

Operationelles Staustufenmanagement als Beitrag zum Hochwasserrückhalt



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald, Dr.-Ing. Sarah Dickel

Vorstellung Innstudie Dezember 2023, Februar 2024

Hochwasserproblematik

- Systematische Flussregulierung führte zu intensivierter Nutzung von Auefläche und Anhäufung hoher ökonomischer Werte
- Hochwasserereignisse stellen Gefährdung insbesondere bei dichter Besiedlung in Fließgewässernähe dar
 - Hochwasserkatastrophen mit großen Ausmaßen als Folge



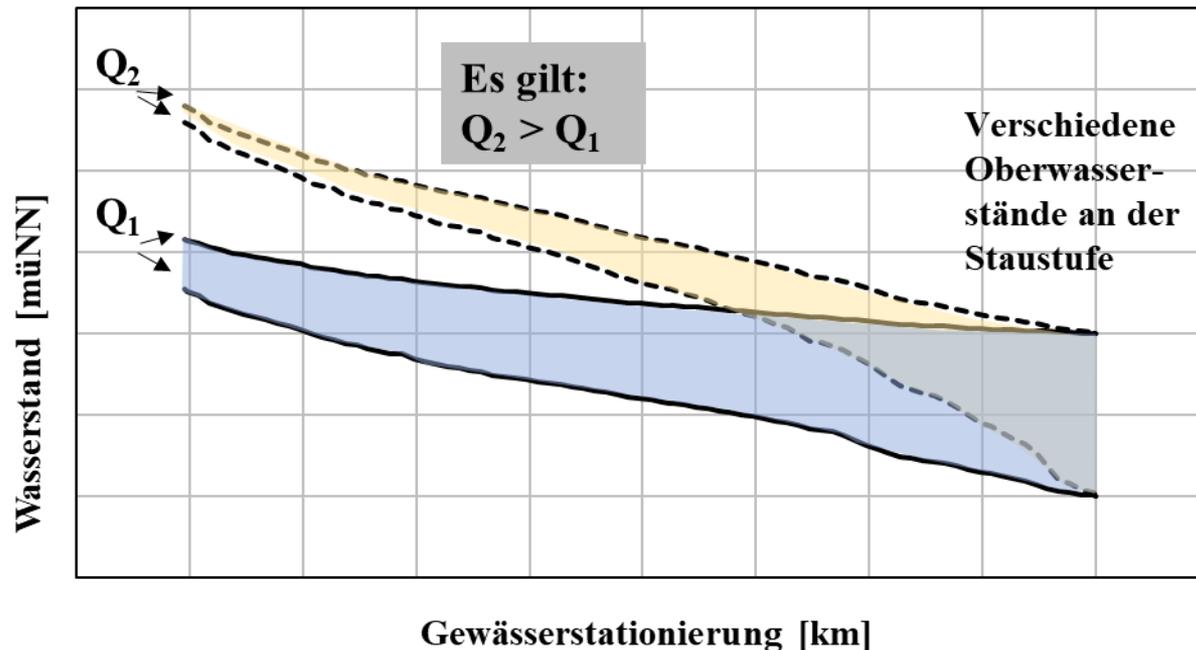
Ausgangslage und Problemstellung

- Große Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte rücken potentielle Schutzmaßnahmen in das Blickfeld von Forschung und Öffentlichkeit
- Überwiegender Anteil großer Fließgewässer in Deutschland mit Staustufen zu Staustufenketten ausgebaut
- Führt zur zentralen Fragestellung, ob durch eine angepasste Betriebsweise der Staustufen einer Staustufenkette eine Scheitelreduktion bei Hochwasser erzielt werden kann
- Wirksamkeit und Anwendbarkeit des Staustufenmanagements wurde im Kontext möglicher Hochwasserschutzmaßnahmen stetig diskutiert und in Frage gestellt
- Innstudie: erstmalig detaillierte Untersuchung für eine Staustufenkette (bisherige Studien: keine praktische Einsatzfähigkeit, keine konkreten Steuerungsregeln)
- Notwendig: Anwendung eines komplexen Modellsystems zur Abbildung der Wechselwirkung zwischen Betrieb der Staustufen und Strömungsverhalten des Fließgewässers und Berücksichtigung operationell verfügbarer Daten



Betrieb von Staustufen im Hochwasserfall

- Sicheres Abführen des Hochwassers hat Priorität, Verstärkung nicht zulässig
- Wasserstände im Stauraum von Abfluss und Oberwasserstand abhängig
- Unterschiedliche Anforderungen/Vorgaben:
 - Konstanthaltung des Oberwasserstandes (um ggf. bewusst Flutungen in entspr. Gebiete durchzuführen zu können)
 - Freigabe des gesamten Abflussquerschnitts (Staulegung)
 - Absenkung des Oberwasserstandes zur Verringerung des Wasserstandes im Stauraum

