



Hochwasserschutz Buholzbach

Auflageprojekt

Bericht Prüfmandat zu den numerischen Simulationen

Auftraggeber:		
Bauherrschaft:	Projektleiter Bauherr:	Stv. Projektleiter Bauherr:
Landwirtschafts- und Umweltdirektion Kanton Nidwalden Amt für Wald und Naturgefahren Stansstaderstrasse 59 Postfach 1251 6371 Stans	 KISSLING + ZBINDEN AG INGENIEURE PLANER USIC Tempelstrasse 8A Fon 033 334 20 50 3608 Thun www.kzag.ch martin.andres@kzag.ch	INDERGAND AG Bauherrenunterstützung Raumplanung – Planungs-/Baurecht Chälengasse 26 Fon 079 257 03 39 6053 Alpnachstad u.indergand@indergand-ag.ch

Projektbearbeitung:		
Bauingenieur:	Hydraulik/Geschiebe:	Zweitmeinung:
 SCHUBIGER AG BAUINGENIEURE 6052 Hergiswil Fon 041 632 66 22 6375 Beckenried info@schubiger-nw.ch 6048 Horw www.schubiger-nw.ch	<i>Beffa tognacca gmbh</i> A San Rocch Fon 091 863 44 41 6702 Claro www.fluvial.ch	 Ingenieurbüro peerli GmbH Fuchsberg 11 8846 Willerzell

Datum:	erst.	gepr.	Dokumentenbezeichnung in Projektmappe	Format:	A4
15.12.2023	JS		1.11	Dok. Nr.:	2287-4004a
a 12.04.2024	JS				
b					
c					
d					

Hochwasserschutz Buholzbach

Prüfmandat

Numerische Modellierungen



Einzugsgebiet Buholzbach. Quelle: Google Earth, 01.12.2023

Impressum

Auftraggeber	Kanton Nidwalden Amt für Naturgefahren Stansstaderstrasse 59 6371 Stans	
Kontaktperson	Martin Andres, Gesamtprojektleiter	
Auftragnehmer	Ingenieurbüro Speerli GmbH Fuchsberg 11 8846 Willerzell UID: CHE-293.628.523	
Autor	Jürg Speerli	
Projekttitlel	Hochwasserschutz Buholzbach Prüfmandat numerische Modellierungen	
Art des Berichtes	Gutachten	
Projekt Nr.	520	
Dokument Datum	Version	Status /Änderungen
15.12.2023	1.0	Autor
Verteiler	1	Martin Andres, Kissling + Zbinden AG
	1	Nadine Philippi, Amt für Naturgefahren
	1	Urs Indergand, Indergand AG
	1	Eva Gertsch, BAFU, Sektion Hochwasserschutz
	1	David Ruedlinger, Schubiger AG Bauingenieure
	1	Christian Tognacca, beffa tognacca GmbH

KONTAKT

Ingenieurbüro Speerli GmbH
Fuchsberg 11
8846 Willerzell

Jürg Speerli
Dr. sc. techn. / dipl. Bauing. ETH / SIA
Mobile: +41 79 328 39 30
E-Mail: speerli@iswb.ch



Jürg Speerli
Experte Wasserbau

Willerzell, den 15. Dezember 2023

INHALT

1	AUSGANGSLAGE	6
2	AUFTRAG	6
2.1	PRÜFMANDAT.....	6
2.2	AUFTRAGSERWEITERUNG	7
2.3	ABLAUF UND VORGEHEN	7
3	HOCHWASSERSCHUTZ BUHOLZBACH – BAUPROJEKT.....	7
3.1	EINLEITUNG	7
3.2	GRUNDLAGEN	7
3.2.1	Ausgangslage.....	7
3.2.2	Beurteilung und Fazit	7
3.3	SCHUTZZIELE	8
3.4	SZENARIEN	8
3.4.1	Ausgangslage.....	8
3.4.2	Beurteilung und Fazit	9
3.5	BEMESSUNGSEREIGNIS UND BEMESSUNGSGRÖSSEN	9
3.5.1	Ausgangslage.....	9
3.5.2	Beurteilung und Fazit	13
3.6	ÜBERLASTBETRACHTUNGEN UND ÜBERLASTSZENARIEN.....	13
3.6.1	Ausgangslage.....	13
3.6.2	Beurteilung und Fazit	14
4	NUMERISCHE MODELLIERUNGEN	14
4.1	SZENARIENDEFINITION.....	14
4.1.1	Hochwasserszenarien	14
4.1.2	Geschiebeszenarien.....	14
4.1.3	Murgangszszenarien.....	15
4.1.4	Überlastszszenarien	16
4.1.5	Flutwellenszenarien.....	16
4.1.6	Beurteilung und Fazit	16
4.2	VERWENDETE NUMERISCHE MODELLE.....	16
4.2.1	1D-Modell	16
4.2.2	2D-Modell	16
4.2.3	3D-Modell	18
4.2.4	Beurteilung und Fazit	18
4.3	BEMESSUNGSANSÄTZE.....	19
4.3.1	Ausgangslage.....	19
4.3.2	Beurteilung und Fazit	19
4.4	PROJEKTENTWICKLUNG UND -ANPASSUNGEN	19

4.4.1	Ausgangslage.....	19
4.4.2	Beurteilung und Fazit	19
4.5	DURCHGEFÜHRTE NUMERISCHE MODELLIERUNGEN	20
4.5.1	Ausgangslage.....	20
4.5.2	Beurteilung und Fazit	20
4.6	AUSWERTUNG UND RESULTATE DER NUMERISCHEN SIMULATIONEN	20
4.6.1	Ausgangslage.....	20
4.6.2	Beurteilung und Fazit	20
5	BAULICHE MASSNAHMEN.....	21
5.1	AUSGANGSLAGE	21
5.2	AUSLAUFBAUWERK	21
5.2.1	Ausgangslage.....	21
5.2.2	Beurteilung und Fazit	22
5.3	GRUNDABLAß MIT BEWEGLICHER SCHÜTZE	22
5.3.1	Ausgangslage.....	22
5.3.2	Beurteilung und Fazit	22
5.4	SCHWEMMHOLZRÜCKHALTBAUWERK	23
5.4.1	Ausgangslage.....	23
5.4.2	Beurteilung und Fazit	23
5.5	ENTLASTUNGSBAUWERKE I UND II.....	23
5.5.1	Ausgangslage.....	23
5.5.2	Beurteilung und Fazit	24
5.6	VERKLAUSUNG BRÜCKE BUOHOLZ	24
5.6.1	Ausgangslage.....	24
5.6.2	Beurteilung und Fazit	24
5.7	ZUSAMMENFLUSS BUOHOLZBACH MIT ENGELBERGER AA.....	24
5.7.1	Ausgangslage.....	24
5.7.2	Beurteilung und Fazit	25
6	FOLGERUNGEN	25
6.1	PRÜFMANDAT.....	25
6.2	ERWEITERTER AUFTRAG	26
7	UNTERLAGEN	27

1 AUSGANGSLAGE

Die Hochwasserereignisse vom August 2005 verursachten in vielen Teilen der Schweiz enorme Schäden in der Höhe von über 3 Milliarden Franken, zudem waren vier Todesopfer zu beklagen. Auch im Kanton Nidwalden kam es zu Rutschungen, Übersarungen und Übermurungen. Beim Buholzbach verursachten Übersarungen auf dem Schwemmkegel grosse Schäden an Infrastrukturanlagen und an Industriebauten.

Ein grosses Risiko stellt der Buholzbach für den Stanser Talboden dar, falls er während einem Hochwasser viel Geschiebe in die Engelberger Aa einträgt, und dadurch die Engelberger Aa linksseitig ausufert und so grossflächige Überschwemmungen auf dem Stanser Talboden verursachen kann.

Mit einem Hochwasserschutzprojekt am Buholzbach sollen zukünftige Ausuferungen vermieden werden und mit einem grossen Geschiebesammler das Geschiebe vor der Einmündung in die Engelberger Aa zurückgehalten werden.

2 AUFTRAG

Basierend auf unserer Offerte vom 17. März 2023 beauftragte das Amt für Naturgefahren des Kantons Nidwalden am 22. März 2023 das Ingenieurbüro Speerli GmbH mit einem Prüfmandat Wasserbau zum Projekt «Hochwasserschutz Buholzbach – numerische Modellierungen».

Die Auslegung des Gesamtbauwerks «Geschiebesammler Buholzbach» ist sehr komplex und herausfordernd. Das Prüfmandat ist als Qualitätskontrolle zu verstehen und erfolgt im Sinne einer Plausibilisierung der Ausgangslage, der Szenarien, der numerische Modellierungen sowie der Resultate inkl. den Interpretationen der Resultate. Es werden im Rahmen des Prüfmandates keine eigenen numerischen Modellierungen durchgeführt.

2.1 Prüfmandat

Im Rahmen des Prüfmandates sind die Resultate der numerischen Modellierungen auf ihre Plausibilität zu überprüfen. Seitens Auftraggeber werden Antworten auf nachstehende Fragen erwartet:

- Decken die durchgeführten numerischen Modellierungen alle relevanten Szenarien ab?
- Sind die verwendeten Annahmen und sind die verwendeten Berechnungsmethoden richtig?
- Sind die Berechnungsergebnisse plausibel?
- Wo gibt es allenfalls Unsicherheiten in den Resultaten und wie gross sind sie?
- Wie müssen die Resultate hinsichtlich Systemrobustheit der Leitdämme und des Rückhalteriums interpretiert werden?
- Wie und wo müssen in der Planung der Projektelemente entsprechende Reserven noch eingeplant werden?

