Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 104 (2012)

Heft: 1

Artikel: Erodierbarer Damm am Hagneckkanal : eine Möglichkeit zur Kontrolle des Überlastfalls

Autor: Höck, Esther / Schmocker, Lukas / Mayor, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941870

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 25.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Erodierbarer Damm am Hagneckkanal – Eine Möglichkeit zur Kontrolle des Überlastfalls

Esther Höck, Lukas Schmocker, Pierre Mayor, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Die Dammstrecke am Hagneckkanal soll saniert werden. Zusätzlich zur Ertüchtigung und Erhöhung der Dämme soll künftig auch der Überlastfall bewältigt werden können. Um eine kontrollierte Entlastung zu gewährleisten, ist auf einer Länge von rund 300 m ein Streichwehr mit einem aufgesetzten erodierbaren Damm geplant. Da die Erfahrungen mit erodierbaren Dämmen bislang beschränkt sind, wurden der Aufbau und das Erosionsverhalten des Dammes an der Versuchsanstalt für Wasserbau sowie dem Institut für Geotechnik der ETH Zürich untersucht. Der Artikel zeigt einerseits die Problematik und den Stand des Wissens auf, beschreibt anschliessend die Versuchsresultate für zwei untersuchte Dammtypen und gibt letztlich Empfehlungen zu deren Anwendungsbereich.

1. Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten fand im Bereich des Hochwasserschutzes ein Umdenken statt. Statt einen Fluss nur auf ein klar definiertes Dimensionierungsereignis auszubauen, soll heutzutage auch der Überlastfall, verursacht durch ein sehr seltenes Extremereignis (EHQ), ohne grossen Schaden bewältigt werden können. Dies erfordert geeignete Sicherheitsventile, die das Schutzsystem gezielt entlasten und dadurch unkontrollierte Prozesse und abrupte Schadenszunahmen verhindern.

Erodierbare Dämme (franz.: digue fusible, engl.: fuse plug) werden vor allem als Notenlastungen bei Staudämmen oder bei Hochwasserschutzdämmen entlang von Flüssen eingesetzt, um den Überlastfall sicher abzuleiten. Bei Staudämmen dienen die erodierbaren Dämme meist als zusätzliche Entlastung, sollte die Kapazität der Hochwasserentlastungsanlagen überschritten werden. Sobald ein vorgegebener Wasserstand im Speicherbecken oder im Fluss erreicht wird, wird der erodierbare Damm überströmt und dadurch die Erosion des Dammes ausgelöst. Da infolge der Erosion die Überfallhöhen rasch zunehmen, ermöglichen erodierbare Dämme auch über kurze Distanzen grosse Entlastungsmengen.

Ein solcher erodierbarer Damm soll nun im Rahmen des Sanierungsprojekts am Hagneckkanal zur Anwendung kommen. Die mittlerweile 140 Jahre alte Dammstrecke weist Schäden auf und kann den Dimensionierungsabfluss heute stellenweise nicht mehr schadlos abführen. Speziell während der Sommerhochwasser 2005 und 2007 stiess der Hagneckkanal an seine Grenzen. Mit baulichen Massnahmen sollen nun künftige Hochwasser wieder sicher bewältigt werden. Die bestehenden Dämme werden saniert und erhöht, so dass ein HQ_{100} = 1500 m³/s sicher abgeführt werden kann. Um den Überlastfall zu kontrollieren, ist eine ca. 300 m lange seitliche Entlastung mittels Streichwehr vorgesehen. Die feste Streichwehrkante wird dabei entsprechend tief angeordnet, so dass eine genügende Entlastungskapazität erreicht werden kann. Um das Anspringen der Entlastung möglichst spät zu aktivieren, ist ein auf das Streichwehr aufgesetzter erodierbarer Damm geplant *(Bild 1)*. Durch die seitliche Entlastung soll der Abfluss im Hagneckkanal während eines Extremereignisses um ca. 300 m³/s von EHQ = 1800 m³/s auf 1500 m³/s gesenkt werden.

Insgesamt wurden weltweit bisher nicht mehr als ca. 20 erodierbare Dämme gebaut (Khatsuria 2005). Zudem gibt es praktisch keine dokumentierten Fälle von ausgeführten erodierbaren Dämmen, die auch zum Einsatz kamen. Daher ist das generelle Vertrauen in die Funktionsfähigkeit dieser Entlastung eher gering. In der Literatur ist dennoch ein grundsätzliches Prinzip für das Design eines erodierbaren Damms vorhanden, welches nachfolgend beschrieben wird (Chee 1971, Pugh 1985, Engels&Sheerman-Chase 1985, USBR 1987, Gosschalk 1988, Khatsuria 2005). Der generelle Querschnitt ist in *Bild 2* dargestellt.

Die Initialbresche ist ein kurzer Abschnitt des erodierbaren Damms, der überströmt wird, sobald der Wasserstand knapp unterhalb der Dammkrone steht. Die Initialbresche garantiert, dass die Überströmung des Damms gezielt an einer Stelle beginnt. Eine gleichzeitige Überströmung des gesamten erodierbaren Damms sollte generell nicht erfolgen, da sonst kein kontrolliertes Versagen auftritt. Wird der Damm überströmt, erfolgt zuerst eine hauptsächlich vertikale Erosion im Bereich der Initialbresche. Ist die feste Dammsohle erreicht, erfolgt anschliessend die kontrollierte laterale Erosion des Damms.

