RWE Power AG

21.04.2026

Tagebausee Hambach

Antrag auf Planfeststellung nach § 68 Abs. 1 WHG

Überprüfung der hydraulischen Verhältnisse in der Einleitung
Anlage A-EBH-04



Abbildung: 3D-Modell Darstellung des Tagebausees Hambach (Quelle: RWE Power AG)

Tractebel GmbH
Gmunder Straße 53 | 81379 München
Tel.: +49 89 381907-70 | Fax: +49 89 381907-99
info.germany@tractebel.engie.com
www.tractebel-engie.com

TAGEBAUSEE HAMBACH

Antrag auf Planfeststellung nach § 68 Abs. 1 WHG

Anlage A-EBH-04

ÜBERPRÜFUNG DER HYDRAULISCHEN VERHÄLTNISSE IN DER EINLEITUNG

Auftragsnummer: 1770_Tagebausee Hambach

Auftraggeber: Tractebel GmbH
Rießnerstr. 18
99427 Weimar

Auftragnehmer: Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Forschungsprofessur Wasserbau and Wasserressourcenmanagement
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Carstensen

Bearbeiter: M.Eng. Max Heß
B.Eng. Niklas Müller

Datum: 21. April 2026

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis ..... **III**
Tabellenverzeichnis ..... **V**
1 Veranlassung **1**
2 Konzeption **3**
2.1 Allgemeines 3
2.2 hydrodynamisch-numerisches Modell 5
2.3 gegenständlicher Modellversuchsstand 7
2.3.1 Allgemeines 7
2.3.2 Modellähnlichkeit 7
2.3.3 Modellversuchsstand 8
2.3.4 Lastfälle und Vorgehensweise 11
2.3.5 Ergänzende Hinweise zur Übertragbarkeit 11
3 Untersuchungsergebnisse **16**
3.1 Untersuchungen zu den Gerinnetreppen 16
3.1.1 3D-HN-Simulationen zur Gerinnetreppe 16
3.1.2 Optimierung der Beckentiefen der Gerinnebecken 18
3.1.3 Optimierung der Überfalleinschnürung der Gerinnebecken 20
3.1.4 Optimierung der Übergangsbecken G-R 24
3.1.5 Fazit – Übertragbarkeit auf die Gesamtanlage 29
3.2 Optimierung des Rohrleitungssystems 32
3.2.1 Lufteinziehende Wirbel an den Rohrleitungseinläufen 32
3.2.2 Rohrhydraulik 34
3.2.3 Fazit und Empfehlungen 42
3.3 Weiterführende Fragestellungen 45
3.4 Hydraulische Bemessung für den abschließenden Planungsstand 48
Lastfall „Normalbetrieb“ 50
Lastfall „steigender Seewasserspiegel“ 53
4 Zusammenfassung **54**
5 Literaturverzeichnis **57**
6 Anlage **58**
6.1 Abmaße in Verbindung mit baulichen Anpassungen bzw. Varianten (Beckenausläufe und Störkörper) 58

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1 Schnittansicht: Planzustand zum Übergangsbecken R-G und Rohrleitung
Abbildung 2-2 Schnittansicht: Planzustand zu den Becken der Gerinnetreppen
Abbildung 2-3 Schnittansicht: Planzustand zum Übergangsbecken G-R und Rohrleitung
Abbildung 2-4 Räumliche Diskretisierung des Modellgebiets für den Planzustand des 3D-HN-Modells.
Abbildung 2-5 Skizze (Längsschnitt, verzerrt): Szenario - rascher Abflussanstieg
Abbildung 2-6 Skizze (Längsschnitt) zum umgesetzten Versuchsaufbau
Abbildung 2-7 Fotoaufnahmen des kompletten gegenständlichen Modellversuchsstands sowie der Bereich der Gerinnetreppe (unten links).
Abbildung 2-8 Lage der Ultraschallsensoren zur Erfassung der Wasserspiegellagen am gegenständlichen Modellversuch im lokalen Koordinatensystem.
Abbildung 2-9 Skizze zu den Auswirkungen des mit dem Froudeschen Modell nicht übertragbaren Einflusses der Reibungskräfte am Modell.
Abbildung 3-1 Seitenansicht des Wasserkörpers im numerischen Modell des ursprünglichen Planzustands als Momentaufnahme inkl. Darstellung der Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche.
Abbildung 3-2 Gegenüberstellung der untersuchten Varianten mittels 3D-HN-Modellierung; Darstellung der zeitlich gemittelten Wasserspiegellage und der gemittelten Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche.
Abbildung 3-3 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckentiefen für Q = 10,4 m³/s.
Abbildung 3-4 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckentiefen für Q = 8,1 m³/s.
Abbildung 3-5 Gegenüberstellung der zeitlich gemittelten Graustufenbilder zur qualitativen Abschätzung des örtlichen Luftgehalts der Strömung für Q = 10,4 m³/s.
Abbildung 3-6 Darstellung der baulichen Varianten der Beckenendwände sowie die resultierende Überfallstrahlausbildung in der Frontal- und Seitenansicht bei einem Abfluss von Q = 10,4 m³/s.
Abbildung 3-7 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckenendwänden für Q = 10,4 m³/s.
Abbildung 3-8 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckenendwänden für Q = 8,1 m³/s.
Abbildung 3-9 Bauliche Ausführung der Beckenausläufe zu den Vorzugsvarianten Be.Var 4 (links), Be.Var 5 (mittig) und Be.Var 6 (rechts).
Abbildung 3-10 Zeitlich gemittelte Graustufenbilder zur Überfallstrahlausbildung mit den Vorzugsvarianten Be.Var 4 (oben), Be.Var 5 (mittig) und Be.Var 6 (unten).
Abbildung 3-11 Zeitlich gemittelte Graustufenbilder zur qualitativen Abschätzung des örtlichen Luftgehalts der Strömung im Übergangsbecken G-R für Q = 10,4 m³/s; links: ohne Prallwände; rechts: mit einer Prallwandkonfiguration.
Abbildung 3-12 Darstellung der zeitlich gemittelten Wasserkonzentrationen im Längsschnitt durchs Übergangsbecken für variierende Beckenlängen bei einem Abfluss von 10,4 m³/s berechnet mit dem 3D-HN-Modell.
Abbildung 3-13 Lage der Ultraschallsensoren zur Erfassung der Wasserspiegellagen am gegenständlichen Modellversuch im lokalen Koordinatensystem durch die bauliche Anpassung (Beckenverlängerung) des Übergangsbeckens G-R.
Abbildung 3-14 Variante 1 (links) und 2 (rechts) bzgl. der Strömungsoptimierung im Übergangsbecken G-R in Verbindung mit einer Beckenlänge von 20 m.
Abbildung 3-15 Zeitlich gemittelte Graustufenbilder des Lufteintrags am Übergangsbecken G-R mit einer Beckenlänge von 20 m ohne Störkörper (oben, links) und mit Störkörpern - Variante 1 (oben, mitte) und Variante 2 (oben, rechts) - sowie einer Überlagerung von Iso-Linien eines konkreten Grauwertes (unten) für Q = 10,4 m³/s.

Abbildung 3-16 Darstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei einer Länge des Übergangsbeckens G-R von 20 m für Q = 8,1 m³/s und Q = 10,4 m³/s.

Abbildung 3-17 Relevante Abmessungen der Übergangsbecken R-G (oben, links), der Gerinnebecken (mittig, links) und der Übergangsbecken G-R (unten, links) sowie der Ausbildung der Beckenendwände zur Überfalleinschnürung (oben, rechts) entsprechend der Vorzugsvariante basierend auf den physikalischen Untersuchungen.

Abbildung 3-18 Lufteinziehende Wirbel im Übergangsbecken G-R am gegenständlichen Modell bei Q = 8,1 m³/s (links) und Q = 10,4 m³/s (rechts).

Abbildung 3-19 Versuche zur Reduzierung des Lufteintrags durch Wirbelbildung an den Einläufen im Übergangsbecken G-R mittels baulicher Anpassungen; von links nach rechts: 0,5 m horizontale Abdeckungen über den Einläufen, 1,5 m horizontale Abdeckungen über den Einläufen, Strömungsgleichrichter in den Rohrleitungseinläufen, Schwimmkörper an der Wasseroberfläche.

Abbildung 3-20 Grafische Darstellung der analytischen Berechnungsergebnisse auf Grundlage der Energiegleichung (Bernoulli) für eine 200 m lange Rohrleitungsstrecke und einen Abfluss von 8,1 m³/s.

Abbildung 3-21 Lage der am Modellversuch installierten Be-/Entlüftungsrohre.

Abbildung 3-22 Momentaufnahme zum Eintrag kleinerer Luftblasen aufgrund der Ausbildung eines Wechselsprungs in einer Rohrleitung.

Abbildung 3-23 Momentaufnahme zu den hydraulischen Verhältnissen im Bereich der Belüftungsrohre bei größerem Unterdruck (oben) und bei geringerem Unterdruck (unten).

Abbildung 3-24 Momentaufnahmen zur Entlüftung bei unterschiedlichen Entlüftungsrohrdurchmessern (linke Leitung: 318 mm; rechte Leitung: 1058 mm); oben links: Luftblasen in Entlüftungsrohre; oben rechts: resultierender Luftaustritt ins Becken ÜB R-G; unten: Luftgehalt der Strömung im Nachlauf der ersten Entlüftungsrohre.

Abbildung 3-25 Charakteristische Momentaufnahmen des Lufteintrages in das Becken ÜB R-G während der Versuchsdurchführungen: links ohne Anpassungen und rechts mit letzten Anpassungen.

Abbildung 3-26 Messtechnisch erfasste Wasserspiegellagen im Übergangsbecken G-R für die simulierten maximalen Rohrleitungslängen am gegenständlichen Versuchsstand mit und ohne Be-/Entlüftung.

Abbildung 3-27 Abflusskurven erfasst am gegenständlichen Modellversuch für die Abflussänderung von 0 auf 10,4 m³/s und von 10,4 auf 0 m³/s.

Abbildung 3-28 Schaubild zum Lufteintrag und -austrag am System „Übergangsbecken G-R → Rohrleitung → Übergangsbecken R-G“.

Abbildung 3-29 Empfohlene Positionierung der Be- und Entlüftungsrohre entlang den Rohrleitungsstrecken.

Abbildung 3-30 Wasserstand-Abfluss-Beziehung für ein Gerinnebecken mit Beckenauslauf Variante Be.Var 6.

Abbildung 3-31 Skizze zu steigendem Tagebauseewasserstand im Bereich einer Flachstrecke (ohne Berücksichtigung von Be-/Entlüftungsrohren).

Abbildung 6-1 Beckenauslaufvarianten Be.Var 0 (Planzustand, oben, links), Be.Var 1 (oben, rechts), Be.Var 2 (unten, links) und Be.Var 3 (unten rechts).

Abbildung 6-2 Störkörpervariante 1 (nur erste Reihe) und 2 (erste und zweite Reihe) inkl. Detailansicht eines Störkörpers (rechts).

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1 Abkürzungen für Anlagen- und Modellbestandteile sowie für spezifische Angaben zur Variantenbezeichnung

Tabelle 2-2 Maßstabskennzahlen entsprechend des Froudeschen Modellgesetzes für den gegenständlichen Modellversuchsstand

Tabelle 2-3 Analytisch bestimmte Verlusthöhen infolge Reibung entlang der im Modell abgebildeten Rohrleitungen (l_R = 106 m) für ausgewählte Abflüsse.

Tabelle 3-1 Anpassungen der Gerinnetreppen ausgehend vom Planzustand für die 3D-HN-Untersuchungen.

Tabelle 3-2 Am Modell erfasste maximale zeitlich gemittelte Wasserstände h_{max} und Mindestfreibord f_{min} eines Beckens der Einleitung mit den Anpassungen resultierend auf den physikalischen Versuchen.

Tabelle 3-3 Maximale Wasserstände h_{max} und Mindestfreibord f_{min} in den einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung mit den Anpassungen entsprechend der physikalischen Versuche für Q = 10,4 m³/s.

Tabelle 3-4 Maximale Wasserstände h_{max} und Mindestfreibord f_{min} in den einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung mit den Anpassungen entsprechend der physikalischen Versuche für Q = 8,1 m³/s.

Tabelle 3-5 Analytisch bestimmte kritische horizontale Rohrleitungslängen in Verbindung mit dem Auftreten von Unterdruck im Rohrleitungssystem in Abhängigkeit des Abflusses ohne Einbauten (lokale Verluste) für eine DN1200 Rohrleitung.

Tabelle 3-6 Analytisch bestimmte simulierte horizontale Rohrleitungslängen aufgrund der Höhendifferenz zwischen Übergangsbeckens G-R und Übergangsbecken R-G am Modellversuchstand in Abhängigkeit des Abflusses.

Tabelle 3-7 Einstauhöhen $h_{Einstau}$ der einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung bei steigendem Seewasserstand.

Tabelle 3-8 Maßgebende Angaben zu den Rohrstrecken entsprechend des Planungsstands vom März 2026 (Quelle: Tractebel).

Tabelle 3-9 Abschätzung des Abflusses, für den noch Druckabfluss vorherrschen könnte, sowie den entsprechenden krit. Rohrleitungslängen für den abschließenden Planungsstand März 2026.

Tabelle 3-10 Hydraulische Berechnungen für den Lastfall „Normalbetrieb“ für den abschließenden Planungsstand März 2026 bei einem Druckabfluss (Annahme) von 8,25 m³/s pro Einleitungsstrang.

Tabelle 3-11 Einstautiefe über Gelände Oberkante der Übergangsbecken G-R bei aufgebrauchtem Beckenfreibord im Lastfall „steigender Seewasserstand“ für den Planungsstand März 2026.

1 VERANLASSUNG

Aufgrund des Braunkohleausstiegs in Deutschland wird die Kohleförderung im Tagebau Hambach eingestellt. Als Folgenutzung des Areals ist die Herstellung eines Tagebausees geplant, dessen Befüllung ab dem Jahr 2030 vorgesehen ist. Der Tagebausee wird eine maximale Tiefe von etwa 345 m und ein Volumen von ca. 4.320 Mio. m³ aufweisen. Maßgeblich soll die Befüllung mit Wasser aus dem Rhein erfolgen, ergänzt um Wässer der nachlaufenden Sümpfung. Über die geplante Rheinwassertransportleitung (RWTL) soll das benötigte Wasser zum Tagebau Hambach befördert werden. Dort angekommen muss das Rheinwasser, sowie zusätzliche Zuflüsse (Sümpfungswasser), über ein Einleitbauwerk schadensfrei dem Tagebausee zugeführt werden. Für die Befüllung bis zum erstmaligen Erreichen des Zielwasserspiegels wird eine Dauer von etwa 40 Jahren prognostiziert. Zudem sind weiterhin rd. 25 Jahre Befüllung für den Ausgleich der Versickerungsverluste ins Grundwasser vorgesehen. Für diesen Zeitraum ist eine sukzessive und sichere Einleitung zu gewährleisten.

Das geplante Einleitbauwerk stellt eine Kombination aus Gerinnetreppen (Steilstecken) und Rohrleitungsstrecken (Flachstrecken) dar und muss eine Höhe von etwa 365 m sowie eine horizontale Länge von ca. 4.130 m überbrücken. Um die Betriebssicherheit zu erhöhen wird die Einleitung auf zwei Stränge aufgeteilt. Über einen Strang soll im Revisionsbetrieb 50% des Maximalabflusses aus der Rheinwassertransportleitung (RWTL) von 13,5 m³/s sowie 1,5 m³/s aus Sümpfungswasser sicher abgeführt werden. Die Summe aus den genannten Abflüssen beträgt 8,25 m³/s. Für diesen Abfluss sollte eine schadensfreie Einleitung ohne Wasserverlust in den Tagebausee gewährleistet sein.

Zu Beginn der hydraulischen Untersuchungen wurde von ein Abfluss von 2,0 m³/s aus Sümpfungswässer und zusätzlich von 1,5 m³/s aus der Entwässerung der Sophienhöhe ausgegangen. Die ursprüngliche Auslegungswassermenge betrug demnach 10,4 m³/s und stellte die Grundlage für die gegenständlichen Untersuchungen dar. Den Erläuterungen in den folgenden Kapiteln 2 bis 3.3 liegt diese ursprüngliche Auslegungswassermenge zugrunde. Im Kapitel 3.4 werden die Auswirkungen der reduzierten Wassermenge und zwischenzeitlichen Planungsänderungen zusammengefasst und bewertet.

Im Rahmen der Bauwerksplanung wurde das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Hochschule Nürnberg (IWWN), Forschungsprofessur Wasserbau und Wasserressourcenmanagement (FProf WW) durch die Tractebel Hydroprojekt GmbH (nachfolgend als Auftraggeber bzw. AG bezeichnet) mit der Durchführung hydraulischer Untersuchungen beauftragt. Dieser Bericht umfasst die Beschreibung der durchgeführten Leistungen sowie der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der hydraulischen Verhältnisse in der geplanten Einleitung.

Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen sollten die Machbarkeit sowie die hydraulischen Verhältnisse bei der späteren Befüllung geprüft und prognostiziert werden. Im Speziellen sollte für variierende Abflussverhältnisse

- die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Anlage,
- die Energiedissipation und Überströmungssicherheit der Gerinnebecken und Übergangsbecken sowie

- das Abflussverhalten bei sich verändernden Strömungsverhältnissen in den Rohrleitungen

beurteilt werden. Für den Fall, dass die zu Beginn der Untersuchungen zu Grunde gelegte Planung die hydraulische Funktionsfähigkeit nicht gewährleistet, waren Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten und diese erneut hydraulisch zu untersuchen.

2 KONZEPTION

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im nachfolgenden Text Abkürzungen für die Bestandteile der Anlage sowie für gewisse Bauteilanpassungen eingeführt und genutzt (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1 Abkürzungen für Anlagen- und Modellbestandteile sowie für spezifische Angaben zur Variantenbezeichnung

Bauteil / Bauteilanpassungen	Abkürzung
Übergangsbecken Rohrleitungs- zu Gerinnestrecke	ÜB R-G
(Gerinne-) Becken der Gerinnetreppen	B bzw. GB
Übergangsbecken Gerinne- zu Rorhrleitungsstrecke	ÜB G-R
Rohrleitungsstrecke	R
Gerinnestrecke	G
Rheinwassertransportleitung	RWTL
Zwischenbecken	ZwB
Einlaufbecken am modellierten Versuchsstand	EB
Beckentiefe	Bt
Beckenendwände	Be

2.1 ALLGEMEINES

Die nachfolgende Bauwerksbeschreibung bezieht sich auf den Planzustand der Einleitung, welcher zum Zeitpunkt der Aufnahme der Modellierungsarbeiten vorlag. Im Laufe der Untersuchungen ergaben sich bauliche Anpassungen, welche den nachfolgenden Abschnitten entnommen werden können.

Auf der terrassenartigen Kippenböschung soll im Bereich des geplanten Einleitbauwerks Hambach (EBH) eine Einleittrasse mit wechselnden Steigungsverhältnissen entstehen. Diese stellt die Gründung des Einleitbauwerks dar. Die Einleittrasse wird insgesamt neun Flachstrecken mit 2% sowie neun (später auf acht reduziert) Steilstrecken mit 20% Gefälleneigung aufweisen, wobei die jeweils zu überwindenden Höhendifferenzen variieren werden. Vor diesem Hintergrund sind im Allgemeinen zwei Bauwerkstypen des Einleitbauwerks vorgesehen. Diese sind Gerinnestrecken (Steilstrecken), bestehend aus einer Aneinanderreihung von Gerinnebecken und Rohrleitungsstrecken (Flachstrecken). Als Übergang zwischen den Abschnitten sind Übergangsbecken von Gerinne auf Rohrleitung (G-R) und von Rohrleitung auf Gerinne (R-G) vorgesehen. Die Planzustände zu den unterschiedlichen Becken sowie den Rohrleitungen sind in Abbildung 2-1, Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 dargestellt.

In der Einleitung sind grundsätzlich variierende Abflussverhältnisse zu erwarten, welche v. a. von der in Abhängigkeit des Rheinwasserstands zulässigen Rheinwasserentnahme abhängen werden. V. a. die Übergänge von den Becken auf das Rohrleitungssystem sowie die Länge und das Gefälle der Rohrleitungen selbst könnten potenziell kritische Bereiche hinsichtlich der hydraulischen Verhältnisse darstellen. In diesem Zusammenhang sind u. a.

- der Wechsel zwischen Freispiegel- und Druckabfluss,
- das mögliche Auftreten von lufteinziehenden Wirbeln an Rohrleitungseinläufen,
- der grundsätzliche Lufteintrag ins Rohrleitungssystem sowie
- die Energieumwandlung in den unterschiedlichen Becken

zu nennen. Die angesprochenen hydraulischen Prozesse werden in Abhängigkeit des Abflusses bzw. der zeitlichen Abflussänderung auftreten. Um derartige kritische Betriebszustände identifizieren zu können, bedarf es einer Vielzahl an Vorversuchen mit variierenden Abflusskurven. Dieses Vorgehen kann effizient mittels gegenständlicher Modellierung erfolgen, da die Auswirkungen von Abflussänderungen, gegenüber numerischen Simulationen, direkt und ohne zeitliche Verzögerung beobachtet werden können. Mit der Kenntnis kritischer Randbedingungen können anschließend die hydraulischen Prozesse für diese Zustände im Detail untersucht werden. Vor diesem Hintergrund wurde ein gegenständlicher Modellversuchstand im Labor für Wasserbau (LWN) am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Hochschule Nürnberg (IWWN) umgesetzt.

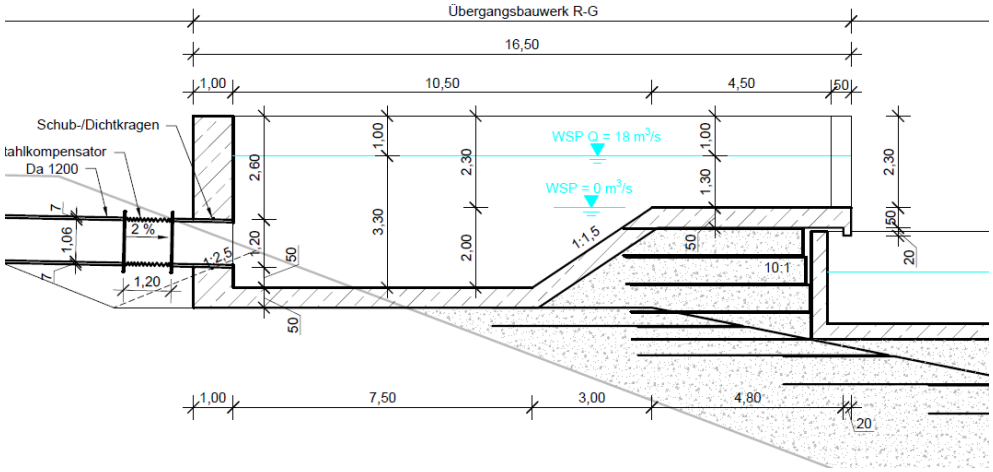


Abbildung 2-1 Schnittansicht: Planzustand zum Übergangsbecken R-G und Rohrleitung

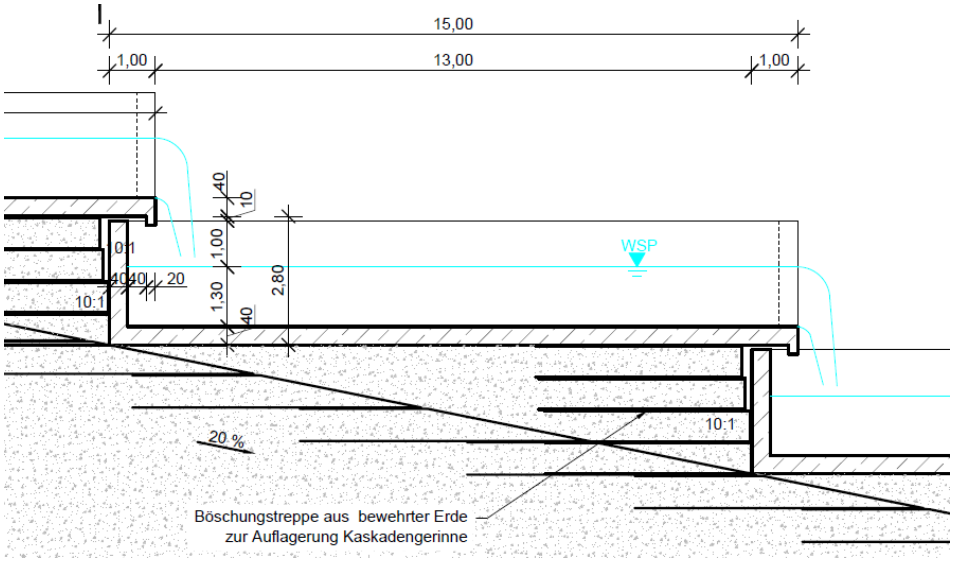


Abbildung 2-2 Schnittansicht: Planzustand zu den Becken der Gerinnetreppen

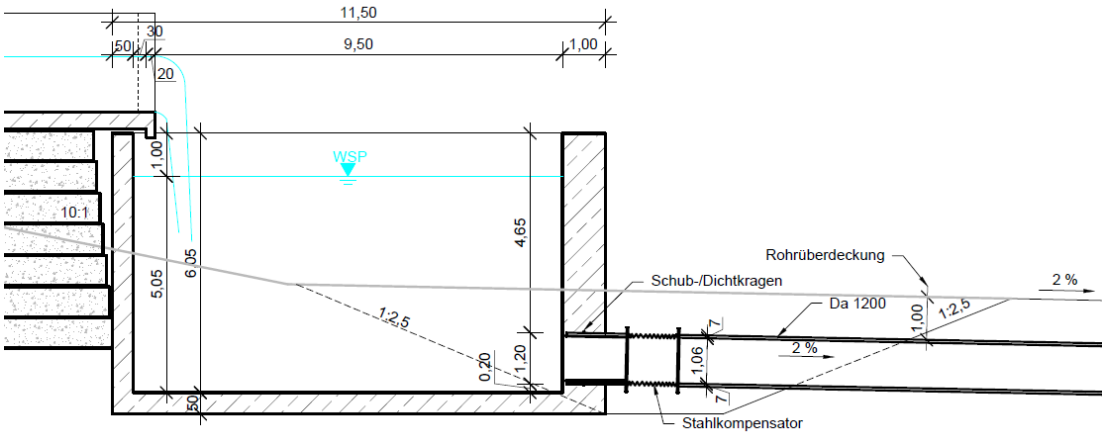


Abbildung 2-3 Schnittansicht: Planzustand zum Übergangsbecken G-R und Rohrleitung

Für die Beurteilung der hydraulischen Funktionsfähigkeit des Einleitbauwerks sind das Rohrleitungssystem der Flachstrecken, die Gerinnebecken der Steilstrecken sowie die Übergangsbecken am Kopf und Fuß einer Rohrleitungstrecke im Modellgebiet zu berücksichtigen. Wird beim Übergang der Becken jeweils von der Ausbildung eines vollkommenen Überfalls ausgegangen, so sind Rückkopplungen ins Oberwasser ausgeschlossen. Wird zudem eine ausreichende Energieumwandlung in den einzelnen Becken vorausgesetzt, so ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Becken die hydraulische Wirksamkeit der Steilstrecken im Allgemeinen nicht bzw. nur marginal beeinflussen. Um diesem Umstand zu prüfen erfolgten vor der baulichen Umsetzung des gegenständlichen Modells hydrodynamisch-numerische Untersuchungen zu den geplanten Beckenkonstruktionen der Gerinnestrecken.

2.2 HYDRODYNAMISCH-NUMERISCHES MODELL

Zur Beurteilung der hydraulischen Situation in den Becken der Gerinnetreppen sowie in den Übergangsbecken R-G und G-R, wurde ein dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches (3D-HN) Modell aufgebaut, welches die beiden Übergangsbecken sowie drei Gerinnebecken beinhaltete. Das numerische Modell wurde mit der Open-Source CFD-Bibliothek OpenFOAM erstellt und unter Verwendung des bewährten Volume-of-Fluid-Verfahrens (VOF) InterFoam die hydrodynamischen Berechnungen ausgeführt. Vor dem Hintergrund der verfügbaren Rechenleistung erfolgte die räumliche Diskretisierung des Modellgebiets mit der Finite-Volumen-Methode (FVM) auf Basis einer Grundgitterweite von 25 cm pro Raumrichtung. Zellverfeinerungen wurden für den Bereich des Wasserkörpers (Abmessungen pro Raumrichtung der Kontrollvolumina: 6,25 cm) sowie an Bauwerksoberflächen (sehr flache Kontrollvolumina) vorgenommen. Insgesamt variierte die Gesamtanzahl der Kontrollvolumina pro Modell zwischen 4,8 und 6,2 Mio. Abbildung 2-4 zeigt das Modellgebiet sowie dessen räumliche Diskretisierung inkl. Detailansichten.

Für die Turbulenzmodellierung, welche im Allgemeinen mit der Umsetzung großräumiger Modellgebiete in Verbindung mit der Endlichkeit verfügbarer Rechenressourcen notwendig wird, wurde das *k*-ω-SST-Modell nach Menter (1994) als Detached Eddy Simulation (DES) herangezogen. Mit diesem Ansatz werden die turbulenten Strukturen in der freien Strömung weitestgehend direkt numerisch gelöst und nur die für das lokale Berechnungsgitter zu feinen Wirbel modelliert. Dieses Vorgehen wird auch als Large Eddy Simulation (LES) bezeichnet. In der Nähe von Wänden, also Bauwerksoberflächen, findet eine Reynolds-Mittelung für die komplette Strömung statt, wodurch

dort sämtliche turbulente Strukturen modelliert werden (RANS-Modellierung). Dieses Vorgehen begründet sich auf der Tatsache, dass aufgrund des großen Modellgebietes die Grenzschichtströmung an Wänden nicht über das Berechnungsgitter abgebildet werden kann.