2.2 Auftragserweiterung

Neben dem Prüfmandat «Numerische Modellierungen» wurde Jürg Speerli (Experte Wasserbau) im Rahmen des laufenden Auftrags zusätzlich mandatiert, die Auslegung und Bemessung des Abschlussbauwerks inkl. Schwemmholzurückhalt und Tosbecken mit dem Planerteam zu diskutieren und bei Bedarf mit dem Planerteam weiterzuentwickeln sowie den Zusammenfluss des Buholzbachs mit der Engelberger Aa zu beurteilen.

2.3 Ablauf und Vorgehen

Die Startsitzen (online) erfolgte am 11. April 2023. Es folgten verschiedene Online-Sitzungen zwischen David Ruedlinger, Christian Tognacca und Jürg Speerli sowie mehrere physische Sitzungen in Einsiedeln und in Biasca. Zu Beginn wurden die Szenarien für die numerischen Modellierungen diskutiert und festgelegt. Die Ergebnisse der numerischen Modellierungen wurden laufend diskutiert und Rückmeldungen sind in die weiteren Modellierungen sowie in die Bemessung einzelner Bauwerke, wie z. B. dem Abschlussbauwerk eingeflossen.

3 HOCHWASSERSCHUTZ BUHOLZBACH – BAUPROJEKT

3.1 Einleitung

Das zentrale Element des Hochwasserschutzprojektes ist der Geschiebesammler. Der Geschieberückhalteraum hat eine asymmetrische Form und soll mit strömunglenkenden Massnahmen (Buhne) optimal verfüllt werden. Der Geschiebesammler weist ein Abschlussbauwerk auf. Im linksseitigen Längsdamm sind zwei Entlastungsbauwerke für den Überlastfall vorgesehen. Das Abschlussbauwerk und die beiden Entlastungsbauwerke sind aufeinander abgestimmt (Schubiger AG Bauingenieure 2023).

Es können verschiedene Fliessprozesse im Geschieberückhalteraum auftreten, welche sehr komplex sind. Hierzu zählen fluviale Abflüsse mit und ohne Seebildung, Abflüsse mit Geschiebe- und Schwemmholztransport sowie viskose und granulare Murgänge. Mit numerischen Modellierungen wurden diese Fliessprozesse ermittelt. Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Modellierungen (Reinwasser, Geschiebe, Murgänge) erfolgte die Dimensionierung des geplanten Schutzsystems am Buholzbach.

3.2 Grundlagen

3.2.1 Ausgangslage

Die für die numerischen Modellierungen verwendeten Grundlagen, wie Geländetopografie, Bauwerksgeometrie, Hydrologie, Geschiebe-, Murgang- und Schwemmholzfrachten und Kornverteilung des Geschiebes sind in Schubiger AG Bauingenieure (2023) und beffa tognacca gmbh (2023) übersichtlich zusammengestellt und mit den Quellen, woher die Grundlagen stammen, versehen.

3.2.2 Beurteilung und Fazit

Es wurden die relevanten Grundlagen verwendet. Die Grundlagen sind umfangreich und werden als plausibel beurteilt.

Im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen wurden in den Murgangsszenarien verschiedene Murgang-Rheologien verwendet. Für die Modellierungen des fluvialen Geschiebetransports wurde der mittlere Korndurchmesser d_m variiert.

Es wird empfohlen im technischen Bericht der Schubiger AG Bauingenieure (2023) die Tabelle 2 noch mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_m zu ergänzen, da der in den numerischen Modellierungen verwendete Ansatz von Smart und Jäggi auch das d_m enthält und im Bericht zu den numerischen Modellierungen (beffa tognacca gmbh 2023) im Abschnitt 5.3 das d_m als Modellparameter erwähnt wird. Dafür ist im Bericht der beffa tognacca gmbh 2023 nur das d_m aufgeführt, jedoch nicht die charakteristischen Korngrößen d_{30} und d_{90} , welche ebenfalls im Ansatz von Smart und Jäggi enthalten sind.

Zur Vollständigkeit der beiden Berichte sollten diese beiden Ergänzungen noch vorgenommen werden.

3.3 Schutzziele

Die Schutzziele sind in Schubiger AG Bauingenieure (2023) festgelegt worden. Abbildung 1 zeigt die entsprechende Schutzzielmatrix.

Nr.	Sachwerte	Infrastruktur	Naturwert	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	EHQ
1	Standortgebundene Bauten, exkl. Sondersikken	Wanderwege Maschinenwege Ski- und Bergtouristenrouten	Naturlandschaften, Odland Gewässer Freihalte-, Reservazonen	3			
2		Flurwege / Waldstrasse Leitungen von lokaler Bedeutung Wander- und Bergwege von kant. Bedeutung	Extensiv bewirtschaftete Landflächen Weide und Alpfächen Wald mit Schutzfunktion (Waldbau B + C)	2	3		
3	Unbewohnte Gebäude (Remisen, Weidescheunen u.ä.)	Verkehrswege und Leitungen von kommunaler Bedeutung	Landwirtschaftlich intensiv genutztes Land	1	3		
4	Zeitweise oder dauernd bewohnte Einzelgebäude und Ställe	Verkehrswege und Leitungen von kant. oder grosser komm. Bedeutung Verkehrswege von nationaler Bedeutung		0	1	2	3
5	Geschlossene Siedlungen, Gewerbe und Industrie, Bauzonen, Zone für Sport und Freizeit, Zone für öffentliche Zwecke			0	1	2	3
6	Sonderfall: Stanser Talebene: KEIN Geschiebebeitrag in Engelbergeraai mit Aus- wirkung eines verfrühten Garinneustritts der Engelbergeraai			0	1		3

Tolerierte Intensitäten:

Vollständiger Schutz	0: keine Intensität
Begrenzter Schutz	1: schwache Intensität
Begrenzter Schutz	2: mittlere Intensität
Fehlender Schutz	3: starke Intensität

Abb. 1: Schutzzielmatrix für dem Buholzbach (Schubiger AG Bauingenieure (2023)).

3.4 Szenarien

3.4.1 Ausgangslage

Das Hochwasserschutzprojekt Buholzbach und insbesondere die Auslegung und Dimensionierung des Geschiebesammlers am Buholzbach wurden auf nachfolgende Gefahrenprozesse ausgelegt:

- Hochwasserereignisse mit Geschiebetrieb
 - Kurze Ganglinie

- Lange Ganglinie
- Murgangereignisse
- Schwemmholttransport
- Kombination von Murgang- und Hochwasserereignissen
- Abfolge von zwei Murgangereignissen

3.4.2 Beurteilung und Fazit

Alle für das Hochwasserschutzprojekt Buholzbach relevanten Gefahrenprozesse wurden in Szenarien definiert.

Der Experte Wasserbau wurde für die Festlegung der relevanten Szenarien während der Projektbearbeitung im Frühjahr 2023 bereits beigezogen und entsprechende Rückmeldungen wurden in den detaillierten Szenariendefinitionen (Abschnitte 3.5, 3.6 und 4.1) berücksichtigt.

3.5 Bemessungsereignis und Bemessungsgrössen

3.5.1 Ausgangslage

Basierend auf den Schutzziele und den Szenarien der Gefahrenprozesse wurden das Bemessungsereignis, bzw. die Bemessungsgrössen festgelegt.

Mit dem Hochwasserschutzprojekt Buholzbach muss ein Geschiebeeintrag durch den Buholzbach in die Engelberger Aa bis und mit einem 300-jährlichen Ereignis verhindert werden, welcher die Engelberger Aa nicht schadlos abzuführen vermag (Schubiger AG Bauingenieur 2023). D.h. ein Geschiebeeintrag aus dem Buholzbach in die Engelberger Aa darf bis und mit einem 300-jährlichen Ereignis zu keinen negativen Auswirkungen in der Engelberger Aa im Bereich der Einmündung des Buholzbachs, ober- und unterstrom davon führen. Dies ist als massgebendes, bzw. übergeordnetes **Bemessungsereignis** zu betrachten.

Für die einzelnen Gefahrenprozesse, bzw. Ereignisabläufe sind in Schubiger AG Bauingenieure (2023) die einzelnen **Bemessungsgrössen** je Szenario einzeln beschrieben. Die Dimensionierung der Schutzbauwerke erfolgte auf dem ungünstigsten Fall.

Nachfolgend ein verkürzter Auszug aus dem Technischen Bericht der Schubiger AG Bauingenieure (2023):

Hochwasserereignisse mit Geschiebetrieb (kurze Ganglinie)

Bei kurzen Hochwasserereignissen mit grossen Abflussspitzen werden folgende Bemessungsgrössen definiert:

- Der Geschieberückhalt erfolgt für Ereignisse mit Jährlichkeiten zwischen ca. 10 und 300 Jahren vollständig oberhalb der Engelberger Aa. Dabei werden folgende Präzisierungen gemacht:
 - Die Grundablassöffnung vom Geschieberückhalteraum ist auf die Zielsetzungen vom Geschieberückhalt ausgelegt. Hydraulisch werden untergeordnete Anforderungen gestellt (ca. 20 m³/s Abflusskapazität).
 - Bis zu einem 100-jährlichen Hochwasserereignis darf kein Wasser in die Industriezonen ausgeleitet werden. Der Abfluss ist bei diesen Szenarien innerhalb vom Buholzbach in Richtung Engelberger Aa abzuführen.

