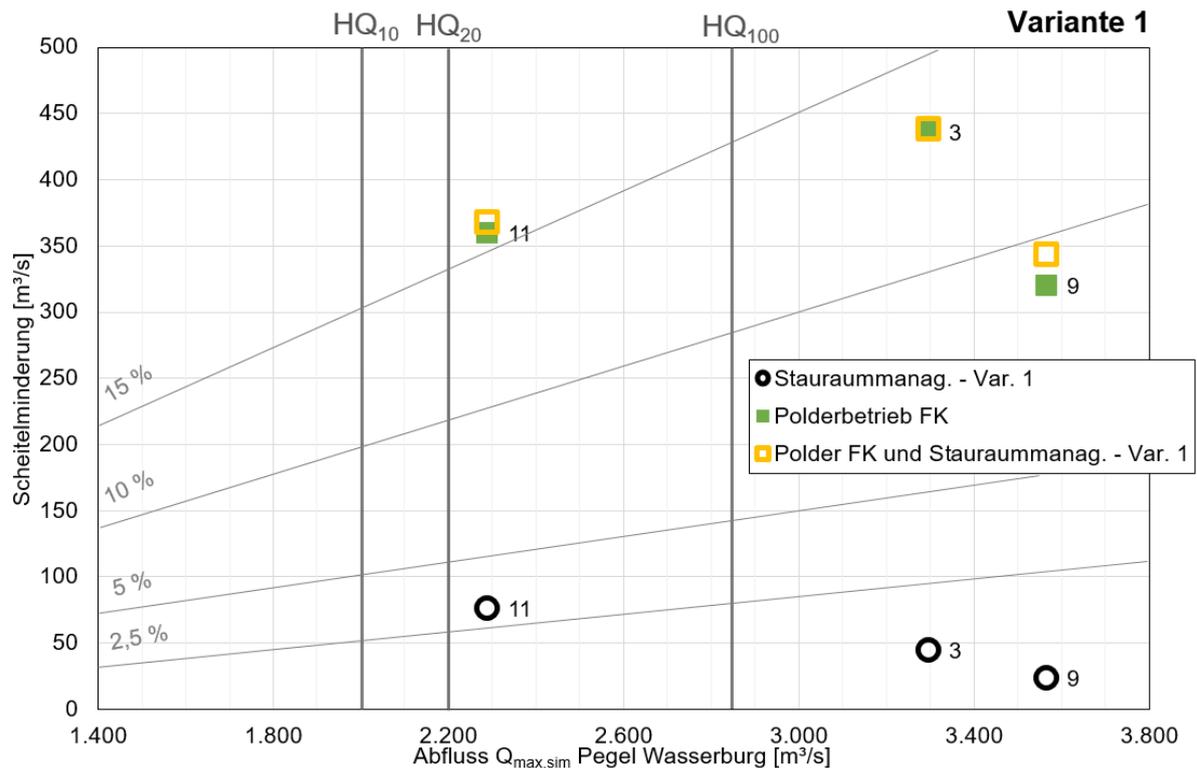


Abbildung 88: Absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Stochastische Szenarien

In der Abbildung 89 sind die Simulationsergebnisse der absoluten Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling für die unterschiedlichen Szenarien und Bewirtschaftungen dargestellt. Im Fall des Szenarios 9 weist der alleinige Polderbetrieb (grün) eine höhere Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling auf als das Stauraummanagement (schwarz). In den beiden weiteren Szenarien sowie den abgelaufenen Hochwassern ist die Reduzierung bei Stauraummanagement größer als bei alleinigem Polderbetrieb. Bei Polderbetrieb und Stauraummanagement (gelb) wurden die höchsten Scheitelreduzierungen von 7,4 % bei Szenario 3, 4,3 % bei Szenario 9 und 5,2 % bei Szenario 11 simuliert. Zum Teil ergibt sich bei dem kombinierten Betrieb eine leicht höhere Abminderung als die summierte Abminderung der Einzelwirkungen von Stauraummanagement und Flutpolderbetrieb. Bei dem kombinierten Betrieb hat der durch den Polderbetrieb verringerte Scheitel des Hochwassers dabei positiven Einfluss auf die mögliche Abminderung durch Stauraummanagement. In Tabelle 18 sind die in der Abbildung dargestellten absoluten sowie prozentualen Scheitelminderungen aufgeführt. Die Varianten 2a und 2b des Stauraummanagements wurden nicht für die Szenarien betrachtet.

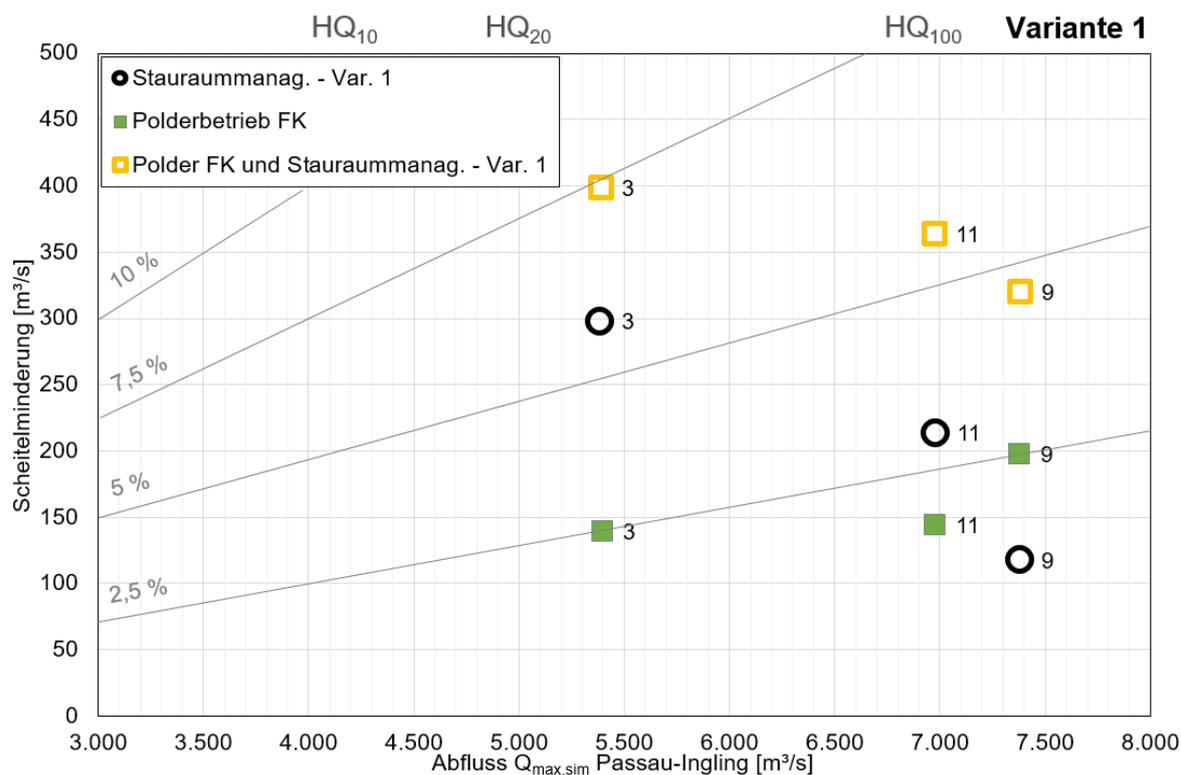


Abbildung 89: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Stochastische Szenarien

Tabelle 18: Absolute und prozentuale Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Stochastische Szenarien

HW	Q _{max} WBO [m³/s]	Scheitelminderung, absolut [m³/s] und prozentual [-]									
		Stauraummanagement, Variante						Polderbetrieb		Stauraummanagement Variante 1 und Polder	
		1	2a	2b							
Szenario 3	5.391	283	5,2%					139	2,6%	399	7,4%
Szenario 9	7.386	115	1,6%					198	2,7%	320	4,3%
Szenario 11	6.978	214	3,1%					144	2,1%	364	5,2%

Weitere Sensitivitätsuntersuchungen für den Polderbetrieb Feldkirchen

Es wurden für die abgelaufenen HW 2005 und 2013 weiterhin Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Mangfall berücksichtigt und eine Zeitverschiebung vorgenommen wurde. Da die Mangfall einen großen Zufluss in die Stauhaltung Feldkirchen darstellt, sollte hiermit betrachtet werden, ob die Berücksichtigung der Gesamtzuflusssituation einen positiven Einfluss auf die Scheitelminderung hat. Wird die Mangfall in die Poldervorschrift einbezogen, muss der Maximalabfluss ebenfalls mittels einer Vorhersage bekannt sein. Die Vorschrift zum Betrieb lautet für diese Simulationen:

$$Q_{\text{zu,Polder}} = (Q_{\text{ab,Rosenheim}} + Q_{\text{Mangfall}}) - Q_{\text{const}}$$

Für die Simulationen mit Mangfall muss Q_{const} angepasst werden, da sich der Bezugsabfluss durch die Berücksichtigung der Mangfall entsprechend vergrößert. Für das HW 2005 beträgt

$Q_{\text{const}} = 2.350 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Mangfall (ohne Mangfall $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$), für das HW 2013 beträgt $Q_{\text{const}} = 1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Mangfall (ohne Mangfall $1400 \text{ m}^3/\text{s}$) für die hier dargestellten Ergebnisse.

Es wurde ebenfalls betrachtet, ob die Berücksichtigung einer Zeitverschiebung die erzielbare Scheitelminderung positiv beeinflusst. Der Hochwasserscheitel hat eine Laufzeit von etwa 1,25 Stunden zwischen dem Kraftwerk Rosenheim und dem Einlaufbauwerk des Flutpolders. Für die Simulationen mit Laufzeitverschiebung wird die Beaufschlagung des Polders um 1,25 Stunden zeitversetzt gegenüber dem simulierten Abfluss am Kraftwerk Rosenheim vorgenommen.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen, Abbildung 90 und Abbildung 91, sind die Simulationsergebnisse für das HW 2005 und HW 2013 jeweils mit Berücksichtigung der Mangfall und Zeitverschiebung dargestellt. Der eingefügte graue Strich in Höhe von Q_{const} bezieht sich hier auf den Abfluss am Kraftwerk Feldkirchen ohne Polderbetrieb. Der Abfluss am KW Feldkirchen setzt sich aus dem Abfluss am KW Rosenheim, dem Zufluss der Mangfall, der Sims und eines Teileinzugsgebietes zusammen. Die Summe aus dem Abfluss der Sims und des Teileinzugsgebietes ist verhältnismäßig gering. Damit entspricht die Summe aus der Abgabe am KW Rosenheim und dem Abfluss der Mangfall näherungsweise der Abgabe am Kraftwerk Feldkirchen und Q_{const} kann hier auf die Abgabe am KW Feldkirchen bezogen werden. Im Vergleich mit den Simulationsergebnissen ohne Berücksichtigung der Mangfall und ohne Zeitverschiebung ist der am KW Feldkirchen abgegebene Abfluss für den Fall des Polderbetriebes bei den nachfolgend gezeigten Simulationsergebnissen gleichmäßiger und konstanter. Eine leichte Differenz zwischen dem geforderten Q_{const} und dem Abfluss am KW Feldkirchen ergibt sich, wie oben beschrieben, durch die beiden weiteren kleinen Zuflüsse.

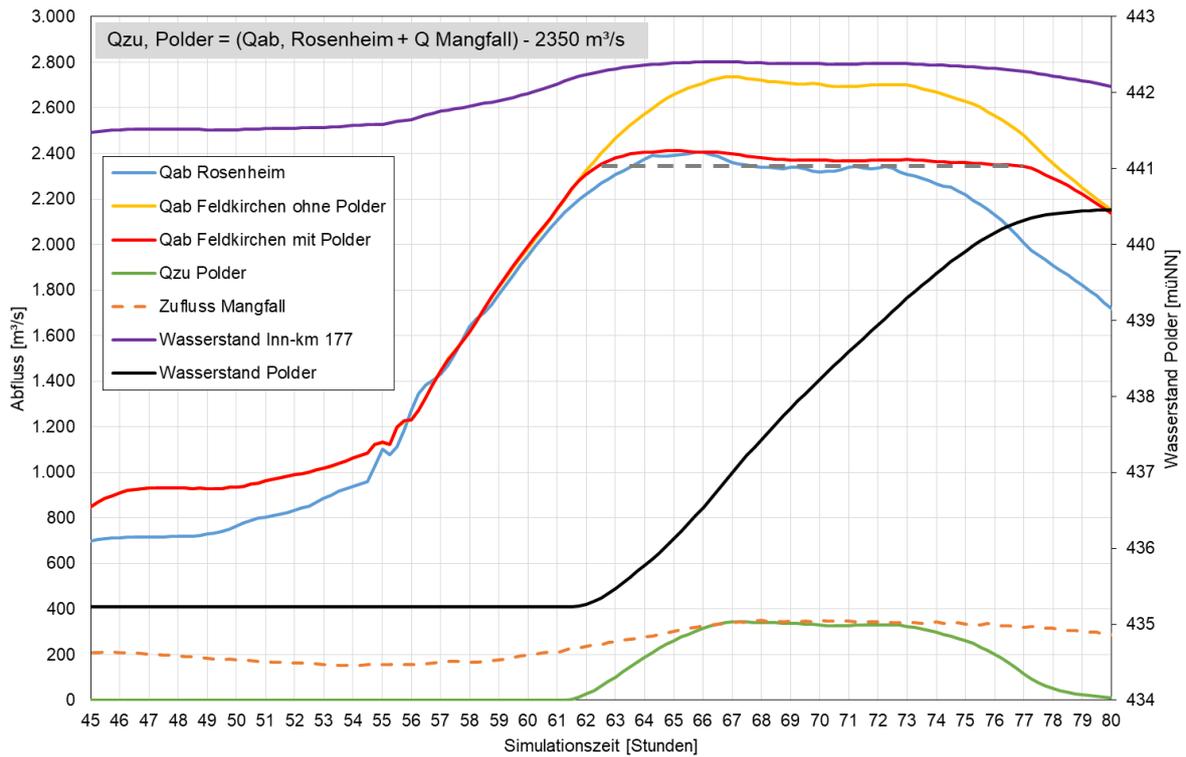


Abbildung 90: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, mit Mangfall und Zeitverschiebung

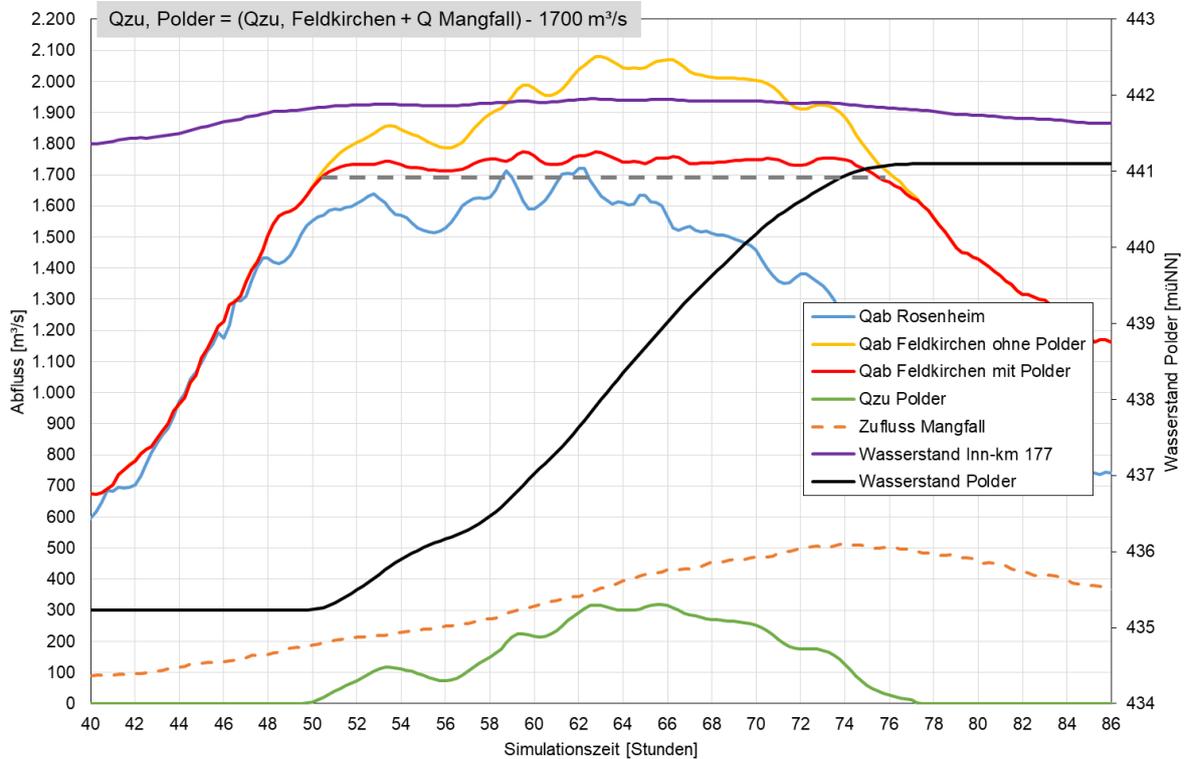


Abbildung 91: HW 2013, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, mit Mangfall und Zeitverschiebung

Die Ergebnisse der Simulationen, die sich jeweils in der Berücksichtigung von Mangfall und Zeitverschiebung unterscheiden, sind für die Scheitelminderung an den Pegeln Wasserburg und Passau-Ingling in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 19 zeigt die absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg bei verschiedenen Füllvorschriften des Flutpolders Feldkirchen für die untersuchten HW 2005 und 2013. Im Falle des HW 2005 unterscheiden sich die Simulationsergebnisse nur wenig voneinander. Die Abminderung ist jeweils bei Berücksichtigung einer Zeitverschiebung von $\Delta t = 1,25$ h größer als ohne Zeitverschiebung, während die Abminderungen ohne Berücksichtigung der Mangfall leicht größer sind. Es ist hierbei zu beachten, dass die Polderfüllung bei den Simulationen mit Berücksichtigung der Mangfall, deren Zufluss im Bereich des Scheitels relativ konstant ist, geringer ausfällt. Die Abflussweitergabe unterstrom des Flutpolder ist mit den getroffenen Annahmen für die Füllvorschrift über den gesamten Füllprozess nahezu konstant (vgl. Abbildung 90). Bei Berücksichtigung der Mangfall ist die Abminderung bei der Simulation des HW 2013 größer als ohne Berücksichtigung, da der Zufluss der Mangfall bei diesem Hochwasser hoch ist und im Bereich des Innscheitels deutlich ansteigt. Auch bei dem HW 2013 wirkt sich die zusätzliche Zeitverschiebung positiv auf die Scheitelminderung aus.

Bei der Betrachtung der Fernwirkung der unterschiedlichen, simulierten Füllvorgänge des Flutpolders Feldkirchen am Pegel Passau-Ingling (Tabelle 20) sind die Differenzen bei der Simulation des HW 2005 vergleichsweise gering. Die Verringerungen liegen in einem Bereich von 5,1 bis 5,9 % prozentualer Abminderung und unterscheiden sich damit nur gering. Im Falle des HW 2013 wirkt sich die Berücksichtigung der Mangfall positiv auf die erzielbare Scheitelabminderung am Pegel Passau-Ingling aus. Bei den Simulationen mit Einzug der Mangfall ist der Flutpolder vollgefüllt und es wird eine nahezu konstante Abflussweitergabe unterstrom des Flutpolders erzielt.

Bei den untersuchten Beispielen hat die Berücksichtigung der Zeitverschiebung damit wenig Einfluss, der Einfluss der Mangfall bei Berücksichtigung in der Poldervorschrift ist ereignisabhängig, da er zum Teil sehr positiv, teilweise aber auch eher negativ ist. Dies könnte generell einen Hinweis darauf geben, dass sowohl eine mögliche Zeitverschiebung als auch der Zufluss der Mangfall gegebenenfalls im Rahmen vertiefter Untersuchungen berücksichtigt werden sollten. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass zur Berücksichtigung der Mangfall eine Vorhersage des Abflusses notwendig ist.

Tabelle 19: Absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg bei Berücksichtigung der Mangfall und Zeitverschiebung zur Füllvorschrift am Polder Feldkirchen

HW	Einbezug Mangfall	Zeitverschiebung delta t [h]	Q _{const} [m³/s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
				[m³/s]	prozentual		
2005	ohne	0 h	2000	286	10,2%	441,07	99,96%
		1,25 h	2000	337	12,1%	441,07	99,96%
	mit	0 h	2350	271	9,7%	440,47	87,82%
		1,25 h	2350	318	11,4%	440,47	87,82%
2013	ohne	0 h	1400	90	4,1%	440,25	83,54%
		1,25 h	1400	121	5,5%	440,26	83,56%
	mit	0 h	1700	213	9,7%	441,10	100,00%
		1,25 h	1700	271	12,3%	441,10	100,00%

Tabelle 20: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling bei Berücksichtigung der Mangfall und Zeitverschiebung zur Füllvorschrift am Polder Feldkirchen

HW	Einbezug Mangfall	Zeitverschiebung delta t [h]	Q _{const} [m³/s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
				[m³/s]	prozentual		
2005	ohne	0 h	2000	247	5,8%	441,07	99,96%
		1,25 h	2000	244	5,7%	441,07	99,96%
	mit	0 h	2350	230	5,4%	440,47	87,82%
		1,25 h	2350	219	5,1%	440,47	87,82%
2013	ohne	0 h	1400	140	2,1%	440,25	83,54%
		1,25 h	1400	153	2,2%	440,26	83,56%
	mit	0 h	1700	205	3,0%	441,10	100,00%
		1,25 h	1700	204	3,0%	441,10	100,00%

7.4 Einbinden des möglichen Flutpolders Ering in das HN-Modell

Lage und Größe des Polders Ering unterstrom der Salzachmündung

Als weiterer Flutpolderstandort wurde der Polder Ering am unteren Inn, unterstrom der Salzachmündung, untersucht. Die Standortauswahl und Übergabe der notwendigen Daten erfolgte durch die TUM in Abstimmung mit dem LfU. Der untersuchte Flutpolderstandort befindet sich im Bereich des Stauraumes Ering-Frauenstein und ist linksseitig des Inns gelegen. Die Integration des Polders in das Modell und die Grobparametrierung der Steuerungsfunktion wurde analog zur Einbindung des Flutpolders Feldkirchen durchgeführt und wird im Folgenden beschrieben. In Abbildung 92 ist die Lage des Polders Feldkirchen (orange) sowie des Polders Ering (gelb) eingetragen, da der gemeinsame Betrieb beider Flutpolder betrachtet wird. Die Lage und der Umgriff der Polderfläche des Polders Ering (gelb) sind in Abbildung 92 und Abbildung 93 dargestellt.

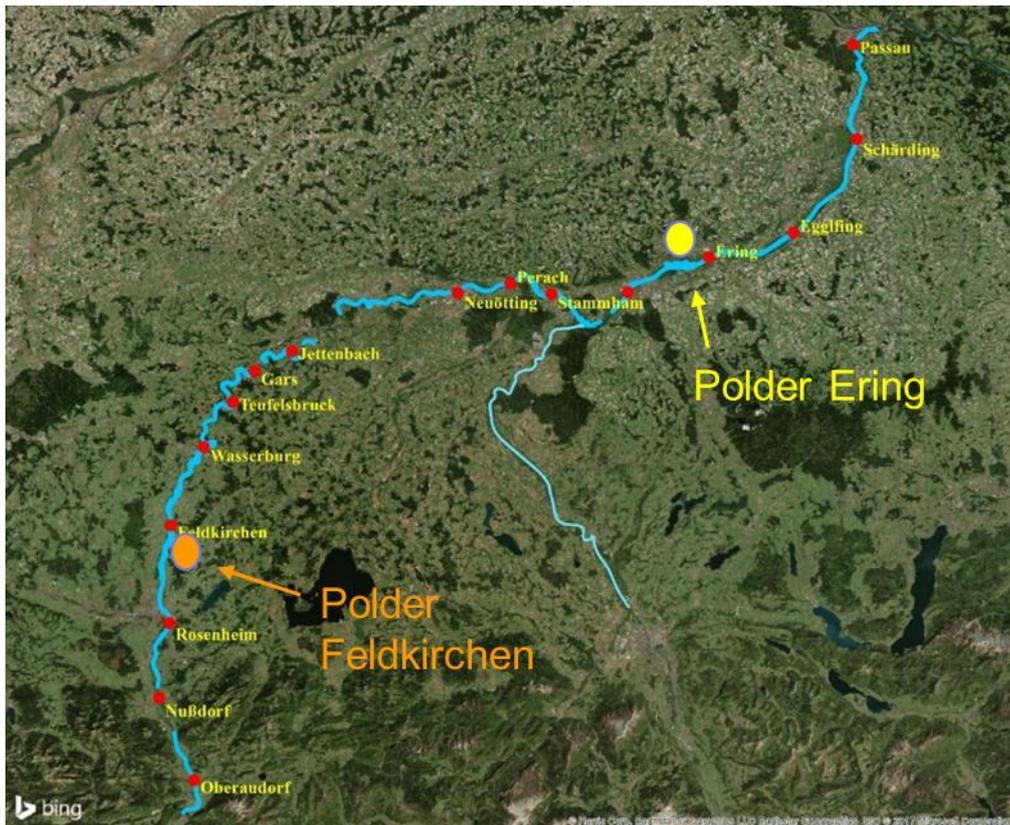


Abbildung 92: Lage der Polder Feldkirchen und Ering (Kartenhintergrund BING Maps – © Harris Corp, Earthstar Geographics LLC Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)

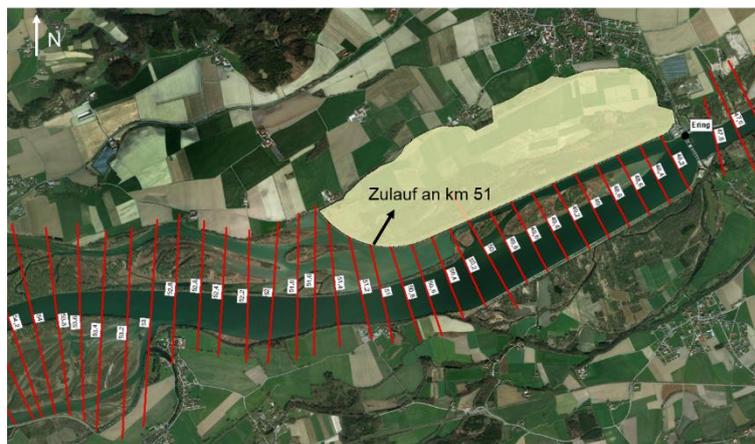


Abbildung 93: Lage und Umgriff der Polderfläche des Flutpolders Ering (Kartenhintergrund BING Maps – © Microsoft Corporation © 2020 Maxar © CNES (2020) Distribution Airbus DS)

Der Zulauf zum Flutpolder Ering soll sich nach Angabe der TUM an Inn-km 51 befinden (vgl. Abbildung 93). Bei einem Stauziel von rund 336,5 müNN beträgt die Fläche des Polders etwa 2,20 km² und das Gesamtvolumen etwa 13,4 Mio. m³. Zur Integration des Polders in das Kettenmodell wurde zunächst mit Hilfe eines GIS die überflutete Fläche sowie das zugehörige Volumen von verschiedenen Wasserständen im Polderbereich bestimmt (vgl. Abbildung 94).

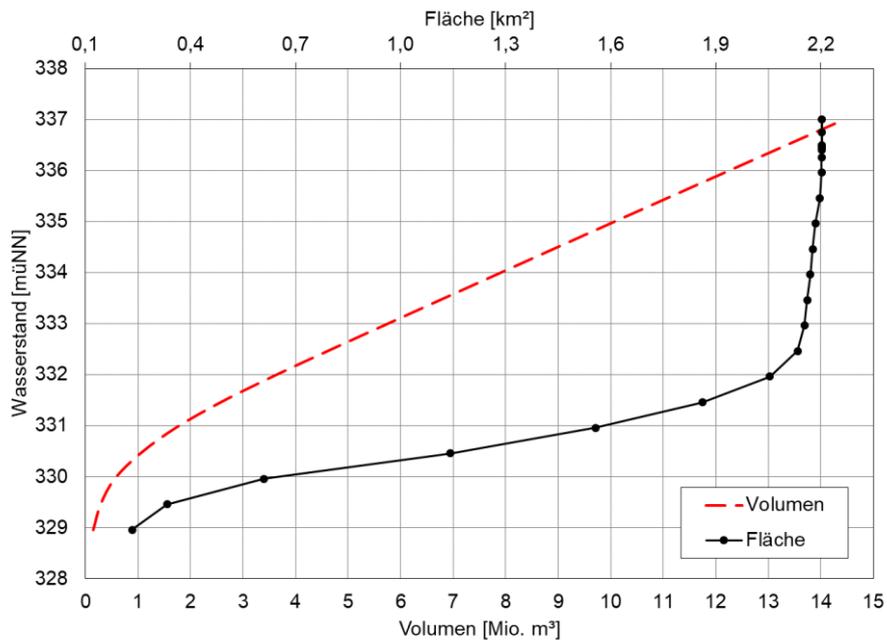


Abbildung 94: Überflutete Fläche und Rückhaltevolumen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Polder Ering

Abbildung 95 zeigt die Lage und Anbindung des Polders Ering schematisch für die Einbindung in das Simulationsmodell. Der Einlauf des Polders befindet sich an Inn-km 51. Der Polder wird mit Hilfe einer Retentionszelle abgebildet, in der die Beziehung von Wasserstand zu überfluteter Fläche hinterlegt ist. Sowohl Zu- als Ablauf des Polders sind als steuerbare Elemente definiert. Oberstrom des Kraftwerkes Ering-Frauenstein (Inn-km 48,0) liegt das Kraftwerk Braunau-Simbach (Inn-km 61,1), in dessen Stauraum die Salzach an Inn-km 68,3 einmündet.

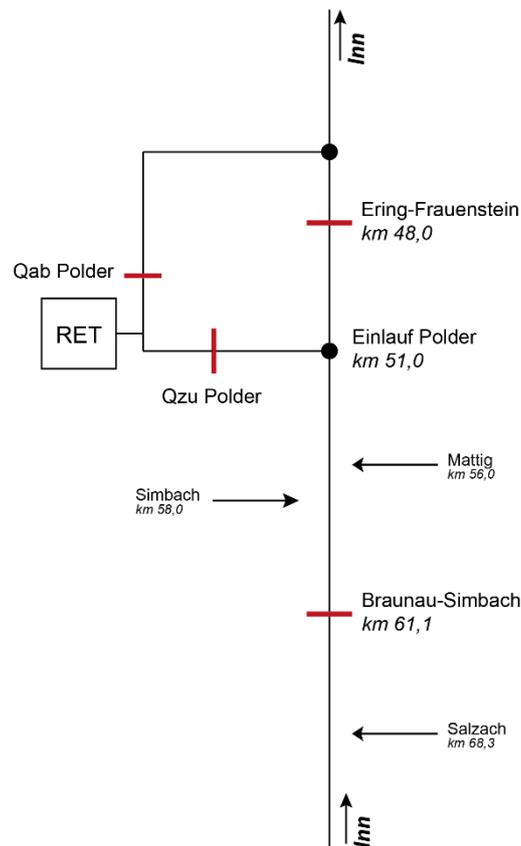


Abbildung 95: Schematische Darstellung zur Lage und Anbindung des Polders Ering

Implementierung und Grobparametrierung der Steuerungsfunktion des Polders Ering

Die Füllvorschrift zur Beaufschlagung des Flutpolders Ering wird analog zur Füllvorschrift des Flutpolders Feldkirchen definiert. Der Abfluss, der in den Polder abfließt, wird anhand des Maximalabflusses am Kraftwerk Braunau-Simbach definiert. Der Maximalabfluss wird hierbei als bekannt (Vorhersage) angenommen. Der Abfluss oberhalb eines definierten Schwellenwertes wird in den Polder eingelagert. Das Augenmerk liegt auch hier auf dem Füllvorgang des Polders. Die Restriktionen der Polderfüllung werden ebenfalls analog zum Polder Feldkirchen definiert, um den Betrieb realistischer abzubilden. Der maximale Zufluss zum Polder wurde mit $Q_{zu,Polder,max} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt. In Anbetracht des definierten maximalen Füllstandes von $y_{Polder,max} = 336,5 \text{ m}ü\text{NN}$ wird der Zufluss zum Polder bereits bei Erreichen eines Wasserstandes von $y_{Polder,max} = 336,4 \text{ m}ü\text{NN}$ entsprechend des zulässigen Gradienten auf $Q_{zu,Polder,max} = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert. Bei Erreichen von $y_{Polder,max} = 336,45 \text{ m}ü\text{NN}$ beträgt $Q_{zu,Polder,max} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, sodass unter einer linearen Reduzierung bei $y_{Polder,max} = 336,5 \text{ m}ü\text{NN}$ der Zufluss auf Null reduziert ist. Die Änderung des Zuflusses in den Polder (Gradient) wird in Abhängigkeit des Polderfüllstandes festgelegt. Bei einsetzender Polderfüllung beträgt $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 10 Minuten bis ein Wasserstand von $y_{Polder} = 327,0 \text{ m}ü\text{NN}$ erreicht ist, um Erosion zu verhindern. Im allgemeinen Betrieb oberhalb von $y_{Polder} = 327,0 \text{ m}ü\text{NN}$

beträgt der Gradient $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 1 Minute bei zunehmendem und abnehmendem $Q_{zu,Polder}$. Zur Prüfung, ob die Polderfüllung hydraulisch möglich ist, wird das Wasserstandsgefälle zwischen Inn und Polderwasserstand überprüft. Anhand der oben gegebenen Formel wird festgelegt, ab wann mit einem rückgestauten Abfluss zu rechnen ist. In Abbildung 96 sind die getroffenen Annahmen für die Höhenkoten dargestellt. Anhand des anliegenden Inn-Querprofils wurde die Sohlhöhe mit 333,0 müNN festgelegt. Die Höhe der Einlaufschwelle des seitlichen Bauwerkes wird somit mit $y_s = 334,0$ müNN angenommen (1 m oberhalb der Sohle). Die Breites des Bauwerkes wird mit $B = 45 \text{ m}$ angenommen. Auch hier gilt wie zuvor beschrieben, dass die genannten Kenngrößen Annahmen sind, um den Einfluss des Einlaufbauwerkes simulationstechnisch abzubilden und keinen Vorschlag zur Dimensionierung des Bauwerkes darstellen.

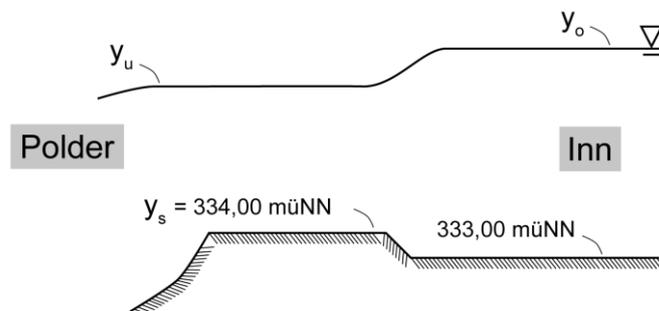


Abbildung 96: Rückgestauter Abfluss – Polder Ering

Mit der Annahme eines Wasserstandes im Inn von $y_o = y_{inn} = 337,4$ müNN wurde die Abflussleistungsfähigkeit für verschiedene Wasserstände im Polder (y_u) berechnet. Die berechneten Werte für $Q_{zu,Polder,max}$ sind in der Tabelle 21 für die Differenz der Wasserstände $\Delta y = y_o - y_u$ aufgetragen.