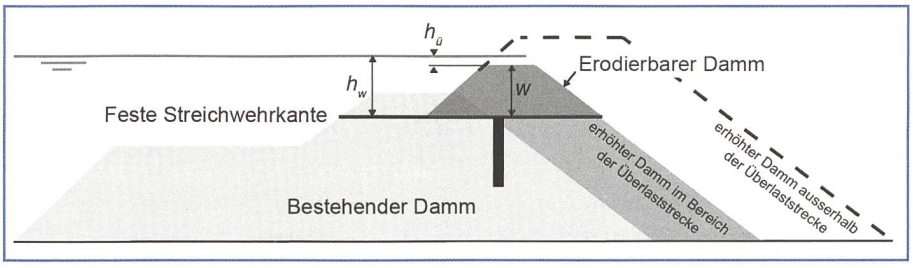


Bild 1. Querschnitt der sanierten Dammstrecke am Hagneckkanal und Definition der Dammhöhe w, der Überfallhöhe $h_ü$ und des Wasserstands h_w.

Die Dichtung eines erodierbaren Damms erfolgt mittels eines schräg vom wasserseitigen Böschungsfuss ansteigenden Dichtungskerns aus schwach durchlässigem feinkörnigem Material. Dieser kann innen liegend oder an der wasserseitigen Dammoberfläche angeordnet werden, minimiert die Durchsickerung und verhindert die Auswaschung des Damms und somit dessen Versagen bei Wasserspiegellagen unterhalb des Anspringpunkts. Bei der Erosion des Damms versagt der Dichtungskern infolge seines Eigengewichts und der Wasserauflast.

Um bei Durchsickerung des Dammes ein Auswaschen des Dichtungskerns zu vermeiden, ist eine Filterschicht nötig, die den Dichtungskern auf der Ober- und Unterwasserseite umschliesst.

Der Dammkörper selbst besteht aus leicht erodierbarem, grobkörnigem Sand und Kies.

Der Oberflächenschutz besteht meist aus grobem Kies oder einem Steinsatz bzw. Steinwurf und wird sowohl auf der Wasser- wie auch auf der Luftseite angebracht. Er verhindert Erosion infolge Wind, Wellen, Regen oder Schneeschmelze.

Der Aufbau eines erodierbaren Damms unterscheidet sich damit prinzipiell nur wenig vom Aufbau eines konventionellen Damms. Bis zum Erreichen des Dimensionierungswasserspiegels, bei dem der Damm wegerodiert werden muss, hat der Damm die gleiche Funktion wie ein normaler Damm zu erfüllen. Er muss bei allen Betriebszuständen stabil bleiben. Dabei dürfen keine Schäden am Dammkörper, wie Risse oder unzulässige Setzungen, entstehen. Es darf keine innere Erosion infolge Durchströmung des Damms oder infolge starken Niederschlags eintreten und die Böschungsstabilität muss für alle Lastfälle gewährleistet bleiben.

Der erodierbare Damm am Hagneckkanal ist durch relativ kleine Abmessungen charakterisiert. Der Dimensionierungswasserspiegel liegt 1 m über der Sohle des erodierbaren Damms und die Breite des Damms ist wegen der Lage auf dem Flussdeich begrenzt. Dies führt unter anderem dazu, dass die Schichtdicken nicht nur aus hydraulischen oder geotechnischen Gründen sondern auch aus ausführungstechnischen Gründen festgelegt werden müssen. Des Weiteren hängt die Wahl der Dammmaterialien von deren ausreichender Verfügbarkeit in der näheren Umgebung des Dammes ab.

Die bei der Überströmung eines Dammes auftretenden Auslöseprozesse und Erosionsvorgänge sowie der Einfluss der Durchsickerung und der Materialeigenschaften lassen sich rechnerisch nur schwer bzw. mit entsprechender Unschärfe bestimmen. Zudem sind die zurzeit vorhandenen Sedimenttransportformeln nur für Normalabfluss und geringe Gefälle gültig. Aufgrund dieser Unsicherheiten sollte mit Hilfe von physikalischen Modellversuchen untersucht werden, ob durch einen geeigneten konstruktiven Aufbau und geeignete Materialien im Falle einer Überströmung ein rasches Versagen des erodierbaren Damms provoziert und somit eine schnelle Freigabe des Abflussquerschnitts erreicht werden kann. Zusätzlich sind Aussagen über die Dauerhaftigkeit des Dammaufbaus (Material, Dichtungsschichten) und zum Langzeitverhalten (Verhalten des kohäsionslosen Materials, Einfluss einer Vegetation, Eintrag von Feinanteilen) notwendig. Die Untersuchung wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geotechnik (IGT) an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt.

Der Artikel beschreibt den Aufbau der Modellversuche und dokumentiert die zwei untersuchten Varianten des überströmbaren Damms bezüglich Dammaufbau und Erosionsverhalten. Zum Schluss werden Empfehlungen zum Aufbau eines erodierbaren Dammes je nach Anwendungsgebiet gegeben.

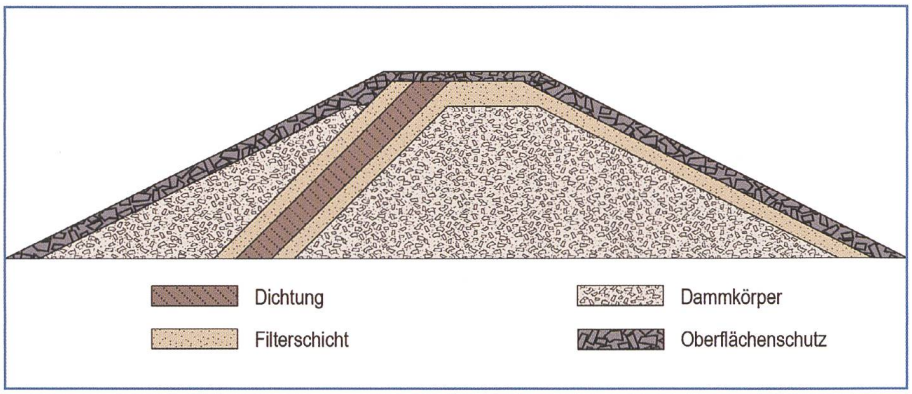


Bild 2. Genereller Querschnitt eines erodierbaren Damms.