- Bei Ereignissen $\geq HQ_{100}$ dürfen Anteile vom Abfluss in Richtung Industriezone ausgeleitet werden. Die Ausleitung hat an vordefinierten Stellen und kontrolliert zu erfolgen. Ausserhalb der Ausleitstellen darf kein Wasser bis zu einem Sicherheitshochwasser (ohne Freibord) ausgeleitet werden (Systemrobustheit).
- Als Input für die Simulationen wird eine Ganglinie mit einer Dauer von 6 h definiert. Die Abflussspitze wird nach 1.6 h erreicht. Grundlage bildeten die verwendeten Ganglinien im Zusammenhang mit der Revision der Gefahrenkarte 2012.
- Als massgebende Korngrösse wurde ein d_m von 5 cm bestimmt. Es wurden im Rahmen von einer Sensitivitätsanalyse auch Simulationen mit einem d_m von 8 cm durchgeführt.
- Schwemmholzeinträge in die Engelberger Aa sind zulässig, solange sie nicht als Schwemmholzteppich und nicht während der Abflussspitze bei Ereignissen $\geq HQ_{100}$ im Buholzbach stattfinden.
- Das Gerinne am Buholzbach wird unterhalb vom Geschieberückhalteraum auf ein Hochwasser HQ_{300} inkl. Freibord ausgelegt. Das Freibord wird in Anlehnung an die Empfehlung der Kommission Hochwasserschutz (KOHS) aus dem Jahr 2013 bestimmt. Somit können Schutzdefizite bei Tiefstellen (Bsp. Büren) verhindert werden.
- Die Brücke Buholz wird auf HQ_{100} inkl. Freibord ausgelegt. Für die Berechnung des Freibords wird eine Brücke mit glatter Untersicht und ein Anfall von Wurzelstöcken berücksichtigt. Das Freibord wird in Anlehnung an die Empfehlung der KOHS bestimmt.
- Das Rauhbettgerinne zwischen der Brücke Buholz und dem Gefällsknick im Geschieberückhalteraum wird auf eine Kapazität von HQ_{30} dimensioniert. Bei grösseren Abflüssen sind seitliche, rechtsufrige Entlastungen in den Geschieberückhalteraum zulässig.

Hochwasserereignisse mit Geschiebetrieb (lange Ganglinie):

Die Bemessungsgrössen bei langanhaltenden Niederschlägen und entsprechenden Hochwasserabflüssen sind grundsätzlich analog zu den Hochwasserereignissen mit einer kurzen Ganglinie. Aufgrund der geringeren Abflussspitze ist jedoch insbesondere der Geschiebetrieb bzw. der Geschieberückhalt im Vergleich zu den kurzen Ereignissen massgebend. Dabei gilt folgende Hauptbemessungsgrösse:

Der Geschieberückhalt für Ereignisse mit Jährlichkeiten zwischen ca. 10 und 300 Jahren hat vollständig oberhalb der Engelberger Aa zu erfolgen.

Im Vergleich zum kurzen Hochwasserereignis sind folgende Anpassungen vorzunehmen:

- Als Input für die Simulationen wird eine Ganglinie mit einer Dauer von 150 h definiert. Die Abflussspitze wird nach gut 35 h erreicht. Grundlage bildeten die verwendeten Ganglinien im Zusammenhang mit der Revision der Gefahrenkarte 2012.
- Der südliche Abschluss vom Geschieberückhalt wird bezogen auf die maximalen Fliesshöhen, auf ein Extremereignis ausgelegt. Damit wird einerseits der Wichtigkeit von diesem Bauwerk (Systemrobustheit) Rechnung getragen, andererseits werden Reserven für die Materialverwertung geschaffen. Das Freibord wurde

nach KOHS basierend auf den Ablagerungen als Grundlagegeometrie ermittelt. Es beträgt mindestens 50 cm.

- Der untere Abschluss vom Geschieberückhalt am Buoholzbach (gegenüber Engelberger Aa) weist lokal unterschiedliche Bemessungsgrößen auf. Dadurch wird verhindert, dass mögliche Überlastereignisse flächige Austritte verursachen (Systemschwachstelle) und die Austritte kontrolliert über bewusst vorgesehene Abflusssektionen erfolgen. Es werden folgende Unterscheidungen gemacht:
 - HQ₃₀₀ ohne Freibord für Geschiebeaustritte bei Entlastungsstellen in Richtung Engelberger Aa auf landwirtschaftlich genutzte Flächen bzw. Flächen, auf welchen Material aufbereitet wird.
 - EHQ ohne Freibord für Geschiebeaustritte bei Entlastungsstellen auf Flächen, welche industriell genutzt werden und auf welchen Gebäude mit ständigen Arbeitsplätzen bestehen.
 - EHQ mit 50 cm Freibord bzw. SHQ (Systemhochwasser) ohne Freibord auf den restlichen Abschnitten.
- Der Mündungsbereich in die Engelberger Aa wird so dimensioniert, dass der Abfluss in der Engelberger Aa möglichst geringfügig durch den Buoholzbach beeinflusst wird. Bei einem Langzeitereignis mit 300-jährlichen Abflüssen im Buoholzbach (19 m³/s) und in der Engelberger Aa (221 m³/s) darf die bestehende EHQ-Entlastung (Bestandteil des Hochwasserschutzsystems an der Engelberger Aa) im Bereich vom Mündungsbereich des Buoholzbaches in die Engelberger Aa nicht anspringen. Der Anspringpunkt der Entlastung ist im heutigen Zustand ab 250 m³/s.

Murgangereignisse:

Am Buoholzbach werden sowohl dickflüssige als auch dünnflüssige Murgänge bzw. Murgänge mit wechselnden Zusammensetzungen erwartet. Als Bemessungsgrösse für den Geschieberückhalt oberhalb von der Engelberger Aa wird grundsätzlich das 300-jährliche Murgangereignis unabhängig von der Murgangcharakteristik definiert. Insgesamt wurden acht unterschiedliche Murgangcharakteristiken, sogenannte Rheologien, als massgebend definiert.

Zur Bemessungsgrösse Murgangereignis M₃₀₀ wurden folgende Präzisierungen gemacht:

- Ausbrüche in Richtung Büren sind bis zu einem 300-jährlichen Ereignis komplett zu verhindern. Dies betrifft auch Ereignisse mit einer allfälligen Verklausung vom Geisssteg. Die rechtsufrige Dammhöhe soll mindestens der maximalen Fliesstiefe bei 300-jährlichen Murgangereignissen entsprechen. Bei einem Extremereignis sind lokale Austritte zulässig.
- Ausbrüche bei der Brücke Buoholz sind infolge Brückenverklausung toleriert. Auf der rechten Uferseite (in Fließrichtung) sind die bestehenden Liegenschaften bei einer Brückenverklausung bis zu einem 100-jährlichen Ereignis zu schützen. Auf der linken Uferseite werden lokale Austritte ab Eintretenswahrscheinlichkeiten von über 300 Jahren toleriert.
- Der südliche Abschluss vom Geschieberückhalt wird auf ein Extremereignis ausgelegt. Damit wird einerseits der Wichtigkeit von diesem Bauwerk (Systemrobustheit) Rechnung getragen, andererseits werden Reserven für die Materialverwertung geschaffen. Das Freibord beträgt auf das jeweils massgebende Extremereignis mindestens 150 cm. Ausnahme bildet die Stelle bei der Brücke Buoholz,

wo Austritte bei einer Brückenverklausung bei einem Extremereignis in reduziertem Mass kontrolliert zugelassen werden. Trotz grosser Dynamik bei einem Murgangereignis wurde in Absprache mit der Projektleitung bewusst darauf verzichtet, das Freibord zu erhöhen, weil durch die Berücksichtigung von acht unterschiedlichen Murgangcharakteristiken sowie dem Szenario Murgang & Hochwasser (siehe in der Folge) bereits ein bedeutender Sicherheitszuschlag eingerechnet wird.

- Der untere Abschluss vom Geschieberückhalt am Buholzbach weist lokal unterschiedliche Bemessungsgrössen auf. Dadurch wird verhindert, dass mögliche Überlastereignisse flächige Austritte verursachen (Systemschwachstelle) bzw. die Austritte kontrolliert über bewusst vorgesehene Abflusssektionen erfolgen. Es werden folgende Unterscheidungen gemacht:
 - Murgang M_{300} ohne Freibord für Austritte bei Entlastungsstellen in Richtung Engelberger Aa auf landwirtschaftliche genutzte Flächen bzw. Flächen, auf welchen Material aufbereitet wird.
 - Murgang M_{EHQ} ohne Freibord für Austritte bei Entlastungsstellen auf Flächen, welche industriell genutzt werden und auf welchen Gebäude mit ständigen Arbeitsplätzen bestehen.
 - Murgang M_{EHQ} mit mindestens 50 cm Freibord in den restlichen Abschnitten.