Tabelle 21: $Q_{zu,Polder,max}$ in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz – Polder Ering

Δy [m]	$Q_{zu,Polder,max}$ [m^3/s]
0,70	225,14
0,60	216,16
0,50	204,37
0,40	189,10
0,30	169,22
0,20	142,63
0,15	125,45
0,10	104,00
0,05	74,66
0,00	0,00

7.5 Simulationen mit Polderbetrieb Ering sowie kombiniertem Betrieb

Simulation der abgelaufenen Hochwasserereignisse HW 2002, 2005 und 2013

Zur Untersuchung der alleinigen Wirkung des Flutpolders Ering, des gemeinsamen Polderbetriebs mit dem Flutpolder Feldkirchen sowie zum gemeinsamen Betrieb und Stauraummanagement wurden zunächst die abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013 betrachtet.

Zur Beaufschlagung des Polders Ering wird wie beschrieben ein Q_{const} als Schwellenwert festgelegt, mit dem eine möglichst konstante Abflussweitergabe bei möglichst vollständiger Füllung des Polders erzielbar ist. Der Schwellenwert wird in Abhängigkeit des maximalen Abflusses am KW Braunau-Simbach festgelegt. Dieses Q_{const} liegt je nach Maximalabfluss am Kraftwerk Braunau-Simbach zwischen $\Delta Q = 325$ bis $430 \text{ m}^3/\text{s}$ niedriger als der Maximalabfluss am Kraftwerk. Beispielhaft werden in den nachfolgenden Abbildung 97 und Abbildung 98 die Simulationsergebnisse für die HW 2002 und 2013 bei alleinigem Betrieb des Polders Ering gezeigt. Es sind der Abfluss am Kraftwerk Braunau-Simbach (blau), der zur Definition des Polderzuflusses genutzt wird, der Abfluss am Kraftwerk Ering-Frauenstein ohne (gelb) und mit Polder (rot) sowie der Zufluss in den Polder (grün) dargestellt. Weiterhin ist auf der Sekundärachse der Wasserstandsverlauf im Polder (schwarz) sowie an Inn-km 52 (lila) aufgetragen. Für das HW 2002 beträgt die maximale Abgabe in den Polder annähernd $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, die Abflussweitergabe am Kraftwerk Ering-Frauenstein steigt zum Ende der Beaufschlagungsdauer leicht an. Bei Betrachtung des HW 2013 beträgt der Maximalzufluss zum Polder $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, der Zeitraum der Polderfüllung ist im Fall des HW 2013 mit einer Dauer von 11 Stunden etwas geringer als beim HW 2002 mit 15 Stunden. Der Abfluss am KW Ering-Frauenstein steigt zum Ende der Beaufschlagung des Polders auch beim HW 2013 leicht an, da in den Simulationen die Laufzeit zwischen dem Referenzpunkt KW Braunau-Simbach und dem Poldereinlauf bei der Definition der Füllvorschrift nicht berücksichtigt wird.

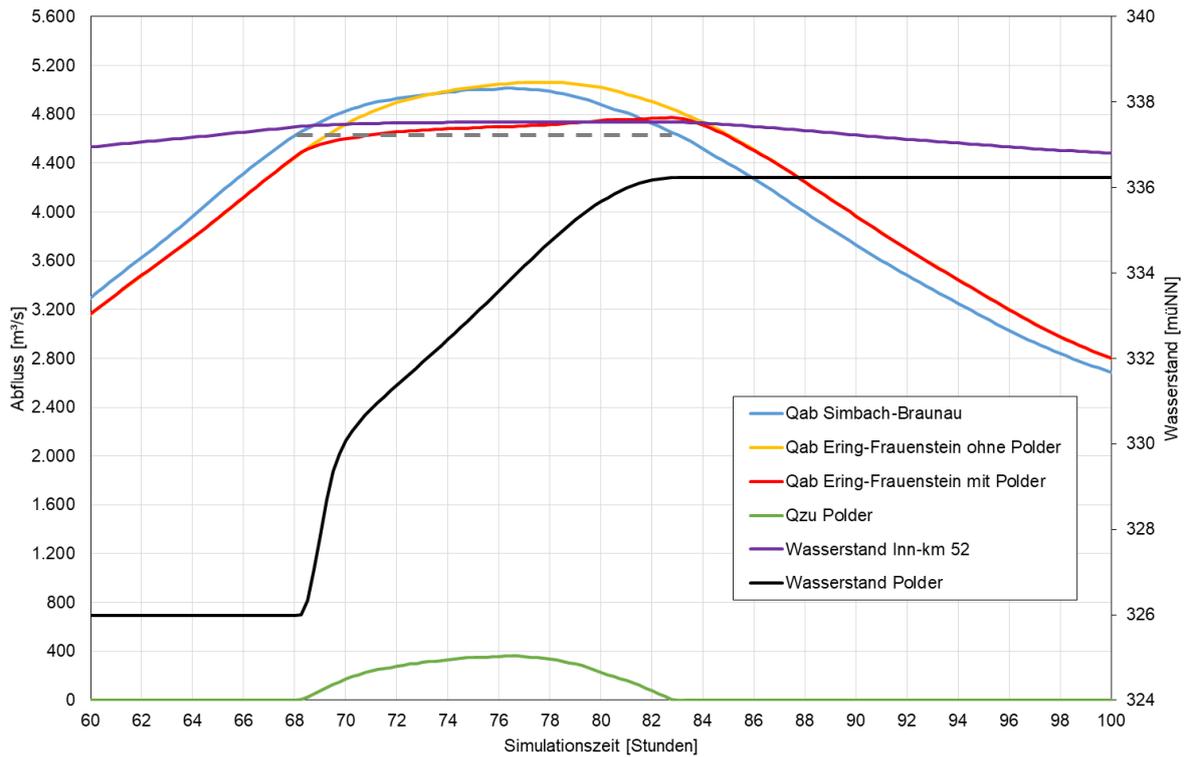


Abbildung 97: HW 2002, Scheitelminderung am KW Ering-Frauenstein, alleiniger Polderbetrieb Ering

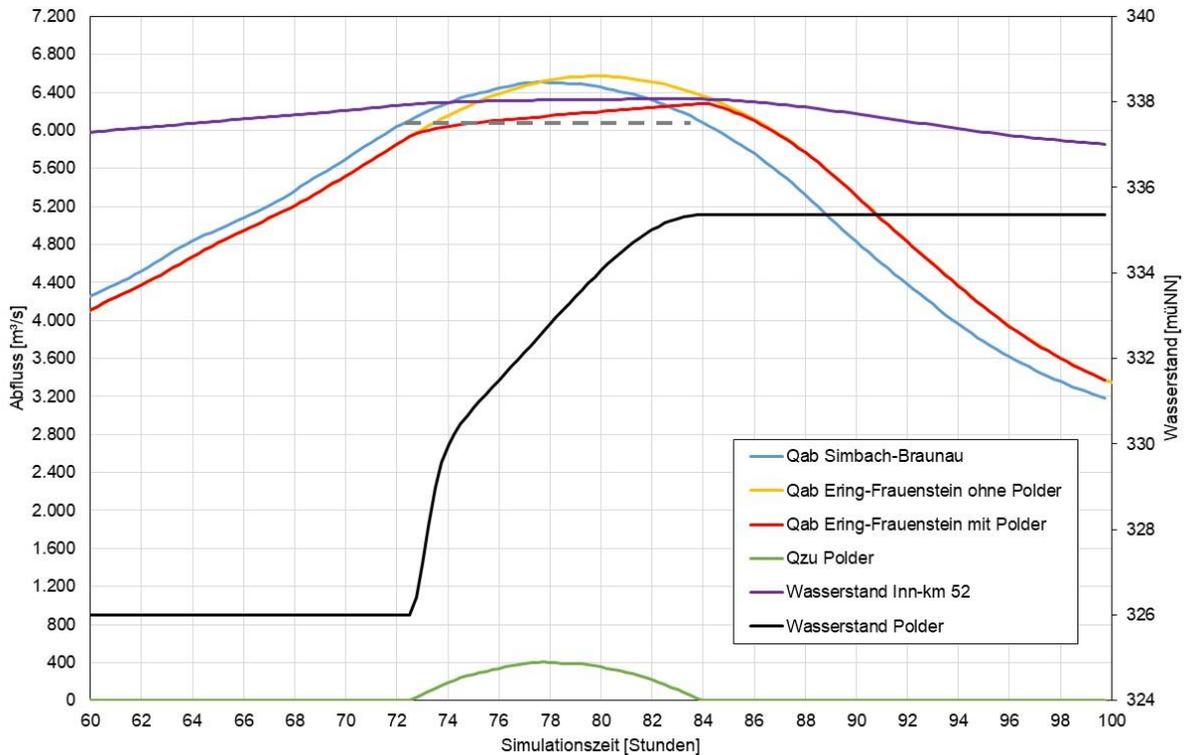


Abbildung 98: HW 2013, Scheitelminderung am KW Ering-Frauenstein, alleiniger Polderbetrieb Ering

Die quantitativen Scheitelminderungen am Pegel Passau-Ingling sind in Tabelle 22 zusammengefasst. Die Entfernung zwischen Polder Ering und Pegel Passau-Ingling beträgt ungefähr 47 km. Aufgeführt sind für die drei betrachteten abgelaufenen Hochwasser das

gewählte Q_{const} , der Maximalabfluss nach WBO am Pegel Passau-Ingling, die absolute und prozentuale Abminderung am Pegel Passau-Ingling sowie der Füllstand des Polders. Es wird zwischen der Betrachtung bei alleinigem Polderbetrieb Ering und dem kombinierten Betrieb des Polders Ering mit Stauraummanagement unterschieden. Bei alleinigem Betrieb des Polders Ering werden am Pegel Passau-Ingling Verringerungen von $\Delta Q = 260 \text{ m}^3/\text{s}$ (4,8 %), $\Delta Q = 254 \text{ m}^3/\text{s}$ (5,9 %) und $\Delta Q = 199 \text{ m}^3/\text{s}$ (2,9 %) für die HW 2002, 2005 und 2013 simuliert. Die Polderfüllung beträgt dabei zwischen 96 % bis 82 %.

Die Vorgaben des Stauraummanagements bezogen auf Abstautiefen und Gradienten des Ab- und Aufstauvorganges werden beim kombinierten Betrieb wie bei der in Kapitel 6 beschriebenen Erstabschätzung des Potentials durch Stauraummanagement durchgeführt. Dieses Vorgehen ist ebenfalls analog zur Betrachtung des Flutpolders Feldkirchen. Das Q_{const} , das zur Beaufschlagung des Polders Ering dient, wird vereinfachend bei dem kombinierten Betrieb nicht angepasst. Hierdurch ergibt sich eine Verringerung der Polderfüllung im Vergleich mit dem alleinigen Polderbetrieb. Bei einer Anpassung des Q_{const} wäre demnach insgesamt eine größere Abminderung möglich. Bei kombiniertem Polderbetrieb des Polders Ering und Stauraummanagement unter den beschriebenen Annahmen werden Abminderungen von $\Delta Q = 495 \text{ m}^3/\text{s}$ (9,1 %), $\Delta Q = 461 \text{ m}^3/\text{s}$ (10,8 %) und $\Delta Q = 328 \text{ m}^3/\text{s}$ (4,8 %) berechnet (vgl. Tabelle 22). Die erzielte Abminderung durch den gemeinsamen Betrieb ist größer als bei den jeweiligen Betrachtungen von Stauraummanagement und Polderbetrieb allein.

Tabelle 22: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei alleinigem Polderbetrieb Ering sowie mit Stauraummanagement – Abgelaufene Hochwasser

	HW	Q_{const} [m ³ /s]	Q_{max} WBO [m ³ /s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
				[m ³ /s]	prozentual		
nur Polderbetrieb Ering	2002	4650	5457	260	4,8%	336,23	96,24%
	2005	3900	4274	254	5,9%	335,74	88,04%
	2013	6100	6815	199	2,9%	335,36	81,68%
Polderbetrieb (Ering) und Stauramm.	2002	4650	5457	495	9,1%	333,53	51,20%
	2005	3900	4274	461	10,8%	332,88	40,57%
	2013	6100	6815	328	4,8%	333,17	45,27%

Es wurde ebenfalls der gemeinsame Betrieb beider Flutpolder Feldkirchen und Ering betrachtet. Das Q_{const} zur Beaufschlagung des Polders Ering wurde für die gemeinsamen Betrachtungen um $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ (für HW 2005 um $\Delta Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$) verringert. In der Abbildung 99 sind beispielhaft die Abflussganglinien der Kraftwerke Feldkirchen und Stammham und Pegel Passau-Ingling jeweils mit und ohne Polderbetrieb für das HW 2013 dargestellt sowie die Zuflüsse zu den Poldern Feldkirchen und Ering. Am Pegel Passau-Ingling ist eine Abminderung bezogen auf den Scheitelabfluss von $\Delta Q = 377 \text{ m}^3/\text{s}$ erzielbar.

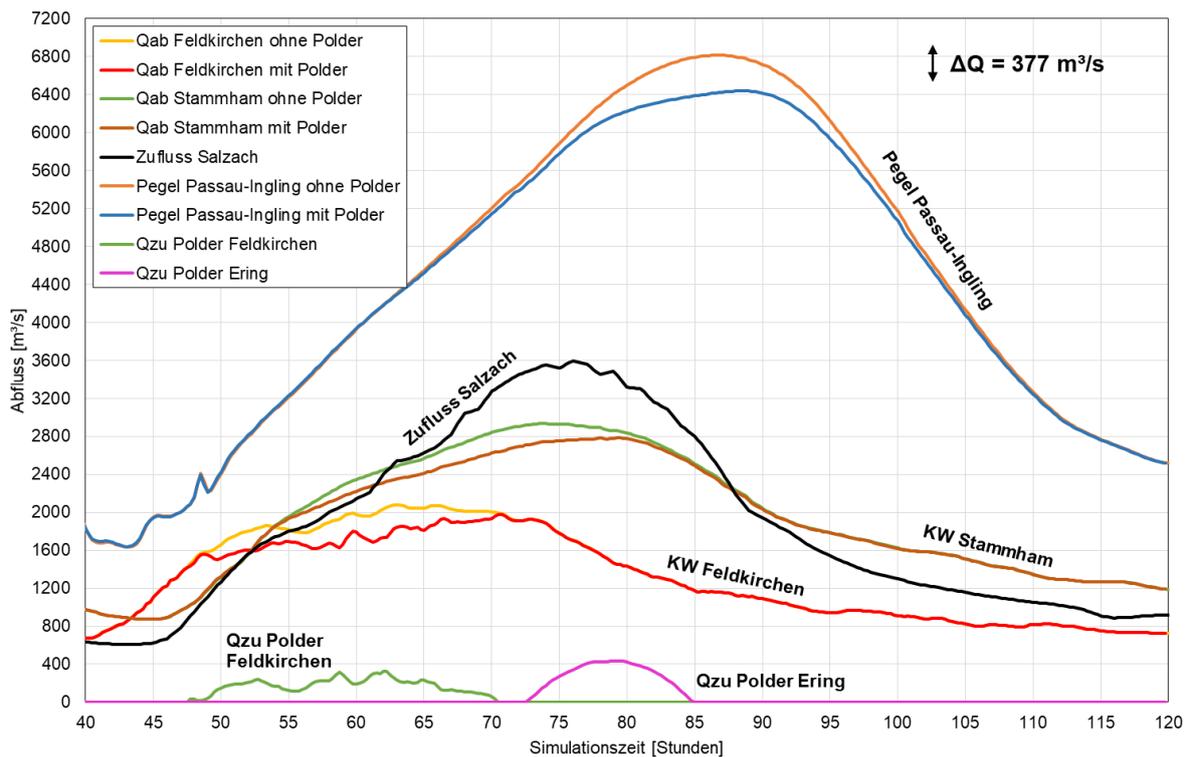


Abbildung 99: HW 2013, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, Polderbetrieb Feldkirchen und Ering

Die ermittelten Scheitelminderungen für die abgelaufenen Hochwasser und die sich ergebenden Füllstände der Polder Feldkirchen und Ering (grau hinterlegt) sind in Tabelle 23 zusammengestellt. Bei Polderbetrieb der beiden Polder Feldkirchen und Ering sind Abminderungen am Pegel Passau-Ingling von $\Delta Q = 424 \text{ m}^3/\text{s}$ (7,8 %), $\Delta Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ (11,7 %) und $\Delta Q = 377 \text{ m}^3/\text{s}$ (5,5 %) für die HW 2002, 2005 und 2013 möglich. Die Polderfüllung beträgt zwischen rund 84 bis 100 % je nach Polder und HW.

Bei Betrachtung des Betriebes beider Flutpolder gemeinsam mit Stauraummanagement werden Abminderungen von $\Delta Q = 649 \text{ m}^3/\text{s}$ (11,9 %), $\Delta Q = 695 \text{ m}^3/\text{s}$ (16,3 %) und $\Delta Q = 494 \text{ m}^3/\text{s}$ (7,2 %) simuliert (vgl. Tabelle 23). Auch im Falle des kombinierten Betriebes beider Polder mit Stauraummanagement werden die Vorgaben für Ab- und Aufstauprozess entsprechend den vorausgegangenen Untersuchungen (Kapitel 6) durchgeführt. Eine Anpassung des Q_{const} wird zur Vereinfachung und besseren Vergleichbarkeit nicht vorgenommen. Hieraus ergibt sich bei gemeinsamem Betrieb mit Stauraummanagement eine Änderung der Polderfüllung, die sich für den Polder Feldkirchen geringer auswirkt als für den Polder Ering (grau hinterlegt).

Tabelle 23: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei kombiniertem Polderbetrieb Feldkirchen und Ering sowie mit Stauraummanagement – Abgelaufene Hochwasser

	HW	Q _{const} [m ³ /s]	Q _{max} WBO [m ³ /s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
				[m ³ /s]	prozentual		
nur Polderbetrieb Feldkirchen + Ering	2002	950	5457	424	7,8%	440,82	95,16%
		4450				335,83	89,59%
	2005	2000	4274	500	11,7%	441,07	99,96%
		3600				335,92	91,13%
	2013	1400	6815	377	5,5%	440,25	83,54%
		5900				336,20	95,75%
Polderbetrieb (Feldk + Ering) und Stauraumm.	2002	950	5457	649	11,9%	440,46	87,82%
		4450				333,41	49,16%
	2005	2000	4274	695	16,3%	440,89	96,49%
		3600				333,05	43,37%
	2013	1400	6815	494	7,2%	439,99	78,21%
		5900				333,87	56,81%

Die beschriebenen simulierten Abminderungen des Maximalabflusses am Pegel Passau-Ingling für die betrachteten abgelaufenen Hochwasser bei den verschiedenen Betriebsweisen von Polder Feldkirchen, Polder Ering und Stauraummanagement und deren Kombination sind in Abbildung 100 graphisch zusammengefasst. Es sind die Abminderungen bei Stauraummanagement, Variante 1 (schwarz), Polderbetrieb Feldkirchen (gelb), Polderbetrieb Ering (grün) sowie Polderbetrieb Feldkirchen gemeinsam mit Ering (orange) dargestellt. Der alleinige Polderbetrieb ist jeweils als ausgefülltes Symbol dargestellt, die Kombination mit Stauraummanagement als unausgefülltes Symbol. Die Abminderungen für den alleinigen Polderbetrieb der Flutpolder Feldkirchen und Ering sind bezogen auf den Pegel Passau-Ingling bei den drei Hochwassern ähnlich groß. Das Stauraummanagement (Variante 1) liegt außer bei dem HW 2013 höher als der alleinige Polderbetrieb der Flutpolder. Durch die Kombination von Polderbetrieb und Stauraummanagement ist eine Erhöhung der Scheitelminderung erzielbar. Bei kombiniertem Betrieb des Polders Feldkirchen mit Stauraummanagement überlagern sich die jeweils alleinigen Abminderungen annähernd additiv, wie oben beschrieben. Auch bei kombiniertem Betrieb des Polders Ering mit Stauraummanagement ist die Abminderung größer als bei alleiniger Betrachtung der beiden Betriebsweisen, aber erreicht nicht die Summe der Einzelwirkungen. Ausschlaggebend für die etwas geringere Abminderung bei dem kombinierten Betrieb im Vergleich zur additiven Betrachtung der Einzelwirkungen ist der niedrigere Füllungsgrad des Flutpolders Ering. Einfluss auf die Wirkung des Stauraummanagements unterstrom des Flutpolders hat bei kombiniertem Betrieb ebenfalls die durch die Abgabe in den Polder konstantere Abflussweitergabe im Bereich des Scheitels. Die größte Abminderung ist bei kombiniertem Betrieb des Polders Feldkirchen, Ering und Stauraummanagement möglich. Es ist dabei allgemein erkennbar, dass die Wirkung zur Minderung des Maximalabflusses absolut und prozentual bei größeren Hochwassern abnimmt.

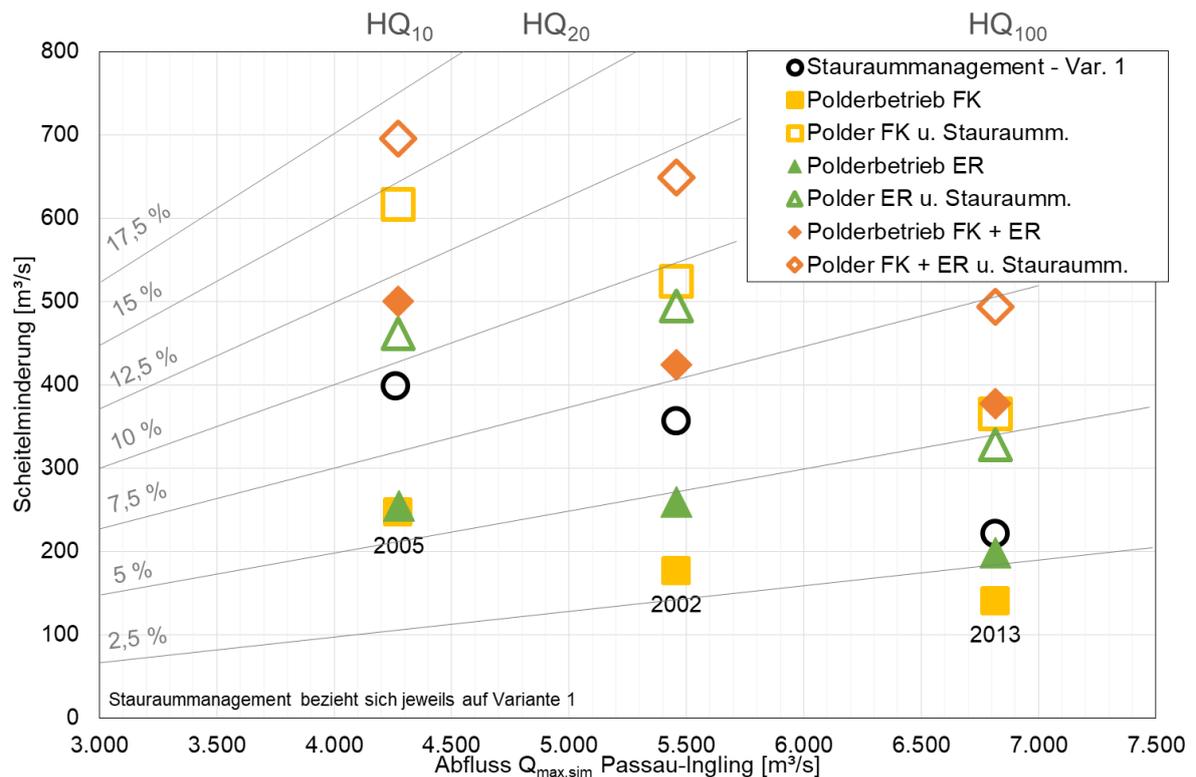


Abbildung 100: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling - Verschiedene Betriebsweisen (Flutpolder Feldkirchen (FK) und Ering (ER)) - Abgelaufene HW

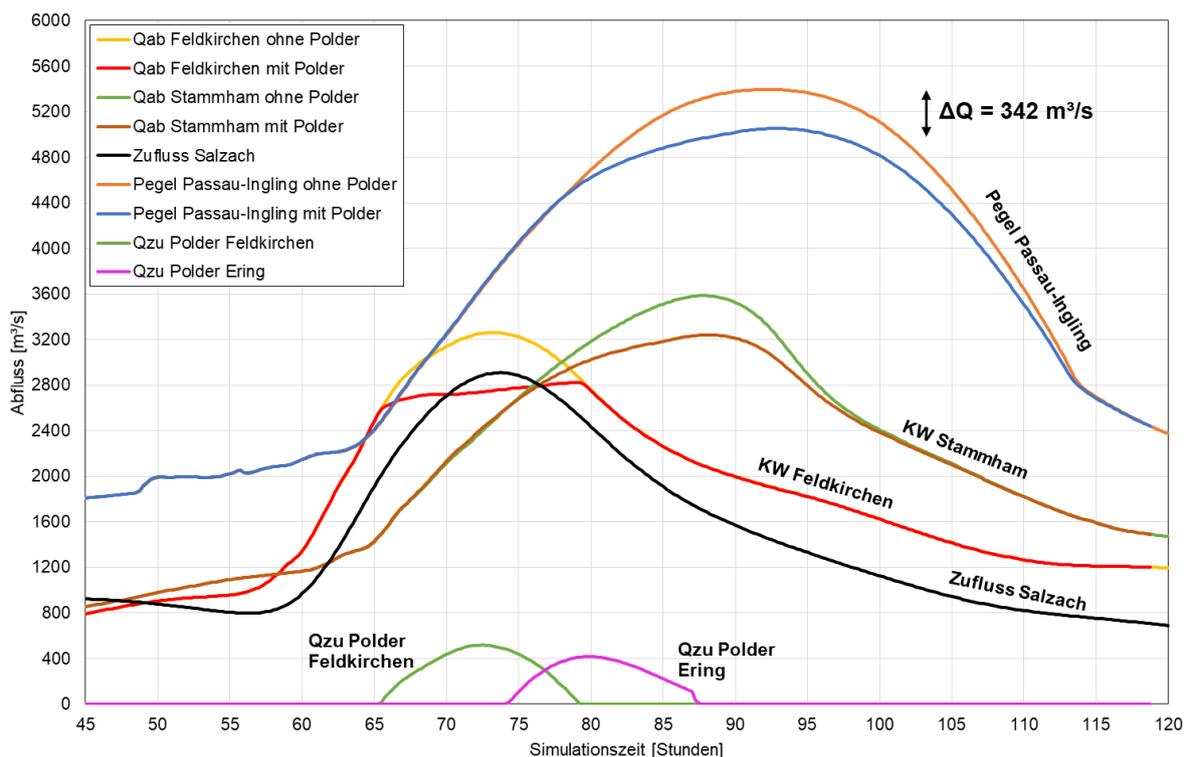
Simulation der synthetischen Hochwasserereignisse

Nach der Untersuchung der abgelaufenen Hochwasser wurden die synthetischen Hochwasserereignisse 3, 9 und 11 betrachtet. Die Vorgehensweise zur Festlegung von Parametern, wie dem Schwellenwert Q_{const} , wurde entsprechend der Betrachtung der abgelaufenen Hochwasser durchgeführt. In Tabelle 24 sind die Werte für Q_{const} , die absolute und prozentuale Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling sowie der Füllstand des Polders Ering bei alleinigem Betrieb sowie bei der Kombination von Polderbetrieb Ering und Stauraummanagement dargestellt. Bei alleinigem Betrieb des Polders Ering wird eine Abminderung des Scheitelabflusses am Pegel Passau-Ingling für die betrachteten Szenarien zwischen 1,9 % (Szenario 9) bis 2,9 % (Szenario 3) berechnet. Das Szenario 9 stellt dabei das größte, das Szenario 3 das kleinste der drei betrachteten Ereignisse am Pegel Passau-Ingling dar. Bei der Kombination mit Stauraummanagement zeigt die Auswertung ein ähnliches Ergebnis wie die Auswertung der abgelaufenen Ereignisse. Die prozentuale Abminderung ist insgesamt größer, während die Polderfüllung aufgrund des hier angesetzten Polderbetriebs gegenüber dem alleinigen Betrieb geringer ist.

Tabelle 24: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei Polderbetrieb Ering sowie mit Stauraummanagement – Stochastische Szenarien

	Szenario	Q_{const} [m ³ /s]	Q_{max} WBO [m ³ /s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
				[m ³ /s]	prozentual		
nur Polderbetrieb Ering	3	5200	5396	155	2,9%	335,46	82,39%
	9	6550	7380	142	1,9%	336,34	97,88%
	11	6700	6978	188	2,7%	336,38	98,61%
Polderbetrieb (Ering) und Stauraumm.	3	5200	5396	363	6,7%	332,61	35,24%
	9	6550	7380	225	3,1%	334,87	73,39%
	11	6700	6978	332	4,8%	334,04	59,60%

Abbildung 101 zeigt beispielhaft einige Abflussverläufe entlang des Inns (Kraftwerke Feldkirchen und Stammham, Pegel Passau-Ingling) ohne und mit Polderbetrieb der beiden Flutpolder Feldkirchen und Ering, den Zufluss der Salzach und die Zuflüsse zu den Poldern Feldkirchen und Ering. Im Falle der stochastischen Szenarien ist der Verlauf der Ganglinien im Vergleich mit den abgelaufenen Hochwassern deutlich homogener und weist kaum Abflussschwankungen auf, sodass auch die Polderzuflüsse einen homogeneren Verlauf zeigen.


Abbildung 101: Szenario 3, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, Polderbetrieb Feldkirchen und Ering

Die Zusammenstellung der quantitativen Ergebnisse der Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling ist in Tabelle 24 dargestellt. Es sind die Ergebnisse des gemeinsamen Betriebes der Flutpolder Feldkirchen und Ering (grau hinterlegt) in der oberen Hälfte sowie die Kombination mit Stauraummanagement (untere Hälfte) aufgeführt.

Tabelle 25: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei kombiniertem Flutpolderbetrieb Feldkirchen und Ering sowie mit Stauraummanagement – Stochastische Szenarien

	Szenario	Q _{const} [m ³ /s]	Q _{max} WBO [m ³ /s]	Delta Q		Füllstand Polder [müNN]	Füllung prozentual
				[m ³ /s]	prozentual		
nur Polderbetrieb Feldkirchen + Ering	3	2500	5396	342	6,3%	440,96	98,03%
		5000				336,50	100,00%
	9	2200	7380	328	4,4%	441,10	100,00%
		6350				336,40	99,77%
	11	1300	6978	342	4,9%	440,95	92,56%
		6550				336,40	98,67%
Polderbetrieb (Feldk + Ering) und Stauraumm.	3	2500	5396	554	10,3%	440,84	95,56%
		5000				334,05	58,90%
	9	2200	7380	409	5,5%	441,10	100,00%
		6350				334,95	74,76%
	11	1300	6978	490	7,0%	440,70	87,05%
		6550				334,47	66,51%

Die oben zusammengefassten Ergebnisse sind in Abbildung 102 graphisch aufbereitet. Es sind die Ergebnisse des Stauraummanagements – Variante 1 (schwarz), der Betrachtung zum Polderbetrieb Feldkirchen (gelb), Polderbetrieb Ering (grün) sowie gemeinsamer Polderbetrieb der beiden Flutpolder (orange) dargestellt. Alleiniger Betrieb der Flutpolder (ausgefülltes Symbol) und Kombination des jeweiligen Polderbetriebes mit Stauraummanagement (unausgefülltes Symbol) werden ebenfalls unterschieden.

Durch die Kombination des Polderbetriebes mit Stauraummanagement ergibt sich jeweils eine höhere mögliche Abminderung. Bei gemeinsamem Betrieb beider Flutpolder und Stauraummanagement ist wie bei den abgelaufenen Hochwassern die höchste Abminderung erzielbar. Die gegenseitige Beeinflussung von Flutpolderbetrieb und Stauraummanagement kann als gering eingeschätzt werden. Allgemein hat das Stauraummanagement bei den verschiedenen Betriebsweisen einen positiven Einfluss auf die Scheitelminderung und leistet damit additiven Beitrag an der Gesamtminderung.

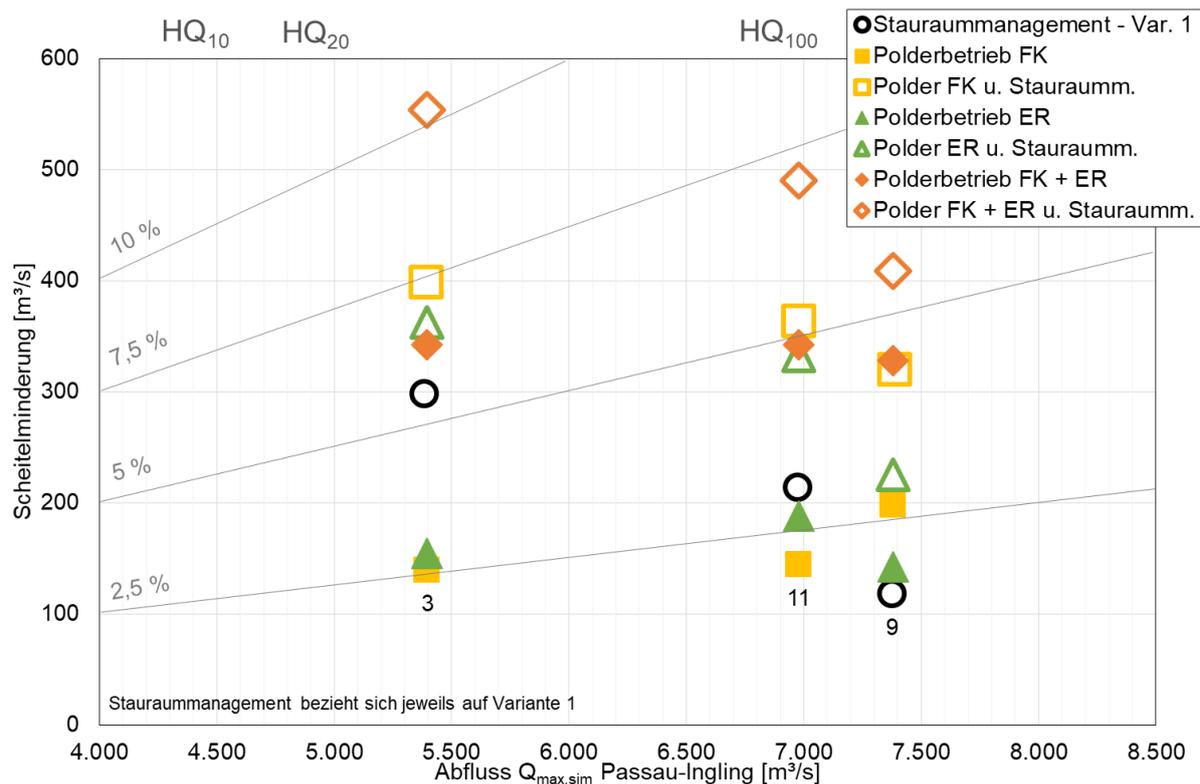


Abbildung 102: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling - Verschiedene Betriebsweisen (Polder Feldkirchen (FK) und Ering (ER)) – Stochastische Szenarien

Die dargestellten Untersuchungen zur Scheitelabminderung durch Flutpolderbetrieb und durch den kombinierten Betrieb von Flutpoldern und Stauraummanagement dienen dazu, ein vertieftes Systemverständnis des Flutpolderbetriebes in Wechselwirkung mit dem Stauraummanagement zu erlangen. Bei der Definition der Polderfüllung liegt der Fokus auf der Nahwirkung des Polderbetriebes für die beiden Flutpolder. Die Untersuchung, die Sensitivitätsaspekte durch Berücksichtigung verschiedener Schwellenwerte zur Beaufschlagung umfasst, aber keine lokalen oder überregionalen Einsatzkriterien mit einbezieht, wird dabei unter idealisierten Bedingungen durchgeführt. Der benötigte Abfluss zum Eingang in die Vorschrift zur Polderfüllung wird als genau bekannt vorausgesetzt und die Füllung als exakt umsetzbar. Die hier dargestellte Füllvorschrift ist somit keine reale Steuerungsoption, sondern gibt die modelltechnisch für die Wirkungsanalyse eines kombinierten Betriebs umgesetzte Polderfüllung wieder.