2. Experimentelle Methoden

2.1 Versuchsaufbau

Im hydraulischen Modellversuch wurde der erodierbare Damm in einem Versuchskanal nachgebildet *(Bild 3)*. Der Hauptdamm und die feste Streichwehrkante, auf der der erodierbare Damm zu liegen kommt, waren nicht Gegenstand der Untersuchungen und wurden fest modelliert. Die Anströmung des Dammes erfolgte rein frontal, was aufgrund des vorhandenen Vorlandes und der damit verbundenen geringen Fliessgeschwindigkeiten als zulässig erachtet wurde. Der Damm wurde auf einem kleinen Podest errichtet, so dass der Erosionsprozess nicht infolge eines Rückstaus vom Unterwasser beeinflusst wurde.

Um zeitlich und wirtschaftlich effizient verschiedene Dammaufbauten zu untersuchen sowie den Einfluss des Einbau-Wassergehalts des Kerns und die Reproduzierbarkeit der Versuche abzuschätzen, wurden Vorversuche in zwei kleinmassstäblichen Froude-Modellen mit den Massstäben 1:5 und 1:2.5 durchgeführt. Bei den Schlussversuchen wurde auf eine exakte Nachbildung Wert gelegt, weshalb diese im Modellmassstab 1:1 durchgeführt wurden. Für die kleinmassstäblichen Versuche wurde sowohl die zweidimensionale (nur vertikale) Erosion des Damms als auch der dreidimensionale (vertikale und laterale) Erosionsvorgang betrachtet. Im Modellmassstab 1:1 wurde nur die zweidimensionale Erosion untersucht. Der Einfluss der Skalierungsmethode der Kerndicke (Abschnitt 2.2) auf den Erosionsvorgang wurde im Massstab 1:5 qualitativ geprüft. *Tabelle 1* zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche.

Zur Dokumentation der Versuche wurde der Zufluss zum Modell mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät (MID) erfasst und der Wasserstand auf der wasserseitigen Dammseite während des Versuchs mit einem Ultraschallpegel (Echolot) aufgezeichnet. Als wichtigstes Auswertungswerkzeug dienten jedoch Fotografien durch die Glasscheibe mit einer 30 Hz-CCD-Kamera, die das Dammerosionsprofil und die Wasserspiegellage während des Versuchs mit einer Frequenz von 12 Hz dokumentierten und dadurch die Bestimmung der Erosionsgeschwindigkeit erlaubten.

2.2 Modellierung Dammmaterial

Die 1:1-Versuche erfolgten direkt mit den in Natur zur Anwendung kommenden Materialien, die der VAW von den entspre-

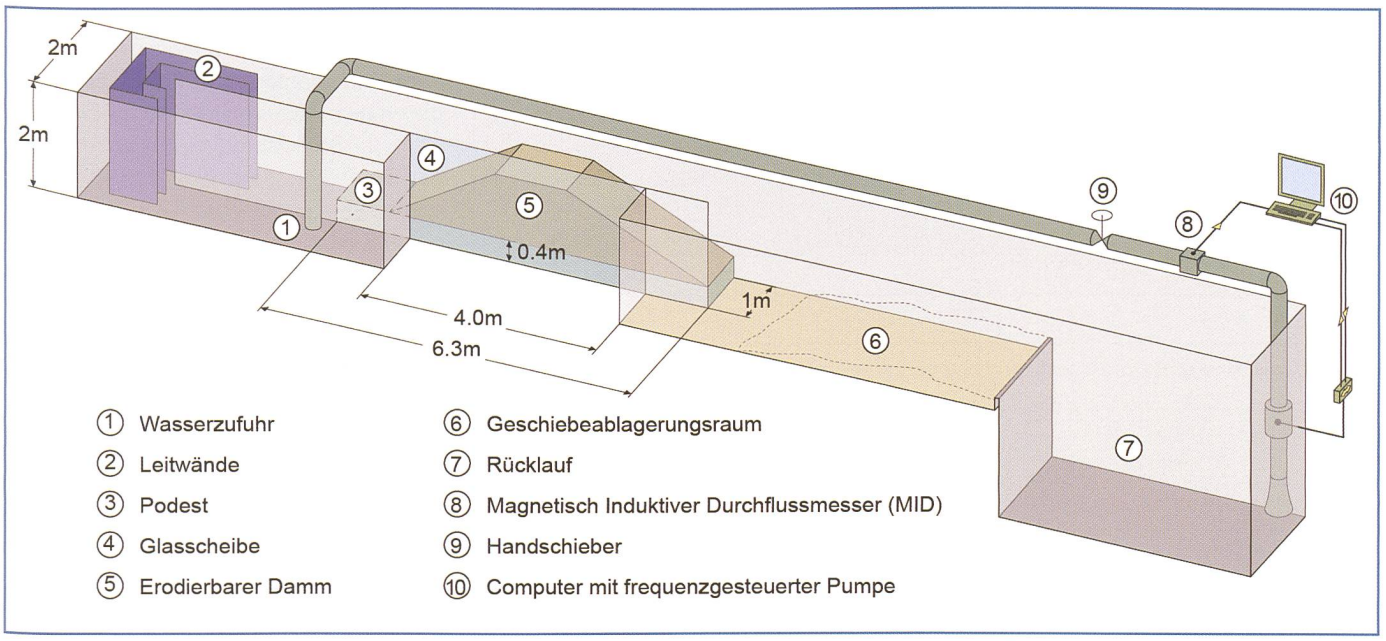


Bild 3. Versuchsanlage für die 1:1-Versuche und die kleinmassstäblichen Versuche mit lateraler Erosion.