Kombination von Murgangereignis und Hochwasserereignis:

Bei einer Abfolge von einem Murgangereignis und einem nachgelagerten Hochwasserereignis wurde die Bemessungsgrösse in Absprache mit der Projektleitung auf ein Murgangereignis M_{300} und einem nachgelagerten Hochwasserereignis HQ_{100} definiert. Dabei gilt es zu präzisieren, dass diese Bemessungsgrösse insbesondere für die Dimensionierung der seitlichen und frontalen Abschlüsse des Geschieberückhalteraums verwendet wurden. Ausnahme bilden die bewussten Austrittsstellen beim unteren Abschluss des Geschieberückhalteraums. Das Freibord wurde nach KOHS ermittelt und für die Dimensionierung der Dämme verwendet. Es stellte sich aber heraus, dass die Murgangereignisse EHQ für die Dammdimensionierung massgebend waren

Abfolge von mehreren Murgangereignissen:

Die Bemessungsgrösse für Murgangereignisse wurde bereits oben definiert. Auf eine separate Definition von einer Bemessungsgrösse bei einer Abfolge von mehreren Murgangereignissen wurde verzichtet. Dies, weil dieses Szenario ein Spezialfall von einer möglichen Murgangcharakteristik darstellt (mehrere Schübe über eine längere Zeit) und für die Gefährdung die Murfracht und weniger die zeitliche Komponente entscheidend ist.

Folglich kann festgehalten werden, dass bei einer Abfolge von mehreren Murgangereignissen mit einer Gesamturfracht von $\leq 135'000 \text{ m}^3$ ($= M_{300}$) keine erhöhte Gefährdung zu erwarten ist. Eine Abfolge von einem 30- und 100-jährlichen Murgangereignis ist beispielsweise nicht massgebend, weil die gesamte Murfracht geringer ist als bei einem 300-jährlichen Murgangereignis.

Wird die Murfracht von $135'000 \text{ m}^3$ durch die Abfolge von mehreren Murgangereignissen übertroffen, so entspricht dieses Ereignis einem Szenario mit einer Eintretenswahrscheinlichkeit von über 300 Jahren (EHQ). Austritte in die Engelberger Aa werden in diesem Fall toleriert.

Brückenbauwerke über die Engelberger Aa:

Die Bemessungsgrößen bei den Brückenbauwerken über die Engelberger Aa wurden gemäss den kantonalen Anforderungen berücksichtigt. Diese Anforderungen sind auf das bestehende Schutzsystem an der Engelberger Aa (Bauetappe 1 bis 4) ausgelegt. Im Bereich vom Projektperimeter ist die Brückenunterkante auf ein Extremereignis an der Engelberger Aa inkl. Berücksichtigung von einem Freibord zu bemessen. Das Freibord beträgt 1.50 m, wobei in den Uferbereichen das Freibord auf 80 cm reduziert werden darf.

3.5.2 Beurteilung und Fazit

Das Bemessungsereignis und die Bemessungsgrößen sind im Technischen Bericht der Schubiger AG Bauingenieure (2023) umfassend dokumentiert und nachvollziehbar erläutert.

Es sind alle denkbaren Gefahrenprozesse im Bemessungsereignis und in den Bemessungsgrößen abgebildet. Die Vorgaben aus der Schutzzielmatrix (Abb. 1) wurden in den Bemessungsgrößen berücksichtigt.

3.6 Überlastbetrachtungen und Überlastszenarien

3.6.1 Ausgangslage

Im Rahmen von **Überlastbetrachtungen** werden weitere **Überlastszenarien** untersucht:

- Vorbelastung des Systems
- Verklausungen
- Flutwellenbildung

Im Projekt wurde Wert daraufgelegt, möglichst alle denkbaren Szenarien und Ereignisabläufe zu untersuchen, damit ein möglichst robustes und gesamtheitliches Schutzsystem geplant werden konnte.

Die Planer haben keine Reduktion der Eintretenswahrscheinlichkeiten der vielen untersuchten Rheologien vorgenommen. Die Umhüllende aller Rheologien wird für die Dimensionierung der Bauwerke berücksichtigt. Die Planer weisen deshalb darauf hin, dass der Überlastfall bezogen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit noch einmal deutlich seltener eintritt.

In der Folge werden die möglichen Überlastszenarien gemäss Schubiger AG Bauingenieure (2023) aufgeführt:

- Überströmen der Leitdämme Süd und Nord
- Ungünstiges Ablagerungsverhalten im Geschieberückhalteraum bzw. Unterschätzung der Geschiebefracht
- Flutwelle infolge Seebildung
- Störung bei der beweglichen Grundablassschütze
- Verfrühtes Anspringen des Entlastungsbauwerks entlang der Engelberger Aa
- Schwemmholzaustrag in Engelberger Aa

3.6.2 Beurteilung und Fazit

Die aufgeführten Überlastszenarien sind detailliert beschrieben und diskutiert und teilweise auch mit den numerischen Modellierungen untersucht worden.

Der Experte Wasserbau sieht keine weiteren relevanten Überlastszenarien, die noch berücksichtigt werden müssten.

Der Experte Wasserbau teilt die Meinung der Planer, dass die verschiedenen untersuchten Rheologien bei den Murgangmodellierungen dazu führen, dass die Eintretenswahrscheinlichkeit eines einzelnen Murgangszenarios deutlich kleiner wird.

4 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN

4.1 Szenariendefinition

Basierend auf den in Abschnitt 3.4 aufgeführten Szenarien und den in Abschnitt 3.5 erläuterten Bemessungsereignis und Bemessungsgrößen sowie auf den in Abschnitt 3.6 aufgeführten Überlastbetrachtungen, bzw. Überlastszenarien wurden die Szenarien definiert, welche in den numerischen Modellierungen zu berücksichtigen sind. Diese sind in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführt und stammen aus Schubiger AG Bauingenieure (2023) und/oder beffa tognacca gmbh (2023).

4.1.1 Hochwasserszenarien

Die untersuchten Hochwasserereignisse basieren auf zwei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen:

- kurze, intensive Gewitterereignisse, Dauer 6 Stunden
- langandauernde Niederschlagsereignisse mit kleinen Intensitäten, Dauer 150 Stunden

Basierend auf diesen Niederschlagsereignissen wurden die Spitzenabflüsse und die Geschiebefrachten für verschiedene Jährlichkeiten ermittelt. Zusätzlich wurde ein Sicherheitshochwasser (SHQ) eingeführt, welches 1.5 mal dem EHQ entspricht.

Prozess		HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	EHQ	SHQ
Hochwasser, Lange Ganglinie (150h)	V	2.5 Mio. m ³	3.58 Mio. m ³	4.47 Mio. m ³	5.65 Mio. m ³	8.48 Mio. m ³
	Q _{max}	12 m ³ /s	16 m ³ /s	19 m ³ /s	24 m ³ /s	36 m ³ /s
Hochwasser, Kurze Ganglinie (6h)	V	0.36 Mio. m ³	0.61 Mio. m ³	0.82 Mio. m ³	1.25 Mio. m ³	1.88 Mio. m ³
	Q _{max}	39 m ³ /s	68 m ³ /s	90 m ³ /s	137 m ³ /s	206 m ³ /s

Tab. 1: Hochwasserszenarien (beffa tognacca gmbh 2023, respektive Oeko-B-AG, 2007).

4.1.2 Geschiebeszenarien

Basierend auf den Hochwasserszenarien wurden die dazugehörigen Geschiebefrachten bestimmt.

Prozess		G_{30}	G_{100}	G_{300}	G_{EHO}	G_{SHO}
Hochwasser, Lange Ganglinie (150h)	V	35'000 m ³	75'000 m ³	120'000 m ³	180'000 m ³	270'000 m ³
Hochwasser, Kurze Ganglinie (6h)	V	17'000 m ³	34'000 m ³	40'000 m ³	70'000 m ³	105'000 m ³

Tab. 2: Geschiebefrachten (beffa tognacca gmbh 2023, respektive Oeko-B-AG, 2007).

4.1.3 Murgangsszenarien

Die in den numerischen Modellierungen untersuchten Murgangsszenarien sind in der Tabelle 3 aufgeführt. Die Murgangfrachten der verschiedenen Jährlichkeiten setzen sich aus einer Anzahl Murschüben sowie aus einem Anteil aus der Gerinnesohle der Transitstrecke, welcher durch Erosion mobilisiert wird. Dieser Anteil wird als zusätzlicher Murschub modelliert.

Prozess		M_{30}	M_{100}	M_{300}	M_{Extrem}
Murgang, granular	V	40'000 m ³	95'000 m ³	150'000 m ³	250'000 m ³
	Q_{max}	150 m ³ /s	500 m ³ /s	800 m ³ /s	1'100 m ³ /s
	Schübe	2 x 15'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 10'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)	3 x 25'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 20'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)	3 x 40'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 30'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)	4 x 50'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 50'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)
Murgang, viskos	V	36'000 m ³	85'000 m ³	135'000 m ³	225'000 m ³
	Q_{max}	150 m ³ /s	500 m ³ /s	800 m ³ /s	1'100 m ³ /s
	Schübe	2 x 15'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 6'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)	3 x 25'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 10'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)	3 x 40'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 15'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)	4 x 50'000 m ³ (Rutschung Waseneggli) & 1 x 25'000 m ³ (Erosion Transitstrecke)

Tab. 3: Murgangsszenarien (beffa tognacca gmbh 2023).