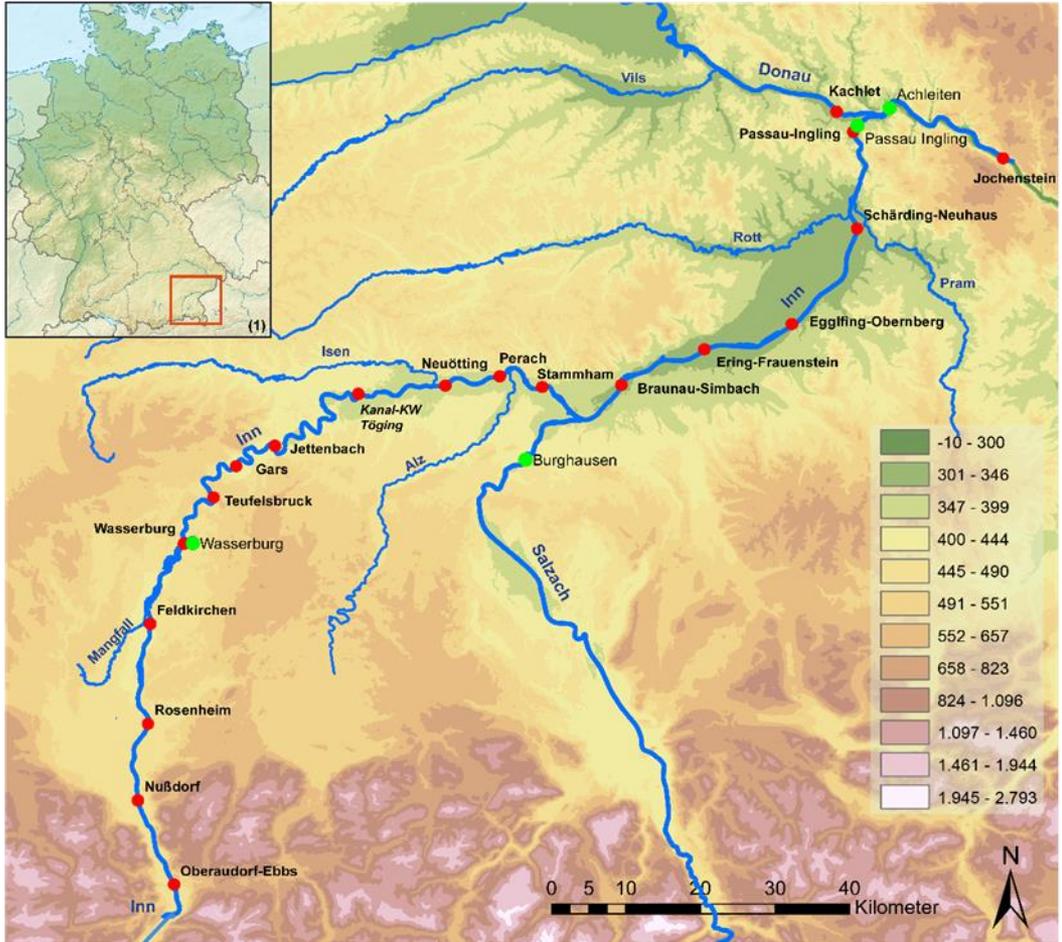


Methodische Vorgehensweise

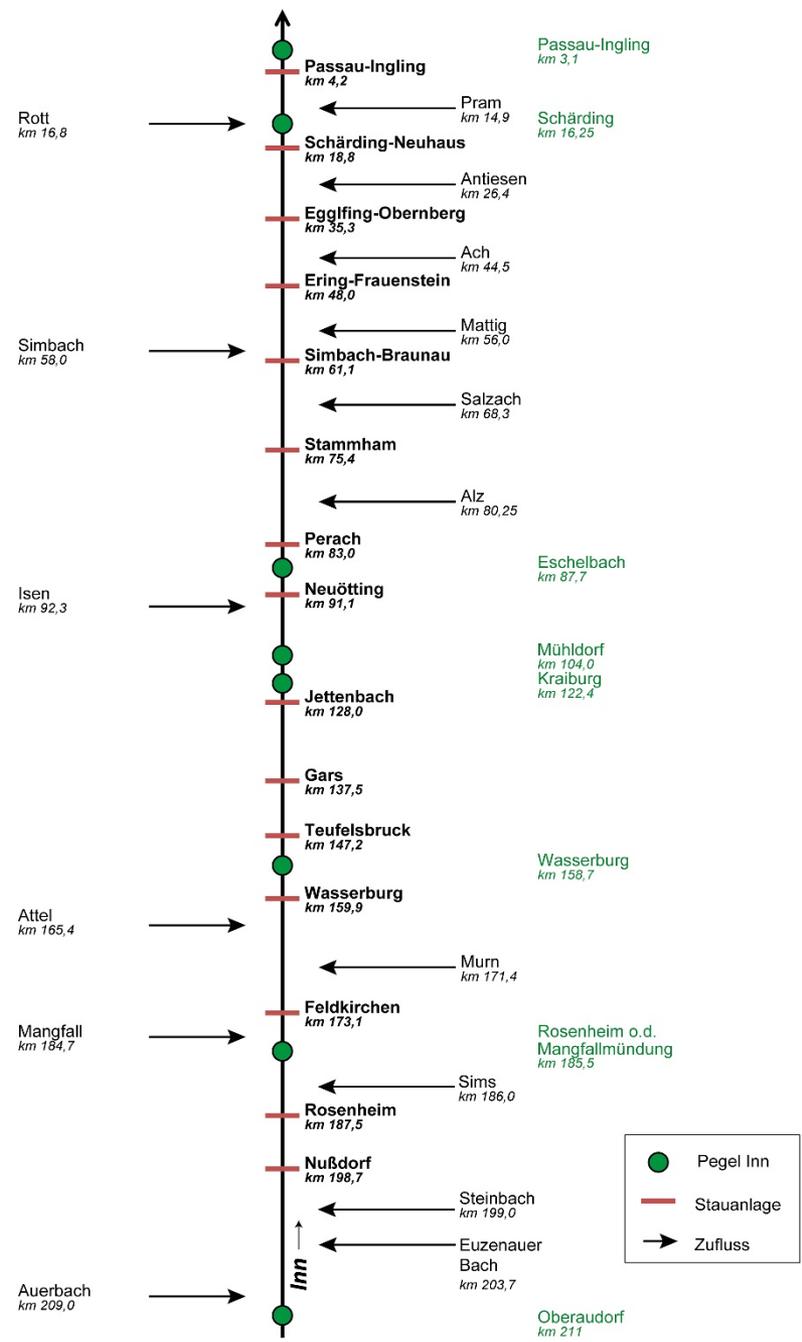
- Abbildung des Fließgewässersystems mittels 1D-HN-Modellierung (Eigenentwicklung in C++, vermaschte und verzweigte Flusssysteme, Sonderbauwerke implementierbar)
- Kopplung des Simulationsmodells mit regelungstechnischen Elementen zur Abbildung des Staustufenbetriebes
 - Abbildung des komplexen Wechselspiels von Steuerungsvorgaben an den Staustufen und Einfluss auf Wasserstand und Abfluss im Stauraum
- Modellierungswerkzeug in Vielzahl von Projekten erfolgreich eingesetzt
- Durchführung von umfangreichen Simulationen zur Sensitivitätsanalyse des Gesamtsystems → Laufzeiten, Retentionsverhalten und Abhängigkeiten
- Analyse und Einbindung von Vorhersagen und Messwerten zur Nutzung von operationell verfügbaren Daten
 - Entwicklung einer praxisrelevanten Steuerungsstrategie für das Staustufenmanagement zum Hochwasserrückhalt



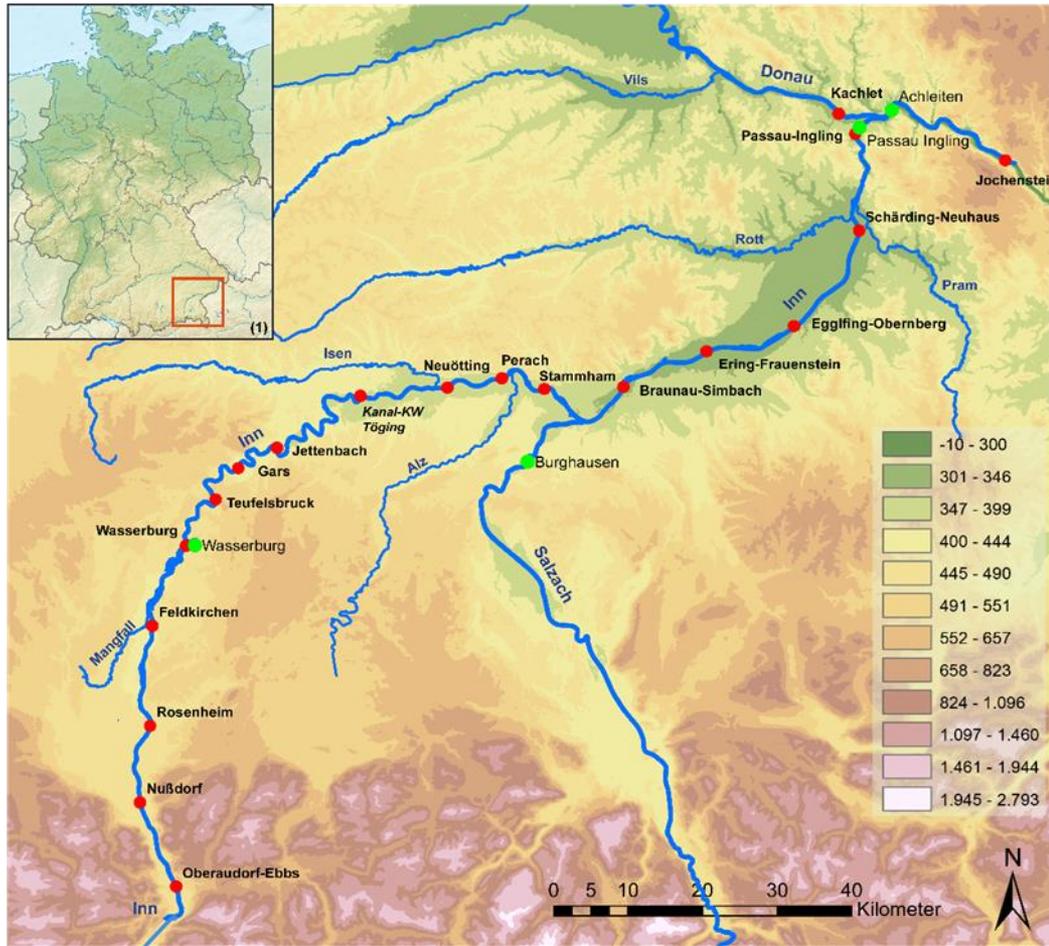
Untersuchungsgebiet



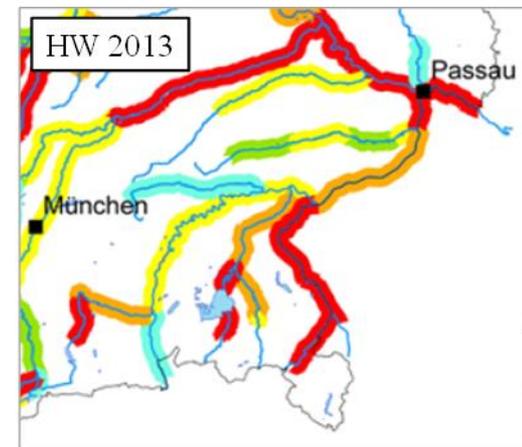
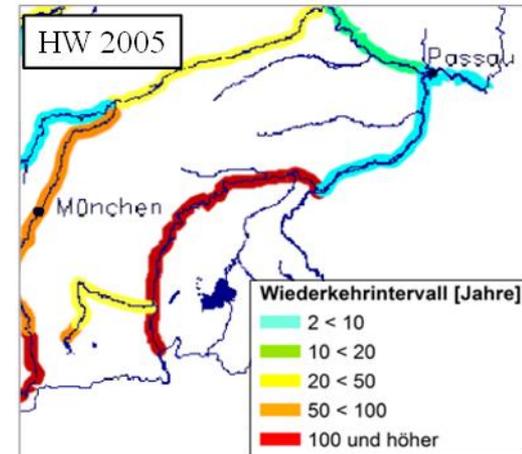
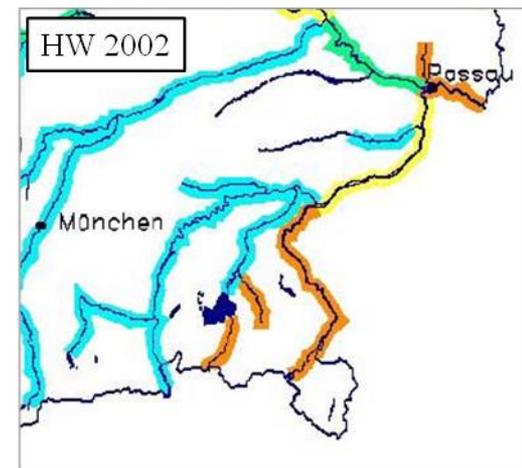
- 211 km Fließstrecke des bayerischen Inns
- 15 Staustufen von Pegel Oberaudorf bis inkl. KW Passau-Ingling, zuzüglich Stauhaltung Jochenstein an der Donau



Untersuchungsgebiet



- 211 km Fließstrecke des bayerischen Inns
- 15 Staustufen von Pegel Oberaudorf bis inkl. KW Passau-Ingling, zuzüglich Stauhaltung Jochenstein an der Donau