	Mass-stab	Anzahl Versuche	Kerndicke Prototyp	Skalierung Kern (Abschn. 2.2)	Einbau-Wassergehalt magerer Ton	Breite Versuchsrinne	Sicker-schutz
Damm mit Dichtungs-kern	1:5	1	0.25 m	massstäblich	50%	0.2 m	-
	1:5	1	0.25 m	Bruchkriterien	50%	0.2 m	-
	1:5	1	0.35 m	Bruchkriterien	50%	0.2 m	-
	1:5	3	0.35 m	Bruchkriterien	33%	0.2 m	-
	1:5	1	0.35 m	massstäblich.	50%	0.2 m	-
	1:5	1	0.35 m	massstäblich	33%	0.2 m	-
	1:5	1	0.35 m	Bruchkriterien	50%, 2 Mt. Trocknung	0.2 m	-
	1:5	1	0.35 m	Bruchkriterien	33%	1.0 m, laterale Erosion	-
	1:2.5	1	0.35 m	Bruchkriterien	50%	0.2 m	-
	1:2.5	1	0.35 m	Bruchkriterien	33%	0.2 m	-
	1:2.5	1	0.35 m	Bruchkriterien	33%	1.0 m	-
	1:1	2	0.35 m	-	33%	1.0 m	-
Damm aus Feinsand	1:5	1	-	-	-	0.2 m	-
	1:5	2	-	-	-	0.2 m	0.25 m
	1:1	1	-	-	-	1.0 m	0.25 m

Tabelle 1. Übersicht der an der VAW durchgeführten Versuche.

chenden Kieswerken geliefert wurden. Für die kleinmassstäblichen Versuche wurden die Kies- und Schottermischungen nach Froud'scher Ähnlichkeit umgerechnet. Das Kern- und das Filtermaterial konnte aufgrund der kleinen Korndurchmesser und des kohäsiven Verhaltens jedoch nicht verkleinert werden. Für den Kern und den Filter wurde daher auch bei den kleinmassstäblichen Versuchen direkt das im Prototyp zur Anwendung kommende Material verwendet. Die Festigkeit des Materials war somit im Prototyp und im Modell dieselbe. Um dadurch im kleinmassstäblichen Modell die Stabilität des Kerns (Versagen durch Bruch) nicht zu überschätzen, wurde dessen Dicke zusätzlich so verkleinert, dass sich das Widerstandsmoment des Modellkerns zu demjenigen des Prototyps Froudeähnlich verhält (VAW 2010).

Eine Grasnarbe konnte im kleinmassstäblichen Modell nicht nachgebildet werden. Im 1:1-Versuch hätte ein Bewuchs durch die Verwendung eines Rollrasens theoretisch simuliert werden können. Da jedoch nur ein aufgelegter Rollrasen ohne Verwurzelung mit dem Untergrund möglich ist, ist die Übertragbarkeit der Versuche auf den Naturzustand nach mehreren Jahren nicht gegeben. Auf die Modellierung eines Bewuchses wurde daher verzichtet.

3. Damm mit Dichtungskern – Variante gemäss Literatur

3.1 Dammaufbau

Der Dammaufbau wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich entwickelt. Als Ausgangspunkt für die erste untersuchte Variante «Damm mit Dichtungskern» wurden die Resultate der Studie von Pugh (1985) herangezogen.

Die Kerndichtung stellt ein Schlüsselelement des erodierbaren Dammes dar (*Bild 4*, [1]). Sie gewährleistet die Dichtigkeit des Dammes, bevor dieser überströmt wird, und bestimmt im Falle eines Überströmens dessen Erosionsgeschwindigkeit. Die Anforderungen an das Kernmaterial sind daher mannigfaltig. Um die Dichtigkeit zu gewährleisten, soll das Kernmaterial einen Durchlässigkeitskoeffizient $k \leq 10^{-7}$ m/s aufweisen. Da der Damm über lange Zeit trocken stehen wird, soll das Material zudem günstige Schrumpfeigenschaften aufweisen, um eine Rissbildung in Grenzen zu halten. Zudem soll die Festigkeit des Materials begrenzt sein, damit ein Versagen des Kerns im Überströmungsfall möglich ist. Ein zu plastisches Tonmaterial kommt aufgrund seiner hohen Trockenfestigkeit und seines relativ hohen Schrumpfmasses deswegen nicht in Frage. Die Suche nach einem geeigneten Material konzentrierte sich deshalb auf ein (tonig-)siltiges Material, welches in genügender Menge erhältlich ist. Mit einem Kieswaschschlamm (als magerer Ton, CM, klassifiziert) wurde ein Material gefunden, das diese Anforderungen erfüllt. Dieses «Abfallprodukt» der Kies- und Sandproduktion wird im Allgemeinen deponiert, erwies sich aber für den Aufbau des Kernes als geeignet.