Es wird unterschieden zwischen viskosen und granularen Murgängen. Für die beiden Murgangstypen wurden unterschiedlich Rheologien verwendet. Neben den Murgängen mit Murschüben konstanter Rheologie (alle Murschübe einer Murgangserie zeigen identisches Fließ- und Ablagerungsverhalten) wurden auch Serien mit Murschüben unterschiedlicher Rheologie betrachtet. Bei Serie 5 werden die einzelnen Schübe progressiv flüssiger und schneller. Bei Serie 6 werden die Schübe progressiv zäher und langsamer. Zusätzlich wurden noch zwei weitere Serien (Serie 7 und 8) für ausgewählte Szenarien (M_{300}) untersucht. Serie 7 startet zunächst mit einem zähen Murschub, gefolgt von viskosen Murschüben bevor am Schluss nochmals ein granularer Schub folgt. Serie 8 beginnt hingegen mit einem flüssigen Murschub, geht

dann in einen granularen Schub über bevor schliesslich noch ein letzter viskoser Schub folgt (beffa tognacca gmbh 2023).

4.1.4 Überlastszenarien

Neben den eigentlichen Überlastereignissen, welche eine Wiederkehrperiode grösser als 300 Jahre aufweisen, wurden weitere Überlastszenarien betrachtet. Dazu gehören Verklausungen bei der Grundöffnung im Abschlussbauwerk und bei der Brücke Buholzbach, wobei jeweils von einer vollständigen Verklausung ausgegangen wird. Unter den Szenarien «Vorbelastung» werden verschiedene Ereignisabfolgen untersucht. Als Vorbelastung wird ein 30-jährliches Murgangereignis definiert, auf welches dann ein 300-jährliches Murgangereignis sowie ein Extrem-Murgangereignis (M_{EHQ}) trifft. Zusätzlich wird die Ereignisabfolge 30-jährliches Geschiebeereignis (kurz & lang) gefolgt von einem 300-jährlichen Murgangereignis untersucht. Eine weitere Ereignisabfolge ist ein 300-jährliches Murgangereignis gefolgt von einem 100-jährlichen Hochwasserereignis (Reinwasser, kurz mit stationärem Abfluss).

4.1.5 Flutwellenszenarien

Bei diesem Szenario wird angenommen, dass der Geschieberückhalteraum infolge einer Verklausung der Grundöffnung mit Wasser bis auf die Kote der Überfallsektion beim Abschlussbauwerk gefüllt ist. Auf dieses Wasservolumen trifft ein flüssiger Murgang (M_{EHQ}).

4.1.6 Beurteilung und Fazit

Es wurden alle möglichen Gefahrenprozesse, welche beim Buholzbach denkbar und relevant sind, in den oben aufgeführten Szenarien abgebildet und in numerischen Modellierungen untersucht. In einem iterativen Prozess zwischen Modellierer, Planer, Bauherr und ab Frühjahr 2023 auch mit dem Experten Wasserbau wurden die Modellierungsergebnisse analysiert und besprochen sowie Folgerungen gezogen. Falls notwendig wurden weitere numerische Modellierungen durchgeführt, um die Funktionalität, bzw. Sicherheit nachzuweisen und/oder Optimierungen durchzuführen.

4.2 Verwendete numerische Modelle

4.2.1 1D-Modell

Für gewisse Bemessungen und Plausibilisierungen wurden durch die Schubiger AG Bauingenieure die 1D-Programme HEC-RAS und HYDRAU eingesetzt. Mit HEC-RAS können stationäre oder instationäre Wasserspiegelverläufe (Stau- und Senkuren) berechnet werden. Für kanalisierte Gewässer können für definierte Abflüsse z.B. Abflusstiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Energiehöhen, kritische Abflusstiefen und Froude-Zahlen berechnet werden.

4.2.2 2D-Modell

Die Geschiebe- und Hochwassermodellierungen sowie die Murgangmodellierungen wurden mit dem 2D-Berechnungsmodell FLUMEN durchgeführt. FLUMEN ist eine Eigenentwicklung der beffa tognacca gmbh (www.fluvial.ch) und wurde schon oft in verschiedenen Projekten eingesetzt.

Modellaufbau

Das Berechnungsmodell basiert auf den Geländeaufnahmen von 2006, ergänzt mit den Aufnahmen aus dem Jahr 2014 vom mittleren Bereich des Schwemmkegels. Die Projektgeometrie wurde entsprechend dem Vorprojekt (Stand November 2022) eingebaut und laufend aufgrund neuer Erkenntnisse aus den numerischen Modellierungen und jeweils in Absprache mit dem Planer angepasst.

Aus den Punktdaten wurde ein trianguliertes Netz mit einer relativ hohen räumlichen Auflösung (mittlere Zellengröße von 5 m²) erstellt. Alle massgebenden Geländekanten wurden als Bruchkanten ins Modell eingeführt.

Abschluss- und Entlastungsbauwerk im 2D-Modell

Das Abschlussbauwerk besteht aus einer Grundöffnung und einer Überfallsektion und die beiden Entlastungsbauwerke aus je einer Überfallsektion. Bei den Abflüssen über die Überfallsektionen und insbesondere durch die Grundöffnung handelt es sich um dreidimensionale Fliessprozesse, welche mit einem 2D-Modell nur angenähert abgebildet werden können.

Die Modellierung des fluvialen Geschiebetransports durch die Grundöffnung kann nur als sehr grobe Näherung an die tatsächlichen Verhältnisse betrachtet werden.

Die nachfolgenden Ausführungen stammen aus beffa tognacca gmbh (2023). «Die Abschlussbauwerke mit den geplanten Öffnungen werden numerisch so nachgebildet, dass Reinwasser und Murgangabflüsse prinzipiell durch die Öffnungen durchströmen können (entsprechend der hydraulischen Kapazität der Öffnung). Geschiebetrieb kann je nach gewählter Methode (siehe Ausführungen im Anhang L) durch die Öffnung modelliert werden oder nicht.

Für Murgänge kann angenommen werden, dass die relativ kleine Grundöffnung schon in der Anfangsphase der Ereignisse durch Geschiebe und Treibholz so stark verstopft wird, dass praktisch keine Feststoffe durchtransportiert werden können. Somit wird das gesamte Murgangvolumen zurückgehalten, solange die Bauwerke nicht überströmt werden. Zur Abklärung möglicher Auswirkungen einer fehlenden Verklauung wurde jedoch auch die Situation mit unverklautem Bauwerk betrachtet. Bei Hochwasserereignissen mit intensivem Geschiebetransport wird neben der Situation mit offenem Grundablass auch die Situation mit Verschluss der Grundöffnung ab Ankunft der Ablagerungsfront am Auslaufbauwerk untersucht.

Zur Abbildung des Grundablasses im Modell wurden drei verschiedenen Ansätze verwendet:

- Durchlass (culvert)
- Schütze (gate)
- Brücke (bridge)

Für Murgangsimulationen ohne Verklauung des Grundablasses wurde der Ansatz «Durchlass» verwendet, um den Murgangabfluss durch den Grundablass zu modellieren.

Für die Geschiebesimulationen kamen alle drei Bauwerkstypen zum Einsatz. Während bei den beiden Ansätzen «Durchlass» und «Schütze» nur ein Reinwasserabfluss modelliert werden kann, wird beim Ansatz «Brücke» auch Geschiebe hindurchtransportiert. Wie sich im späteren Verlauf der Untersuchungen jedoch herausgestellt

hat, wird der Abfluss beim Ansatz «Brücke» überschätzt. Die Geschiebeausträge sind somit aufgrund der zu grossen Abflusskapazität an der oberen Grenze der zu erwartenden Geschiebeausträge. Bei den beiden Ansätzen «Durchlass» und «Schütze» wird hingegen die Abflusskapazität realistisch abgebildet, dafür erlaubt das numerische Modell bei beiden Ansätzen «Durchlass» und «Schütze» keine Abbildung des Geschiebetransports.

Ein detaillierter Beschrieb der numerischen Abbildung der drei verwendeten Bauwerkstypen ist im Anhang L des Berichts von beffa tognacca gmbh (2023) zu finden.»

4.2.3 3D-Modell

Die Flutwellenmodellierungen (Reinwasser) wurden mit dem 3D-Modell OpenFOAM durchgeführt (www.openfoam.com).

Modellaufbau

Als Modellgrundlage diente das Höhenmodell, welches für die 2D-Modellierungen verwendet wurde. Das Berechnungsnetz besteht aus insgesamt ca. 2.5 Mio. Zellen mit einer Maschengrösse zwischen 0.1 und 0.5 m.

4.2.4 Beurteilung und Fazit

Die für das Hochwasserschutzprojekt massgebenden Gefahrenprozesse, bzw. daraus definierten Szenarien wurden die korrekten Modellierungsansätze und Modellierungstools (1D, 2D und 3D) eingesetzt.