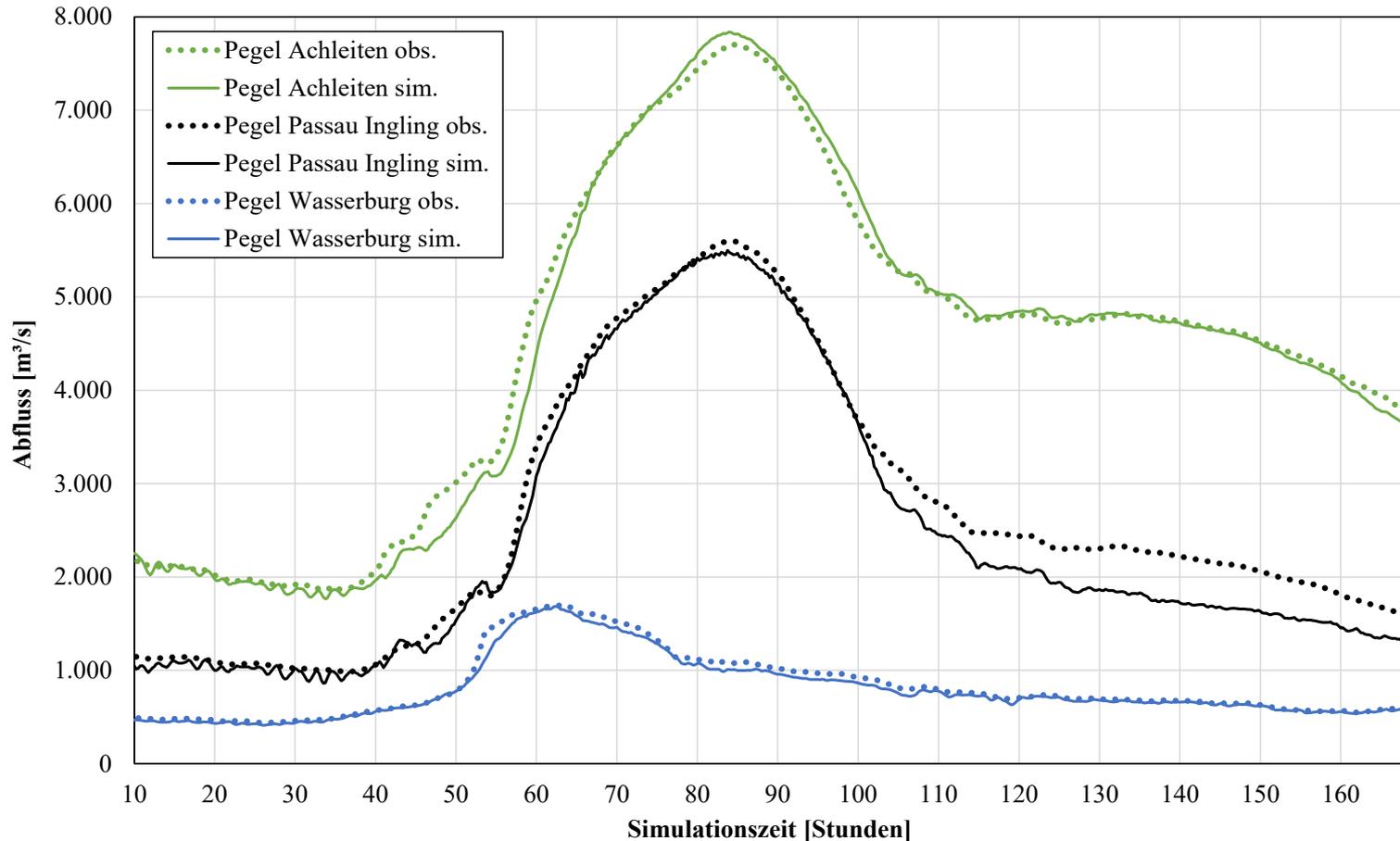
Links: Kartenhintergrund: DEM over Europe from the GMES RDA project (EU-DEM, resolution 1 arcsec) - version 1, Oct. 2013; Quelle Karte (1): TUBS (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Relief_Map_of_Germany.svg), „Relief Map of Germany“, Ergänzung, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode> - Rechts: Ausschnitte zusammengestellt und ergänzt aus: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002); Hochwasser im August 2002; Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007); Gewässerkundlicher Bericht Hochwasser August 2005; Augsburg; Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014); Junihochwasser 2013; Wasserwirtschaftlicher Bericht; Augsburg.



Kalibrierung und Validierung des Modells

Kalibrierung HW 2013 und HW 2005; Validierung des Modells anhand des HW 2002 (HQ₅ am oberen Inn und HQ₂₀ bis HQ₅₀ am unteren Inn)

Pegel Wasserburg, Passau Ingling und Achleiten - HW 2002

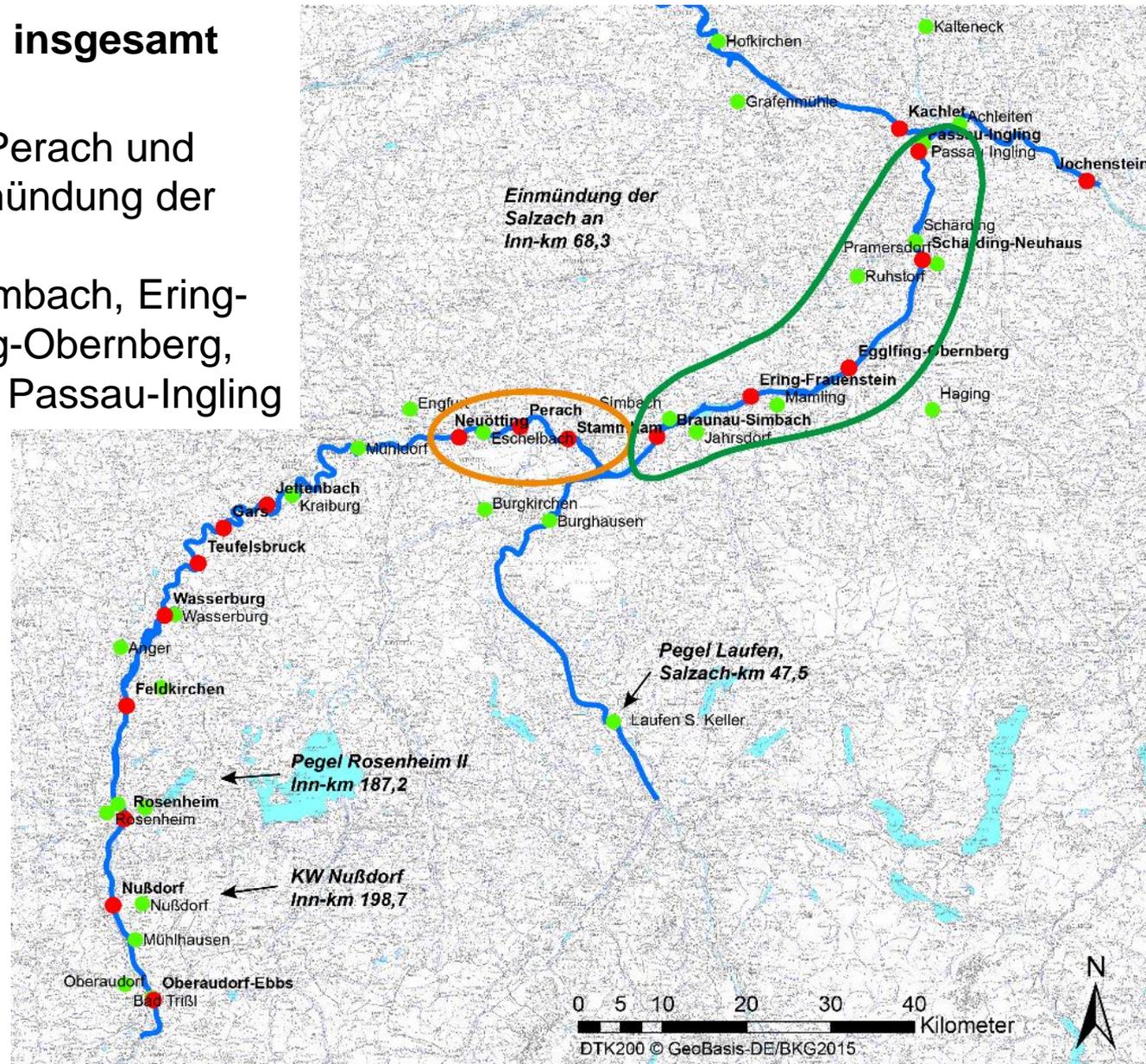


Steuerung Staustufenmanagement – Übersicht

Berücksichtigung von insgesamt acht Staustufen

- Anlagen Neuötting, Perach und Stammham vor Einmündung der Salzach
- Anlagen Braunau-Simbach, Erling-Frauenstein, Eggfing-Obernberg, Schärding-Neuhaus, Passau-Ingling

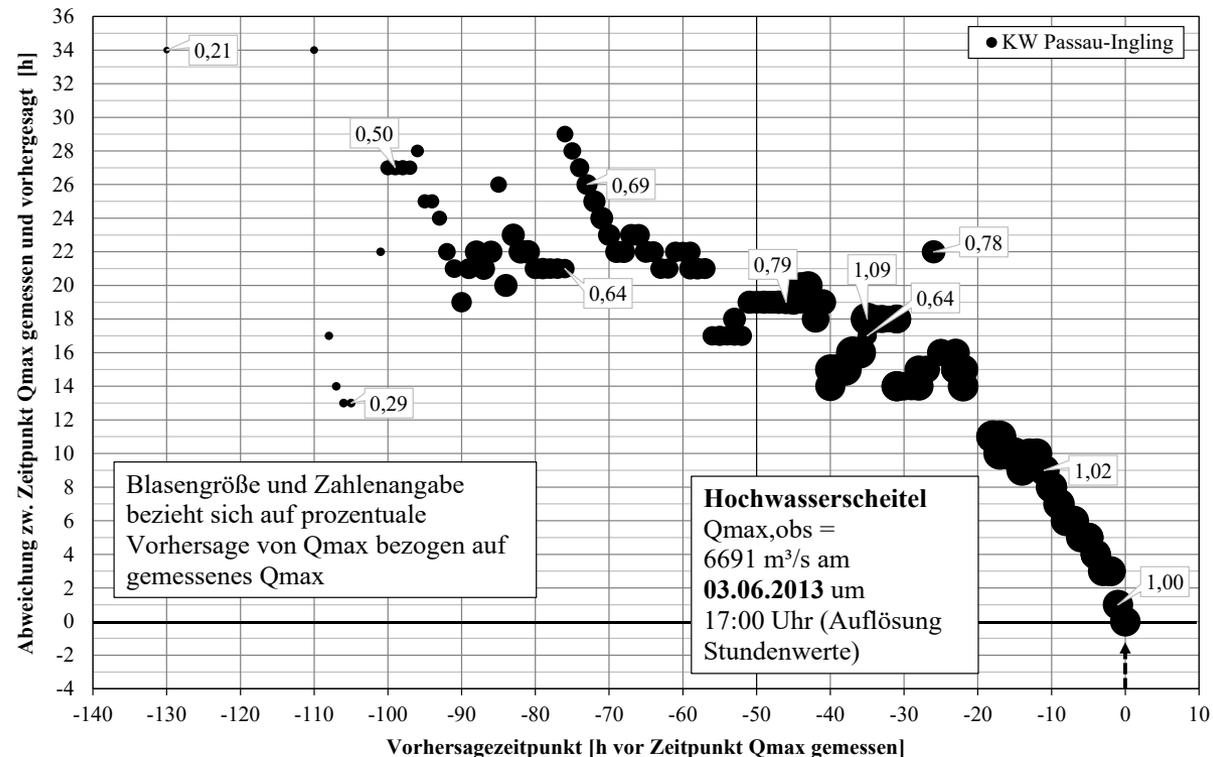
Entwicklung und Evaluierung der Steuerungsvorgaben anhand der Simulation von drei abgelaufenen Hochwassern (2002, 2005 und 2013) und 12 stochastischen Ereignissen (HW-Szenarien)



