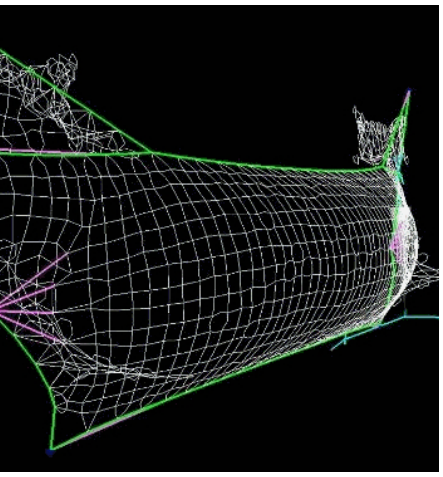
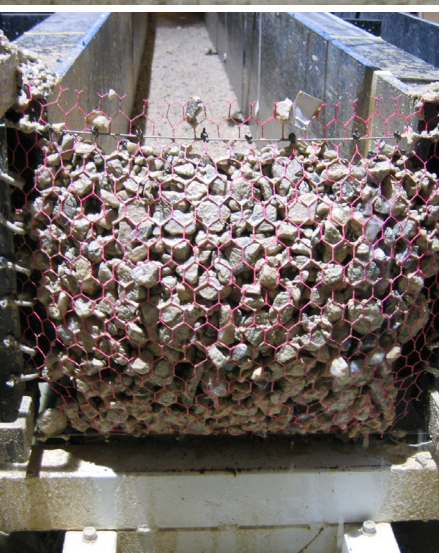








Heft 8, 2014

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

Flexible Murgangbarrieren

Bemessung und Verwendung

Axel Volkwein

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Heft 8, 2014
WSL Berichte
ISSN 2296-3456

Flexible Murgangbarrieren

Bemessung und Verwendung

Axel Volkwein

Herausgeberin
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Dr. Manfred Stähli, Leiter Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, WSL
Layout: Axel Volkwein, WSL

Kontakt
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Dr. Axel Volkwein
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
E-Mail: axel.volkwein@wsl.ch

Zitiervorschlag
Volkwein, A., 2014: Flexible Murgangbarrieren – Bemessung und Verwendung. WSL Ber. 8: 31 S.

Bezug
PDF Download www.wsl.ch/publikationen/pdf/13551.pdf

ISSN 2296-3456

Fotos Umschlag
Seitenansicht einer gefüllten Murgangbarriere im Illgraben VS, Mai 2006
Numerische Simulation einer Murgangbarriere
Murgangfront
Physikalische Modelierung von Murgangbarrieren im Labor

Quellenverzeichnis der Abbildungen
Abb. 1, 3, 4, 5, 7, 8: Wendeler (2008)
Abb. 10: Wasserbauplan Gemeinde Sigriswil (Tiefbauamt Kanton Bern, Herzog Ingenieure, Emch & Berger)
Abb. 11: Geobrugg AG
Abb. 14: C. Graf, WSL

© Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 2014

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6
2 Komponenten einer flexiblen Murgangbarriere 10
2.1 Netz 10
2.2 Tragseile 10
2.3 Flügel- und Randseile 10
2.4 Bremselemente 10
2.5 Verankerung 10
2.6 Stützen 11
2.7 Abrasionsschutz 11
3 Kraftbasierter Lastansatz für Murgangbarrieren 12
3.1 Modellgrundlage 12
3.2 Bestimmung der relevanten Lasten 14
4 Nachweis der Tragfähigkeit 16
4.1 Nachweis der prinzipiellen Funktionsweise über 1:1 Verfüllung/Belastung 16
4.1.1 Struktur der Barriere 16
4.1.2 Einwirkung 16
4.1.3 Murgang-Barrieren-Interaktion 16
4.2 Bemessung/Nachweis mittels Simulationen 17
4.3 Analytischer Nachweis 17
5 Weitere Nachweise 18
5.1 Installierbarkeit der Konstruktion. 18
5.2 Rückhaltefähigkeit 18
5.3 Rückhaltevolumen 18
5.4 Abrasionsschutz 18
5.5 Korrosionsschutz 18
5.6 Verhalten bei Hochwasser, Wildholz- oder Geschiebetransport 18
5.7 Wartung/Unterhalt 19
6 Sicherheitsfaktoren / Risikokonzept 20
7 Referenzen 21
Anhang A Beispiele zur Lastermittlung 22
Anhang B Beispiele für analytische Nachweise 24
Anhang C Einsatzbeispiele flexibler Murgangbarrieren 26
Beispiel Grönbach / Merligen 26
Beispiel Hüpbach 27
Beispiel Hasliberg 29
Beispiel Merdenson 30
Beispiel Illgraben 31

Vorwort

Die mitunter beeindruckende Leistungsfähigkeit der heutigen flexiblen Steinschlagschutznetzverbauungen motivierte die Forschung, in den letzten Jahren, das Potential von Netzverbauungen auch hinsichtlich des Einsatzes gegen flächige Lasten auszuloten. War dies bis anhin schon gang und gäbe im Bereich des aktiven Lawinenschutzes, wurde an der WSL von 2005 bis 2008 auch deren Einsatz in Murganggerinnen untersucht. Hierbei ging es um die prinzipielle Eignung, Entwurf eines Lastmodells zur Bemessung und Entwicklung geeigneter Nachweisverfahren. Die Struktur der Barrieren war anfänglich genausowenig vorgegeben wie die Kombination verschiedener im Bereich der Netzverbauungen üblicher Komponenten, zum Beispiel Seile, Stützen, sogenannte Bremselemente und passende Netze. Teilfinanziert wurde dieses Forschungsprojekt von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) des Bundes.

Das Projekt befasste sich mit den Barrieren von verschiedenen Gesichtspunkten aus. Zum einen gehörten dazu theoretische Ansätze und numerische Simulationen. Weiterhin zeigte sich, dass kleinskalige Laborexperimente sich nicht dazu eignen, physikalische Modelle zu entwickeln. Zu komplex ist die Rheologie von Murgängen und deren Interaktion mit einer Barriere, im besonderen einer flexiblen. Die wichtigsten Erkenntnisse wurden jedoch durch die (teilweise mehrfache) Installation von Barrieren in zwei aktiven Murganggerinnen gewonnen. Allein auf diese Art und Weise konnte die Eignung eines Barrierentyps eindeutig nachgewiesen werden. Auch die praktischen Elemente wie Einbau, Unterhalt oder Leerung bzw. Räumung liessen sich so optimieren genauso wie die Tragstruktur an sich. Langzeitbeobachtungen in Bezug auf Standzeit- und Korrosionsverhalten werden an der WSL weiterhin durchgeführt.

Dieser Bericht fasst die Erfahrungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL bezüglich der Funktionsweise von flexiblen Murgangbarrieren zusammen. Er basiert zu grossen Teilen auf der Dissertation von Corinna Wendeler, welche im Rahmen des obigen Projekts erstellt wurde. Ich bin überzeugt, dass damit der Praxis bei der Bemessung flexibler Murgangbarrieren und dem Nachweis notwendiger Elemente hilfreiche Grundlagen zur Verfügung stehen.

Birmensdorf, März 2014

Manfred Stähli, Leiter Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen

Summary

Experiences from North America, Japan and Europe have proven that flexible protection systems have an ideal bearing behavior to stop dynamic loads such as debris flows due to their large deformation capacity and permeability to water. Similar to rockfall loads, debris flows act mainly dynamically on a protection barrier. Although in contrast to falling rocks, debris flows impose not a punctual impact but a distributed load on the protection system. Therefore, structural adaptations compared to a typical rockfall protection are unavoidable in order to achieve a reliable protection system against debris flows such as special rope guiding details, abrasion protection etc. This report summarizes the results of a research project that aimed the development of a dimensioning concept for flexible debris flow protection systems. The concept results on specially focused research combining laboratory tests, fully instrumented field installations and corresponding numerical simulations. The report is meant to form a basis that enables engineers or other people in the field of natural hazards to calculate and understand the design of flexible barriers against debris flows within channelized river beds.

1 Einleitung

Die Fortschritte der letzten Jahre im Bereich der Schutznetze gegen Hochenenergiesteinschlag, gemachte einschlägige Erfahrungen und die prinzipiellen Vorteile von flexiblen Schutzkonstruktionen erlauben eine Erweiterung ihres Einsatzspektrums auf Gerinnemurgänge. Der vorliegende Bericht gibt für diesen Anwendungsbereich Aufschluss über die Randbedingungen zum Einsatz flexibler Barrieren. Auf Basis der hier beschriebenen Verfahrens wird es möglich, flexible Murgangbarrieren korrekt zu bemessen.

Der Bericht richtet sich einerseits an die ausschreibenden und planenden Stellen ebenso wie an die Hersteller und Anbieter flexibler Murgangbarrieren. Hintergrund zur Bemessung ist die Annahme eines «Design»-Murganges, wobei dabei u.U. zwischen einem granularen Ereignis und einen Schlammstrom unterschieden werden muss. Die hierfür notwendigen charakteristischen Murganggrössen wie Fliesshöhe h_{Fl} und Frontgeschwindigkeit v_{Fr} werden darum hier nicht berechnet, sondern müssen vorgängig separat ermittelt werden. Dies erfordert zusätzlich entsprechende Gutachten oder Simulationen. Weitere Grundlagen zu Murganglasten im Objektschutz sind in EGLI (2003) zu finden.

Massgebend im Bereich der Schutznetze gegen Murgänge ist die Doktorarbeit an der ETH Zürich von Corinna Wendeler (WENDELER 2008). Der vorliegende Bericht basiert grösstenteils auf den dort gefundenen Erkenntnissen, basierend auf umfassenden Feld- und Laborexperimenten sowie numerischen Simulationen. Die Ergebnisse wurden mittlerweile auch von anderen Institutionen aufgegriffen und mündeten zum einen in Bemessungsvorschläge (KWAN und CHEUNG 2012) oder Publikationen (CANELLI *et al.* 2012; BRIGHENTI *et al.* 2013).

Der Einsatzbereich der hier behandelten Schutzbarrieren liegt innerhalb von Gerinnen mit deutlichen Gerinneeinhängen. Eine Schutzbarriere spannt sich dann von einer Böschung zur anderen. Zwischen der Bachsohle und dem unteren Netzrand kann ein Freiraum (Durchlass, bzw. Basalöffnung) normalen Abfluss und kleine nicht Schaden bringende Hochwasser widerstandsfrei abführen und bietet zusätzlich einen Durchschlupf für Wild.