Mit dem 1D-Programm HEC-RAS konnten die für einzelne Bemessungen notwendigen Grössen, wie beispielsweise Geschwindigkeiten und Abflusstiefen berechnet werden. Die Anwendung eines 1D-Programms ist für Fliessgewässer mit näherungsweise prismatischer Geometrie, bei welchen 2D- und 3D-Strömungssituationen vernachlässigbar sind, zulässig.

Mit dem 2D-Program FLUMEN können die Strömungs- und Ablagerungsprozesse im Buholzbach oberhalb des Geschiebesammlers, im Rückhalteraum des Geschiebesammlers sowie im Buholzbach unterhalb des Abschlussbauwerks, in den Entlastungsräumen, in der Engelberger Aa sowie beim Zusammenfluss des Buholzbachs in die Engelberger Aa gut modelliert werden.

Bereiche, wo 3D-Strömungen vorherrschen, wie bei den Entlastungsbauwerken (Überfälle und Grundablass) ist der 2D-Ansatz ungenau. Deshalb wurden die Abflusskapazitäten über die Überfallsektionen beim Abschlussbauwerk und bei den beiden Entlastungsbauwerken wie auch der Durchfluss durch den Grundablass beim Abschlussbauwerk anhand von Bemessungsansätzen (Poleni und Torricelli) berechnet und die entsprechenden Pegel-Abflussrelationen für diese Bauwerke ermittelt und in den 2D-Modellierungen berücksichtigt.

Der 2D-Ansatz für die Berechnung des fluvialen Geschiebetransports durch den Grundablass bei einem eingestauten Sammler ist ungenau und die Ergebnisse können nur als Anhaltspunkte und Grössenordnungen betrachtet werden. Im konkreten Fall ist dies jedoch von ungeordneter Bedeutung, da das Geschiebe nur bei Hochwasserereignissen mit langer Ganglinie bis zum Abschlussbauwerk gelangen und für dieses Szenario beschlossen wurde, dass der Grundablass mit einer beweglichen

Schütze ausgestattet wird, um einen unzulässigen Geschiebeaustrag aus dem Sammler insbesondere in der abklingenden Hochwasserwelle zu verhindern.

Die Flutwellenmodellierungen, hier das Auftreffen eines Murgangs in einen mit Wasser gefüllten Sammler, wurde mit einer 3D-Modellierung durchgeführt, welche hier als zweckmässig beurteilt wird.

4.3 Bemessungsansätze

4.3.1 Ausgangslage

Neben den numerischen Modellen wurde verschiedene Bemessungsansätze aus der Literatur verwendet, mit welchen in «Handrechnungen», bzw. mit Excel verschiedene Dimensionierungen, wie z.B. Blockgrössen, Entlastungskapazitäten der Überfälle und beim Grundablass sowie Tosbeckenabmessungen ermittelt wurden.

4.3.2 Beurteilung und Fazit

Es wurden für die verschiedenen Fragestellungen, bzw. Dimensionierungen die korrekten Bemessungsansätze verwendet.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass gewisse Ergebnisse wie z.B. die Dimensionierung des Tosbeckens mit diesen Bemessungsansätzen nicht sehr genau sind und daher auch notwendige Reserven in diesen Bauwerken vorzusehen sind. Für den Nachweis der Funktionalität und für die Optimierung des Tosbeckens unterhalb des Abschlussbauwerk wäre eine hydraulische Modellierung ein guter Modellierungsansatz gewesen.

4.4 Projektentwicklung und -anpassungen

4.4.1 Ausgangslage

Als Startgeometrie für die numerischen Modellierungen wurde vom Vorprojekt (Stand November 2022) ausgegangen. Im Laufe der Projektentwicklung und basierend auf den numerischen Modellierungen wurde im engen Austausch mit dem Planer und teilweise auch mit dem Experten Wasserbau die Projektgeometrie entsprechend angepasst. Im Folgenden sind der Ablauf der Modellierungsschritten und die jeweiligen Anpassungen aufgeführt:

- Startgeometrie: Geometrie Vorprojekt
- Anpassung rechte Flügelmauer beim Abschlussbauwerk
- Definition Uferhöhen Unterlauf zwischen Auslaufbauwerk und Mündung
- Definition Dammhöhen Entlastungskorridor
- Erhöhung des Abschlussbauwerkes um 50 cm
- Verkleinerung Grundablass von 3 x 14 m (H x B) auf 2 x 1.5 m (H x B)
- Test mit kleinerem Grundablass von 2 x 0.8 m (H x B)
- Anpassung Gerinne Unterlauf
- Aktualisierung Gerinne Engelberger Aa mit Entlastungsbauwerk

4.4.2 Beurteilung und Fazit

Die Projektentwicklungen und Anpassungen sind in beffa tognacca gmbh (2023) nachvollziehbar dokumentiert.

4.5 Durchgeführte numerische Modellierungen

4.5.1 Ausgangslage

Die durchgeführten numerischen Modellierungen sind nachfolgend zusammengefasst:

- 2D-Murgangsimulationen
 - Mit Verklausung Grundablass
 - Ohne Verklausung Grundablass 3 x 14 m (B x H)
 - Mit Vorbelastung M30
 - Mit Verklausung Brücke Buholz
 - Mit Vorbelastung G30
 - Mit Hochwasser HQ100
- 2D-Geschiebesimulationen
 - Grundablass 1.5 x 2 m (H x B)
- 2D-Geschiebesimulationen (Zusatz)
 - Grundablass 3 x 14 m (H x B)
 - Grundablass 1.5 x 2 m (H x B)
 - Grundablass 0.8 x 2 m (H x B)
- 2D-Reinwassersimulationen Unterlauf
- 3D-Flutwellensimulationen

Für alle numerischen Modellierungen sind in beffa tognacca gmbh (2023) im Anhang die relevanten Karten, bzw. Grafiken und Tabellen aufgeführt. Dazu gehören Ablagerungen, Ablagerungshöhen, Wasserspiegelkoten, Fliessgeschwindigkeiten, Abflusshöhen, Spitzenabflüsse, Froude-Zahlen, Entlastungskubaturen.

4.5.2 Beurteilung und Fazit

Die durchgeführten numerischen Modellierungen sind in beffa tognacca gmbh (2023) sehr umfassend und im Detail in Form von Grafiken, Karten und Tabellen sehr gut dokumentiert und beschrieben.

4.6 Auswertung und Resultate der numerischen Simulationen

4.6.1 Ausgangslage

In beffa tognacca gmbh (2023) sind die Auswertungen und Resultate gut und nachvollziehbar zusammengefasst und beschrieben. Im Anhang sind die detaillierten Resultate umfassend und vollständig dokumentiert, siehe Abschnitt 4.5.2. Die Resultate wurden laufend mit dem Planer und teilweise auch mit dem Experten Wasserbau ausgetauscht und diskutiert und sind in die Optimierung der Bauwerke eingeflossen.

4.6.2 Beurteilung und Fazit

Die numerischen Modellierungen haben wichtige Grundlagen für die Erarbeitung und Optimierung des Bauprojekts Hochwasserschutz Buholzbach geliefert. Die Modellierungen selbst oder deren Interpretation haben den Nachweis der Funktionalität der verschiedenen Schutzbauten ermöglicht.

5 BAULICHE MASSNAHMEN

5.1 Ausgangslage

Die Dimensionierung der verschiedenen Schutzbauwerke basieren mehrheitlich auf den numerischen Modellierungen der beffa tognacca gmbh (2023). Teilweise basieren einzelne Dimensionierungen von Schutzbauwerken oder flussbauliche Bemessungen auf 1D-Modellierungen mit den Programmen HEC-RAS oder HYDRAU. Die entsprechenden Dokumentationen sind in den Anhängen A.1 und A.2 in Schubiger AG Bauingenieure (2023) aufgeführt. Zudem wurden einzelne Elemente von Schutzbauwerken mit wasserbaulichen Bemessungsansätzen dimensioniert, wie beispielsweise das Tosbecken unterhalb des Auslaufbauwerks oder das Schwemmholzurückhaltebauwerk. Das erforderliche Freibord wird gemäss der Empfehlung der Kommission Hochwasserschutz (KOHS 2013) ermittelt.

5.2 Auslaufbauwerk

5.2.1 Ausgangslage

Die Gestaltung und Bemessung des Auslaufbauwerks, bzw. Abschlussbauwerks inkl. dem Grundablass, dem Tosbecken und dem Schwemmholzurückhaltebauwerk wurden intensiv zwischen R. Ruedlinger (PL Planer, Schubiger AG Bauingenieure), teilweise auch mit Ch. Tognacca (Modellierer) und J. Speerli (Experte Wasserbau) diskutiert und zusammen weiter entwickelt. Die eigentliche Dimensionierung des Auslaufbauwerks wurde durch R. Ruedlinger vorgenommen.

Die Beschreibung des Auslaufbauwerks wird als Auszug aus Schubiger AG Bauingenieure (2023) nachfolgend zusammengefasst:

Das Auslaufbauwerk ist 41.50 m breit und inkl. Tauchwand knapp 30 m lang. Es besteht aus einer Tauchwand, einer Sperre mit Grundablass und Überfallsektion sowie einem Tosbecken mit seitlichen Leitwerken, zwei Aussteifungen und einer Vorsperre.