Um innere Erosion zu verhindern, werden die verschiedenen Zonen mit Hilfe von Filterschichten voneinander getrennt, wobei die Filterkriterien nach Norm SN 670125a eingehalten werden müssen. Beim Damm mit Dichtungskern trennt eine Filterschicht aus Feinsand (2) den Kern vom erodierbaren Stützkörpermaterial (3). Für das erodierbare Material wurde eine Kiessandmischung gewählt. Der Böschungsschutz (4) aus gewaschenem Schotter wird anschliessend direkt auf den Dammkörper aufgebracht. Mit diesem

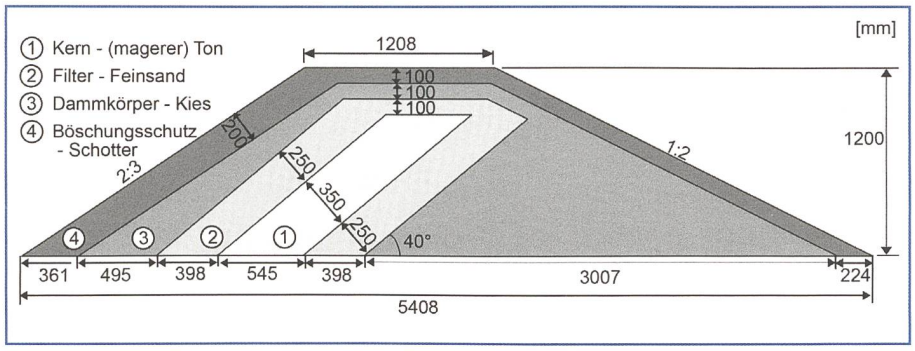


Bild 4. Geometrie und Dammaufbau des erodierbaren Damms mit Dichtungskern.

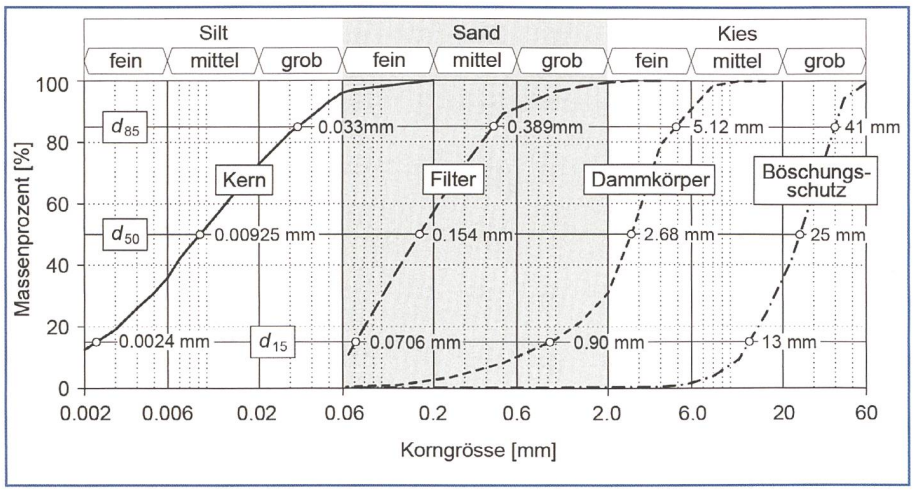


Bild 5. Kornverteilungskurven der für den Prototyp vorgesehenen Materialien.

Aufbau wirkt von innen nach aussen jede Schicht als Filter gegen innere Erosion für die vorgehende Schicht.

Die Abmessungen des Damms mit Dichtungskern sind *Bild 4* zu entnehmen. Die wasserseitige Böschungsneigung beträgt 2:3, die luftseitige 1:2. Der Kern schliesst mit der Aufstandsfläche einen Winkel von 40° ein. *Bild 5* zeigt die Kornverteilungskurven der für den Prototyp vorgesehenen Materialien.

3.2 Porenwasserspannungen und Durchsickerung bei Einstau

Die geotechnische Dammmodellierung konzentrierte sich auf zwei Aspekte des Dammverhaltens. Einerseits wurden die Porenwasserdrücke und die Durchsickerung mit der FE-Methode berechnet und anderseits die Böschungsstabilität mittels konventioneller Bruchkreismethode unter Berücksichtigung der mit der FE-Methode berechneten Porenwasserdrücke analysiert. Für die Berechnungen ist das Softwarepaket GeoStudio 2007 der Firma GEO-SLOPE International Ltd. zur Anwendung gekommen. Die Aufstandsfläche wurde für die Berechnungen als undurchlässig angenommen.

Bild 6 zeigt die Porenwasserspannungen für den stationären Zustand mit h_w = 1.0 m sowie die Sickerlinie als blau gestrichelte Kurve. Dargestellt sind sowohl die positiven als auch die im ungesättigten Bereich des Damms vorhandenen negativen Porenwasserspannungen in kN/m^2. Die Dammabmessungen sind *Bild 4* zu entnehmen.

Der berechnete Sickerwasserdurchfluss im stationären Zustand bei h_w = 1.0 m beträgt $q = 2.1 \cdot 10^{-6}$ m^3/s/m. Dieser Durchfluss kann sich nur bei einem dauerhaften konstanten Wasserspiegel auf der maximalen Höhe von h_w = 1.0 m einstellen. Nach 24 Stunden bei h_w = 1.0 m beträgt der Durchfluss rund $q = 1.5 \cdot 10^{-6}$ m^3/s/m und hat noch nicht den Wert des stationären Zustandes erreicht. Die schwarzen Pfeile zeigen den Wasserdurchfluss, wobei ersichtlich ist, dass ein Teil des Wassers durch die ungesättigte Zone, d.h. oberhalb der Sickerlinie (blaue gestrichelte Kurve), fliesst.

Die Durchsickerung des Dammes erreicht damit auch im stationären Fall keine Grössen, die als problematisch erachtet werden müssten. Die Standsicherheit ist somit für alle Lastfälle gegeben.