Steuerung Staustufenmanagement – Datennutzung

Berücksichtigung verschiedener operationell verfügbarer Daten möglich

- Messwerte
 - Insbesondere Wasserstandsmesswerte lassen sich auch bei höheren Abflüssen vergleichsweise genau messen
 - Laufzeiten zur Einsetzbarkeit sind zu prüfen
- Abflussvorhersagen
 - Lange Zeitdauer bis zum Eintritt des Ereignisses
 - Unsicherheiten der Vorhersage müssen berücksichtigt werden
 - Genau genug für Vorhersage eines Hochwassers, zu ungenau für korrekte Vorhersage des Scheitels



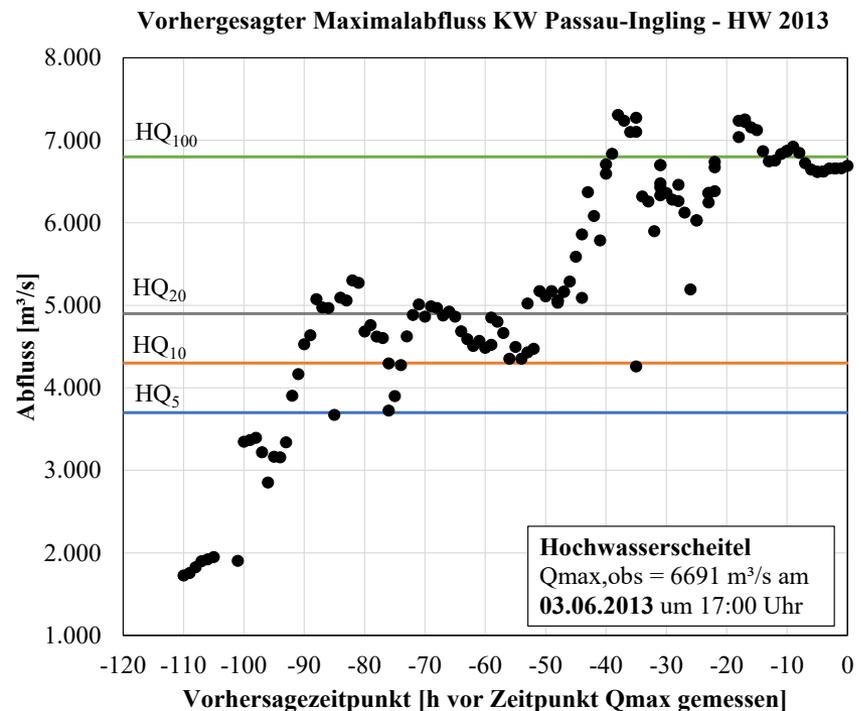
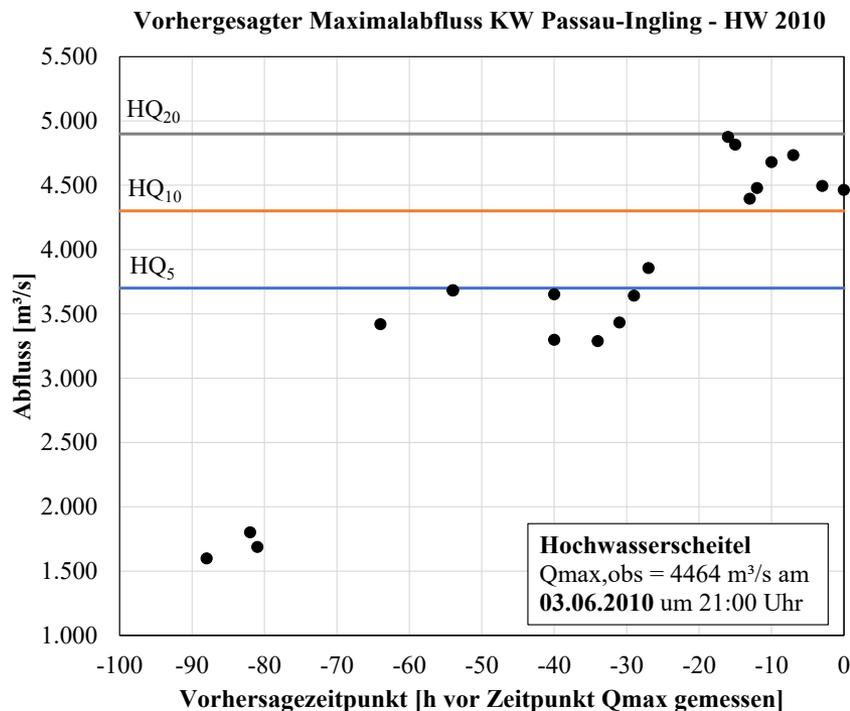
Steuerung Staustufenmanagement – Abstauprozess

- **Für Abstauprozess** des Staustufenmanagements ist
 - **entscheidend, dass ein Hochwasser stattfinden wird** (Überschreiten eines definierten Schwellenwertes)
 - **nicht entscheidend ist der Eintrittszeitpunkt** oder das **exakte Q_{\max}**
- Abstauregel berücksichtigt sowohl Vorhersage als auch gemessene Abflüsse im System
 - Wenn Vorhersage am Pegel Passau-Ingling einen Schwellenwert überschreitet (hier angenommen: $Q > 3700 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie Abfluss-Messwerte am KW Nußdorf und/oder Pegel Laufen über definiertem Wert (hier angenommen: $Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$) liegen, wird abgestaut
- Abstaugradient beträgt 10 cm/h (außer Passau-Ingling) entsprechend Betriebsvorgaben, sodass keine Gefährdung auftritt
- Maximaler Abstau an den drei Anlagen des oberen Inns beträgt $1,5 \text{ m}$, am unteren Inn zwischen 2 und $4,5 \text{ m}$, sodass zusätzlich zur WBO um weitere $1,5$ bis $2,5 \text{ m}$ abgestaut wird



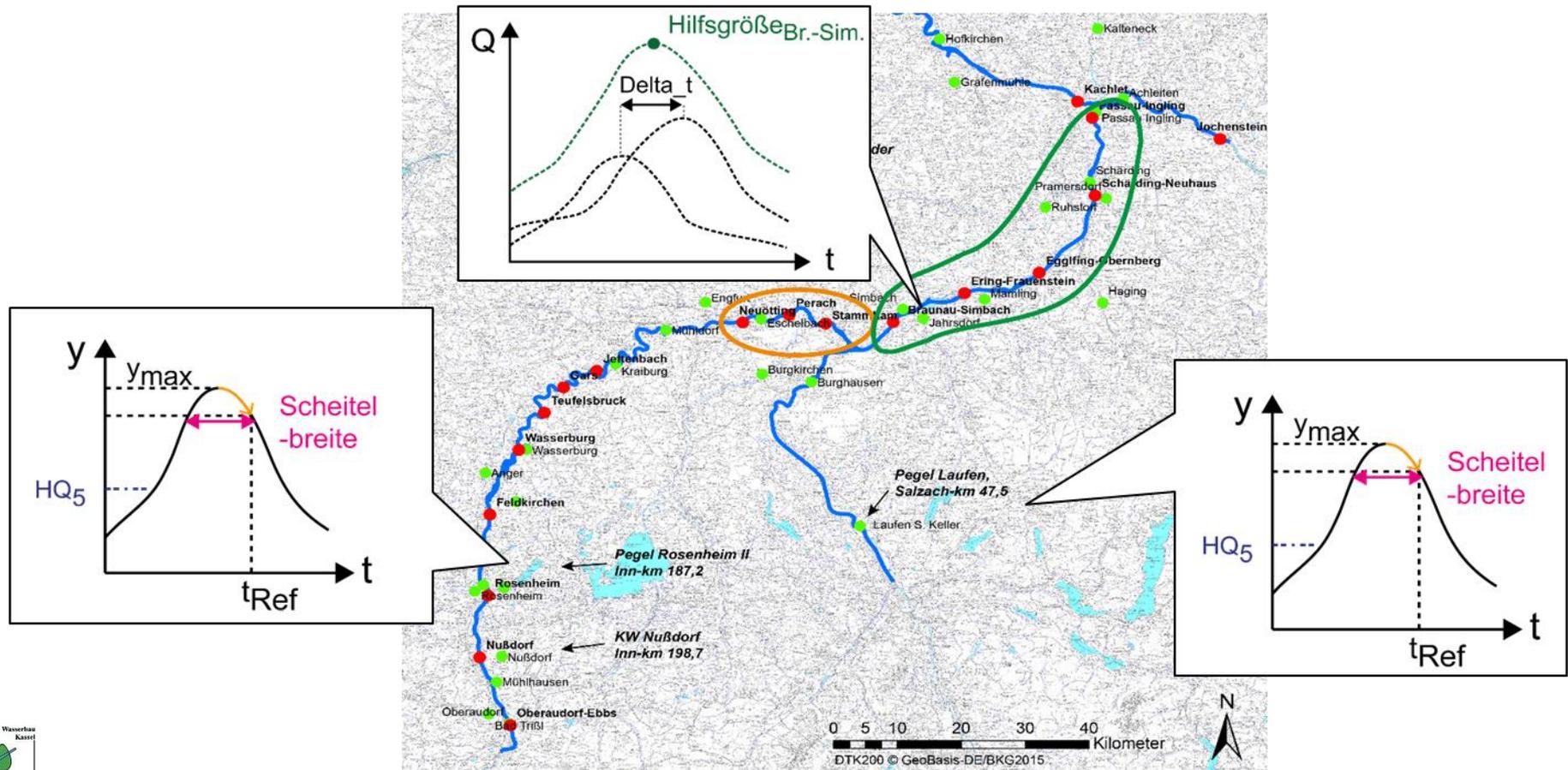
Steuerung Staustufenmanagement – Abstauprozess