Das Schutznetz wird von Tragseilen aufgespannt und ist im Bereich der Böschung entlang dieser auch befestigt (z.B. mit Randseilen). Die Seile sind jeweils in den Uferböschungen verankert. Wird die Spannweite zu gross (typischerweise >15–20 m) so können Zwischenstützen für die Tragseile installiert werden. Zusätzliche sogenannte Bremselemente in den Tragseilen verlängern jene unter Belastung derart, dass die Seile sich optimal hinsichtlich der jeweiligen Lasteinwirkung ausrichten können. Für den Fall des Überströmens einer Barriere muss das oberste Tragseil mit einem Abrasionsschutz versehen sein. Abb. 1 zeigt ein derart ausgeführtes Barrierenbeispiel.

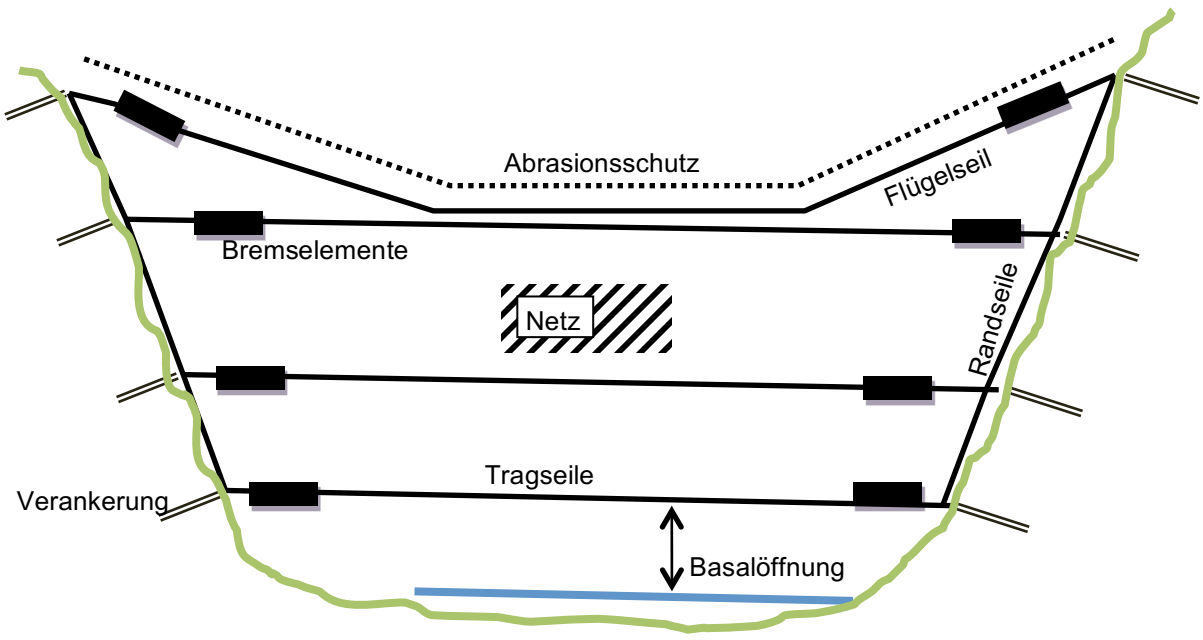


Abb. 1. Prinzipielle Anordnung einer typischen flexiblen Murgangbarriere.

Die hier behandelten Barrieren sollen das ankommende Murmaterial infolge ihres grossen Deformationvermögens gezielt abbremsen und auffangen. Die Netzstruktur ermöglich eine Entwässerung der Murmischung, welche dadurch infolge zunehmender Reibung der festen Partikel rasch zum Stillstand kommt und stabilisiert wird. Über den Rückstau gerinneaufwärts (Verlandung) wird weiteres Murmaterial gestoppt oder abgebremst, bis die Netzbarriere komplett hinterfüllt ist.

Der grosse Vorteil der Netzbarrieren ist deren vergleichsweise einfache und schnelle Installation. Das grösste notwendige Gerät ist eine Bohrlafette zur Erstellung der seitlichen Verankerungen. Das übrige Material lässt sich hinfahren oder einfliegen und ist ohne Einsatz schwerer Maschinen zu installieren. Die fertige Konstruktion wirkt sehr transparent und fügt sich somit gut in die Landschaft ein. Der Korrosionsschutz der Barrierenkomponenten garantiert in der Regel eine minimale ereignislose Standdauer von 30 bis 50 Jahre. Im Falle eines Ereignisses lassen sich die Barrieren gezielt bzw. koordiniert leeren und wieder instandsetzen. Für letzteres müssen in der Regel vor allem die Bremselemente ersetzt werden.

Flexible Murgangbarrieren können auf verschiedenste Art und Weise eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind in Anhang C gezeigt. Werden mehrere Barrieren in einem Gerinne hintereinander installiert, erhöht sich das maximale Rückhaltevolumen entsprechend (sog. Multi-Level-Barrieren). Die Murgangbarrieren sind auch besonders sinnvoll nahe dem Auslösebereich. Hier können sie einen kleineren Murgang komplett stoppen und so Gerinne- und Ufererosion und sich dadurch vergrössernde Muren vermeiden. Im Vergleich zu herkömmlichen Murgangbarrieren sind speziell im Auslösebereich die flexiblen Barrieren von Vorteil, da diese vergleichsweise einfach mit einem Helikopter eingeflogen werden können.

Die Bemessung erfolgt auf Basis von errechneten Anpralldrücken, welche in entsprechend auf die Barriere wirkende Kräfte umgerechnet werden. Dieses Verfahren zeigte die beste Effizienz in WENDELER (2008) und ist darum anderen Ansätzen wie einem Energieansatz vorzuziehen, welcher z.B. auch in KWAN und CHEUNG (2012) beschrieben ist und dementsprechend im vorliegenden Bericht nicht empfohlen wird. Eine Bemessung auf rein theoretischer Basis ist jedoch nicht empfehlenswert. Darum regt diese Richtlinie den prinzipiellen Nachweis der Funktionsweise des verwendeten Barrierenkonzepts anhand von 1:1 Felddaten an. Auf Basis derer können numerische Modelle kalibriert bzw. validiert werden und damit wiederum Varianten des getesteten Barrierentyps mit Hilfe numerischer oder analytischer Methoden entwickelt werden.

Die hier behandelten Murgangereignisse werden über die nachfolgenden Parameter (siehe auch Abb. 2) beschrieben, welche vorgängig separat bestimmt werden müssen:

- Dichte ρ
- Front-/Fliessgeschwindigkeit v_{Fl}
- Fliesshöhe h_{Fl}
- Gesamtvolumen V
- Durchmesser Einzelblöcke d
- Gerinneneigung β
- Ablagerungswinkel ϕ

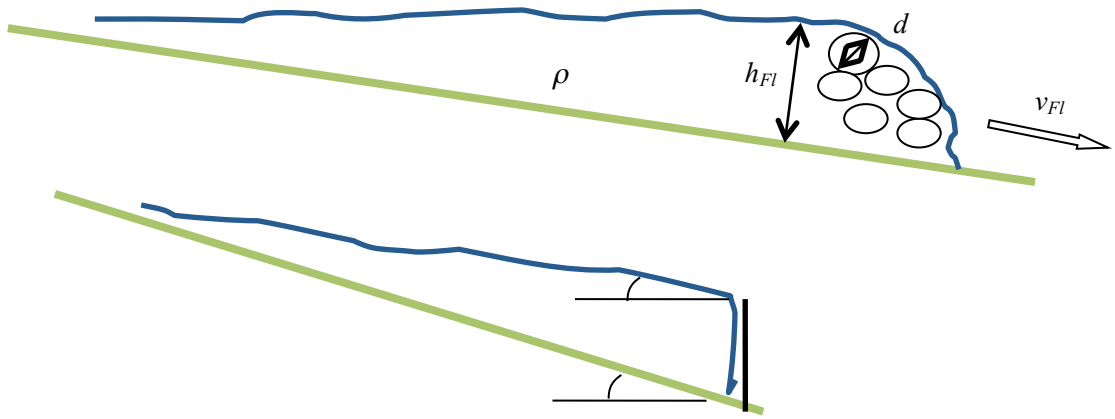


Abb. 2. Relevante Kenngrössen einer Murgangfront (oben) und des abgelagerten Murgangmaterials (unten), ermittelt gemäss Vorgehen z.B. nach EGLI (2003) oder HÜRLIMANN *et al.* (2008).

Massgeblich beschreibend für die Art eines Murgangs ist die Frontdichte in Abhängigkeit der geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet, der Korngrössenverteilung und dem Wassergehalt in der Mischung. Je nachdem kann man von einem granularen oder einem eher flüssigen Ereignis ausgehen. Fliesshöhe und Geschwindigkeit beeinflussen die zu erwartenden Anpralldrücke massgeblich. Das Gesamtvolumen in Kombination mit der Gerinneneigung und dem Ablagerungswinkel ist hinsichtlich der gesamten Rückhaltekapazität pro Barriere relevant.

Für die maximale Beanspruchung einer Murgangbarriere wird angenommen, dass der Murgang plötzlich auftritt und somit die Barriere von einer Front belastet wird. Kapitel 3 zeigt das hierfür verwendete Lastmodell.

2 Komponenten einer flexiblen Murgangbarriere

Wie in Abb. 1 zu sehen, besteht eine typische flexible Murgangbarriere aus verschiedenen Komponenten, welche im Folgenden kurz beschrieben werden. Sämtliche Komponenten müssen dabei einen ausreichenden Korrosionsschutz aufweisen.

2.1 Netz

Das Netz wird zuerst vom Murgang belastet und muss die wirkenden Anprall- und Druckkräfte an die Tragstruktur ableiten. Deren flächenmässige Verteilung muss auf das Tragvermögen der Netze abgestimmt sein, d.h., schwächere Netze benötigen ein dichteres Netz an Tragseilen. Die Maschenweite sollte in etwa der d_{90}-Korngrösse entsprechen, d.h. 90% der ankommenden Partikel haben einen kleineren Durchmesser als d_{90}. Wasser und kleinere Partikel können so gut drainiert werden. Unter Umständen empfiehlt sich eine Kombination aus einem stärkeren und grobmaschigeren Primärnetz und einem feinmaschigeren Sekundärgeflecht.