Es zeigt sich, dass die Flutpolderwirkung bei der getroffenen Definition mit Fokus auf die Nahwirkung auch in der Fernwirkung gute Abminderungen aufweist. Bei kombiniertem Betrieb von Flutpoldern und Stauraummanagement überlagern sich die jeweiligen Einzelwirkungen positiv und die gegenseitige Beeinflussung ist als gering einzuschätzen. Bei den kombinierten Betrachtungen von Flutpolderbetrieb und Stauraummanagement werden die Rückhaltevolumina der Flutpolder zum Teil nicht vollständig ausgeschöpft. Jedoch kann auch bei nicht vollständiger Nutzung der Kapazitäten eine gute Scheitelminderung erreicht werden.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen stellen zusammenfassend keine realen Steuerungsvorgaben dar, die auf operationell zur Verfügung stehenden Daten basieren. In Kapitel 9 werden weitergehende Untersuchungen zum Polderbetrieb Feldkirchen beschrieben, die auf Aspekte zur praktischen Umsetzung einer Poldersteuerung eingehen.

8 Weitergehende Untersuchungen zur Ableitung von Steuerungsvorgaben für Stauraummanagement

8.1 Allgemeines zum Stauraummanagement

Da die Erstabschätzung zur Scheitelminderung durch Stauraummanagement ein Potential aufgezeigt hat, wurden weitergehende Untersuchungen zu Umsetzungsaspekten des Stauraummanagements durchgeführt. Das Kernergebnis dieser Untersuchungen zum Stauraummanagement stellt die Ermittlung einer praxisnahen Steuerungsvorschrift dar, deren Definition im Folgenden erläutert wird. Weiterhin wird in Kapitel 9 der Betrieb des geplanten Flutpolders Feldkirchen im Kontext einer realistischeren Steuerungsvorschrift betrachtet.

Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, wird bei der Durchführung des Stauraummanagements Volumen in einer Stauhaltung durch ein frühzeitiges Absenken des Oberwasserstandes geschaffen, das bei Durchgang des Hochwasserscheitels zum Rückhalt und damit Abminderung des Scheitels genutzt werden kann. Um den Rückhalt zu erzielen, wird der Oberwasserstand an der Stauanlage kurz vor Durchgang des Scheitels auf die festgelegte Stauhöhe geführt.

Bei der Durchführung des Stauraummanagements wird zwischen dem Abstau- und Aufstauprozess unterschieden. Der Abstauprozess soll möglichst frühzeitig vor dem eigentlichen Hochwasser durchgeführt werden, um eine negative Hochwasserwellenüberlagerung zu vermeiden. Aus diesem Grund wird beim Abstau eine Vorhersage des Abflusses berücksichtigt. Der Aufstauprozess wird hingegen rein messwertbasiert durchgeführt, sodass keine Abhängigkeit von Vorhersagen und den damit verbundenen etwaigen Unsicherheiten besteht. Die Definition der Parameter sowie räumliche und zeitliche Bezüge der Ab- und Aufstauprozesse werden im Folgenden erläutert.

8.2 Kenngrößen des Betriebes gemäß Wehrbetriebsordnung

Für die Festlegung der Gradienten des Ab- und Aufstaus wurden Informationen zu den maximalen Absenkgeschwindigkeiten an den Anlagen bei der VERBUND AG eingeholt. In Tabelle 26 sind die Angaben zu definiertem Stauziel gemäß WBO, Absenkziel, Absenktiefe, Absenkgeschwindigkeit sowie Informationen über die Freigabe des gesamten

Abflussquerschnittes zusammengetragen. Die Absenkgeschwindigkeit beträgt in der Regel 10 cm/h und liegt in einzelnen Ausnahmefällen höher. Für den Betrieb der Anlage Passau-Ingling (keine Stauhaltungsdämme) wird die Abstaugeschwindigkeit zeitabhängig festgelegt. Darüber hinaus bestätigte der Betreiber VERBUND AG, dass der Abstau der ersten 0,5 bis 1 m mit einer üblichen Abstaugeschwindigkeit von bis zu 1 m/h unkritisch für Dämme und Deiche sei. Darauf folgend beträgt die weitere Absenkung laut VERBUND 10 cm/h. Weiterhin existieren nach Angaben des Betreibers zwischen Jettenbach und Wasserburg Rutschhänge, die eine Absenkung in den betroffenen Stauräumen kritisch machen.

Die Freigabe des gesamten Abflussquerschnittes erfolgt bei der Anlage Braunau-Simbach bei Absenkziel ab $Q = 9.900 \text{ m}^3/\text{s}$, bei der Anlage Ering-Frauenstein bei Stauziel ab $Q = 7.800 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei den Anlagen Eggfing-Obernberg und Schärding-Neuhaus bei Stauziel ab $Q = 9.900 \text{ m}^3/\text{s}$. Am Kraftwerk Passau-Ingling wird der Abflussquerschnitt ab einem Abfluss von etwa $Q = 5.300 \text{ m}^3/\text{s}$ freigegeben.

Tabelle 26: Absenkgeschwindigkeit gemäß WBO und Freigabe des gesamten Abflussquerschnittes

Stauhaltung	Stauziel WBO [müNN]	Absenkziel WBO [müNN]	Delta h WBO [m]	Absenkgeschwindigkeit	Freigabe gesamter Abflussquerschnitt
Nußdorf	464,00	462,50	1,50	50 cm/h	Bei SZ $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ (TUM 2007)
Rosenheim	451,30	451,30	0,00		
Feldkirchen	441,00	440,50	0,50	10 cm/h	
Wasserburg	430,75	430,50	0,25	10 cm/h, in Ausnahmefällen 20 cm/h	
Teufelsbruck	420,50	420,50	0,00		
Gars	412,50	412,50	0,00		
Jettenbach	403,35	402,50	0,85	von 403,35 bis 403,00 müNN mit 10 cm/h, von 403,00 bis 402,5 2,5 cm/h	
Neuötting	368,80	368,80	0,00		
Perach	361,60	361,00	0,60	10 cm/h, in Ausnahmefällen 50 cm/h	
Stammham	355,10	355,10	0,00		
Simbach-Braunau	349,00	348,50	0,50	10 cm/h	Bei Absenkziel $Q=9900 \text{ m}^3/\text{s}$ (TUM 2007)
Ering-Frauenstein	336,20	336,20	0,00		Bei SZ $Q=7800 \text{ m}^3/\text{s}$ (TUM 2007)
Eggfing-Obernberg	325,90	325,90	0,00		Bei SZ $Q=9900 \text{ m}^3/\text{s}$ (TUM 2007)
Schärding-Neuhaus	314,90	314,90	0,00		Bei SZ $Q=9900 \text{ m}^3/\text{s}$ (TUM 2007)
Passau-Ingling	303,00	300,00	3,00	1. Stunde 18 cm/h 2. Stunde 36 cm/h 3. Stunde 54 cm/h	Bei Absenkziel ab ca. $Q=5300 \text{ m}^3/\text{s}$ (z.B. HW 2013)

8.3 Auswertung von Vorhersagedaten

Im Rahmen des Projektes wurden durch das LfU, Ref. 86 „Hochwassernachrichtendienst, Hochwasservorhersage Donau und Inn, Gebietshydrologie“, Vorhersagedaten abgelaufener Hochwasser zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen vorhergesagte Ganglinien aus zwei Modellen, dem hydrodynamischen Modell Flux/Floris Inn sowie aus dem hydrologischen Modell LARSIM Inn. Für den Inn selbst sind laut LfU die Vorhersagen aus dem Flux/Floris-Modell maßgebend. Der Vorhersagezeitraum der beiden Modelle unterscheidet sich und beträgt in Flux/Floris 48 Stunden, in LARSIM 48 bis 96 Stunden. Nach Angabe des LfU bestehen hier interne Weiterentwicklungen des Modells Flux/Floris für einen längeren Vorhersagezeitraum von 96 Stunden. Die Daten liegen in stündlicher Auflösung vor, der Berechnungszeitpunkt liegt in der Regel 30 bis 90 Minuten zeitlich nach dem Vorhersagezeitpunkt. Die Datendichte (Aufruf der Vorhersage) unterscheidet sich zwischen den beiden Modellen für das HW 2013 deutlich, während die Häufigkeit der Aufrufe von Flux und LARSIM bei den anderen Hochwassern ähnlich groß ist. Übergeben wurden die Daten der folgenden Hochwasser:

- Mai/Juni 2010 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 4.464 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Mai/Juni 2012 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 2.938 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Mai/Juni 2013 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 6.691 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Juni/Juli 2014 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 1.253 \text{ m}^3/\text{s}$)
- August/September 2016 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 2.851 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Mai/Juni 2019 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 2.990 \text{ m}^3/\text{s}$)
- August 2020 ($Q_{\max, \text{Passau-Ingling}} = 4.350 \text{ m}^3/\text{s}$)

Verglichen mit den Jährlichkeiten des Pegels Passau-Ingling weisen von den aufgeführten Hochwassern die Ereignisse der Jahre 2010, 2013 und 2020 eine Jährlichkeit größer als HQ_{10} ($Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$) auf. Alle anderen Hochwasser sind Ereignisse mit einem Maximum, das kleiner als HQ_5 ($Q = 3.700 \text{ m}^3/\text{s}$) ist.

In Abbildung 103 sind ausgewählte Vorhersagen des HW 2013 für das KW Passau-Ingling des Modells LARSIM dargestellt. Aufgetragen ist der gemessene Abfluss (schwarz) sowie die Vorhersagen zu unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkten (bunt, Angabe des Vorhersagezeitpunkts in Legende). Die Länge der Vorhersage beträgt wie oben beschrieben 48 bis 96 Stunden und ist damit vor allem im ansteigenden Bereich des Hochwassers länger als die untersuchten Vorhersagezeitreihen in Flux von 48 Stunden. Die Länge der Vorhersage

stellt ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz bei Stauraummanagement dar. Die Vorhersagen liegen für das HW 2013 im zeitlichen Abstand von einer Stunde vor.

Zu Beginn des Hochwassers liegen die Vorhersagen bezogen auf das Abflussmaximum anfangs zu niedrig. Im weiteren Verlauf gibt die Vorhersage den Scheitel besser wieder. Es ist zu beachten, dass nach Angabe des LfU aktuelle Vorhersagen des Pegels Burghausen / Salzach während des Ereignisses zeitweise nicht verfügbar waren. Der Hochwasserscheitel wird am 03.06.2013 um 17 Uhr gemessen.

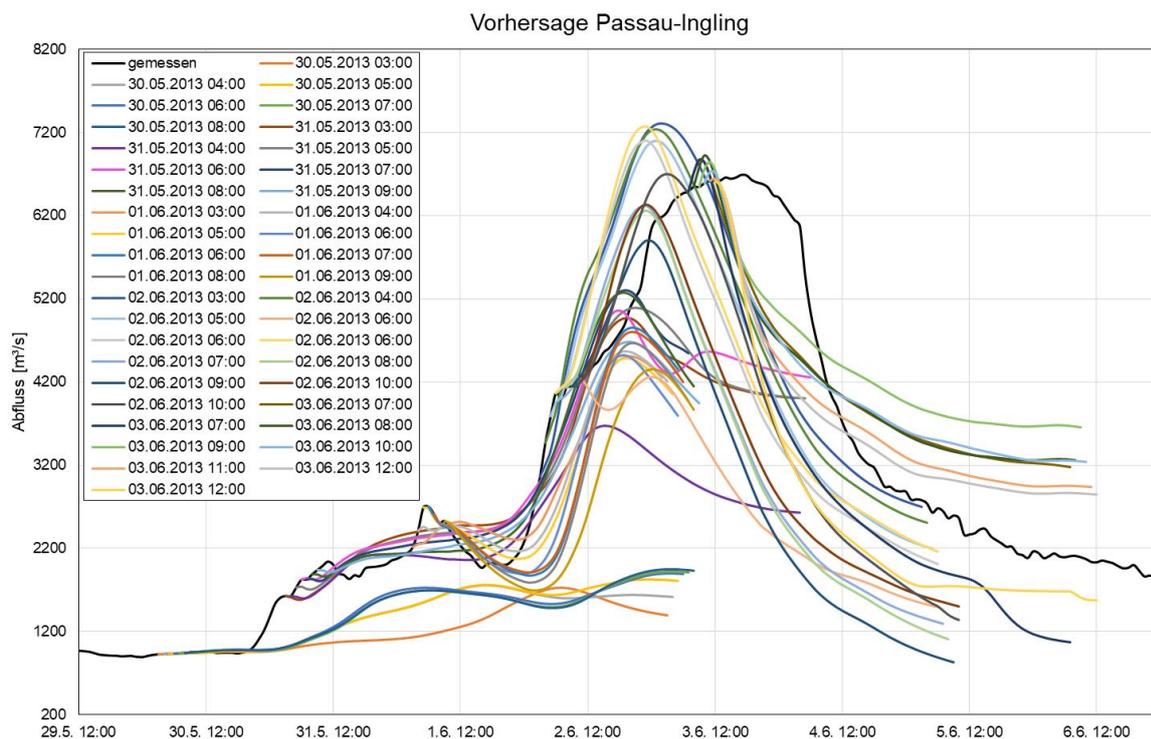


Abbildung 103: Vorhersage HW 2013 KW Passau-Ingling LARSIM

Die Auswertung der Daten bezieht sich auf den vorhergesagten Scheitelabfluss und dessen Auftrittszeitpunkt im Abgleich mit dem gemessenen Q_{max} . Die Auswertung ist in Abbildung 104 dargestellt. Auf der x-Achse ist der Vorhersagezeitpunkt in zeitlichem Bezug zum Auftreten des gemessenen Scheitels (Zeitpunkt $T=0$) aufgetragen. Die Abweichung des vorhergesagten Auftrittszeitpunktes von Q_{max} zu dem real gemessenen ist auf der y-Achse aufgetragen; eine positive Abweichung gibt an, dass der vorhergesagte Zeitpunkt zeitlich vor dem gemessenen liegt. Die Blasengröße der Punkte und die zugehörige Zahlenangabe beziehen sich auf die Relation von vorhergesagtem Q_{max} zu gemessenem. Ein Wert größer als eins gibt an, dass die Vorhersage höher als der Messwert ist.

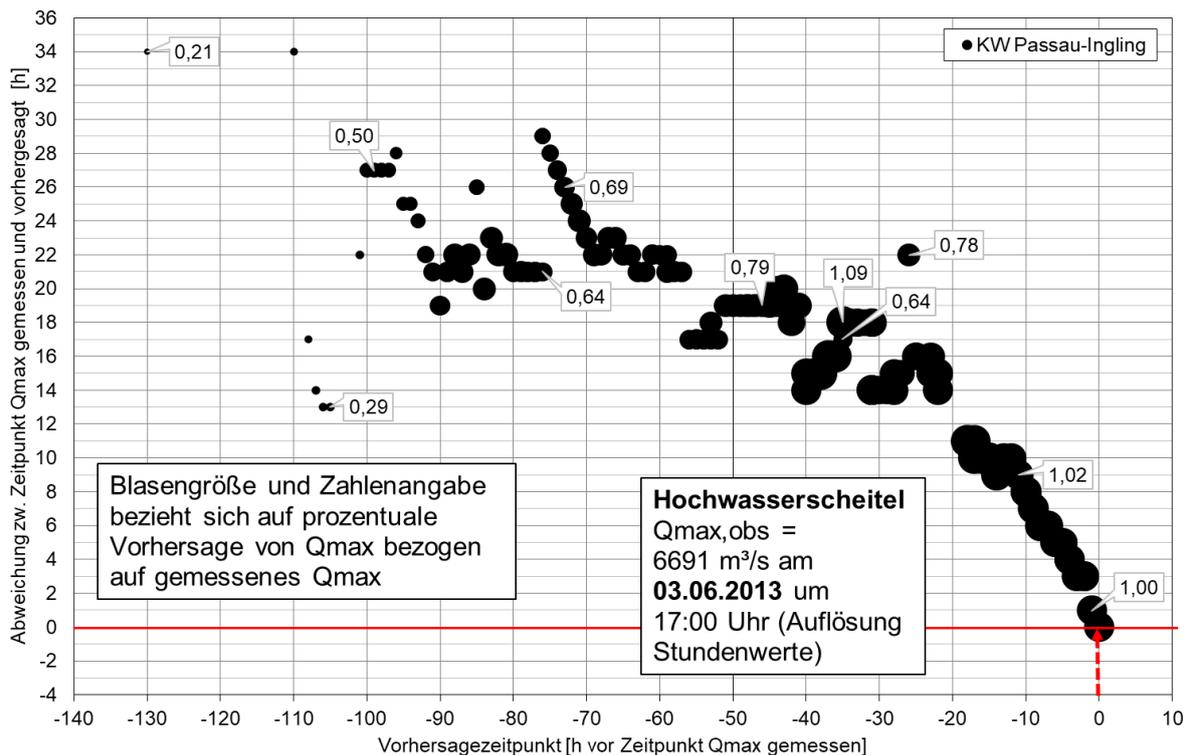


Abbildung 104: Vorhersage HW 2013 KW Passau-Ingling LARSIM Auswertung

Für den Abstauprozess ist die Kenntnis erforderlich, dass ein Hochwasser, beziehungsweise das Überschreiten eines definierten Schwellenwertes eines Abflusses, voraussichtlich stattfinden wird. Nicht entscheidend ist der exakte Auftrittszeitpunkt oder das exakte Q_{\max} .

Da es im Mündungsbereich des Inns in Passau gemäß den Angaben des StMUV bereits bei Hochwassern unter einer Jährlichkeit von HQ_1 zu ersten Überschwemmungen kommt, wird ein niedriger Schwellenwert bei der Auswertung der Vorhersage am KW Passau-Ingling angenommen. Die Auswertungen der Vorhersagen des HW 2013 ($Q_{\max} = 6.691 \text{ m}^3/\text{s}$, $\approx HQ_{100}$) des Modells LARSIM zeigen, dass bereits 92 Stunden vor Auftritt des Scheitels ein Hochwasser von mindestens $Q = 3.700 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_5) vorhergesagt wird. Bei den nachfolgenden Vorhersagen wird dieser Schwellenwert einmal unterschritten, ab 84 Stunden vor dem Hochwasser liegt die Vorhersage dauerhaft über dem genannten Wert. Ein Hochwasser der Jährlichkeit von mindestens HQ_{10} ($Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$) wird ab 90 Stunden vor dem Scheiteleintritt vorhergesagt, der vorhergesagte Maximalabfluss verringert sich ab 73 Stunden nicht unter den Wert von $Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$. Für das HW 2013 liegen stündlich aktualisierte Vorhersagen vor. Im zeitlichen Abstand von 50 Stunden vor dem gemessenen Scheitel sagt die Vorhersage ein Abflussmaximum von etwa $Q = 5.100 \text{ m}^3/\text{s}$ voraus. Der maximale Abfluss wird 30 bis 25 Stunden vor Scheiteleintritt relativ genau vorhergesagt (vgl. Abbildung 104).

Die Auswertung wurde analog auch für das HW 2010 ($Q_{\max} = 4.464 \text{ m}^3/\text{s}$, $\approx HQ_{10}$) durchgeführt. Ein Schwellenwert von $Q = 3.700 \text{ m}^3/\text{s}$ wird hier ab 27 Stunden vor dem

gemessenen Hochwasserscheitel vorhergesagt, der maximal vorhergesagte Abfluss verringert sich im weiteren Verlauf nicht unter den Wert des HQ_5 . Der vorhergesagte Maximalabfluss überschreitet den Wert des HQ_{10} ab 16 Stunden vor dem gemessenen Scheiteleintritt und liegt im weiteren Verlauf nicht unter dem Wert von $Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$. Für das HW 2010 ist zu beachten, dass in LARSIM keine stündlich aktualisierte Vorhersage vorliegt und es sich um ein vergleichsweise geringeres Hochwasser handelt.

Die Definition des Abstauprozesses, der auf der Vorhersage eines Hochwasserereignisses beruht, wird im nachfolgenden Kapitel erläutert und mit den Auswertungen der Vorhersage abgeglichen.

8.4 Entwurf der Steuerung zum Stauraummanagement

8.4.1 Übersicht der berücksichtigten Stauanlagen

Die Betrachtung des Stauraummanagements wird für die Anlagen Neuötting, Perach und Stammham (vor Einmündung der Salzach) sowie die Anlagen Braunau-Simbach, Ering-Frauenstein, Eggfing-Obernberg, Schärding-Neuhaus und Passau-Ingling (unterstrom der Salzachmündung) durchgeführt. Am oberen Inn werden oberstrom von Neuötting keine Anlagen berücksichtigt, da aufgrund der morphologischen Prozesse und von Rutschhängen eine Umsetzung in der Realität deutlich erschwert wäre. Weiterhin ist die Laufzeit entlang des Inns zu beachten. Die Laufzeit muss ausreichend groß sein, um Steuerungsvorgaben zeitlich passend einleiten zu können. Dies ist unter Umständen an weiter oberstrom gelegenen Anlagen nicht so leicht umsetzbar.

In der folgenden Abbildung 105 ist eine Übersicht des Inns dargestellt. Es sind die Stauanlagen (rot) sowie Pegelstellen (grün) eingetragen. Orange umkreist sind die drei Anlagen, die vor Einmündung der Salzach in das automatisierte Stauraummanagement eingehen. Grün umrandet sind die fünf Anlagen, die am unteren Inn betrachtet werden.

Zur Einleitung des Abstauprozesses erfolgt die Überprüfung der Abflüsse am KW Nußdorf an Inn-km 198,7 sowie des Abflusses am Pegel Laufen an der Salzach, an Salzach-km 47,5. Für die Definition des Aufstauprozesses werden zwei Pegelstellen als Referenzpunkte genutzt. Am Inn befindet sich der Pegel im Bereich des Unterwassers des Kraftwerks Rosenheim (Inn-km 187,5), und ist zwischen dem Unterwasser und dem Pegel Rosenheim o.d. Mangfallmündung gelegen. Der Messort am Inn sollte sich in der Nähe, jedoch nicht direkt im Unterwasser des Kraftwerkes Rosenheim befinden, sodass es nicht zu einer negativen Beeinflussung aufgrund von Wehrmanövern und damit einhergehenden kurzfristigen Wasserstandsschwankungen kommt. Als Referenz-km wurde der Inn-km 187,2 gewählt; der Pegel wird im Folgenden als Rosenheim II bezeichnet. Der Referenzpegel an der Salzach ist

der Pegel Laufen an Salzach-km 47,5. Bei der Steuerung werden die Hochwasser anhand der genannten Pegel zwischen inn- und salzachbetont unterschieden.

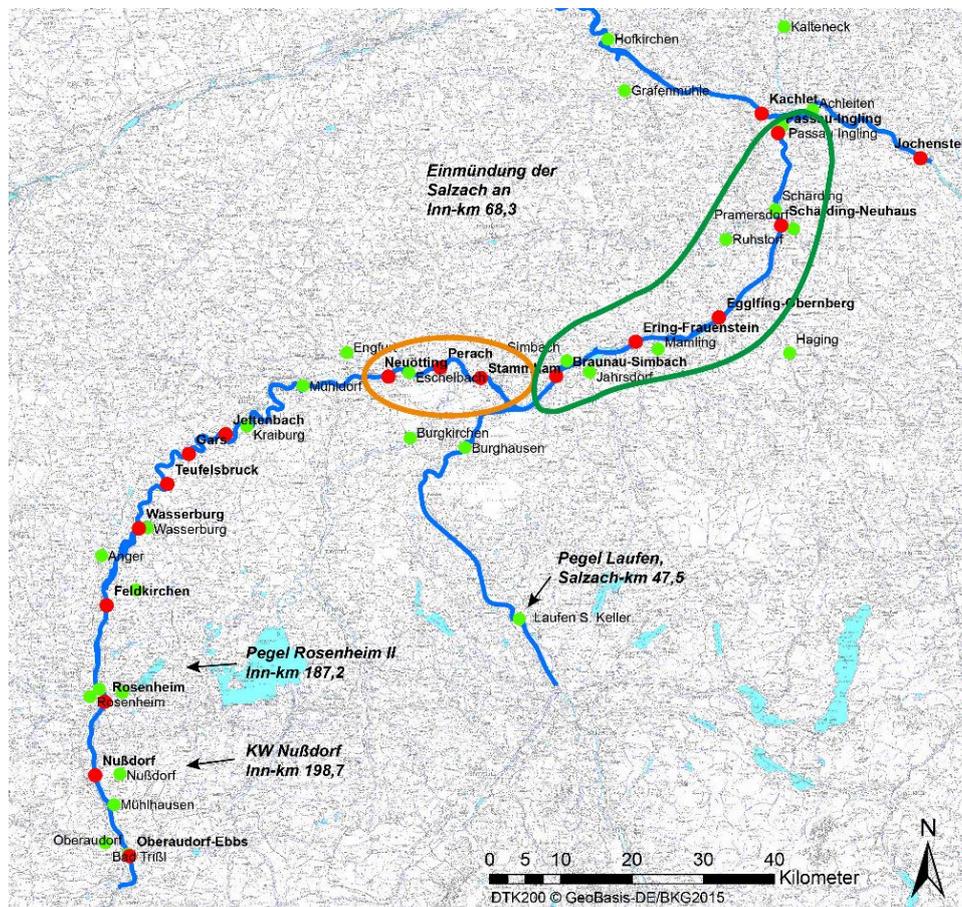


Abbildung 105: Übersicht Inn zum Stauraummanagement - Berücksichtigte Stauanlagen und Referenzpegel (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)

8.4.2 Abstauprozess

Für die reale Umsetzung muss für den Abstauprozess zunächst eine Vorhersage eines Hochwassers vorliegen, die einen definierten Schwellenwert überschreitet. Wenn die Vorhersage für den Pegel Passau-Ingling einen Schwellenwert (hier angenommen: $Q = 3.700 \text{ m}^3/\text{s}$) überschreitet sowie die Abflusswerte an der Staustufe Nußdorf und / oder am Pegel Laufen über einem definierten Wert (hier angenommen: $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$) liegen, wird abgestaut. Die Vorhersage wird in der Realität während des Prozesses kontrolliert. Bei einem Rückgang der Vorhersage wird der weitere Abstau zeitweise ausgesetzt.

An allen betrachteten Anlagen wird somit bei einer Vorhersage für Passau-Ingling $> 3.700 \text{ m}^3/\text{s}$ der Abstau durchgeführt, sobald am Kraftwerk Nußdorf ein Abfluss von $Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht wird, beziehungsweise sobald ein Abstau gemäß WBO durchzuführen ist (Beachtung insbesondere bei Passau-Ingling notwendig). An den Anlagen unterstrom der

Salzacheinmündung wird darüber hinaus ein Abstau durchgeführt, wenn der Abfluss am Pegel Laufen einen Wert von $Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$ annimmt.

Der Gradient des Abstaus beträgt 10 cm/h (außer Passau-Ingling, vgl. Tabelle 28) und der Abstau wird an den Anlagen vor Einmündung der Salzach bis zu $1,5 \text{ m}$ durchgeführt. Der Abstau beträgt $2,0 \text{ m}$ (Braunau-Simbach, Ering-Frauenstein, Eggfling-Obernberg), $2,5 \text{ m}$ (Schärding-Neuhaus) und $4,5 \text{ m}$ (Passau-Ingling) an den Anlagen unterstrom der Salzachmündung. Der Abstau in Schärding-Neuhaus wird aufgrund der Größe des Stauraumes um $2,5 \text{ m}$ vorgenommen und am KW Passau-Ingling wird um $4,5 \text{ m}$ abgestaut, da gemäß WBO bereits um 3 m am KW Passau-Ingling abgesenkt wird. Die hier aufgeführten Kenngrößen des Abstaus sowie die später erläuterten Kenngrößen des Aufstaus (Gradienten, Zeitpunkte) wurden anhand umfangreicher Sensitivitätsuntersuchungen und Laufzeitanalysen ermittelt. Die Eignung der Kenngrößen wird durch die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse bestätigt. Das generierbare Rückhaltevolumen ist abhängig von der Abstautiefe respektive der zulässigen Aufstauhöhe sowie der Abflusssituation im System. Bei höheren Abflüssen im Stauraum nimmt das verfügbare Rückhaltevolumen ab und das zusätzliche Volumen eines tieferen Abstaus ist vergleichsweise gering. Größere Abstautiefen gehen zusätzlich mit größerer Erosion und Trockenfallen weiterer Bereiche einher. Die Simulationen mit den genannten Abstautiefen werden als Variante A bezeichnet. In einer weiteren Variante B wird ein geringerer Abstau an den Anlagen am unteren Inn (unterstrom der Salzachmündung) vorgenommen. In Tabelle 27 sind die Stauziele und Absenkungen gemäß WBO sowie der Ab- und Aufstau an den berücksichtigten Anlagen für das Stauraummanagement der Varianten A und B zusammengestellt. Der Ergebnisvergleich der beiden Varianten ist in Kapitel 8.4.5 dargestellt.

Tabelle 27: Stauziel und Ab- und Aufstau an den berücksichtigten Anlagen in Varianten A und B

Zuordnung	Anlage	Stauziel WBO [müNN]	Absenkung gemäß WBO [m]	Abstau Variante A [m]	Aufstau Variante A [m]	Abstau Variante B [m]	Aufstau Variante B [m]
Oberer Inn	Neuötting	368,80	0,0	1,5	1,5	1,5	1,5
	Perach	361,60	0,6	1,5	0,9	1,5	0,9
	Stammham	355,10	0,0	1,5	1,5	1,5	1,5
Unterer Inn	Braunau-Simbach	349,00	0,5	2,0	1,5	1,5	1,0
	Ering-Frauenstein	336,20	0,0	2,0	2,0	1,5	1,5
	Eggfling-Obernberg	325,90	0,0	2,0	2,0	1,5	1,5
	Schärding-Neuhaus	314,90	0,0	2,5	2,5	2,0	2,0
	Passau-Ingling	303,00	3,0	4,5	1,5	4,0	1,0

Der Abstauprozess dauert damit in Abhängigkeit der Abstautiefe beispielsweise 20 Stunden bei einem Abstau von $2,0 \text{ m}$ und einem definierten Abstau-Gradienten von 10 cm/h . Die oben beschriebenen Auswertungen der Vorhersage aus LARSIM für die HW 2010 und insbesondere für das betrachtete HW 2013 zeigen, dass die Zeitspanne zwischen der

Vorhersage eines Hochwassers, das einen Schwellenwert von beispielsweise $Q = 3700 \text{ m}^3/\text{s}$ überschreitet, in der Regel ausreichend ist, um mit dem Abstauprozess, der etwa 20 Stunden dauert, frühzeitig beginnen zu können. Zur Einleitung des Abstauprozesses müssen die gemessenen Abflüsse an Inn und Salzach den hier angenommenen Schwellenwert von $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ überschreiten. Für das HW 2013 wird der Abstauprozess an den Anlagen oberstrom der Salzacheinmündung 67 Stunden, an den Anlagen unterstrom bereits 86 Stunden vor Eintreffen des Scheitels in Passau-Ingling eingeleitet.

8.4.3 Aufstauprozess

Bei dem Aufstau wird zwischen innabhängigen und salzachabhängigen Aufstauprozessen unterschieden. Die Parameter und Zeitverschiebungen für den Aufstauprozess wurden anhand von umfangreichen Analysen zu Laufzeiten des Fließsystems sowie den im Rahmen der Erstabschätzung und bei Sensitivitätsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnissen definiert. Die Eignung der genutzten Werte konnte mittels umfassender Simulationen bestätigt werden. An den drei Anlagen vor Einmündung der Salzach wird der Aufstau, wenn aufgrund des Abflusses am KW Nußdorf abgestaut wurde, immer innabhängig durchgeführt. Beim Aufstauprozess an den Anlagen unterstrom der Salzachmündung wird der Aufstau abhängig von Inn (Bezug $WST_{RO,II}$) oder Salzach (WST_{Laufen}) wie folgt definiert:

1. wenn $WST_{RO,II} > 446,5 \text{ müNN}$ ($\approx \text{HQ20}$) \rightarrow innabhängig
2. wenn $WST_{Laufen} > 394 \text{ müNN}$ ($\approx \text{HQ20}$) \rightarrow salzachabhängig.

Wird die Steuerungsvorgabe für ein Hochwasser als innabhängig definiert, wird der Aufstau in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Absinkens des Pegels Rosenheim II (gleitendes Mittel des Wasserstandwertes über 30 Minuten) um 30 cm (t_{RO}) vorgenommen. Für die Definition des gegenüber t_{RO} zeitverschobenen Aufstaubeginns t_{auf} gilt, in Abhängigkeit des maximalen Wasserstandes $WST_{RO,II}$, die folgende Zuordnung:

- $WST_{RO,II} = 446 \text{ müNN} \rightarrow t_{auf} = t_{RO} + 0\text{h}$
- $WST_{RO,II} = 448,50 \text{ müNN} \rightarrow t_{auf} = t_{RO} + 3\text{h}$; linear interpoliert, keine Extrapolation

Der Aufstauprozess am KW Neuötting wird entsprechend der dargestellten Zeitverschiebung vorgenommen. Der Aufstau am KW Perach wird zusätzlich um 0,5 h verschoben, der Aufstau am KW Stammham um 1 h. Am KW Braunau-Simbach wird der Aufstau zusätzlich um 1,5 h verschoben, am KW Ering-Frauenstein um 2,5 h, an Eggfing-Obernberg und Schärding-Neuhaus um 0 h und am KW Passau-Ingling um 9,5 h. Der Gradient des Aufstauprozesses beträgt 20 cm/h und der Aufstau wird an den Anlagen, an denen ein Abstau gemäß WBO vorgesehen ist, jeweils auf Absenkziel geführt (gemäß WBO, Variante 1). Umfangreiche

Analysen und Sensitivitätsuntersuchungen führten zur Festlegung der aufgeführten Parameter. Es besteht ein komplexes Wechselspiel zwischen den verschiedenen Kenngrößen von Abstautiefen, Gradienten und Zeitpunkten des Aufstaus, bei dem Laufzeiten im Fließsystem und Anstiegsdauern zu berücksichtigen sind. Die Eignung der aufgeführten Werte wurde anhand einer Vielzahl von Analysen und Simulationen bestätigt.

Handelt es sich um ein salzachabhängiges Hochwasser, wird der Aufstau an den Anlagen unterstrom der Salzacheinmündung zeitverschoben gegenüber dem Absinken des Wasserstandes des Pegels Laufen WST_{Laufen} um 30 cm (t_{LA}) vorgenommen. In Abhängigkeit des maximalen Wasserstandes WST_{Laufen} gilt:

- $WST_{\text{Laufen}} = 393 \text{ mÜNN} \rightarrow t_{\text{auf}} = t_{\text{LA}} + 0 \text{ h}$
- $WST_{\text{Laufen}} = 396 \text{ mÜNN} \rightarrow t_{\text{auf}} = t_{\text{LA}} + 1 \text{ h}$; linear interpoliert, keine Extrapolation

Für die Anlagen unterstrom des KW Braunau-Simbach wird der Beginn des Aufstaus bei salzachabhängigen Hochwassern zusätzlich um 1 h am KW Ering-Frauenstein und 8 h am KW Passau-Ingling verschoben. An den Anlagen Eggfing-Obernberg und Schärding-Neuhaus wurde keine zusätzliche Zeitverschiebung definiert. Der Gradient des Aufstaus beträgt auch hier 20 cm/h. Wie oben beschrieben wird auch in diesem Fall der Aufstau auf das Stauziel während Hochwasser gemäß WBO geführt. Der Aufstau wird somit rein messwertbasiert durchgeführt.