- Auswertung von Vorhersagedaten des HW 2010 und HW 2013 am KW Passau-Ingling zeigt, dass
 - mit dem Abstauprozess früh genug begonnen werden kann
 - ein niedriger Schwellenwert von HQ_5 zu wählen ist, da es bereits bei kleineren Hochwassern zu Überschwemmungen kommt und damit ein frühzeitiger Beginn des Abstaus vorzuziehen ist



Steuerung Staustufenmanagement – Aufstauprozess

- Mögliche Reduzierung maßgeblich von zeitsensitivem Aufstauprozess (Aufstaugradient, Zeitpunkt des Aufstaus) abhängig
- Stützung der Vorgaben auf Wasserstandsmessungen an Referenzpegeln
- Entwicklung verschiedener Varianten des Aufstaus, unterschiedlich in Komplexität (Anzahl berücksichtigter Parameter) → Vorzugsvariante III

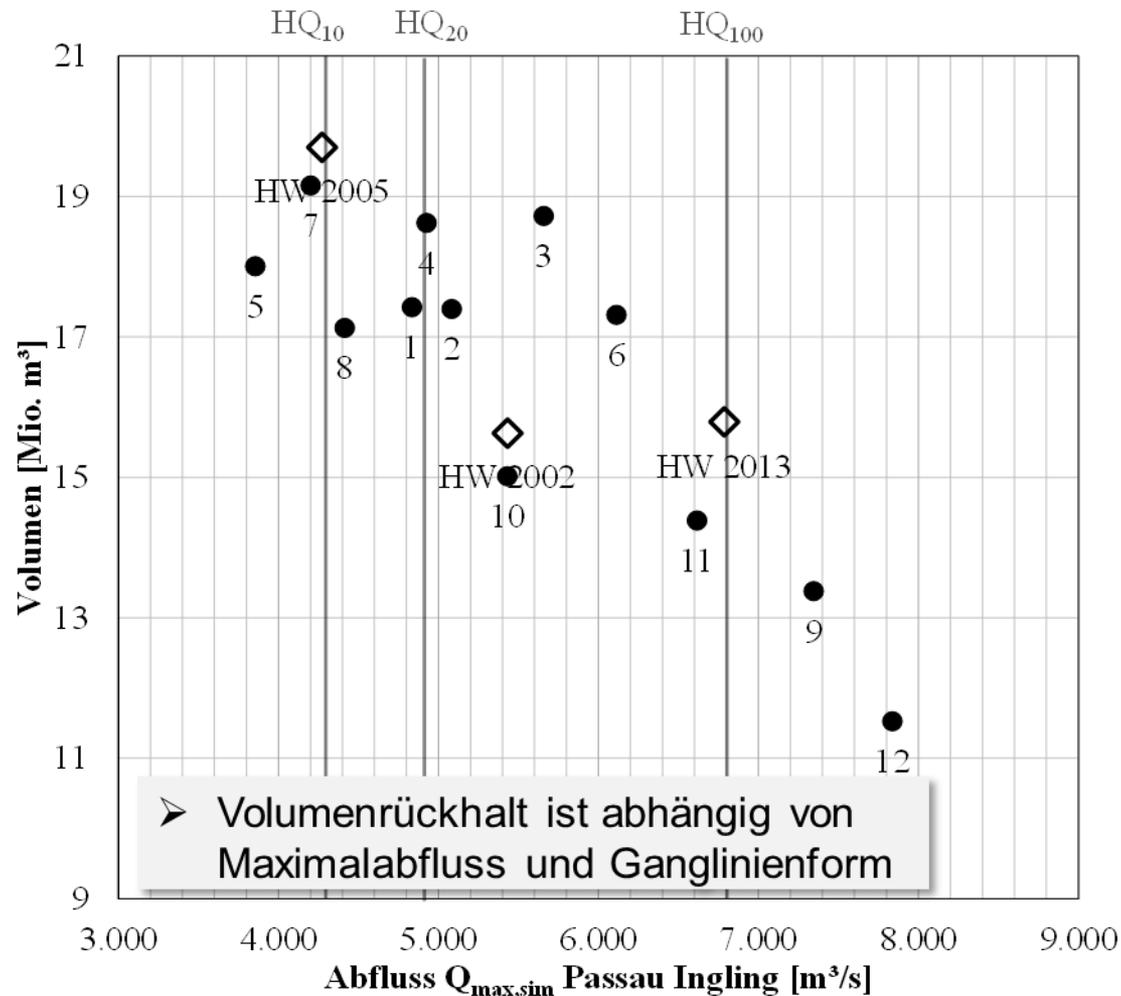


Steuerung Staustufenmanagement – Aufstauprozess

- Berücksichtigung von Referenzpegeln entsprechend überschrittenem Wasserstand und Rückgang des Wasserstandes an Referenzpegeln
 - Fall 1:** $WST_{RO,II}$ UND WST_{Laufen} größer als HQ_5 → Überlagerungseffekte
 - Fall 2:** $WST_{RO,II}$ ODER WST_{Laufen} größer als HQ_5
- Generelle Kriterien, unterschiedliche Berücksichtigung je nach Fall (1 oder 2)
 - Festlegung ob inn- oder salzachabhängiger Zeitbezug anhand des größeren prognostizierten Abflusses im mündungsnahen Bereich
 - Festlegung des Aufstaugradienten 15, 20 oder 25 cm/h anhand verschiedener Faktoren
 - Festlegung der Zeitverschiebung basierend auf verschiedenen Faktoren
 - Aufstau bis auf bescheidgemäßes Stauziel, kein Überstau
- Komplexe Abhängigkeiten von verschiedenen Parametern (Maximalwasserstände, Ganglinienform, Überlagerung) für die Festlegung von Aufstaugradient und Zeitverschiebungen, rein messwertbasierter Vorgang

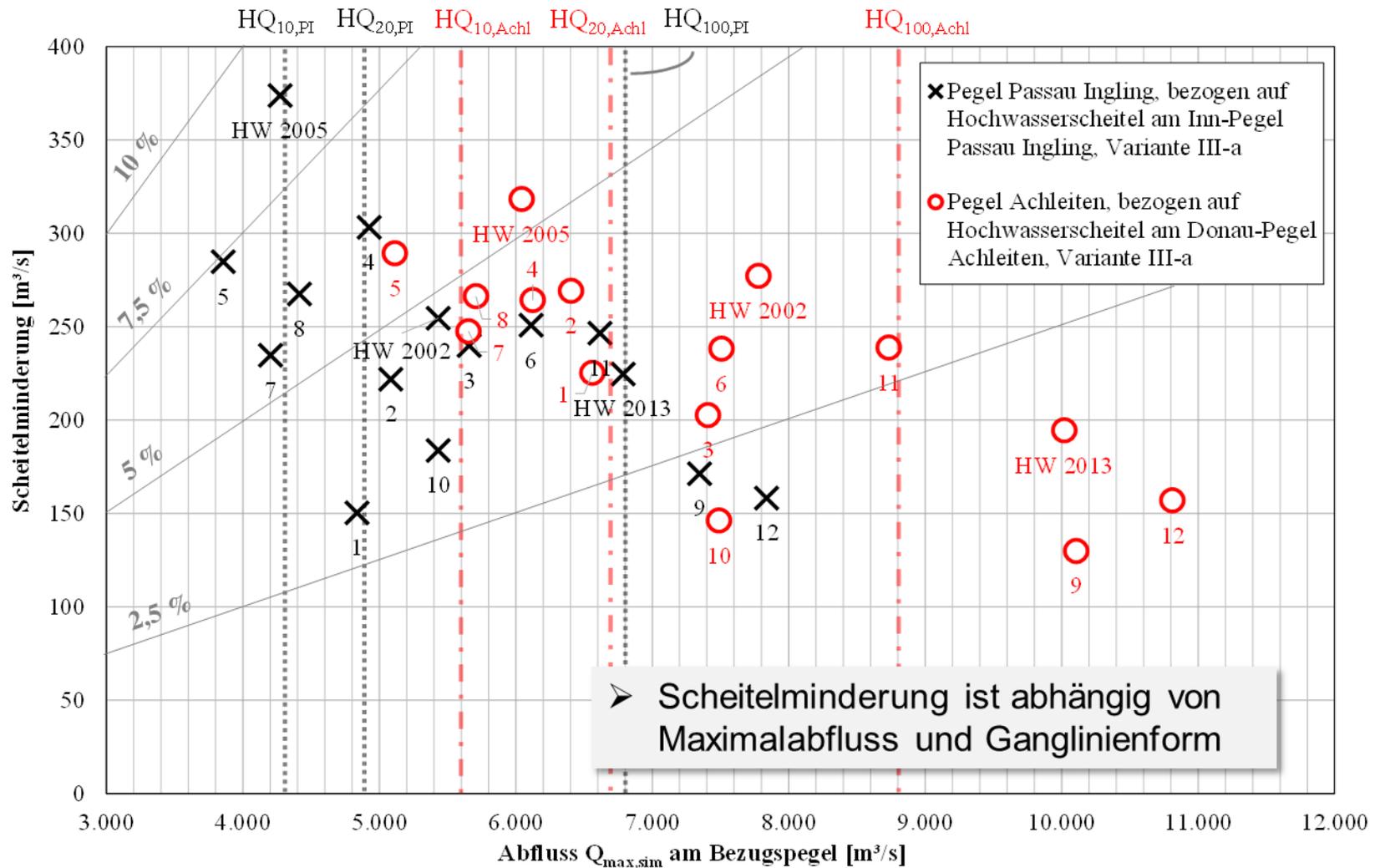
Steuerung Staustufenmanagement – Variante III