2.2 Tragseile

Die Tragseile führen die auf das Netz einwirkenden Lasten zu den Verankerungen ab. Je nach zu erwartender Last kann ein Tragseilstrang auch aus mehreren Einzelseilen bestehen. Mehrere Tragseilstränge sind in der Regel gleichmässig über die Barrierenhöhe verteilt. Die Tragseillage sollte auch hinsichtlich der zu erwartenden Verformungen der Barriere optimiert werden. Eine optimale Ausrichtung der Seile ermöglichen integrierte Elemente, welche grosse Verformungen zulassen (sog. Bremselemente, siehe Abschnitt 2.4).

2.3 Flügel- und Randseile

Das Flügelseil verläuft z.B. in der mittleren Hälfte der Barriere parallel zum oberen Tragseil und wird in den Randbereichen nach oben geführt. Diese Seilführung bewirkt eine Konzentration des Murflusses hin zur Barrierenmitte und reduziert die Böschungserosion. Zudem reduziert das Flügelseil die Absenkung der Barrierenoberkante.

Die Randseile verlaufen Böschungsparallel und sind regelmässig zu diesen hin verankert. Dadurch wird das Netz seitlich gespannt und seitliche Öffnungen in der Barriere werden vermieden.

2.4 Bremselemente

Die Murlasten werden über das Netz, die Tragseile und das Flügelseil zur Verankerung geführt. Dort installierte Elemente mit grosser plastischer Verformungskapazität reduzieren die Lastspitzen, welche beim Einzelanprall von grössen Blöcken auftreten können. Bremselemente und angeschlossene Seile müssen aufeinander abgestimmt sein. Aufgrund der mit dem Verfüllungsgrad wachsenden Lasten empfehlen sich Bremselemente mit einer kontinuierlich ansteigenden Last-Verfomungs-Charakteristik.

2.5 Verankerung

Die seitlichen Verankerungen der Seile werden im Normalfall über Seilanker oder Selbstbohranker mit flexiblen Ankerköpfen umgesetzt. Die Orientierung der Anker sollte hierbei auf die Geometrie der Barriere abgestimmt sein. Der flexible Ankerkopf ermöglicht einen optimalen Lasteintrag durch die Seile auch bei deformierter Barriere. Kopffundamente werden empfohlen.

2.6 Stützen

Im Falle von grösseren Spannweiten (> 15–20 m) bei breiteren Gerinnebetten und dadurch zu geringen Restnutzhöhen im Ereignisfall bzw. im verfüllten Zustand, können zusätzliche Stützen den Netzrand hochhalten. Das Stützenfundament muss auf Zug, Druck und Scherkräfte hin bemessen werden.

2.7 Abrasionsschutz

Wird infolge längerer Standzeit einer bereits gefüllten Barriere oder bei einer Serieninstallation von mehreren Einzelbarrieren ein Überströmen der Barrieren erwartet, so müssen oberes Tragseil und Flügelseil mit einem Schutz versehen sein, welcher vor Abrasion und bei Einzelanprall grösserer Blöcke bewahrt. Der Abrasionsschutz muss die Verformungen des oberen Barrierenrandes mitmachen können und Querkraftspitzen auf die Längsseile sollten vermieden werden.

3 Kraftbasierter Lastansatz für Murgangbarrieren

Um den Anprall eines Murgangs an eine Barriere vollständig und physikalisch korrekt zu beschreiben, bedarf es substanzieller Fluid-Struktur-Simulationen. Trotz allgemein verfügbarer und brauchbarer entsprechender Software sind derartige Simulationen mit viel Aufwand verbunden. Insbesondere die Fliesseigenschaften eines Murgangs müssen korrekt erfasst werden, was eine u.U. umfangreiche Kalibrierung erfordert. Für die Simulation der flexiblen Barrieren muss letztendlich auch noch deren Deformationsvermögen in die Simulation mit einfliessen und die wirkenden Lasten innerhalb der Barriere und an den Verankerungen müssen ebenfalls korrekt abgebildet werden. VON BOETTICHER *et al.* (2011a und b) beschreiben derartige Simulationen im Detail. In der Praxis sind diese – zumindest derzeitig – jedoch noch nicht adäquat einsetzbar. Insofern empfiehlt sich die Verwendung eines passenden Lastmodells wie ein solches im Folgenden beschrieben wird.

3.1 Modellgrundlage

WENDELER (2008) zeigt einen Ansatz, welcher die auf die Barriere wirkende Drücke und damit einwirkende Kräfte bestimmt und sehr gut die Situation in der Realität abbildet. Dieser Ansatz wird auch in der vorliegenden Abhandlung verwendet. Auf den Energieansatz, welcher in KWAN und CHEUNG (2012) beschrieben wird und den kinetischen Energieinhalt eines Murgangs berücksichtigt, wird dabei nicht eingegangen. Es zeigte sich in WENDELER (2008), dass eine auf den ersten Blick einfache erscheinende Umrechnung einer Murgangenergie in eine passende Steinschlagenergie zu keinen befriedigenden Ergebnissen führt. Zu unterschiedlich sind die Belastungen in den Barrieren. Ausserdem müssten die einwirkenden Murlasten in Kräfte in den Komponenten und Verankerungen transformiert werden, was insbesondere über den Auffüllvorgang nicht machbar ist.

Wie in Abschnitt 1 erwähnt, wird für die Barriere als Maximallast ein Murgangereignis mit einer ausgeprägten Front angenommen (Abb. 3). Diese trifft mit dem sogenannten «Erstanprall» auf die Barriere. Nach diesem wird die Barriere mit dem nachströmenden Material gefüllt. Dieser kontinuierliche Prozess wird im verwendeten Lastmodell zeitlich so diskretisiert, dass die Barriere in einzelnen sogenannten Stufen mit einer gleichmässigen Stufenhöhe (z.B. gleich der Fliesshöhe) verfüllt wird (Abb. 4). Ist nach dem vollständigen Verfüllen der Barriere noch mit weiterem Murgangmaterial oder späteren Folgeereignissen zu rechnen, so muss auch der Lastfall Überströmen für die Bemessung berücksichtigt werden (WENDELER 2008; KWAN und CHEUNG 2012; Abb. 5).

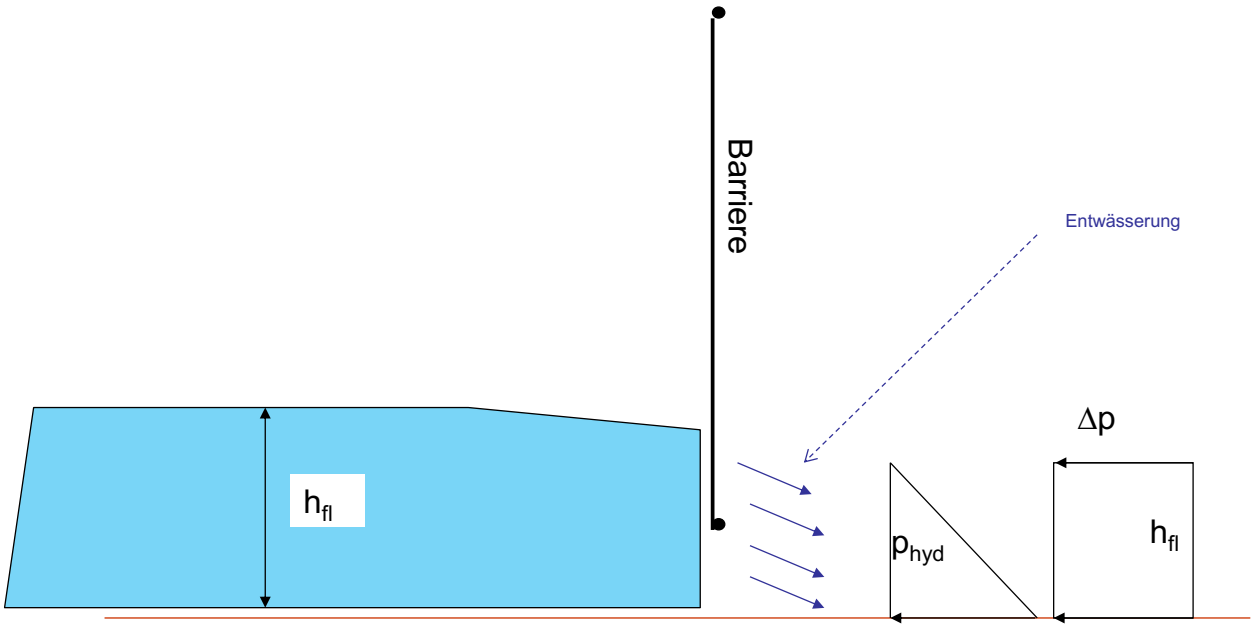


Abb. 3. Erstanprall des Murgangs auf die Barriere mit angewandtem Druckstossmodell bestehend aus hydrostatischem p_{hyd} und hydrodynamischen Druck Δp.