Tabelle 28 führt die bei Stauraummanagement eingehenden Anlagen sowie die Parameter von Ab- und Aufstau für Variante A zusammenfassend auf. Eingetragen sind die Abstautiefe, der Gradient des Abstaus, die entsprechende Dauer des Abstauprozesses, die Aufstauhöhe, der Gradient des Aufstaus sowie die Dauer. Der Abstaugradient beträgt mit Ausnahme des Kraftwerks Passau-Ingling maximal 10 cm/h. Der Gradient des Aufstauprozesses wurde mit 20 cm/h festgelegt. Beide Werte liegen in einem realistischen Bereich, der im realen Betrieb nicht zu einer Gefährdung (Deiche, Dämme, ...) führen würde. Orange hinterlegt dargestellt ist der Aufstau an den Anlagen, bei denen gemäß WBO ein Abstau während eines Hochwassers durchgeführt wird. Der Aufstau wird hier auf das Absenkziel bei Hochwasser geführt (gemäß WBO, entsprechend Variante 1 aus Erstabschätzung des Potentials).

In den letzten beiden Spalten der Tabelle ist die zusätzliche Zeitverschiebung bei innbetonten (gelb) und salzachtbetonten (grün) Aufstauprozessen gegenüber dem Absinken des Wasserstandes an den jeweiligen Referenzpegeln dargestellt. Bei innbetonten Aufstauprozessen (gelb) wird der Aufstau wie oben beschrieben in Abhängigkeit des Pegels Rosenheim II an Inn-km 187,2 durchgeführt. An den Anlagen Neuötting, Perach und Stammham sind die Aufstauprozesse immer innbetont. Bei salzachtbetonten

Aufstauprozessen (grün) an den Anlagen unterstrom der Salzacheinmündung wird der Aufstau anhand des Pegels Laufen definiert.

Tabelle 28: Parameter des Ab- und Aufstauprozesses (Variante A)

Anlage	Abstau	grad ab	Abstau dauert	Aufstau	grad auf	Aufstau dauert	Innbetont	Salzachbetont
	[m]	[m/h]	[h]	[m]	[m/h]	[h]	zusätzliche Zeitverschiebung [h]	zusätzliche Zeitverschiebung [h]
Neuötting	1,5	0,1	15	1,5	0,2	7,5	0	0
Perach	1,5	0,1	15	0,9	0,2	4,5	0,5	0,5
Stammham	1,5	0,1	15	1,5	0,2	7,5	1	1
Braunau-Simbach	2,0	0,1	20	1,5	0,2	7,5	1,5	0
Ering-Frauenstein	2,0	0,1	20	2,0	0,2	10,0	2,5	1
Eggfing-Obernberg	2,0	0,1	20	2,0	0,2	10,0	0	0
Schärding-Neuhaus	2,5	0,1	25	2,5	0,2	12,5	0	0
Passau-Ingling	4,5	0,3	15	1,5	0,2	7,5	9,5	8

Für die praktische Umsetzung der Steuerung ist mit Bezug auf die Referenzpegel zu beachten, dass eine Redundanz der Messung sichergestellt wird. Es sollten Wasserstandsmessungen am gleichen Querschnitt mit verschiedenen Messeinrichtungen durchgeführt werden, für die jeweils eine unabhängige Stromversorgung und Datenübertragung vorauszusetzen sind. Gegebenenfalls sollte ein Abgleich mit einer weiter oberstrom gelegenen Anlage durchgeführt werden, sodass sicher ist, dass der Hochwasserscheitel durchlaufen wurde.

8.4.4 Simulationen der abgelaufenen Hochwasser und stochastischer Ereignisse

Nachfolgend sind in der Tabelle 29 die betrachteten abgelaufenen Hochwasser und stochastischen Ereignisse mit den auftretenden Maximalwasserständen des Referenzpegels Rosenheim II und des Pegels Laufen aufgetragen. Die Hochwasser werden anhand des Überschreitens eines Referenzwasserstandes (Ref, etwa HQ_{20}) an den beiden Pegeln als inn- oder salzachbetont definiert (orange hinterlegt). Werden beide Wasserstände überschritten (Szenario 12), entscheidet der zuerst überschrittene über den Zeitbezug für den Aufstau. In der letzten Spalte der Tabelle 29 ist zusätzlich das Verhältnis der simulierten Abflüsse am Kraftwerk Neuötting und Pegel Burghausen aufgetragen, um einen Überblick über die Größenordnung der Maximalabflüsse der beiden Flussabschnitte im Nahbereich der Einmündung zu geben.

Tabelle 29: Wasserstände an Referenzpegeln

	WST _{max} Rosenheim II [müNN]	WST _{max} Laufen [müNN]	Verhältnis Q _{max} (Neuötting/Burg- hausen) [-]
2002	445,42	395,70	0,59
2005	447,47	391,54	2,13
2013	446,18	395,94	0,61
1	446,71	392,81	1,27
2	446,87	393,72	0,96
3	448,31	393,90	1,29
4	447,67	392,39	1,60
5	442,70	394,60	0,19
6	445,84	395,22	0,58
7	448,37	390,86	2,72
8	442,54	395,31	0,15
9	447,78	393,05	1,58
10	448,52	393,57	1,56
11	446,08	395,93	0,61
12	446,67	396,15	0,69
Ref	446,50	394,00	

Im Rahmen der Simulationen werden die gesamten, oben beschriebenen Steuerungsregeln berücksichtigt. Es erfolgt eine automatische Überprüfung und Berücksichtigung des Rückstaus des Unterwasserstandes an allen Anlagen. Da für die betrachteten abgelaufenen Hochwasser (außer HW 2013) und synthetischen Ereignisse keine Vorhersagen vorliegen, wurde der Abstau bei allen Simulationen durchgeführt, wenn ein Abfluss von $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ am KW Nußdorf oder Pegel Laufen überschritten wurde.

In Abbildung 106 sind die Ergebnisse der absoluten Scheitelminderung des automatisierten Stauraummanagements am Pegel Passau-Ingling bezogen auf den Maximalabfluss gemäß WBO aufgetragen. Ausgewertet wurde die Differenzen der Scheitelabflüsse gemäß WBO und Stauraummanagement. Es wird unterschieden zwischen den Simulationsergebnissen der stochastischen Szenarien (rot) und der abgelaufenen Hochwasser (schwarz). Es sind absolute Abminderungen zwischen $\Delta Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $380 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie prozentuale Abminderungen von 2 bis 9 % erzielbar. Tendenziell nimmt die mögliche Scheitelabminderung mit steigendem Maximalabfluss ab.

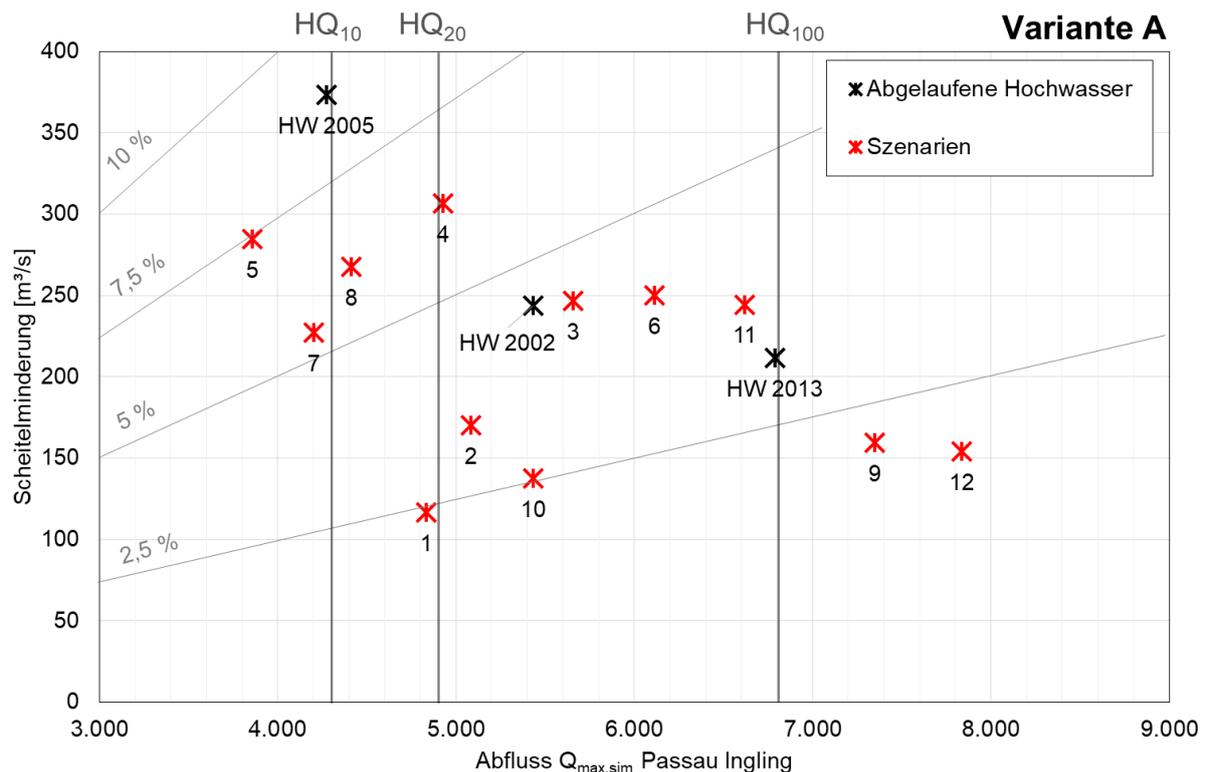


Abbildung 106: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei abgelaufenen Hochwassern und stochastischen Szenarien am Pegel Passau-Ingling (Variante A)

Bei dem Vergleich der Simulationsergebnisse des Stauraummanagements der Erstabschätzung des Potentials (Kapitel 6.3) und des realistischen Potentials (Abbildung 106) ist zu beachten, dass sich die Betrachtungen hinsichtlich einzelner Punkte unterscheiden. Bei den hier vorgestellten weitergehenden Untersuchungen nehmen die Anlagen Neuötting bis Passau-Ingling (8 Anlagen) am Stauraummanagement teil, bei der Erstabschätzung darüber hinaus Rosenheim, Feldkirchen und Wasserburg (11 Anlagen). Die Werte der Abstautiefe und der Gradienten (insbesondere Aufstaugradient) variieren bei der Erstabschätzung pro Hochwasserereignis, während hier gleichbleibende Werte genutzt werden.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der absoluten Scheitelminderung der Erstabschätzung (Punkte) und des realistischen Potentials (Sterne) für die abgelaufenen Hochwasser ist einzig bei dem HW 2002 eine größere Differenz erkennbar (vgl. Abbildung 107). Diese ergibt sich, da es sich bei dem HW 2002 um ein steiles, schnell ansteigendes Hochwasser handelt. An vier der Anlagen (Neuötting, Perach, Stammham und Schärding) wird bei der gewählten Regel der Abstau auf das geforderte Absenkeziel nicht erreicht. Das Simulationsergebnis zeigt jedoch, dass das System so robust ist, dass der Aufstau nahtlos fortgesetzt und ein gutes Ergebnis für die Abminderung des Scheitels erzielt werden kann. Die Ergebnisse der möglichen Scheitelminderung für die HW 2005 und 2013 liegen in einem sehr ähnlichen Bereich wie bei der Erstabschätzung des Potentials.

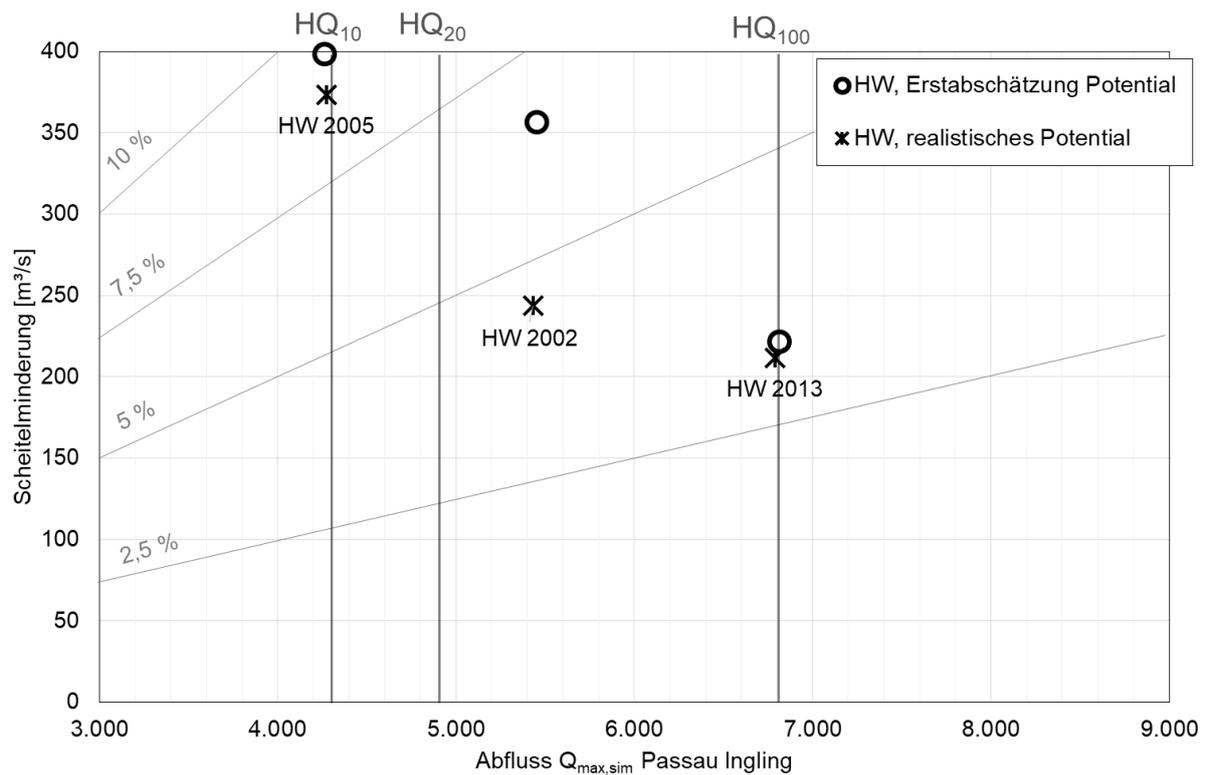


Abbildung 107: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei abgelaufenen HW (Variante A) im Vergleich mit Ergebnissen aus Erstabschätzung des Potentials am Pegel Passau-Ingling

Abbildung 108 zeigt beispielhaft die Abflussganglinien des Betriebes gemäß WBO und bei Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling für das HW 2002. Es ist erkennbar, dass der Abstauprozess und damit eine Abflusserhöhung gegenüber dem Betrieb gemäß WBO etwa ab Simulationsstunde 48 stattfindet. Da es sich bei dem HW 2002 wie beschrieben um ein schnell ansteigendes Hochwasser handelt, findet der Abstau bei der gewählten Regel vergleichsweise spät statt. Der Aufstauprozess beginnt entsprechend des beschriebenen Reglements etwa bei Simulationsstunde 72. Es ist eine deutliche Abminderung im Scheitelbereich durch das Stauraummanagement erkennbar.

Die Abflussganglinie wird über den gesamten zeitlichen Verlauf über ansteigenden bis abfallenden Bereich durch das Stauraummanagement nur geringfügig zeitlich beeinflusst. Im Bereich des Scheitels wird die Ganglinie bei Stauraummanagement über einen längeren Zeitbereich von mehreren Stunden gegenüber dem Betrieb gemäß WBO reduziert.

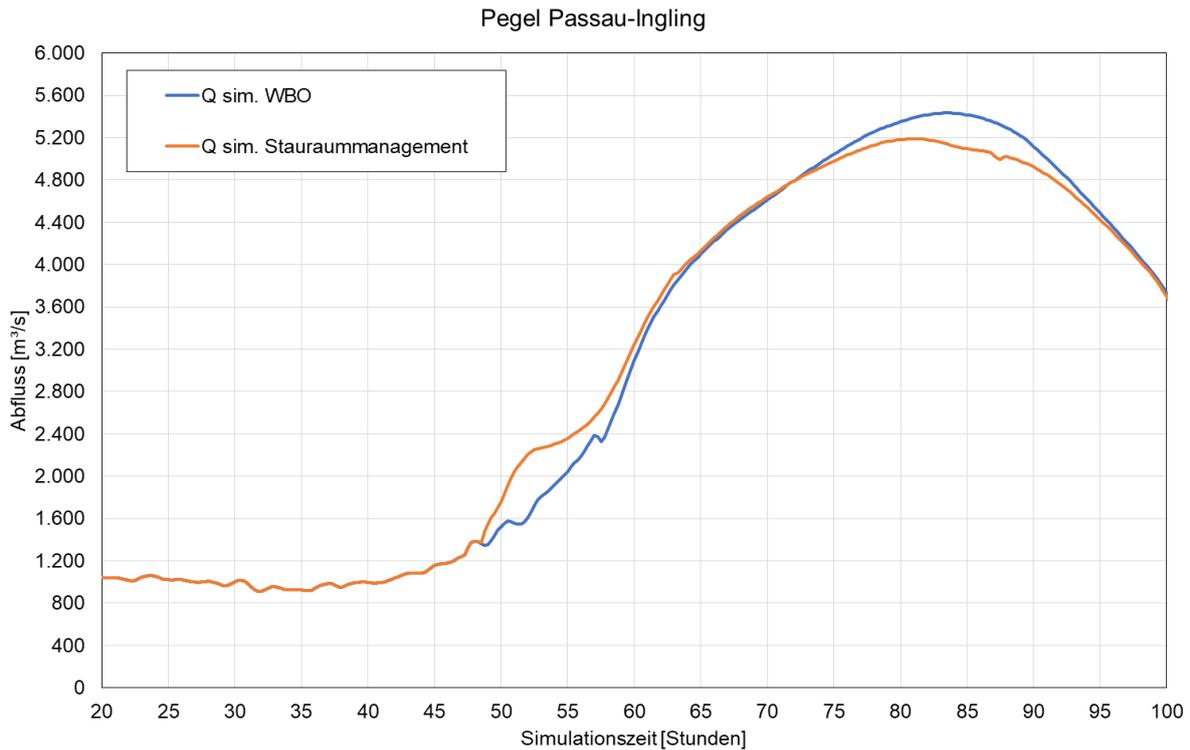


Abbildung 108: HW 2002 Ganglinien bei Betrieb gemäß WBO und Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling (Variante A)

Im Fall des HW 2013 findet der Abstau schon deutlich früher statt, wie in Abbildung 109 für den Pegel Passau-Ingling zu sehen ist. Die Abflusserhöhung durch den Abstauprozess findet im Zeitbereich bis etwa Stunde 20 statt. Im ansteigenden Ast des Hochwassers ab Stunde 55 führt der verringerte Oberwasserstand zu einer marginalen Verzögerung der Abflussganglinie. Ungefähr ab Simulationsstunde 71 findet der Aufstauprozess statt und der Scheitelpunkt der Ganglinie wird bei der Simulation mit Stauraummanagement entsprechend reduziert. Im weiteren Verlauf ab Stunde 95 verlaufen die Ganglinien gemäß WBO und Stauraummanagement annähernd gleich.

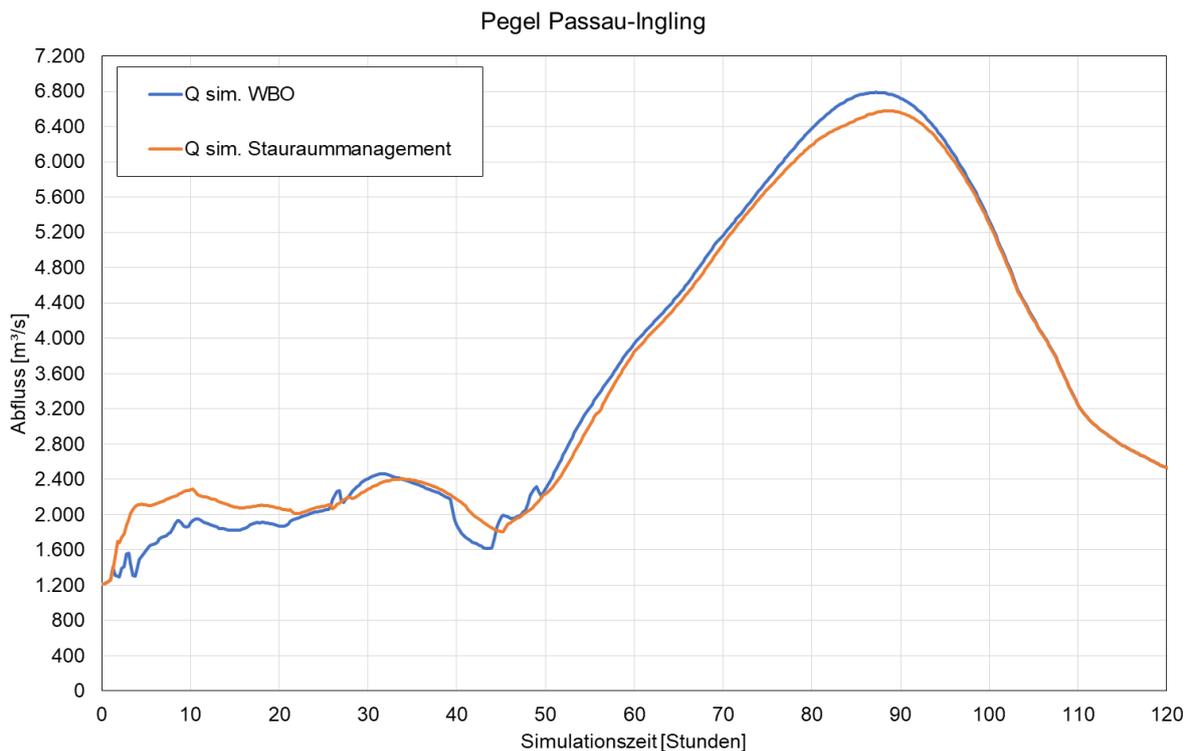


Abbildung 109: HW 2013 Ganglinien bei Betrieb gemäß WBO und Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling (Variante A)

Anhand der beispielhaften Simulationsergebnisse für die HW 2002 und 2013 ist ersichtlich, dass die Abflussganglinien bei Stauraummanagement nicht beschleunigt oder verzögert werden. Der Einfluss des abgesenkten Oberwasserstandes auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hochwasserwelle ist gering. Im Bereich des Scheitels wird die Hochwasserwelle durch den Rückhalt von Volumen bei dem Aufstauprozess verringert.

In der nachfolgenden Abbildung 110 sind die Ergebnisse der absoluten Scheitelminderungen der stochastischen Szenarien mit ungeraden Ziffern der Erstabschätzung des Potentials (Punkte) sowie der weitergehenden Untersuchung zum realistischen Potential (Sterne) aufgetragen.

Die Definition des Zuflusses der Salzach unterscheidet sich für die beiden Betrachtungen. Im Rahmen der Erstabschätzung wurde für den Zufluss am Pegel Burghausen/Salzach die von der TU Wien simulierte Ganglinie des entsprechenden Knotenpunktes des N-A-Modells verwendet. Für die weitergehenden Untersuchungen zur Entwicklung von Steuerungsvorgaben wurden Ganglinien der TUM aus der Betrachtung mit dem 2D-HN-Modell genutzt, die sich von den Ganglinien der TU Wien unterscheiden. Von der TUM wurden Simulationsergebnisse von Wasserstand und Abfluss der Pegel Laufen und Burghausen an der Salzach zur Verfügung gestellt. Der simulierte Abfluss am Pegel Burghausen dient zur

Definition des seitlichen Zuflusses und die Abfluss- und Wasserstandsdaten am Pegel Laufen werden bei der Steuerung genutzt.

Bei dem Vergleich der Simulationen gemäß WBO, die für die unterschiedliche Definition des Zuflusses der Salzach durchgeführt wurden, ergibt sich ein unterschiedlicher Maximalabfluss am Pegel Passau-Ingling. Die simulierten Scheitelmaxima liegen bei Nutzung der Daten der TUM in der Regel niedriger als bei Verwendung der Daten der TU Wien. Durch eine veränderte Überlagerung der Hochwasserwellen aus Inn und Salzach kann es jedoch auch dazu kommen, dass der Maximalabfluss am Pegel Passau-Ingling bei Nutzung der TUM-Daten höher ist (Szenario 3). Weiterhin ist die Form der Abflussganglinien von TUM und TU Wien am Pegel Burghausen unterschiedlich, sodass die Szenarien und die erzielten Ergebnisse für die Szenarien nicht vollkommen vergleichbar sind.

Die Abminderungen sind für die einzelnen Ereignisse in der Regel vergleichbar groß. Lediglich der Vergleich der Ergebnisse des Szenarios 1 zeigt dabei eine deutliche Abweichung, die sich durch die Überlagerung der Hochwasserwellen von Inn und Salzach ergibt. Der Scheitel der Salzach ist zwar deutlich geringer ($Q = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ gegenüber $Q = 3.200 \text{ m}^3/\text{s}$), tritt jedoch am Kraftwerk Braunau-Simbach etwa 10 Stunden früher auf als der Scheitel des Inns. Da im Rahmen der Erstabschätzung nicht immer konsequent bis auf den angegebenen maximalen Abstau abgestaut wurde, kann wie im Fall des Szenarios 9 die ermittelte Abminderung des realistischen Potentials größer sein als die Abminderung der Erstabschätzung.

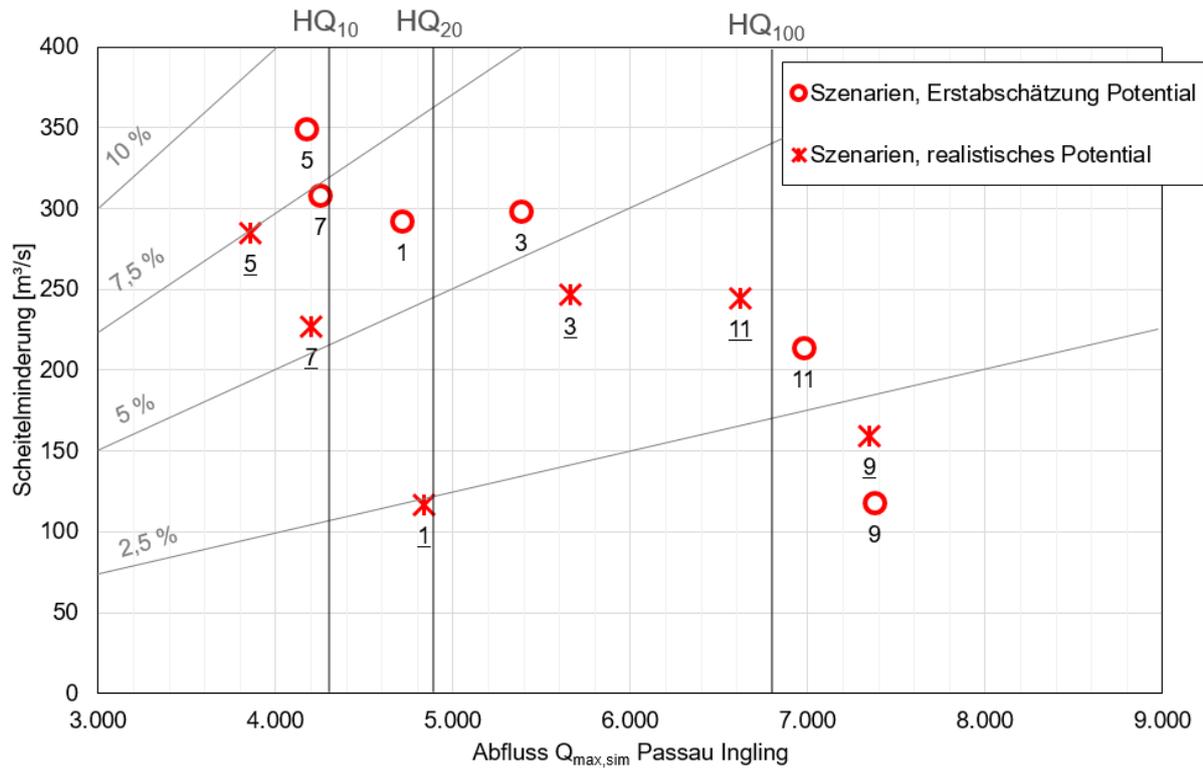


Abbildung 110: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei stochastischen Szenarien (Variante A, ungerade Ziffern) im Vergleich mit Ergebnissen aus Erstabschätzung des Potentials am Pegel Passau-Ingling

Auch bei dem Vergleich der stochastischen Ereignisse mit geraden Ziffern (Abbildung 111) ist ersichtlich, dass die Abminderungen der Erstabschätzung und des realistischen Potentials ähnlich groß sind. Nur im Falle des Szenarios 2 kommt es zu einer größeren Abweichung, die sich aufgrund einer breiten Wellenform am oberen Inn ergibt. Der Aufstauvorgang wird hier unabhängig durchgeführt. Durch die breite Wellenform am Pegel Rosenheim II ist die Zeitspanne bis zum Absinken vergleichsweise groß, der Aufstau beginnt relativ spät.

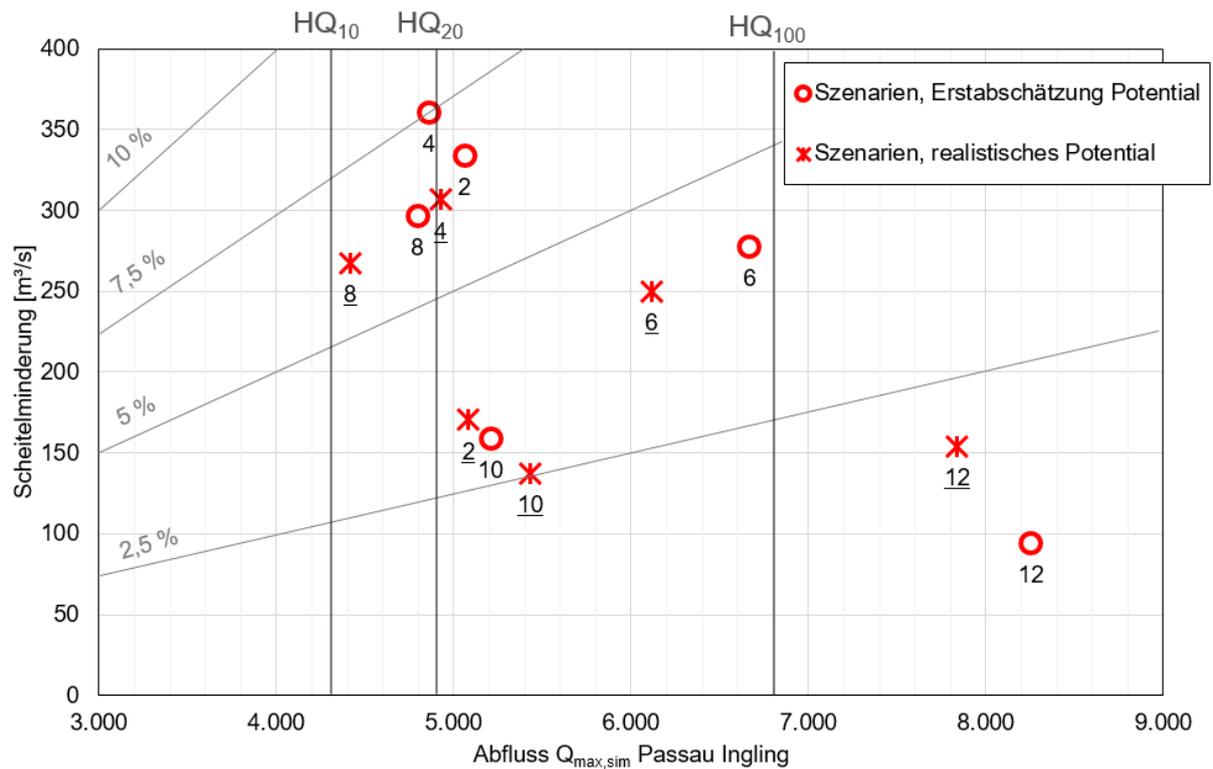


Abbildung 111: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei stochastischen Szenarien (Variante A, gerade Ziffer) im Vergleich mit Ergebnissen aus Erstabschätzung des Potentials am Pegel Passau-Ingling

Im Bereich des Scheitels werden durch den Aufstauvorgang bei Stauraummanagement Volumen zwischen etwa 12 und 20 Mio. m³ am Pegel Passau-Ingling zurückgehalten (Abbildung 112). Bilanziert wird das Volumen anhand der Differenzen der Abflussganglinien am Pegel für die Simulationen gemäß WBO und bei Stauraummanagement. Der betrachtete Zeitbereich zur Bilanzierung beginnt mit dem Aufstau gemäß Stauraummanagement und endet mit dem Zusammenlaufen der Ganglinien. Das Volumen zum Rückhalt ist abhängig von der Abstautiefe, der zulässigen Aufstauhöhe und der Abflusssituation. Bei größeren Hochwassern und damit höheren Abflüssen im System wird dabei generell ein geringeres Rückhaltevolumen generiert als bei Hochwassern geringerer Jährlichkeit.

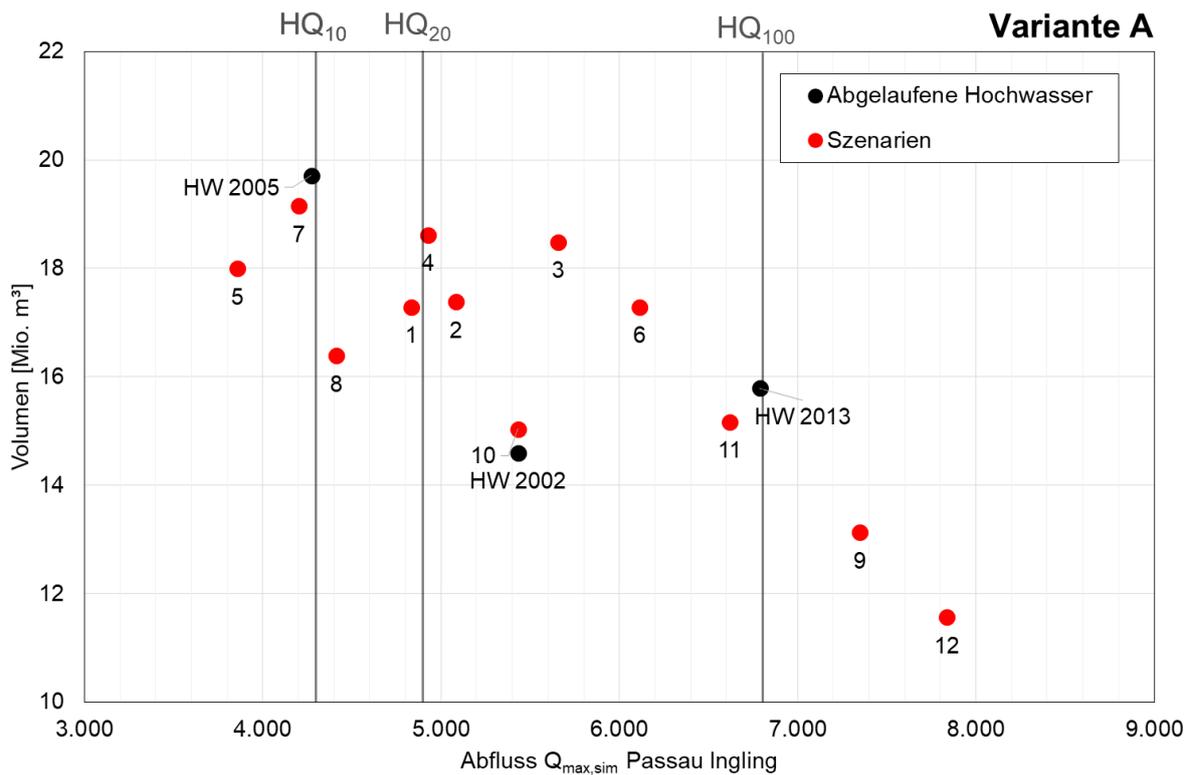


Abbildung 112: Zurückgehaltenes Volumen bei Stauraummanagement im Bereich des Scheitels durch Aufstauvorgang (Variante A, Basis: Ganglinien Pegel Passau-Ingling)

Die simulierten Wasserstandsdifferenzen zwischen den Simulationen gemäß WBO und bei Stauraummanagement wurden an den Pegeln Schärding (Inn-km 16,25, Abbildung 113), Passau-Ingling (Inn-km 3,10, Abbildung 114) und Passau (Donau-km 2.226,70, Abbildung 115) ausgewertet und sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Am Pegel Schärding betragen die Wasserstandsdifferenzen zwischen 17 und 46 cm. Aufgrund des Einflusses der Donau werden am Pegel Passau-Ingling Differenzen der Maximalwasserstände von 12 bis 38 cm berechnet. Oberhalb des Zusammenflusses der Donau mit dem Inn, am Pegel Passau an der Donau, beträgt die Wasserstandsdifferenz durch die Scheitelminderung bei Stauraummanagement zwischen 8 und 23 cm. Zur Beurteilung der Gesamtabflusssituation im Mündungsbereich ist die Wasserstandsverringerung am Pegel Passau in Abbildung 115 auf den simulierten Scheitelabfluss am Pegel Achleiten (Donau-km 2.223,05) nach Zusammenfluss von Donau, Inn und Ilz, bezogen. An allen betrachteten Pegeln ist die Wirkung mit zunehmendem Scheitelabfluss geringer.