Für die Gerinnestrecken kann davon ausgegangen werden, dass die Abflussänderungen, welche im Rahmen der Wasserzufuhr über die RWTL zu erwarten sind, keine kritischen Zustände erwarten lassen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass der kontinuierliche maximale Abfluss von 10,4 m³/s den maßgebenden Lastfall für die Gerinnestrecken darstellt. Für die 3D-HN-Simulationen wurde demnach ein Zufluss von 10,4 m³/s als Einlass-Randbedingung definiert. Am Auslass wurde eine hydrostatische Druckrandbedingung gesetzt, welche einen Gegendruck und damit ein vorherrschendes hydraulisches Gefälle vorgab.

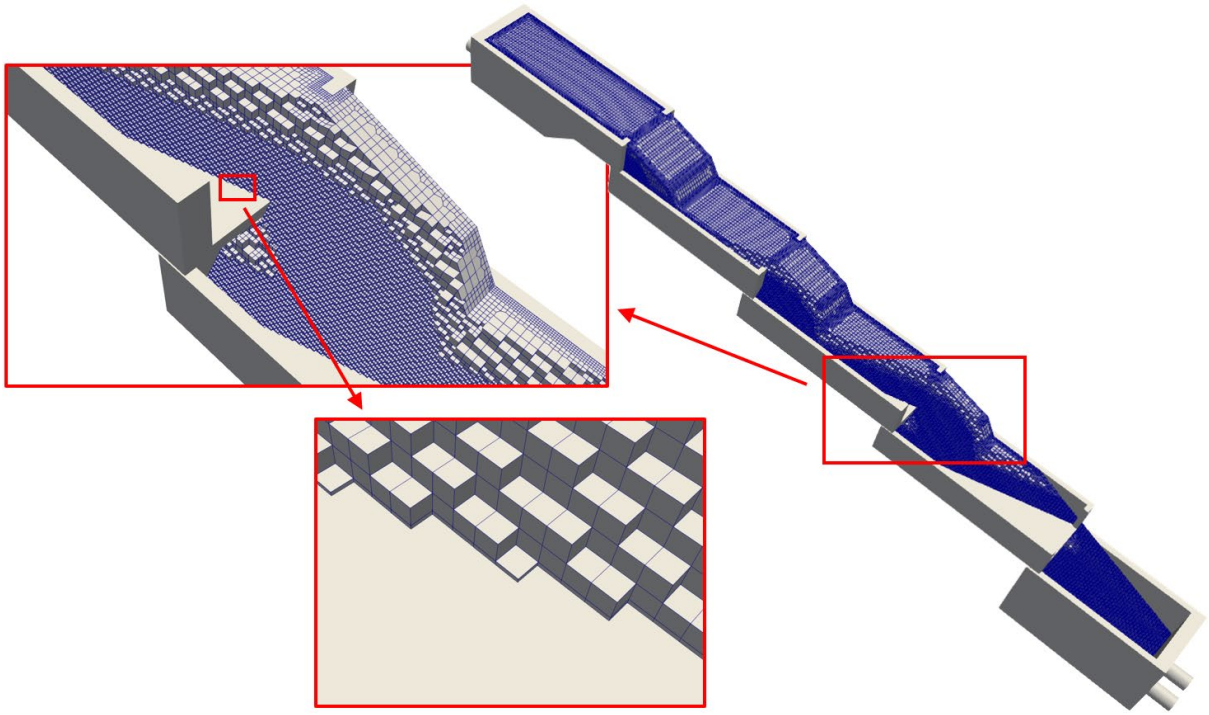


Abbildung 2-4 Räumliche Diskretisierung des Modellgebiets für den Planzustand des 3D-HN-Modells.

Mit der Festlegung der Randbedingungen erfolgte die Initialisierung der Modellgrenzen für die einzelnen Simulationen. Da vor der Berechnungsausführung das Strömungsfeld im Modellgebiet unbekannt war, lagen zu Beginn einer Simulation jeweils ruhende Verhältnisse vor. Zur Verbesserung der numerischen Stabilität der Simulationen wurde der Abfluss von 10,4 m³/s über einen gewissen Zeitraum von Null kontinuierlich auf den Soll-Abfluss gesteigert und dann konstant gehalten. Nach Erreichen eines quasi-stationären Fließzustands im Modell konnten die hydraulischen Parameter analysiert werden.
Im Rahmen der Auswertung der 3D-HN-Simulation zum Planzustand wurden Anpassungen an den Beckengeometrien vorgenommen und auf ihre hydraulische Funktionsfähigkeit untersucht. Details zu den Beckenanpassungen sowie zur Auswertung der Berechnungsergebnisse sind dem Abschnitt 3.1 sowie der Anlage zu entnehmen.

2.3 GEGENSTÄNDLICHER MODELLVERSUCHSSTAND

2.3.1 Allgemeines

Der gegenständliche Versuchsstand diente u. a. der Bestätigung der hydraulischen Optimierung der Gerinnetreppen (vorangegangene 3D-HN-Modellierung) sowie der Untersuchung der Hydraulik der Rohrleitungsstrecken. Bzgl. Letzterem war davon auszugehen, dass v. a. rasche Abflussänderungen maßgebende Lastfälle für kritische Betriebszustände darstellen. Dies begründet sich auf der konstruktiven Ausbildung des Systems *Übergangsbecken G-R → Rohrleitung → Übergangsbecken R-G*. Bedingt durch das Gefälle der Rohrleitungsstrecken sowie der jeweils unterwasserseitig angeordneten Übergangsbecken R-G war grundsätzlich von einem Rückstau in die Rohrleitungen (Stauwurzel ohne Abfluss in den Rohrleitungen) auszugehen. Ist ausgehend vom Ruhezustand (kein Abfluss) ein rascher Anstieg des Abflusses zu erwarten, so kann die in den Leitungen befindliche Luft eingeschlossen werden und ggf. zu kritischen Zuständen führen. Dies stellte Gegenstand der Untersuchungen dar und ist mittels einer nicht maßstäblichen Skizze in Abbildung 2-5 veranschaulicht.

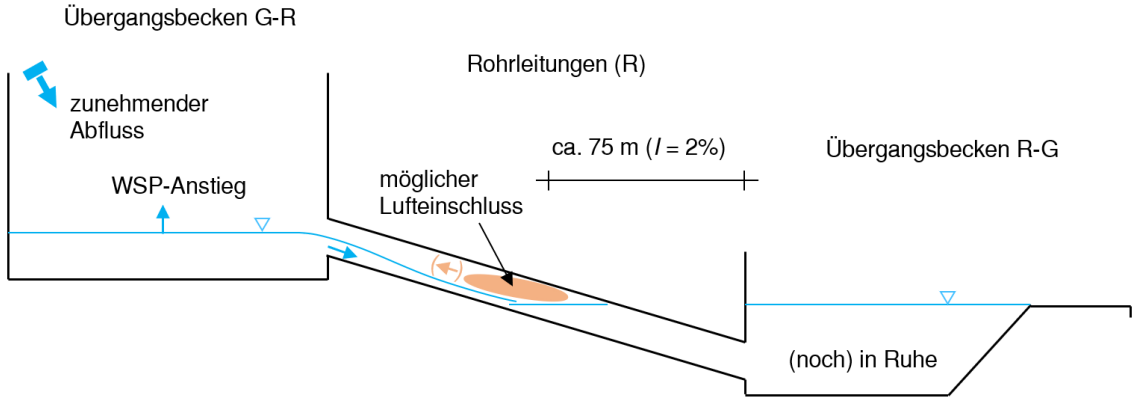


Abbildung 2-5 Skizze (Längsschnitt, verzerrt): Szenario - rascher Abflussanstieg

Hinsichtlich der Modellierung stellte die Untersuchung dieser Prozesse eine große Herausforderung dar, da die Umsetzung sehr langer Rohrleitungen in einem gegenständlichen Modellversuch im LWN unter Verwendung eines adäquaten Modellmaßstabs nur eingeschränkt möglich war. Für die Untersuchung der Flachstrecken wurde der Versuchsstand so aufgebaut, dass das Gefälle der Rohrleitungen vor einer Versuchsdurchführung verändert werden konnte. Mit diesem Vorgehen konnten Maßstabseffekte aufgrund des Einflusses der Reibung kompensiert werden. Des Weiteren bestand die Möglichkeit variierende Rohrleitungslängen zu simulieren.

2.3.2 Modellähnlichkeit

Die gegenständlichen Modelluntersuchungen wurden, da bei Strömungseffekten dieser Art im Wasser die Schwere- und Trägheitskräfte überwiegen, wohingegen die Zähigkeit des Wassers sowie die innere Reibung im Wasserkörper (beschrieben durch die Reynoldszahl) i. d. R. vernachlässigbar sind, entsprechend dem Froudeschen Modellgesetz durchgeführt.

Aus dem gewählten Modellgesetz sowie dem Modellmaßstab $1:M_l = 1:10{,}6$ ergeben sich die in Tabelle 2-2 angegebenen Maßstabskennzahlen.

Tabelle 2-2 Maßstabskennzahlen entsprechend des Froudeschen Modellgesetzes für den gegenständlichen Modellversuchsstand

Größe	Länge, Breite, Höhe	Fläche	Volumen	Kraft	Zeit	Geschwindigkeit	Durchfluss
Maßstabsfaktor	M	M^2	M^3	M^3	$M^{1/2}$	$M^{1/2}$	$M^{5/2}$
Maßstabskennzahl	10,6	112,4	1191,0	1191,0	3,26	3,26	365,8

Die vollständige dynamische Ähnlichkeit im Modell ist nur durch die Vernachlässigung bestimmter Kräfteeinflüsse erreichbar (Martin und Pohl, 2009), die im Folgenden überprüft werden soll.

Für die Erfüllung der dynamischen Ähnlichkeit im Modell müssen alle Kräftearten Berücksichtigung finden:

- Trägheitskraft,
- Schwerkraft,
- Reibungskraft,
- Kapillarkraft (Oberflächenspannung),
- Elastizitätskraft.

Der Einfluss der Elastizitätskraft konnte bei den zu betrachtenden Versuchen vernachlässigt werden, da Änderungen der Temperatur des Wassers nicht nachgewiesen wurden und sich stets an den Werten in der Natur orientierten.

Das Verhältnis von Trägheit- zu Oberflächenspannung wird durch die Weberzahl ausgedrückt. Ab einer Wassertiefe im Modell von h > 2 cm können i. d. R. Maßstabseffekte aus zu hohen Kapillarkräften ausgeschlossen werden (Oumeraci, 1998). Diese Mindestwassertiefe wurde grundsätzlich während der zu bewertenden Modellversuche eingehalten. Ein Einfluss aus der Oberflächenspannung ist für Weberzahlen We > 10 marginal. Diese Bedingung kann bei den meisten hydraulischen Vorgänge eingehalten werden. Nur bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten und sehr kleinen Luftblasen kann die Einhaltung dieser Bedingung ggf. nicht sichergestellt werden. Ergänzende Anmerkungen dazu sind im Abschnitt 2.3.5 einsehbar.

Wie bereits erwähnt, wird die Ähnlichkeit von Trägheits- und Schwerekräfte durch die Anwendung des Froudeschen Modellgesetzes eingehalten. Einflüsse aus Reibungskräften werden, sofern notwendig, mittels der Reynoldszahl berechnet. Bedingt durch die Abbildung einer etwa 106 m langen Rohrleitungsstrecke im gegenständlichen Modell (Länge im Modell ca. 10 m), sind die auftretenden Reibungskräfte nicht zu vernachlässigen. Mit dem Froudeschen Modell werden die Reibungskräfte i. d. R. überschätzt, wodurch die resultierenden Wasserstände im Übergangsbecken G-R nicht mit dem Längenmaßstab 1 : 10,6 in die Natur übertragen werden können. Details dazu sind dem Abschnitt 2.3.5 zu entnehmen.

2.3.3 Modellversuchsstand

Der Versuchsaufbau bzw. das Modellgebiet wurde entsprechend der Abbildung 2-6 aufgebaut und beinhaltete ein Einlaufbecken, welches sich an den Abmessungen der Übergangsbecken R-G orientierte, zwei Gerinnebecken (Becken 1 und 2), jeweils ein Übergangsbecken am Einlass und Auslass der Rohrleitungen (Übergangsbecken G-R und R-G) sowie eine Rohrleitungsstrecke (R). Die geradlinige Anordnung der Becken inkl. des Einlaufbeckens am Modelleinlass, der Rohrleitungsstrecke und des Übergangsbeckens R-G führten zu einer Gesamtlänge des Modellversuchsstands von

ca. 170 m (Natur). Die Rohrleitungen waren dabei mit einer Länge von jeweils 106 m berücksichtigt. Des Weiteren wurde die volle Beckeninnenbreite von 5,0 m im Modell berücksichtigt und der Höhenunterschied zwischen Einlass und Auslass des Modellgebiets betrug etwa 17,5 m.

Die Beckenausführungen stellten nicht den Planzustand dar, sondern wurden auf Grundlage der vorangegangenen 3D-HN-Untersuchungen angepasst, vgl. hierzu Abschnitt 3.1.

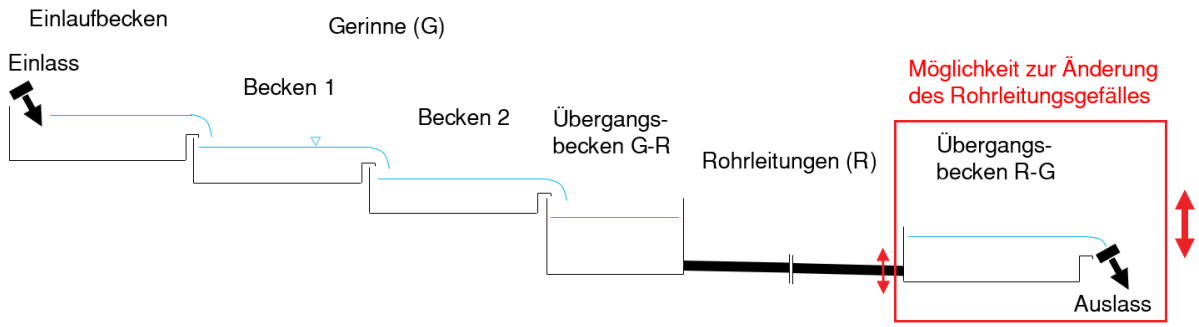


Abbildung 2-6 Skizze (Längsschnitt) zum umgesetzten Versuchsaufbau

Der Aufbau des gegenständlichen Modellversuchstands erfolgte in der Großen Rinne des LWN im Modelllängenmaßstab 1 : M_l = 1 : 10,6. So ergaben sich eine Modelllänge von etwa 16,0 m, eine Beckeninnenbreite von rd. 0,47 m und ein Höhenunterschied zwischen Modelleinlass und -auslass von etwa 1,65 m. Daraus resultierten u. a. Rohrinnendurchmesser für die beiden 10 m langen Leitungen von etwa 100 mm. Der Modelllängenmaßstab 1 : M_l = 1 : 10,6 wurde schließlich aufgrund der Innendurchmesser verfügbarer, transparenter Rohrleitungen (Plexiglas) festgelegt.

Die bauliche Umsetzung der Becken erfolgte mit beschichteten Schichtholzplatten sowie transparenten Kunststoffplatten und ermöglichte so die fortwährende Beobachtung der hydraulischen Prozesse. Des Weiteren wurde das Übergangsbecken R-G am Ende der Rohrleitungsstrecke baulich so umgesetzt, dass dieses in seiner Höhe variiert und damit das Gefälle der Rohrleitungen beeinflusst werden konnte. Die Abflüsse für die Versuchsdurchführungen konnten über frequenzgesteuerte Pumpen stufenlos eingestellt werden und betrugen entsprechend des Modellmaßstabs maximal 28,4 l/s (Natur: 10,4 m³/s).

Neben der Foto- und Videodokumentation der Versuche, wurden relevante Strömungsparameter, wie Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten und Drücke unter Berücksichtigung der Wassertemperatur, erfasst. In Abhängigkeit der verwendeten Messinstrumente konnten die Messprotokolle hinsichtlich charakteristischer Parameter, wie beispielsweise der Turbulenzintensität, ausgewertet werden. Zur Erfassung entsprechender hydraulischer Parameter standen nachfolgend aufgelistete Messinstrumente zur Verfügung:

- Wasserstände: Ultraschall-Sensoren, Stechpegel und bildgebende Systeme
- Fließgeschwindigkeiten: Messflügel, Staurohr, Vectrino-Sonden, Laser-Doppler-Anemometer (LDA, 2D und 3D), Particle Image Velocimetry (PIV)
- Drücke: Piezometer, Manometer
- Verformung: Dehnungsmessstreifen, Lasertracker
- Kräfte: Wägezellen (Druck und Zug)

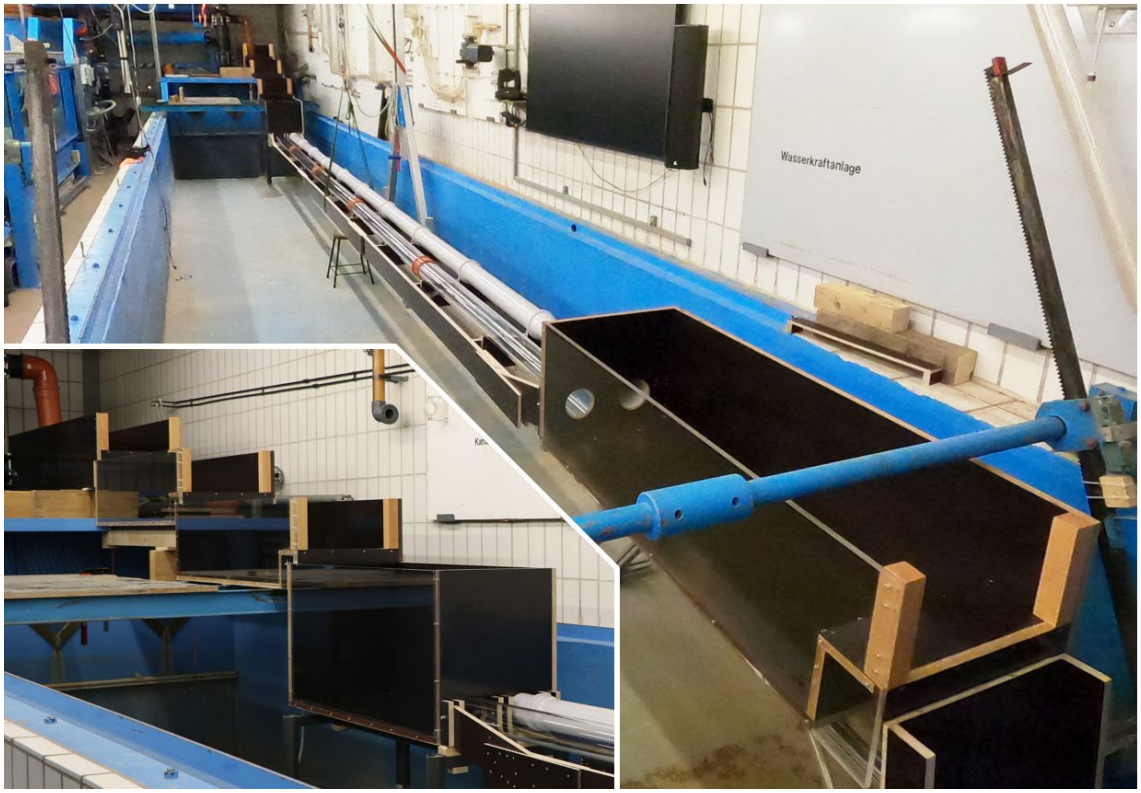


Abbildung 2-7 Fotoaufnahmen des kompletten gegenständlichen Modellversuchsstands sowie der Bereich der Gerinnetreppe (unten links).

Neben beweglichen Messinstrumenten, wie Messflügel oder Vectrino-Sonde zur Erfassung von Fließgeschwindigkeiten, wurden ortsfeste Messwertaufnehmer installiert. Diese waren vorwiegend Ultraschallsensoren (US) zur Erfassung der freien Wasseroberfläche. Dafür wurden 13 US jeweils mittig über dem Modell positioniert, deren genaue Lage entlang der x-Achse (Strömungsrichtung) in Abbildung 2-8 eingesehen werden kann. Der Sensor Nr. 1 wurde über dem Einlaufbecken (EB) installiert, welcher lediglich zur Überprüfung des Abflusses beim Einströmen ins Modellgebiet auf Grundlage einer vorab erarbeiteten W-Q-Beziehung diente. Um für instationäre Lastfälle den Abfluss an weiteren Stellen im Modell zeitlich erfassen zu können, wurden auch W-Q-Beziehungen für die übrigen Beckenausläufe erarbeitet (B1, B2 und ÜB R-G).

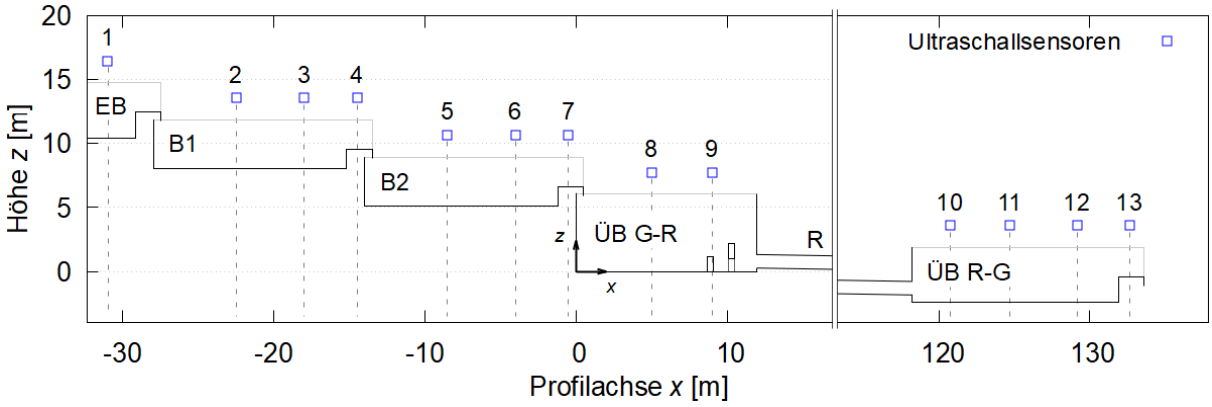


Abbildung 2-8 Lage der Ultraschallsensoren zur Erfassung der Wasserspiegellagen am gegenständlichen Modellversuch im lokalen Koordinatensystem.

Zur Referenzierung der erfassten hydraulischen Parameter wurde ein lokales Koordinatensystem definiert, dessen Ursprung der Abbildung 2-8 entnommen werden kann.

Die in dieser Abbildung dargestellten Bauwerkskonturen repräsentieren jeweils die Innenseiten der Bauwerkswandungen. Somit liegt der lokale Koordinatenursprung der x-z-Ebene am Schnittpunkt der Beckensohle und der Beckenrückwand des Übergangsbeckens G-R.

2.3.4 Lastfälle und Vorgehensweise

Für die Untersuchungen wurden von Seiten des AG vorab keine konkreten Lastfälle definiert. Im Rahmen der Untersuchungen sollten jedoch die in Abschnitt 1 und 2.1 aufgeführten Fragestellungen geklärt werden und die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Anlage zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein.

Es konnte davon ausgegangen werden, dass der maximale Abfluss pro Strang von 10,4 m³/s (ursprüngliche Auslegungswassermenge) hinsichtlich der Beckenauslastung als maßgebend einzustufen ist und damit einen wichtigen Lastfall darstellt. Zusätzlich wurde in Absprache mit dem Auftraggeber im Rahmen von der Projektberatung vom 19.04.2024 ein Abfluss vom 8,1 m³/s pro Strang (maximale planmäßige Beaufschlagung der Einleitung) als relevant definiert. Im Rahmen der gegenständlichen Versuchsdurchführungen wurden v. a. diese Abflüsse herangezogen.

Des Weiteren war davon auszugehen, dass bei bestimmten stationären Abflüssen bzw. der zeitlichen Änderung des Abflusses die in Abschnitt 2.1 aufgeführten hydraulischen Prozesse auftreten können. Diese waren Gegenstand der Untersuchungen und konnten zum Zeitpunkt der Modellerstellung nicht mit einem konkreten Abfluss oder einer Abflusskurve verknüpft werden. Daher wurden im Rahmen der Versuchsdurchführungen variierende Abflusskurven eingesteuert und kritische Zustände identifiziert, um diese anschließend im Detail untersuchen zu können.

Die ersten Versuchsdurchführungen konzentrierten sich auf die Optimierung der Gerinnebecken und beinhalteten die Variation der Beckentiefe sowie der Beckenendwände, welche den resultierenden Überfallstrahl einschnüren. Weiterführend galt es den Lufteintrag in die Rohrleitungen bedingt durch den in das Übergangsbecken G-R eintauchenden Überfallstrahls zu vermeiden bzw. zu minimieren. Im Ergebnis dieser Versuche und mit den in Absprache mit dem AG getroffenen baulichen Anpassungen erfolgte die Durchführung von Versuchen bzgl. der Rohrhydraulik und den damit in Verbindung stehenden Optimierungen. Aufgrund der Anpassung der Auslegungswassermenge (siehe Abschnitt 1) wurden, u. a. basierend auf den am Modellversuch erfassten Daten, analytische Berechnungen durchgeführt, um die hydraulischen Verhältnisse in der Einleitung zu prognostizieren.

2.3.5 Ergänzende Hinweise zur Übertragbarkeit

Im Rahmen der Untersuchungen stellten sich hydraulische Prozesse ein, welche hinsichtlich der Beurteilung der Übertragbarkeit auf den Naturmaßstab eine Korrektur erfasster Größen bzw. ein vertieftes Prozessverständnis erforderten. Diese Prozesse waren v. a. der Lufteintrag infolge des Eintauchens eines Überfallstrahls in einen Wasserkörper sowie der Einfluss von Reibungsverlusten entlang der Rohrleitungsstrecken.

<u>Anmerkungen zu Lufteintrag und -austrag am gegenständlichen Modell</u>

Die Viskosität und Dichte des Wassers und der Luft wurden im Froudeschen Modell nicht skaliert und waren im Verhältnis zu den skalierten Größen zu groß. Auch die Oberflächenspannung des Wassers wurde nicht auf die Modellgröße angepasst. Theoretisch kann also davon ausgegangen werden, dass die Abmessungen eingetragener

Luftblasen im Modell, in etwa der gleichen Größenordnung entsprachen wie im Naturmaßstab. Folglich war im Modellversuch von einer Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen auszugehen, wie es im Naturmaßstab der Fall ist. D. h., dass die Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen im Modell überschätzt wurde und eine Entlüftung grundsätzlich zu rasch erfolgte.

Bzgl. des Luftgehalts, welcher mit dem Überfallstrahl in den Wasserkörper eingetragen wurde, ist, auch aufgrund der nicht skalierten Stoffgrößen, davon auszugehen, dass die Bildung von Luftblasen gegenüber der Natur gehemmt war und so der Lufteintrag im Modell unterschätzt wurde.

Dem gegenüber steht die Tatsache, dass entsprechend der Froudeschen Ähnlichkeit die Geschwindigkeiten im Modellversuch in Relation zu den Längen um den Faktor 3,25 (M_l / M_v = 10,6 / 3,26 = 3,25) größer abgebildet wurden. Höhere Geschwindigkeiten im Überfallstrahl resultieren i. d. R. in einem größeren Lufteintrag und in einer größeren Eindringtiefe der Luftblasen. Vor diesem Hintergrund ist also davon auszugehen, dass der Lufteintrag im Modell überschätzt wurde, gleichzeitig aber eine beschleunigte Entlüftung erfolgte.

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der nicht skalierten Stoffgrößen (höhere Entlüftungsgeschwindigkeiten) etwas größer war, als der Einfluss aufgrund der Maßstabsfaktoren entsprechend der Froudeschen Ähnlichkeit (erhöhter Lufteintrag und zu tiefes Eindringen der Luftblasen). Daher ist es wahrscheinlich, dass der am Modell beobachtete Lufteintrag ins Übergangsbecken G-R im Vergleich zur Realität leicht unterschätzt wurde. Die räumliche Ausbreitung der Luftblasen im Wasserkörper muss davon jedoch nicht zwangsläufig stark beeinträchtigt sein. Vor diesem Hintergrund kann angenommen werden, dass die beobachtete räumliche Ausdehnung der Luftblasen im Wasserkörper mit dem Modelllängenmaßstab mit ausreichender Genauigkeit auf die Natur übertragbar ist. Belastbare Aussagen zur Übertragbarkeit dieser Prozesse auf natürliche Verhältnisse lassen sich nicht ohne Weiteres formulieren und stellen grundsätzlich eine Unschärfe bei der Anwendung des Froudeschen Modellgesetzes dar.

<u>Anmerkungen zum Einfluss der Reibung am gegenständlichen Modell</u>

Der gegenständliche Modellversuchstand des Einleitbauwerks für den Tagebausee Hambach wurde im Längenmaßstab 1 : M_l = 1 : 10,6 entsprechend der Froudeschen Ähnlichkeitstheorie umgesetzt. Entsprechend des Abschnitts 2.3.2 können mit der Anwendung des Froudeschen Modellgesetzes Limitationen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Strömungsprozesse auf die Natur einher gehen. In diesem Zusammenhang und im Hinblick auf die beobachteten Strömungsprozesse im Modell der Einleitung war u. a. der Einfluss der Reibung zu beachten.

Speziell bei der Durchströmung von längeren Rohrleitungen im Froudeschen Modell kann der Einfluss der Reibungskräfte nicht vernachlässigt werden und die Übertragbarkeit auf die Natur ist nicht mehr gewährleistet. Im vorliegenden Fall bezog sich dies maßgeblich auf die streckenabhängigen Verluste aufgrund der Rohrleitungslängen.