Der Grundablass der Sperre weist eine Breite von 1.5 m und eine lichte Höhe von 2 m auf. Sie ist bewusst klein gehalten, dass der Geschiebeauftrag aus dem Geschieberückhalteraum im Ereignisfall möglichst klein ist. Ebenfalls ist eine Niederwasserrinne im Grundablass vorgesehen. Ab einem Abfluss von gut 20 m³/s wird eine Seebildung im Rückhalteraum zugelassen.

Die Grundablassöffnung wird durch eine verstellbare Schütze mit hydraulischem Antrieb ausgestattet. Diese Schütze ist notwendig, um bei langen Hochwasserereignissen den Geschiebetrieb komplett zu unterbinden. Im Normalbetrieb ist die Schütze geöffnet. Ebenso bei kurzen Hochwasserereignissen.

Der Sperrenüberfall weist eine Breite von 30 m auf. Die Höhe der Überfallsektion liegt 1.20 m unterhalb der Überfallsektion vom Entlastungsbauwerk I. Somit kann gewährleistet werden, dass bis zu einem 100-jährlichen Hochwasserereignis kein Wasser über das Entlastungsbauwerk I in den Abflusskorridor austritt. Die Höhe der Sperre gegenüber der Gerinnesohle beträgt 8.75 m und ist auf die Ablagerungshöhen der Murgänge bzw. langanhaltenden Hochwasserereignisse ausgelegt. Die Sperrenflügel sind gegenüber der Überfallsektion um 2.25 m erhöht.

Das Tosbecken und die seitlichen Leitwerke weisen eine Länge von 18.60 m auf. Das Tosbecken ist mit örtlich affinen Natursteinblöcken ausgebildet um die Energiedissipation sowie die Sicherheit vor Kolkungen zu gewährleisten. Die Steine sind so angeordnet, dass eine Niederwasserrinne vorliegt und die Durchgängigkeit für Fische ermöglicht wird. Das Tosbecken wird durch eine Vorsperre abgeschlossen, welche zentral eine vertiefte Abflusssektion inkl. Aussparung für das Niedrigwasser vorweist. Wird die Sperre überströmt, so bildet sich aufgrund der Vorsperre ein Einstau im Tosbecken (bessere Energiedissipation). Der Wechselsprung erfolgt innerhalb vom Tosbecken.

Zur Energiedissipation des Ausflusstrahls beim Grundablass sind Störvorrichtungen im Tosbecken vorgesehen. Die Stahlbetonelemente brechen den Strahl und verhindern grössere Wasseraustritte über die Vorsperre in direkter Fliessrichtung (Schutz der Liegenschaft im Unterwasser). Der Abfluss überströmt die Vorsperre dadurch kontrolliert zentral.

5.2.2 Beurteilung und Fazit

Da der Experte Wasserbau in die Weiterentwicklung und Auslegung des Auslaufbauwerks bis zur vorliegenden Geometrie stark involviert war, liegt eine Befangenheit in der Beurteilung dieses Bauwerks vor. In die Bemessung des Auslaufbauwerks war der Experte Wasserbau nicht involviert.

Es wurden die korrekten Bemessungsansätze für die hydraulische Dimensionierung des Auslaufbauwerks verwendet. Der Experte Wasserbau hat keine eigenen Nachrechnungen durchgeführt. Die resultierenden Abmessungen des Auslaufbauwerks werden als plausibel angeschaut.

5.3 Grundablass mit beweglicher Schütze

5.3.1 Ausgangslage

Die Diskussionen zwischen D. Ruedlinger, Ch. Tognacca und J. Speerli betreffend eines Geschiebeaustrags durch den Grundablass bei langanhaltenden Hochwasserereignissen und insbesondere während der abklingenden Hochwasserwelle haben gezeigt, dass mit einem unzulässig grossen Geschiebeaustrag gerechnet werden muss. Dieser Geschiebeaustrag würde grössere Probleme in der Engelberger Aa verursachen und die Projektziele könnten für das Szenario «langanhaltendes Hochwasserereignis» nicht erreicht werden und ein Schutzdefizit würde weiterhin vorliegen. Nur mit einer beweglichen Schütze, welche geschlossen wird, sobald sich die Geschiebefront dem Auslaufbauwerk nähert, kann ein unzulässiger Geschiebeaustrag verhindert werden.

5.3.2 Beurteilung und Fazit

Da der Experte Wasserbau in die Entwicklung und Auslegung des Grundablasses inkl. beweglicher Schütze stark involviert war, liegt eine Befangenheit in der Beurteilung dieses Bauwerks vor.

Der Experte Wasserbau kann aufgrund seiner langjährigen Erfahrungen mit hydraulischen Modelluntersuchungen von Geschiebesammler inkl. Abschlussbauwerken bestätigen, dass im vorliegenden Fall eine bewegliche Schütze für das Szenario

«langanhaltendes Hochwasserereignis» erforderlich ist, um die Schutzziele zu gewährleisten.

Die Schliessmechanismus ist robust auszulegen und mit einem Notstromaggregat und einem Handbetrieb auszugestalten. Dies ist im Bauprojekt entsprechend vorgesehen.

Da die Geschiebefront um die 30 Stunden benötigt, bis sie das Abschlussbauwerk erreicht, bleibt genügend Vorwarnzeit, um die Schütze zu schliessen, selbst wenn die Schütze von Hand geschlossen werden müsste. Aus diesem Grund soll die bewegliche Grundablassschütze auch gefahrenwirksam beurteilt werden.

5.4 Schwemmholzrückhaltbauwerk

5.4.1 Ausgangslage

Wie im Abschnitt 5.2.1 bereits erwähnt, wurden verschiedene Varianten für den Schwemmholzrückhalt zwischen R. Ruedlinger, Ch. Tognacca und J. Speerli diskutiert.

Es hat sich gezeigt, dass für die Randbedingungen und Verhältnisse am Geschiebesammler Buoholzbach eine Tauschwand die beste Lösung darstellt. Das Schwemmholzrückhaltebauwerk hat in diesem Projekt vor allem die Funktion, grössere Mengen von Schwemmholz, insbesondere Schwemmholzteppiche während einem Hochwasserereignis zurückzuhalten und den Austrag Richtung Engelber Aa zu verhindern. Ein vorzeitige Verklausung der Grundablassöffnung durch Schwemmholz wird in diesem Projekt toleriert.

5.4.2 Beurteilung und Fazit

Mit einer Tauschwand kann der Unterhalt vor dem Auslaufbauwerk mit grösseren Baumaschinen gut gewährleistet werden. Die geforderte Rückhaltekapazität sowie die Überlastsicherheit in Abstimmung mit den Entlastungsbauwerken wird bei dieser Variante erfüllt.

5.5 Entlastungsbauwerke I und II

5.5.1 Ausgangslage

Die Beschreibung der Entlastungsbauwerke wird als Auszug aus Schubiger AG Bauingenieure (2023) nachfolgend zusammengefasst:

Entlastungsbauwerk I

Das Entlastungsbauwerk I ist gut 36 m breit und knapp 13 m lang. Es besteht aus einer Sperre mit Überfallsektion sowie einem Tosbecken mit seitlichen Leitwerken, zwei Aussteifungen und einer Vorsperre. Der Sperrenüberfall weist eine Breite von 26 m auf. Die Höhe der Sperre gegenüber der Gerinnesohle beträgt gut 7 m. Die Sperre liegt 1.20 m über der Überfallsektion vom Auslaufbauwerk. Die Höhe ist ausgelegt auf die Hochwasserabflüsse, so dass kein verfrühter Wasseraustritt über das Entlastungsbauwerk I erfolgt (ab HQ_{100}). Die Sperrenflügel sind gegenüber der Überfallsektion um 1.95 m erhöht. Das Tosbecken und die seitlichen Leitwerke weisen eine Länge von knapp 13 m auf. Das Tosbecken ist mit örtlich affinen Natursteinblöcken ausgebildet um die Energievernichtung sowie die Sicherheit vor Kolkungen zu

gewährleisten. Das Tosbecken wird durch eine Vorsperre abgeschlossen, welche zentral eine vertiefte Abflusssektion vorweist, welche auf die unterliegende Mulden-situation der Zufahrt Industrie ausgelegt ist.

Entlastungsbauwerk II

Das Entlastungsbauwerk II ist 29 m breit und gut 16 m lang. Es besteht aus einer Sperre mit Überfallsektion sowie einem Tosbecken mit seitlichen Leitwerken, zwei Aussteifungen und einer Vorsperre. Die Sperre ist komplett eingeschüttet und luftseitig nicht sichtbar. Der Sperrüberfall weist eine Breite von 20 m auf. Die Höhe der Sperre gegenüber der Gerinnesohle beträgt gut 8 m. Die Höhe der Überfallsektion ist auf die mögliche Entlastung bei einem extremen Murgangereignis ausgelegt. Die Sperrflügel sind gegenüber der Überfallsektion um 1 m erhöht. Das Tosbecken und die seitlichen Leitwerke weisen eine Länge von gut 16 m auf. Das Tosbecken ist mit örtlich affinen Natursteinblöcken ausgebildet um die Energievernichtung sowie die Sicherheit vor Kolkungen zu gewährleisten. Das Tosbecken wird durch eine Vorsperre abgeschlossen.