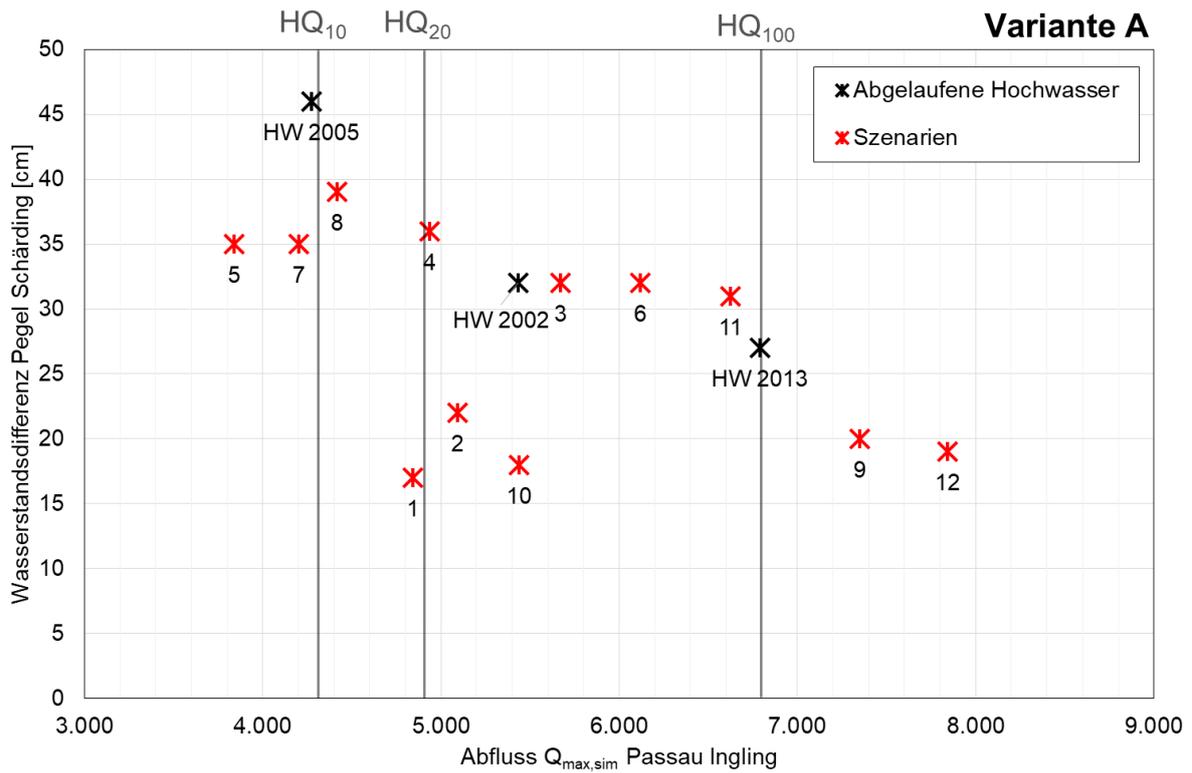


Abbildung 113: Wasserstandsdifferenz durch Stauraummanagement am Pegel Schärding (Variante A)

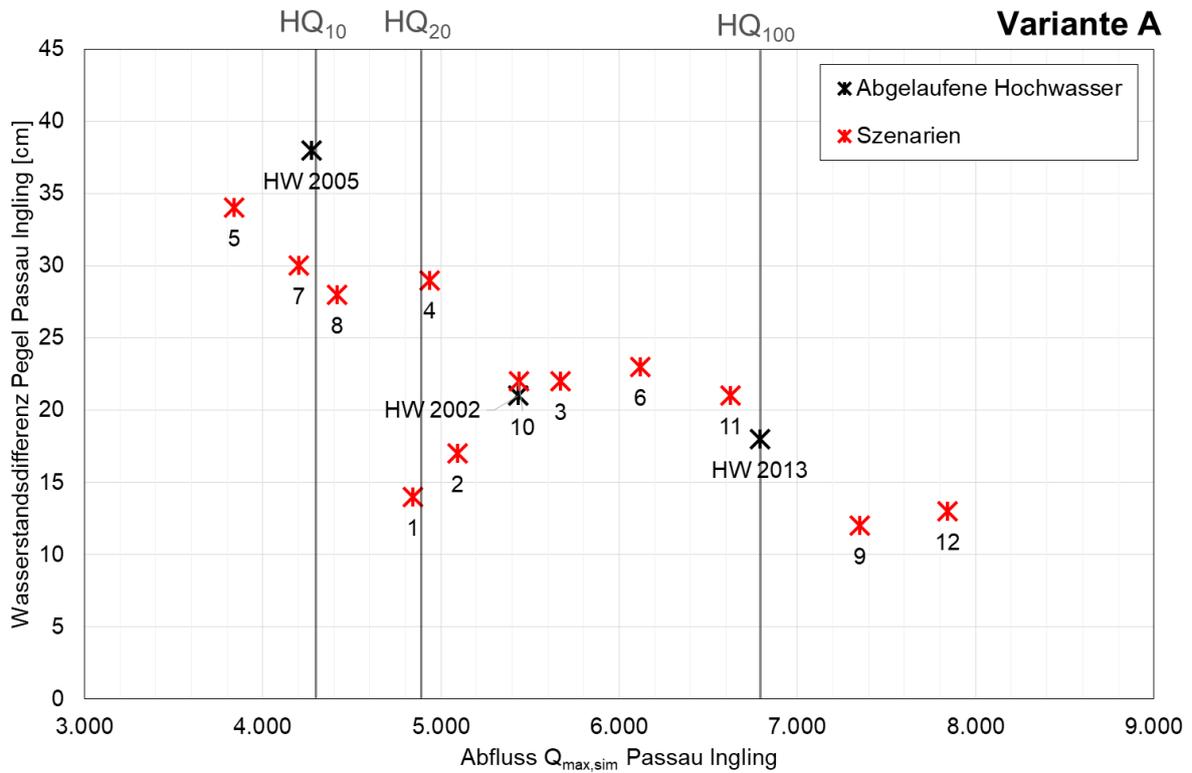


Abbildung 114: Wasserstandsdifferenz durch Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling (Variante A)

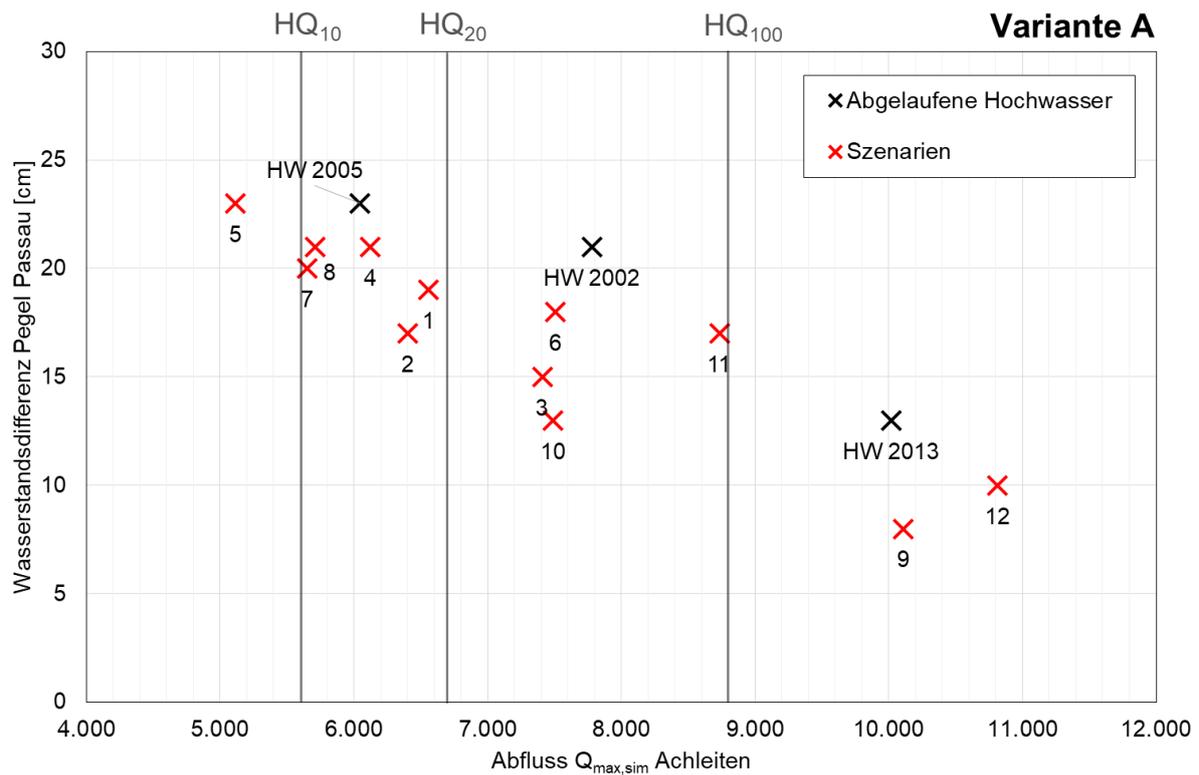


Abbildung 115: Wasserstandsdifferenz durch Stauraummanagement am Pegel Passau (Variante A)

8.4.5 Variantenuntersuchung bei geringerer Abstautiefe am unteren Inn

Folgend auf die dargestellten Untersuchungen wurde die mögliche Abminderung am Pegel Passau-Ingling betrachtet, wenn der Abstau an den Anlagen des unteren Inns um einen halben Meter reduziert wird (Variante B, vgl. Tabelle 27). Die sich ergebenden Werte für Wassertiefen und Dauern der Variante B sind in Tabelle 30 aufgeführt. Die Gradienten für Ab- und Aufstau werden beibehalten. Sowohl bei inn- und salzachtbetonten Hochwassern wird die zusätzliche Zeitverschiebung um 2,5 Stunden erhöht, sodass der Aufstau zum gleichen Zeitpunkt endet wie in der vorherigen Betrachtung mit tieferem Abstau. Es wurden hierbei die drei abgelaufenen Hochwasser und sechs ausgewählte stochastische Ereignisse (3, 5, 6, 7, 9 und 11) betrachtet.

Tabelle 30: Parameter des Ab- und Aufstauprozesses (Variante B)

Anlage	Abstau [m]	grad ab [m/h]	Abstau dauert [h]	Aufstau [m]	grad auf [m/h]	Aufstau dauert [h]	zusätzliche Zeitverschiebung	
							Innbetont [h]	Salzachtbetont [h]
Neuötting	1,5	0,1	15	1,5	0,2	7,5	0	0
Perach	1,5	0,1	15	0,9	0,2	4,5	0,5	0,5
Stammham	1,5	0,1	15	1,5	0,2	7,5	1	1
Braunau-Simbach	1,5	0,1	15	1,0	0,2	5,0	4,0	2,5
Ering-Frauenstein	1,5	0,1	15	1,5	0,2	7,5	5,0	3,5
Egglfing-Obernberg	1,5	0,1	15	1,5	0,2	7,5	2,5	2,5
Schärding-Neuhaus	2,0	0,1	20	2,0	0,2	10,0	2,5	2,5
Passau-Ingling	4,0	0,3	13,33	1,0	0,2	5,0	12,0	10,5

Abbildung 116 zeigt die absoluten Scheitelminderungen der abgelaufenen Hochwasser sowie der stochastischen Szenarien. Die oben beschriebenen Untersuchungsergebnisse des realistischen Potentials der abgelaufenen Hochwasser sind mit schwarzen Sternen gekennzeichnet, die der Szenarien mit roten Sternen (Variante A). Die Simulationsergebnisse, die sich bei einer verringerten Abstautiefe für das realistische Potential ergeben, sind für die Szenarien grün dargestellt, für die abgelaufenen Hochwasser blau (Variante B). Bei einem geringeren Abstau an den Anlagen des unteren Inns ergibt sich bei allen betrachteten Hochwassern eine geringere Scheitelminderung. Der Einfluss der verringerten Abstautiefe ist tendenziell höher bei den kleineren Hochwassern als bei den größeren Hochwassern, da das wegfallende Volumen hier einen verhältnismäßig größeren Einfluss hat. Bei den Hochwassern, deren Maximalabfluss am Pegel Passau-Ingling eine Jährlichkeit im Bereich HQ₂₀ bis HQ₁₀₀ aufweist, ist die Differenz der erzielten Scheitelminderung im Vergleich zu den oben beschriebenen Untersuchungsergebnissen für den reduzierten Abstau gering. Es wird insgesamt eine sehr gute Wirkung der Scheitelminderung bei dem hier untersuchten verringerten Abstau erzielt.

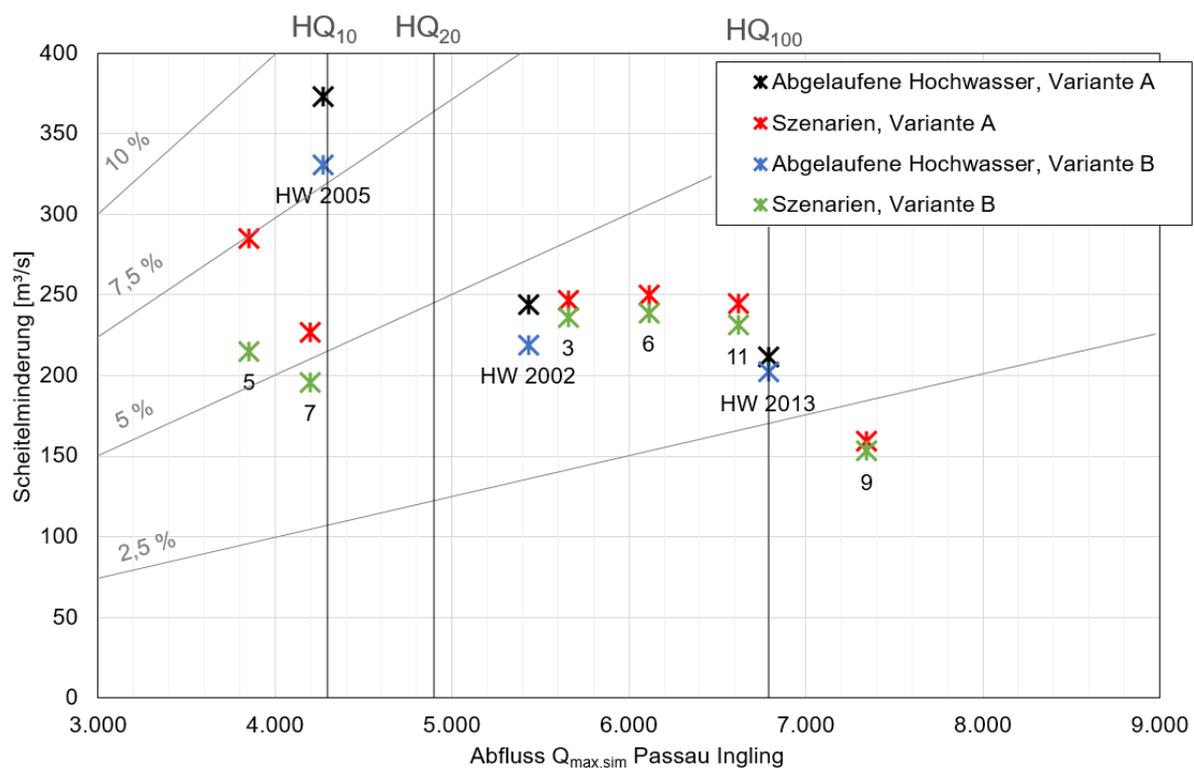


Abbildung 116: Absolute Scheitelminderung (Pegel Passau-Ingling) durch Stauraummanagement bei abgelaufenen Hochwassern und ausgewählten stochastischen Szenarien bei unterschiedlichen Abstautiefen am unteren Inn (Varianten A und B)

8.5 Fazit zur Scheitelminderung durch Stauraummanagement

Mit Hilfe der beschriebenen Steuerungsvorgaben des Stauraummanagements, die auf umsetzbaren und praxisnahen Steuerungsregeln basieren, ist eine gute Scheitelabminderung erzielbar. Am Pegel Passau-Ingling werden für die betrachteten Hochwasser mit Scheitelwerten von etwa HQ_{10} bis über HQ_{100} Abminderungen zwischen $\Delta Q = 380 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $100 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet (vgl. Abbildung 106). Durch den Aufstauprozess wird ein Rückhaltevolumen von etwa 20 bis 12 Mio. m^3 generiert.

Der Abstauprozess wird eingeleitet, sobald die Vorhersage eines Hochwassers über einem definierten Schwellenwert vorliegt und der gemessene Abfluss am KW Nußdorf am Inn oder dem Pegel Laufen an der Salzach eine definierte Abflussgrenze überschreitet. Der Aufstauprozess wird rein messwertbasiert durchgeführt und ist abhängig vom Absinken des Wasserstandes an zwei Referenzpegeln an Inn oder Salzach. Anhand des maximalen Wasserstandes der Referenzpegel werden die Hochwasser als inn- oder salzachtbetont definiert.

Durch den Einsatz des Stauraummanagements wird die Abflussganglinie des Hochwassers weder verzögert noch beschleunigt. Der Einfluss der angepassten Steuerung bezieht sich auf den Scheitelbereich der Hochwasserganglinie, der entsprechend abgemindert wird.

8.6 Umsetzungsaspekte des Stauraummanagements

Die getroffenen Annahmen für Abstautiefen und Gradienten liegen in einem realistischen Bereich. Anlagen, bei denen der Abstauprozess aufgrund von morphologischen Prozessen, Rutschhängen und zu geringen Laufzeiten schwierig umzusetzen ist, wurden im Stauraummanagement nicht berücksichtigt. Die Variantenuntersuchung zu einer geringeren Abstautiefe zeigen, dass auch bei einer Verringerung des Abstaus gute Scheitelminderungen möglich sind.

Es ist hervorzuheben, dass im betrachteten Abschnitt des Inns im Vergleich zu anderen Fließgewässern günstige Standortbedingungen (zum Beispiel große Fallhöhen, keine Wasserstraße sowie keine Schifffahrt bei den relevanten Wasserführungen) vorliegen sowie Restriktionen in Bezug auf Bewirtschaftungsvolumen, Anlagendimension und Steuerbarkeit bei großen Wassermengen hinsichtlich der auftretenden Wasserstände eingehalten werden können. Auch bei hohen Abflüssen erfolgt bei den berücksichtigten Anlagen im realen Betrieb außer in Passau-Ingling keine Freigabe des gesamten Abflussquerschnittes. Aufgrund der Berücksichtigung von insgesamt acht Stauanlagen wird der Ausfall einer Anlage, zum Beispiel durch Verklausung, das Scheitelminderungspotential nur in geringem Ausmaß reduzieren. Da nach Angabe von VERBUND Revisionsarbeiten im Winterhalbjahr durchgeführt werden, ist

eine Einschränkung durch Revision im durch Sommerhochwasser geprägten Einzugsgebiet des Inns nicht wahrscheinlich.

Mit Hilfe der entwickelten praxisnahen Steuerungsregeln konnten unter der Annahme, dass keine situationsabhängigen Einschränkungen (zum Beispiel Verklausungen) vorliegen, gute Ergebnisse für die Abminderung des Hochwasserscheitels am Pegel Passau-Ingling erzielt werden. Für eine Umsetzung in der Praxis sind weitergehende Detailuntersuchungen zu ökologischen und morphologischen Fragestellungen durchzuführen. Diese betreffen beispielsweise den Abstau bei Flachwasserzonen und damit den Einfluss auf den Lebensraum von Fischen und Vögeln. Die Mobilisierung von Feststoffen durch den Abstau bei Stauraummanagement ist ebenfalls im Rahmen weitergehender Untersuchungen zu betrachten. Weiterhin sind die Alarmpläne von Anrainern wie der Stadt Schärding detailliert zu prüfen und bei einer Änderung der Betriebsvorgaben der Stauanlagen für das Stauraummanagement gegebenenfalls anzupassen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Stauraummanagement im Bereich des Hochwasserschutzes beziehungsweise Hochwasserrückhaltes eine additive Maßnahme zu Rückhaltebecken und Flutpoldern darstellt, die ohne größere bauliche Maßnahmen umgesetzt werden kann.

9 Weitergehende Untersuchungen zum Flutpolderbetrieb Feldkirchen

9.1 Grundsätzliches zur Flutpoldersteuerung Feldkirchen

Bei der Steuerung des Polders Feldkirchen wird unterschieden, ob ein Überlastfall im Nahbereich des Polders (z. B. in Wasserburg) oder im Fernbereich des Polders (z. B. in Passau) besteht (vgl. Abbildung 117). Der Flutpolder Feldkirchen befindet sich etwa 17 km oberstrom des Pegels Wasserburg und etwa 170 km entfernt vom Pegel Passau-Ingling. Das primäre Einsatzziel dieses Polders am oberen Inn ist der Schutz der direkt unterstrom liegenden Ortslagen bei einem Überlastereignis. Jedoch ist auch der überregionale Einsatz des Polders denkbar, wenn beispielsweise ein hoher Abfluss an der Salzach zu einem Überlastereignis am unteren Inn führt, am Standort des Flutpolders Feldkirchen jedoch ein geringeres Hochwasser auftritt und kein lokaler Einsatz des Flutpolders erforderlich ist.

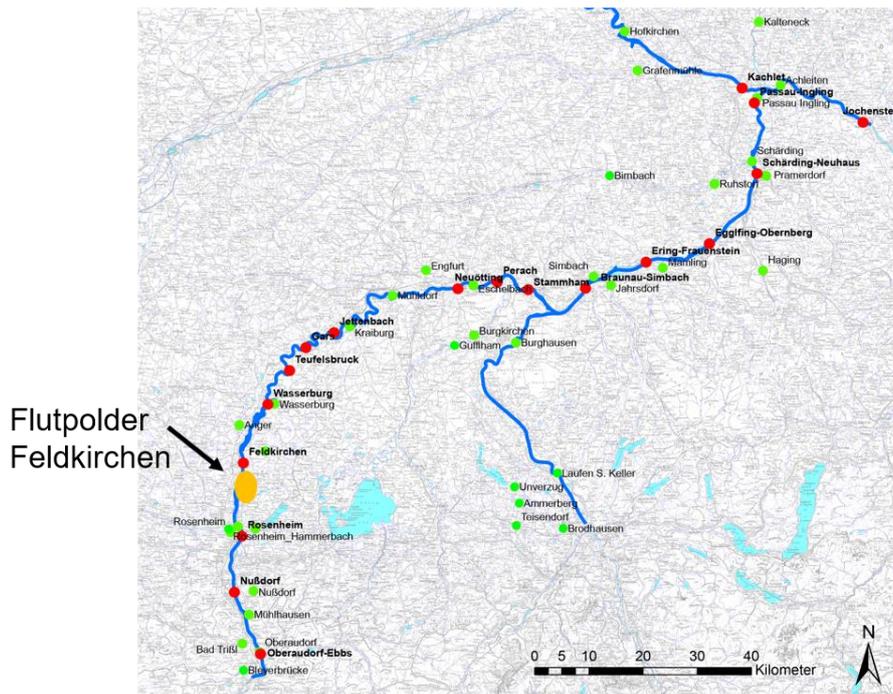


Abbildung 117: Lage des Flutpolders Feldkirchen im Fließgewässersystem

9.2 Überlastfall im Nahbereich des Flutpolders

Tritt im Nahfeld des Polders, also beispielweise am Pegel Wasserburg, ein Hochwasser auf, das das Bemessungsereignis für diesen Bereich erreicht oder übersteigt (Überlastfall), kann zwischen verschiedenen Vorgehensweisen der Polderbeaufschlagung unterschieden werden.

Im ersten Fall wird ein fester Schwellenwert, beispielsweise der Bemessungsabfluss der unterhalb liegenden Hochwasserschutzanlagen, zur vorhersageunabhängigen Polderfüllung genutzt. Das abfließende Volumen der Ganglinie oberhalb dieses Schwellenwertes wird in den Polder eingelagert und der Überlastfall unterhalb damit im besten Fall vermieden.

Wenn aufgrund einer Messung oberstrom oder durch eine Vorhersage gesicherte Informationen darüber vorliegen, dass der Scheitelabfluss des Hochwassers den Bemessungsabfluss deutlich überschreitet und es damit ersichtlich ist, dass der Überlastfall nicht verhindert werden kann, könnte bei Kenntnis der Systemreaktionen des Hochwasserschutzsystems unterhalb gegebenenfalls ein etwas höherer, noch tolerierbarer Schwellenwert des Abflusses gewählt werden. Sollte das Hochwasservolumen über dem Schwellenwert das verfügbare Poldervolumen übersteigen, würde es nach Völlfüllung zu einer Abflusserhöhung und gegebenenfalls kritischen Situationen unterhalb kommen. Der Zeitgewinn, bis der Flutpolder mit einem Volumen von 17,4 Mio. m³ gefüllt wurde, stellt als zweiten Fall ein weiteres wesentliches Einsatzziel dar, wodurch in den betroffenen Gebieten weitere Ad-hoc-Maßnahmen zum Hochwasserschutz oder Evakuierungen durchgeführt werden können.

Ein dritter Fall der Bewirtschaftungsstrategie kann vorliegen, wenn der Scheitelwert des Hochwasserereignisses nur etwas höher als der Schwellenwert ist, sodass das Poldervolumen durch die Beaufschlagung nur teilweise genutzt werden würde. In diesem Fall könnte eine ereignisabhängige Anpassung des Schwellenwertes vorgenommen werden mit dem Ziel, durch eine höhere Ausnutzung des verfügbaren Poldervolumens zum einen für eine größere Entspannung bei den Hochwasserschutzanlagen unterhalb zu sorgen, zum anderen aber auch zu einer Entschärfung kritischer Situationen durch größere Zuflüsse im weiteren Fließverlauf beizutragen. Diese Vorgehensweise und die damit verbundene Festlegung des Schwellenwertes müssen anhand einer Hochwasservorhersage oder messwertbasiert durchgeführt werden. Das Vorgehen für den zweiten sowie für den dritten beschriebenen Fall ist sorgfältig zu untersuchen.

Zur Analyse, ob eine messwertbasierte Steuerung des Polderbetriebes möglich ist, wurden zunächst die aufgezeichneten Pegeldata oberstrom des KW Oberaudorf ausgewertet. Die Datenübergabe von Pegeldata oberstrom des KW Oberaudorf erfolgte durch VERBUND AG für die abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013. Dabei stellt das HW 2005 ein Überlastereignis im Nahbereich des Flutpolders Feldkirchen dar. Die Daten enthalten Aufzeichnungen am Inn sowie an seitlichen Zuflüssen. Die Auswertung der Daten erfolgte hinsichtlich der Nutzung von Messwerten für die Polderbeaufschlagung analog zum Aufstauvorgang bei Stauraummanagement. Der Beginn der Polderfüllung würde eingeleitet werden, sobald ein Abklingen des Abflusses, beziehungsweise Wasserstandes, an einem der oberstrom liegenden Pegel, z. B. Pegel Rotholz, erkennbar ist. In Abbildung 118 ist die Lage der Pegel, von denen Aufzeichnungsdaten durch die VERBUND AG für die drei Hochwasserereignisse übergeben wurden, dargestellt.

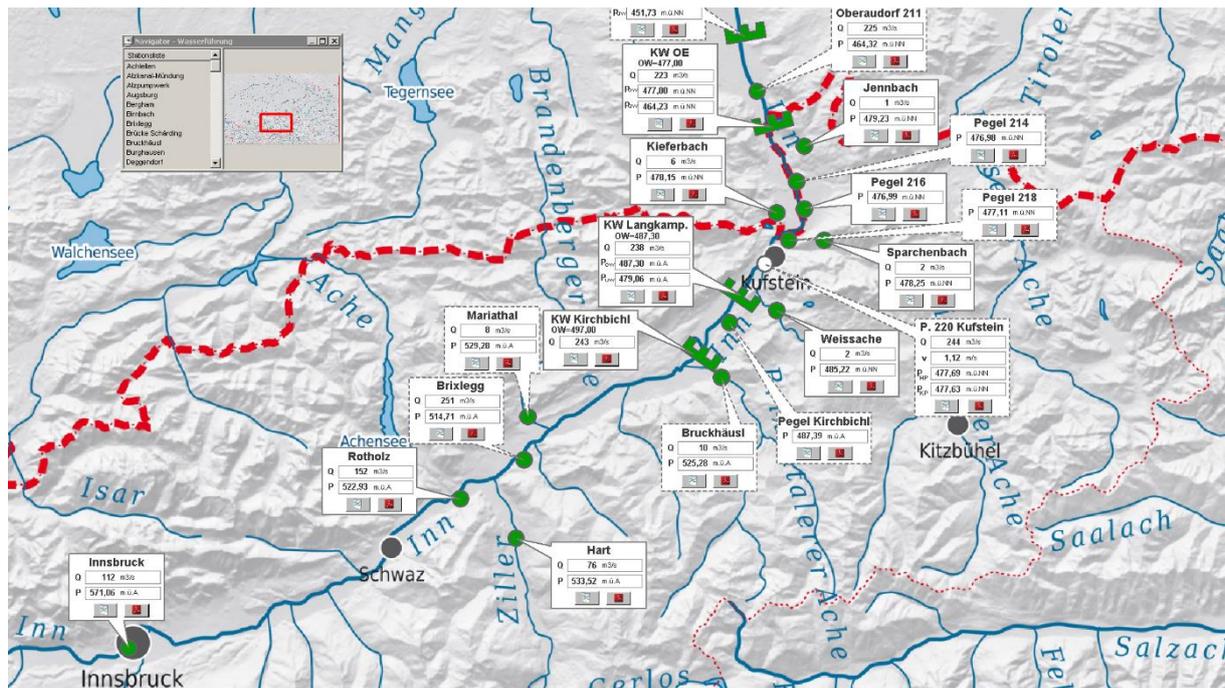


Abbildung 118: Lagekarte zu übergebenen Pegelraten von Pegeln oberstrom des KW Oberaudorf, Quelle: VERBUND AG

In den folgenden Abbildungen sind die Ganglinien für die Pegel Rotholz (Inn-km 260,47), Pegel Brixlegg (Inn-km 252,04), Pegel Kirchbichl (Inn-km 229,16), KW Oberaudorf (Inn-km 211,35; sowie Pegel Oberaudorf an Inn-km 211) und KW Rosenheim (Inn-km 187,50) dargestellt.

Die Ganglinien des HW 2002 an den genannten Pegeln sind in der nachfolgenden Abbildung 119 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die seitlichen Nebengewässer sichtbar zur Hochwasserbildung beitragen. Die Maxima an den Pegeln Rotholz und Brixlegg treten zeitlich nach dem Maximum am Kraftwerk Rosenheim auf. Das HW 2002 stellt im Bereich des Pegels Rosenheim o.d. Mangfallmündung etwa ein Hochwasser der Jährlichkeit HQ_5 dar. Im Fall des HW 2005 (Abbildung 120) handelt es sich im dargestellten Bereich des Inns um ein Hochwasser, dessen Scheitelwert eine Jährlichkeit von größer als HQ_{100} aufweist. An zwei Pegeln tritt ein Ausfall der Aufzeichnungen im Scheitelbereich auf. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Hochwassers ist so groß, dass das Maximum am KW Rosenheim erreicht wird, bevor ein Abklingen am Pegel Brixlegg ersichtlich ist. Zwischen Pegel Brixlegg und KW Rosenheim liegt eine Entfernung von 64,5 km. Bei Betrachtung des HW 2013 (Abbildung 121) ist noch deutlicher als beim HW 2002 zu erkennen, wie stark seitliche Nebengewässer zur Hochwasserbildung beitragen. Das Hochwasser stellt ebenfalls am Pegel Rosenheim / Mangfall das höchste bisher aufgezeichnete Ereignis dar. Der Abflussverlauf am Pegel Brixlegg lässt damit keine Aussage über ein Abklingen des Hochwassers zu.

Die Nutzung von Messdaten zur Simulation einer messwertbasierten Polderbeaufschlagung ist damit derzeit nicht zielführend ausführbar. Für eine messwertbasierte Regelung müssten viele seitliche Zuflüsse in die Auswertung mit aufgenommen werden, da die seitlichen Zubringer zum Teil sehr stark zur Hochwasserbildung beitragen. Weiterhin müsste der Bezug auf die Inn-Pegel aufgrund der geringen Laufzeiten noch weiter oberstrom liegen.