Zurückgehaltenes Volumen im Scheitelbereich, Bezug auf die Ganglinien am Pegel Passau Ingling



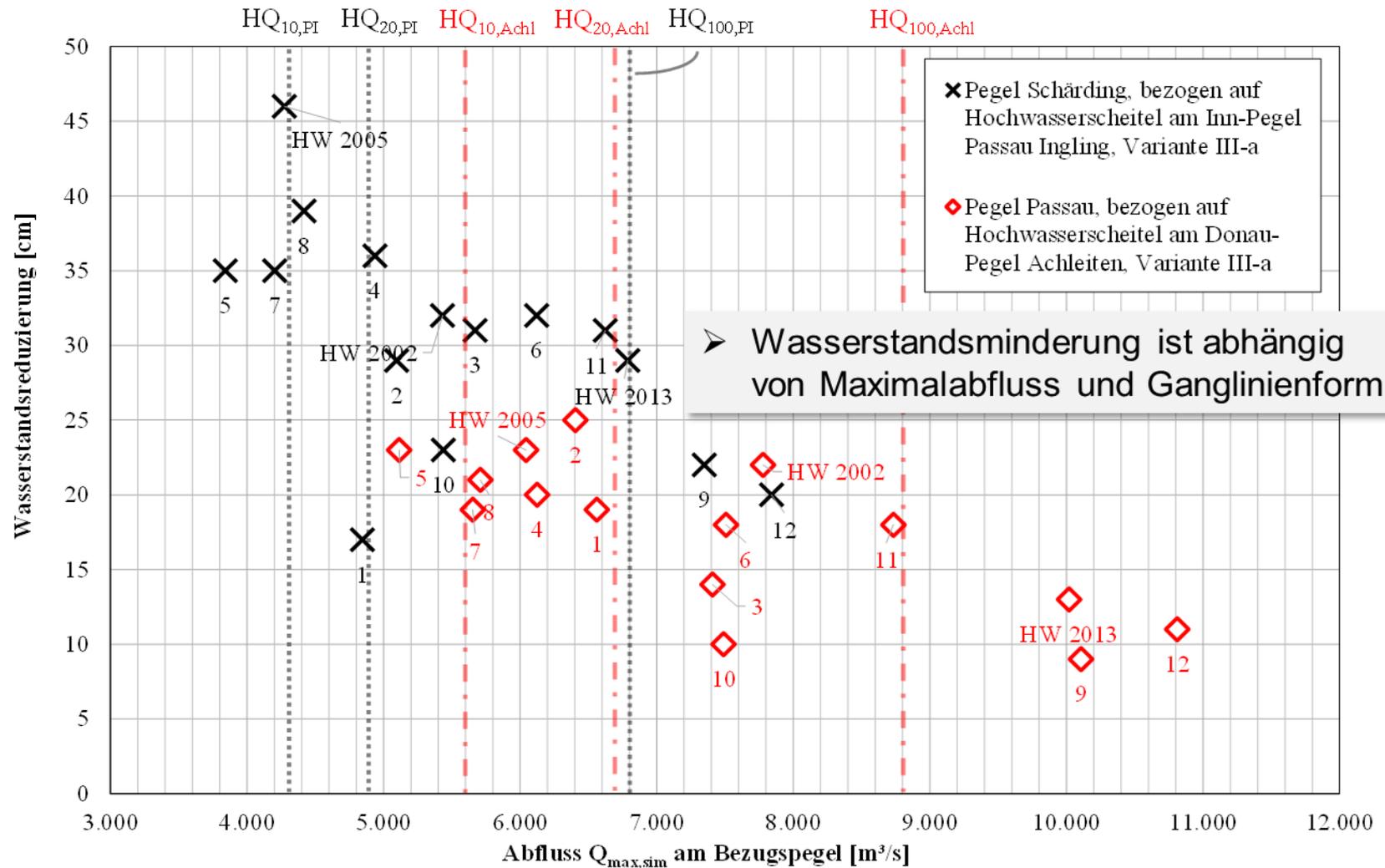
Steuerung Staustufenmanagement – Variante III

Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau Ingling (Inn-km 3,1) und Pegel Achleiten (Donau-km 2223,05) unterstrom der Einmündung



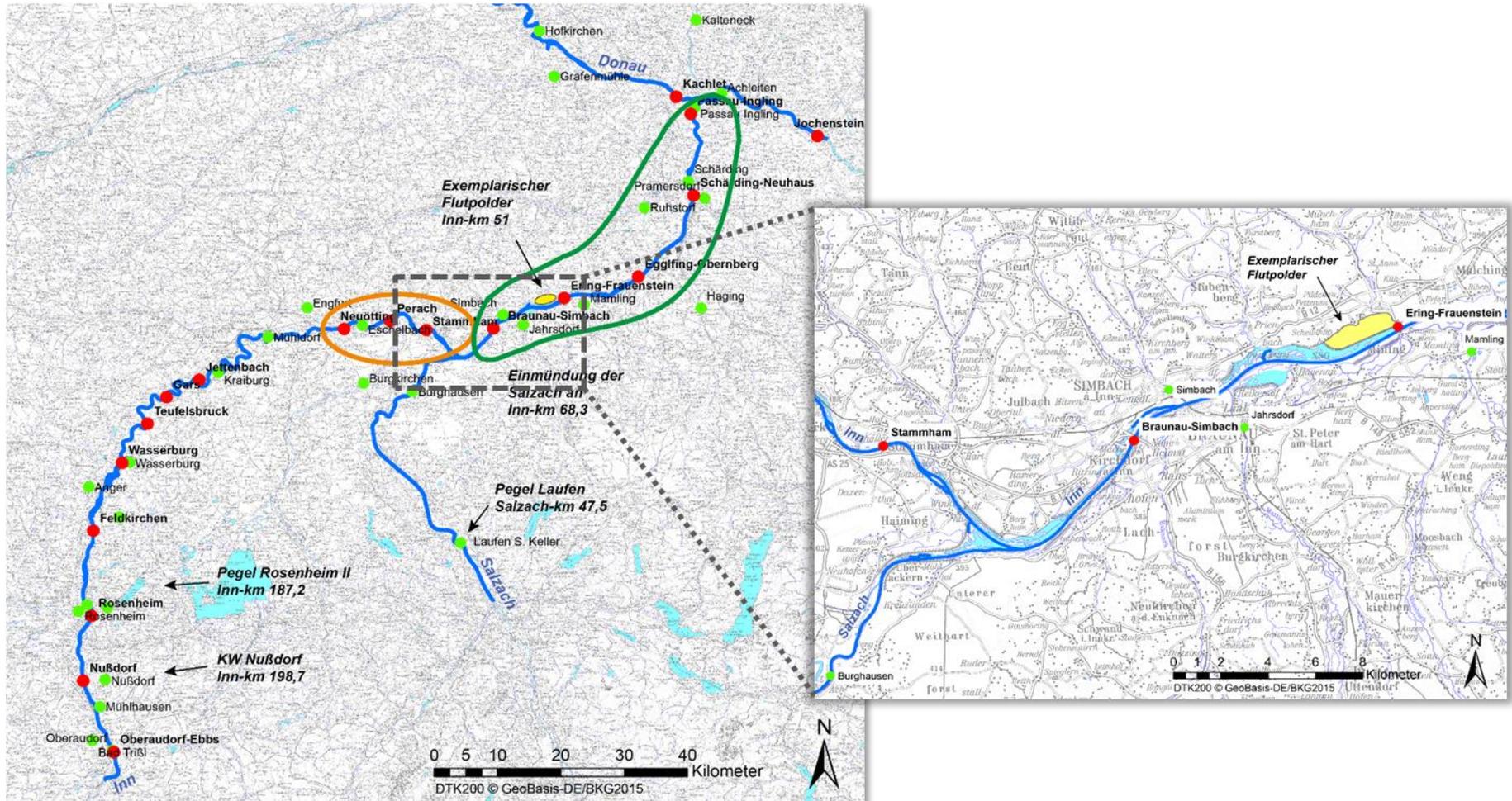
Steuerung Staustufenmanagement – Variante III

Wasserstandsreduzierung am Pegel Schärding (Inn-km 16,25) und Pegel Passau (Donau-km 2226,70) oberstrom der Einmündung des Inns



Kombinierter Betrieb von Staustufenmanagement und Flutpolder

Exemplarischer Flutpolder im direkten Einsatzbereich des Staustufenmanagements mit einem Gesamtvolumen von 13,4 Mio. m³