In der Einleitung sollen planmäßig Kunststoffrohrleitungen (Rohrmaterial PE) verbaut werden, welche im Vergleich zu anderen Baustoffen, wie Beton oder Stahl, grundsätzlich geringere Oberflächenrauheiten aufweisen. Entsprechend den Angaben des AG werden die Kunststoffrohrleitungen einen Rauigkeitswert von k = 0,007 mm aufwei-

sen. Die Rohre im Modell müssten demnach einen sehr kleinen Rauheitswert von k_{Modell} = 0,00066 mm (= k_{Natur} / M_l) aufweisen. Hinzu kommt, dass die Geschwindigkeiten im Modell im Verhältnis zu den Längen um den Faktor 3,25 überhöht dargestellt sind (siehe oben) und die reibungsbedingten hydraulischen Verluste gemäß der Darcy-Weisbach-Gleichung näherungsweise proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit sind. Um die reibungsbedingten Verluste im Modell naturnah abbilden zu können, müsste die Oberfläche der Rohre im Modell also noch glatter ausgeführt werden. Dies ist praktisch nicht umsetzbar und es musste auf handelsübliche Plexiglasrohre zurückgegriffen werden, welche i. d. R. einen Rauheitswert von ca. k = 0,005 mm aufweisen. Folglich resultierte im Modell ein größerer Reibungsverlust, was sich durch einen deutlich erhöhten Wasserstand im Übergangsbecken G-R bemerkbar machte. D. h., dass im Modell die Reibungskräfte gegenüber der Natur zu groß ausfielen und demnach eine größere Druckhöhe notwendig war, um die Einhaltung eines entsprechenden Abflusses gewährleisten zu können.

Vor diesem Hintergrund können grundsätzlich zwei Herangehensweisen verfolgt werden, um diesen Effekt in der Ergebnisdarstellung zu korrigieren. Einerseits kann eine Umrechnung von am Versuch erfassten Wasserständen im ÜB G-R $h_{WSP,Modell}$ in Naturwerte der Wasserstände $h_{WSP,Natur}$ mit der Gleichung 2-1 erfolgen. Dabei stellt $h_{VR,Modell}$ bzw. $h_{VR,Natur}$ jeweils die entsprechende Verlusthöhe infolge der Reibung entlang der Rohrleitung dar.

$$h_{WSP,Natur} = (h_{WSP,Modell} - h_{VR,Modell}) \cdot M_l + h_{VR,Natur} \qquad 2\text{-}1$$

Mit diesem Vorgehen resultieren im Modell zu hohe Wasserstände im ÜB G-R, welche im Rahmen der Auswertung mit der vorgestellten Gleichung zu korrigieren sind. Theoretisch sind dabei keine Veränderungen am Modellaufbau notwendig. Jedoch muss gewährleistet sein, dass der überhöhte Wasserstand im ÜB G-R dargestellt werden kann, ohne, dass das Becken überläuft. Für den maximalen Abfluss von 10,4 m³/s war Wasserübertritt über die Beckenwände zu verzeichnen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich durch die überhöhten Wasserstände im ÜB G-R die Fallhöhe des einfallenden Überfallstrahls aus dem vorgelagerten Gerinnebecken reduziert und so auch die Strömungsausbildung im Becken beeinflusst wird.

Alternativ zur beschriebenen Vorgehensweise können auch direkt am Versuchsstand näherungsweise die tatsächlichen Wasserstände im ÜB G-R erhalten werden. Dazu ist der stützende Gegendruck im ÜB R-G am Ende der Rohrleitungsstrecke und damit das hydraulische Gefälle entsprechend anzupassen. Zielführend kann das mit der Anpassung der Höhenlage des ÜB R-G erfolgen. Im Konkreten muss also das ÜB R-G um die Differenz in der Verlusthöhe aufgrund der Reibung zwischen dem Modell und der Natur herabgesetzt werden. Die erforderliche Differenz in der Höhenlage $\Delta h_{VR,Natur}$ kann in Abhängigkeit des Abflusses, welcher bei der Berechnung der theoretischen Verlusthöhe Berücksichtigung findet, ausgerechnet werden, vgl. Gleichung 2-2.

$$\Delta h_{VR,Natur} = h_{VR,Modell} \cdot M_l - h_{VR,Natur} \qquad 2\text{-}2$$

Da eine dynamische Anpassung der Höhenlage des ÜB R-G während einer Versuchsdurchführung nicht vorgesehen war, kann dieses Vorgehen nur für stationäre Abflüsse zielführend erfolgen, indem vor dem Versuch die auf den Abfluss angepasste Höhenlage des ÜB R-G eingestellt wird. Mit diesem Vorgehen muss jedoch eine Vergrößerung des Gefälles der Rohrleitungsstrecke (I > 2%) in Kauf genommen werden.

Die beiden beschriebenen Herangehensweisen basieren auf der theoretischen Bestimmung der streckenabhängigen Reibungsverluste. Um diese abschätzen zu können, wurden die Reibungsbeiwerte λ anhand der Prandtl-Colebrook-Formel ermittelt, vgl. Gleichung 2-3.

$$\lambda = \left[-2 \cdot log\left(\frac{2{,}51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k/d}{3{,}71} \right) \right]^{-2} \qquad 2\text{-}3$$

Der Reibungsbeiwert ist demnach abhängig vom Rauigkeitswert des Rohrleitungsmaterials k [mm], vom Rohrinnendurchmesser der Leitungen d [mm] und von der Strömung, welche durch die Reynoldszahl Re beschrieben wird. Die Verlusthöhe infolge der Reibung h_{VR} kann anschließend mit der Gleichung 2-4 bestimmt werden.

$$h_{VR} = \frac{\lambda \cdot l_R}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \qquad 2\text{-}4$$

Mit l_R der Rohrleitungslänge, v der Fließgeschwindigkeit in der Rohrleitung, d [m] der Rohrinnendurchmesser und g der Fallbeschleunigung.

In Analogie zu den streckenabhängigen Verlusten, kann eine Korrektur auf die Ein- und Auslaufverluste erfolgen. Abbildung 2-9 veranschaulicht skizzenhaft die Auswirkungen des mit dem Froudeschen Modell nicht übertragbaren Einflusses der Reibungskräfte am System *ÜB G-R → R → ÜB R-G*.

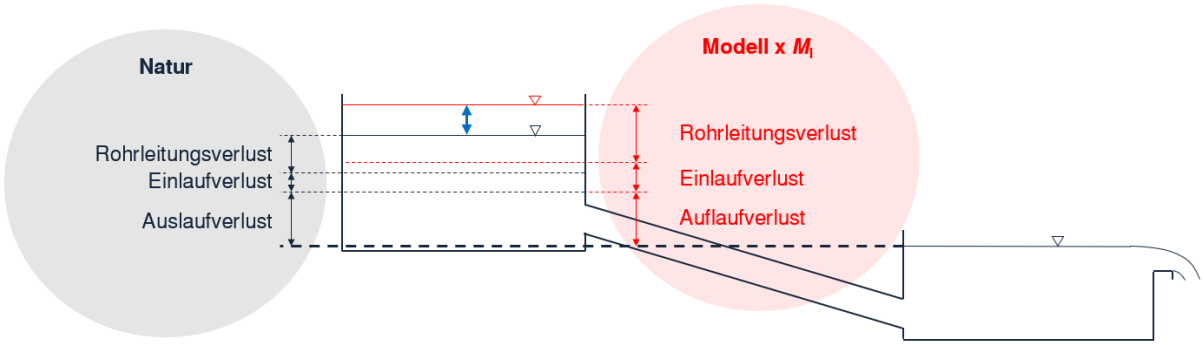


Abbildung 2-9 Skizze zu den Auswirkungen des mit dem Froudeschen Modell nicht übertragbaren Einflusses der Reibungskräfte am Modell.

Für die geplanten Kunststoffleitungen wurde, wie beschrieben, ein Rauigkeitswert von k = 0,007 mm herangezogen. Der Hersteller der im Modell verbauten Plexiglasrohre nennt leider keine Angaben zur Rauigkeit der Rohre. Entsprechend allgemein zugänglichen Informationen können für extrudierte Plexiglasbauteile Rauigkeitswerte von k = 0,003 bis 0,007 mm erwartet werden. Vor diesem Hintergrund wurde für die Korrektur im Rahmen der durchgeführten Versuche ein Rauigkeitswert von k = 0,005 mm angenommen. Dies stellt eine pragmatische Herangehensweise dar, wobei Abweichungen der tatsächlichen Rauigkeit die resultierenden Verlusthöhen beeinflussen. Eine mögliche Abweichung des tatsächlichen Rauigkeitswert von Δk = 0,002 mm für die am Versuch verbauten Plexiglasrohre (Länge: 106 m in Natur) resultiert bei einem Abfluss von 10,4 m³/s in einer Verlusthöhendifferenz von ca. 0,025 m umgerechnet in den Naturmaßstab.

Für die maßgebenden Abflüsse, bei welchen stets Druckabfluss vorherrschte, sind in Tabelle 2-3 analytisch die berechneten Verlusthöhen für eine 106 m lange Leitung (Natur) sowie für die 10 m langen Plexiglasrohre im Modell aufgezeigt. Daraus wird

u. a. die Größenordnung der Differenzen zwischen den Verlusthöhen im Modell und in Natur deutlich.

Tabelle 2-3 Analytisch bestimmte Verlusthöhen infolge Reibung entlang der im Modell abgebildeten Rohrleitungen (l_R = 106 m) für ausgewählte Abflüsse.

Q_{Natur} [m³/s]	$h_{VR,Natur}$ [m]	$h_{VR,Modell}$ [m]	$h_{VR,Modell} \cdot M_l$ [m]	$\Delta h_{VR,Natur}$ [m]
5,5	0,497	0,086	0,912	0,415
6,75	0,729	0,124	1,314	0,585
8,1	1,026	0,173	1,834	0,808
10,4	1,644	0,273	2,894	1,250

Zur Korrektur dieser Differenzen wurde am Versuchsstand das Übergangsbecken R-G in seiner Höhenlage an den jeweiligen (stationären) Abfluss angepasst. In der Lageänderung des Beckens wurde zudem auch die Differenz der lokalen Ein- und Auslaufverluste berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund erfolgte eine Absenkung des Übergangsbeckens R-G im Modell um

- $\Delta h_{korr,Modell}$ = 4,1 cm bei Q = 5,50 m³/s,
- $\Delta h_{korr,Modell}$ = 5,8 cm bei Q = 6,75 m³/s,
- $\Delta h_{korr,Modell}$ = 8,0 cm bei Q = 8,10 m³/s und
- $\Delta h_{korr,Modell}$ = 12,4 cm bei Q = 10,40 m³/s.

Aufgrund der Anpassungen der Höhenlage des Übergangsbeckens R-G mussten Änderungen im Gefälle der Rohrleitungen in Kauf genommen werden. Ausgehend vom planmäßigen Gefälle von 2% ergaben sich demnach größere Rohrleitungsgefälle, z. B. 2,8% für Q = 8,1 m³/s und 3,2% für Q = 10,4 m³/s.

Neben den Abflüssen 5,5, 6,75, 8,1 und 10,4 m³/s, wurden im Rahmen der Untersuchungen auch geringere stationäre sowie instationäre Abflusszustände eingesteuert. Da für diese Lastfälle teilweise kein kontinuierlicher Druckabfluss in den Leitungen vorherrschte sowie die Veränderung der Lage des Übergangsbeckens R-G während der Versuchsdurchführung grundsätzlich nicht möglich war, konnte eine Korrektur aufgrund der Rohrreibung nicht erfolgen. Für diese Lastfälle wurde $\Delta h_{korr,Modell}$ = 12,4 cm (Q = 10,4 m³/s) eingestellt. Im Resultat wurden die am Versuch beobachteten Wasserstände im ÜB G-R bei Abflüssen kleiner 10,4 m³/s etwas unterschätzt. Eine genaue Quantifizierung der Abweichungen war im Zusammenhang mit den Versuchsdurchführungen nicht erforderlich, da hinsichtlich des erforderlichen Freibords am ÜB G-R der Abfluss von 10,4 m³/s zu maßgebenden Wasserständen führt.

3 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Nachfolgende aufgeführte Angaben und Messergebnisse sind grundsätzlich im Naturmaßstab angegeben. Werden abweichend davon Angaben im Modellmaßstab getätigt, ist dies entsprechend ausgewiesen.

3.1 UNTERSUCHUNGEN ZU DEN GERINNETREPPEN

3.1.1 3D-HN-Simulationen zur Gerinnetreppe

Im Rahmen der Auswertung der numerischen Simulation zum Planzustand der Gerinnetreppen konnten ungünstige hydraulische Verhältnisse v. a. in den (Standard-)Becken aufgezeigt werden. Ein Fließwechsel in den Becken konnte nicht nachgewiesen werden, weshalb durchgehend schießender Abfluss zu erwarten ist und der Energiegehalt der Strömung von Becken zu Becken zunimmt. Dieser Umstand ist u. a. erkennbar aufgrund der Wurfweite des Überfallstrahls beim Eintritt in das jeweils nachfolgende Becken, welche mit der Anzahl durchströmter Becken zunimmt (vgl. Abbildung 3-1).

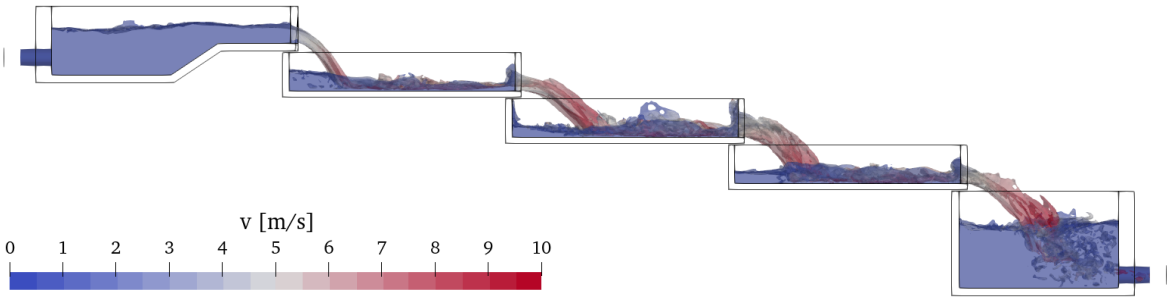


Abbildung 3-1 Seitenansicht des Wasserkörpers im numerischen Modell des ursprünglichen Planzustands als Momentaufnahme inkl. Darstellung der Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche.

Ein weiteres Defizit stellt die konstruktive Ausbildung des Übergangsbeckens G-R hinsichtlich des Lufteintrags in die Rohrleitungen dar. Mit dem Eintauchen des Überfallstrahls in das Übergangsbecken wird ein nicht unerheblicher Lufteintrag prognostiziert. Ein Teil der eingetragenen Luft wird im weiteren Verlauf mit der Strömung in die Rohrleitungen transportiert und kann dort zu ungünstigen hydraulischen Verhältnissen führen. Die Abbildung kleiner Luftblasen oder Wassertropfen ist im numerischen Modell im Allgemeinen nur eingeschränkt möglich, da die räumliche Diskretisierung mit der Anwendung der Finite-Volumen-Methode begrenzt ist. Luftblasen, deren Durchmesser kleiner als die Zellgröße ist, werden daher nicht direkt dargestellt. Stattdessen liefert lediglich der Wert der Wasserkonzentration in der jeweiligen Zelle Hinweise auf das theoretische Vorhandensein einer Luftblase. Das generelle Auftreten vom Lufteintrag (quantitativ nicht eindeutig belastbar) sowie dessen etwaige Ausbreitung im Wasserkörper kann dennoch überschlägig erfolgen. Daraus folgt, dass die Simulation vor allem qualitative Aussagen über die Verteilung und Dynamik von Luftblasen zulässt, während exakte Konzentrationswerte nur eingeschränkt interpretierbar sind.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse zum Planzustand der Gerinnetreppen wurden Anpassungen der Beckenkonstruktionen erarbeitet, diese entsprechend in numerischen Modellen umgesetzt und die hydrodynamischen Berechnungen ausgeführt

und ausgewertet. Die Anpassungen der jeweiligen Varianten sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1 Anpassungen der Gerinnetreppen ausgehend vom Planzustand für die 3D-HN-Untersuchungen.

Variante	Bauteil	Anpassung
N1	ÜB R-G	keine
	B	Vertiefung der Beckensohle um 2,0 m sowie Ausbildung einer Sohlrampe entsprechend des Übergangsbeckens R-G
	ÜB G-R	Beckenverlängerung um 2,0 m und Anbringung von Prallwänden
N2	ÜB R-G	Entfernen der Sohlrampe und Ausbildung einer durchgehenden Beckensohle sowie einer Beckenendschwelle
	B	Vertiefung der Beckensohle um 2,0 m und Ausbildung einer Beckenendschwelle
	ÜB G-R	Beckenverlängerung um 2,0 m und Anbringung von Prallwänden
N3 (Bt 1.5)	ÜB R-G	Entfernen der Sohlrampe und Ausbildung einer durchgehenden Beckensohle sowie einer Beckenendschwelle
	B	Vertiefung der Beckensohle um 1,5 m und Ausbildung einer Beckenendschwelle
	ÜB G-R	Beckenverlängerung um 2,0 m und Anbringung von Prallwänden
N4 (Bt 1.0)	ÜB R-G	Entfernen der Sohlrampe und Ausbildung einer durchgehenden Beckensohle sowie einer Beckenendschwelle
	B	Vertiefung der Beckensohle um 1,0 m und Ausbildung einer Beckenendschwelle
	ÜB G-R	Beckenverlängerung um 2,0 m und Anbringung von Prallwänden
N5 (Bt 0.5)	ÜB R-G	Entfernen der Sohlrampe und Ausbildung einer durchgehenden Beckensohle sowie einer Beckenendschwelle
	B	Vertiefung der Beckensohle um 0,5 m und Ausbildung einer Beckenendschwelle
	ÜB G-R	Beckenverlängerung um 2,0 m und Anbringung von Prallwänden

Die Anpassungen des ÜG G-R (Verlängerung und Prallwände) führten grundsätzlich zu einer verbesserten Strömungssituation hinsichtlich des Lufteintrags in die Rohrleitungen. Da die Abbildung von Luftblasen in 3D-HN-Modellen unter Anwendung der VOF-Methode grundsätzlich nur begrenzt möglich ist, war zu diesem Zeitpunkt (das gegenständliche Modell war noch nicht erstellt) keine aussagekräftige Prognose hinsichtlich des tatsächlichen Lufteintrags möglich. In Absprache mit dem AG wurde festgelegt, dass das ÜB G-R mit einer Verlängerung von 2,0 m im gegenständlichen Modell umgesetzt werden soll und daran weitere Optimierungen, beispielsweise über das Einbringen von Prallwänden, vorzunehmen sind.

Mit der Anpassung des ÜB R-G, also dem Entfernen der Sohlrampe, konnten keine maßgebenden Veränderungen der hydraulischen Situation im Becken sowie hinsichtlich des resultierenden Überfallstrahls aufgezeigt werden. Das angepasste Becken stellt jedoch aus bautechnischer Sicht eine Vereinfachung dar und wurde so entsprechend im gegenständlichen Modell umgesetzt.

Alle untersuchten Beckentiefen der (Standard-)Becken gegenüber dem Planzustand zeigten eine deutliche Verbesserung der Strömungssituation. Die durch die Beckenvertiefungen entstandenen Wasserreservoire tragen maßgebend zur Energieumwandlung des Überfallstrahls bei. Auch der jeweils resultierende Überfallstrahl zeigt keine nennenswerten Variationen unter den aneinandergereihten Becken auf (vgl. Abbildung 3-2). Vor dem Hintergrund, dass die Verringerung der Beckentiefe im gegenständlichen Modell mit Hilfe von Einlegeböden verhältnismäßig einfach umsetzbar ist, wurde festgelegt, die Variante N3, also eine Beckenvertiefung vom 1,5 m im Versuchsstand zu berücksichtigen.

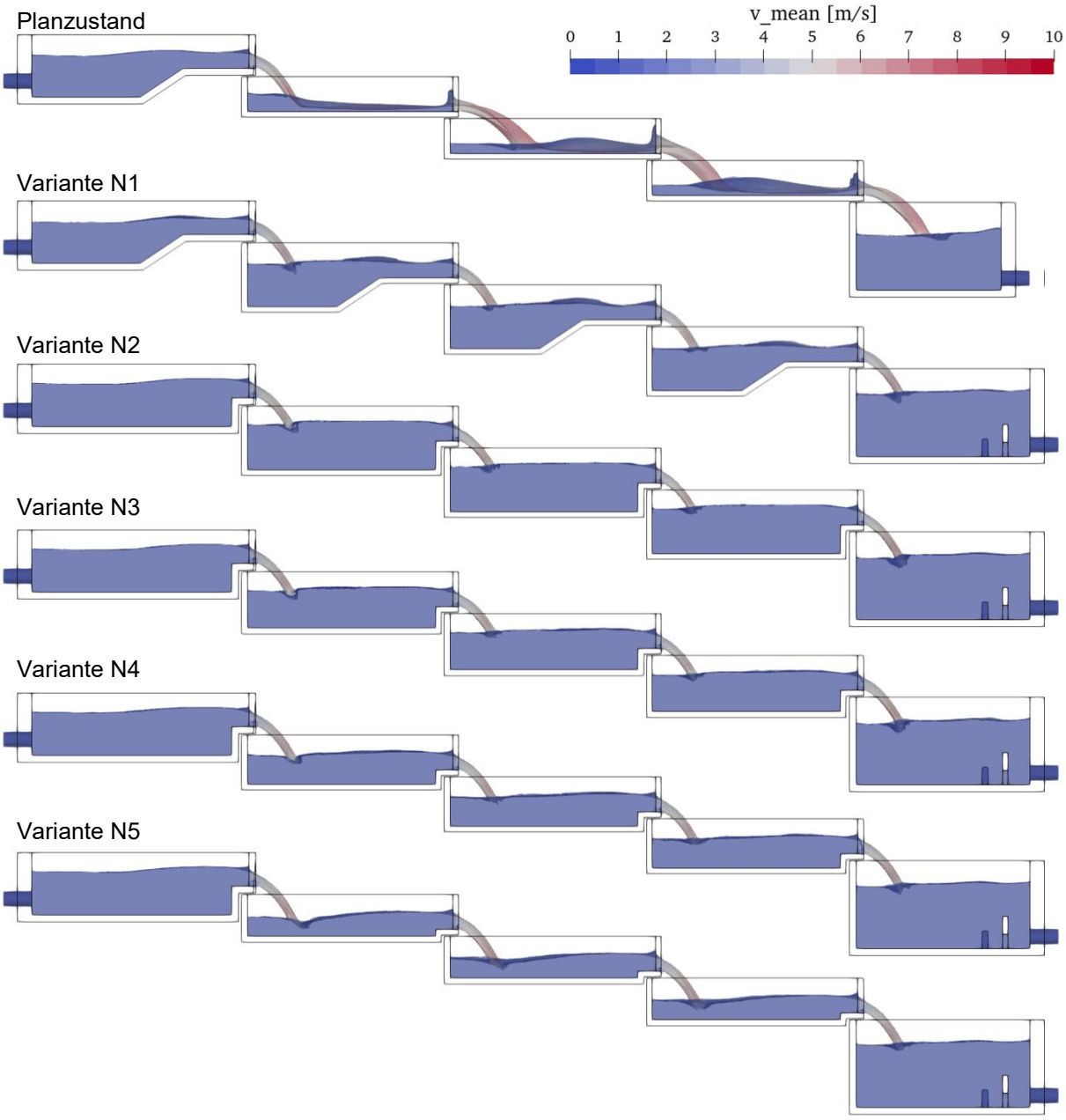


Abbildung 3-2 Gegenüberstellung der untersuchten Varianten mittels 3D-HN-Modellierung; Darstellung der zeitlich gemittelten Wasserspiegellage und der gemittelten Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche.

3.1.2 Optimierung der Beckentiefen der Gerinnebecken

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den numerischen Simulationen (vgl. Abschnitt 3.1) wurden bereits bei der baulichen Umsetzung des gegenständlichen Modellversuchs Anpassungen des Planzustands berücksichtigt. So wurden u. a. die Gerinnebecken so ausgeführt, dass die Beckentiefe mit überschaubarem baulichem Aufwand variiert werden konnte. In diesem Zusammenhang erfolgten Versuchsdurchführungen für Beckentiefen (Bt) von 1,5, 1,0 und 0,5 m jeweils für die Abflüsse von 10,4 und 8,1 m³/s. Dabei wurden in erster Linie die Wasserstände mittels der installierten Ultraschallsensoren (US) erfasst. Zusätzlich gewährleistete die jeweils orthogonal zu den Plexiglas-Seitenwänden der Becken ausgerichtete Bilderfassung (pic) eine Auswertung der Wasserspiegellage an den entsprechenden Beckenseitenwänden sowie

der Oberkante des Überfallstrahls. Die erfassten Wasserspiegellagen sind in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 vergleichend gegenübergestellt.

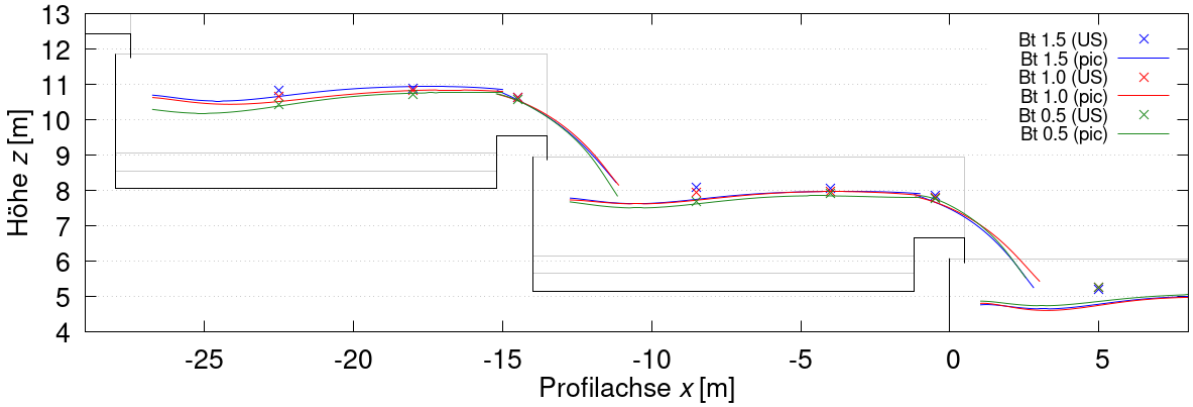


Abbildung 3-3 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckentiefen für Q = 10,4 m³/s.

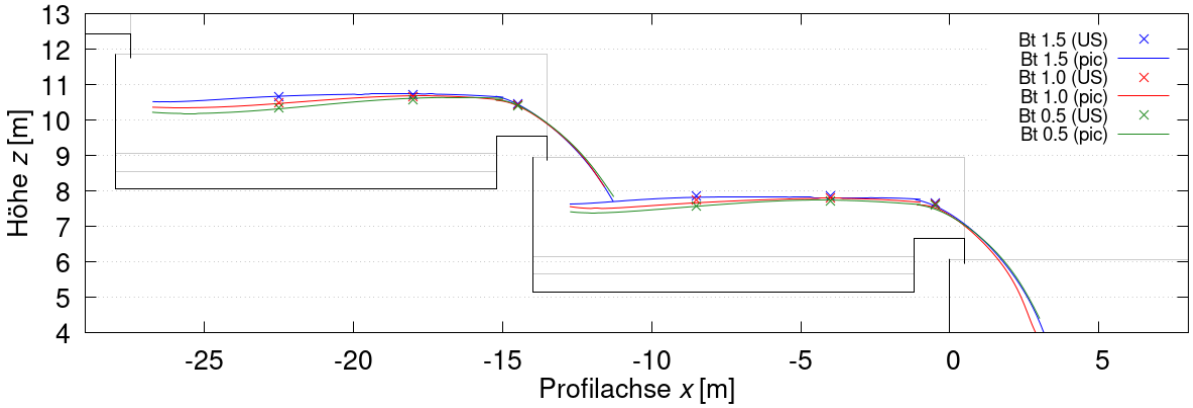


Abbildung 3-4 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckentiefen für Q = 8,1 m³/s.

Der Wasserspiegellagenauswertung ist zu entnehmen, dass die resultierenden Wasserstände am Beckenende nur marginale Differenzen aufwiesen. Im Bereich des eintauchenden Überfallstrahls, also im vorderen Bereich der Gerinnebecken, konnten diesbezüglich deutlichere Differenzen aufgezeigt werden. So ist dort mit zunehmender Beckentiefe eine Zunahme der lokalen Höhenlage des Wasserspiegels zu erwarten.

Des Weiteren wurde der Lufteintrag in den Wasserkörper infolge des Eintauchens des Überfallstrahls mittels bildgebender Verfahren analysiert. Dazu wurden die Bildaufnahmen in Graustufenbilder überführt und für jeden Pixel der mittlere Grauwert über mehrere Bilder bestimmt. Auf diese Weise wurden Grauwertbilder erhalten, welche den lokalen Luftgehalt der Strömung rein qualitativ abbilden können. In Abbildung 3-5 sind die Graustufenbilder bei variierenden Beckentiefen für einen Abfluss von 10,4 m³/s dargestellt.

Dabei ist zu erkennen, dass die Beckentiefe im Allgemeinen nur geringen Einfluss auf den Luftgehalt und die räumliche Verteilung der eingetragenen Luft nimmt. Lediglich zum Beckenende hin ist eine leichte Abnahme des Luftgehalts wahrzunehmen. Demnach kann mit abnehmender Beckentiefe eine Zunahme des Luftgehalts beim Ausströmen aus den Gerinnebecken, also am Überfallstrahl, erwartet werden. Bei größeren Beckentiefen erfolgt demnach eine etwas effizientere Entlüftung.

Beckentiefe 1,5 m



Beckentiefe 1,0 m



Beckentiefe 0,5 m



Abbildung 3-5 Gegenüberstellung der zeitlich gemittelten Graustufenbilder zur qualitativen Abschätzung des örtlichen Luftgehalts der Strömung für Q = 10,4 m³/s.

Auf Grundlage der Untersuchungen zur Beckentiefe wurde in Absprache mit dem AG für alle nachfolgenden Versuchsdurchführungen eine Beckentiefe von 1,0 m (Natur) berücksichtigt.