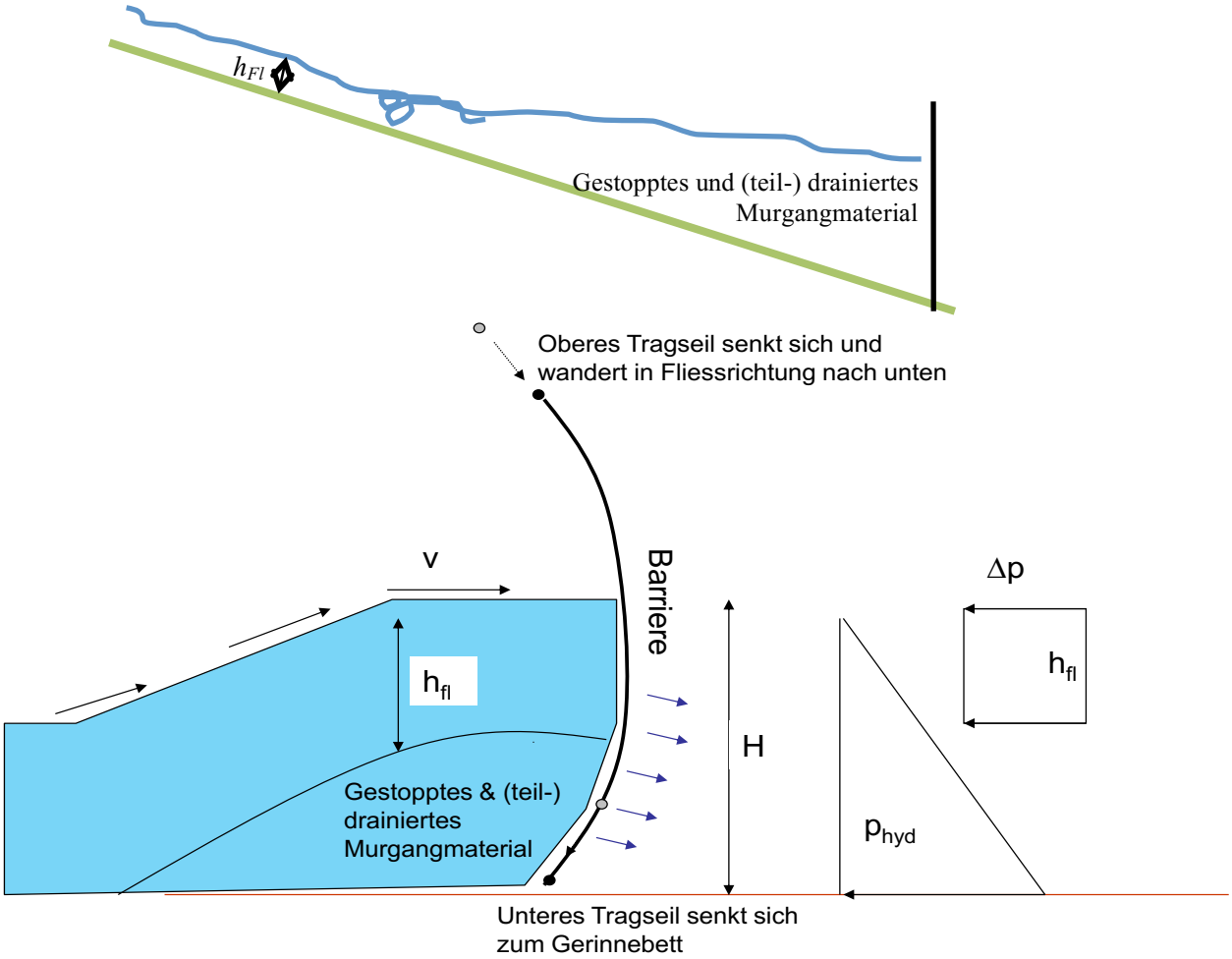


Abb. 4. Tatsächlicher Auffüllvorgang (oben) und zeitlich diskretisierter Auffüllprozess im Modell inkl. zu erwartender Deformationen der Barriere (unten).

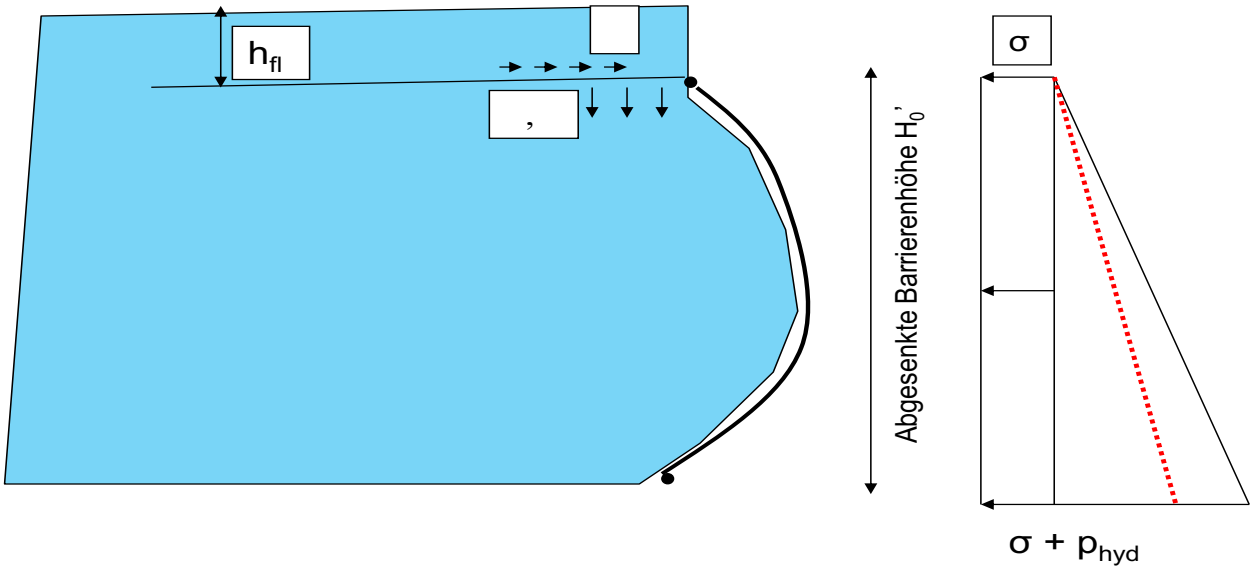


Abb. 5. Lastsituation während des Überströmens einer Barriere, welche infolge Verfüllung nur noch eine gegenüber ihrer Anfangshöhe reduzierte Restnutzhöhe aufweist.

3.2 Bestimmung der relevanten Lasten

Die wirkenden hydrostatischen (p_{stat}) und hydrodynamischen (p_{dyn}) Drücke in [N/m^2] werden als über die Gerinnebreite gleichmässig verteilt angenommen (Eignung dieses Modells in WENDELER (2008) für typische Gerinne nachgewiesen, im Einzelfall noch auf Grund der Gerinnegeometrie zu prüfen) und berechnen sich nach

$$p_{dyn} = \alpha \rho v^2 \text{ und } p_{stat} = KH\rho g \quad (1)$$

mit v = Anprallgeschwindigkeit
H = aktuelle Einstauhöhe
ρ = Murgangdichte = 1600–2200 kg/m^3
α = Druckkoeffizient = 2.0 (0.7–1.0 für ρ < 1900 kg/m^3)
K = Erddruckbeiwert = 1.0
g = Gravitationskonstante = 9.81 m/s^2

Im Falle des Überströmens wirkt auf die Oberseite der verfüllten Barriere eine zusätzliche Schlepp-/ Scherspannung, welche ebenfalls von der Barriere abgetragen werden muss:

$$\tau = h_{Fl} \rho g \tan \varphi \quad (2)$$

mit h_{Fl} = Fliesshöhe
φ = Reibungswinkel des Murgangmaterials

Entscheidend für die Berechnung der Anpralldrücke ist in diesem Fall die Wahl des Druckkoeffizienten α. Wie in EGLI (2003) gezeigt, kann dieser für den Anprall einer granularen Murgangfront zu 2.0 angenommen werden. Dieser Wert berücksichtigt zugleich auch entsprechend höhere Drücke, welche beim Anprall von Einzelblöcken auftreten können. Handelt es sich bei dem Murgang jedoch um ein eher flüssiges Ereignis (Murgangdichte ρ < 1900 kg/m^3), so kann gemäss WENDELER (2008) der Druckkoeffizient auf bis zu 0.7 herabgesetzt werden. Der Anprall von eventuell mitgeführten Einzelblöcken muss dann jedoch separat berücksichtigt werden. Die Grösse der Einzelblöcke kann u.a. anhand der erwarteten Fliesshöhe abgeschätzt werden.

Des weiteren gilt:

- Für den hydrodynamischen Druck muss der maximale Wert für wässrige/schnellere und granulare/langsamere Murgänge ermittelt werden. Mehrere Beispiele hierfür finden sich in Anhang B, Tab. 4 und Anhang C Tab. 5 und 6.
- Der dynamische Druck wirkt jeweils über die Fliesshöhe h_{Fl}, welche während des Füllvorgangs als konstant angenommen wird; eine mögliche Reduktion infolge einer bei zunehmender Stauhöhe grösser werdenden Gerinnebreite wird somit auf der sicheren Seite liegend nicht berücksichtigt (Beispiel siehe Anhang A, Tab. 1). Geht man alternativ von einem konstanten relevanten Durchflussvolumen aus, so kann die Fliesshöhe bei einem z.B. trapezförmigen Gerinne während des Auffüllvorgangs variieren (Beispiel siehe Anhang A, Tab. 2).
- In Folge des Verformungsvermögens einer flexiblen Barriere muss davon ausgegangen werden, dass sich die anfängliche Höhe der Barriere infolge der Längung der Tragseilbremsen reduziert. Die wirkenden hydrostatischen Drücke können darum entsprechend reduziert werden. Bei einem trapezförmigen Gerinnequerschnitt ergibt sich damit automatisch auch eine kleinere Einwirkungsfläche.
- Die einwirkenden Drücke werden je nach geltendem Sicherheitskonzept mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren beaufschlagt, wie z.B. vorgeschlagen in Abb. 7 bzw. WENDELER (2008) oder EGLI (2003).
- Die Standfestigkeit der Barriere muss auch für den Anprall von grösseren Einzelblöcken (Durchmesser bei Gerinneanalyse bestimmen) nachgewiesen werden. Wurde der dynamische Druckbeiwert mit 2.0 angesetzt, so entfällt der Nachweis für den Anprall von grossen Einzelblöcken.

Visualisiert man den zeitlich diskretisierten Auffüllvorgang gemäss Abb. 6a–d, so erkennt man die in Abb. 6e abgebildeten relevanten Eckwerte für die wirkenden Drücke. Eine tabellarische Darstellung der Druckeinwirkung könnte damit wie in Anhang A dargestellt aussehen.

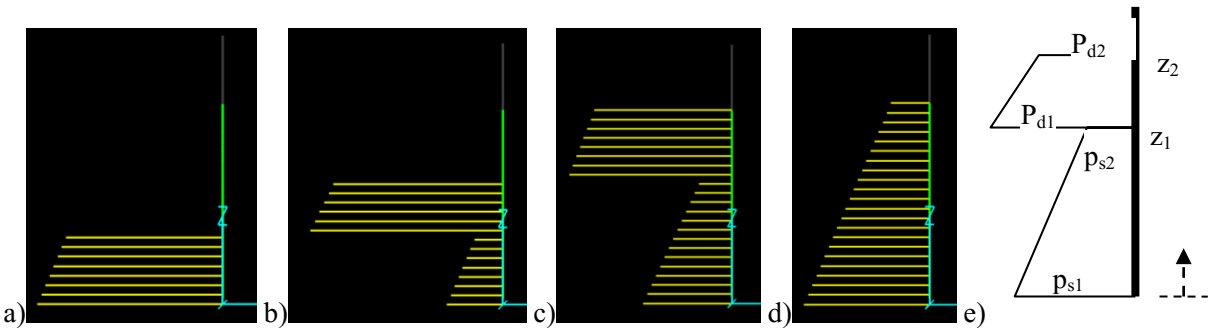


Abb. 6. a) Druckverteilung in Fliessrichtung beim Erstanprall, b) und c) stufenweiser Auffüllvorgang, d) Lastfall Überströmen, e) Abstraktion der relevanten Druckwerte $p_{s/d\ 1/2}$ und Einwirkungshöhen $z_{1/2}$.