3.3 Erosionsverhalten im hydraulischen Modellversuch

Sowohl die kleinmassstäblichen wie auch der 1:1-Prototypversuch zum Damm mit Dichtungskern zeigten ein ähnliches Erosionsverhalten. Es konnten somit keine signifikanten Massstabseffekte beobachtet werden. Der generelle Erosionsverlauf wird nachfolgend am Beispiel eines 1:1-Versuchs erläutert *(Bild 7)*. Alle Angaben beziehen sich auf Naturgrössen.

Der Versuch wurde durch Auffüllen des wasserseitigen Reservoirs gestartet. Der Wasserspiegel wurde dabei langsam angehoben, um allfällige Durchsickerungsprozesse erkennen zu können. Bis zu einem Wasserstand h_w = 1.0 m (OK Sand-Filterschicht) konnte keine Durchsickerung des Damms beobachtet werden. Bei höherem Wasserstand setzte zuerst die Durchsickerung des erodierbaren Materials an der Dammkrone ein. Die Durchnässung des luftseitigen Stützkörpers begann erst ab h_w = 1.10 m, als die Durchströmung des Böschungsschutzes einsetzte (*Bild 7*, Startbild). Das am Böschungsfuss austretende Wasser war relativ klar, woraus geschlossen werden kann, dass aufgrund der eingehaltenen Filterkriterien das Auswaschen von Feinmaterial verhindert wurde.

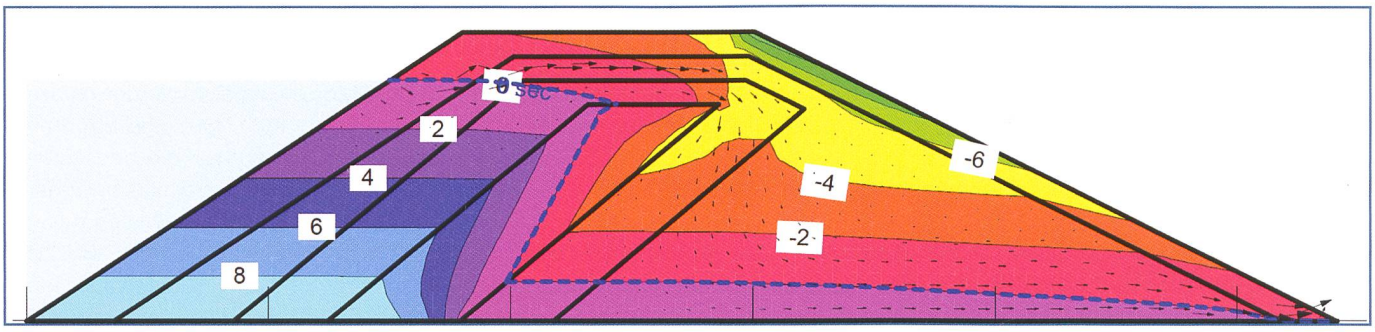


Bild 6. Porenwasserspannungen [kN/m^2] beim Damm mit Dichtungskern im stationären Zustand mit h_w = 1.0 m.

Ein erstes Abrutschen des luftseitigen Oberflächenschutzes wurde bei einer Überströmhöhe $h_ü \approx 4$ cm ($h_w \approx 1.24$ m) beobachtet. Der luftseitige Stützkörper wurde durch diesen ersten Rutsch nicht freigelegt, so dass sich bei unverändertem Oberwasserstand wieder ein stabiler Abflusszustand einstellte. Die erste Rutschung wurde daher in der Zeitmessung der Erosion nicht berücksichtigt. Bei fortschreitendem Anstieg des Oberwasserstandes wurden weitere kleine Rutschungen des Oberflächenschutzes beobachtet. Der eigentliche Erosionsprozess setzte bei einer Überströmhöhe des Dammes von $h_ü \approx 6$ cm ein, was einem spezifischen Durchfluss von ca. $q = 0.02$ m³/s/m entspricht. Die luftseitige Dammkrone war zu diesem Zeitpunkt, der im Folgenden mit $t = 0$ s bezeichnet wird, infolge der Umlagerung des Oberflächenschutzes bereits ausgerundet (*Bild 7*, t = 0 s). Der Oberflächenschutz wurde daraufhin innert kurzer Zeit wegerodiert, was zu einer Freilegung des Stützkörpers und damit der Erosion des leicht erodierbaren Materials hinter dem Dichtungskern führte (*Bild 7*, $t = 13$ s). Mit zunehmender Erosion des Dammkörpers wurde der schräge Dichtungskern unterspült und freigelegt, wodurch er als Kragarm wirkte und schliesslich infolge Eigengewicht und Wasserauflast versagte (*Bild 7*, $t = 144$ s). Mit zunehmender Erosion des Dammkörpers brach der Dichtungskern immer weiter nach, bis er schliesslich nicht mehr unterspült werden konnte (*Bild 7*, 173 s und 399 s). Das letzte Stück des Kerns, das nicht infolge der Unterspülung abbrechen konnte, wurde nicht erodiert und blieb stehen (*Bild 7*, $t = 800$ s). Die Kernhöhe in diesem stabilen Endzustand betrug ca. 25–30 cm. Der gesamte Erosionsprozess dauerte rund 400 s.

Beim Einsetzen der Erosion wurde der Zufluss zum Reservoir kontinuierlich gesteigert, um den Wasserstand so lange wie möglich konstant zu halten. Aufgrund der beschränkten Pumpenleistung von 275 l/s, senkte sich der Wasserstand ab ca. $t = 173$ s (*Bild 7*) jedoch ab. Somit ergab sich ab diesem Zeitpunkt ein konstanter spezifischer Durchfluss von $q = 0.257$ m³/s/m.