3.1.3 Optimierung der Überfalleinschnürung der Gerinnebecken

Im Rahmen der Versuchsdurchführungen zur Tiefe der Gerinnebecken konnte über die Beckenwände tretendes Wasser infolge des Überfallstrahls beobachtet werden. Mit den Beckenendwänden, welche entsprechend des Planzustands mit einer Länge von jeweils 50 cm vorgesehen waren, konnte demnach keine ausreichende Einschnürung des Überfalls erreicht werden. Insgesamt wurden drei Anpassungen der Beckenendwände vorgenommen und die Ausbildung des Überfalls jeweils mittels Videotechnik erfasst. Abbildung 3-6 zeigt die baulichen Varianten sowie die resultierenden Überfallsstrahlausbildungen jeweils bei einem Abfluss von 10,4 m³/s.

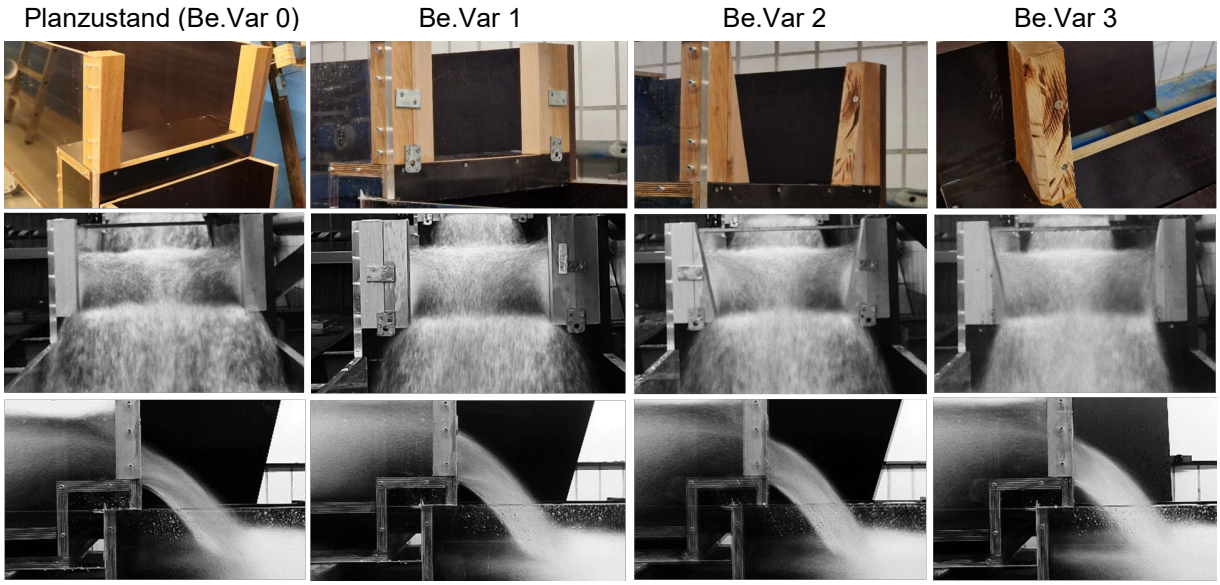


Abbildung 3-6 Darstellung der baulichen Varianten der Beckenendwände sowie die resultierende Überfallstrahlausbildung in der Frontal- und Seitenansicht bei einem Abfluss von Q = 10,4 m³/s.

In Analogie zu den Versuchsdurchführungen bzgl. der Beckentiefen wurden die Wasserspiegellagen für die variierenden baulichen Varianten der Beckenendwände für Abflüsse von 10,4 und 8,1 m³/s messtechnisch erfasst (für Be.Var 2 wurde der Lastfall Q = 8,1 m³/s nicht aufgenommen). Diese sind in Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 dargestellt.

In Abhängigkeit der Abmessungen der Beckenendwände variiert grundsätzlich die zur Verfügung stehende Abflussbreite aus den Becken. Im Planzustand resultiert eine über die Wassertiefe gleichbleibende Abflussbreite von 4,0 m. Diese stellt unter den Varianten die größte Abflussbreite dar und folglich ergaben sich im Versuch die geringsten Wasserstände in den Becken (blau). Mit den baulichen Varianten resultierte eine verbesserte Einschnürung des Überfallstahls, jedoch ergaben sich in diesem Zusammenhang auch höhere Wasserstände in den Becken. Zwischen den Varianten Be.Var 1, 2 und 3 zeigte sich jedoch, dass bei gleichzeitiger Optimierung der Überfallstrahleinschnürung von Be.Var 1 zu Be.Var 3 eine (geringfügige) Reduzierung der Wasserstände erreicht werden konnte. Diese Reduzierung der Wasserstände resultierte aus dem Strömungswiderstand, welcher mit der jeweiligen Variante einherging. Dies ist teilweise in Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 erkennbar.

Die Variante Be.Var 3 stellte in diesem Zusammenhang die priorisierte Anpassung der untersuchten Beckenendwände dar. Mit der Vergrößerung der Abflussbreite mit zunehmender Wandhöhe konnte ein guter Kompromiss zwischen den resultierenden Wasserständen in den Becken und der Einschnürung des Überfalls erreicht werden. Weiter konnte mit der Anfasung der innenliegenden Kante der Beckenendwände die Strahlablösung und damit die Einschnürung des Überfallstrahls verbessert werden.

Im Zusammenhang mit den Überfalleinschnürungen konnte der Wasserverlust über die seitlichen Beckenwände deutlich reduziert werden. Infolge des Eintauchens des Überfallstrahls in den Wasserkörper des jeweils unterwasserseitigen Beckens konnte lediglich ein sehr geringer Wasseraustritt in Form von Spritzwasser beobachtet werden. Diese verbleibende Spritzwassermenge wurde, vor dem Hintergrund der eingeschränkten Übertragbarkeit von Luft-Wasser-Gemischen auf den Naturmaßstab, als vernachlässigbar angesehen. Durch das Anbringen einer Spritzschutz-Barriere auf den seitlichen Beckenwänden oder einer Teilabdeckung der Becken (beides nicht im

Modell untersucht) kann das verbleibende Risiko des Spritzwasseraustritts im Betrieb an der Anlage weiter reduzieren werden.

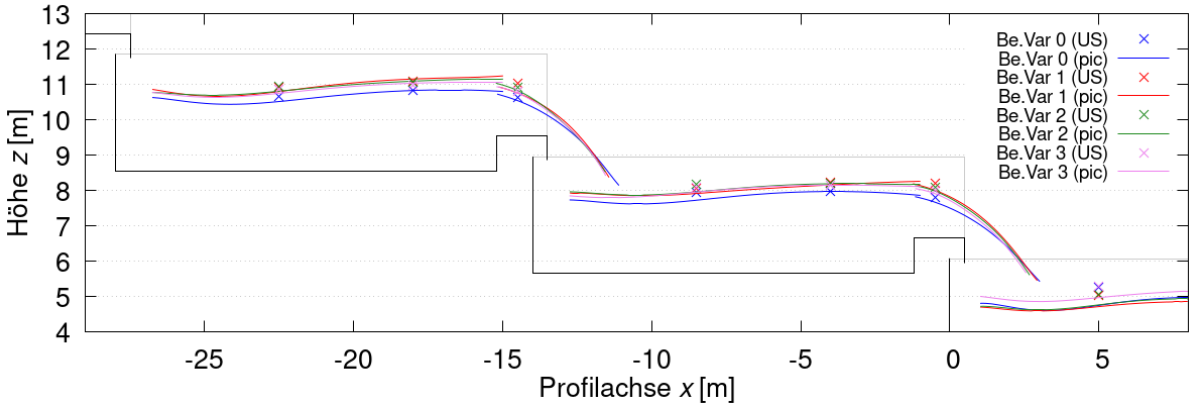


Abbildung 3-7 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckenendwänden für Q = 10,4 m³/s.

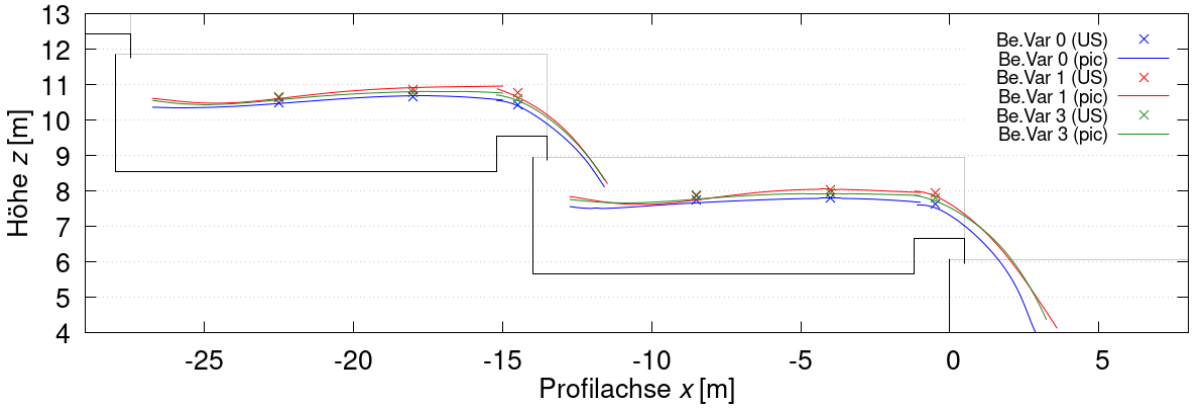


Abbildung 3-8 Gegenüberstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen bei variierenden Beckenendwänden für Q = 8,1 m³/s.

Auf Grundlage der Untersuchungen zur Überfallstrahleinschnürung wurde in Absprache mit dem AG für alle nachfolgenden Versuchsdurchführungen die Beckenendwandvariante Be.Var 3 berücksichtigt.

Weiterführende Optimierung der Beckenausläufe (Bachelorarbeit)

Parallel zu den laufenden Untersuchungen an der Einleitung wurden Versuche bzgl. der Optimierung der Überfallstrahlausbildung im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt. Mit den in Abbildung 3-9 links und mittig dargestellten baulichen Ausführungen der Beckenausläufe (Be.Var 4 und 5) konnte gegenüber den vorangegangenen Varianten eine nochmals verbesserte Überfallstahleinschnürung bei gleichzeitig geringen Überfallhöhen erreicht werden. Im Detail zeigte sich eine verbesserte Bündelung des Überfallstrahls beim Eintauchen ins unterwasserseitig angeordnete Becken, wodurch das verbleibende Risiko des Wasseraustritts weiter reduziert werden konnte.

Des Weiteren wurde im Nachgang einer Modellbesichtigung mit RWE abschließend eine weitere Variante bzgl. der Beckenauslaufgestaltung untersucht und mit Be.Var 6 betitelt. Diese Variante stellte eine Weiterführung der Be.Var 5 mit jeweils einer Fußbreite der Einschnürungswände von 1,0 m dar (vgl. Abbildung 3-9, rechts).

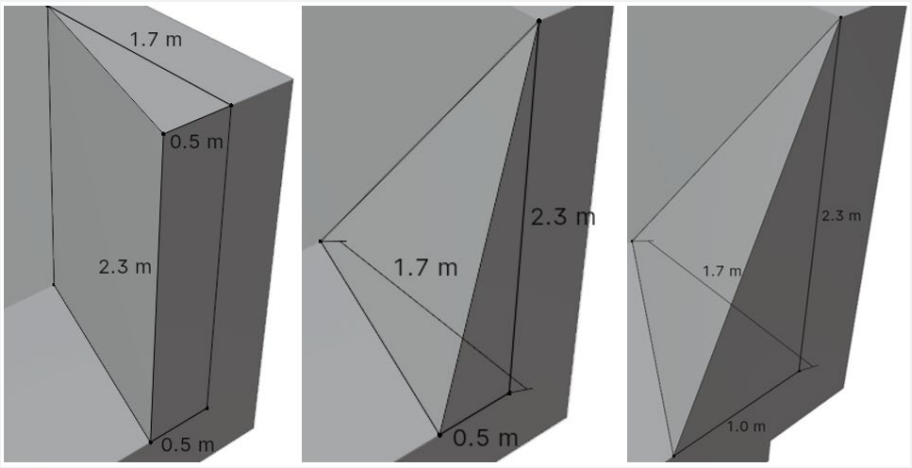


Abbildung 3-9 Bauliche Ausführung der Beckenausläufe zu den Vorzugsvarianten Be.Var 4 (links), Be.Var 5 (mittig) und Be.Var 6 (rechts).

Die Untersuchungen erfolgten lediglich an einem der Gerinnebecken und für einen Abfluss von 10,4 m³/s. Die nachfolgenden Freibordmaße und Wasserstände wurden im Rahmen der Versuche erfasst:

- Be.Var 4: f_{min} = 0,93 m | h_{max} = 2,37 m
- Be.Var 5: f_{min} = 1,00 m | h_{max} = 2,30 m
- Be.Var 6: f_{min} = 0,89 m | h_{max} = 2,41 m

Momentaufnahmen dieser Varianten im Versuch, in welchen jeweils die Ausbildung des Überfallstrahls zu erkennen ist, sind in Abbildung 3-10 dargestellt. Dabei ist die seitliche Überfalleinschnürung gut zu erkennen. Vor dem Hintergrund, dass im Betrieb der Anlage eine gewisse Relativverschiebung der Gerinnebecken nicht ausgeschlossen werden kann, wurde die Variante Be.Var 6 als die abschließende Vorzugsvariante behandelt. Diese gewährleistete eine sehr gute Überfalleinschnürung bei gleichzeitig ausreichendem Freibord.

Gegenüber der Be.Var 3, auf welcher Grundlage die weiterführenden hydraulischen Versuche und Berechnungen durchgeführt wurden, wurde damit eine Freibordoptimierung bei den Gerinnebecken um 15 cm erreicht. Es kann davon ausgegangen werden,

dass auch für Übergangsbecken R-G mit der optimierten Variante eine Freibordvergrößerung von 15 cm (Natur) zu erwarten ist (Q = 10,4 m³/s). Diese Differenz ist nachfolgend zu berücksichtigen.

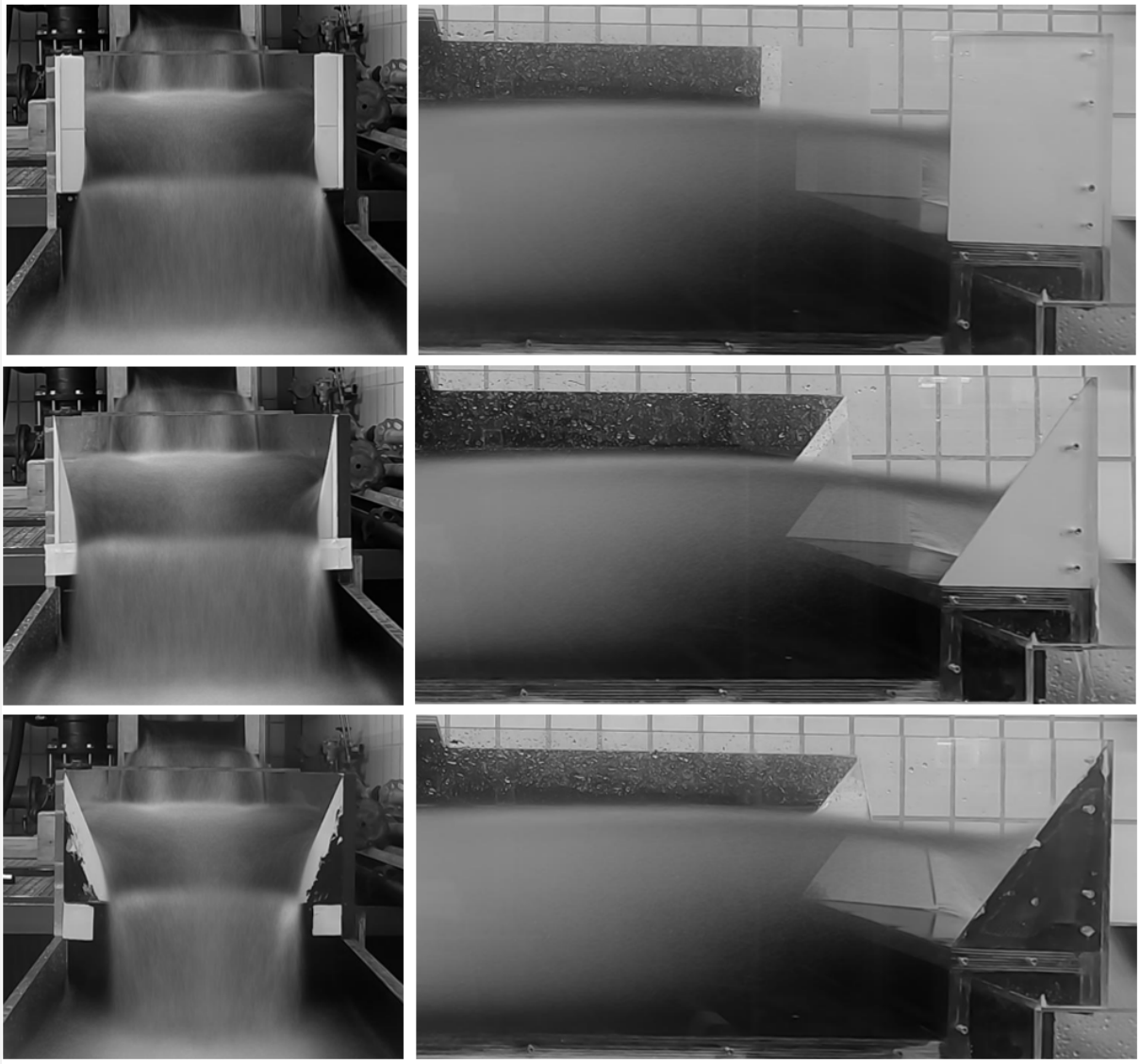


Abbildung 3-10 Zeitlich gemittelte Graustufenbilder zur Überfallstrahlausbildung mit den Vorzugsvarianten Be.Var 4 (oben), Be.Var 5 (mittig) und Be.Var 6 (unten).

3.1.4 Optimierung der Übergangsbecken G-R

Am Ende einer Gerinnetreppe ist planmäßig ein Übergangsbecken G-R (ÜB G-R) angeordnet, welches den Übergang von der Gerinnetreppe zur Rohrleitungsstrecke gewährleistet.

Luftein- und austrag

Mit dem Eintauchen des Überfallstrahls aus dem letzten Gerinnebecken erfolgt ein Lufteintrag in den Wasserkörper des Übergangsbeckens. Um Luftpakete in der anschließenden Rohrleitungsstrecke weitestgehend vermeiden zu können, sollte bis zur Einmündung in die Rohrleitungen eine ausreichende Entlüftung stattgefunden haben.

Mit einem, entsprechend der ursprünglichen Planung, 10 m langen ÜB G-R konnten bereits mit den anfänglich durchgeführten numerischen Simulationen, vgl. Abschnitt 3.1, aufgezeigt werden, dass eine größere Beckenlänge sowie ggf. die Anordnung von Prallwänden oder Störkörper notwendig sind, um den Lufteintrag in die Rohrleitungen zu verhindern bzw. zu reduzieren. Daher wurde das ÜB G-R im gegenständlichen Modellversuch mit einer Länge von 12 m (Natur) ausgeführt.

Bereits mit den Vorversuchen bei der Inbetriebnahme des gegenständlichen Modells zeigte sich, dass trotz der Beckenverlängerung um 2 m gegenüber des Planzustands die räumliche Ausdehnung des mit Luftblasen versetzten Bereichs bis zur Beckenendwand reichte und damit ein deutlicher Lufteintrag in die Rohrleitungen erfolgte (vgl. Abbildung 3-11, links). Auch mit der Prallwandkonfiguration entsprechend der numerischen Simulationen (vgl. Abschnitt 3.1) konnte keine ausreichende Reduzierung des Lufteintrags in die Rohrleitung erreicht werden (vgl. Abbildung 3-11, rechts).

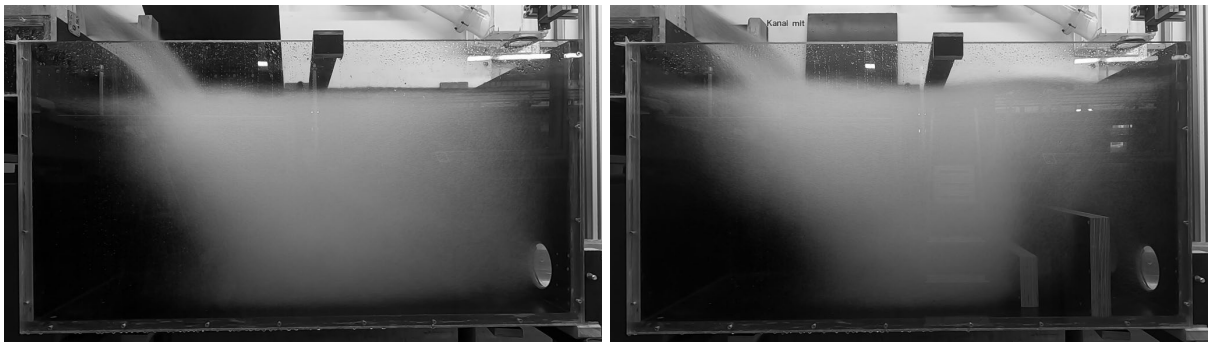


Abbildung 3-11 Zeitlich gemittelte Graustufenbilder zur qualitativen Abschätzung des örtlichen Luftgehalts der Strömung im Übergangsbecken G-R für Q = 10,4 m³/s; links: ohne Prallwände; rechts: mit einer Prallwandkonfiguration.

Weitere Versuche zeigten auch mit anderen Prallwandkonfigurationen keine zufriedenstellenden Ergebnisse bzgl. des Lufteintrags in die Rohrleitungen. Grundsätzlich wird mit dem Einbau von Prallwänden der Abflussquerschnitt im Becken reduziert. Folglich sind erhöhte lokale Geschwindigkeiten zu erwarten, wodurch Luftblasen tendenziell stärker mit der Strömung transportiert werden und die Entlüftung der Strömung herabsetzen. Dieser Umstand konnte mit den durchgeführten Versuchen bestätigt werden. Als Konsequenz ist davon auszugehen, dass eine ausreichende Entlüftung nur erreicht wird, wenn eine möglichst homogene Geschwindigkeitsverteilung im Übergangsbecken und damit gemäßigte Geschwindigkeiten vorliegen. Bezogen auf die vorliegenden Verhältnisse kann ein solcher Zustand durch die Verlängerung des Fließwegs im Becken, also durch eine Verlängerung des Beckens, ggf. in Verbindung mit Störkörpern, erreicht werden.

Aufgrund des baulichen Aufwands bei einer weiteren Anpassung der Beckenlänge am gegenständlichen Modell erfolgten weitere numerische Simulationen, um vorab eine Abschätzung der notwendigen Beckenlänge treffen zu können. Dabei wurde das Modellgebiet des bestehenden 3D-HN-Modells auf ein Gerinnebecken mit anschließendem Übergangsbecken reduziert und Simulationen mit variierenden Beckenlängen sowie unter Berücksichtigung einer Prallwand ausgeführt und verglichen.

Zu bedenken ist, dass mit der Verwendung der VOF-Methode (numerisches Verfahren) Luftblasen nur dann dargestellt werden können, wenn diese größer sind, als die

Abmessungen der lokalen Kontrollvolumina. Demnach stellt die Auswertung der Wasserkonzentration ein geeigneteres Vorgehen dar, die mögliche Präsenz von Luftblasen in der Strömung zu prognostizieren. In Abbildung 3-12 ist jeweils die Wasserkonzentration von 90 bis 100% farblich in einer Schnittansicht (Längsschnitt) durchs Übergangsbecken als Mittelwert über 20 s Simulationszeit dargestellt. Dabei ist v. a. auf die Einfärbung bei der Einmündung in die Rohrleitung zu achten. Je höher dort die Wasserkonzentration prognostiziert wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass tatsächlich Luftblasen in die Rohrleitungen transportiert werden.

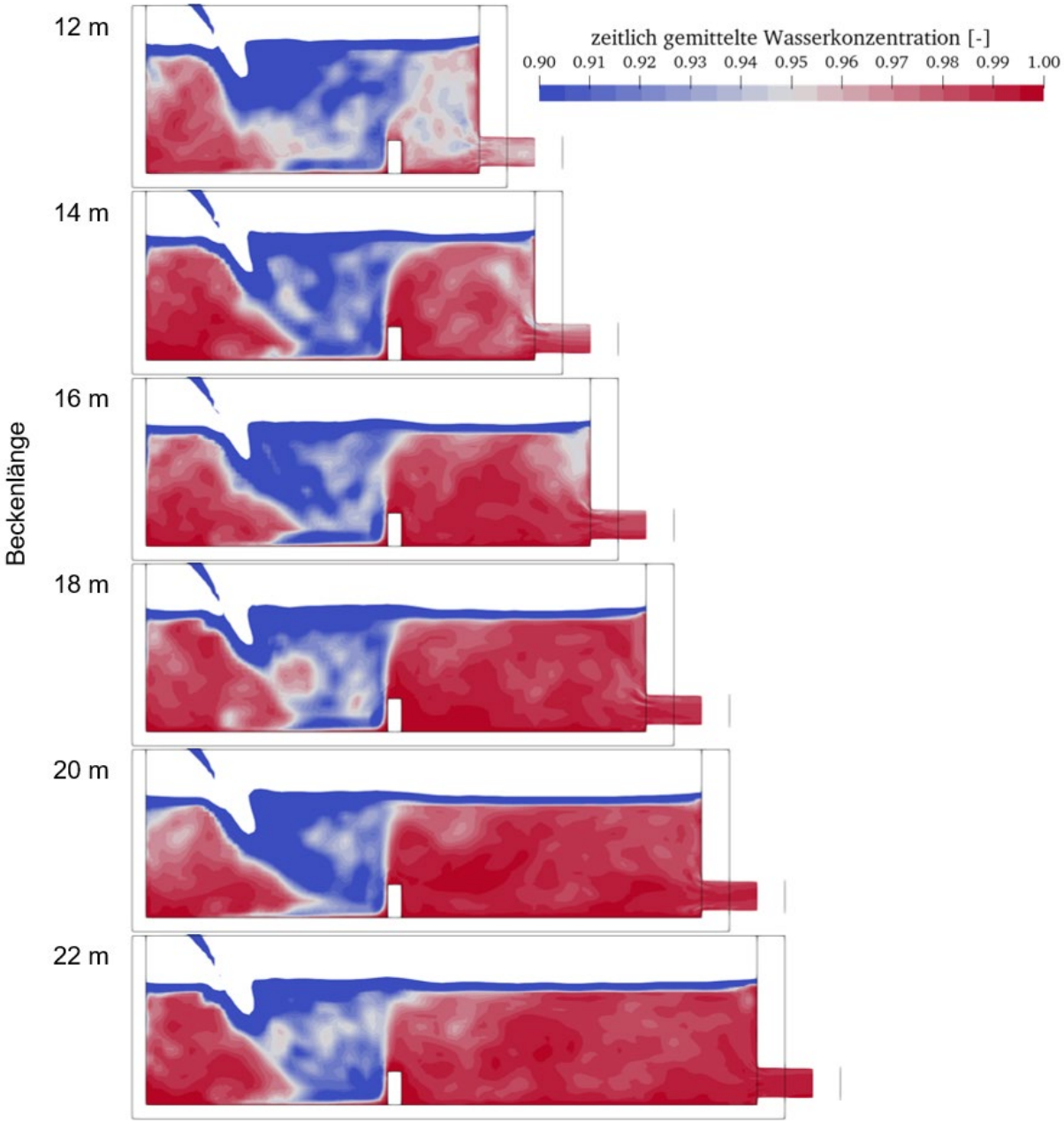


Abbildung 3-12 Darstellung der zeitlich gemittelten Wasserkonzentrationen im Längsschnitt durchs Übergangsbecken für variierende Beckenlängen bei einem Abfluss von 10,4 m³/s berechnet mit dem 3D-HN-Modell.

Für Beckenlängen bis einschließlich 16 m wird entsprechend der Simulationsauswertung (vgl. Abbildung 3-12) eine deutlich geringere Wasserkonzentration vor den Einläufen in die Rohrleitungen prognostiziert, als es für größere Beckenlängen der Fall

ist. Vor dem Hintergrund der begrenzten Aussagekraft des numerischen Modells hinsichtlich Wasser-Luft-Gemischen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber für die bauliche Umsetzung am gegenständlichen Modell eine Beckenverlängerung von 10 m und damit auf eine Gesamtbeckenlänge von 20 m festgelegt. Um die im gegenständlichen Modell umgesetzte Länge der Rohrleitungsstrecke nicht zu beeinträchtigen erforderte der Umbau eine Lageänderung der oberwasserseitigen Gerinnebecken sowie des Einlaufbeckens. Diese mussten im Modellmaßstab um 0,755 m (entspricht einer Länge von 8 m im Naturmaßstab) entgegen der Strömungsrichtung verschoben werden. Die Messtechnik zur Erfassung der Wasserspiegellagen musste auf die neuen Positionen angepasst werden, vgl. hierzu Abbildung 3-13.

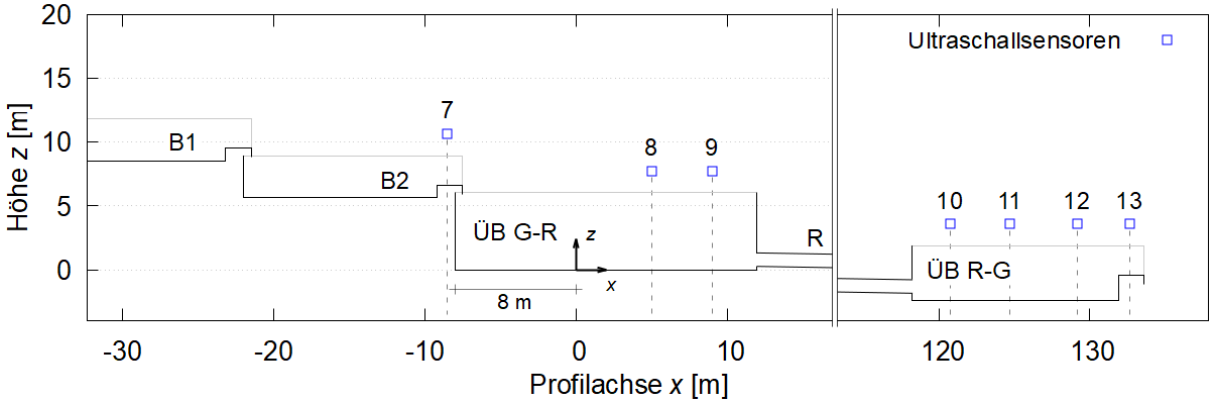


Abbildung 3-13 Lage der Ultraschallsensoren zur Erfassung der Wasserspiegellagen am gegenständlichen Modellversuch im lokalen Koordinatensystem durch die bauliche Anpassung (Beckenverlängerung) des Übergangsbeckens G-R.