4 Nachweis der Tragfähigkeit

Essentiell für den Einsatz einer flexiblen Murgangbarriere ist eine ausreichend garantierbare Standfestigkeit und Gebrauchstauglichkeit dieser. Bemessungsrichtlinien für Murgangbarrieren gibt es jedoch bislang in der Schweiz lediglich für starre Bauwerke. Dieses Kapitel bietet darum eine Grundlage, wie flexible Barrieren gegen Murgänge ausreichend nachgewiesen werden können. Dies garantiert eine spätere zuverlässige Funktion.

Der Nachweis der strukturellen Tragfähigkeit einer flexiblen Murgangbarriere erfolgt über eine Kombination aus Feldexperimenten, Simulationen und analytischer Rechnung. Grund für die kombinierte Vorgehensweise ist die Tatsache, dass es momentan nahezu unmöglich ist, eine Barriere exakt auf ihre Bemessungslasten durch ein natürliches Murgangereignis zu belasten. Der Nachweis der Tragfähigkeit einer Murgangbarriere setzt sich darum aus den nachfolgenden Elementen 4.1 bis 4.3 zusammen:

- Ein Prototyp eines Murgangbarrieremodells wird nach 4.2 oder 4.3 bemessen.
- Über 4.1 wird dann die entsprechende Funktion im Versuch nachgewiesen. Dabei müssen alle Komponenten den Typen entsprechen, welche nachher angewendet werden.
- Die Resultate der experimentellen Belastung werden detailliert mit denjenigen verglichen, welche gemäss der Bemessung zu erwarten waren. Hierzu müssen entsprechende Messdaten (Ankerlasten, Füllstand) und Videoaufzeichnungen vorliegen.
- Weitere Barrieren mit ähnlichem strukturellem Aufbau können dann zukünftig nach der vorher angewandten Methode 4.2 oder 4.3 bemessen werden. Alle eingesetzten Modelle müssen an Feldversuchen kalibriert und validiert worden sein.

4.1 Nachweis der prinzipiellen Funktionsweise über 1:1 Verfüllung/Belastung

In einem 1:1 Feldversuch durch entweder künstliche oder natürliche Auslösung eines Murgangs wird eine Barriere mit einem prinzipiell ähnlichen konstruktiven Aufbau wie die nachzuweisende Barriere belastet. Der Füllvorgang muss durch Videoaufzeichnungen dokumentiert sein. Die folgenden Elemente müssen nachgewiesen werden.

4.1.1 Struktur der Barriere

Sämtliche Komponenten der Barriere müssen eindeutig identifizierbar dokumentiert sein. Die Zusammensetzung der Komponenten muss gemäss der zugrunde liegenden Pläne erfolgen und nach Erstellung dokumentiert und nachgewiesen werden. Das zu erwartende Verhalten der Barriere und aller einzelnen Komponenten unter Lasteinfluss muss vorgängig beschrieben werden hinsichtlich der erwarteten Ankerlasten, Verformungen in der Höhe und Fliessrichtung sowie etwaige Bremsenlängungen.

4.1.2 Einwirkung

Das auf die Barriere treffende künstliche oder natürliche Murgangereignis muss hinsichtlich seiner rheologischen Eigenschaften beschrieben werden können und eine Murgangähnliche Rheologie aufweisen. Die Beschreibung hat hierbei durch entsprechende Messungen belegt zu werden. Zu den relevanten Eigenschaften gehören die Fliesshöhe, die Frontgeschwindigkeit und Gerinnequerschnitt (alternativ Gerinnequerschnitt und Abflussvolumen) sowie die Dichte des Murgangmaterials.

4.1.3 Murgang-Barrieren-Interaktion

Die Murgangeinwirkung muss so gross sein, dass die Barriere voll verfüllt wird. Die Belastungen auf die Verankerungen sollten direkt gemessen oder anhand etwaiger angeschlossener Bremselemente eindeutig hergeleitet werden können. Die Verformungen der Barriere in der Höhe und in Fliessrichtung sowie etwaige Bremsenlängen müssen erfasst und mit den ursprünglichen Bemessungsansätzen verglichen werden. Allfällige Schäden müssen dokumentiert werden. Anzugeben sind weiterhin effektiver Füllungsgrad bzw. Überströmsituation, Absenkung/Restnutzhöhe, Belastungsgrad in Bezug auf Dimensionierung bzw. vorhandene strukturelle Reserven.

4.2 Bemessung/Nachweis mittels Simulationen

Das eingesetzte Simulationsprogramm muss in der Lage sein, sämtliche Barrierenkomponenten und die komplette zusammengesetzte Barriere dynamisch zu berechnen. Die Belastung kann hierfür entweder über einwirkende und über die Zeit variierende Kräfte auf die Netzfläche eingegeben werden oder aber eine Fluid-Struktur-Interaktion ermöglicht die direkte Berechnung des Aufpralls von Murgangmaterial auf die Barriere. Für die eingesetzte Software muss eine vollständige Kalibrierung bzw. Validierung mit 1:1 Feld-/Versuchsdaten in Bezug auf die Struktur- und die Murgangsimulation vorliegen. Die Resultate der Simulation liefern die zu erwartenden Verankerungskräfte, die Verformungen der Barriere über die Höhe und in Fliessrichtung, die Verformungen etwaiger Bremselemente sowie Angaben über die Auslastung der einzelnen Barrierenkomponenten.

4.3 Analytischer Nachweis

Anhand geeigneter Ansätze lassen sich die Barrierenkomponenten auch analytisch bemessen. Umrechnungen von Murgang- in Steinschlagenergien o.ä. sind nicht zu lässig. Ausgangsbasis für den hier verlangten analystischen Nachweis sind die wirkenden Drücke auf das Netz. Letzteres leitet die Last auf die Tragseile weiter. Nachzuweisen sind hierfür dann z.B. Tragfähigkeit des Netzes und die maximal in den Seilen wirkende Kräfte. Die maximale Last im Netz bestimmt sich dabei aus dem maximalen Abstand zwischen zwei Tragseilen. Die Belastung auf die Seile kann als gleichverteilt angenommen werden. Eine hierfür geeignete Seildifferentialgleichung wird dann iterativ gelöst, bis die berechneten Seilkräfte mit den für diese Kräfte zu erwartenden Seil- und Bremsenlängungen übereinstimmen.

5 Weitere Nachweise

Neben dem strukturellen Nachweis müssen für eine Barriere auch noch die in diesem Abschnitt angeführten Nachweise erbracht werden.

5.1 Installierbarkeit der Konstruktion

Die technische Dokumentation zur Barriere muss alle Angaben enthalten, welche zur erfolgreichen und korrekten Installation/Montage der Barriere notwendig sind. Dazu gehören

- Identifizierung/Kennzeichnung der Barrierenkomponenten
- Platzierung der Barriere im Gerinne nach Lage, Ausrichtung, Basalöffnung (siehe 5.6), etc.
- Platzierung und Ausrichtung der Verankerung
- Erwartete Ankerlasten (notwendig zur Bemessung der Anker)
- Montageablauf/Installationsanleitung
- Wartungsplan (siehe 5.7)

5.2 Rückhaltefähigkeit

Die Maschengrössen des Schutznetzes sollten die Kornfraktion d_{90} (90% des Murgangmaterials sind kleiner als) nicht überschreiten. Andernfalls muss ein entsprechend kleinmaschigeres Sekundärgeflecht gerinneaufwärts auf das Primärgeflecht montiert werden.

5.3 Rückhaltevolumen

Das mit einer Barriere erreichte maximale Rückhaltevolumen muss berechnet und angegeben werden. Die entsprechende Berechnung berücksichtigt die aktuelle Gerinnetopographie, zu erwartende Setzungen der Barriere im verfüllten Zustand sowie den Ablagerungswinkel des rückgestauten Murgangmaterials.

5.4 Abrasionsschutz

Die Dauerhaftigkeit eines Abrasionschutzes lässt sich bei einem einzelnen Murgangereignis in der Regel nicht beurteilen. Für die Standzeit der Barriere müssen darum anderweitige Resultate von Dauerhaftigkeitsversuchen vorliegen. Alternativ kann ein Barrierenbausatz auch entsprechend viele Ersatzabrasionschutzeinheiten und einen entsprechenden Inspektionsplan der Barriere beinhalten.

5.5 Korrosionsschutz

Ein Korrosionsschutz der Barrierenkomponenten muss für die Standzeit der Barriere ausreichend bemessen sein und nachgewiesen werden (siehe z.B. EOTA 2012). Im Falle des Abrasionschutzes muss davon ausgegangen werden, dass dieser seine Korrosionschutzbeschichtung im Falle von Überströmen verlieren würde. Aus diesem Grund muss dessen Bemessung ausreichend Materialstärke vorhalten.

5.6 Verhalten bei Hochwasser, Wildholz- oder Geschiebetransport

Für den Fall von Hochwasserereignissen oder Geschiebetransport, welche die Barriere nicht verfüllen sollen, muss die ausreichende Grösse der basalen Öffnung in Relation zu erwarteten Ereignisgrössen und -zusammensetzungen (z.B. Schwemmholz) nachgewiesen werden.

5.7 Wartung/Unterhalt

Entsprechend der Ereignishäufigkeit im Gerinne der installierten Barriere, muss diese regelmässig inspiziert werden. Die technische Dokumentation bietet hierfür eine entsprechende Checkliste sowie Grenzwerte, anhand derer entschieden werden kann, ob Instandsetzungsmassnahmen getroffen werden müssen. Diese gelten auch für teilweise aktivierte Bremselemente oder reduzierten Basisdurchlassquerschnitt infolge Sedimentablagerungen. Der Wartungsplan enthält auch Angaben für einen Benachrichtigungs- und Massnahmenplan im Ereignisfall.