Da der stabile Dichtungskern nicht kontinuierlich mit dem Dammkörper erodiert wurde, bildete sich jeweils ein Absturz, an dessen Fuss Energie umgewandelt wird, siehe z.B. *Bild 7*, $t = 144$ s. Der in Natur unter dem erodierbaren Damm liegende bestehende Hochwasserschutzdamm muss gegen diese Beanspruchung entsprechend geschützt werden.

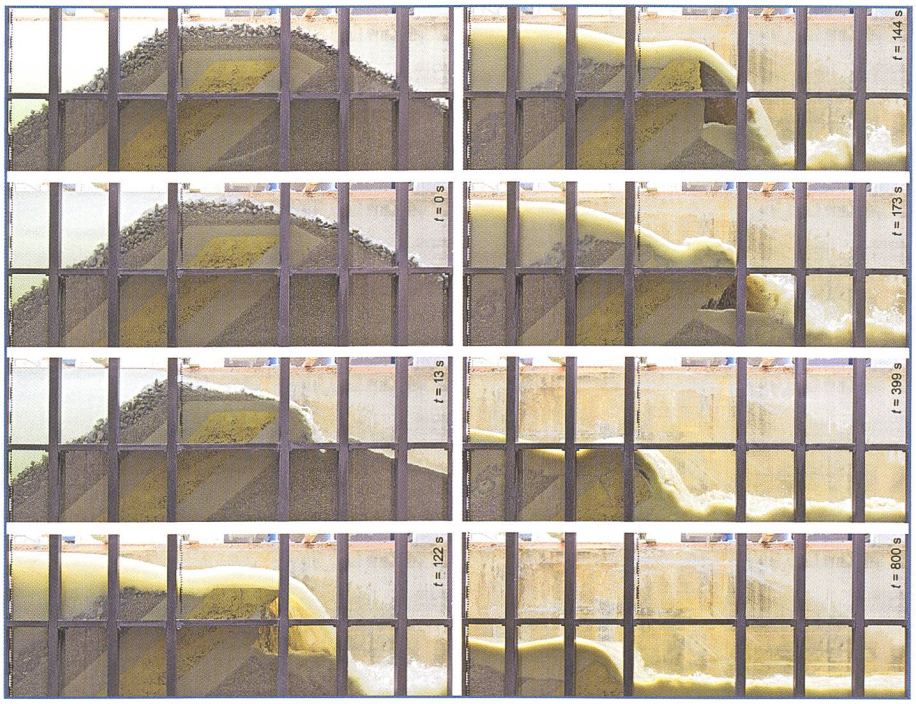


Bild 7. Erosionsverlauf des Damms mit Dichtungskern im 1:1-Versuch. Bis zu einer Überströmhöhe von $h_ü < 4$ cm erfolgt keine Erosion des Oberflächenschutzes und der Damm bleibt stabil (Bild oben links). Bei ansteigendem Wasserspiegel erfolgt eine erste Rutschung des Oberflächenschutzes, die sich aber wieder stabilisiert. Beim weiteren Anstieg des Wasserspiegels setzt schliesslich der eigentliche Erosionsprozess ein (ab t = 0 s). Der Erosionsprozess ist nach rund 400 s abgeschlossen. Die Dammhöhe ändert sich ab diesem Zeitpunkt nicht mehr.

3.4 Laterale Erosion

Die laterale Erosion wurde im Massstab 1:5 für einen im Modell 1 m langen Dammabschnitt (entspricht im Prototyp einer Dammlänge von 5 m) anhand eines Halbmodells untersucht. An der Glasscheibe wurde der Oberflächenschutz auf einer Breite von 2 Modell-cm entfernt und dadurch eine Initialbresche geschaffen. Somit repräsentiert die Glasscheibe die Mittelachse der Bresche. In Natur würde sich die Bresche nach beiden Seiten lateral ausbreiten.

Bild 8 zeigt den Erosionsverlauf seitlich durch die Kanalscheibe sowie von oben, auf die luftseitige Dammböschung blickend. Das Reservoir wurde langsam gefüllt und der Wasserspiegel lag während des gesamten Erosionsprozesses unterhalb der Dammkrone. Somit konnte garantiert werden, dass die Erosion im Bereich der Initialbresche startet. Sobald das Wasser in die Initialbresche fliesst, erodiert der Damm primär vertikal infolge Unterspülung und Nachbrechen des Dichtungskerns wie in Kapitel 3.3 beschrieben (*Bild 7*). Nach der ersten vertikalen Erosion im Bereich der Initialbresche erfolgte die Erosion des Oberflächenschutzes und des luftseitigen Stützkörpers primär durch seitliches Nachrutschen. Der Kern wirkte nach der Unterspülung als Kragarm und brach unter Eigengewicht und Wasserauflast (*Bild 8*, $t = 197$ s). Die seitliche Erosionsgeschwindigkeit betrug umgerechnet auf Prototypgrösse ungefähr 0.5 m/min. Ausgehend von einer Initialbresche, die eine beidseitige Erosion zulässt, breitet sich die Bresche somit mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/min aus.