Am Versuchsstand konnte beobachtet werden, dass in Analogie zu den numerischen Simulationen mit der reinen Beckenverlängerungen ohne Prallwände oder Störkörper der Lufteintrag in die Rohrleitungen deutlich reduziert werden konnte. Vor dem Hintergrund der Unschärfen bzgl. der Übertragbarkeit der am Modell beobachtenden Prozesse in Verbindung mit Lufteintrag sowie der Entlüftung der Strömung, wurde zusätzlich der Einfluss Störkörpern im verlängerten Übergangsbecken G-R untersucht. So erfolgten weiterführende numerische Simulationen und anschließend die Untersuchung zweier Varianten am gegenständlichen Modell. In Abbildung 3-14 sind die beiden Varianten dargestellt. Die genaue Ausformung und Position der Störkörpervarianten können der Anlage 6.1 entnommen werden.

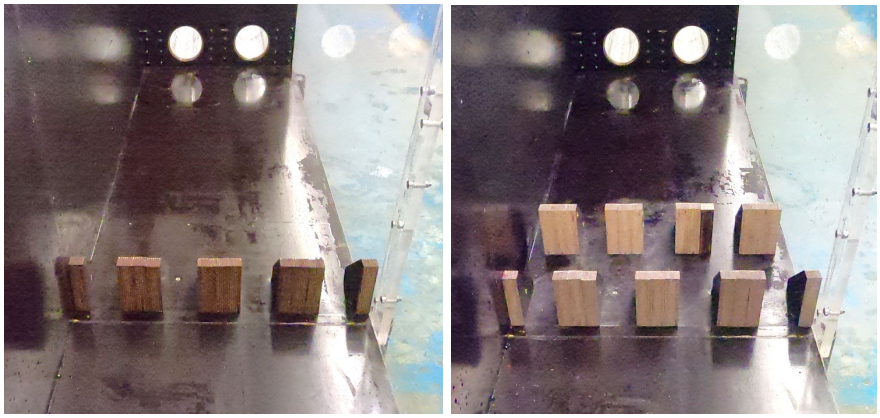


Abbildung 3-14 Variante 1 (links) und 2 (rechts) bzgl. der Strömungsoptimierung im Übergangsbecken G-R in Verbindung mit einer Beckenlänge von 20 m.

Die untersuchten Störkörpervarianten lenkten Teile des Schussstrahls in Richtung der Wasseroberfläche um und sorgten so für eine verbesserte Entlüftung. Abbildung 3-15 zeigt eine Gegenüberstellung der zeitlich gemittelten Graustufenbilder für die Variantenuntersuchung (oben) sowie eine Überlagerung von Iso-Linien eines konkreten Grauwertes (unten) für einen Abfluss von 10,4 m³/s. Auf dieser Grundlage kann ein qualitativer Vergleich der räumlichen Ausdehnung des Lufteintrags im Becken erfolgen. Demnach konnte mit der Störkörpervariante 2 die größte Verringerung der räumlichen Ausdehnung der Luftblasen im Wasserkörper erreicht werden.

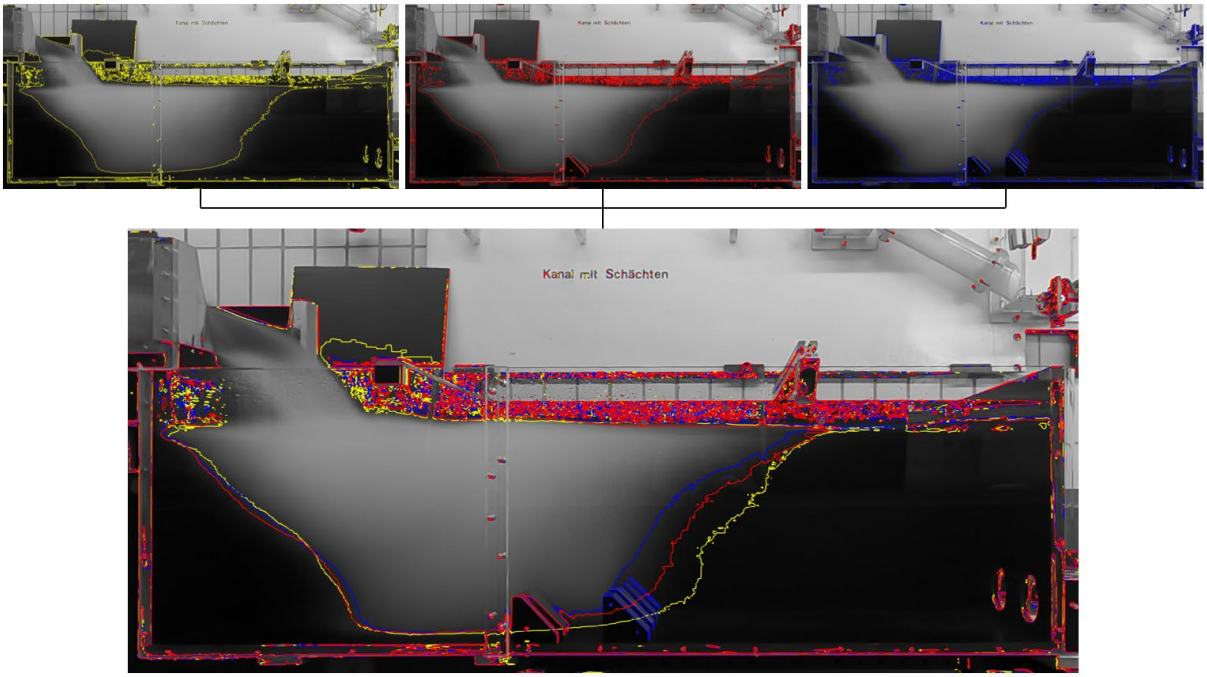


Abbildung 3-15 Zeitlich gemittelte Graustufenbilder des Lufteintrags am Übergangsbecken G-R mit einer Beckenlänge von 20 m ohne Störkörper (oben, links) und mit Störkörpern - Variante 1 (oben, mitte) und Variante 2 (oben, rechts) - sowie einer Überlagerung von Iso-Linien eines konkreten Grauwertes (unten) für Q = 10,4 m³/s.

Im Anschluss dieser Versuchsreihe wurde die allein mit der Beckenlänge von 20 m erreichte Entlüftung der Strömung, auch vor dem Hintergrund des baulichen Aufwands zur Umsetzung von Störkörpern als zufriedenstellend eingestuft. In Absprache mit dem AG wurde entsprechend festgelegt, dass weiterführende Untersuchungen ohne den Einsatz von Störkörpern bzw. mit einer Reihe Störkörper (Variante 1) erfolgen sollten.

Wasserstände

In Abbildung 3-16 sind die am Modell erfassten zeitlich gemittelten Wasserspiegellagen im 20 m langen ÜB G-R sowie im ÜB R-G für die Abflüsse von 8,1 und 10,4 m³/s dargestellt. Für die Versuche erfolgte entsprechend des Abflusses eine Anpassung der Höhenlage des ÜB R-G, wie es im Abschnitt 2.3.5 erläutert ist. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die am gegenständlichen Modell erfassten Wasserstände über den Längenmaßstab M_l = 10,6 auf die Natur übertragbar sind.

Zu beachten ist, dass die am Modell erfassten Wasserstände im Übergangsbecken G-R nur für die im Modell abgebildeten Rohrleitungslängen gültig sind. Da der Einfluss der Reibung sowie das hydraulische Gefälle im System *ÜB G-R → R → ÜB R-G* von der Länge der Flachstrecken abhängt, sind in den einzelnen Übergangsbecken G-R

der Einleitung variierende Wasserstände zu erwarten. Details dazu sowie die tatsächlich zu erwartenden Wasserstände sind dem Abschnitt 3.1.5 zu entnehmen.

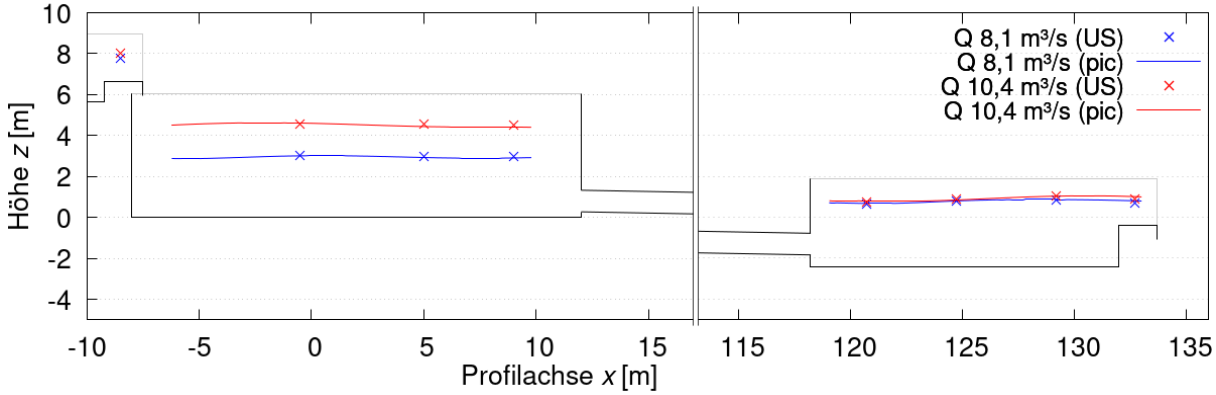


Abbildung 3-16 Darstellung der am gegenständlichen Modell erfassten, zeitlich gemittelten Wasser-spiegellagen bei einer Länge des Übergangsbeckens G-R von 20 m für Q = 8,1 m³/s und Q = 10,4 m³/s.

3.1.5 Fazit – Übertragbarkeit auf die Gesamtanlage

Im Rahmen der durchgeführten Versuche erfolgten Anpassungen der Beckengeometrien zur Optimierung der Strömungssituation in der Einleitung. In Absprache mit dem AG wurden folgende Anpassungen gegenüber der Planvariante als Vorzugsvariante festgelegt:

- Die Sohle der Gerinnebecken wurde um 1,0 m vertieft, um eine ausreichende Energieumwandlung in den einzelnen Gerinnebecken gewährleisten zu können.
- Für die Übergangsbecken R-G wurde in diesem Zusammenhang sowie hinsichtlich der baulichen Vereinfachung eine durchgehende ebene Sohle bis zum Beckenende angeordnet.
- Die Beckenendwände der Gerinnebecken und der Übergangsbecken R-G, welche eine Einschnürung des Überfallstrahls bewirken, wurden entsprechend der in Abbildung 3-17 skizzierten Abmessungen angepasst (Be.Var 3).
  Ausdrücklich empfohlen werden die im Rahmen der Bachelorarbeit bzw. die mit der daran anknüpfenden Optimierung erarbeiteten konstruktiven Ausbildungen der Beckenaufläufe, v. a. hinsichtlich einer optimierten Überfallstrahlausbildung (Be.Var 6, vgl. Abschnitt 3.1.3, später in der Planung berücksichtigt).
- Für die Übergangsbecken G-R wurde eine Beckenlänge von 20 m angeordnet, um eine ausreichende Entlüftung des Wasserkörpers zu erreichen. Es ist davon auszugehen, dass die Anordnung von Störkörpern an der Beckensohle nicht erforderlich ist.

Die getroffenen baulichen Anpassungen als Resultat der physikalischen Untersuchungen sind in Abbildung 3-17 skizziert und mit Abmessungen versehen. Diese Anpassungen stellen nicht den abschließenden Planungsstand dar.

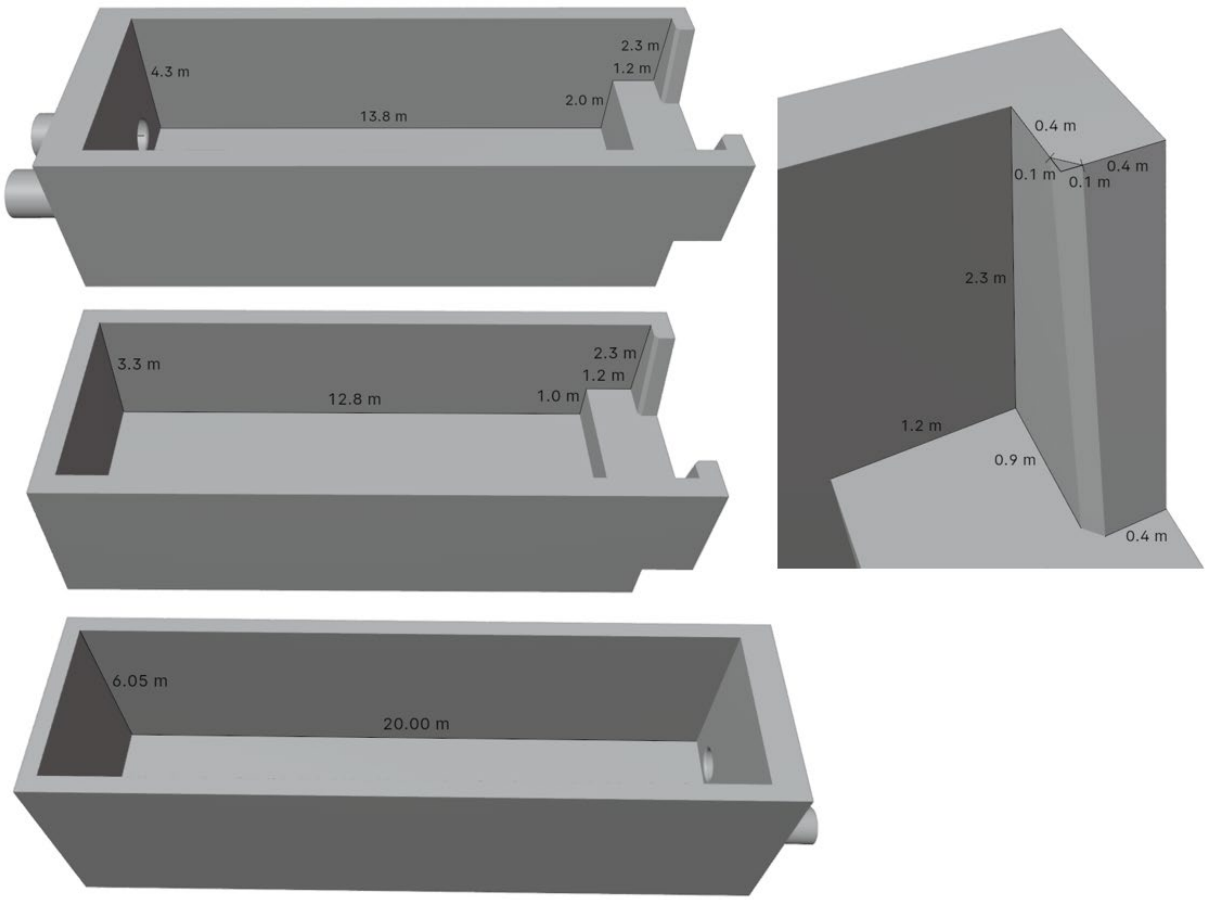


Abbildung 3-17 Relevante Abmessungen der Übergangsbecken R-G (oben, links), der Gerinnebecken (mittig, links) und der Übergangsbecken G-R (unten, links) sowie der Ausbildung der Beckenendwände zur Überfalleinschnürung (oben, rechts) entsprechend der Vorzugsvariante basierend auf den physikalischen Untersuchungen.

Mit den angepassten Beckengeometrien entsprechend der Abbildung 3-17 wurden die in Tabelle 3-2 aufgeführten höchsten zeitlich gemittelten Wasserstände in einem Becken h_{max} erfasst. Unter Berücksichtigung der Beckentiefen ergeben sich zudem die Mindestfreibordmaße f_{min} für die unterschiedlichen Beckentypen für die stationären Abflüsse Q = 8,1 m³/s und Q = 10,4 m³/s.

Tabelle 3-2 Am Modell erfasste maximale zeitlich gemittelte Wasserstände h_{max} und Mindestfreibord f_{min} eines Beckens der Einleitung mit den Anpassungen resultierend auf den physikalischen Versuchen.

Abfluss Q [m³/s]	Gerinnebecken		Übergangsbecken G-R		Übergangsbecken R-G	
	h_{max} [m]	f_{min} [m]	h_{max} [m]	f_{min} [m]	h_{max} [m]	f_{min} [m]
8,1	2,33	0,97	3,15	2,90	3,30	1,00
10,4	2,56	0,74	4,69	1,36	3,47	0,83

Bei den Gerinnebecken sowie den Übergangsbecken R-G, bei welchen die resultierenden Wasserstände nur von der Ausbildung des Überfalls und der damit einhergehenden Überfallhöhe beeinflusst werden, ergeben sich die Wasserstände lediglich in Abhängigkeit des Abflusses. Aufgrund der Fließwechsel an den vollkommenen Überfällen findet zudem keine Beeinflussung aus dem Unterwasser statt und die in Tabelle 3-2 aufgeführten Wasserstände sind in allen Gerinnebecken bzw. Übergangsbecken R-G der Einleitung mit Be.Var 3 zu erwarten.

Im Gegensatz dazu ist zu berücksichtigen, dass die in Tabelle 3-2 aufgeführten Wasserstände im Übergangsbecken G-R auf Grundlage der im Modell abgebildeten Rohrleitungslänge von ca. 106 m resultieren. Da der Einfluss der Reibung sowie das hydraulische Gefälle im System *ÜB G-R → R → ÜB R-G* u. a. von der Länge der Flachstrecken abhängt, sind in den einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung variierende Wasserstände zu erwarten. Vor diesem Hintergrund erfolgte, auch unter Berücksichtigung der am Modellversuch erfassten Wasserstände, eine analytische Bestimmung (Bernoulli-Gleichung) der Wasserstände für alle Übergangsbecken G-R der Einleitung. In Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 sind die in den einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung zu erwartenden maximalen Wasserstände sowie die entsprechenden Mindestfreibordmaße angegeben.

Für diese Berechnungen wurden zusätzlich zu den Rohrreibungsverlusten (vgl. Abschnitt 2.3.5) auch Ein- und Auslaufverluste berücksichtigt. Für die Einläufe konnte im gegenständlichen Modell eine kreisbogenförmige Abrundung umgesetzt werden, welche in Natur einem Radius von 134 mm und einen Verlustbeiwert von ζ_{VE} = 0,085 entspricht. Da größere Radien zu geringeren Verlustbeiwerten führen, sollten beim Bau der Anlage die Radien der Einlaufabrundungen mindestens 134 mm betragen. Für den Auslaufverlust wurde entsprechend einschlägiger Literatur ein Verlustbeiwert von ζ_{VA} = 1,06 herangezogen.

Tabelle 3-3 Maximale Wasserstände h_{max} und Mindestfreibord f_{min} in den einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung mit den Anpassungen entsprechend der physikalischen Versuche für Q = 10,4 m³/s.

Flachstrecke	Gefälle [%]	Nennweite Rohr	horizontale Länge [m]	Höhendifferenz [m]	Übergangsbecken G-R	
					h_{max} [m]	f_{min} [m]
1	2,0	DN1200	320,9	6,42	3,78	2,27
2	2,0	DN1200	97,3	3,58	4,78	1,27
3	2,0	DN1200	87,7	1,75	4,83	1,22
4	2,0	DN1200	128,8	2,58	4,64	1,41
5	2,0	DN1200	617,3	13,27	2,74	3,31
6	2,0	DN1200	143,8	2,88	4,57	1,48
7	2,0	DN1200	131,0	2,62	4,63	1,42
8	2,0	DN1200	101,2	2,03	4,77	1,28
9	2,0	DN1200	93,6	1,87	4,80	1,25

Tabelle 3-4 Maximale Wasserstände h_{max} und Mindestfreibord f_{min} in den einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung mit den Anpassungen entsprechend der physikalischen Versuche für Q = 8,1 m³/s.

Flachstrecke	Gefälle [%]	Nennweite Rohr	horizontale Länge [m]	Höhendifferenz [m]	Übergangsbecken G-R	
					h_{max} [m]	f_{min} [m]
1	2,0	DN1200	320,9	6,42	1,98	4,07
2	2,0	DN1200	97,3	3,58	3,24	2,81
3	2,0	DN1200	87,7	1,75	3,34	2,71
4	2,0	DN1200	128,8	2,58	2,91	3,14
5	2,0	DN1200	617,3	13,27	1,98	4,07
6	2,0	DN1200	143,8	2,88	2,76	3,29
7	2,0	DN1200	131,0	2,62	2,89	3,16
8	2,0	DN1200	101,2	2,03	3,20	2,85
9	2,0	DN1200	93,6	1,87	3,28	2,77

Rechnerisch kann in Abhängigkeit des Abflusses sowie der Rohrleitungslänge bereichsweise Unterdruck in den Rohrleitung auftreten, wodurch, ohne eine entsprechende Möglichkeit für einen Druckausgleich, u. a. eine gewisse Sogwirkung auf das Wasser im Übergangsbecken G-R resultiert (vgl. Abschnitt 3.2.2). Für derartige Zustände kann ohne Weiteres keine verlässliche Prognose der zu erwartenden Wasserstände erfolgen. Vor diesem Hintergrund sind in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 Wasserstände angegeben, welche sich rechnerisch auf Grundlage des Ausflusses aus einem Behälter (Torricelli) sowie unter Berücksichtigung des Einlaufverlusts ergeben. Diese Werte sind grau eingefärbt.

Wird geplant die Beckenausläufe nicht entsprechend der Be.Var 3 auszuführen und stattdessen die Be.Var 6 bevorzugt (wie es zu einem späteren Zeitpunkt der Planung zum Einleitbauwerk erfolgte), so kann für einen Abfluss von 10,4 m³/s von einer Freibordoptimierung (Vergrößerung) von 15 cm ausgegangen werden. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Übergangsbecken G-R und dem jeweiligen Übergangsbecken R-G am Ende eine Rohrleitungsstrecke, wirken sich die 15 cm Freibordoptimierung auch auf den Freibord im Übergangsbecken G-R aus.

Vor dem Hintergrund des möglichen Wasseraustritts durch Spritzwasser wird eine Reduzierung der Beckenwandhöhen und damit des Freibords nicht empfohlen. Vielmehr wird zur Reduzierung des verbleibenden Risikos des Wasserverlusts infolge von Spritzwasser, in Ergänzung zum jeweils vorhandenen Freibord, empfohlen, zusätzliche Vorkehrungen zu treffen oder zumindest eine Möglichkeit diese bei Bedarf nachzurüsten vorzusehen.

3.2 OPTIMIERUNG DES ROHRLEITUNGSSYSTEMS

Für die bisherigen Versuchsdurchführungen war davon auszugehen, dass v. a. der maximale, stationäre Abfluss von 10,4 m³/s als kritischer Lastfall herangezogen werden kann. Im Hinblick auf die Hydraulik in den Rohrleitungen sowie beim Ein- und Ausströmen in bzw. aus den Leitungen können neben stationären Abflüssen, auch instationäre Zustände zu kritischen Strömungsverhältnissen führen. Mit Letzterem sollen Abflussänderungen im Betrieb der Anlage simuliert werden. Diese können Übergänge von Druck- zu Freispiegelabfluss bzw. von Freispiegel- zu Druckabfluss in den Leitungen beinhalten. Des Weiteren besteht in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe an den Rohrleitungseinläufen sowie der Abflussgeschwindigkeit in den Rohrleitungen im Allgemeinen die Gefahr von ggf. lufteinziehender Wirbelbildung.

3.2.1 Lufteinziehende Wirbel an den Rohrleitungseinläufen

An Einlaufbauwerken können grundsätzlich Wirbelströmungen auftreten, welche in einem Luft- und Dralleintrag resultieren. Trotz der Beckenoptimierung bzgl. der Entlüftung der durch den Überfallstrahl eingetragenen Luftblasen und den damit etwas beruhigten Strömungsverhältnissen im hinteren Beckenbereich konnten gelegentlich auftretende Wirbelbildungen an dem Einläufen zu den Rohrleitungen beobachtet werden (vgl. Abbildung 3-18).

Einige konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Wirbelbildungen, welche u. a. entsprechend einschlägiger Literatur (z. B. Knauss, 1983) empfohlen werden, wurden am Versuchsstand auf ihre Wirksamkeit untersucht. Neben horizontalen Abdeckungen

variierender Längen über den Einläufen (vgl. Abbildung 3-19, links), wurden u. a. Strömungsgleichrichter in den Rohrleitungseinläufen (vgl. Abbildung 3-19, mitte) angebracht. Diese Maßnahmen führten zu keiner Verbesserung der Einlaufsituation. Mit Hilfe an der Wasseroberfläche befindlicher Konstruktionen, im Versuch wurden teilgetränkte Tafelschwämme auf die Wasseroberfläche gesetzt (vgl. Abbildung 3-19, rechts), konnte die Wirbelbildung an der Wasseroberfläche und damit der Einzug von Luft im Versuch unterbunden werden. In der Natur könnte dies über vertikal geführte, flächige Schwimmkonstruktionen ermöglicht werden.

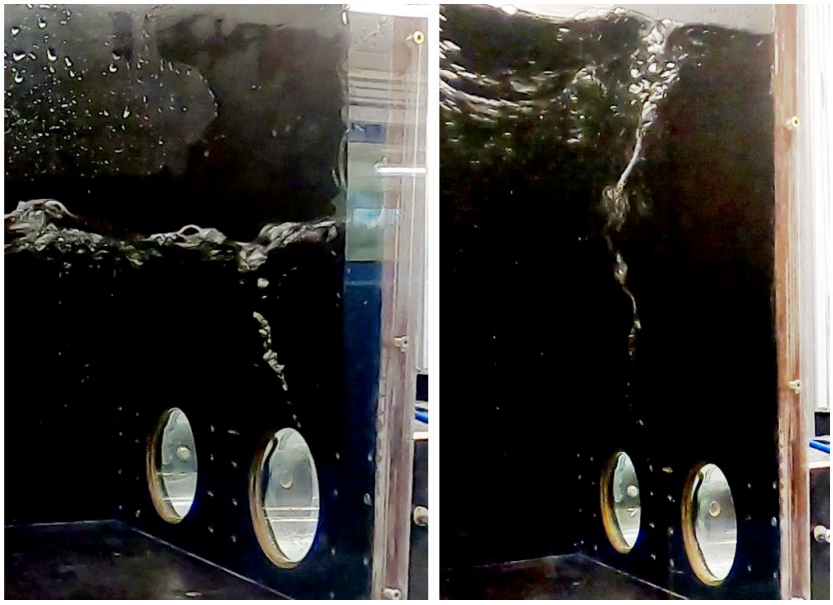


Abbildung 3-18 Lufteinziehende Wirbel im Übergangsbecken G-R am gegenständlichen Modell bei Q = 8,1 m³/s (links) und Q = 10,4 m³/s (rechts).

Wird das sporadische Auftreten von lufteinziehenden Wirbeln im Versuch entsprechend auf die Natur übertragen, so kann der resultierende Lufteintrag als relativ gering eingestuft werden. Diese Aussage kann v. a. im Vergleich zum Lufteintrag, welcher sich durch das Einsaugen von Luft durch die Be-/Entlüftungsrohre in Leitungsabschnitten mit vorherrschendem Unterdruck ergibt, getroffen werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Der Lufteintrag aufgrund entsprechender Wirbelbildung spielt für den Betrieb der Anlage daher eine untergeordnete Rolle und wird als nicht relevant angesehen.



Abbildung 3-19 Versuche zur Reduzierung des Lufteintrags durch Wirbelbildung an den Einläufen im Übergangsbecken G-R mittels baulicher Anpassungen; von links nach rechts: 0,5 m horizontale Abdeckungen über den Einläufen, 1,5 m horizontale Abdeckungen über den Einläufen, Strömungsgleichrichter in den Rohrleitungseinläufen, Schwimmkörper an der Wasseroberfläche.

3.2.2 Rohrhydraulik

Analytische Betrachtung

Das Einleitbauwerk umfasst insgesamt neun Flachstrecken mit variierenden Rohrleitungslängen bei einem Gefälle von 2%. Daraus ergeben sich jeweils variierende Höhenunterschiede, welche mit den Flachstrecken überwunden werden. Im Rahmen der Optimierung der Gerinnebecken erfolgte eine Anpassung der Beckenendwände, welche den resultierenden Überfallstrahl und auch den Wasserstand in den jeweiligen Becken beeinflussen. Unter diesen Randbedingungen resultieren auch in den Übergangsbecken R-G entsprechende Wasserstände in Abhängigkeit des Abflusses, welche von den Rohrleitungslängen nicht maßgebend beeinflusst werden. Die Wechselwirkung zwischen diesen Wasserständen (ÜB R-G), den vorherrschenden Abflüssen und den Rohrleitungslängen beeinflussen schließlich die resultierenden Wasserstände in den Übergangsbecken G-R (vgl. Abschnitt 3.1.5) sowie die hydraulischen Zustände in den Rohrleitungen.

Mit Hilfe der Energiegleichung (Bernoulli) sowie auf Grundlage der am Modell erfassten Wasserstände im ÜB R-G sind in Abschnitt 3.1.5 Wasserstände für die ÜB G-R in Abhängigkeit der variierenden Rohrleitungslängen der einzelnen Flachstrecken angegeben. In diesem Zusammenhang wurde auf das mögliche Auftreten von Unterdruck in langen Rohrleitungen hingewiesen. Unterdruck resultiert dann, wenn die lokale Druckhöhe in der Leitung kleiner als die lokale Höhenlage der Rohroberkante ist. Bei unverändertem Rohrleitungsgefälle ist der Verlauf der Druckhöhe abhängig von der Rohrleitungslänge, dem Abfluss sowie den Verlusten im System.