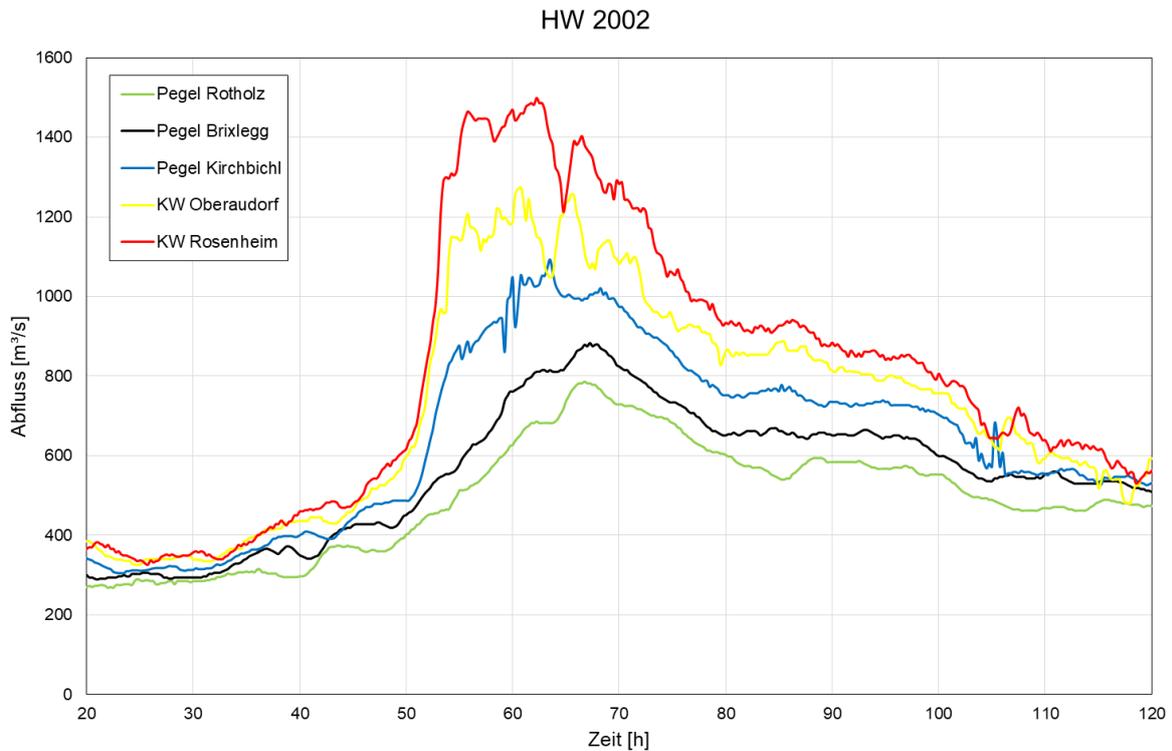


Abbildung 119: Messdaten ausgewählter Pegel von Pegel Rotholz bis KW Rosenheim - HW 2002

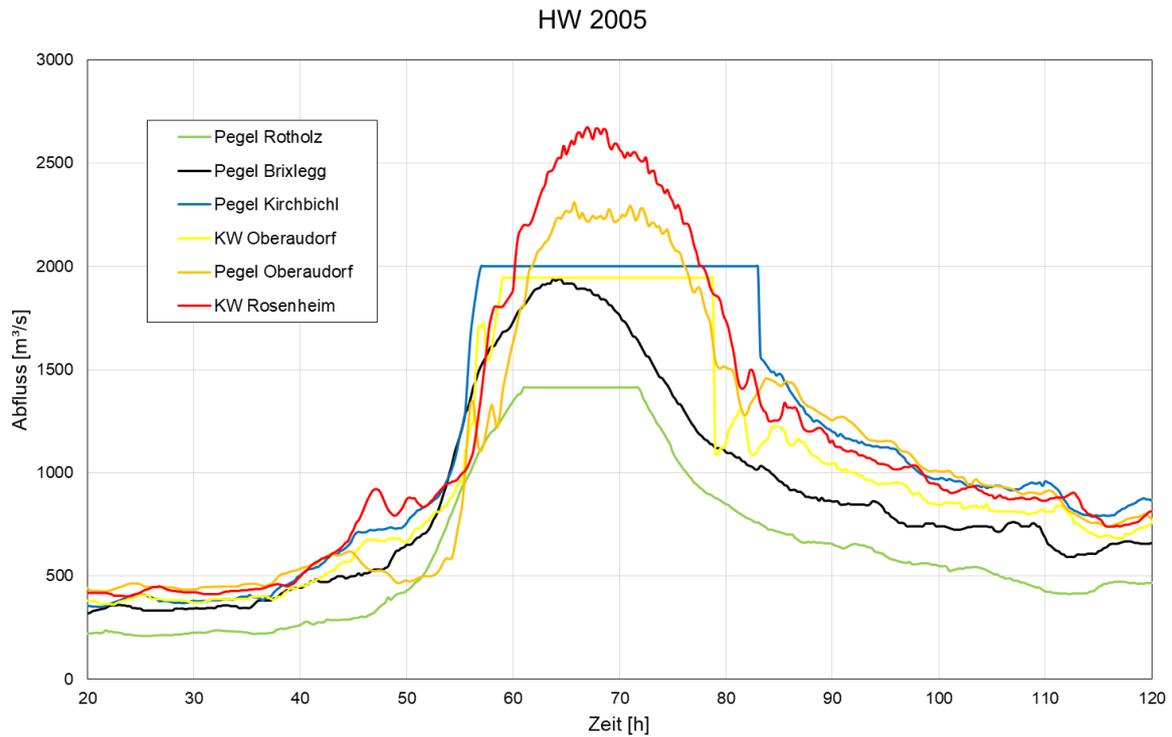


Abbildung 120: Messdaten ausgewählter Pegel von Pegel Rotholz bis KW Rosenheim - HW 2005

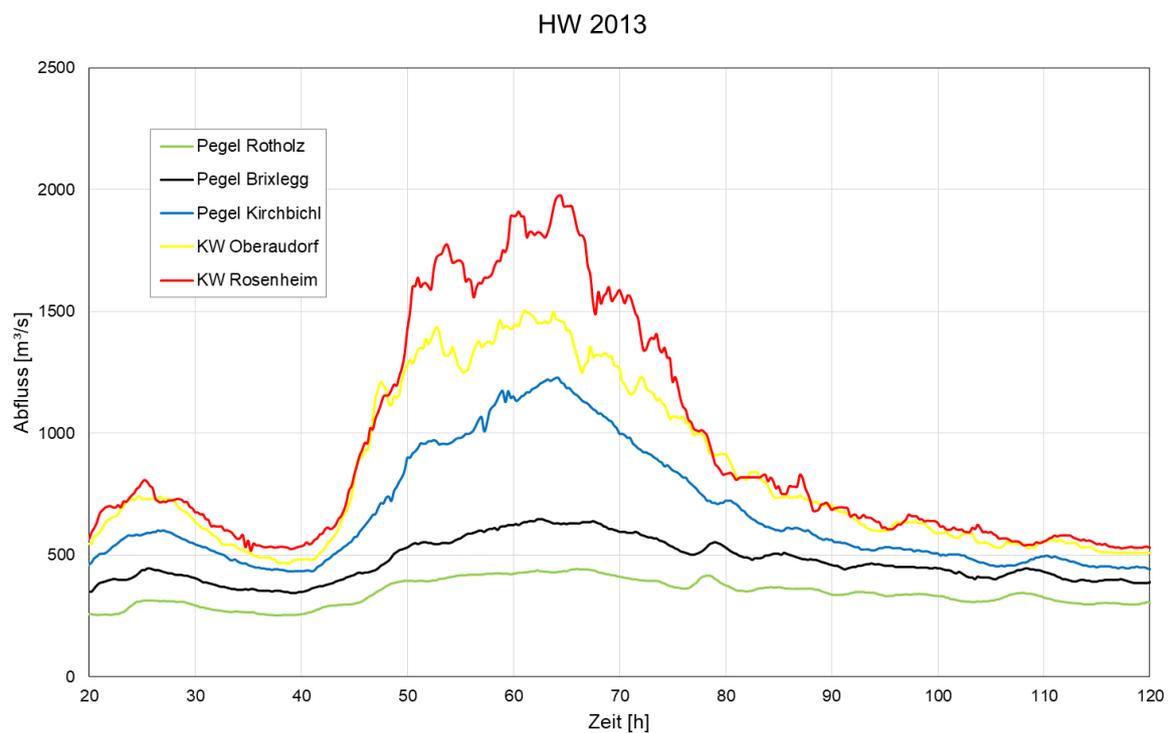


Abbildung 121: Messdaten ausgewählter Pegel von Pegel Rotholz bis KW Rosenheim - HW 2013

Da eine messwertbasierte Steuerung des Flutpolders Feldkirchen aufgrund der derzeitigen Datenlage und des Modellumfangs nicht möglich ist, wurden Vorhersagen der abgelaufenen Hochwasser zur Berücksichtigung bei der Polderfüllung analysiert. Von den übergebenen

Hochwasservorhersagen, die Daten ab dem HW 2010 umfassen, stellt kein Hochwasser einen Überlastfall im Nahbereich des Polders dar. Aus diesen Gründen konnten die oben beschriebenen Fälle zu einer Polderbewirtschaftung bei einem Überlastfall im Nahbereich des Polders nicht untersucht werden.

9.3 Überlastfall im Fernbereich des Flutpolders

9.3.1 Vorgehensweise bei der Flutpolderfüllung

Die Durchführung einer Polderbeaufschlagung am Polder Feldkirchen mit einem überregionalen Fokus der Abflussminderung im Fernbereich des Polders, z. B. in Passau, kann nur unter der Voraussetzung durchgeführt werden, dass eine verlässliche Vorhersage darüber vorliegt, dass das Bemessungshochwasser der lokal unterhalb liegenden Hochwasserschutzanlagen nicht erreicht oder überschritten wird und somit der lokale Einsatzfall im Nahbereich des Polders nicht gegeben ist.

Bei der Vorgehensweise zur Polderfüllung kann zwischen zwei Varianten unterschieden werden. Die Abflussminderung durch Abgabe in den Polder wird im ersten Fall auf den Fernbereich bezogen, bei der z. B. der Abfluss am Pegel Passau-Ingling die Bezugsgröße darstellt. Die seitlichen Zuflüsse auf der Fließstrecke werden somit entsprechend berücksichtigt.

Alternativ ist eine Abminderung des lokalen Hochwasserscheitels am Polderstandort möglich, da auch dieser maßgeblich für die Abflusssituation im weiter entfernten Bereich unterstrom des Polders ist. Als Bezugsgröße für die Abflussminderung durch die Polderabgabe würde beispielsweise der Abfluss am Pegel Wasserburg oder am KW Feldkirchen genutzt werden. Hierbei werden die einmündenden seitlichen Zuflüsse unterstrom des Polders jedoch nicht berücksichtigt.

Da weder für die synthetischen noch für die HW 2002 und 2005 Vorhersagen vorliegen, kann lediglich das HW 2013 untersucht werden. Das HW 2013 stellt für den Nahbereich des Flutpolders Feldkirchen keinen Überlastfall dar, überschreitet jedoch im Bereich Schärding und Passau durch den Einfluss der Salzach und weiterer seitlicher Zuflüsse das HQ_{100} und stellt damit einen Überlastfall im Fernbereich des Polders Feldkirchen dar. Aus diesem Grund wurden die beiden beschriebenen Vorgehensweisen zur Polderfüllung bei einem Überlastfall im Fernbereich des Polders für das HW 2013 untersucht.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass mit der Analyse von nur einem Hochwasser keine allgemeingültigen Regeln ableitbar sind. Hierzu ist die Anwendung der zu entwickelnden Steuerstrategie auf mehrere Hochwasserereignisse erforderlich.

9.3.2 Wirkungsanalyse zur Flutpolderfüllung mit Fokus der Abflussreduzierung auf den Fernbereich

Für die Wirkungsanalyse, die die Scheitelminderung durch die Beaufschlagung des Polders Feldkirchen mit Fokus auf die Fernwirkung am Pegel Passau-Ingling betrachtet, erfolgte eine Konzentration auf die vorhergesagten Scheitelzeitpunkte am KW Passau-Ingling. Die Polderfüllung wird dabei mit einem konstanten Abfluss durchgeführt und die Dauer der Beaufschlagung ergibt sich entsprechend des Poldervolumens. Um die Sensitivität des Systems zu analysieren, wurden verschiedene konstante Polderzuflüsse zwischen $\Delta Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $\Delta Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ simuliert.

Beispielhaft wird das Vorgehen zur Definition der Polderfüllung für die Einlagerung eines Abflusses von $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ vorgestellt. Mit einem Gesamtvolumen des Polders Feldkirchen von 17,4 Mio. m^3 ergibt sich bei einer Einlagerung von konstant $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Beaufschlagungsdauer von 24,2 Stunden. Die Vorhersagen des Modells Flux/Floris für das KW Passau-Ingling wurden hinsichtlich des vorhergesagten Zeitpunktes des Maximalabflusses ausgewertet (vgl. Tabelle 31). Hierbei wurden die Ganglinien berücksichtigt, für die visuell ein Abklingen des Hochwassers zu erkennen ist. In Abbildung 122 ist die Vorgehensweise für die Definition des Füllzeitpunktes schematisch dargestellt. Die berechnete Fülldauer von 24,2 Stunden bei $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ (blauer Balken symbolisiert Poldervolumen) wird auf die Ganglinie bezogen, sodass die Hälfte der Dauer vor und die andere Hälfte nach dem vorhergesagten Scheitelmaximum liegt. Dies stellt den Zeitbereich dar, in dem die Beaufschlagung durchgeführt werden soll, um am Pegel Passau-Ingling eine Verringerung des Abflusses zu erzielen. Die Laufzeit des Hochwasserscheitels von rund 20 Stunden bei dem HW 2013 zwischen dem Flutpolderstandort Feldkirchen und dem KW Passau-Ingling muss ebenfalls berücksichtigt werden, um die Füllung zum richtigen Zeitpunkt einzuleiten. Folglich wird mit der Füllung des Flutpolders bei einem Polderzufluss von $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 32,1 Stunden vor dem vorhergesagten Maximalabfluss am KW Passau-Ingling begonnen. Die Dauer von 32,1 Stunden, die bei dem übergeordneten Betrieb zwischen dem vorhergesagten Scheitel und dem Füllbeginn liegt, stellt insbesondere im Vergleich mit der Vorhersagedauer von 48 Stunden ein weites Zeitfenster dar, durch das sich Unsicherheiten ergeben können.

Die Auswertung der Vorhersage, die am 01.06.2013 um 18:15 Uhr vorliegt, gibt einen Beginn der Beaufschlagung am 01.06.2013 um 20:55 Uhr vor (entsprechend Simulationsstunde 44,92, vgl. Tabelle 31).

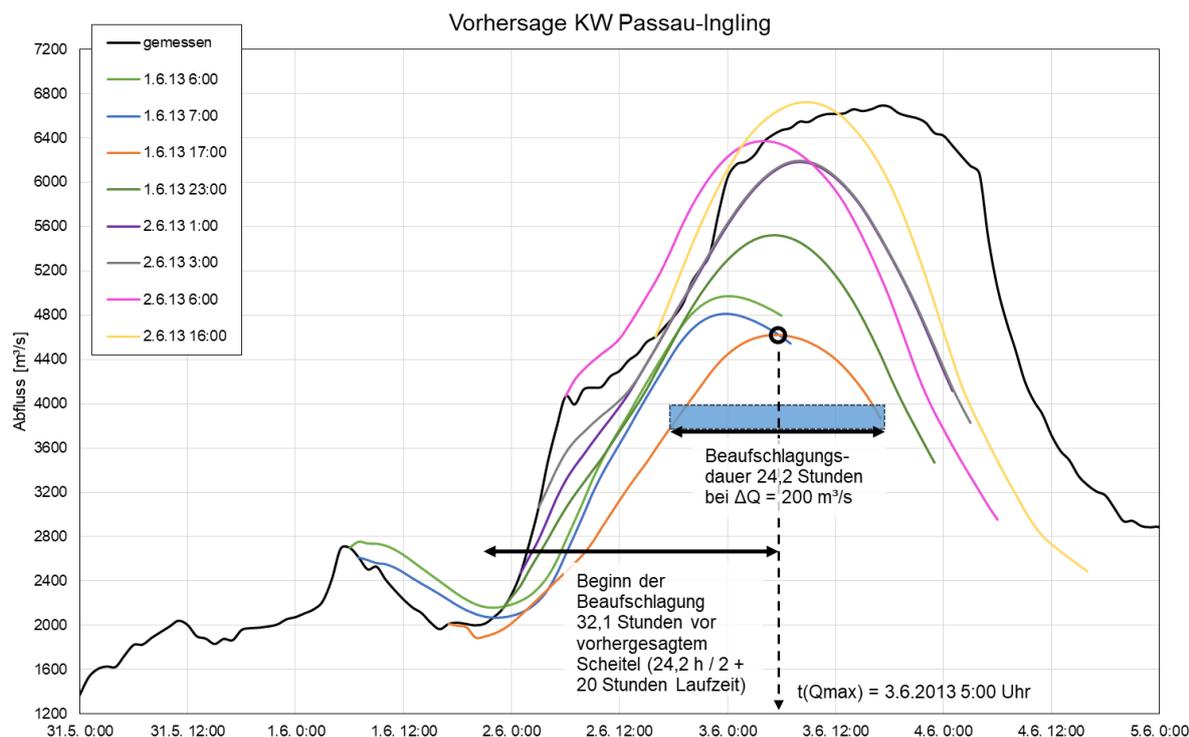


Abbildung 122: Vorhersage am KW Passau-Ingling und Auswertung für Polderfüllung Feldkirchen

Tabelle 31: Auswertung Vorhersage HW 2013 KW Passau-Ingling

Berechnungszeitpunkt	Vorhersagezeitpunkt	Vorhergesagter Zeitpunkt des Maximums	Beginn Beaufschlagung	Beginn Beaufschlagung [Sim.-Stunde]
1.6.13 6:48	1.6.13 6:00	3.6.13 0:00	noch kein Abklingen	
1.6.13 7:48	1.6.13 7:00	3.6.13 0:00	noch kein Abklingen	
1.6.13 18:15	1.6.13 17:00	3.6.13 5:00	1.6.13 20:55	44,92
2.6.13 0:52	1.6.13 23:00	3.6.13 5:00	1.6.13 20:55	44,92
2.6.13 2:08	2.6.13 1:00	3.6.13 8:00	1.6.13 23:55	47,92
2.6.13 4:21	2.6.13 3:00	3.6.13 8:00	1.6.13 23:55	47,92
2.6.13 7:02	2.6.13 6:00	3.6.13 4:00	1.6.13 19:55	43,92
2.6.13 17:12	2.6.13 16:00	3.6.13 9:00	2.6.13 0:55	48,92
2.6.13 21:03	2.6.13 20:00	3.6.13 8:00	1.6.13 23:55	47,92
3.6.13 2:09	3.6.13 1:00	3.6.13 10:00	2.6.13 1:55	49,92
3.6.13 3:51	3.6.13 3:00	3.6.13 13:00	2.6.13 4:55	52,92
3.6.13 9:05	3.6.13 8:00	3.6.13 14:00	2.6.13 5:55	53,92

Weiterhin wurden neben der erläuterten Simulation mit einer konstanten Polderbeaufschlagung von $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ Zuflüsse von $\Delta Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ und $\Delta Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ zur konstanten Polderfüllung untersucht. Die Beaufschlagungsdauer der Polderfüllung nimmt bei größeren konstanten Polderzuflüssen ab und beträgt zwischen 32,2 und 16,1 Stunden (vgl. Tabelle 32). Der Beginn des Füllprozesses am Flutpolder Feldkirchen wurde für die weiteren betrachteten Polderzuflüsse analog zum oben beschriebenen Vorgehen bestimmt. Bei höheren Polderzuflüssen wird der Beginn der Füllung entsprechend der kürzeren Fülldauer und den ausgewerteten Vorhersagen später eingeleitet.

Durch die Abgabe in den Polder mit Fokus der Scheitelminderung auf den Fernbereich wird ebenfalls die Abflusssituation im Nahbereich des Polders beeinflusst, auf die zunächst zur Vollständigkeit eingegangen wird. Die Abminderung im Nahbereich des Flutpolderstandortes variiert am Pegel Wasserburg zwischen $\Delta Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $\Delta Q = 32 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Falle der Polderfüllung mit $\Delta Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ wird die Polderfüllung aufgrund der langen Fülldauer über den gesamten Bereich des Scheitels im Nahbereich des Polders durchgeführt, sodass die Abminderung am Pegel Wasserburg in gleicher Höhe erhalten bleibt. Im Falle der höheren Zuflüsse zur Beaufschlagung wird der Füllprozess später eingeleitet, die Fülldauer ist kürzer und erstreckt sich nicht über den gesamten Bereich des Scheitels am Polderstandort, was am Pegel Wasserburg mit einer geringeren Abminderung einhergeht.

In Abbildung 123 sind die Ganglinien am Pegel Passau-Ingling ohne Polderbetrieb (schwarz) und bei den verschiedenen Polderzuflüssen (bunt) dargestellt. Die Ganglinien am Pegel Passau-Ingling sind auf die linke y-Achse bezogen, während die zugehörigen Polderzuflüsse in den Flutpolder Feldkirchen, die farblich mit den Ganglinien am Pegel Passau-Ingling korrespondieren, auf die rechte y-Achse bezogen sind. Wie beschrieben beginnt die Füllung des Polders bei geringeren Zuflüssen früher und wird über eine längere Dauer durchgeführt. Es sind nur geringfügige Unterschiede der Ganglinien am Pegel Passau-Ingling bei der Beaufschlagung mit unterschiedlichen Polderzuflüssen erkennbar. Die Abminderung im Fernbereich liegt zwischen $\Delta Q = 136 \text{ m}^3/\text{s}$ und $142 \text{ m}^3/\text{s}$ und reagiert damit wenig sensitiv auf die jeweilige Polderbeaufschlagung. Die Wirkungen der Polderfüllung zeigen sich am Pegel Passau-Ingling bei den verschiedenen hohen Polderfüllungen nach unterschiedlichen Zeiträumen, die geringer sind als die berücksichtigte Laufzeit von 20 Stunden. Die Laufzeit von 20 Stunden bezieht sich auf den Scheitel der Hochwasserganglinien und ist bei kleineren Abflüssen allgemein geringer. Der durch die Abgabe in den Polder verringerte Abfluss beeinflusst ebenfalls die Abstauvorgänge gemäß WBO an den Stauanlagen.

Tabelle 32: Simulationsergebnisse Polderbetrachtung Feldkirchen mit überregionalem Fokus am Pegel Passau-Ingling

Polder- zufluss	Beaufschlagungs- dauer	Beginn Füllung	Delta Q Passau Ingling	
			[m ³ /s]	prozentual
[m ³ /s]	[h]	[Sim.-stunde]	[m ³ /s]	
150	32,2	42,26	136	2,0%
200	24,2	44,92	142	2,1%
250	19,3	47,33	139	2,0%
300	16,1	48,94	137	2,0%

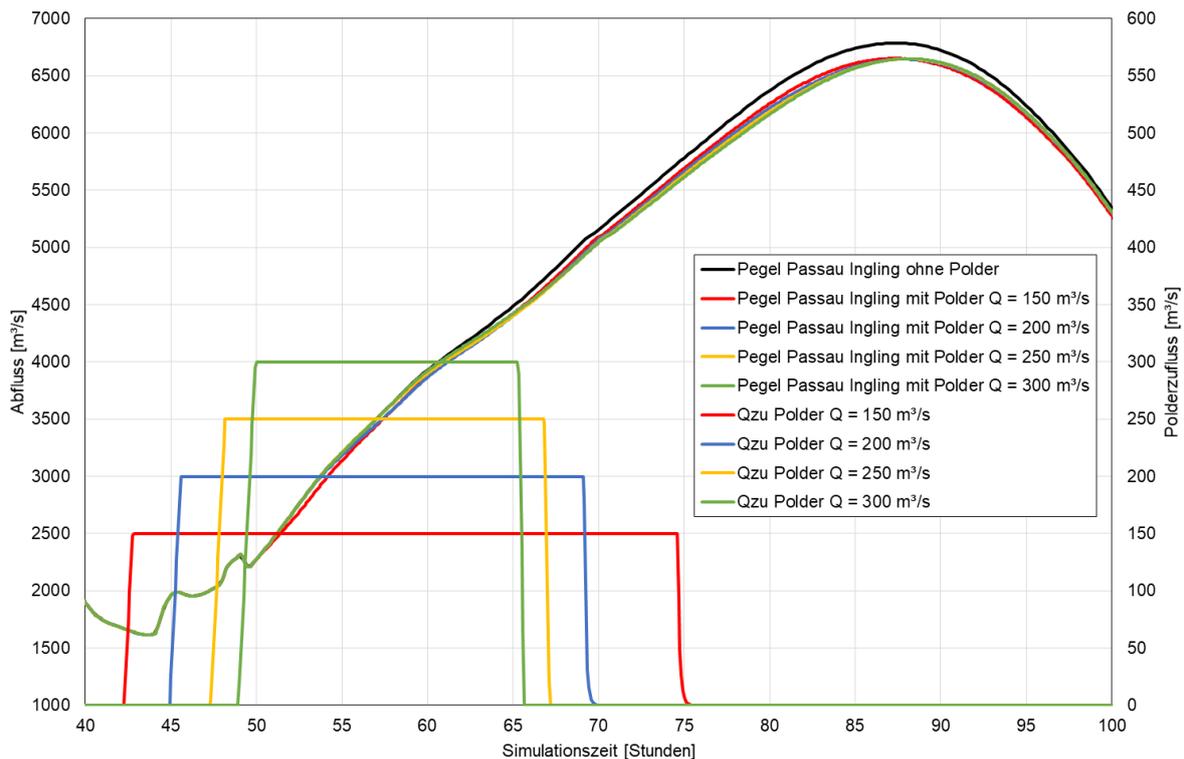


Abbildung 123: Polderbetrachtung Feldkirchen mit überregionalem Fokus - Pegel Passau-Ingling bei unterschiedlichen Polderzuflüssen

Die Vorgehensweise zur Definition des Beaufschlagungsbeginns mit einer vereinfacht angenommenen zeitlich nicht veränderlichen Füllung zeigt damit auf, dass für das untersuchte Ereignis auch bei einer unsicheren Vorhersage am KW Passau-Ingling, die den Scheitel etwas zu früh vorhersagt, eine gute Abminderung erzielbar ist. Es ist zu beachten, dass nach Angabe des LfU die Vorhersagen des Pegels Burghausen während des Ereignisses zeitweise nicht verfügbar waren. Die Vorhersage am KW Passau-Ingling ist davon direkt beeinflusst und damit bei diesem Ereignis stärker fehlerbehaftet. Die Zeiträume von 36,1 Stunden ($\Delta Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$) bis 28,1 Stunden ($\Delta Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$), die zwischen dem Beginn der Polderfüllung und dem Scheitelzeitpunkt am KW Passau-Ingling liegen, stellen lange Zeitfenster dar, durch die sich Unsicherheiten ergeben können. Aufgrund dieser Unsicherheiten der Vorhersagen wäre eine adaptive Untersuchung der Polderfüllung mit Fokus auf den Fernbereich nicht zielführend, auf eine entsprechende Untersuchung wurde daher verzichtet. Obwohl sich bei der Steuerung mit Fokus auf den Fernbereich Unsicherheiten durch die Laufzeiten der Ganglinien und die Auftrittszeitpunkte des Scheitels ergeben, zeigen die Ergebnisse, dass mit dem robusten Ansatz eines konstanten Polderzuflusses auch bei unterschiedlichen Polderzuflüssen und damit Fülldauern gute Abminderung für den Fernbereich erreicht werden können.

9.3.3 Wirkungsanalyse zur Flutpolderfüllung mit Fokus der Abflussreduzierung auf den Nahbereich

Kurzbeschreibung der untersuchten Varianten

Es wurden insgesamt drei Varianten betrachtet, bei denen den Fokus der Abflussminderung zur Reduzierung des Scheitels auf dem Nahbereich liegt, um eine Scheitelreduzierung im Fernbereich zu schaffen. Die erste Analyse bezieht sich auf den vorhergesagten Hochwasserscheitel am KW Feldkirchen. Es handelt sich dabei um eine erste Analyse zur Beaufschlagung und nicht um eine Steuerstrategie. Eine Adaption des angesetzten Schwellenwertes zur Polderfüllung wird nicht durchgeführt. Bei der zweiten Variante wird eine adaptive volumenbezogene Polderfüllung betrachtet. Liegt eine neue Vorhersage vor, findet ein Abgleich mit der aktuellen Polderfüllung statt. Unter Auswertung des Volumens der vorhergesagten Ganglinie wird eine Anpassung des Schwellenwertes zur Polderfüllung vorgenommen. In einer weiteren dritten Variante wird die Polderfüllung ebenfalls volumenbezogen und adaptiv durchgeführt, der Schwellenwert wird dabei jedoch nicht verringert.

Für die Definition der Polderfüllung wurden die Vorhersagen des HW 2013 aus dem Modell Flux/Floris genutzt, da hier Vorhersagen für alle Pegel und Kraftwerke am Inn vorhanden sind. Bei diesem Hochwasser ist nach Angabe des LfU die für die Vorhersage herausfordernde, extreme Hochwassersituation an der Mangfall zu beachten. Für das Modell LARSIM sind die Vorhersagen an Pegeln des Inns im Bereich des Flutpolders Feldkirchen (zum Beispiel Rosenheim o.d. Mangfallmündung oder Wasserburg) erst ab dem HW 2019 in den übergebenen Daten vorhanden.

Das HW 2013 stellt im Nahbereich des Polders keinen Überlastfall dar, da der Scheitel im Bereich des Polders (Pegel Wasserburg) einer Jährlichkeit von etwa HQ_{20} entspricht. Die bei den adaptiven Vorgehensweisen ermittelten Schwellenwerte zur Polderfüllung liegen damit ebenfalls deutlich niedriger als beispielsweise der Bemessungsabfluss der unterhalb liegenden Hochwasserschutzanlagen, sodass kein Überlastfall im Nahbereich des Polders auftritt. Der Überlastfall entspricht im Bereich der Stadt Wasserburg ungefähr einem HQ_{100} .

Erste Analyse zur Beaufschlagung ohne Adaption

Im ersten Schritt wird eine Analyse zur Beaufschlagung des Polders ohne Adaption durchgeführt, bei der sich der Fokus bei der Abflussreduzierung auf den Nahbereich bezieht. Hierbei wird in Abhängigkeit der Vorhersagen der Zeitpunkt des Füllbeginns festgelegt. Ab diesem Zeitpunkt wird der Abfluss direkt unterstrom des Poldereinlaufs durch die Abgabe in

den Polder nahezu konstant gehalten. Nach Beginn der Polderfüllung werden keine weiteren Vorhersagen berücksichtigt, ein adaptives Nachsteuern erfolgt somit nicht.

Zur Bestimmung des Polderzuflusses wird ein Wasserstandsregler genutzt. Der Referenzwasserstand (Regelgröße) liegt 200 m unterhalb des Poldereinlaufes an Inn-km 175,6. Wird der Referenzwasserstand durch die Abgabe in den Polder konstant gehalten, ist direkt unterstrom des Polders eine nahezu konstante Abflussweitergabe möglich.

Die definierten Nebenbedingungen (Restriktionen) bleiben weiterhin bestehen, wie zuvor in Kapitel 7.2 beschrieben. Diese betreffen den maximalen Polderzufluss ($Q_{zu,Polder,max} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$), den maximalen Füllstand ($y_{Polder,max} = 441,10 \text{ müNN}$), die Begrenzung der Änderung des Zuflusses in den Polder (Gradient) sowie die Prüfung, ob die Füllung hydraulisch möglich ist (Wasserstandsgefälle zwischen Inn und Wasserstand im Polder). Die Vorgabe des Gradienten zur Füllung wurde angepasst, sodass die Beendigung des Füllprozesses nicht zu abrupt geschieht. Der Gradient wurde auf $\Delta Q_{zu,max,Polder} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ pro 1 Minute reduziert. Im Abgleich mit dem verringerten Gradienten zur Polderfüllung musste ebenfalls der maximal mögliche Zufluss vor Erreichen des maximalen Polderwasserstandes reduziert werden. Für die in diesem Kapitel dargestellten Simulationsergebnisse wird der maximal mögliche Zufluss ab einem Polderwasserstand von 440,80 müNN auf $Q_{zu,Polder,max} = 520 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert. Es erfolgt eine sukzessive Verringerung in Schritten von 10 cm, bis zu einer Reduzierung auf $Q_{zu,Polder,max} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Erreichen des Maximalwasserstandes.

Zur Festlegung des Beginns der Polderfüllung wurden die Vorhersagen am KW Feldkirchen, für die ein Abklingen des Abflusses erkennbar ist, ausgewertet. Die Vorhersage am KW Feldkirchen wurde genutzt, da hier der Einfluss der Mangfall enthalten ist. Unter Annahme einer Abflusssdifferenz von $\Delta Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ im Abgleich mit dem Maximalabfluss der Vorhersage wurde ein Abflussschwellenwert berechnet, für den der Zeitpunkt des Durchgangs im ansteigenden und absteigenden Bereich des Hochwassers ermittelt wurde. Bei der Vorhersage für den 01.06.2013 7:00 Uhr (Abbildung 124) ergibt sich somit ein Beginn der Polderfüllung am 02.06.2013 um 5:00 Uhr.

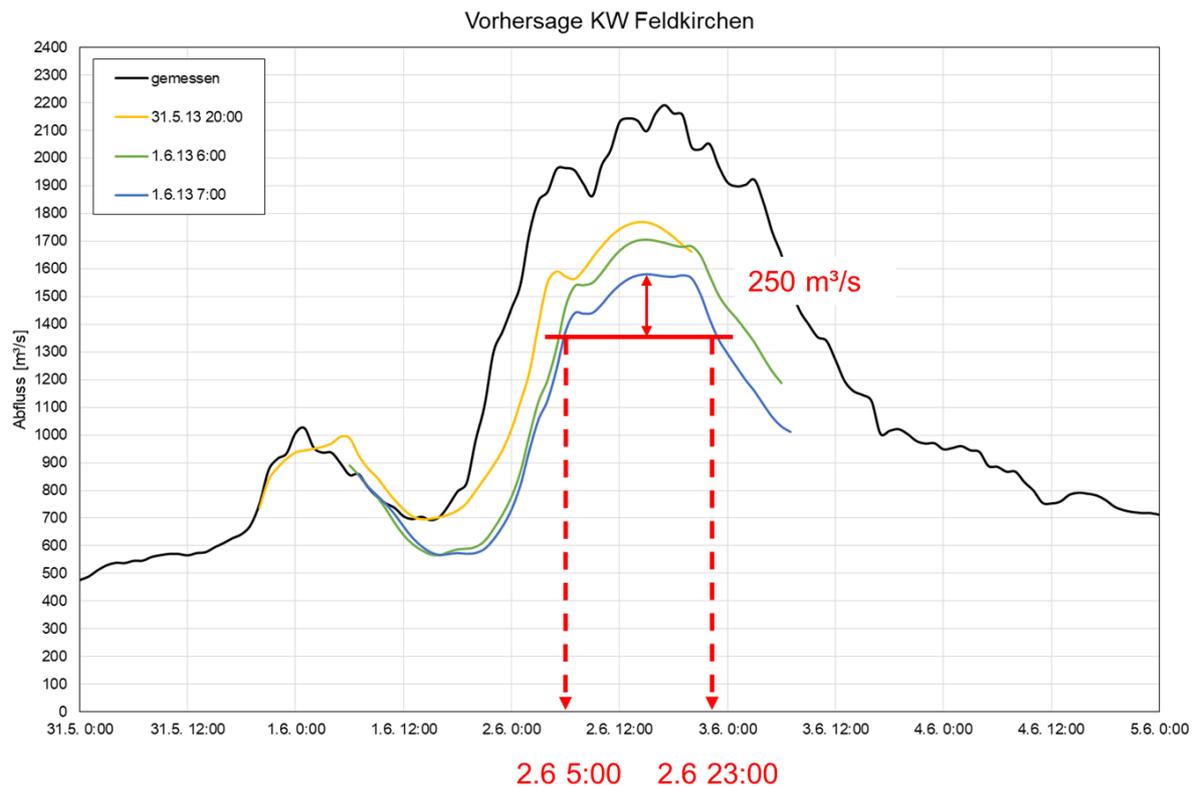


Abbildung 124: Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen - Fester Bezug auf Schwellenwert (Beispiel)

Die nachfolgenden Vorhersagen wurden analog ausgewertet. In Tabelle 33 ist die Auswertung tabellarisch zusammengefasst. Es sind der Berechnungs- und Vorhersagezeitpunkt der Vorhersagen aufgetragen, der vorhergesagte Zeitpunkt des Abflussmaximums, das Abflussmaximum, der Abgleich des Zeitpunktes mit dem gemessenen Auftrittszeitpunkt sowie die Zeitpunkte von $Q_{\max}-250 \text{ m}^3/\text{s}$ im An- und Abstieg und deren Zeitdifferenz Δt . Bis zur Vorhersage für 02.06.2013 1:00 Uhr wird mehrheitlich 02.06.2013 5:00 Uhr als Startzeitpunkt zur Polderfüllung ermittelt (grün). Am 02.06.2013 um 2:08 Uhr liegt eine Vorhersage vor, die besagt, dass entsprechend der Auswertung sofort mit dem Füllvorgang zu beginnen ist. Es wird auch fortfolgend ein abklingender Verlauf vorhergesagt (rot). Das gemessene Maximum wird am 02.06.2013 um 17:00 Uhr erreicht.