6 Sicherheitsfaktoren / Risikokonzept

Die aufzubringenden Lasten müssen nach geltenden Normen mit einem entsprechenden Sicherheitsfaktor multipliziert werden (z.B. gemäss Abb. 7, WENDELER [2008] oder EGLI [2003]). Dies kann bei der Berechnung der massgebenden Murdrücke erfolgen.

Wiederkehrperiode / Gefahrenklasse	1 - 30 Jahre	30 - 100 Jahre	Über 100 Jahre
1	1.0	1.0	1.0
2	1.3	1.3	1.2
3	1.5	1.3	1.2

Abb. 7. Vorschlag für Sicherheitsbeiwerte für Murlasten nach WENDELER (2008).

7 Referenzen

BRIGHENTI, R.; SEGALINI, A.; FERRERO, A.M., 2013: Debris flow hazard mitigation: A simplified analytical model for the design of flexible barriers. Comput. Geotech. 54; 1–15.

CANELLI, L.; FERRERO, A.M.; MIGLIAZZA, M.; SEGALINI, A., 2012: Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers – experimental tests and impact analysis. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12: 1693–1699.

EGLI, TH., 2003: Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren, VKF, Bern.

EOTA, 2008, 2012: ETAG 027 – Leitlinie für die Europäische technische Zulassung für Bausätze für Steinschlagschutznetze, European Organization for Technical Approvals, Brüssel, 32 S.

GERBER, W., 2001, 2006: Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern; Eidg Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 39 + 6 S.

HÜRLIMANN, M.; RICKENMANN, D.; MEDINA, V.; BATEMAN, A., 2008: Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. Eng. Geol. 102: 152–163.

KWAN, J.S.H.; CHEUNG, R.W.M., 2012: Suggestions on Design Approaches for Flexible Debris-resisting Barriers, incl. Appendix C Comments and responses, Discussion Note DN 1/2012, GEO, Hong Kong.

MONNEY, J.; HERZOG, B.; WENGER, C.; ROTH, A., 2007: Einsatz von multiplen Stahlnetzbarrieren als Murgangrückhalt. Wasser Energ. Luft 99, 3: 255–259.

VON BOETTICHER, A.; HÜBL J.; WENDELER, C.; VOLKWEIN, A., 2011a: Modeling the impact of shallow landslides on flexible protection barriers. In: MARSCHALLINGER, R.; ZOBL, F. (eds) Mathematical geosciences at the crossroads of theory and practice. Proceedings of the IAMG2011 conference, 5–9 September 2011, Salzburg, Austria. IAMG. 659–670.

VON BOETTICHER, A.; VOLKWEIN, A.; WÜCHNER, R.; BLETZINGER, K.-U.; WENDELER, C., 2011b: Numerical modeling of shallow landslide impacts on flexible protection systems and its validation with full scale testing. In: PAPADRAKAKIS, M.; OÑATE, E.; SCHREFLER, B. (eds) Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering IV: Proceedings of the IV International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering held in Kos, Greece, 20–22 June 2011. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). 12 S.

WENDELER, C., 2008: Murgangrückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren, Diss. ETH Nr. 17916.

WENDELER, C.; VOLKWEIN, A.; ROTH, A.; HERZOG, B.; HÄHLEN, N.; WENGER, M.; 2008: Hazard prevention using flexible multi-level debris flow barriers. In: MIKOS, M.; HUEBL, J.; KOBOLTSCHNIG, G. (eds) Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren, Massenbewegungen und Lawinen. Interpraevent 26–30 May 2008, Dornbirn, Vorarlberg, Austria. Conference Proceedings. 1: 547–554.

Anhang A Beispiele zur Lastermittlung

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein mögliches Schema zur Bemessung von Murgangbarrieren nach WENDELER (2008). In den beiden anschliessenden Tabellen werden die wirkenden Drücke für zwei verschiedene Situationen exemplarisch ermittelt.

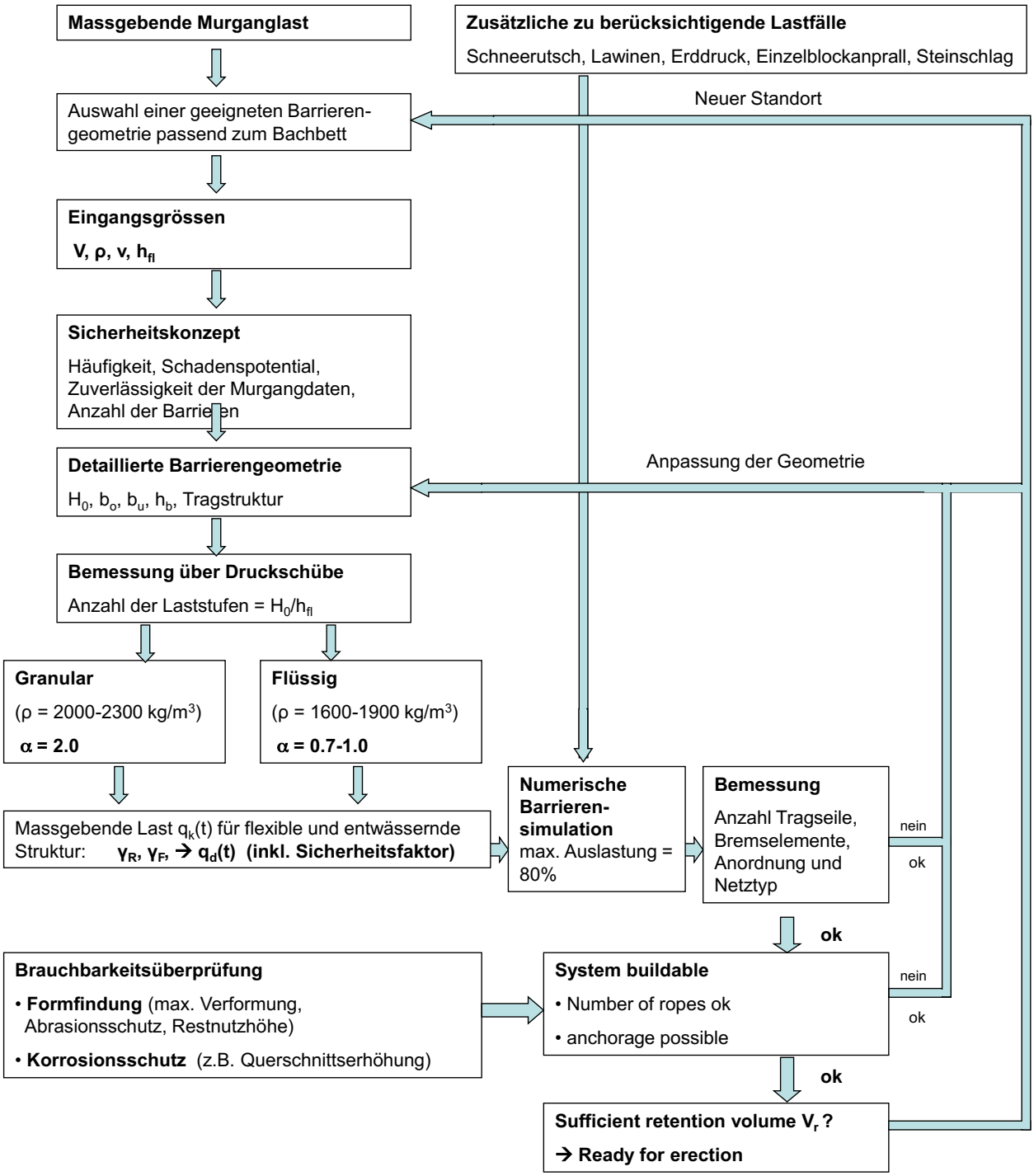
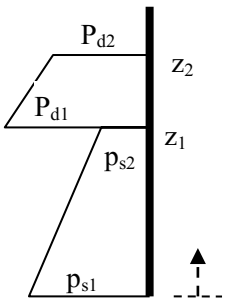


Abb. 8. Ablaufschema für Bemessung und Nachweis einer flexiblen Murgangbarriere.

Tab. 1. Beispiel für tabellarische Bestimmung der einwirkenden Drucklasten bei konstanter Fliesshöhe. Infolge einer angenommenen Barrierenabsenkung auf 75% der ursprünglichen Barrierenhöhe reduziert sich die Einwirkungsfläche entsprechend (direkte Berücksichtigung mit «0.75*0.75» bei Druckwertberechnung)

Fliessgeschwindigkeit	V = 5.8 m/s
Murgangdichte	ρ = 2200 kg/m^3
Fliesshöhe	h_{Fl} = 1.0 m
Durchschnittlicher Anpralldruck der Murgangfront	p = 160 kN/m^2
Barrierenhöhe	H = 6 m

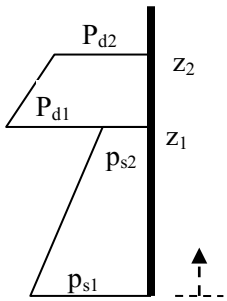


Laststufe / Druckwert	1	2	3	4	5	6	Over-flow	
p_{d2}	149	149	149	149	149	149	22	kN/m^2
P_{d1}	171	171	171	171	171	171	151	kN/m^2
P_{s2}	--	22	22	22	22	22	--	kN/m^2
P_{s1}	--	43	65	86	108	130	--	kN/m^2
z_2	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	6.0	m
z_1	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	0.0	m

Tab. 2. Beispiel für tabellarische Bestimmung der einwirkenden Drucklasten bei konstantem Durchflussvolumen.