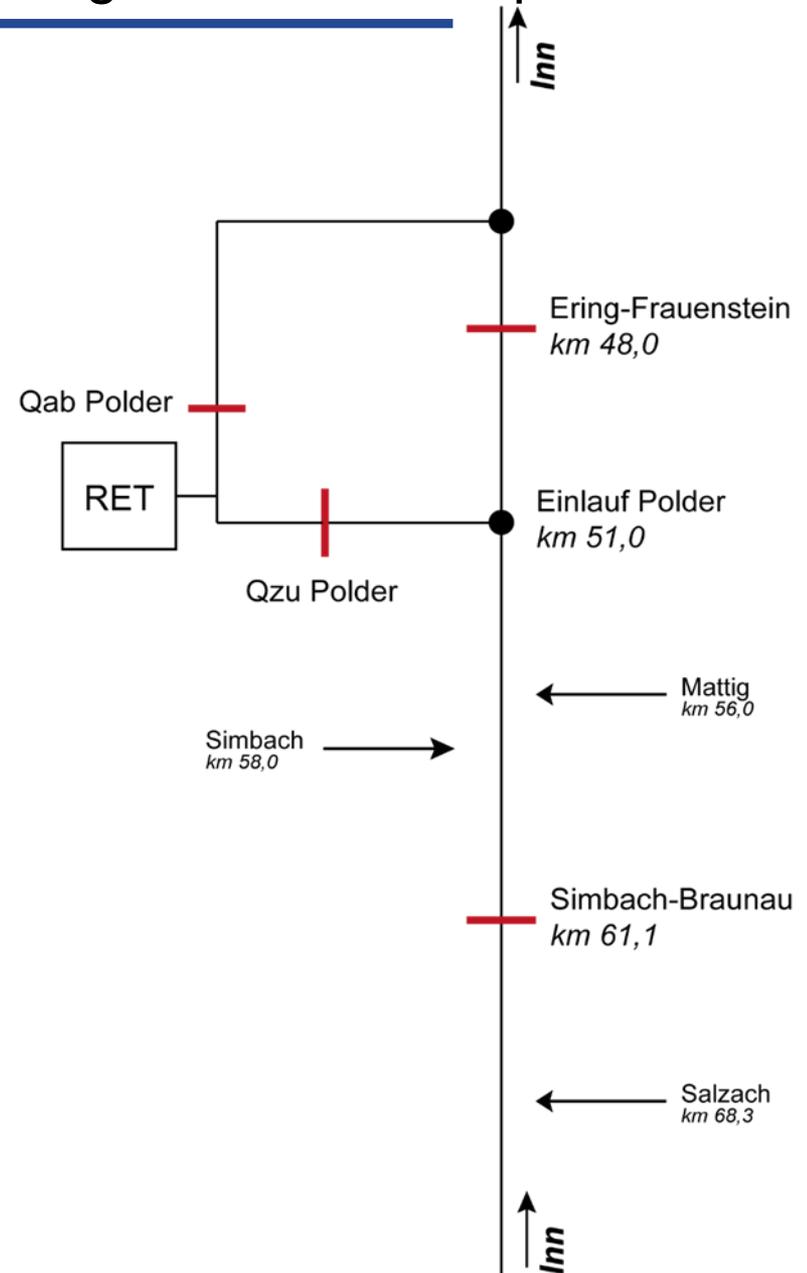


Kombinierter Betrieb von Staustufenmanagement und Flutpolder

Definition von Nebenbedingungen

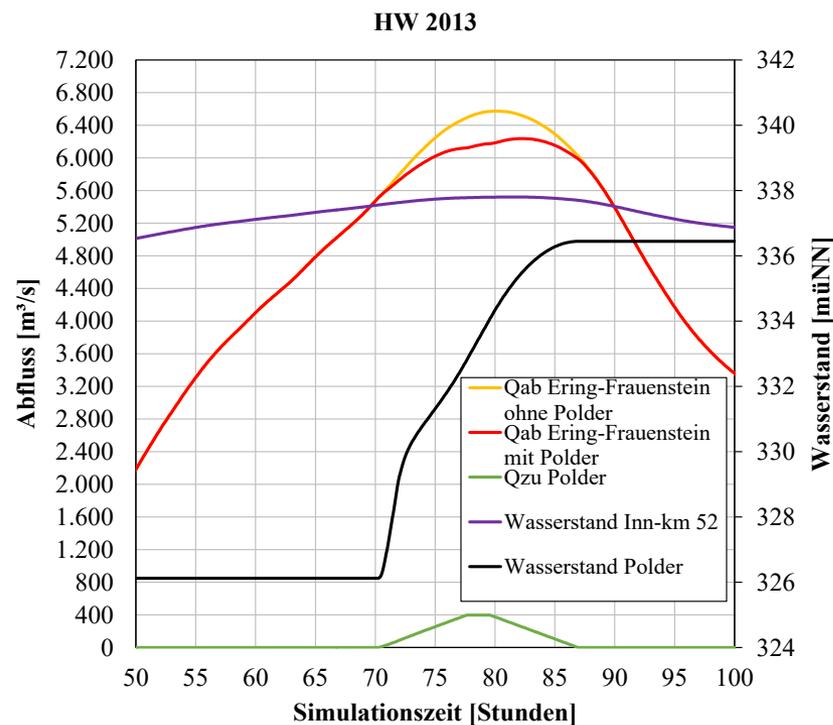
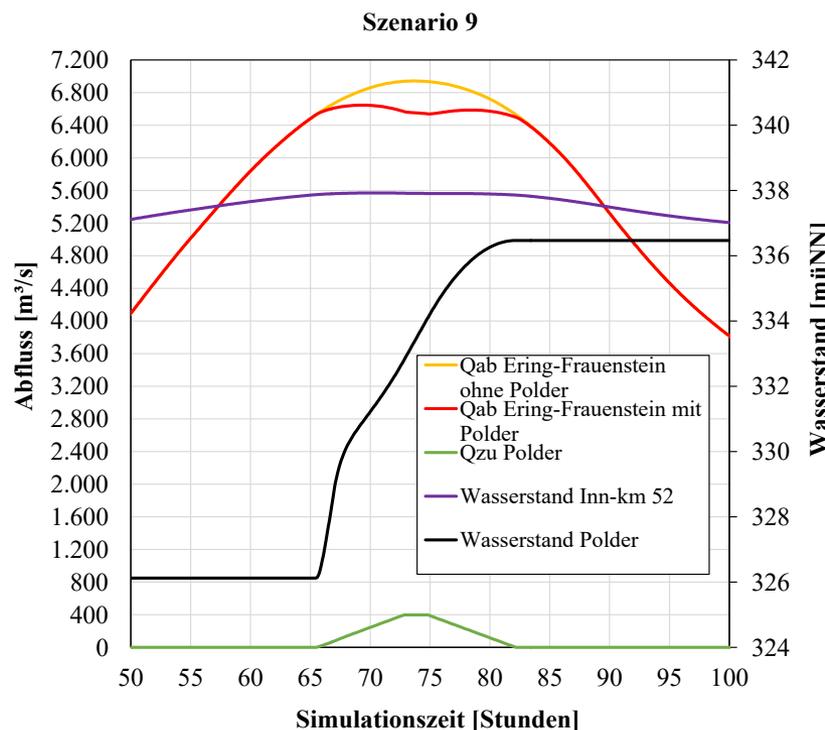
(Restriktionen) zur realistischeren Abbildung der Betriebsweise in der Simulation

- Begrenzung der maximalen Zuflussmenge
- Mögliche Änderung des Zuflusses abhängig vom Wasserstand im Polder zur Verhinderung von Erosion
- Graduelle Verringerung des maximalen Zuflusses bei Erreichen des maximalen Wasserstandes
- Prüfung, ob eine Füllung des Polders hydraulisch möglich ist aufgrund des Wasserspiegelgefälles zwischen Inn und Polder und entsprechende Verringerung des Zuflusses wenn ein Rückstau vorliegt



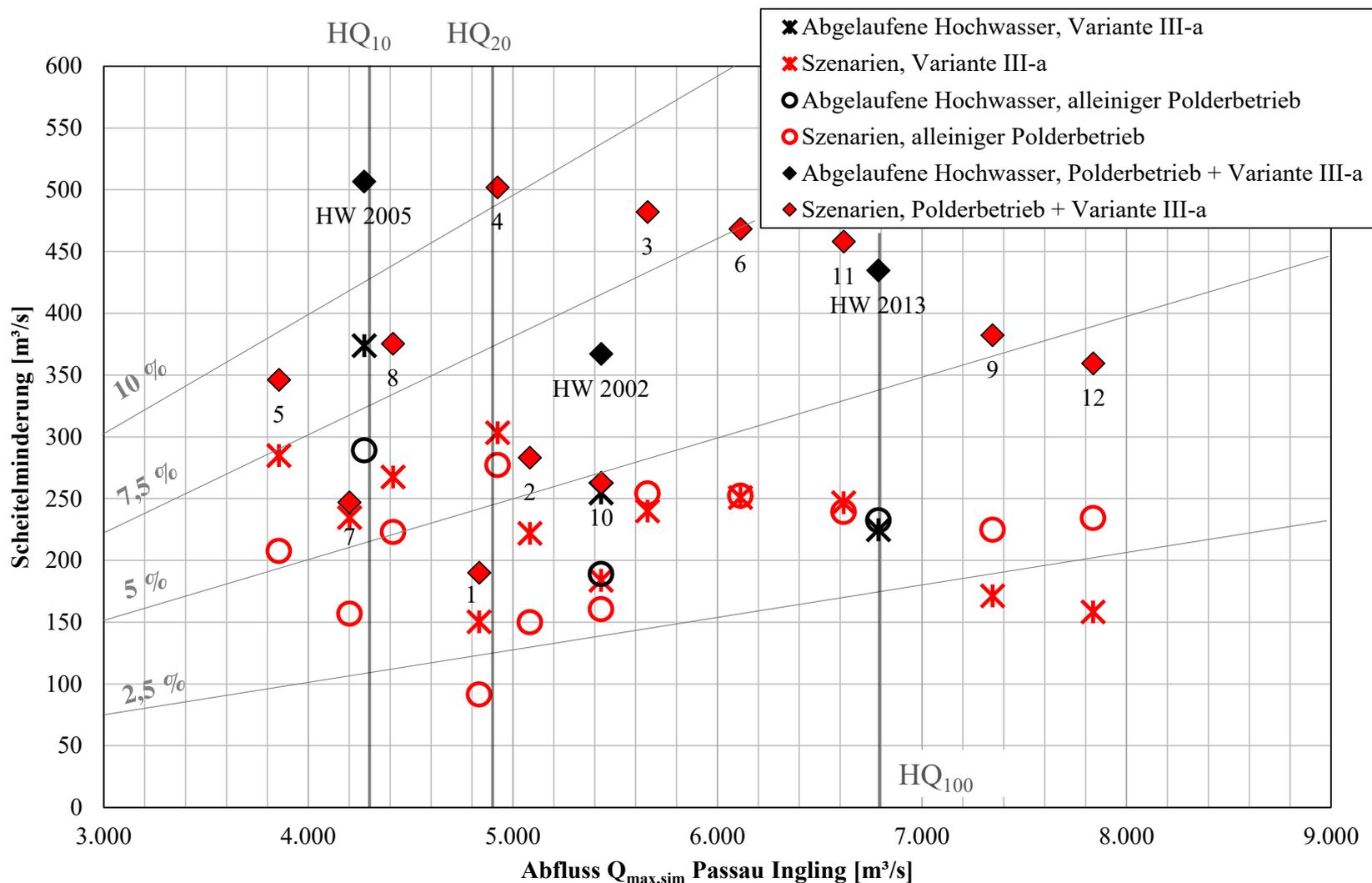
Kombinierter Betrieb von Staustufenmanagement und Flutpolder