Tabelle 33: Auswertung Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen - Fester Bezug auf Schwellenwert

Berechnungszeitpunkt	Vorhersagezeitpunkt	Differenz Vorhersage bis Eintritt	Vorhergesagtes Datum des Maximums	Vorhergesagter Abfluss Qmax	Qmax-250	Zeitpunkt Qmax-250 Anstieg	Zeitpunkt Qmax-250 Abstieg	Delta t
		[h]		[m³/s]				
gemessen		0	2.6.13 17:00	2191				
31.5.13 13:48	31.5.13 13:00	-52,00	2.6.13 13:00	1908	1658	noch kein Abklingen		
31.5.13 20:48	31.5.13 20:00	-45,00	2.6.13 14:00	1769	1519	noch kein Abklingen		
1.6.13 6:48	1.6.13 6:00	-35,00	2.6.13 15:00	1706	1456	2.6.13 5:00	3.6.13 0:00	19,00
1.6.13 7:48	1.6.13 7:00	-34,00	2.6.13 15:00	1581	1331	2.6.13 5:00	2.6.13 23:00	18,00
1.6.13 18:15	1.6.13 17:00	-24,00	2.6.13 13:00	1839	1589	2.6.13 7:00	2.6.13 20:00	13,00
2.6.13 0:52	1.6.13 23:00	-18,00	2.6.13 10:00	2184	1934	2.6.13 5:00	2.6.13 17:00	12,00
2.6.13 2:08	2.6.13 1:00	-16,00	2.6.13 13:00	1831	1581	2.6.13 1:00	2.6.13 18:00	17,00
2.6.13 4:21	2.6.13 3:00	-14,00	2.6.13 13:00	1841	1591	2.6.13 3:00	2.6.13 18:00	15,00
2.6.13 7:02	2.6.13 6:00	-11,00	2.6.13 15:00	2034	1784	2.6.13 6:00	2.6.13 21:00	15,00
2.6.13 17:12	2.6.13 16:00	-1,00	2.6.13 16:00	2161	1911	2.6.13 16:00	2.6.13 23:00	7,00
2.6.13 21:03	2.6.13 20:00	3,00	2.6.13 17:00	2191	1941	2.6.13 9:00	2.6.13 23:00	14,00
3.6.13 2:09	3.6.13 1:00	8,00	2.6.13 17:00	2191	1941	2.6.13 9:00	2.6.13 23:00	14,00
3.6.13 3:51	3.6.13 3:00	10,00	2.6.13 17:00	2191	1941	2.6.13 9:00	2.6.13 23:00	14,00
3.6.13 9:05	3.6.13 8:00	15,00	2.6.13 17:00	2191	1941	2.6.13 9:00	2.6.13 23:00	14,00
3.6.13 16:47	3.6.13 16:00	23,00	2.6.13 17:00	2191	1941	2.6.13 9:00	2.6.13 23:00	14,00

Mit der Polderfüllung wird demnach am 02.06.2013 um 2:08 Uhr begonnen (entsprechend Simulationsstunde 50,15). In Abbildung 125 ist das Simulationsergebnis aufgetragen. Dargestellt ist der Abfluss am KW Feldkirchen ohne (gelb) und mit (rot) Polder sowie der Wasserstand am Referenzpegel Inn-km 175,6 ohne (schwarz) und mit (lila) Polder sowie der Polderzufluss (grün). Der Wasserstand am Referenzpegel (Inn-km 175,6) wird durch den Stauzielregler ab Stunde 50 annähernd konstant gehalten. Es ist damit eine nahezu konstante Abflussweitergabe unterstrom des Polders am KW Feldkirchen möglich. Da der Polder nach etwa 19 Stunden Beaufschlagungsdauer gefüllt ist, wird der Polderzufluss gedrosselt und es kommt zu einem sprunghaften Abflussanstieg am KW Feldkirchen.

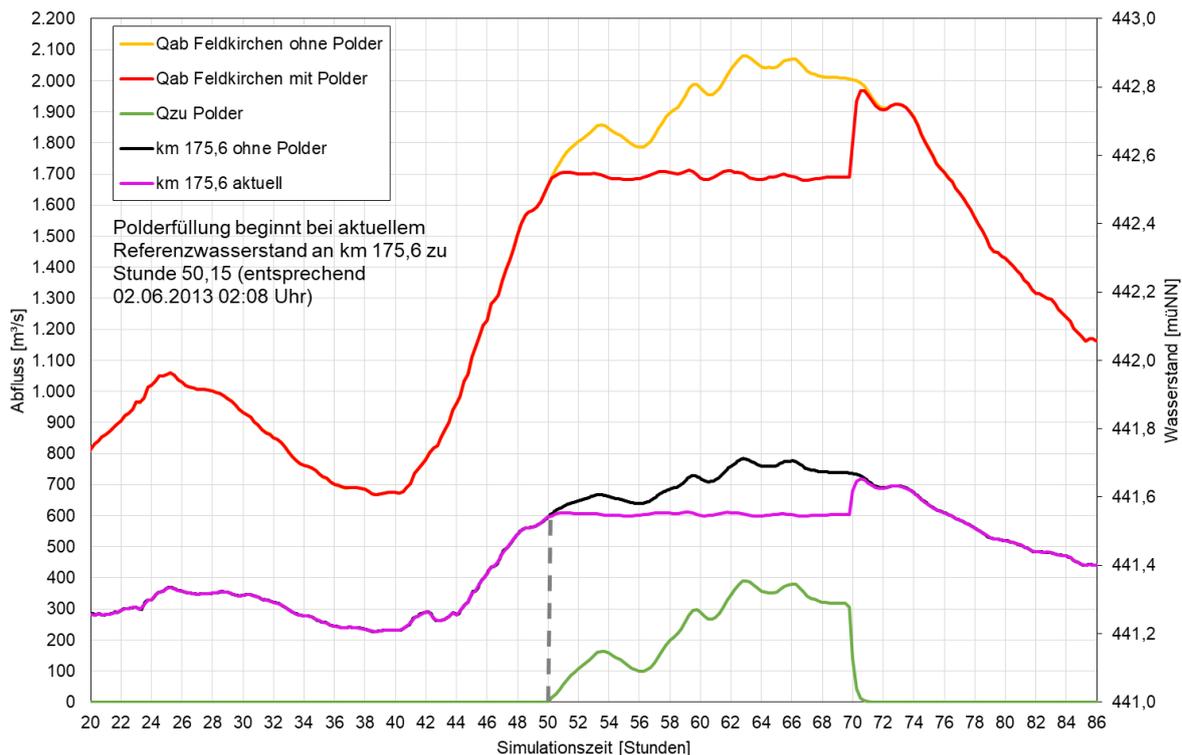


Abbildung 125: Simulationsergebnis KW Feldkirchen - Fester Bezug auf Schwellenwert

In dieser ersten Analyse zur Füllvorschrift des Polders erfolgte die Konzentration auf den Zeitpunkt des Füllbeginns. Mit der Definition des Füllbeginns und dem Bezug auf einen festen Schwellenwert ohne Adaption als erste Analyse ist eine nahezu konstante Abflussweitergabe unterstrom des Polders am KW Feldkirchen während der Polderfüllung erzielbar. Die Poldervollfüllung tritt nach etwa 19 Stunden ein und hat direkt unterstrom des Poldereinlaufs einen sprunghaften Abflussanstieg zur Folge, der jedoch aufgrund des vergleichsweise niedrigen Abflussbereichs im Nahfeld des Polders (kein Überlastfall) nicht zu einer Gefährdung führt. Um den Abflussanstieg zu verhindern, könnte beispielsweise der Schwellenwert der Auswertung zur Bestimmung des Zeitpunktes entsprechend angepasst werden.

Die Anwendung einer adaptiven Steuerung bietet die Möglichkeit, Parameter der Steuerung während des laufenden Betriebs zu verändern, um auf eine geänderte Vorhersage reagieren zu können. Aus diesem Grund wird anschließend an die erste Analyse ein adaptiver Füllprozess untersucht.

Adaptiver Füllprozess mit Verringerung des Schwellenwertes (Variante A)

Die Beaufschlagung des Polders wird in der nachfolgend beschriebenen Simulation adaptiv basierend auf dem vorhergesagten Volumen der Hochwasserwelle in Abgleich mit der aktuellen Polderfüllung durchgeführt. Dabei wird, wenn dies durch die Auswertung der Vorhersage angezeigt wird, eine Veränderung des Schwellenwertes zur

Polderbeaufschlagung durchgeführt, die sowohl Verringerungen als auch Erhöhungen des Schwellenwertes umfasst. Die nachfolgend vorgestellte adaptive Vorgehensweise mit Verringerung und Erhöhung des Schwellenwertes wird als Variante A (mit Verringerung) bezeichnet, während in einer weiteren Variante B keine Verringerung des Schwellenwertes vorgenommen wird.

Es wird ebenfalls ein Stauzielregler zur Beaufschlagung des Polders genutzt, der Referenzwasserstand (Regelgröße) liegt 200 m unterhalb des Poldereinlaufes an Inn-km 175,6.

Im ersten Schritt wird anhand der Auswertung des vorhergesagten Wellenvolumens im Abgleich mit dem gesamten Poldervolumen der Zeitpunkt zum Beginn der Polderfüllung festgelegt. Nach Beginn der Polderfüllung werden bei Vorliegen einer neuen Vorhersage adaptive Anpassungen über relative Änderungen ($\Delta Q \rightarrow \Delta h$) des ersten ermittelten Abflussschwellenwertes vorgenommen. Es wird keine absolute Betrachtung der W-Q-Beziehung an der Referenzstelle durchgeführt, da diese im Vergleich zur Realität eine zu große Ungenauigkeit aufweist. Abbildung 126 zeigt die Vorhersage am KW Feldkirchen für den 01.06.2013 23:00 Uhr (Berechnungszeitpunkt 02.06.2013 0:52 Uhr). Die Auswertung ergibt, dass mit der Füllung am 02.06.2013 um 01:50 Uhr zu beginnen ist. Der zugehörige Abflussschwellenwert beträgt $Q = 1751 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Auswertungen der vorhergehenden Vorhersagen ergaben einen Beginn der Füllung am 02.06.2013 zwischen 5:00 und 6:40 Uhr (vgl. Tabelle 34). Bei der Auswertung des Volumens der Abflussganglinien oberhalb des Schwellenwertes ergibt sich für die Vorhersage ein Volumen von 17,43 Mio. m^3 und für die tatsächlich messtechnisch erfasste Abflussganglinie ein leicht größerer Wert von 23,67 Mio. m^3 .

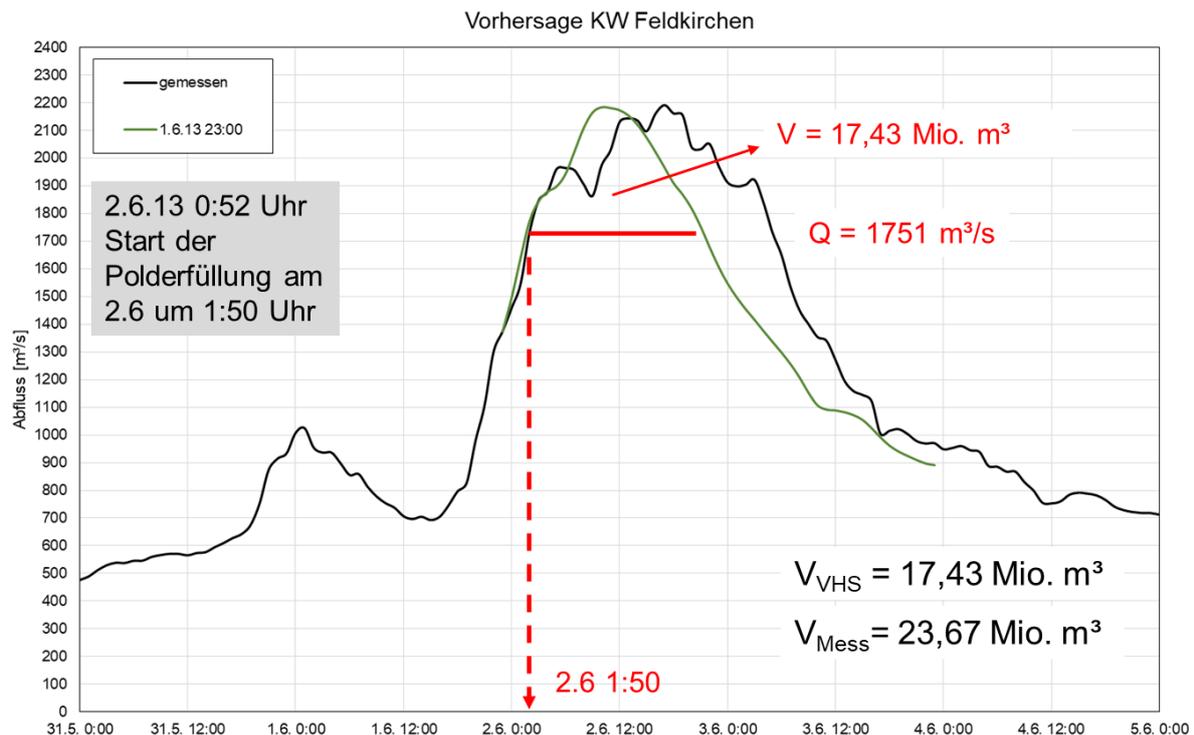


Abbildung 126: Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen – Volumenbezogen und adaptiv (Var. A, Beispiel I)

Nach Beginn der Polderfüllung um 1:50 Uhr liegt die nächste Vorhersage um 2:08 Uhr vor. Der Polder wurde innerhalb der Zeitspanne seit Beginn der Füllung mit einem Volumen von 0,01 Mio. m³ gefüllt. Unter Annahme eines verringerten Restvolumens, das im Polder zur Verfügung steht, ergibt sich bei Integration der neuen, in diesem Fall deutlich niedrigeren Vorhersage ein Schwellenwert des Abflusses von $Q = 1.472 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Berücksichtigung der auf diese Weise durch Auswertung der Vorhersageganglinien im Abgleich mit der Polderfüllung ermittelten Schwellenwerte bei der Polderfüllung wird nachfolgend erläutert.

In Tabelle 34 sind die ermittelten Werte zur Durchführung einer adaptiven, volumenbezogenen Polderbeaufschlagung aufgeführt. Am 02.06.2013 0:52 Uhr (Berechnungszeitpunkt) wird wie zuvor beschrieben 1:50 Uhr als Beginn der Füllung ermittelt (grau hinterlegt). Ab diesem Zeitpunkt erfolgt das Halten des aktuellen Wasserstandes an der Referenzstelle des Stauzielreglers (WST beträgt zu diesem Zeitpunkt 441,54 müNN). Liegt eine neue Vorhersage vor, also beispielsweise um 2:08 Uhr, wird der Wasserstand im Polder ausgelesen (gelb hinterlegt). Anhand des Wasserstandes wird das zur Verfügung stehende Restvolumen im Polder anhand der Wasserstands-Volumen-Beziehung bestimmt. Aus der Ganglinie der Vorhersage unter Vorgabe des Restvolumens wird der neue Schwellenwert zur Beaufschlagung des Polders ermittelt. Es erfolgt eine Korrektur des neuen Schwellenwertes entsprechend der Abflussdifferenz aus Simulation ohne Polder und Messung am KW Feldkirchen, da im Rahmen der Simulation zu beachten ist, dass eine Differenz zwischen

Simulation und Messung (Simulation ist im vorliegenden Fall des HW 2013 geringer als Messung) besteht. Die Differenz der gemessenen (orange) und simulierten Ganglinien (gelb) ist in Abbildung 127 ersichtlich.

Der korrigierte Wert entspricht dem neuen Soll-Wert des weiterzugebenden Abflusses am KW Feldkirchen. Zum Zeitpunkt 2:08 Uhr der Simulation wird der simulierte Abfluss am KW Feldkirchen ermittelt (gelb hinterlegt), dieser stellt den Ist-Wert des Abflusses dar. Mittels der Differenzenbildung ΔQ aus Soll und Ist-Wert des Abflusses am KW Feldkirchen wird Δy für ΔQ aus der W-Q-Beziehung am Referenzpunkt des Stauzielreglers gebildet. Die berechnete Wasserstandsdifferenz Δy wird mit dem ersten Wasserstand von 441,54 müNN verrechnet und dient als neue Regelgröße. Liegt eine neue Vorhersage vor, werden die beschriebenen Schritte wiederholt. Der Polder ist bei Vorliegen der Vorhersage am 02.06.2013 um 17:12 bereits gefüllt. Das gemessene Maximum wird am 02.06.2013 um 17:00 Uhr erreicht.

Tabelle 34: Auswertung Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen – Volumenbezogen und adaptiv (Variante A)

Berechnungszeitpunkt	Vorhersagezeitpunkt	Zeitpunkt Start Volumenbezogen	Simzeit bzgl auf Berechnungszeitpunkt	Qgrenz Volumenbezogen	Qgrenz mit Korrektur (obs-sim)	Qgrenz aus Simulation (Qab KW Feldk.)	Delta Q (Qgrenz sim - Qgrenz mit Kor)	Delta y	WST zur Füllung	WST Polder [müNN]	Polderfüllung
				[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]				
31.5.13 13:48	31.5.13 13:00										
31.5.13 20:48	31.5.13 20:00										
1.6.13 6:48	1.6.13 6:00	2.6.13 5:20	53,33	1364							
1.6.13 7:48	1.6.13 7:00	2.6.13 5:00	53,00	1239							
1.6.13 18:15	1.6.13 17:00	2.6.13 6:40	54,67	1432							
2.6.13 0:52	1.6.13 23:00	2.6.13 1:50	49,83	1751	1694				441,54		
2.6.13 2:08	2.6.13 1:00		50,15	1472	1394	1666	-272	-0,09	441,45	435,26	0,01
2.6.13 4:21	2.6.13 3:00		52,35	1535	1465	1428	38	0,01	441,46	436,32	2,43
2.6.13 7:02	2.6.13 6:00		55,04	1710	1574	1419	155	0,05	441,51	437,79	6,20
2.6.13 17:12	2.6.13 16:00		65,21	Polder bereits voll gefüllt						441,10	17,30

Mit der so definierten Regel wird das in Abbildung 127 dargestellte Ergebnis simuliert. Das Diagramm zeigt den Abfluss am KW Feldkirchen ohne (gelb) und mit (rot) Polder, den gemessenen Abfluss am KW Feldkirchen (orange), den Zufluss zum Polder Feldkirchen (grün) sowie den Wasserstand an der Referenzstelle an Inn-km 175,6 ohne (schwarz) und mit (lila) Polderbetrieb. Durch die adaptiven Anpassungen ist der weitergegebene Abfluss unterstrom des Polders am KW Feldkirchen nicht konstant.

Da das vorhergesagte Volumen der Hochwasserganglinien, insbesondere für die Vorhersagen ab 2:08 Uhr zu gering ist, wird eine zu starke Beaufschlagung des Polders vorgenommen und der Polder ist nach etwa 14 Stunden Beaufschlagungsdauer gefüllt. Ungünstig wirkt sich weiterhin noch die große Zeitspanne zwischen den vorliegenden Vorhersagen von bis zu 10 Stunden im Scheitelpunkt des Hochwassers aus, während der kein Abgleich mit der Polderfüllung durchgeführt wurde. Die Dichte der Vorhersagen muss zur Beaufschlagung des Polders mindestens zwei bis drei Stunden betragen, was in der Regel gegeben ist,

insbesondere bei großen Hochwassern. Ist die Aufrufhäufigkeit zu gering, sollte ein zwischenzeitliches Nachsteuerung mit einem Abgleich der Polderfüllung durchgeführt werden.

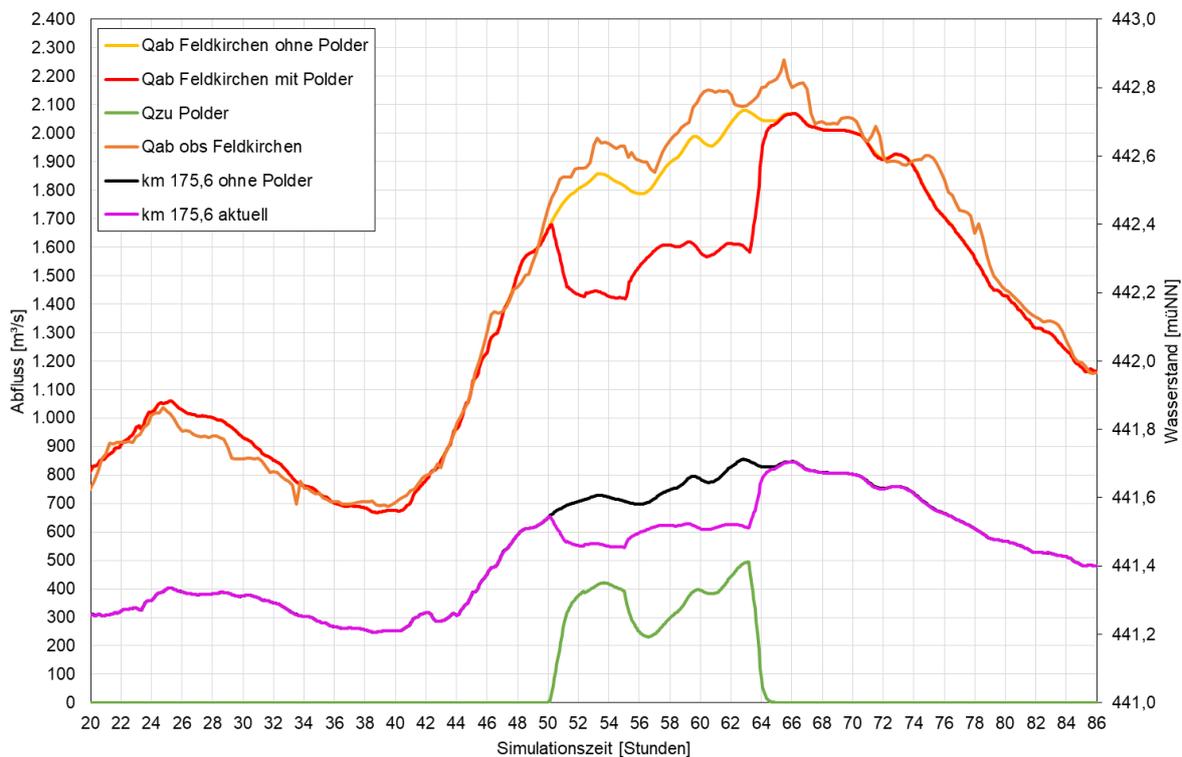


Abbildung 127: Simulationsergebnis KW Feldkirchen - Volumenbezogen und adaptiv (Variante A)

Adaptiver Füllprozess ohne Verringerung des Schwellenwertes (Variante B)

In einer weiteren Untersuchung wurde der gleiche adaptive Ansatz gewählt wie bei der zuvor beschriebenen Betrachtung. Es wird jedoch aufgrund der stark schwankenden und damit eher unsicheren Vorhersagen keine Verringerung des Schwellenwertes vorgenommen. Der untersuchte Füllprozess entfernt sich damit von einer realistischen Steuerungsoption und dient zum Systemverständnis. Es ist hierbei, wie zuvor erläutert, zu beachten, dass im Nahbereich des Polders kein Überlastfall bei dem untersuchten Ereignis besteht. Ergibt die Auswertung des aktuellen Polderfüllstandes in Verbindung mit einer neuen Vorhersage, dass eine Erhöhung des Schwellenwertes durchzuführen ist, wird eine Erhöhung des Wasserstandes zur Polderfüllung vorgenommen. Diese adaptive Vorgehensweise ohne Verringerung des Schwellenwertes wird als Variante B bezeichnet.

Die Auswertung der Vorhersage am 02.06.2013 um 0:52 Uhr ergibt einen Start der Polderfüllung um 1:50 Uhr. Der Wasserstand wird ab diesem Zeitpunkt durch die Abgabe in den Polder unter Einsatz des Wasserstandsreglers konstant gehalten. Es stellt sich hierbei eine nahezu konstante Abflussweitergabe von etwa $Q = 1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ ein. Da die Auswertungen der nachfolgenden Vorhersagen in Verbindung mit der Auswertung des aktuellen

Polderfüllstandes eine Verringerung des Schwellenwertes ergeben, wird keine adaptive Anpassung veranlasst. Die Auswertung der Vorhersage am 02.06.2013 um 17:12 Uhr (Simulationsstunde 65,21) ergibt eine notwendige Erhöhung des Schwellenwertes, sodass unter Auswertung des Füllstandes und der W-Q-Beziehung der Bezugswasserstand zur Füllung des Flutpolders um 2 cm erhöht wird. Die Vollfüllung des Polders tritt etwa bei Simulationsstunde 69 ein (Abbildung 128). Hierbei ist ebenfalls, wie zuvor erläutert, die große Zeitspanne zwischen den vorliegenden Vorhersagen im Scheitelbereich des Hochwassers von 10 Stunden zu beachten, die sich ungünstig auswirkt. Der Grenzwert eines Überlastfallereignisses ($> HQ_{100}$) direkt unterstrom greift in diesem Fall, wie zuvor erläutert, nicht, da das HW 2013 keinen lokalen Überlastfall darstellt.

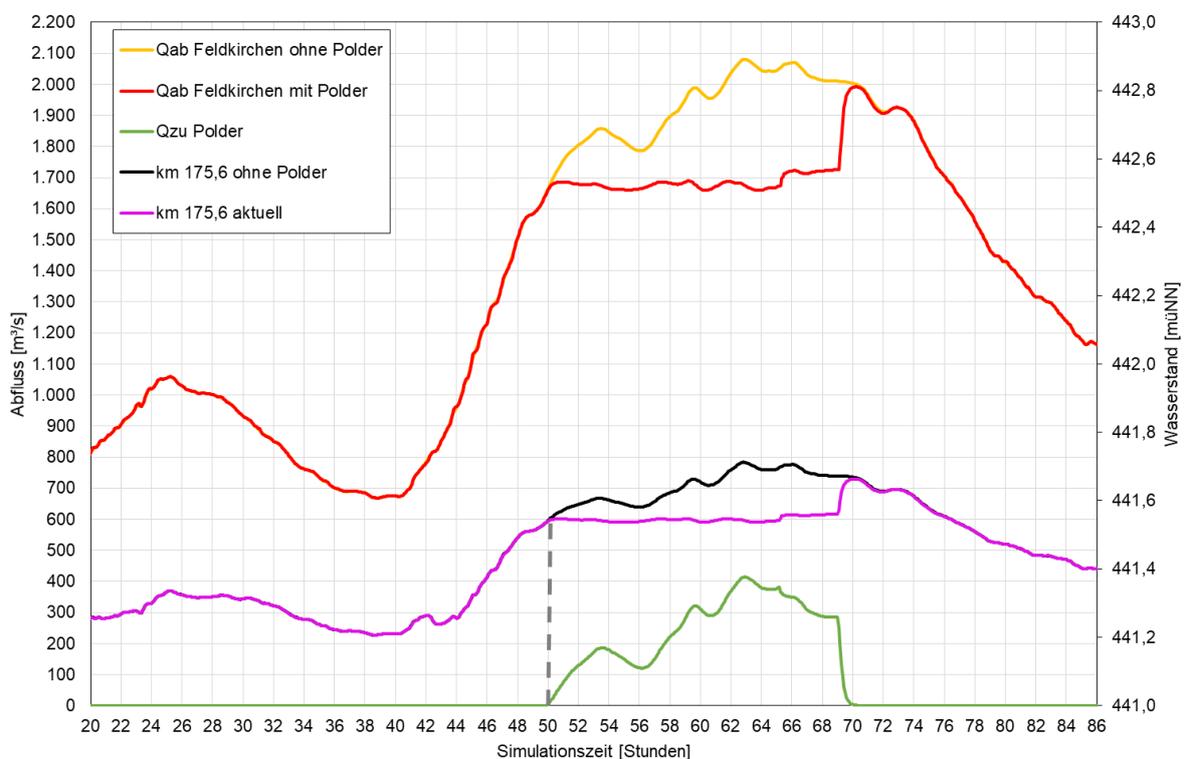


Abbildung 128: Simulationsergebnis KW Feldkirchen - Volumenbezogen und adaptiv ohne Verringerung (Variante B)

Im Nahfeld des Polders ergeben sich Abminderungen, die sich bei den verschiedenen Varianten stärker unterscheiden. Die Abminderung bei konstanter Beaufschlagung und adaptiver Füllung ohne Verringerung des Schwellenwertes (Variante B) sind ähnlich groß (5,6 gegenüber 4,9 %). Während die adaptive Beaufschlagung mit Verringerung (Variante A) eine geringere Abminderung am Pegel Wasserburg (1,1 %) zeigt. Hierbei ist zu beachten, dass kein lokaler Überlastfall im Bereich des Flutpolderstandortes besteht.

Die Abminderungen am Pegel Passau-Ingling sind für die untersuchten Vorgehensweisen mit Fokus der Abminderung auf den Nahbereich ähnlich groß (vgl. Tabelle 35). Zum Vergleich ist

das Ergebnis der Polderbeaufschlagung aus der ersten Wirkungsanalyse mit aufgenommen, bei dem die Mangfall berücksichtigt wurde. Diese Wirkungsanalyse stellt ein theoretisches Beispiel dar, bei dem die Abflussganglinien als bekannt vorausgesetzt werden. Die konstante Beaufschlagung und die Simulation mit adaptiver Anpassung ohne Verringerung weisen Abminderungen von 3,2 % und 3,0 % auf, während bei der adaptiven Beaufschlagung mit Verringerung eine Abminderung von 1,9 % ermittelt wird. Die simulierten Abminderungen im Fernfeld unterscheiden sich damit für die untersuchten Vorgehensweisen geringer voneinander und die lokale Sensitivität macht sich im Fernfeld des Polders in einer Entfernung von 170 km bei diesem Beispiel nicht bemerkbar. Es wurden ebenfalls Simulationen mit kombiniertem Polderbetrieb und Stauraummanagement durchgeführt. Die Durchführung des Stauraummanagements bei kombiniertem Betrieb von Polder Feldkirchen mit Stauraummanagement erfolgt automatisch anhand der in Kapitel 8 vorgestellten Steuerungsvorgaben. Auch hier ergibt sich eine annähernd additive Überlagerung der erzielten Abminderungen bei Betrachtung des alleinigen Polderbetriebes der untersuchten Vorgehensweisen zur Polderbeaufschlagung mit dem kombinierten Betrieb mit Stauraummanagement.

Tabelle 35: Simulationsergebnisse Polderbetrachtung Feldkirchen - Pegel Passau-Ingling

Steuerung	Zeitpunkt Beginn Polderfüllung	Delta Q		Füllung prozentual
		[m³/s]	prozentual	
Wirkungsanalyse Polder (mit Mangf.)	---	204	3,0%	100,00%
Polder (konstant)	02.06.2013 02:08	217	3,2%	100,00%
Polder adaptiv mit Verr. (A)	02.06.2013 01:50	128	1,9%	100,00%
Polder adaptiv ohne Verr. (B)	02.06.2013 01:50	206	3,0%	100,00%
Staur	---	212	3,1%	---
Polder (konstant) + Staur	02.06.2013 02:08	422	6,2%	100,00%
Polder adaptiv mit Verr. (A) + Staur	02.06.2013 01:50	333	4,9%	100,00%
Polder adaptiv ohne Verr. (B) + Staur	02.06.2013 01:50	409	6,0%	100,00%

9.4 Fazit zur vorhersagebasierten Poldersteuerung des Flutpolders Feldkirchen

Wie eingangs erläutert sind verschiedene Vorgehensweisen bei der Definition der Polderbeaufschlagung möglich. Diese sind davon abhängig, ob ein Überlastfall im Nahfeld oder im Fernbereich des Polders auftritt. Bei einem Überlastfall im Nahfeld des Polders wird die Polderfüllung mit Bezug auf z. B. den Pegel Wasserburg oder KW Feldkirchen anhand von festen Schwellenwerten oder basierend auf Messwerten oder Vorhersagen durchgeführt. Stellt ein Hochwasser ausschließlich im Fernbereich des Polders einen Überlastfall dar, ist eine Nutzung des Flutpolders Feldkirchen mit Fokus der Abflussminderung auf den Fernbereich (überregional, Bezugsgröße z. B. Pegel Passau-Ingling) oder auf den Nahbereich möglich.

Da eine nahfeldbezogene Steuerungsvorschrift für den Polder Feldkirchen anhand von weiter oberstrom gelegenen Messwerten mit dem bisherigen Simulationsmodell und den vorliegenden aufgezeichneten Daten nicht möglich ist, wurde die Steuerung anhand von Vorhersagedaten des Modells Flux/Floris untersucht. Im Rahmen der weitergehenden Untersuchungen konnte nur ein Ereignis, das HW 2013, näher betrachtet werden, weil nur für dieses geeignete Vorhersagedaten zur Verfügung stehen. Das HW 2013 stellt im Fernbereich des Polders im Bereich Passau ein Überlastereignis dar, während der Scheitel im Nahfeld des Polders am Pegel Wasserburg etwa einem Ereignis von HQ_{20} entspricht. Ein Überlastfall im Nahbereich des Flutpolders Feldkirchen konnte hier somit nicht untersucht werden. Der Betrieb des Polders bei einem Überlastfall im Fernbereich mit dem Fokus der Abflussminderung auf den Fern- sowie auf den Nahbereich wurde für das HW 2013 untersucht.

Bei der durchgeführten Wirkungsanalyse mit Fokus der Abflussreduzierung auf die Fernwirkung am KW Passau-Ingling werden bei verschiedenen konstanten Polderfüllungen Scheitelminderungen von rund 2 % am Pegel Passau-Ingling berechnet. Bei einer Fokussierung der Abflussminderung auf den Nahbereich werden am Pegel Passau-Ingling, in einer Entfernung von etwa 170 km zum Flutpolderstandort, Abminderungen von rund 3 % bestimmt.

Der Fokus auf den Nahbereich unter Verwendung von Abflussvorhersagen zeigt damit für den untersuchten Überlastfall im Fernbereich ein besseres Ergebnis als der überregionale Fokus. Ob sich dieses Verhältnis auch bei anderen Ereignissen einstellt, ist durch Untersuchung weiterer Beispiele zu betrachten. Wie oben erläutert ist die Ableitung einer Poldersteuerung gestützt auf die Untersuchung nur eines Ereignisses nicht aussagekräftig und es müssen mehrere Ereignisse betrachtet werden. Die dargestellten Untersuchungen stellen erste Analysen und Anhaltspunkte, jedoch aber keine allgemeingültigen Steuerstrategien dar und erlauben keine allgemeinen Rückschlüsse. Da nur ein Ereignis betrachtet werden konnte, wurde keine Optimierung der Steuerungsvorschriften durchgeführt.

Für die Erstellung einer allgemeingültigen vorhersagebasierten Poldersteuerung ist es notwendig, die erforderliche Datengrundlage von Vorhersagen für verschiedene relevante Hochwasser zu generieren. Anhand dieser erweiterten Datengrundlage bestünde die Möglichkeit, die zu entwickelnde Poldersteuerung an mehreren Beispielen zu evaluieren und somit allgemeingültige Regeln zu entwickeln. Für die Zukunft ist weiterhin die Möglichkeit der Nutzung von Vorhersagedaten des Modells LARSIM zu überprüfen. Die Möglichkeit einer messwertbasierten Steuerung ist anhand einer Analyse mit einem erweiterten Simulationsmodell sowie der Berücksichtigung einer Vielzahl von Pegelmessungen weiter oberstrom und entsprechender seitlicher Zuflüsse zu untersuchen.