Exemplarisch zeigt Abbildung 3-20 eine grafische Darstellung der analytischen Berechnungsergebnisse für eine 200 m lange Rohrleitungsstrecke bei einem Abfluss von 8,1 m³/s. Eingefärbt in blau ist dabei u. a. die Druckhöhenlinie dargestellt, welche in einem Abstand von etwa 28 m vom ÜB G-R die Oberkante der Rohrleitung unterschreitet und folglich Unterdruck in der Leitung zu erwarten ist (rot markierter Bereich in Abbildung 3-20).

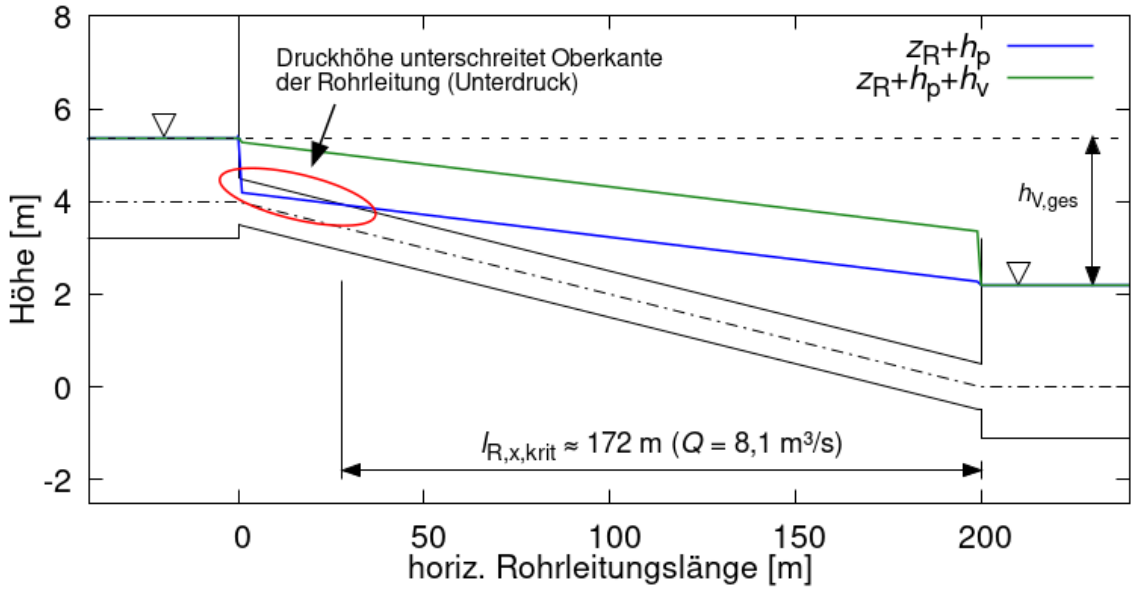


Abbildung 3-20 Grafische Darstellung der analytischen Berechnungsergebnisse auf Grundlage der Energiegleichung (Bernoulli) für eine 200 m lange Rohrleitungsstrecke und einen Abfluss von 8,1 m³/s.

Vor dem Hintergrund der in Abbildung 3-20 dargestellten Situation können kritische Rohrleitungslängen für variierende Abflüsse ermittelt werden, ab welchen mit Unterdruck im Rohleitungssystem zu rechnen ist. Unter der Voraussetzung, dass in den Rohrleitungen kein Freispiegelabfluss vorherrscht, wurden für ausgewählte Abflüsse kritische Rohrleitungslängen berechnet. Diese sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Tabelle 3-5 Analytisch bestimmte kritische horizontale Rohrleitungslängen in Verbindung mit dem Auftreten von Unterdruck im Rohrleitungssystem in Abhängigkeit des Abflusses ohne Einbauten (lokale Verluste) für eine DN1200 Rohrleitung.

Abfluss Q [m³/s]	kritische horizontale Rohrleitungslänge $l_{R,x,krit}$ [m]
10,40	441
8,10	172
6,75	126
5,05	88
2,90	59
1,35	42

Auf Grundlage der Versuchsdurchführungen kann bei einem Abfluss von etwa 5 m³/s vom Übergang zu Freispiegelabfluss ausgegangen werden. Herrscht dieser Abfluss vor, so kann in der längsten Rohrleitungsstrecke von ca. 617 m (Planzustand vom 21.11.2023) theoretisch der größte Unterdruck erwartet werden. Die am Einlauf zu erwartende negative Druckhöhe beträgt etwa 8,5 m. Grundsätzlich kann bei derartigen Druckverhältnissen mit dem Auftreten von Kavitation gerechnet werden. Jedoch ist davon auszugehen, dass sich dieser Unterdruck auf den Wasserkörper im ÜB G-R dahingehend auswirkt, dass sich die Wasserspiegellage absenkt und eine Belüftung über die Rohrleitungseinläufe, und somit ein gewisser Druckausgleich, erfolgt.

Für größere Abflüsse, bei welchen eine ausreichende Überdeckung der Rohrleitungseinläufe im ÜB G-R vorherrscht, kann ein Druckausgleich über die Einläufe ggf. nicht erfolgen. Folglich kann das Risiko von Kavitationserscheinungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Mit einer Belüftungsmöglichkeit nach den Einläufen, und damit im Bereich des auftretenden Unterdrucks, kann ein Druckausgleich erfolgen und das Auftreten von Kavitation an den Einläufen ausgeschlossen werden (vgl. nachfolgenden Abschnitt).

Luftaustrag aus dem Rohrleitungssystem

Entsprechend der vorangegangenen Untersuchungen und den daraus abgeleiteten Bauwerksoptimierungen konnte der Lufteintrag ins Rohrleitungssystem deutlich reduziert werden. Dennoch ist im Betrieb mit z. T. deutlichen Lufteintrag zu rechnen:

- Durch das Eintauchen des Überfallstrahls ins ÜB G-R wird Luft in den Wasserkörper eingetragen. Mit der Beckenverlängerung konnte am Modellversuch eine ausreichende Entlüftung erreicht werden, dennoch ist im tatsächlichen Betrieb nicht auszuschließen, dass eingetragene Luftblasen den Weg in die Rohrleitungen finden.
- Bei Druckabfluss kann Lufteintrag infolge lufteinziehender Wirbel an den Rohrleitungseinläufen auftreten (vgl. Abschnitt 3.2.1).

- In Abhängigkeit der Länge der Rohrleitung sowie des Abflusses kann zudem Lufteintrag infolge von Unterdruck im Rohrleitungssystem erfolgen. Am Versuchsstand konnte bei geringen Überdeckungshöhen an den Einläufen in Verbindung mit Unterdruck in der Leitung das Einsaugen von Luftpaketen beobachtet werden.
- Bei geringen Abflüssen resultiert bis zur Stauwurzel aufgrund des Wasserstands im ÜB R-G Freispiegelabfluss in den Leitungen. An der Stauwurzel erfolgt der Übergang zu Druckabfluss (Wechselsprung), wodurch fortwährend der Eintrag von Luftblasen beobachtet werden konnte.
- Bei instationären Betriebszuständen kann ein Wechsel von Freispiegel- auf Druckabfluss oder umgekehrt erfolgen, wodurch temporär mit einem z. T. deutlichen Lufteintrag zu rechnen ist.

Im Betrieb der Anlage kann der Eintrag von Luft ins Rohrleitungssystem also grundsätzlich nicht vernachlässigt werden. Die Luftblasen/-pakete werden i. d. R. mit der Strömung durch die Rohrleitung transportiert und entweichen beim Auslauf aus den Leitungen im ÜB R-G (Beobachtung am Versuch). Damit verbunden ist u. a. mit z. T. deutlichen Spritzwasser aufgrund der aufsteigenden Luftblasen im ÜB R-G zu rechnen. Es erfolgte eine bauliche Anpassung am Rohrleitungssystem des Modellversuchstands mit dem Ziel, den Lufteintrag in ÜB R-G möglichst gering zu halten und gleichzeitig eine optimierte Entlüftung bereitzustellen.

Zur Vermeidung der konzentrierten Entlüftung im ÜB R-G mit starker Spritzwasserbildung wurden am Versuchsstand vorerst drei Entlüftungsrohre pro Rohrleitung installiert. Die Entlüftungsrohre wiesen im Naturmaßstab einen Innendurchmesser von 318 mm auf und wurden etwa 2,2 m nach den Rohrleitungseinläufen, im Bereich der Stauwurzel und etwa 2,2 m vor den Rohrleitungsausläufen angebracht (vgl. Abbildung 3-21).

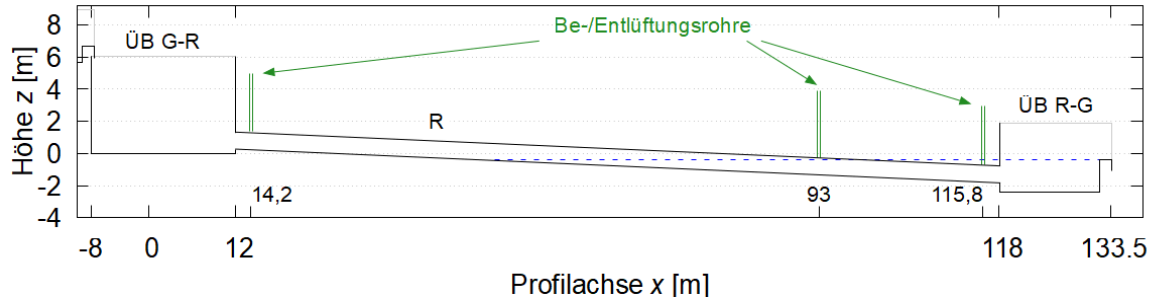


Abbildung 3-21 Lage der am Modellversuch installierten Be-/Entlüftungsrohre.

Entsprechende Versuchsdurchführungen konzentrierten sich auf die Beobachtung bzw. visuelle Erfassung der Strömungsverhältnisse v. a. in Bezug auf das Entweichen der Luftblasen/-pakete aus den Leitungen über die Entlüftungsrohre sowie im ÜB R-G. Dabei zeigte sich die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Entlüftungsrohre. In Abhängigkeit des Abflusses und den damit vorherrschenden Fließgeschwindigkeiten in den Rohrleitungen war jedoch zu beobachten, dass die Entlüftung teilweise nicht vollständig über die Entlüftungsrohre erfolgte, sondern Luftpakete weiterhin bis ins ÜB R-G mit der Strömung transportiert wurden.

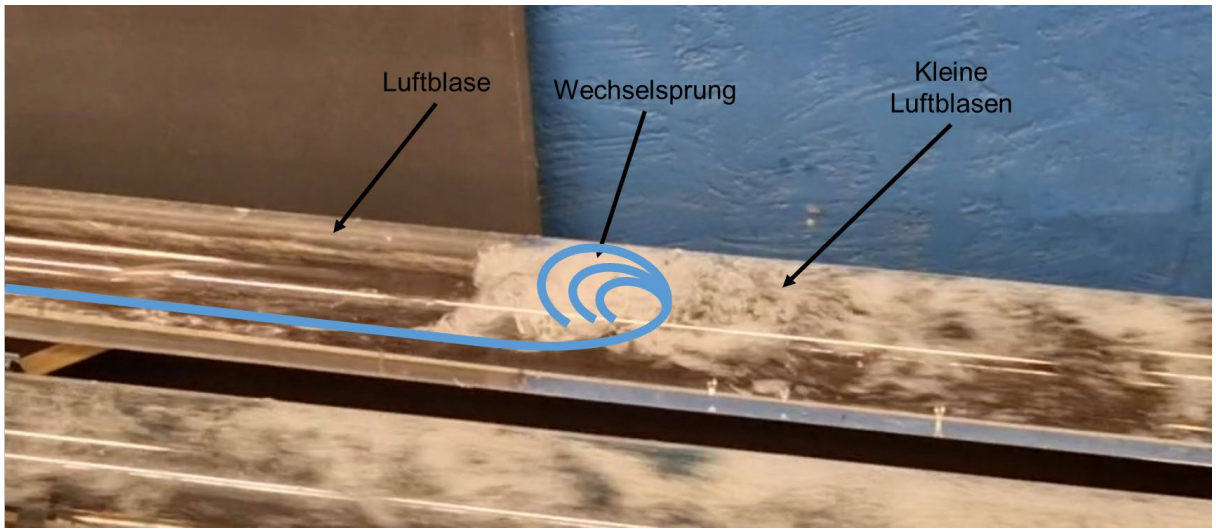


Abbildung 3-22 Momentaufnahme zum Eintrag kleinerer Luftblasen aufgrund der Ausbildung eines Wechselsprungs in einer Rohrleitung.

Um konkretere Aussagen bzgl. des Lufteintrags treffen zu können, ist es zielführend, eine Fallunterscheidung auf Grundlage der vorherrschenden hydraulischen Zustände vorzunehmen. Nachfolgende Ausführungen beziehen sich grundsätzlich auf die Beobachtungen am gegenständlichen Versuchsstand.

Freispiegelabfluss	An der Stauwurzel in der Rohrleitung findet der Übergang von Freispiegel- zu Druckabfluss in Form eines Wechselsprungs statt. Dabei werden kleinere Luftblasen produziert und mit der Strömung transportiert (vgl. Abbildung 3-22). Entsprechend der Modellversuche konnte über die vor dem ÜB R-G angeordneten Be-/Entlüftungsrohre der maßgebende Anteil der Luftblasen aus den Rohrleitungen entweichen, bevor diese das ÜB R-G erreichten.
Überdeckungsabfluss ohne Unterdruck ($I_{R,x} < I_{R,x,krit}$)	Herrscht Überdeckungsabfluss vor und es tritt kein Unterdruck in den Leitungen auf (Druckabfluss), so erfolgt Lufteintrag in die Leitungen lediglich über lufteinziehende Wirbelbildung an den Einläufen. Dieser Lufteintrag fiel im Rahmen der Modellversuche marginal aus und konnte über die Be-/Entlüftungsrohre entweichen.
Überdeckungsabfluss mit Unterdruck ($I_{R,x} < I_{R,x,krit}$)	Herrscht Überdeckungsabfluss vor und es tritt Unterdruck in den Leitungen auf, so erfolgt Lufteintrag in die Leitungen über lufteinziehende Wirbelbildung an den Einläufen sowie über das Einsaugen von Luft durch die ersten Be-/Entlüftungsrohre. Letzteres kann in Abhängigkeit des Unterdrucks • zu impulsweisen Eintrag von größeren Luftpaketen, welche durch die Rohrleitungen transportiert werden, (geringer Unterdruck) oder • zu kontinuierlichen Lufteintrag führen, wobei sich, beginnend an den Belüftungsrohren, Freispiegelabfluss einstellt (größerer Unterdruck, vgl. Abbildung 3-23).

Im Übergangsbereich der genannten Druckverhältnisse kann wiederkehrend eine Unterbrechung des Freispiegelabflusses und damit das Auftreten sehr großer eingeschlossener Luftpakete erfolgen, welche durch die Rohrleitung transportiert werden. Eine vollständige Entlüftung (Innendurchmesser Entlüftungsrohre: 318 mm) konnte nicht gewährleistet werden und größere Luftmengen erreichten das ÜB R-G und führten dort zu Spritzwasser.

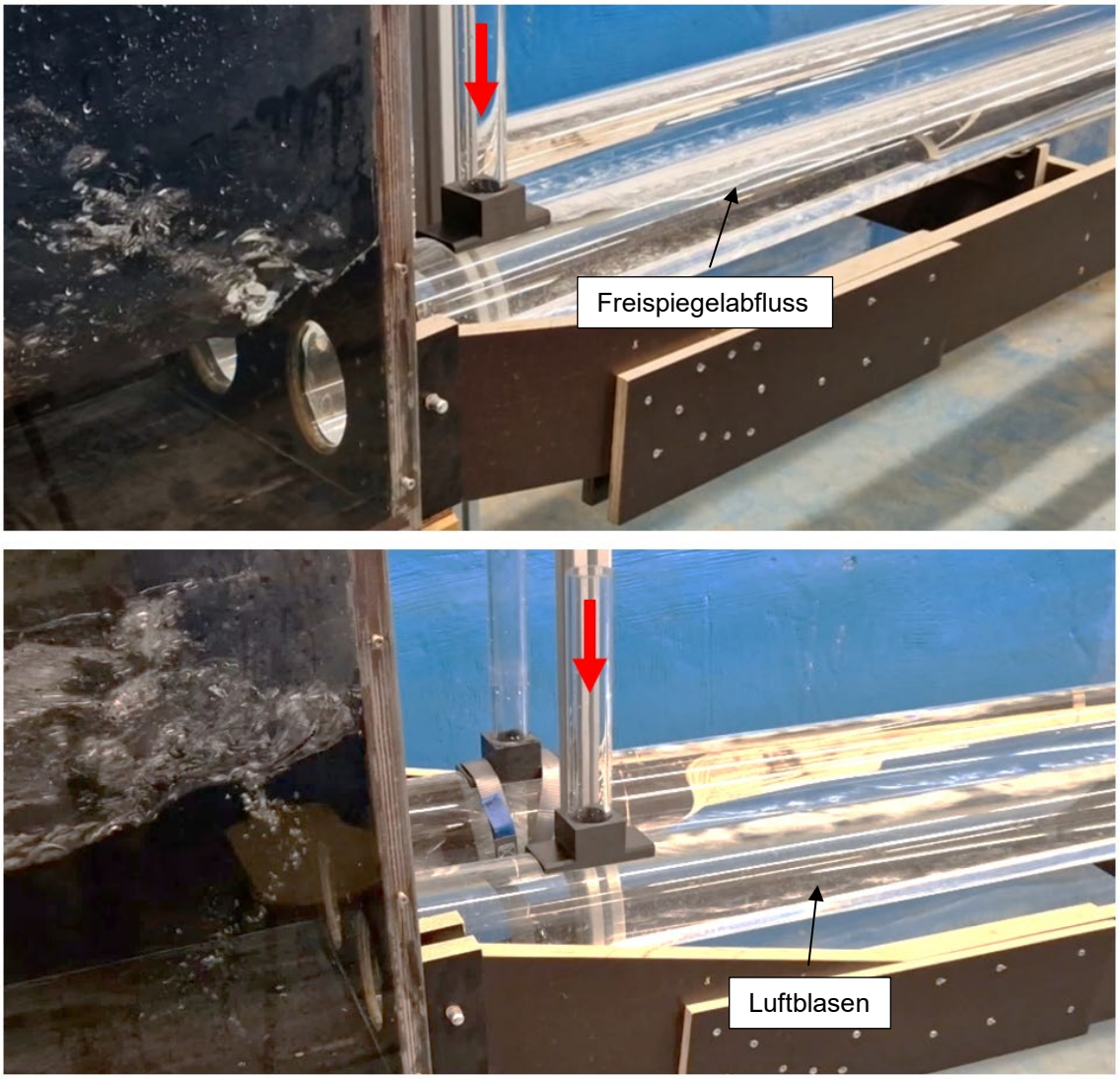


Abbildung 3-23 Momentaufnahme zu den hydraulischen Verhältnissen im Bereich der Belüftungsrohre bei größerem Unterdruck (oben) und bei geringerem Unterdruck (unten).



Abbildung 3-24 Momentaufnahmen zur Entlüftung bei unterschiedlichen Entlüftungsrohrdurchmessern (linke Leitung: 318 mm; rechte Leitung: 1058 mm); oben links: Luftblasen in Entlüftungsrohre; oben rechts: resultierender Luftaustritt ins Becken ÜB R-G; unten: Luftgehalt der Strömung im Nachlauf der ersten Entlüftungsrohre.

Bei den beschriebenen hydraulischen Zuständen besteht trotz der Beckenverlängerung grundsätzlich die Möglichkeit, dass zusätzlich Luftblasen, welche infolge des ins ÜB G-R einfallenden Überfallstrahls eingetragen werden, auch den Weg bis in die Rohrleitungen finden können. Vor dem Hintergrund der Untersuchungen am gegenständlichen Modell ist jedoch davon auszugehen, dass ein derartiger Lufteintrag vernachlässigbar gering ausfällt.



Abbildung 3-25 Charakteristische Momentaufnahmen des Lufteintrages in das Becken ÜB R-G während der Versuchsdurchführungen: links ohne Anpassungen und rechts mit letzten Anpassungen.

Im weiteren Verlauf der Modellversuche wurde der Einfluss größerer Rohrdurchmesser für die hinteren Be-/Entlüftungsrohre untersucht, indem diese mit einem Innendurchmesser von 1058 mm (Naturmaßstab) und damit im Durchmesser der eigentli-

chen Rohrleitungsstrecken verbaut wurden (vgl. Abbildung 3-24). Die Entlüftung erfolgte dabei grundsätzlich effizienter und der verminderte Lufteintrag ins ÜB R-G war am Versuchsstand deutlich zu erkennen. Auch das, v. a. beim Zuschlagen der Leitungen, impulsweise hohe Aufsteigen von Wasser-Luft-Gemischen in den Be-/Entlüftungsrohren wurde mit der Rohrdurchmesservergrößerung positiv beeinflusst und konnte deutlich reduziert werden.

Simulation verlängerter Rohrleitungsstrecken

Um die Auswirkungen des Unterdrucks auf die hydraulischen Verhältnisse im ÜB G-R besser beurteilen zu können, erfolgten vergleichende Versuchsdurchführungen (Fall *a* und *b*), bei welchen

a) alle Be-/Entlüftungsrohre aktiv waren und einen Druckausgleich zuließen und
b) die Belüftungsrohre verschlossen wurden und damit ein Druckausgleich im Bereich der Rohrleitungseinläufe unterbunden wurde.

Für diese Untersuchungen wurde zudem das am Modell größtmögliche Gefälle der Rohrleitungen eingestellt. D. h., das ÜB R-G wurde möglichst tief gelagert und damit das hydraulische Gefälle zwischen ÜB G-R und ÜB R-G vergrößert. Mit diesem Vorgehen konnten Rohrleitungslängen simuliert werden, welche die kritischen Rohrleitungslängen (vgl. Tabelle 3-5) teilweise überschritten und damit Unterdruck zu erwarten war. Auf Grundlage analytischer Berechnungen (Energiegleichung) sind in Tabelle 3-6 die simulierten Rohrleitungslängen für die am Modell eingestellte maximale Höhendifferenz zwischen den Übergangsbecken aufgezeigt.

Tabelle 3-6 Analytisch bestimmte simulierte horizontale Rohrleitungslängen aufgrund der Höhendifferenz zwischen Übergangsbeckens G-R und Übergangsbecken R-G am Modellversuchstand in Abhängigkeit des Abflusses.

Abfluss Q [m³/s]	simulierte horizontale Rohrleitungslänge $l_{R,x,sim}$ [m]	
10,40	433,5	> $l_{R,x,krit}$ (theoretisch kein Unterdruck)
8,10	435,5	< $l_{R,x,krit}$ (Unterdruck)
6,75	438,5	< $l_{R,x,krit}$ (Unterdruck)

Die entsprechenden Versuche zeigten, dass für den Fall *b* mit dem auftretenden Unterdruck eine Sogwirkung auf den Wasserkörper im ÜB G-R resultierte und damit, bei einer ausreichenden Überdeckung der Einläufe, eine Absenkung des Wasserstands im ÜB G-R einherging (vgl. Abbildung 3-26). Während für den Abfluss von 10,4 m³/s die Wasserstandsdifferenz Δh zwischen Fall *a* und *b* mit ca. 0,16 m eher gering ausfiel (entsprechend der analytischen Berechnung wird hier theoretisch kein Unterdruck prognostiziert), konnte für einen Abfluss von Q = 8,1 m³/s ein Δh von etwa 0,69 m und für Q = 6,75 m³/s ein Δh von ca. 0,52 m messtechnisch erfasst werden.

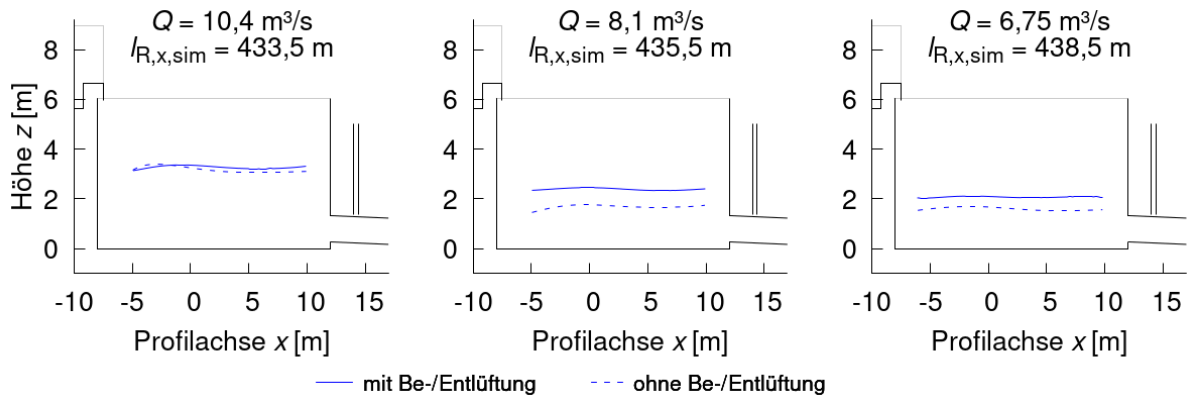


Abbildung 3-26 Messtechnisch erfasste Wasserspiegellagen im Übergangsbecken G-R für die simulierten maximalen Rohrleitungslängen am gegenständlichen Versuchsstand mit und ohne Be-/Entlüftung.

Für den Fall *a*, bei welchem ein Druckausgleich über die Belüftungsrohre stets ermöglicht wurde, konnte bei auftretendem Unterdruck das Einsaugen von Luftblasen/-paketen beobachtet werden. Ein deutlicher Lufteintrag ist die Folge. Diese Luftpakete werden, zumindest teilweise, wieder durch die unterliegenden Entlüftungsrohre, bei welchen die örtliche Druckhöhe die lokale Höhenlage der Rohrleitungsoberkante überschreitet, ausgetragen. Die in den Leitungen verbleibende Luft entweicht schließlich im ÜB R-G und kann temporär zu deutlichem Spritzwasser führen.

Instationäre Zustände

Im Betrieb der Anlage sind neben stationären Abflusssituationen auch instationäre Zustände, also Abflussänderungen, zu erwarten. Im Zusammenhang mit Rohrströmungen sind v. a. das sog. Auf- und Zuschlagen von Leitungen, also der Wechsel von Druck- zu Freispiegelabfluss und umgekehrt, als potenziell kritische Zustände zu betrachten. Es kann davon ausgegangen werden, dass möglichst rasche Abflussänderungen die ungünstigsten Szenarien für das Auf- bzw. Zuschlagen der Rohrleitungen anzusehen sind.

Mit den im LWN verfügbaren Pumpen konnte eine Abflusssteigerung von 0 auf 10,4 m³/s innerhalb von ca. 32 s (Naturwerte) erreicht werden. Die Abflussreduzierung von 10,4 auf 0 m³/s erfolgte im Rahmen der Abschaltung der Pumpen in einem Zeitraum von etwa 100 s. Die am Auslauf des (G)B 2 sowie am Auslauf des ÜB R-G protokollierten Abflusskurven sind in Abbildung 3-27 dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass der zeitliche Versatz zwischen den beiden dargestellten Abflussmessungen (schwarze und blaue Graphen) nicht den tatsächlichen Zuständen entspricht und des Weiteren mit der Rohrleitungslänge variiert.

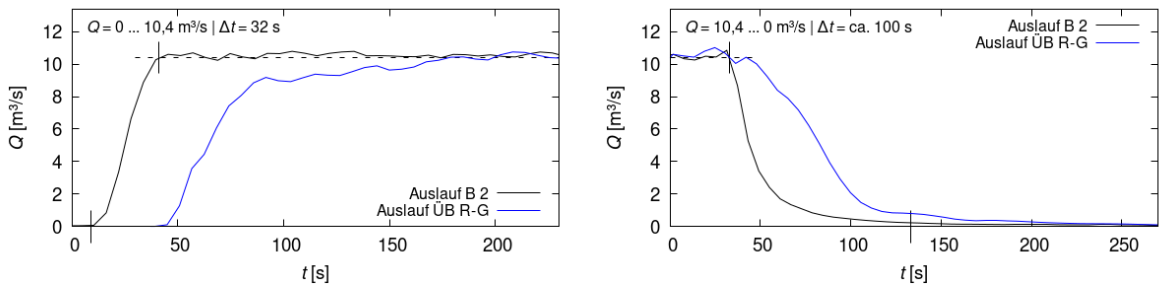


Abbildung 3-27 Abflusskurven erfasst am gegenständlichen Modellversuch für die Abflussänderung von 0 auf 10,4 m³/s und von 10,4 auf 0 m³/s.

Die Beobachtungen zu den instationären Lastfällen können im Allgemeinen wie folgt beschrieben werden:

- Mit dem Abflusszuwachs von 0 auf 10,4 m³/s resultiert zu Beginn ein Freispiegelabfluss in den Rohrleitungen. Mit weiter zunehmendem Abfluss schlagen die Leitungen zu, schließen den in den Leitungen befindlichen Luftkörper ein und bewirken ein „Durchdrücken“ des Luftvolumens in Form kleinerer Luftpakete. Zum Teil können diese das ÜB R-G erreichen. Anschließend bildet sich an der Stauwurzel ein Wechselsprung aus, welcher fortwährend kleinere Luftblasen produziert. Mit dem Abfluss nehmen auch die Fließgeschwindigkeiten in den Leitungen zu, wodurch die Entlüftung über die Be-/Entlüftungsrohre großteils erfolgen kann und eher geringe Luftmengen ins ÜB R-G eingetragen werden.
- Das Aufschlagen von Rohrleitungen bedingt im Allgemeinen ein abruptes Einsaugen von Luft an den Einläufen in die Leitungen. Mit den vorhandenen Be-/Entlüftungsrohren kann das Aufschlagen der Leitungen für den Lastfall der Abflussreduzierung von 10,4 auf 0 m³/s als unkritisch angesehen werden. Das Einsaugen der Luft erfolgt in diesem Fall über die Be-/Entlüftungsrohre und entlastet damit die hydraulische Situation an den Einläufen.