- Steuerungsregeln des Polderbetriebes
 - Definition eines einzulagernden Zuflusses, linearer Anstieg und Halten von $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ über 2 Stunden, gesamte Beaufschlagungsdauer von 16,7 Stunden bei einem Volumen von 13,4 Mio. m^3
 - Beginn der Beaufschlagung in Abhängigkeit des Wasserstandes an Referenzpegeln mit Zeitverschiebung analog zum Staustufenmanagement → rein messwertbasierter Polderbetrieb



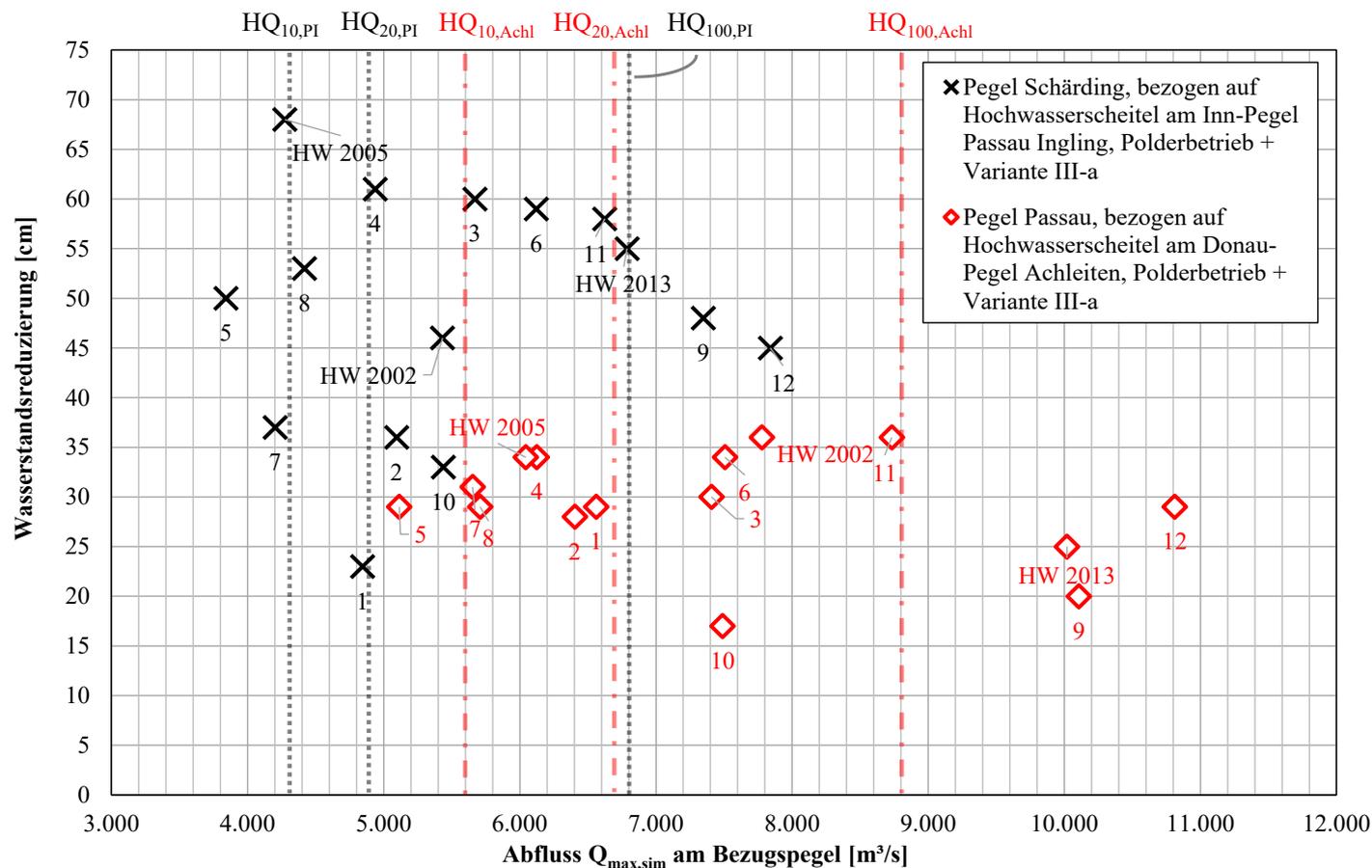
Kombinierter Betrieb von Staustufenmanagement und Flutpolder

Absolute Scheitelminderung am Pegel Passau Ingling (Inn-km 3,1)



Kombinierter Betrieb von Staustufenmanagement und Flutpolder

Wasserstandsreduzierung am Pegel Schärding (Inn-km 16,25) und Pegel Passau (Donau-km 2226,70) oberstrom der Einmündung



- An genannten, neuralgischen Punkten, die auch schon bei geringeren Hochwassern von Überflutungen betroffen sind, ist jede Wasserstandsreduzierung wesentlich

Stauraummanagement – Zusammenfassung

- Keine Berücksichtigung von Anlagen, an denen Stauraummanagement aufgrund der Gegebenheiten schwierig umzusetzen ist (morphologische Prozesse, Rutschhänge und zu geringe Laufzeiten)
- Annahmen für Abstautiefen und Gradienten liegen in einem realistischen Bereich; Variantenstudium durchgeführt mit verringertem Abstau, Verfügbarkeit einzelner Stauanlagen eingeschränkt,
- **Günstige Standortbedingungen (große Fallhöhen, keine Schifffahrt, Steuerbarkeit bei großen Wassermengen)**
- **Mit Hilfe der praxisnahen Steuerungsvorgaben ist eine gute Scheitelabminderung erzielbar**
- Weitere Detailuntersuchungen für Umsetzung in Praxis notwendig
 - Abstau bei Flachwasserzonen und damit Einfluss auf Lebensraum von Fischen und Vögeln
 - Mobilisierung von Feststoffen
 - Überprüfung und ggf. Anpassung der Alarmpläne von Anrainern wie der Stadt Schärding



Fazit

- Staustufenmanagement kann zur Hochwasserminderung am Inn beitragen
- Wechselwirkung mit Flutpolderbetrieb zeigt positive Überlagerungseffekte

- Entwickelte Steuerungsvorgaben sind für den operationellen Betrieb geeignet aufgrund der Berücksichtigung operationell verfügbarer Daten
- Anwendung eines komplexen Modellsystems notwendig zur Abbildung der vielfältigen Abhängigkeiten und wechselseitigen Beeinflussungen
- Vielzahl von Parametern und Sensitivität muss beachtet werden

- Staustufenmanagement, das ohne größere bauliche Maßnahmen umsetzbar wäre, stellt aussichtsreiches additives Element im Gesamtkonzept des Hochwasserschutzes dar
- Angewendete Methode kann auf andere Fließgewässersysteme übertragen werden

Zusammenarbeit

Besonderer Dank gilt den Mitarbeitenden des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, der TU München, der TU Wien sowie der beteiligten deutschen und österreichischen Landes- und Fachbehörden für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes „Retentionspotentialstudie Inn“. Dank gilt ebenfalls den Ansprechpartnern der VERBUND AG.

Publikationen

- Dickel, S. (2023): Simulationsgestützte Entwicklung eines Staustufenmanagements zum Hochwasserrückhalt, Kasseler Wasserbau-Mitteilungen Heft 23, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel
- Dickel, S. und S. Theobald (2022): Adapted Control of a Cascade of Hydropower Plants for Flood Reduction. 39th IAHR World Congress: From Snow to Sea, 19. bis 24. Juni 2022 in Granada, Spanien.
- Dickel, S. & S. Theobald (2022): Staustufenmanagement als Teil des Hochwassermanagements – Modellierung des bayerischen Inns, Wasserwirtschaft 112 (4/2022)
- Dettmann, S., U. Theobald & S. Theobald (2022): Einsatzmöglichkeiten einer übergeordneten Steuerung beim automatisierten Betrieb von Staustufenketten, Wasserwirtschaft 112 (4/2022)
- Theobald, U., S. Dettmann, & S. Theobald (2022): Automatisierter Staustufenbetrieb auf Basis lokaler Wasserhaushaltsregelungen, Wasserwirtschaft 112 (4/2022)
-

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



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Quelle: Carsten Steger (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aerial_image_of_Passau.jpg),
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>