Eckdaten

Durchfluss	200	m^3/s
Breite unten	5.6	M
Breite oben	36.7	M
Höhe oben	13.5	M
Murgangdichte	2.2	to/m^3
Fliessgeschwindigkeit	7	m/s
Fliessquerschnittsfläche	29	m^2
Druckbeiwert	2	(Dichte < 1900 kg/m^3 → 0.7, sonst 2.0)
Dynamischer Druck	216	kN/m^2
Sicherheitsbeiwert	1.3	



Lastniveau	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**= Over-flow**
z_1	0	1.4	2.7	4.1	5.4	6.8	8.1	9.5	10.8	12.2	13.5	m
Relevante Breite z1	5.6	8.7	11.8	14.9	18.0	21.2	24.3	27.4	30.5	33.6	36.7	m
Fliesshöhe	3.1	2.5	2.0	1.7	1.4	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	m
z_2 = z1 + h_fl	3.1	3.8	4.7	5.7	6.8	8.0	9.2	10.5	11.7	13.0	14.3	m
Relevante Breite z2	12.8	14.4	16.5	18.8	21.4	24.1	26.8	29.7	32.6	35.5	36.7	m
p_{d2}		280	280	280	280	280	280	280	280	280		kN/m^2
p_{d1}		350	337	328	321	316	312	308	306	303		kN/m^2
p_{s2}	280	69	57	47	41	35	31	28	25	23	21	kN/m^2
p_{s1}	452	107	132	161	192	225	259	293	328	364	400	kN/m^2

Anhang B Beispiele für analytische Nachweise

Die Lasten auf die Tragseile und das Netz lassen sich auch analytisch ermitteln (WENDELER 2008). Hierfür müssen die wirkenden Drücke entsprechend umgelegt werden. Abb. 9 zeigt hierfür ein Beispiel im Falle von vier gleichmässig über die Barrierenhöhe verteilten Tragseilen. In Tab. 3 ist exemplarisch die Lösung der Seildifferentialgleichung eines mit einer Gleichlast q belasteten Seiles zu sehen. Die Seilkraft wird hierbei iterativ auf Basis der Seil-/Bremsenlängung bestimmt. Tab. 4 zeigt eine mögliche Bestimmung der Last, welche auf einen Netzstreifen innerhalb der Barriere wirkt. Darüber kann anschliessende die Stärke des Netzes nachgewiesen werden.

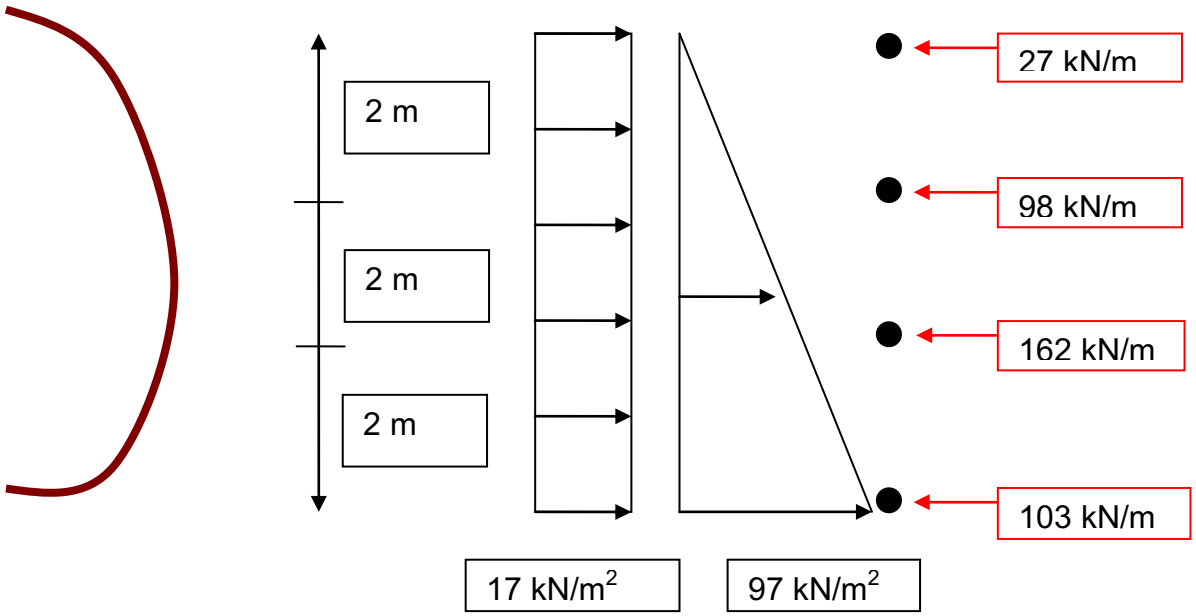


Abb. 9. Ermittlung der Gleichlast für die Tragseile: Verteilung des hydrodynamischen und -statischen Drucks der voll verfüllten Barriere auf 4 gleichmässig verteilte Tragseile.

Tab. 3. Iterative Ermittlung der Seilkraft mit Hilfe der Differentialgleichung für gleichmässig belastete Seile. Die Längung der Bremselemente wird so lange angepasst, bis die berechnete Verlängerung der Brems-Seil-Kombination einen vergleichbaren Wert ergibt. Anschliessend muss überprüft werden, ob die sich gemäss Bremsenlängungscharakteristik ergebende Bremsenlängung mit der errechneten übereinstimmt.

Gleichlast q	27000	[N/m]
Länge l	10	[m]
Durchhang f	0.5	[m] = 1/30-1/50 L
Ausgangslänge Seil So	10.07	[m]
Bremsenlängung brges	3.70	[m]
s1	13.77	
H_1	89800	
H_neu	89650	
H^3+b*H^2-c	$H^3 + H^2 \cdot EA \cdot \left[1 - \frac{1}{s_0} \cdot l\right] = \frac{EA \cdot q^2 \cdot l^3}{24 \cdot s_0}$	
E_Modul	1.28E+11	[N/m^2]
Querschnittsfläche A Seil	7.68E-04	[m^2]
EA	9.83E+07	[N]
Faktor b	26897168	

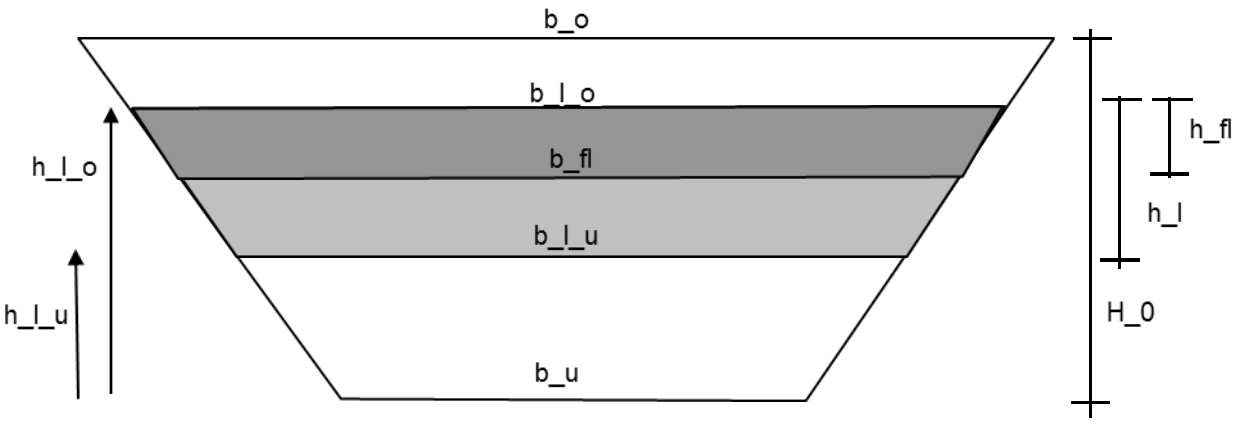
Faktor c	2.16898E+17	
Hneu+1	89650	[N]
	89650	
Fseil	**162056**	[N]
Verlängerung	**3.76**	

Tab. 4. Beispiel zur Ermittlung der maximalen Last auf einen Netzstreifen.

Analytischer Netznachweis für Murgangbarrieren – Berechnung der maximalen Einwirkung

System		Granular	
Murgangdichte	rho	2.2	to/m^3
Fliessgeschwindigkeit	v	7	m/s
Fliesshöhe	h_fl	0.7	m
Barrierenhöhe	H_0	13.5	m
Barrierenbreite oben	b_o	36.7	m
Barrierenbreite unten	b_u	5.6	m
Höhenkote oben Lasteinwirkung*	h_l_o	13.5	m
Höhenkote unten Lasteinwirkung	h_l_u	0.0	m
Relevante Barrierenbreite oben**	b_l_o	36.7	m
Relevante Barrierenbreite Beginn Fliesshöhe	b_fl	36.7	m
Relevante Barrierenbreite unten	b_l_u	5.6	m
Laststreifenhöhe	h_l	13.5	m
Statischer Druck unterer Laststreifenrand	p_u	291	kN/m^2
Dynamischer Druck	p_dyn	216	kN/m^2
Einwirkung stat	P_stat	11033	kN
Einwirkung dyn	P_dyn	5609	kN
Summe Einwirkung	**P_stop**	**16642**	**kN**

*Keine Setzung der Barriere erwartet, da ohne Bremsen und Tragseile hängend montiert



Anhang C Einsatzbeispiele flexibler Murgangbarrieren

Beispiel Grönbach / Merligen

Im Zuge von geplanten Hochwasserschutzmassnahmen wurde der Grönbach bei Merligen (BE) auch mit einem Schutzsystem gegen Murgänge zur Vermeidung von Schäden im Siedlungsgebiet und Verklausungen ausgestattet. Hierfür entsteht oberhalb des geplanten Schutzsystems ein Retentionsraum für Geschiebe und Schwemmholz mit einem Gesamtvolumen von ca. 12 000 m^3. Dieser wird an seinem unteren Ende durch eine nachfolgend beschriebene und in Abb. 100 gezeigte Murgangsperre abgeschlossen, welche die mitgeführten Feststoffe zurückhalten, normalen (Hoch-) Wasserabfluss und kleinere Partikel jedoch passieren lassen soll.

Die geplante Massnahme sieht vor, dass am unteren Ende des Retentionsraums mehrere Leitwände aus Beton parallel zur Fliessrichtung angeordnet und deren Zwischenräume mit Schutznetzen verbunden werden. Ein Teil der geplanten Murgangsperre muss als Strasse passierbar bleiben und wird darum nicht mit einem Netz, sondern mit einem Tor verschlossen.