3.2.3 Fazit und Empfehlungen

Bei geringen Abflüssen in der Einleitung herrscht bis zur Stauwurzel in den Rohrleitungen Freispiegelabfluss vor. Aufgrund der Ausbildung eines Wechselsprungs werden dort Luftblasen produziert und mit der Strömung ins Übergangsbecken R-G transportiert. Für größere Abflüsse liegt Druckabfluss vor. In Abhängigkeit des Abflusses und der resultierenden Überdeckung der Rohrleitungseinläufe können sich lufteinziehende Wirbelstrukturen ausbilden. Wird davon ausgegangen, dass die am Modell beobachteten, eher schwach ausgeprägten lufteinziehenden Wirbelstrukturen entsprechend auf die Natur übertragen werden können, so kann der resultierende Lufteintrag als relativ gering eingestuft werden. Die Luftblasen werden anschließend durch die Rohrleitung transportiert und ins Übergangsbecken R-G eingetragen. Erfolgt eine Reduzierung des Abflusses und damit ein Übergang von Druckabfluss auf Freispiegelabfluss, so ist mit sog. Aufschlagen der Leitungen zu rechnen. Dabei wird über die Rohrleitungseinläufe Luft in die Leitung eingesogen bis sich der Freispiegelabfluss eingestellt hat. Durch die Ausbildung eines Wechselsprungs an der Stauwurzel werden dann Luftblasen in den Wasserkörper eingetragen. Findet umgekehrt eine Zunahme des Abflusses und damit der Wechsel von Freispiegel- zu Druckabfluss statt, so erfolgt das sog. Zuschlagen der Leitungen. Die bei Freispiegelabfluss in den Leitungen befindlichen Luftkörper werden eingeschlossen und mit der Zunahme der Fließgeschwindigkeiten durch die Leitungen gedrückt. Die eingeschlossenen Luftkörper weisen in Abhängigkeit der Rohrleitungslängen eher große Volumina auf.

V. a. das zuletzt genannte Zuschlagen der Leitungen kann hinsichtlich des Lufteintrags in die Leitungen und den damit verbundenen Luftaustrag im Übergangsbecken R-G als kritisch hinsichtlich der resultierenden Spritzwassermenge betrachtet werden. Um eine (anteilige) Entlüftung bereits von dem Übergangsbecken R-G zu erreichen wurden Be-/Entlüftungsrohre an den Leitungen des Modellversuchstands installiert. Über diese konnte der Lufteintrag ins Übergangsbecken R-G deutlich reduziert werden.

Im Betrieb der Anlage kann in Abhängigkeit des Abflusses in einigen Rohrleitungsstrecken Unterdruck auftreten. Auf Grundlage analytischer Berechnungen wurden kritische Rohrleitungslängen für variierende Abflüsse bestimmt. Überstreitet die Rohleitungslänge einer Flachstrecke eine kritische Rohrleitungslänge, so ist für den entsprechenden Abfluss mit Unterdruck im Bereich der Rohrleitungseinläufe zu rechnen (vgl. Tabelle 3-5). Mit dem Unterdruck resultiert eine Sogwirkung auf den Wasserkörper im Übergangsbecken G-R, wodurch eine Absenkung des Wasserstands einhergeht. Da Unterdruck in Rohrströmungen tendenziell als ungünstig angesehen werden kann, z. B. wird das Auftreten von Kavitation dadurch begünstigt, ist ein Druckausgleich zu empfehlen. Dieser kann über an die Rohrleitungen angeflanschte Belüftungsrohre, welche sich im Bereich des Unterdrucks befinden, erfolgen. Mit dem Druckausgleich findet ein deutlicher Lufteintrag in die Rohrleitungen statt, wodurch sich in Abhängigkeit des Unterdrucks entweder Freispiegelabfluss resultiert oder große abgeschlossene Luftpakete durch die Leitungen transportiert werden. Über stromabliegende Entlüftungsrohre im Überdruckbereich der Rohrleitungen können Großteile der Luftpakete/-blasen entweichen, bevor diese ins Übergangsbecken R-G eingetragen werden.

Der Luftein- und Luftaustrags am System *ÜB G-R → R → ÜB R-G* inkl. installierter Be-/Entlüftungsrohre ist zusammenfassend in Abbildung 3-28 dargestellt.

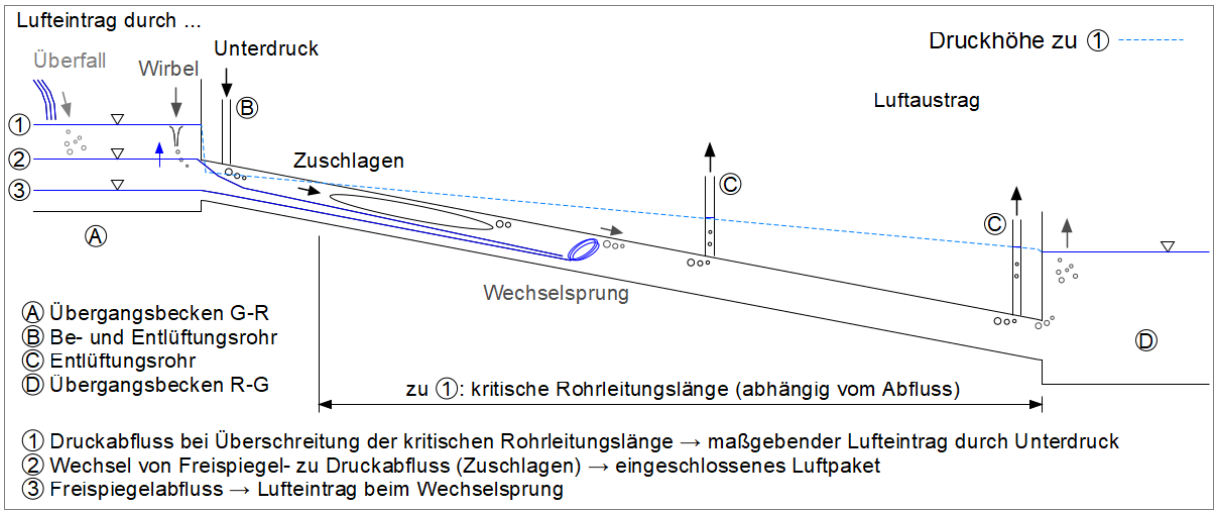


Abbildung 3-28 Schaubild zum Lufteintrag und -austrag am System „Übergangsbecken G-R → Rohrleitung → Übergangsbecken R-G“.

Vor dem Hintergrund der durchgeführten Modellversuche wird für den Betrieb der Einleitung ausgehend vom Planzustand des Systems *ÜB G-R → R → ÜB R-G* empfohlen mindestens drei Be- bzw. Entlüftungsrohre pro Rohrstrang einer Flachstrecke zu installieren. Optional kann zudem eine Teilabdeckung der Übergangsbecken R-G im Bereich der Ausläufe auf einer Länge von etwa 6,0 m ausgehend von der Beckenrückwand als Spritzwasserschutz vorgesehen werden.

In Verbindung mit Spritzwasser ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass es im Winter zu Anfrierungen kommen kann. Diese wirken allgemein als Querschnittsverengung und könnten damit das Abflussverhalten beeinflussen. Durch das Ablösen von Anfrierungen und deren möglicher Transport mit der Strömung besteht weiterhin die Gefahr des Versatzes von Rohrleitungseinläufen. In diesen Zusammenhang ist es empfehlenswert ein Monitoring der Anlage vorzusehen, um ggf. betriebliche Vorkehrungen treffen zu können.

Dimensionierung und Lage der Be-/Entlüftungsrohre

In geringem Abstand (wenige Meter) stromab der Rohrleitungseinläufe im Übergangsbecken G-R sollten vertikale Rohrleitungen maßgeblich zur Belüftung bei auftretendem Unterdruck vorgesehen werden. Bei Druckabfluss ohne Überschreitung der kritischen Rohrleitungslänge kann zudem Luft, welche über lufteinziehende Wirbel oder anderweitig eingetragen wurde, bereits anteilig aus dem Rohrleitungssystem entweichen. Empfohlen werden Rohrinnendurchmesser dieser ersten Be-/Entlüftungsrohre von min. 300 mm.

Weiter unterliegend sollten im Sinne der Entlüftung weitere, angeflanschte Rohrleitungen vorgesehen werden. Sinnvolle Positionen für Entlüftungsrohre sind (vgl. auch Abbildung 3-29):

- Etwa am unterwasserseitgen Ende der Stauwurzel (ohne vorherrschenden Abfluss) und damit gesichert im Nachlauf des Wechselsprungs, welcher sich bei Freispiegelabfluss einstellt. Ausgehend von der Rückwandinnenkante des Übergangsbeckens R-G in einem Abstand von ca. 20 m in Richtung Oberwasser.
- In geringem Abstand (wenige Meter) stromauf der Rohrleitungsausläufe am Übergangsbecken R-G.
- Bei langen Rohrleitungsstrecken kann eine zusätzliche Entlüftung wenige Meter stromab der kritischen Rohrleitungslänge, welche sich beim geringsten Druckabfluss einstellt, sinnvoll werden. So können Luftblasen zum Teil bereits frühzeitig aus den Rohrleitungen entweichen und werden weniger weit durch die Leitungen transportiert. Des Weiteren nimmt mit der Rohrleitungslänge auch der Abflussbereich zu, bei welchem Unterdruck und damit Lufteintrag durch die Belüftungsrohre auftritt. Für Rohrleitungslängen ab 100 m wird demnach eine zusätzliche Entlüftung empfohlen.
  Entsprechend der Versuchsdurchführungen sowie der analytischen Berechnung kann bei einem Abfluss von etwa 5 m³/s (DN1200) über einen Einleitungsstrang vom Übergang zu Freispiegelabfluss ausgegangen werden. Bei diesem Abfluss resultiert entsprechend der analytischen Berechnungen eine kritische Rohrleitungslänge von ca. 88 m. Die Positionierung entsprechender Entlüftungsrohre könnte etwa in einem Abstand von 80 m zum Rohrende erfolgen.

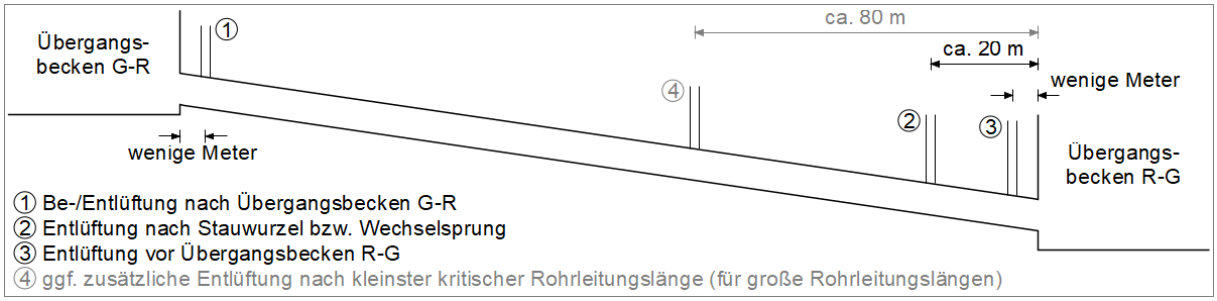


Abbildung 3-29 Empfohlene Positionierung der Be- und Entlüftungsrohre entlang den Rohrleitungsstrecken.

Abgesehen von Sonderanfertigungen, welche von der runden Querschnittsform abweichen, wie z. B. in Fließrichtung lange, schlitzförmige Anschlüsse mit entsprechenden Entlüftungsschächten, ist zu erwarten, dass auch größere Rohrdurchmesser zu einer verbesserten Entlüftung beitragen. Vertikale Abgänge im Durchmesser der geplanten Rohrleitungsstrecken (DN 1200) können über entsprechende T-Stücke realisiert werden und zeigten auch im Versuch eine Optimierung hinsichtlich der Entlüftung.

Mit den anfangs am Modell installierten Entlüftungsrohren (Innendurchmesser im Naturmaßstab 318 mm) konnte v. a. beim Zuschlagen der Leitungen das impulsweise hohe aufsteigen von Wasser-Luft-Gemischen in den Entlüftungsrohren beobachtet werden. Mit der Vergrößerung der Entlüftungsrohrdurchmesser fielen diese Schwankungen deutlich geringer aus. Konkrete Angaben bzgl. der erforderlichen Länge bzw. Höhe der Be- und Entlüftungsrohre sind aufgrund der Maßstabseffekte in Verbindung mit Wasser-Luft-Gemischen nicht ohne Weiteres definierbar. Entsprechend den zu erwartenden hydraulischen Verhältnissen in der Einleitung werden folgende Längen der Be-/Entlüftungsrohre ausgehend von den Rohrleitungsachsen empfohlen:

- Anordnung der Belüftungsrohre wenige Meter hinter den Übergangsbecken G-R mit einer Höhe etwa bis zur Oberkante der Beckenwände.
- Entlüftungsrohre im Durchmesser der Einleitungsrohrleitungen mit einer Höhe von min. 3,2 m (Beckentiefe Übergangsbecken R-G). Positionierung entsprechend der Abbildung 3-29.

Um Wasseraustritt aus den Entlüftungsrohren zu vermeiden, wird empfohlen zusätzliche konstruktive Maßnahmen vorzusehen. In diesem Zusammenhang stellen Querschnittsreduzierungen, Rohrkrümmer oder das Zusammenführen der Entlüftungsrohre der parallel verlaufenden Leitungsstränge mögliche Herangehensweisen dar.

Mit der Nutzung von Be- bzw. Entlüftungsrohren ist zudem zu berücksichtigen, dass mit deren Installation in den Rohrleitungen zusätzliche lokale Verluste zu erwarten sind. Der Verlustbeiwert für Kreisrohrverzweigungen, wie es mit den Be-/Entlüftungen der Fall ist, wird entsprechend einschlägiger Literatur (Schröder und Zanke, 2003) mit $\zeta = 0{,}04$ angegeben. Der lokale Verlust kann dann in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit bestimmt werden mit $h_{VEntl} = \zeta \cdot v^2/2g$. Für einen Abfluss von 10,4 m³/s ergibt sich demnach pro Be-/Entlüftungsrohr ein lokaler Verlust von 7,2 cm. Der Freibord in einem ÜB G-R einer Flachstrecke reduziert sich entsprechend der Anzahl der eingebauten Be-/Entlüftungsrohre. Werden z. B. drei Be-/Entlüftungsrohre in einer Flachstrecke berücksichtigt, so reduziert sich der min. Freibord bei $Q = 10{,}4$ m³/s (vgl. Tabelle 3-3) um 3x 0,072 m = 0,216 m.

3.3 WEITERFÜHRENDE FRAGESTELLUNGEN

Im Rahmen abschließender Projektberatungen ergaben sich drei weiterführende Fragestellungen zur baulichen Umsetzung bzw. zum Betrieb der Anlage, welche nachfolgend erörtert werden.

<u>Ausreichender Mindestfreibord</u>

Entsprechend der Angaben des Planers (Tractebel) müssen aus konstruktiven Gründen bauliche Anpassungen an den Gerinnebecken erfolgen, welche eine Reduzierung des vorhandenen Freibords um ca. 15 cm bewirken. In diesem Zusammenhang stellte sich die Frage nach einem ausreichenden Mindestfreibord für die Gerinnebecken.

Mit der baulichen Anpassung der Beckenausläufe entsprechend der Be.Var 3 konnte bei einem Abfluss von 10,4 m³/s ein min. Freibord von 0,74 m (vgl. Tabelle 3-2) erreicht werden. Dieses Freibordmaß kann vor dem Hintergrund der durchgeführten Versuche grundsätzlich als ausreichend angesehen werden. Ein verbleibendes Risiko von Wasseraustritt in Form von Spritzwasser ist dabei jedoch nicht auszuschließen. Eine Reduzierung dieses Freibordmaßes, z. B. aufgrund der konstruktiven Anpassungen, wird

nicht empfohlen. Jedoch wurde ausgehend von der Be.Var 3 eine weitere Vorzugsvariante der Beckenausläufe Be.Var 6 erarbeitet (vgl. Abschnitt 3.1.3). Diese Variante stellte bei gleichzeitig verbesserter Überfallstrahleinschnürung eine Freibordvergrößerung gegenüber der Be.Var 3 von 15 cm dar (Q = 10,4 m³/s). Entsprechend des abschließenden Planungsstands (vgl. Abschnitt 48) wird die Be.Var 6 im Rahmen der baulichen Umsetzung Berücksichtigung finden, so wird die aus konstruktiven Gründen erforderliche Freibordreduzierung ausgeglichen werden.

Wasserstand-Abfluss-Beziehung für ein Gerinnebecken

Zur Bestimmung bzw. Kontrolle des Abflusses an einem Gerinnebecken der Einleitung wurde eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung am gegenständlichen Modell ermittelt. Entsprechend eines aktualisierten Planungsstands wurde dabei die Beckenauslaufvariante Be.Var 6 (vgl. Abbildung 3-10) berücksichtigt. Die Wasserstanderfassung erfolgte entlang der Mittelachse des Gerinnebeckens in einem Abstand zum Beckenauslauf von 4,0 m. In Abbildung 3-30 sind die messtechnisch erfassten Werte inkl. einer entsprechenden Trendfunktion dargestellt.

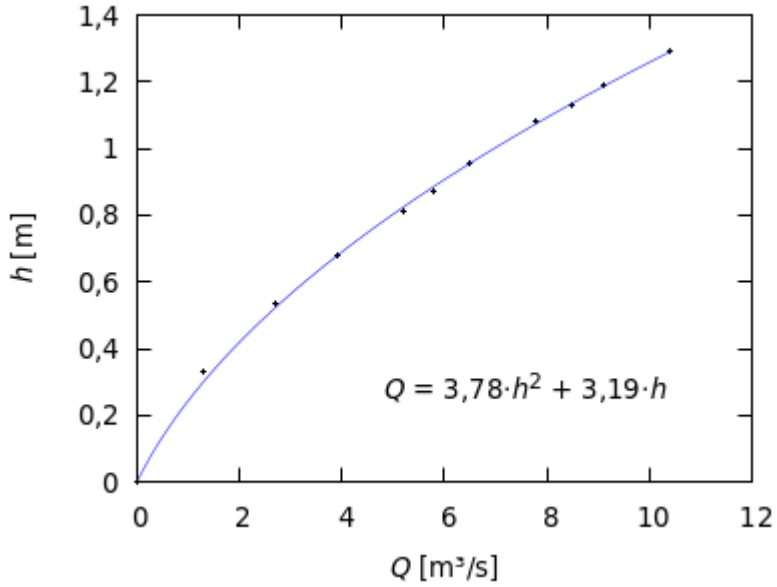


Abbildung 3-30 Wasserstand-Abfluss-Beziehung für ein Gerinnebecken mit Beckenauslauf Variante Be.Var 6.

Zu berücksichtigen ist, dass, u. a. in Abhängigkeit des Abflusses, die Wasserspiegelausbildung in den Gerinnebecken durch die vorherrschende turbulente Strömungssituation und die fortwährende Entlüftung maßgebend beeinflusst wird. Vor allem Letzteres stellt einen Strömungsprozess dar, welcher nicht ohne Weiteres auf die Natur übertragen werden kann, weshalb eine Verifizierung bzw. Korrektur der W-Q-Beziehung an der errichteten Anlage erfolgen sollte.

Steigender Wasserstand im Tagebausee:

Eine weitere Fragestellung bezog sich auf den Lastfall des ansteigenden Tagebausee-wasserspiegels und dessen Auswirkungen auf die lokale, hydraulische Situation bei der Einleitung. Mit dem Anstieg des Wasserspiegels im Tagebausee werden die Becken bzw. die Rohrleitungen des Einleitbauwerks sukzessive eingestaut. Dieser Umstand wird die hydraulischen Vorgänge in der Einleitung beeinflussen.

Bei steigenden Seewasserständen in Bereichen der offenen Gerinne, also bei den Steilstrecken, wird zeitweise eine Beeinflussung der Überfallstrahlausbildung zwischen den Becken erfolgen. Mit dem Einstau wird demnach der vollkommene Überfall aus einem Gerinnebecken in einen unvollkommenen Überfall übergehen. Damit verbunden ist i. d. R. ein Anstieg der oberwasserseitigen Wasserspiegellage, was schließlich zu einer Freibordreduzierung in diesem Becken führen wird. Zu diesen Zeitpunkten ist jedoch davon auszugehen, dass die jeweiligen Gerinnebecken bereits ausreichend eingestaut sind und ein Wasserübertritt über die Beckenwände keine gravierenden Folgen hat.

Das ÜB G-R und ÜB R-G einer Flachstrecke sind jeweils mit zwei Rohrleitungen verbunden. Über das Prinzip der kommunizierenden Wassersäulen ist bei steigendem Seewasserstand im Bereich eines ÜB R-G auch ein entsprechender Anstieg des Wasserstands im jeweiligen ÜB G-R zu erwarten. Dabei sind die lokalen und streckenabhängigen Verluste zu berücksichtigen. Ist der vorhandene Freibord im betroffenen ÜB G-R aufgebraucht, so ist ein Überlaufen des Beckens zu erwarten. Bis zu diesem Zeitpunkt muss der gesamte Abfluss über die Rohrleitungen abgeführt werden, wodurch keine nennenswerten Veränderungen der Einlauf,- Auslauf- und Rohrreibungsverluste einhergehen. Abbildung 3-31 skizziert diesen Zustand des steigenden Seewasserspiegels bis der Freibord im ÜB G-R aufgebraucht ist (blau) und weiter bis zum Überlauf (rot).

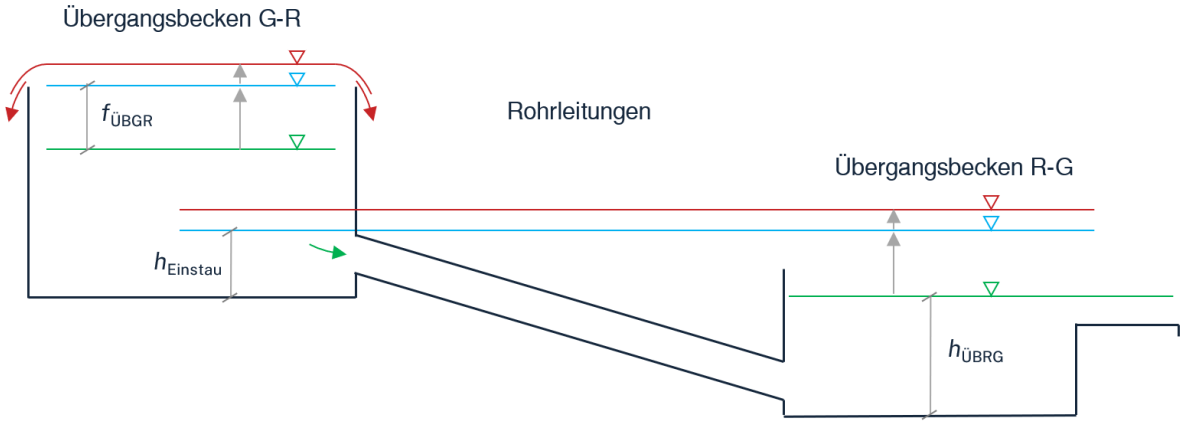


Abbildung 3-31 Skizze zu steigendem Tagebauseewasserstand im Bereich einer Flachstrecke (ohne Berücksichtigung von Be-/Entlüftungsrohren).

Die geringsten Freibordmaße in den ÜB G-R liegen beim Maximalabfluss von 10,4 m³/s vor. Für die einzelnen Flachstrecken der Einleitung sind in Tabelle 3-7 die zu erwartenden Einstauhöhen (Seewasserstände) an den jeweiligen ÜB G-R, gemessen von der Beckensohlenoberkante, zum Zeitpunkt der Vollfüllung des Beckens, also wenn der vorhandene Freibord aufgebraucht ist, aufgezeigt (Abbildung 3-31, blau). Dabei wurden die, im Rahmen der fortschreitenden Planung durch Tractebel (Anpassung der Rohrleitungslängen), angepasste Beckentiefe der ÜB G-R von 5,9 m und die geänderten Rohrleitungslängen berücksichtigt. Diese entsprechen nicht dem finalen Planungsstand, vgl. hierzu Abschnitt 3.4. Neben dem Abfluss von 10,4 m³/s, erfolgten die Berechnungen auch für einen Abfluss von 8,5 m³/s (abweichend zu bisher berücksichtigten Abfluss von 8,1 m³/s).

Ob ein ÜB G-R tatsächlich eingestaut ist, hängt weiterhin von der Einbindetiefe der Becken in den anstehenden Boden ab. Entsprechend den Planunterlagen ist eine Einbindetiefe von 2,2 bis 2,6 m gemessen von der Beckensohlenoberkante vorgesehen.

Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass bei einem Abfluss von 10,4 m³/s in Verbindung mit dem beginnenden Überlaufen der ÜB G-R aufgrund des Seewasserspiegelanstiegs keines der Becken vollständig eingestaut sein wird.

Tabelle 3-7 Einstauhöhen $h_{Einstau}$ der einzelnen Übergangsbecken G-R der Einleitung bei steigendem Seewasserstand.

Flachstrecke	horizontale Länge [m]	Gefälle [%]	Nennweite Rohr	Q = 8,5 m³/s		Q = 10,4 m³/s	
				f_{min} [m]	$h_{Einstau}$ [m]	f_{min} [m]	$h_{Einstau}$ [m]
1	320,9	2,0	DN1200	3,80	0,91	1,95	-1,45
2	111,0	2,0	DN1200	2,48	3,14	1,01	1,81
3	74,6	2,0	DN1200	2,14	3,53	0,84	2,37
4	130,9	2,0	DN1200	2,67	2,93	1,10	1,50
5	586,0	2,0	DN1200	3,80	-1,90	3,14	-5,56
6	193,5	2,0	DN1200	3,25	2,26	1,38	0,53
7	72,5	2,0	DN1200	2,12	3,55	0,83	2,40
8	186,0	2,0	DN1200	2,39	1,55	0,16	-0,54
9	813,8	2,0	DN1200	3,80	-4,32	3,16	-9,10

Um das Schadenspotential beim Überlaufen eines ÜB G-R zu minimieren, sind bauliche Anpassungen zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang wird grundsätzlich empfohlen, die Einbindetiefe der Becken möglichst gering zu halten, um eine ausreichende Einstautiefe (Empfehlung mind. 1,0 m) gewährleisten zu können. Des Weiteren sollte eine Befestigung der Geländeoberkante um die ÜB G-R in Betracht gezogen werden. Zudem besteht grundsätzlich die Möglichkeit für jede Flachstrecke individuelle Anpassungen am Rohrleitungssystem vorzunehmen, welche die Verluste insgesamt reduzieren. Entsprechende Anpassungsmöglichkeiten sind die Vergrößerung der Rohrleitungsdurchmesser oder die Reduzierung der Auslaufverluste durch die Berücksichtigung von Rohrerweiterungen (Diffusor). Des Weiteren kann mit Hilfe von zusätzlichen Zwischenbecken in den Flachstrecken eine Reduzierung der effektiven Flachstreckenlänge erfolgen. Diese Becken führen jedoch zu zusätzlichen lokalen Verlusten und können daher nur in Kombination mit anderen Anpassungen zur Reduzierung der Verluste einhergehen. Neben diesen konstruktiven Maßnahmen können betrieblichen Vorgaben im Sinne von zeitweisen Abflussreduzierungen ein frühzeitiges Überlaufen eines ÜB G-R vorbeugen.

Beim vorliegenden Lastfall ist nicht nur ein Überlaufen an den ÜB G-R zu erwarten, sondern auch an den Be- und Entlüftungsrohren. Auch dort wird empfohlen eine Erosionssicherung der Geländeoberfläche vorzunehmen.

3.4 HYDRAULISCHE BEMESSUNG FÜR DEN ABSCHLIEßENDEN PLANUNGSSTAND

Im März 2026 wurde dem IWWN ein abschließender Planungsstand zur Einleitung übergeben. Dieser beinhaltet bauliche Anpassungen an den Becken und Rohrleitungen sowie eine Reduzierung der Auslegungswassermenge für die Bemessung der Anlage. Die Auslegungswassermenge für einen Einleitungsstrang betrug bisher 10,4 m³/s und wurde auf 8,25 m³/s reduziert. Dieser Wert setzt sich zusammen aus 1,5 m³/s aus Sümpfungswasser und 6,75 m³/s als Maximalabfluss aus der RWTL. Hydraulisch relevante Bauwerksbestandteile und -abmessungen für die einzelnen Rohrstrecken sind in Tabelle 3-8 einsehbar.

Tabelle 3-8 Maßgebende Angaben zu den Rohrstrecken entsprechend des Planungsstands vom März 2026 (Quelle: Tractebel).