In den hier dargestellten Analysen wurde der Entleerungsvorgang des Flutpolderbetriebes nicht betrachtet, da sich die Untersuchung auftragsgemäß auf den Füllprozess bezieht. Die Entleerung des Polders ist im Rahmen von weitergehenden Detailuntersuchungen und entsprechenden Simulationen ausführlich zu betrachten, die das Abflussgeschehen mit Zubringern weiter unterstrom berücksichtigen.

10 Zusammenfassung / Schlussfolgerung / Ausblick

Große Flusshochwasser können insbesondere in Bereichen dichter Besiedlung zu hohen Schäden führen, sodass es von hohem gesellschaftlichen Interesse ist, das Potential geeigneter Rückhaltmaßnahmen für eine mögliche Abminderung des Hochwasserscheitels zu untersuchen. Das Hochwasser im Jahr 2013 stellte vor allem in Passau an der Donau ein Ereignis mit einer Jährlichkeit größer als HQ_{100} dar, das im Stadtbereich Passau zu weitreichenden Überschwemmungen und Schäden geführt hat. Der Mündungsbereich des Inns in die Donau ist weiterhin bereits bei Hochwassern kleinerer Jährlichkeit von Überschwemmungen betroffen.

Der Inn ist wie der überwiegende Anteil großer Fließgewässer in Deutschland und Österreich mit Staustufen ausgebaut. Die Betriebsweise der Staustufen folgt festgelegten Vorschriften, die auch als Wehrbetriebsordnungen (WBO) bezeichnet werden. Insbesondere im Fall sehr großer Hochwasserereignisse ist der sichere Betrieb der Stauanlagen von entscheidender Bedeutung. Hierbei ist zu beachten, dass der Betrieb in jedem Fall hochwasserneutral durchzuführen ist und keine Verstärkung respektive Aufsteilung des Hochwasserabflusses erzeugt wird. Im besten Fall ist eine Dämpfung des Hochwasserscheitels anzustreben.

Der bestehende Ausbau von großen Fließgewässern mit Staustufen in Verbindung mit der Gefährdung, die von großen Hochwassern ausgehen kann, führt zu der zentralen Fragestellung, ob es durch eine Anpassung der Betriebsweise der Staustufen im Hochwasserfall und damit einem geeigneten Stauraummanagement möglich ist, den Scheitel eines Hochwassers zu reduzieren.

Im Rahmen des Teilprojektes C der Retentionspotentialstudie Inn – Potentialermittlung bei den Wehrbetriebsordnungen für den Ist-Zustand des Inns – wurde untersucht, ob es durch modifizierte Wehrbetriebsordnungen Potentiale gibt, den Hochwasserabfluss des Inns zu verringern. Die Scheitelreduktion der Hochwasserwelle soll dabei durch einen angepassten Betrieb der Stauanlagen erreicht werden. Grundlage der Untersuchungen bildet ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (1D-HN-Modell) der bayerischen Gewässerstrecke von Oberaudorf bis Passau-Ingling mit einer Länge von 211 km und 15 Staustufen, inklusive des Donauabschnittes vom Kraftwerk Kachlet bis zum Kraftwerk

Jochenstein. Dieses 1D-HN-Modell ist mit Modulen zur Ansteuerung der Kontrollbauwerke und der Bewirtschaftung von Staustufenketten gekoppelt, sodass die Wechselwirkungen zwischen den Zu- und Abflüssen an den Staustufen und den Wasserständen im Stauraum berechnet sowie die Betriebsvorgaben an den Staustufen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Wasserstand und Abfluss überprüft werden können. Im Rahmen der Kalibrierung des Modells und der anschließenden Validierung wurden die Hochwasser 2002, 2005 und 2013 simuliert, für die im Vergleich mit den vorliegenden umfangreichen Messdaten eine gute Übereinstimmung erzielt werden konnte.

Der Vergleich von Nachrechnungen der Hochwasser mit Simulationen, bei denen als interne Randbedingungen die WBO eingesetzt wurde, zeigt, dass die Wehrbetriebsordnungen bei dem realen Betrieb eingehalten wurden und der Betrieb gemäß WBO nicht zu einer Abflussaufsteilung führt. Da es durch Hochwasserereignisse zum Teil zu starken Umlagerungsprozessen der Sohle und damit zu einer Beeinflussung der Strömungsverhältnisse kommt, wurden Untersuchungen von unterschiedlichen Sohlagen, die die Zustände von entlandeten und angelandeten Sohlgeometrien abbilden, durchgeführt. Die Analyse zeigt, dass keine Anpassungen der WBO im Hinblick auf Veränderungen der Sohle notwendig sind.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die drei abgelaufenen Hochwasser 2002, 2005 und 2013 sowie 12 synthetische Hochwasser simuliert, die von der TU Wien im Rahmen des Teilprojektes A – Stochastische Niederschlag-Abflussmodellierung zur Ermittlung des räumlichen Zusammenwirkens der Zubringerwellen – mittels einer Monte-Carlo-Simulation mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell erzeugt wurden. Diese synthetischen Ereignisse weisen an unterschiedlichen Bezugspegeln an Inn und Salzach unterschiedliche Jährlichkeiten von Abflüssen auf und geben damit ein breites Spektrum an unterschiedlichen Niederschlags-beziehungsweise Abflussverteilungen wieder.

Das allgemeine Prinzip zur Scheitelkappung eines Hochwassers basiert auf der Einlagerung von Volumen in einem Speicher. Hierzu kann ein Flutpolder oder der Stauraum einer Staustufe (Stauraummanagement) genutzt werden. Beim Stauraummanagement wird Speichervolumen durch ein frühzeitiges, tiefes Absenken des Oberwasserstandes (Vorabsenkung) geschaffen. Sofern das Volumen nicht bereits durch das ansteigende Hochwasser ganz oder teilweise verbraucht ist, kann durch einen aktiven Wiederaufstau (Erhöhung des Oberwasserstandes) kurz vor dem Eintreffen des Scheitels Volumen in der Stauhaltung eingelagert und die Hochwasserwelle entsprechend gekappt werden.

Im Rahmen einer Erstabschätzung des Potentials durch Stauraummanagement konnten bei einem Aufstau bis maximal auf das reguläre Absenkziel (kein Überstau) im untersuchten

Abflussspektrum, das Abflüsse im Bereich von HQ_{10} bis HQ_{1000} am Pegel Passau-Ingling umfasst, prozentuale Abflussminderungen von 9,3 % bis 1 % erreicht werden. Da die Erstabschätzung des Potentials zur Scheitelminderung durch Stauraummanagement ein Potential deutlich macht, wurden weitergehende Untersuchungen zum Stauraummanagement durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassten die Ableitung von praxisnahen Steuerungsvorgaben zur Scheitelminderung.

Mit Hilfe der entwickelten praxisnahen Steuerungsvorgaben des Stauraummanagements ist eine gute Scheitelabminderung der betrachteten Hochwasser erzielbar. Für die Einleitung des Abstaus wird eine Vorhersage berücksichtigt. Hierbei ist die Information ausschlaggebend, dass ein Hochwasser auftreten wird (Überschreiten eines definierten Schwellenwertes); nicht entscheidend sind die vorhergesagte Höhe und Auftrittszeitpunkt des Hochwasserscheitels. Der Aufstauprozess wird rein messwertbasiert durchgeführt, sodass keine Abhängigkeit von einer Vorhersage und ihren Ungenauigkeiten besteht. Die Wirkung des Stauraummanagements zur Verringerung des Scheitelabflusses ist abhängig vom maximalen Abfluss des Hochwassers sowie der Wellenform und des Volumens. Bei kleineren Ereignissen im Bereich der Jährlichkeit von HQ_{10} bis HQ_{30} ist die erzielbare prozentuale Abminderung größer als im Bereich des HQ_{50} (5 bis 9 Prozent gegenüber 4 %), sowie größer als bei HQ_{100} und darüber hinaus (1 bis 2,5 %). Auch die absolute Scheitelabminderung, die zwischen $\Delta Q = 100$ bis $380 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt, nimmt dabei mit steigendem Maximalabfluss tendenziell ab. Da der Inn erheblich zum Hochwassergeschehen in Passau beiträgt, ist bereits eine Abminderung kleinerer Ereignisse am Inn sinnvoll, da es in Passau im Mündungsbereich des Inns in die Donau bereits bei Hochwassern unter einer Jährlichkeit HQ_1 zu ersten Überschwemmungen kommt. Die getroffenen Annahmen für Abstautiefen und Gradienten liegen in einem realistischen Bereich und zeigen gute Ergebnisse. Anlagen, bei denen der Abstauprozess aufgrund von morphologischen Prozessen, Rutschhängen oder zu geringen Laufzeiten schwierig umzusetzen ist, wurden bei der Betrachtung nicht berücksichtigt. Die Variantenuntersuchung zu einer geringeren Abstautiefe zeigen, dass auch bei einer Verringerung des Abstaus gute Scheitelminderungen möglich sind. Die Hochwasserwelle des Inns wird durch den Einsatz des Stauraummanagements über den gesamten zeitlichen Verlauf über ansteigenden bis abfallenden Bereich nur geringfügig zeitlich beeinflusst. Im Bereich des Scheitels wird die Ganglinie bei Stauraummanagement über einen Zeitraum von mehreren Stunden gegenüber dem Betrieb gemäß WBO reduziert.

Es ist hervorzuheben, dass im betrachteten Abschnitt des Inns im Vergleich zu anderen Fließgewässern günstige Standortbedingungen (zum Beispiel große Fallhöhen, keine Schifffahrt) vorliegen sowie Restriktionen in Bezug auf Bewirtschaftungsvolumen, Anlagendimension und Steuerbarkeit bei großen Wassermengen hinsichtlich der auftretenden

Wasserstände eingehalten werden können. Auch bei hohen Abflüssen erfolgt bei den berücksichtigten Anlagen im realen Betrieb außer in Passau-Ingling keine Freigabe des gesamten Abflussquerschnittes. Aufgrund der Berücksichtigung einer Vielzahl von insgesamt acht Stauanlagen wird der Ausfall einer Anlage, zum Beispiel durch Verklausung, das Scheitelminderungspotential nur in geringem Ausmaß reduzieren. Mit Hilfe der entwickelten praxisnahen Steuerungsregeln konnten unter der Annahme, dass keine situationsabhängigen Einschränkungen (zum Beispiel Verklausungen) vorliegen, gute Ergebnisse für die Abminderung des Hochwasserscheitels am Pegel Passau-Ingling erzielt werden. Für eine Umsetzung in der Praxis sind weitere Detailuntersuchungen zu ökologischen und morphodynamischen Aspekten notwendig. Diese Untersuchungen sollten beispielsweise den Abstau an Flachwasserzonen und Feststofftransport umfassen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Stauraummanagement im Bereich des Hochwasserschutzes beziehungsweise Hochwasserrückhaltes eine additive Maßnahme zu Rückhaltebecken und Flutpoldern darstellt, die ohne größere bauliche Maßnahmen umgesetzt werden kann.

Weiterhin erfolgte eine Wirkungsanalyse zur Scheitelminderung für den Betrieb des Flutpolders Feldkirchen sowie für den möglichen Flutpolderstandort Ering unterstrom der Salzachmündung. Diese erste Analyse und Abschätzung erfolgte unter idealisierten Bedingungen, da die Zuflussganglinien als bekannt angenommen wurden, und dient dazu, ein vertieftes Systemverständnis zu erlangen. Hierbei lag das Augenmerk zudem auf dem kombinierten Betrieb von Flutpoldern und Stauraummanagement, um die gegenseitige Beeinflussung zu untersuchen. Die Auswertung der Simulationen ergab hierbei, dass die gegenseitige Beeinflussung gering ist. Bei gemeinsamem Betrieb von Flutpolder und Stauraummanagement überlagern sich die Einzelwirkungen annähernd additiv, die positive Wirkung des Stauraummanagements bleibt auch bei Polderbetrieb erhalten.

In weitergehenden Untersuchungen wurde die Polderfüllung des Flutpolders Feldkirchen betrachtet. Es sind verschiedene Vorgehensweisen bei der Definition der Polderfüllung möglich, die davon abhängig sind, ob ein Überlastfall im Nah- oder Fernbereich des Polders auftritt. Bei einem Überlastfall im Nahfeld des Polders wird die Polderfüllung mit Bezug auf z. B. den Pegel Wasserburg oder KW Feldkirchen anhand von festen Schwellenwerten oder basierend auf Messwerten oder Vorhersagen durchgeführt. Stellt ein Hochwasser ausschließlich im Fernbereich des Polders einen Überlastfall dar, ist eine Nutzung des Flutpolders Feldkirchen mit Fokus der Abflussminderung auf den Fernbereich (überregional, Bezugsgröße z. B. Pegel Passau-Ingling) oder auf den Nahbereich möglich.

Da eine rein messwertbasierte Regel anhand der vorliegenden Informationen für den Betrieb des Flutpolders Feldkirchen derzeit nicht möglich ist, wurden Analysen zu einer vorhersagebasierten Poldersteuerung durchgeführt. Für die untersuchten relevanten

Hochwasser lagen lediglich für das HW 2013 Vorhersagen vor. Das HW 2013 stellt im Fernbereich des Polders ein Überlastereignis dar, während der Scheitel im Nahfeld des Polders am Pegel Wasserburg etwa einem Ereignis von HQ_{20} entspricht. Ein Überlastfall im Nahbereich des Flutpolders Feldkirchen konnte hier somit nicht untersucht werden, da das HW 2013 keinen lokalen Überlastfall im Polderbereich und am Pegel Wasserburg darstellt. Der Betrieb des Polders bei einem Überlastfall im Fernbereich mit dem Fokus der Abflussminderung auf den Fern- sowie auf den Nahbereich wurde für das HW 2013 untersucht.

Bei der durchgeführten Wirkungsanalyse mit Fokus der Abflussreduzierung auf die Fernwirkung am KW Passau-Ingling werden bei verschiedenen konstanten Polderfüllungen Scheitelminderungen von rund 2 % am Pegel Passau-Ingling berechnet. Bei einer Fokussierung der Abflussminderung auf den Nahbereich werden am Pegel Passau-Ingling, in einer Entfernung von etwa 170 km zum Flutpolderstandort, Abminderungen von rund 3 % bestimmt.

Der Fokus auf den Nahbereich unter Verwendung von Abflussvorhersagen zeigt damit für den untersuchten Überlastfall im Fernbereich ein besseres Ergebnis als der überregionale Fokus. Ob sich dieses Verhältnis auch bei anderen Ereignissen einstellt, ist durch Untersuchung weiterer Beispiele zu betrachten. Die Ergebnisse und Aussagen können nicht generalisiert werden, da aufgrund der vorliegenden Daten nur ein Ereignis untersucht werden konnte. Eine allgemeingültige Betriebsregel, die für eine Bandbreite verschiedener Maximalabflüsse erfolgreich einsetzbar sein muss, ist anhand von Untersuchungen weiterer Ereignisse zu entwickeln. Für die Berücksichtigung von Vorhersagen bei der Poldersteuerung und die Ableitung von entsprechenden Regeln ist aus diesem Grund die erforderliche Datengrundlage von Vorhersagen für verschiedene relevante Hochwasser zu generieren und zu untersuchen.

In den hier dargestellten Analysen wurde der Entleerungsvorgang des Flutpolderbetriebes nicht betrachtet, da sich die Untersuchung auftragsgemäß auf den Füllprozess bezieht. Die Entleerung des Polders ist im Rahmen von weitergehenden Detailuntersuchungen und entsprechenden Simulationen ausführlich zu betrachten, die das Abflussgeschehen mit Zubringern weiter unterstrom berücksichtigen.

Kassel, Oktober 2021



Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Theobald

11 Literatur

AquaSoli (2009): Wasserspiegellagenberechnung Stauraum Perach, 1. Zwischenbericht, 26.03.2009

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2014): Junihochwasser 2013 – Wasserwirtschaftlicher Bericht. S. 5., 2014

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.) (2013): Länderübergreifende Analyse des Juni-Hochwassers 2013, BfG- Bericht 1797, 2013

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2014): DWA-Themen T1/2014 – Flutpolder, April 2014

Fiedler, K. (2008): Erfassung hydromorphologischer Vorgänge bei Hochwasser mit Hilfe von ADCP-Messungen, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Band 120, 2008

Gewässerkundlicher Dienst Bayern (2018): Information zu Pegel Wasserburg / Inn und Passau-Ingling / Inn, zuletzt abgerufen am 08.01.2018

Hochwassernachrichtendienst Bayern (2019): Informationen zu den Statistiken der Pegel am Inn, (<https://www.hnd.bayern.de/pegel>), zuletzt abgerufen am 17.12.2019

Lahmeyer Hydroprojekt (2014): Hydrodynamisches Abflussmodell des Bayerischen Inn – Vom Unterwasser Kraftwerk Oberaudorf-Ebbs bis zur Mündung in die Donau bei Passau, Erläuterungsbericht, Juni 2014

Theobald, S. (1999): Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Dissertation, Mitteilungen 201, Karlsruhe, 1999

Theobald, S. (2008): Simulationswerkzeuge zum automatisierten Betrieb von Staustufen, Wasserwirtschaft, Heft 6/2008, S. 10-13, 2008

Wacker Chemie AG (2018): Alzkanalabstellung 2016 – Zahlen, Daten, Fakten, Präsentation verfügbar auf Firmenhomepage, https://www.wacker.com/cms/de/wacker_group/wacker_facts/sites/burghausen/alzkanal/projektetails.jsp, zuletzt abgerufen am 08.01.2018

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschiedliche Bereiche des Inns – Blick auf Stauanlage Oberaudorf von Oberwasser (o. l.), Blick von Kraftwerk (KW) Teufelsbruck auf Rutschhang im Bereich des Oberwassers (o. r.), Schluchtstrecke im Stauraum Passau-Ingling (u. l.), Europareservat Unterer Inn im Stauraum Ering-Frauenstein (u. r.).....	4
Abbildung 2: Untersuchungsgebiet mit Lage der Staustufen (rot) und Pegel (grün) (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)	5
Abbildung 3: Flutrinnen im Stauraum Feldkirchen – Lage im Stauraum (links) und schematische Umsetzung im Modell (rechts) (Kartenhintergrund Bing Maps - © 2017 GeoEye © GeoContent / (p) Intergraph Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)	10
Abbildung 4: Schneiden eines Querprofils zum Anlegen von seitlichen Strängen.....	11
Abbildung 5: Abdeckung des ÜSG durch Querprofile im Stauraum Gars (Kartenhintergrund Bing Maps - © 2017 GeoEye © GeoContent / (p) Intergraph Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)	12
Abbildung 6: Simulationsergebnis HW 2005 (stationär) Stauraum Feldkirchen.....	13
Abbildung 7: Einzugsgebiet des Inns mit Teileinzugsgebieten entlang der Untersuchungsstrecke (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)	16
Abbildung 8: Schematische Darstellung der abgebildeten Fließgewässerstrecke mit Einzugsgebietsgrößen.....	17
Abbildung 9: Oberwasserstand in Abhängigkeit des Zuflusses - KW Feldkirchen und KW Wasserburg.....	19
Abbildung 10: Donauabschnitt KW Kachlet bis KW Jochenstein (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)	19
Abbildung 11: Obere Randbedingungen Nachrechnung HW 2005 (links) und HW 2013 (rechts).....	22
Abbildung 12: Ganglinien der unbepegelten Teil-EZG des HW 2005 (links) und HW 2013 (rechts).....	24
Abbildung 13: Pegel Wasserburg - Abfluss - HW 2005.....	26
Abbildung 14: Pegel Kraiburg - Abfluss - HW 2005	27
Abbildung 15: Pegel Eschelbach - Wasserstand - HW 2005.....	28

Abbildung 16: Gars - Abfluss und OW-Stand - HW 2005.....	29
Abbildung 17: Gars - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2005.....	30
Abbildung 18: Ering - Abfluss und OW-Stand - HW 2005.....	31
Abbildung 19: Ering - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2005.....	32
Abbildung 20: Passau-Ingling - Abfluss, OW-Stand und Pegel Passau-Ingling - HW 2005...33	
Abbildung 21: Pegel Wasserburg - Abfluss - HW 2013.....	34
Abbildung 22: Pegel Kraiburg - Abfluss - HW 2013	35
Abbildung 23: Pegel Eschelbach - Wasserstand - HW 2013.....	36
Abbildung 24: Gars - Abfluss und OW-Stand - HW 2013.....	37
Abbildung 25: Gars - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2013.....	37
Abbildung 26: Ering - Abfluss und OW-Stand - HW 2013	39
Abbildung 27: Ering - Längsschnitt mit Maximalwerten - HW 2013.....	40
Abbildung 28: Passau-Ingling - Abfluss, OW-Stand und Pegel Passau-Ingling - HW 2013...41	
Abbildung 29: Obere Randbedingung Nachrechnung HW 2002.....	42
Abbildung 30: Pegel Wasserburg - Abfluss - HW 2002.....	43
Abbildung 31: Pegel Kraiburg - Abfluss - HW 2002	44
Abbildung 32: Pegel Eschelbach - Wasserstand - HW 2002.....	45
Abbildung 33: Gars - Abfluss und OW-Stand - HW 2002.....	45
Abbildung 34: Ering - Abfluss und OW-Stand - HW 2002	46
Abbildung 35: Passau-Ingling - Abfluss, OW-Stand und Pegel Passau-Ingling - HW 2002...47	
Abbildung 36: Pegel Passau-Ingling - Abfluss - HW 2002	49
Abbildung 37: Pegel Passau - Wasserstand - HW 2002.....	49
Abbildung 38: Pegel Achleiten - Abfluss - HW 2002	50
Abbildung 39: Pegel Passau-Ingling - Abfluss - HW 2013	51
Abbildung 40: Pegel Passau - Wasserstand - HW 2013.....	51

Abbildung 41: Pegel Achleiten - Abfluss - HW 2013	52
Abbildung 42: Wasserburg, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2002	53
Abbildung 43: Passau-Ingling, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2002	54
Abbildung 44: Wasserburg, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2005	54
Abbildung 45: Passau-Ingling, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2005	55
Abbildung 46: Wasserburg, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2013	55
Abbildung 47: Passau-Ingling, Abfluss - Vergleich Nachrechnung und gemäß WBO - HW 2013	56
Abbildung 48: Mittlere Sohlen Stauraum Perach (Quelle: VERBUND).....	58
Abbildung 49: Verschiedene Peilungen eines Querprofils	59
Abbildung 50: Ermittlung der mittleren Sohle.....	60
Abbildung 51: Beispielhafte Auswertung der hohen und tiefen Sohle für die Stauhaltung Perach.....	61
Abbildung 52: Anschluss eines Vorlandes an die Sohlpeilung des Flussschlauches	63
Abbildung 53: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Wasserburg – HW 2002	65
Abbildung 54: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Passau-Ingling – HW 2002	65
Abbildung 55: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Wasserburg – HW 2005	66
Abbildung 56: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Passau-Ingling – HW 2005	66
Abbildung 57: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Wasserburg – HW 2013.....	67
Abbildung 58: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohlagen – Pegel Passau-Ingling – HW 2013	67

Abbildung 59: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohllagen – Pegel Wasserburg – Szenario 3	69
Abbildung 60: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Sohllagen – Pegel Passau-Ingling – Szenario 3	70
Abbildung 61: Scheitelminderung am Kraftwerk Eggfing-Obernberg - HW 2002 - Variante 1 – Stauraummanagement am unteren Inn	72
Abbildung 62: Scheitelminderung am Pegel Achleiten - HW 2002 - Variante 1 - Stauraummanagement am unteren Inn	75
Abbildung 63: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1 - Stauraummanagement am unteren Inn	76
Abbildung 64: Prozentuale Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1, 2a und 2b - Stauraummanagement am unteren Inn	77
Abbildung 65: Prozentuale Scheitelminderung des Abflusses Pegel Wasserburg - Variante 1 - Stauraummanagement am oberen und unteren Inn	79
Abbildung 66: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1 – Stauraummanagement für oberen sowie oberen und unteren Inn	80
Abbildung 67: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Passau-Ingling - Variante 1 - Stauraummanagement am oberen und unteren Inn	81
Abbildung 68: Absolute Scheitelminderung des Abflusses Pegel Passau-Ingling - Variante 1, 2a und 2b - Hochwasser 2002, 2005 und 2013	82
Abbildung 69: Lage des Polders Feldkirchen (Kartenhintergrund BING Maps – © Harris Corp, Earthstar Geographics LLC Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation).....	85
Abbildung 70: Querprofil an km Inn-176,0 im Stauraum Feldkirchen	85
Abbildung 71: DGM des Polderbereichs Feldkirchen (links) und überflutete Flächen bei ausgewählten Höhenlinien (rechts) (Kartenhintergrund BING Maps – © 2020 Microsoft Corporation © 2020 Maxar © CNES (2020) Distribution Airbus DS)	86
Abbildung 72: Überflutete Fläche und Rückhaltevolumen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Polder Feldkirchen.....	87
Abbildung 73: Schema des Stauraumes und des Flutpolders Feldkirchen.....	87
Abbildung 74: Rückgestauter Abfluss – Polder Feldkirchen.....	90

Abbildung 75: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$	92
Abbildung 76: HW 2005, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$	93
Abbildung 77: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 1.750 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Abbildung 78: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 2.200 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Abbildung 79: HW 2002, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 950 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Abbildung 80: HW 2002, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 950 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Abbildung 81: HW 2013, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 1.400 \text{ m}^3/\text{s}$	97
Abbildung 82: HW 2013, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 1.400 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Abbildung 83: HW 2005, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, Polderbetrieb Feldkirchen und Stauraummanagement, $Q_{const} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$	100
Abbildung 84: Absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Abgelaufene HW.....	101
Abbildung 85: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Abgelaufene HW.....	102
Abbildung 86: Szenario 3, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, $Q_{const} = 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$	103
Abbildung 87: Szenario 3, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen.....	104
Abbildung 88: Absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Stochastische Szenarien.....	105
Abbildung 89: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Stochastische Szenarien.....	106
Abbildung 90: HW 2005, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, mit Mangfall und Zeitverschiebung.....	108

Abbildung 91: HW 2013, Scheitelminderung am KW Feldkirchen, alleiniger Polderbetrieb Feldkirchen, mit Mangfall und Zeitverschiebung	108
Abbildung 92: Lage der Polder Feldkirchen und Ering (Kartenhintergrund BING Maps – © Harris Corp, Earthstar Geographics LLC Earthstar Geographics SIO © 2017 Microsoft Corporation)	111
Abbildung 93: Lage und Umgriff der Polderfläche des Flutpolders Ering (Kartenhintergrund BING Maps – © Microsoft Corporation © 2020 Maxar © CNES (2020) Distribution Airbus DS)	111
Abbildung 94: Überflutete Fläche und Rückhaltevolumen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Polder Ering.....	112
Abbildung 95: Schematische Darstellung zur Lage und Anbindung des Polders Ering	113
Abbildung 96: Rückgestauter Abfluss – Polder Ering.....	114
Abbildung 97: HW 2002, Scheitelminderung am KW Ering-Frauenstein, alleiniger Polderbetrieb Ering.....	116
Abbildung 98: HW 2013, Scheitelminderung am KW Ering-Frauenstein, alleiniger Polderbetrieb Ering.....	116
Abbildung 99: HW 2013, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, Polderbetrieb Feldkirchen und Ering.....	118
Abbildung 100: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling - Verschiedene Betriebsweisen (Flutpolder Feldkirchen (FK) und Ering (ER)) - Abgelaufene HW.....	120
Abbildung 101: Szenario 3, Scheitelminderung über den Verlauf des Inns, Polderbetrieb Feldkirchen und Ering.....	121
Abbildung 102: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling - Verschiedene Betriebsweisen (Polder Feldkirchen (FK) und Ering (ER)) – Stochastische Szenarien	123
Abbildung 103: Vorhersage HW 2013 KW Passau-Ingling LARSIM	127
Abbildung 104: Vorhersage HW 2013 KW Passau-Ingling LARSIM Auswertung.....	128
Abbildung 105: Übersicht Inn zum Stauraummanagement - Berücksichtigte Stauanlagen und Referenzpegel (Kartenhintergrund: DTK200 © GeoBasis-DE/BKG2015)	130
Abbildung 106: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei abgelaufenen Hochwassern und stochastischen Szenarien am Pegel Passau-Ingling (Variante A)	136

Abbildung 107: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei abgelaufenen HW (Variante A) im Vergleich mit Ergebnissen aus Erstabschätzung des Potentials am Pegel Passau-Ingling.....	137
Abbildung 108: HW 2002 Ganglinien bei Betrieb gemäß WBO und Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling (Variante A).....	138
Abbildung 109: HW 2013 Ganglinien bei Betrieb gemäß WBO und Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling (Variante A).....	139
Abbildung 110: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei stochastischen Szenarien (Variante A, ungerade Ziffer) im Vergleich mit Ergebnissen aus Erstabschätzung des Potentials am Pegel Passau-Ingling.....	141
Abbildung 111: Absolute Scheitelminderung durch Stauraummanagement bei stochastischen Szenarien (Variante A, gerade Ziffer) im Vergleich mit Ergebnissen aus Erstabschätzung des Potentials am Pegel Passau-Ingling	142
Abbildung 112: Zurückgehaltenes Volumen bei Stauraummanagement im Bereich des Scheitels durch Aufstauvorgang (Variante A, Basis: Ganglinien Pegel Passau-Ingling).....	143
Abbildung 113: Wasserstands Differenz durch Stauraummanagement am Pegel Schärding (Variante A).....	144
Abbildung 114: Wasserstands Differenz durch Stauraummanagement am Pegel Passau-Ingling (Variante A).....	144
Abbildung 115: Wasserstands Differenz durch Stauraummanagement am Pegel Passau (Variante A).....	145
Abbildung 116: Absolute Scheitelminderung (Pegel Passau-Ingling) durch Stauraummanagement bei abgelaufenen Hochwassern und ausgewählten stochastischen Szenarien bei unterschiedlichen Abstautiefen am unteren Inn (Varianten A und B).....	146
Abbildung 117: Lage des Flutpolders Feldkirchen im Fließgewässersystem	149
Abbildung 118: Lagekarte zu übergebenen Pegel Daten von Pegeln oberstrom des KW Oberaudorf, Quelle: VERBUND AG.....	151
Abbildung 119: Messdaten ausgewählter Pegel von Pegel Rotholz bis KW Rosenheim - HW 2002.....	152
Abbildung 120: Messdaten ausgewählter Pegel von Pegel Rotholz bis KW Rosenheim - HW 2005.....	153
Abbildung 121: Messdaten ausgewählter Pegel von Pegel Rotholz bis KW Rosenheim - HW 2013.....	153

Abbildung 122: Vorhersage am KW Passau-Ingling und Auswertung für Polderfüllung Feldkirchen.....	156
Abbildung 123: Polderbetrachtung Feldkirchen mit überregionalem Fokus - Pegel Passau- Ingling bei unterschiedlichen Polderzuflüssen	158
Abbildung 124: Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen - Fester Bezug auf Schwellenwert (Beispiel)	161
Abbildung 125: Simulationsergebnis KW Feldkirchen - Fester Bezug auf Schwellenwert ...	163
Abbildung 126: Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen – Volumenbezogen und adaptiv (Var. A, Beispiel I)	165
Abbildung 127: Simulationsergebnis KW Feldkirchen - Volumenbezogen und adaptiv (Variante A)	167
Abbildung 128: Simulationsergebnis KW Feldkirchen - Volumenbezogen und adaptiv ohne Verringerung (Variante B).....	168

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Gleichgewichtssohlen	6
Tabelle 2: Genutzte Pegeldaten	8
Tabelle 3: Zuflusspegel und Umrechnungsfaktoren	15
Tabelle 4: Definition der Abflüsse der unbepegelten Teil-EZG HW 2005	22
Tabelle 5: Definition der Abflüsse der unbepegelten Teil-EZG HW 2013	23
Tabelle 6: Auswertung der mittlere Sohlen - Vorliegende Daten	57
Tabelle 7: Ausgewählte hohe und tiefe Sohlen und Höhendifferenzen zum Gleichgewichtszustand	62
Tabelle 8: Zeitlicher Überblick vorliegender Peilungen, Definition als Gleichgewichtssohle, hohe und tiefe Sohle	63
Tabelle 9: Auswirkung der Sohlvariation auf die Abflussganglinien (Auswertung des Scheitelabflusses) – Abgelaufene Hochwasserereignisse	68
Tabelle 10: Ausgewählte synthetische Szenarien und Jährlichkeiten	69
Tabelle 11: Auswirkung der Sohlvariation auf die Abflussganglinien (Auswertung des Scheitelabflusses) – Stochastische Szenarien	70
Tabelle 12: Erweiterung der Betrachtung des Stauraummanagements - Übersicht der Anlagen	78
Tabelle 13: $Q_{zu,Polder,max}$ in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz – Polder Feldkirchen	90
Tabelle 14: Simulationsergebnisse am Pegel Wasserburg bei alleinigem Polderbetrieb Feldkirchen und unterschiedlichen Q_{const} – Abgelaufene Hochwasser	99
Tabelle 15: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei alleinigem Polderbetrieb Feldkirchen und unterschiedlichen Q_{const} – Abgelaufene Hochwasser	99
Tabelle 16: Absolute und prozentuale Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Abgelaufene HW	102
Tabelle 17: Ausgewählte stochastische Szenarien und Jährlichkeiten	103
Tabelle 18: Absolute und prozentuale Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling – Polder Feldkirchen, Verschiedene Betriebsweisen – Stochastische Szenarien	106

Tabelle 19: Absolute Scheitelminderung am Pegel Wasserburg bei Berücksichtigung der Mangfall und Zeitverschiebung zur Füllvorschrift am Polder Feldkirchen.....	110
Tabelle 20: Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau-Ingling bei Berücksichtigung der Mangfall und Zeitverschiebung zur Füllvorschrift am Polder Feldkirchen.....	110
Tabelle 21: $Q_{zu,Polder,max}$ in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz – Polder Ering	114
Tabelle 22: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei alleinigem Polderbetrieb Ering sowie mit Stauraummanagement – Abgelaufene Hochwasser	117
Tabelle 23: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei kombiniertem Polderbetrieb Feldkirchen und Ering sowie mit Stauraummanagement – Abgelaufene Hochwasser	119
Tabelle 24: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei Polderbetrieb Ering sowie mit Stauraummanagement – Stochastische Szenarien.....	121
Tabelle 25: Simulationsergebnisse am Pegel Passau-Ingling bei kombiniertem Flutpolderbetrieb Feldkirchen und Ering sowie mit Stauraummanagement – Stochastische Szenarien	122
Tabelle 26: Absenkgeschwindigkeit gemäß WBO und Freigabe des gesamten Abflussquerschnittes	125
Tabelle 27: Stauziel und Ab- und Aufstau an den berücksichtigten Anlagen in Varianten A und B.....	131
Tabelle 28: Parameter des Ab- und Aufstauprozesses (Variante A)	134
Tabelle 29: Wasserstände an Referenzpegeln	135
Tabelle 30: Parameter des Ab- und Aufstauprozesses (Variante B)	145
Tabelle 31: Auswertung Vorhersage HW 2013 KW Passau-Ingling	156
Tabelle 32: Simulationsergebnisse Polderbetrachtung Feldkirchen mit überregionalem Fokus am Pegel Passau-Ingling.....	157
Tabelle 33: Auswertung Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen - Fester Bezug auf Schwellenwert	162
Tabelle 34: Auswertung Vorhersage HW 2013 KW Feldkirchen – Volumenbezogen und adaptiv (Variante A).....	166
Tabelle 35: Simulationsergebnisse Polderbetrachtung Feldkirchen - Pegel Passau-Ingling	169