5.5.2 Beurteilung und Fazit

Es wurden die korrekten Bemessungsansätze für die hydraulische Dimensionierung der Entlastungsbauwerke verwendet. Die Abstimmung des Auslaufbauwerks mit den beiden Entlastungsbauwerken erfolgte aufgrund dem Anspringpunkt des jeweiligen Überfalls und der Funktionalität der drei Bauwerke.

Der Experte Wasserbau hat keine eigenen Nachrechnungen durchgeführt. Die resultierenden Abmessungen der Entlastungsbauwerke werden als plausibel erachtet.

5.6 Verklausung Brücke Buoholz

5.6.1 Ausgangslage

Diskussionen zwischen R. Ruedlinger und J. Speerli haben ergeben, dass mit der bisherigen Variante aus dem Vorprojekte für die Zufahrt zur Brücke Buoholz über den Leitdamm Süd die geforderte Murgangsicherheit im Falle einer Vollverklausung der Brücke Buoholz nicht gewährleistet ist. Der vorliegende Lösungsansatz für die Zufahrt wurde gemeinsam von D. Ruedlinger und J. Speerli entwickelt. Die Dimensionierung erfolgt durch D. Ruedlinger.

5.6.2 Beurteilung und Fazit

Da der Experte Wasserbau in die Lösungsfindung für die Zufahrt zur Brücke Buoholz involviert war, liegt eine Befangenheit in der Beurteilung dieses Bauwerks vor. In die Bemessung war der Experte Wasserbau nicht involviert.

Die Ausgestaltung und Bemessung der vorliegenden Zufahrt zur Brücke Buoholz wird als plausibel und ausführbar beurteilt.

5.7 Zusammenfluss Buoholzbach mit Engelberger Aa

5.7.1 Ausgangslage

Das Streichwehr der EHQ-Entlastung entlang der Engelberger Aa in Dallenwil ist darauf ausgelegt, dass ab einem Abfluss von ca. 250 m³/s eine Entlastung erfolgen soll.

Die Abflussverhältnisse und Fließbedingungen bei der Einmündung des Buholzbachs in die Engelberger Aa wurden deshalb mit 2D Reinwassermodellierungen untersucht, um zu beurteilen, ob die Funktionalität der Seitenentlastung von der neuen Einmündung des Buholzbachs betroffen ist. Dabei wurden stationäre Abflüsse im Buholzbach für HQ₁₀₀ (kurz) und HQ₃₀₀ (kurz) mit keinem oder kleinem Abfluss aus der Engelberger Aa respektive einem 30-jährlichem Ereignis (114 m³/s, stationär) durchgeführt. Das Anspringen der Hochwasserentlastung in der Engelberger Aa wurde untersucht, indem bei einem HQ₃₀₀ (kurz) aus dem Buholzbach der Abfluss der Engelberger Aa sukzessive bis zum Anspringen der Seitenentlastung in der Engelberger Aa erhöht wurde.

Die 2D-Simulationen zeigen, dass im Fall eines Kurzzeitereignisses im Buholzbach und einem erhöhten Abfluss in der Engelberger Aa die Seitenentlastung früher anspringt. Übersteigt der Abfluss in der Engelberger Aa den Wert von 120 m³/s (ca. HQ₅₀) springt bei einem gleichzeitigen Hochwasser im Buholzbach (HQ₃₀₀) die Seitenentlastung an. Der maximale Abfluss über die Seitenentlastung liegt bei einem Abfluss in der Engelberger Aa von 125 m³/s bei 0.5 m³/s, bei einem Abfluss von 150 m³/s steigt die Entlastung auf 5 m³/s. Es ist folglich mit leichten Überschwemmungen im Bereich der Industrie von Dallenwill als auch auf dem Talboden zu rechnen (beffa tognacca gmbh 2023).

5.7.2 Beurteilung und Fazit

Die Einzugsgebietscharakteristik der Engelberger Aa und des Buholzbachs sind unterschiedlich. Grosse Abflüsse in der Engelberger Aa erfordern langandauernde Niederschläge, damit das ganze Einzugsgebiet abflusswirksam wird. Hingegen sind es kurzzeitige, intensive Gewitterniederschläge, die zu hohen Abflüssen im Buholzbach führen. Eine Gleichzeitigkeit einer Abflussspitze im Buholzbach (HQ₃₀₀) und in der Engelberger Aa (HQ₅₀) wird als unwahrscheinlich beurteilt und die Eintretenswahrscheinlichkeit ist deutlich kleiner als ein HQ₃₀₀.

Es wird daher empfohlen, diese Abflusskombination als akzeptiertes Risiko zu betrachten.

6 FOLGERUNGEN

6.1 Prüfmandat

In einem Mail von Martin Andres (Gesamtprojektleiter Bauherr) vom 6. März 2023 wurden die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Fragen gestellt. Im Folgenden werden auf diese Fragen eingegangen und Antworten gegeben:

- Decken die durchgeführten numerischen Modellierungen alle relevanten Szenarien ab?
Für die Hochwassersicherheit am Buholzbach werden alle relevanten Szenarien in den numerischen Modellierungen berücksichtigt und berechnet.
- Sind die verwendeten Annahmen und sind die verwendeten Berechnungsmethoden richtig?
Die verwendeten Grundlagen, definierten Szenarien und getroffenen Annahmen werden als korrekt und plausibel beurteilt. Es wurden je nach Fragestellung mit

Bemessungsansätzen, 1D, 2D und 3D Modellierungen entsprechende Bemessungen von Bauwerken oder Gewässerabschnitten vorgenommen. Die verwendeten Berechnungsmethoden werden als korrekt beurteilt.

- Sind die Berechnungsergebnisse plausibel?
Es wurden keine eigenen Berechnungen durchgeführt. Die Darstellungen der Berechnungsergebnisse, die Interpretation und Diskussionen dieser Resultate werden als plausibel beurteilt. Einzig die modellierten Geschiebeausträge für langanhaltende Niederschlagsereignisse (HQ₃₀₀ lang) werden als unsicher beurteilt. Da für dieses Szenario der Grundablass mit einer beweglichen Schütze ausgestattet wird, sind diese Unsicherheiten jedoch akzeptierbar und nicht relevant.
- Wo gibt es allenfalls Unsicherheiten in den Resultaten und wie gross sind sie? Mögliche Unsicherheiten werden in den Bemessungen von folgenden Bauwerken gesehen:
 - Bemessung des Uferschutzes und der Sohlensicherung infolge von Murgangabflüssen, bzw. Murgangeinwirkungen.
 - Bemessung des Tosbeckens beim Auslaufbauwerk aufgrund der stark dreidimensionalen Abflussverhältnissen.
 - Diese Unsicherheiten können nicht quantifiziert werden und es sind entsprechende «Reserven» in der jeweiligen Dimensionierung vorzusehen.
- Wie müssen die Resultate hinsichtlich Systemrobustheit der Leitdämme und des Rückhalteriums interpretiert werden?
Die Systemrobustheit wird als hoch beurteilt. Dies aufgrund nachfolgender Aspekte:
 - Auslegung und Abstimmung der einzelnen Schutzbauwerke und insbesondere aufgrund der abgestuften Überströmbauwerke (Abschlussbauwerk, Entlastungsbauwerk I und II).
 - Bereiche der Längsdämme, welche überströmt werden können, werden erosionssicher ausgeführt.
 - Die in numerischen Modellierungen untersuchten Bemessungsszenarien inkl. den Überlastszenarien und die Berücksichtigung dieser Resultate in der Bemessung der einzelnen Bauwerke.
- Wie und wo müssen in der Planung der Projektelemente entsprechende Reserven noch eingeplant werden?
Siehe entsprechende Frage unter dem 4. Spiegelpunkt und der entsprechenden Antworten.

6.2 Erweiterter Auftrag

Der Experte Wasserbau hat im Rahmen des erweiterten Auftrags nachfolgende Bauwerke, bzw. Modellierungen eng begleitet und/oder teilweise in der Auslegung und Bemessung der Bauwerke, bzw. in der Interpretation der Ergebnisse mitgearbeitet:

- Auslegung des Grundablasses inkl. beweglicher Schütze beim Abschlussbauwerk
- Tosbecken unterstrom Abschlussbauwerk
- Schwemmholtzrückhaltebauwerk beim Abschlussbauwerk
- Situation bei einer Verklausung Brücke Buholz
- Modellierung Zusammenfluss Buholzbach mit Engelberger Aa und Auswirkungen aus Seitenentlastung in der Engelberger Aa

Da der Experte Wasserbau in diese Arbeiten involviert war, wird auf eine Beurteilung und ein Fazit dieser Arbeiten verzichtet. Die langjährigen Erfahrungen insbesondere aus hydraulischen Modelluntersuchungen (> 30 Jahre) sind jedoch in diese Arbeiten eingeflossen.

7 UNTERLAGEN

beffa tognacca gmbh (2023). Bericht zu den numerischen Modellierungen, Hochwasserschutzprojekt Buholzbach – Bauprojekt, Entwurf 13.11.2023.

Oeko-B-AG (2007). Gefahren- und Risikobeurteilung Gemeinde Wolfenschiessen: Wildbäche, Technischer Bericht.

Schubiger AG Bauingenieure (2023). Technischer Bericht, Hochwasserschutzprojekt Buholzbach – Bauprojekt, Entwurf 07.12.2023.