Rohrstrecke	Rohrleitung: horizontale Länge jeweils von Innenkante Beckenwand [m]	Rohrleitung: Neigung der Rohrleitung [%]	Rohrleitung: Nennweite der Rohrleitung DN [mm]	Rohrleitung: SDR Rohrleitung [-]	Rohrleitung: Anzahl Be-/Entlüftungen [-]	Rohrleitung: zusätzliche lokale Einbauten	Rohrleitung: Anzahl der Zwischenbecken [-]	Rohrleitung: Anzahl der Leitungen pro Strang [-]	Übergangsbecken G-R: Abstand OK Beckensohle zu UK Rohrleitung ÜB G-R [m]	Übergangsbecken G-R: Beckentiefe (OK Beckensohle zu OK Beckenwände) ÜB G-R [m]	Übergangsbecken G-R: mittlere Einbindetiefe über OK Beckensohle ÜB G-R [m]	Zwischenbecken: Abstand OK Beckensohle zu UK Rohrleitung Einlauf ZwB [m]	Zwischenbecken: Beckentiefe (OK Beckensohle zu OK Beckenwände) ZwB [m]	Zwischenbecken: Abstand OK Beckensohle zu UK Rohrleitung Auslauf ZwB [m]	Zwischenbecken: mittlere Einbindetiefe über OK Beckensohle ZwB [m]	Übergangsbecken R-G: Abstand OK Beckensohle zu UK Rohrleitung ÜB R-G [m]	Übergangsbecken R-G: Beckentiefe (OK Beckensohle zu OK Beckenwände) ÜB R-G [m]	Übergangsbecken R-G: Abstand OK Beckensohle zu OK Beckenauslasssohle [m]	Höhenunterschied OK Beckensohle ÜB G-R zu ÜB R-G bzw. ÜB G-R zu ZwB oder ZwB zu ÜB R-G[m]
R1	326	1,55	1200	17	4	1x Absperrklappe DN1400 1x Verengung DN1400 auf DN1200 2x Rohrbogen R 105 m / W 14,1°	0	2	0,5	6,1						0,51	4,3	2,0	5,06
R2	105	1,80	1200	26	4	1x Rohrbogen R 90 m / W 16,9°	0	2	0,5	6,1	2,48					0,51	4,3	2,0	1,90
R3	72	2,00	1200	26	3		0	2	0,5	6,1	2,71					0,51	4,3	2,0	1,45
R4	130	2,00	1200	26	4		0	2	0,5	6,7	2,71					0,51	4,3	2,0	2,61
R5a	297	2,00	1400	26	1		1	2	0,5	6,1	2,91	0,7	6,1		2,79				6,14
R5b	297	2,00	1400	26	4	1x Rohrbogen R 90 m / W 24,7°		2					6,1	0,49		0,51	4,3	2,0	5,96
R6	184	2,00	1200	26	4		0	2	0,5	6,1	2,91					0,51	4,3	2,0	3,69
R7	73	2,00	1200	26	3		0	2	0,5	6,1	2,91					0,51	4,3	2,0	1,47
R8	197	2,00	1400	26	4	16x 15° Knie	0	2	0,5	6,1	3,01					0,51	4,3	2,0	3,95
R9	845	3,00	1200	26	4	1x Rohrbogen R 105 m / W 4,0° 1x Rohrbogen R 105 m / W 0,5° 1x Rohrbogen R 105 m / W 8,1°	0	1	0,5	6,1	3,01					0,51	4,3	2,0	25,36

Lastfall „Normalbetrieb“

Im Normalbetrieb der Anlage ist gewährleistet, dass das Wasser frei aus dem an eine Flachstrecke anschließenden Übergangsbecken R-G ausfließen kann und somit kein Rückstau vorliegt (vollkommender Überfall). Unter dieser Randbedingung stellt der Wasserstand im jeweiligen Übergangsbecken R-G den Ausgangspunkt für die hydraulischen Berechnungen dar. Dieser wurde auf Grundlage der am gegenständlichen Modell erfassten Wasserstand-Abfluss-Beziehung für die Beckenauslaufvariante Be.Var 6 (vgl. Abbildung 3-30) ermittelt.

Die zu erwartenden Beckenwasserstände sowie der jeweilige Freibord, die kritischen Rohrleitungslängen und die angenommenen Verluste für die Auslegungswassermenge von 8,25 m³/s in Tabelle 3-10 aufgeführt. Für die Gerinnebecken ist bei einem Abfluss von 8,25 m³/s ein Wasserstand von 2,11 m und damit ein Beckenfreibord von 1,04 m zu erwarten.

Es ist anzumerken, dass in Abhängigkeit des vorherrschenden Abflusses entweder Druckabfluss oder Freispiegelabfluss vorliegt. Im Rahmen der Versuchsdurchführungen wurde der Übergang von Druck- zu Freispiegelabfluss etwa bei einem Abfluss von 5 m³/s pro Einleitungsstang beobachtet. Ausgehend von den damit einhergehenden Druckverhältnissen in den Rohrleitungen sowie den zum Zeitpunkt der in den Untersuchungen berücksichtigten lokalen Verluste wurde die Empfehlung für die Positionierung einer zusätzlichen Entlüftung bei ca. 80 m ausgehend vom Rohrleitungsende empfohlen. Mit der Verwendung

- größerer Rohrdurchmesser (teilweise bis DN1400),
- variierendem Rohrleitungsgefälle und
- unter Berücksichtigung der geplanten Einbauten und den damit verbundenen lokalen Verlusten,

kann davon ausgegangen werden, dass der Wechsel von Druck- zu Freispiegelabfluss bei anderen, nicht ohne Weiteres bestimmbaren, Abflusswerten auftritt. Damit in Verbindung steht u. a. die Positionierung der zusätzlichen Entlüftung, denn der Abfluss, für den gerade noch Druckabfluss vorliegt, führt zu den kürzesten kritischen Rohrleitungslängen einer Flachstrecke.

Um näherungsweise abschätzen zu können, bei welchem Abflusswert pro Flachstrecke noch Druckabfluss vorliegen könnte, wurde die Torricelli-Gleichung herangezogen. Als Randbedingung wurde dabei der vollständige Einstau der Rohrleitungseinläufe angenommen (Beckenwasserstand entspricht OK Rohrleitung). Die vor diesem Hintergrund ermittelten Abflüsse nach Torricelli und die dazugehörigen kritischen Rohrleitungslängen sind in Tabelle 3-9 aufgezeigt. Diese Werte sind jedoch mit einer gewissen Unsicherheit belegt und dienen lediglich als grobe Orientierung.

Im normalen Betrieb der Anlage wurde neben der Auslegungswassermenge ein Abfluss von 7,5 m³/s herangezogen, für den die Überstauhöhe im Übergangsbecken von RWTL zur Rohrstrecke R1 zu ermitteln war. Der Abfluss von 7,5 m³/s ergibt sich aus 50% Sümpfungswasser und 50% des Maximalabflusses aus der RWTL (0,5 · 1,5 m³/s + 0,5 · 13,5 m³/s). Entsprechend der analytischen Berechnungen ist für diesen Abfluss eine Überstauhöhe von etwa 0,9 m bezogen auf die Rohrachse der abgehenden DN1400-Leitung zu erwarten.

Tabelle 3-9 Abschätzung des Abflusses, für den noch Druckabfluss vorherrschen könnte, sowie den entsprechenden krit. Rohrleitungslängen für den abschließenden Planungsstand März 2026.

Rohrstrecke	Abfluss nach Torricelli [m³/s]	krit. Rohrleitungslänge [m]
R1	5,8	127
R2	6,4	104
R3	6,4	90
R4	6,4	90
R5	9,2	91
R6	6,4	90
R7	6,4	90
R8	9,2	105
R9	3,2	40

Tabelle 3-10 Hydraulische Berechnungen für den Lastfall „Normalbetrieb“ für den abschließenden Planungsstand März 2026 bei einem Druckabfluss (Annahme) von 8,25 m³/s pro Einleitungsstrang.

Rohrstrecke		horizontale Länge [m]	Neigung [%]	DN [mm]	SDR [-]	Be-/Entlüftungen	Zwischenbecken	Leitungen pro Strang	Wasserstand ÜB G-R [m]	Freibord ÜB G-R [m]	Wasserstand ZwB [m]	Freibord ZwB [m]	Wasserstand ÜB R-G [m]	Freibord ÜB R-G [m]	Auslaufverlust [m]	Verlust an Be-/Entlüftungen [m]	Verlust an lokalen Einbauten [m] (Verengungen, Verschlussarmaturen, Rohrbögen und Segmentkrümmern)	Einlaufverlust [m]	Rohrreibungsverlust [m]	krit. Rohrleitungslänge [m]
	Q = 8,25 m³/s																			
R1		326	1,55	1200	17	4	0	2					3,11	1,19	1,186	0,179	0,223	0,095	3,240	303
R2		105	1,80	1200	26	4	0	2	3,27	2,83			3,11	1,19	0,990	0,149	0,006	0,083	0,836	162
R3		72	2,00	1200	26	3	0	2	3,42	2,68			3,11	1,19	0,990	0,112		0,083	0,573	131
R4		130	2,00	1200	26	4	0	2	2,76	3,94			3,11	1,19	0,990	0,149		0,083	1,035	135
R5a		297	2,00	1400	26	1		2	1,76*	4,34	1,76*	4,34			0,534	0,020		0,058	1,109	83
R5b		297	2,00	1400	26	4	1	2			1,76*	4,34	3,11	1,19	0,534	0,061	0,005	0,058	1,109	83
R6		184	2,00	1200	26	4	0	2	2,12*	3,98			3,11	1,19	0,990	0,149		0,083	1,465	135
R7		73	2,00	1200	26	3	0	2	3,41	2,69			3,11	1,19	0,990	0,112		0,083	0,581	131
R8		197	2,00	1400	26	4	0	2	1,76*	4,34			3,11	1,19	0,534	0,081	0,355	0,058	0,736	105
R9		845	3,00	1200	26	4	0	1							kein Normalbetrieb					

* ermittelt nach Torricelli - ggf. kein Druckabfluss

Lastfall „steigender Seewasserspiegel“

Mit der Befüllung des Tagebausees steigt der Seewasserspiegel sukzessive an. Es kommt zeitweise zu Rückstauerscheinungen, wodurch am betroffenen Übergangsbecken R-G kein freier Ausfluss mehr vorliegt und die hydraulischen Verhältnisse in der oberwasserseitigen Flachstrecke beeinflusst werden. Das Übergangsbeckens G-R der betroffenen Rohrstrecke (oder auch das Zwischenbecken von R5) wird in Abhängigkeit des Abflusses und des Seewasserstands überlaufen. Liegt neben konstruktiven Maßnahmen zur Sicherung der Geländeoberkante eine ausreichende Einstautiefe vor, so kann das Überlaufen als unproblematisch angesehen werden.

Um ein Überlaufen bei nicht ausreichender Einstautiefe zu verhindern, wurden für jede, von diesem Lastfall betroffene, Rohrstrecke Maximalabflüsse und damit betriebliche Einschränkungen festgelegt. Diese Abflüsse sind zusammen mit den rechnerisch ermittelten Einstautiefen, ausgehend von der mittleren Einbindetiefe, in Tabelle 3-11 einsehbar. R1 und R2 sind hier nicht relevant, da diese dauerhaft überhalb des Wasserspiegels liegen und demnach nicht eingestaut werden.

Tabelle 3-11 Einstautiefe über Gelände Oberkante der Übergangsbecken G-R bei aufgebrauchtem Beckenfreibord im Lastfall „steigender Seewasserstand“ für den Planungsstand März 2026.

Rohrstrecke	max. Abfluss pro Strang [m³/s]	Einstautiefe über Beckensohle OK [m] ÜBGR	ZwB
R3	6,75	2,20	-
R4	6,75	2,46	-
R5	6,75	2,02	2,09
R6	6,75	1,37	-
R7	8,25	1,42	-
R8	8,25	1,33	-
R9	2,00	1,06	-

Unter Einhaltung einer Mindesteintauchtiefe von mind. 1,0 m, wird für die Rohrstrecke R9 rechnerisch ein maximaler Abfluss von etwa 2,0 m³/s pro Strang prognostiziert.

Mit den Abflüssen aus Tabelle 3-11 wird stets eine Einstautiefe von mindestens 1,0 m eingehalten und es ist von einem schadenfreien Überlaufen der Becken auszugehen. Die im Abschnitt 3.3 formulierte Empfehlung zur Sicherung der Geländeoberkante im Nahbereich der Übergangsbecken G-R wird dennoch angeraten. Entsprechend der abschließenden Planung sind Wasserbausteine (LMB 60/300) um die Übergangsbecken G-R als Sicherungsmaßnahme vorgesehen. Ein Überlaufen ist nicht nur an dem Übergangsbecken G-R zu erwarten, sondern auch an den Be- und Entlüftungsrohren. Auch dort sind Sicherungsmaßnahmen empfehlenswert.

Der festgelegte Maximalabfluss für eine Rohrstrecke ist dann einzuhalten, wenn aufgrund des steigenden Seewasserstands der Beckenfreibord des jeweiligen Übergangsbeckens G-R aufgebraucht ist. In diesem Zusammenhang sollte ein Mindestfreibord definiert werden, mit dessen Erreichen die Einhaltung des Maximalabflusses vorzusehen ist. Diese Abflussreduzierung kann grundsätzlich auch sukzessive in Abhängigkeit des vorhandenen Freibords im jeweiligen Übergangsbecken G-R oder Zwischenbecken erfolgen. Daher und aus Gründen der Betriebssicherheit wird empfohlen, ein Monitoring der Beckenwasserstände vorzusehen, um beim Erreichen eines im Hinblick auf das verbleibende Risiko festgelegten Mindestfreibords den Abfluss in der Anlage bedarfsweise zu reduzieren.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Das geplante Einleitbauwerk für die Befüllung der Tagebaumulde Hambach soll im Wesentlichen aus einer Aneinanderreihung von Gerinnetreppen und Rohrleitungsstrecken bestehen, welche jeweils variierende Höhenunterschiede überbrücken werden. Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Hochschule Nürnberg wurde ein gegenständlicher Modellversuchstand auf Grundlage des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes aufgebaut und hydraulische Untersuchungen durchgeführt. Das Modell beinhaltete eine Aneinanderreihung eines modellierungsbedingten Einlaufbeckens, zwei regulärer Gerinnebecken, einem Übergangsbecken G-R, einer Rohrleitungsstrecke von 106 m und einem anschließenden Übergangsbecken R-G. Letzteres wurde in seiner Höhe variierbar gelagert, wodurch das Gefälle der beiden parallel verlaufenden Rohrleitungen und damit auch das hydraulische Gefälle zwischen den Übergangsbecken verstellt werden konnte. Dies ermöglichte Einflüsse aufgrund von Reibungskräften in den Rohrleitungen, welche mit dem Froudeschen Modellgesetz grundsätzlich nicht auf die Natur übertragbar sind, auszugleichen. Des Weiteren konnte damit die Simulation größerer Rohrleitungslängen erfolgen, welche zusammen mit dem vorherrschenden Abfluss generell Einfluss auf die Druckverhältnisse in den Leitungen nehmen.

Mit der zusätzlichen Anwendung dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Simulation, wurden bereits vor Beginn der baulichen Umsetzung des gegenständlichen Modells Anpassungen an den Gerinnebecken vorgenommen. Die Versuchsdurchführungen am gegenständlichen Modell fokusierten sich anschließend auf die Erfassung und Optimierung der hydraulischen Verhältnisse in der Anlage. In diesem Zusammenhang sind neben der Sicherstellung einer ausreichenden Energieumwandlung in den Gerinnebecken, v. a. die Reduzierung des Lufteintrags in die Rohrleitungen sowie die Vermeidung von Wasserverlust zu nennen.

In Abhängigkeit des Abflusses bzw. der Abflussänderungen konnte deutlicher Lufteintrag in die Rohrleitungen beobachtet werden, dessen Ursache wie folgt beschrieben werden kann:

- Bei geringen Abflüssen in der Einleitung herrscht bis zur Stauwurzel in den Rohrleitungen Freispiegelabfluss vor. Aufgrund der Ausbildung eines Wechselsprungs werden dort Luftblasen produziert.
- Für größere Abflüsse liegt Druckabfluss vor. In Abhängigkeit des Abflusses und der resultierenden Überdeckung der Rohrleitungseinläufe können sich lufteinziehende Wirbelstrukturen ausbilden. Wird davon ausgegangen, dass die am Modell beobachteten, eher schwach ausgeprägten lufteinziehenden Wirbelstrukturen entsprechend auf die Natur übertragen werden können, so kann der resultierende Lufteintrag als relativ gering eingestuft werden.
- Erfolgt eine Reduzierung des Abflusses und damit ein Übergang von Druckabfluss auf Freispiegelabfluss, so ist mit sog. Aufschlagen der Leitungen zu rechnen. Dabei wird über die Rohrleitungseinläufe Luft in die Leitung eingesogen bis sich der Freispiegelabfluss eingestellt hat. Durch die Ausbildung eines Wechselsprungs an der Stauwurzel werden dann Luftblasen in den Wasserkörper eingetragen.
- Findet umgekehrt eine Zunahme des Abflusses und damit der Wechsel von Freispiegel- zu Druckabfluss statt, so erfolgt das sog. Zuschlagen der Leitungen. Die bei Freispiegelabfluss in den Leitungen befindlichen Luftkörper werden

eingeschlossen und mit der Zunahme der Fließgeschwindigkeiten durch die Leitungen gedrückt. Die eingeschlossenen Luftkörper weisen in Abhängigkeit der Rohrleitungslängen dabei vergleichsweise große Volumina auf.

In Abhängigkeit des Abflusses und der Rohrleitungslänge ist ohne Belüftungseinrichtungen zudem mit Unterdruck im Bereich der Rohrleitungseinläufe zu rechnen. Mit dem Unterdruck resultiert eine Sogwirkung auf den Wasserkörper im Übergangsbecken G-R, wodurch dort eine Absenkung des Wasserstands einhergeht. Die jeweils kritische Rohrleitungslänge, ab welcher Unterdruck auftritt, korrespondiert mit dem vorherrschenden Abfluss bei volldurchströmten Leitungen. Da Unterdruck in Rohrströmungen tendenziell als ungünstig angesehen werden kann, z. B. wird das Auftreten von Kavitation dadurch begünstigt, wurde ein Druckausgleich mit der Anordnung von Belüftungsrohren erreicht. Neben den bereits genannten Ursachen bzgl. des Lufteintrags in die Strömung, erfolgt mit dem Druckausgleich eine zusätzliche Belüftung.

Zur Vermeidung der konzentrierten Entlüftung in den Übergangsbecken R-G und dem damit verbundenen Potential des Wasseraustritts infolge des Spritzwassers wurden zusätzlich Entlüftungsrohre berücksichtigt, welche den Luftanteil in der Strömung vorzeitig reduzieren.

Weiterführende Fragestellungen beinhalteten u. a. den Lastfall des ansteigenden Seewasserspiegels und dessen Einfluss auf die hydraulischen Verhältnisse bei der Befüllung. In diesem Zusammenhang ist, v. a. in Abhängigkeit des Abflusses und der jeweiligen Rohrleitungslänge, mit Wasserüberlauf an den Übergangsbecken G-R zu rechnen. Individuelle Maßnahmen für die betroffenen Flachstrecken (baulicher sowie betrieblicher Natur) zielten darauf ab, eine Reduzierung der hydraulischen Verluste am System *Übergangsbecken G-R – Rohrleitung – Übergangsbecken R-G* zu erreichen. Im Resultat konnte auf Grundlage analytischer Berechnungen aufgezeigt werden, dass ein Wasserübertritt erst dann erfolgt, wenn eine ausreichende Einstautiefe des jeweiligen Beckens vorliegt. In Verbindung mit Maßnahmen zur Sicherung des anstehenden Bodens kann von einer ausreichenden Erosionssicherheit ausgegangen werden.

Mit dem abschließend untersuchten Planungsstand vom März 2026 wurden gegenüber der ursprünglichen Planung die Auslegungswassermenge reduziert, betriebliche Bestimmungen definiert sowie umfangreiche Bauwerksanpassungen berücksichtigt. Letzteres beinhaltete u. a.

- variierende Rohrleitungsdurchmesser,
- verschiedene Neigungen der Rohrstrecken,
- die Berücksichtigung von Be- und Entlüftungsrohren,
- die Berücksichtigung eines Zwischenbeckens in der Rohrstrecke 5,
- die Anpassungen der Beckengrößen,
- eine Optimierung der Auslaufgeometrie der Gerinnebecken sowie
- Erosionsschutzmaßnahmen an den Übergangsbecken G-R.

Grundsätzlich wird empfohlen ein Monitoring der Einleitung, v. a. der Beckenwasserstände in den Übergangsbecken G-R und dem Zwischenbecken, vorzusehen, um kri-

tische Zustände erkennen und auf diese reagieren zu können. Zudem kann die Überwachung des Beckenfreibords auch für einen optimierten Betrieb der Einleitung herangezogen werden, wenn der steigende Seewasserstand die hydraulischen Verhältnisse in einer Flachstrecke beeinträchtigt.

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde die ursprüngliche Auslegungswassermenge von 10,4 m³/s je Einleitungsstrang auf 8,25 m³/s reduziert, was aus hydraulischer Sicht grundsätzlich als vorteilhaft einzustufen ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Anpassung sowie die umfangreichen, abschließenden Bauwerksmodifikationen erst nach Abschluss der gegenständlichen Modellversuche vorgenommen wurden und deren hydraulische Wirksamkeit daher nicht unmittelbar am Modell überprüft werden konnte.

In diesem Zusammenhang sowie unter Berücksichtigung der eingeschränkten Übertragbarkeit der im Modell beobachteten Spritzwassermengen auf den Naturmaßstab (Maßstabseffekte) sind bei Bedarf ergänzende Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos eines Wasseraustritts infolge von Spritzwasser denkbar.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche, des zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts bekannten Planzustands (März 2026) und unter Berücksichtigung der mit der gegenständlichen sowie der numerischen Modellierung einhergehenden Unschäfen bei der Übertragbarkeit gewisser hydraulischer Prozesse auf die Natur, kann mit den erarbeiteten Bauwerksanpassungen davon ausgegangen werden, dass ein sicherer und dauerhafter Betrieb der Anlage gegeben ist.

5 LITERATURVERZEICHNIS

Aigner, D. (2015). Mitnahme und Bewegung von Lufteinschlüssen in Rohrleitungen. bbr 11-2015

Aigner, D. und Bollrich, G. (2015). Handbuch der Hydraulik: für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Beuth Verlag

Dorer, H. (1984). Ähnlichkeit bei Flussbaulischen Modellen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Nr. 54

Ettema, R., Zhu, D. Z., Gaskin, S. J., Mulligan, S., Lyons, T. C., Boes, R. M., Chan, S. N. und Lee, J. H. W. (2023). Vortex-Flow Intakes. IAHR Water Monograph Series. ISBN 978-90-833476-0-8

Hager, W. H. (1994). Abwasserhydraulik – Theorie und Praxis. Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-77430-0

Knuass, J. (1983). Wirbelbildung an Einlaufbauwerken: Luft- und Dralleintrag. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Heft 63

Martin, H. und Pohl, R. (2009). Technische Hydromachanik 4: Hydraulische und numerische Modelle. Beuth Verlag

Schröder, R. und Zanke, U. (2003). Technische Hydraulik: Kompendium für den Wasserbau

Volkart, P. (1978). Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 30. ETH Zürich

6 ANLAGE

6.1 ABMAßE IN VERBINDUNG MIT BAULICHEN ANPASSUNGEN BZW. VARIANTEN (BECKENAUSLÄUFE UND STÖRKÖRPER)

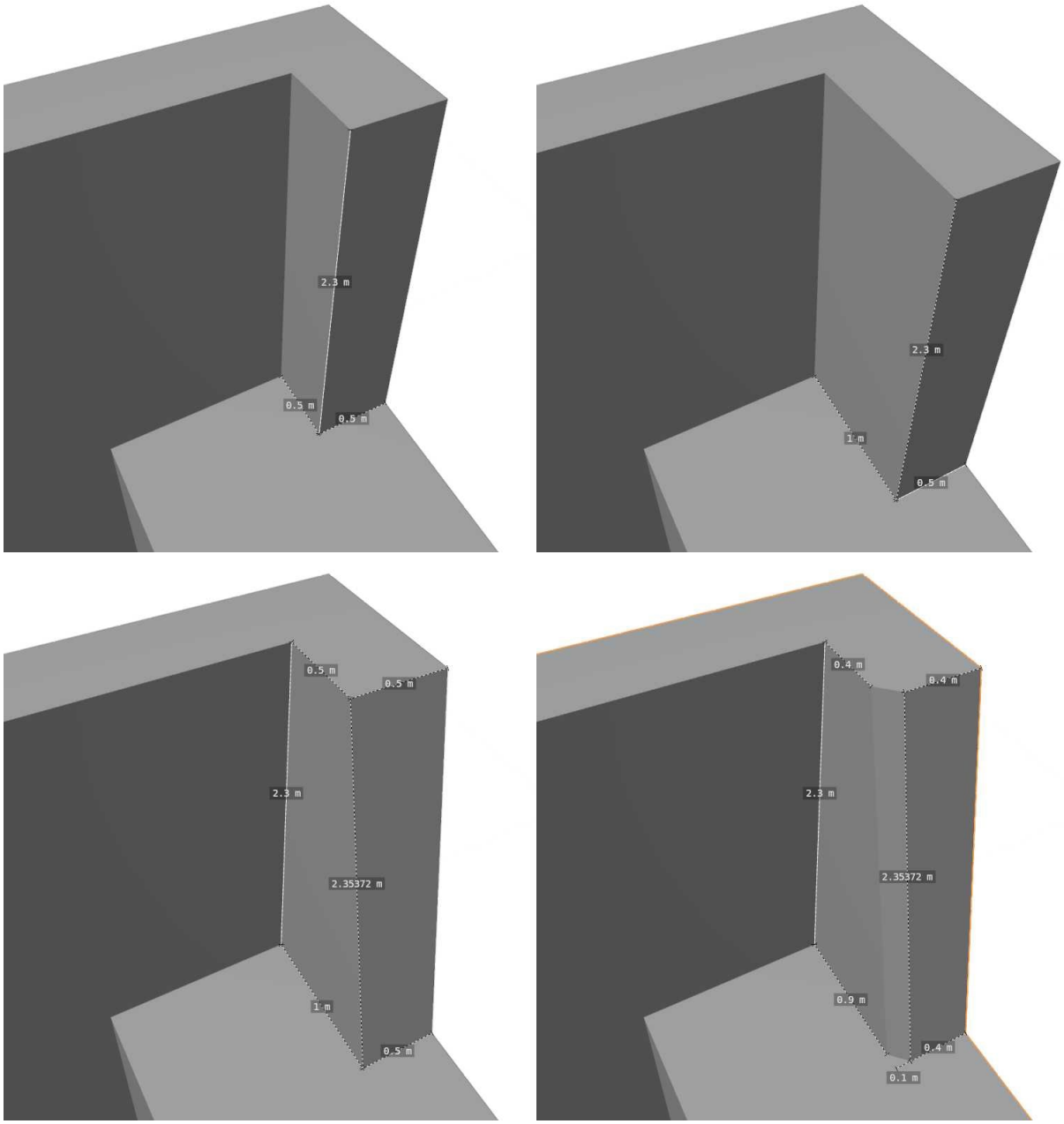


Abbildung 6-1 Beckenauslaufvarianten Be.Var 0 (Planzustand, oben, links), Be.Var 1 (oben, rechts), Be.Var 2 (unten, links) und Be.Var 3 (unten rechts).

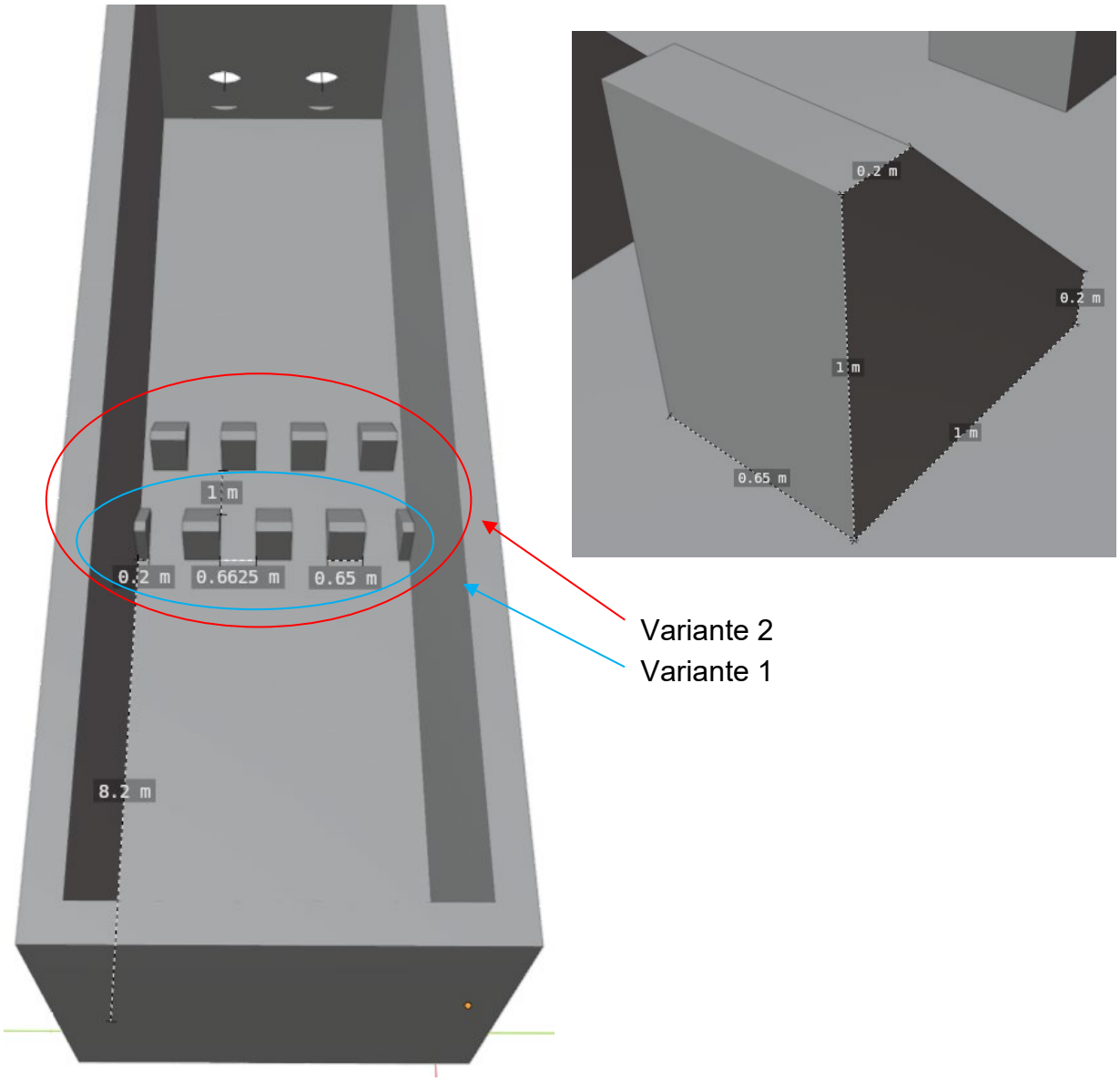


Abbildung 6-2 Störkörpervariante 1 (nur erste Reihe) und 2 (erste und zweite Reihe) inkl. Detailansicht eines Störkörpers (rechts).