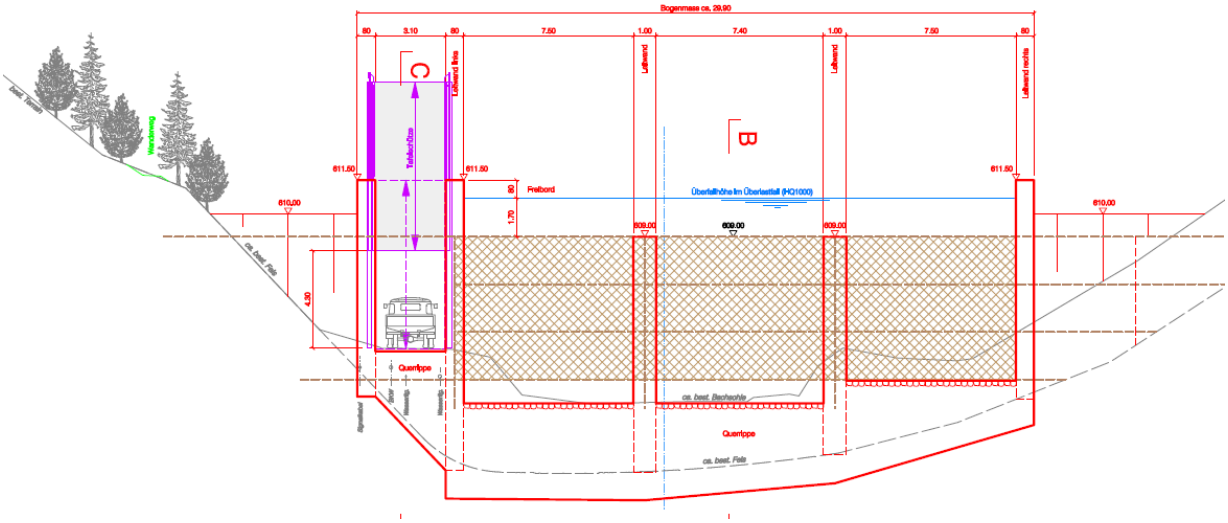


Abb. 10. Installierte Murgangbarriere im Grönbach bei Merligen.

Da sich im Bachbett einzelne Kanäle mit seitlichen Ablagerungen (Loben) bilden können, würde dadurch auch eine Murgangfront auf eine minimale Breite konzentriert und nicht über die ganze Verbauung gleichmässig verteilt auf die Barriere treffen. Die Murfront darf darum nicht als gleichmässig verteilt über sämtliche Barrierensegmente angenommen werden. Dies ergibt in erster Linie eine höhere Fliesshöhe und -geschwindigkeit. Auf welche minimale Breite der Erstanprall gerechnet werden muss, wird der allgemeinen Beurteilung der Murgangsituation entnommen. Im Extremfall würde es bedeuten, dass die gesamte Murgangfront als auf nur einen einzelnen Barrierenabschnitt auftreffend angenommen wird.

Erst im späteren Auffüllprozess ist es möglich, die Fliesshöhen zu reduzieren, wenn die erreichte Füllhöhe die ursprüngliche Kanaltiefe übersteigt und der Murgang die Barriere auf die volle Breite gleichmässig füllt. Sollte die allgemeine Murganganalyse jedoch eine über die Barrierenbreite ungleichmässige Füllung ergeben, könnte die angenommene Einwirkungsbreite kleiner als die volle Barrierenbreite sein und einen einzelnen Barrierenabschnitt als Reserve haben.

Die Bemessung der Leitwände muss so erfolgen, dass sie die Lasten auch dann abtragen können, wenn sie nur einseitig belastet werden.

Beispiel Hüpbach

Die hier gezeigte Barriere ist ein Beispiel für eine Umsetzung des in diesem Bericht vorgestellten Dimensionierungskonzepts für sehr grosse Abmessungen. Das System ist am oberen Rand beinahe 40 m breit. Die Höhe beträgt maximal 19.2 m an den Rändern bzw. 13.5 m in der Mitte (einstaurelevant). 0 zeigt die hierfür ermittelten Lasten für granulare und flüssigere Murgänge. Die Barriere wurde so bemessen, dass die Tragseile schon von vornherein einen «idealen» Durchhang aufweisen (siehe Abb. 11).

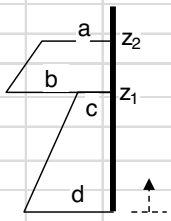


Abb. 11. Installierte Murgangbarriere im Hüpbach.

Tab. 5. Einwirkungen (oben) granularer Murgang (=massgebend) und (unten) Mudflow im Hüpbach.

Granular debris flow

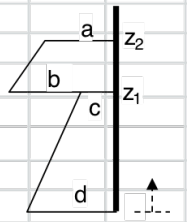
Eckdaten												
Durchfluss	200	m^3/s										
Breite unten	5.6	m										
Breite oben	36.7	m										
Höhe oben	13.5	m										
Murgangdichte	2.2	to/m^3										
Fliessgeschwindigkeit	7	m/s										
Fliessquerschnittsfläche	29	m^2										
Druckbeiwert c_d	2	(Dichte<1900 --> 0.7, sonst 2.0)										
Dynamischer Druck p_dyn = c_d*rho*v^2	216	kN/m^2										
Sicherheitsbeiwert	1.3											



Lastniveau	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**= Overflov**
z_1	0	1.4	2.7	4.1	5.4	6.8	8.1	9.5	10.8	12.2	13.5	m
Relevante Breite z1	5.6	8.7	11.8	14.9	18.0	21.2	24.3	27.4	30.5	33.6	36.7	m
Fliesshöhe	3.1	2.5	2.0	1.7	1.4	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	m
$z_2 = z1 + h_fl$	3.1	3.8	4.7	5.7	6.8	8.0	9.2	10.5	11.7	13.0	14.3	m
Relevante Breite z2	12.8	14.4	16.5	18.8	21.4	24.1	26.8	29.7	32.6	35.5	36.7	m
a		280	280	280	280	280	280	280	280	280		kN/m^2
b		350	337	328	321	316	312	308	306	303		kN/m^2
c	280	69	57	47	41	35	31	28	25	23	21	kN/m^2
d	452	107	132	161	192	225	259	293	328	364	400	kN/m^2

Mudflow

Eckdaten												
Durchfluss	200	m^3/s										
Breite unten	5.6	m										
Breite oben	36.7	m										
Höhe oben	13.5	m										
Murgangdichte	1.8	to/m^3										
Fliessgeschwindigkeit	10	m/s										
Fliessquerschnittsfläche	20	m^2										
Druckbeiwert c_d	0.7	(Dichte<1900 --> 0.7, sonst 2.0)										
Dynamischer Druck p_dyn = c_d*rho*v^2	126	kN/m^2										
Sicherheitsbeiwert	1.3											



Lastniveau	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**= Overflov**
z_1	0	1.35	2.7	4.05	5.4	6.75	8.1	9.45	10.8	12.15	13.5	m
Relevante Breite z1	5.6	8.7	11.8	14.9	18.0	21.2	24.3	27.4	30.5	33.6	36.7	m
Fliesshöhe	2.4	1.8	1.5	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	m
z_2 = z1 + h_fl	2.4	3.2	4.2	5.3	6.4	7.7	8.9	10.2	11.4	12.7	14.0	m
a		164	164	164	164	164	164	164	164	164		kN/m^2
b		206	198	192	188	184	182	180	179	177		kN/m^2
c	164	42	34	28	24	21	18	16	15	13	12	kN/m^2
d	268	73	96	121	148	176	204	233	263	292	322	kN/m^2

Beispiel Hasliberg

Dieses Beispiel zeigt eine Installation von mehreren Barrieren in Reihe, um so ein grösseres Rückhaltevolumen von total 12 000 m^3 zu erhalten (siehe auch WENDELER *et al.* 2008; MONNEY *et al.* 2007).



Abb. 12. Installierte Serie von Murgangverbauungen am Milibach, Hasliberg (BE).

Beispiel Merdenson

Die flexiblen Barrieren können auch zur Stabilisierung einer Bachsohle als Alternative zu Beton, Blockwurf oder Holzstufen eingesetzt werden. In Abb. 13 wird eine Betonschwelle zwischen der obersten Barriere und der Betonwand im Hintergrund eingestaut. Die Betonschwelle war ursprünglich als Kolkschutz für die Betonwand gedacht, wurde jedoch so stark erodiert, dass sie die Schutzfunktion nicht mehr wahrnehmen konnte. Die dreistufige Netzverbauung wurde 3 Monate nach Erstellung im November 2008 durch einen natürlichen Murgang verfüllt.



Abb. 13. Installierte Murgangbarrieren zur Sohlestabilisierung bei Merdenson.

Beispiel Illgraben

Mit Hilfe der abgebildeten zwei Barrieren wurden die Murgänge im Illgraben wieder in ihr ursprüngliches Bachbett zurückgeleitet. In einer ersten Massnahme wurde die untere Barriere erstellt, um so eine erste Einstauhöhe zu erreichen. Die nach dem nächsten Murgangereignis erstellte obere Barriere konnte dann das Gerinnebett am Gerinnerand soweit anheben, dass die Murgänge seitdem wieder über die urspüngliche Betonschwelle fliessen.



Abb. 14. Kontrollierte Rückleitung der Murgänge im Illgraben in das ursprüngliche Bachbett.

Verzeichnis der Schriftenreihe WSL Berichte

Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen
Rickenmann, D., 2014
WSL Ber. 9: 105 S.

Flexible Murgangbarrieren – Bemessung und Verwendung
Volkwein, A., 2014
WSL Ber. 8: 31 S.

Zukunftsbilder für die Landschaft in vier periurbanen Regionen der Schweiz.
Tobias, S., 2014
WSL Ber. 7: 69 S.

Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. Forum für Wissen 2013
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (Hrsg.) 2013.
WSL Ber. 6: 116 S.

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2011/12
Techel, F.; Pielmeier, C.; Darms, G.; Teich, M.; Margreth, S., 2013
WSL Ber. 5: 118 S.

Situazione fitosanitaria dei boschi 2012
Meier, F.; Engesser, R.; Forster, B.; Odermatt, O.; Angst, A., 2013
WSL Ber. 4: 28 S.

Protection des forêts - Vue d'ensemble 2012
Meier, F.; Engesser, R.; Forster, B.; Odermatt, O.; Angst, A., 2013
WSL Ber. 3: 28 S.

Forstschutz-Überblick 2012
Meier, F.; Engesser, R.; Forster, B.; Odermatt, O.; Angst, A., 2013
WSL Ber. 2: 28 S.

Hochwasserschutz in der Stadt Zürich: Eine empirische Studie zur Riskokommunikation
Maidl, E.; Buchecker, M., 2013
WSL Ber. 1: 88 S.

Alle WSL Berichte sind als Download auf www.wsl.ch/berichte verfügbar.

ISSN 2296-3456