3.5 Fazit Damm mit Dichtungskern

Die Variante Damm mit Dichtungskern zeigte insbesondere in Bezug auf die Dichtigkeit und die Stabilität des Damms ein günstiges Verhalten. Die Stabilität des Damms war bis zu dessen Überströmung gegeben. Eine Durchsickerung erfolgte erst, wenn der Wasserstand die Kernhöhe überstieg, blieb aber selbst dann gering und führte zu keiner Auswaschung des Filtermaterials. Sobald eine Überströmhöhe von ca. 6 cm erreicht wurde, rutschte der Oberflächenschutz ab und die Erosion des Stützkörpers setzte ein. Der Kern wurde unterspült, wirkte dadurch als Kragarm und brach schliesslich unter Eigengewicht und Wasserauflast. Dieser Erosionsprozess wiederholte sich, solange der Kern unterspült werden konnte. Gegen Ende des Erosionsprozesses blieb ein dreieckiges Stück des Kerns stehen, das nicht mehr unterspült werden konnte und daher nicht wegbrach. Auch unter langer Strömungs-

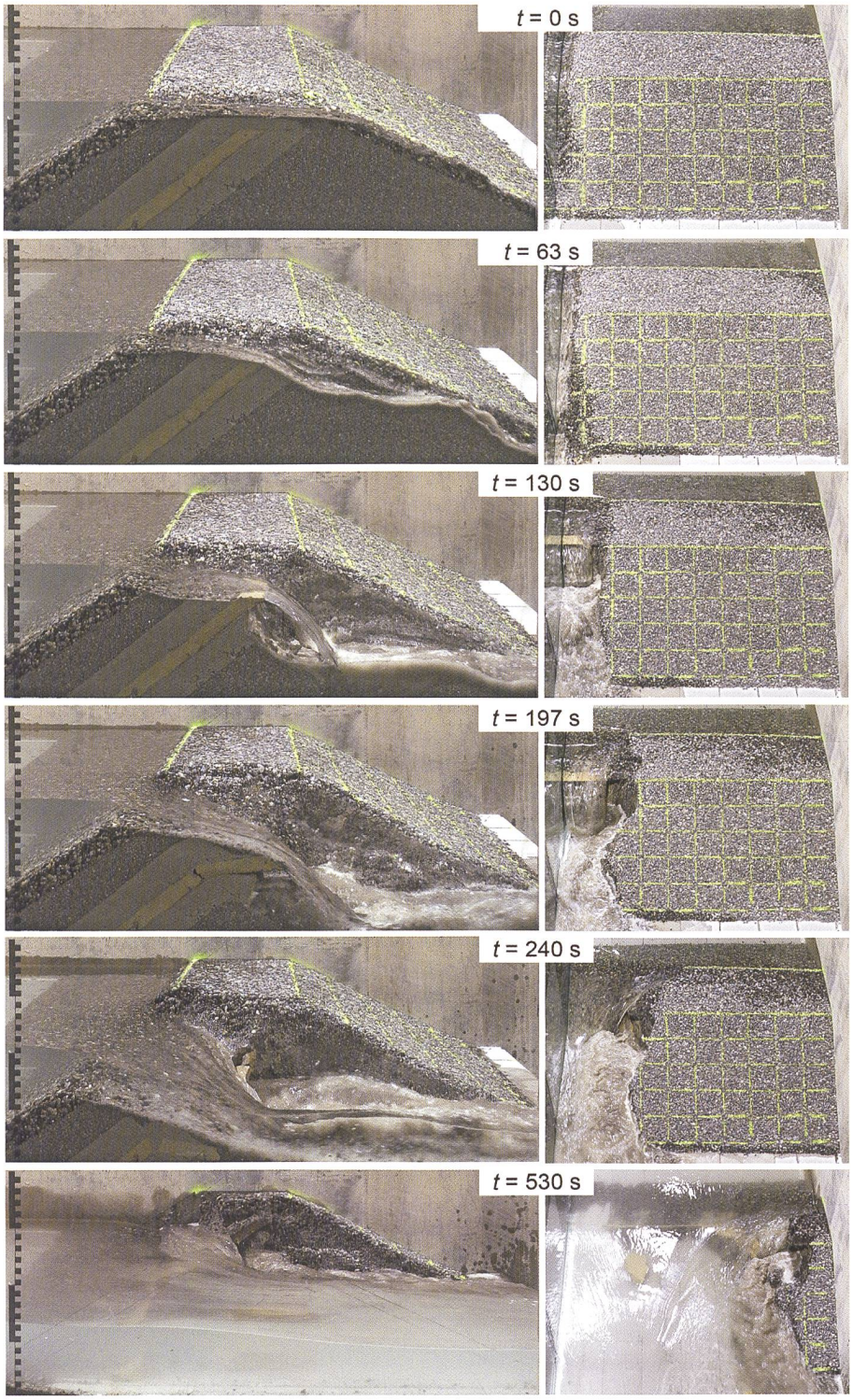


Bild 8. Laterale Erosion im Modell mit Massstab 1:5. Die Erosion startet infolge Überströmung der Initialbresche an der Scheibe. Die weitere Erosion erfolgt nur durch seitliche Erosion und das Nachrutschen der Böschung (Fliessrichtung von links nach rechts, bzw. von oben nach unten; Zeitangaben in Naturgrössen).

belastung erodierte dieses Kernstück nicht. In vereinzelten kleinmassstäblichen Versuchen wurde ein Abgleiten des restlichen Kernstücks auf der Aufstandsfläche beobachtet.

Die Forderung nach einer vollständigen Erosion des Damms kann mit dem gewählten Aufbau mit Dichtungskern folglich nicht komplett erfüllt werden. Es ist mit einem Reststück zu rechnen, dessen Höhe ungefähr der Dicke des Dichtungskerns entspricht. Zu beachten sind die Grenzen der Modellierung bezüglich Bewuchs und Langzeitverhalten.

Beim erodierbaren Damm am Hagneckkanal handelt es sich mit einer Höhe von 1.2 m um einen kleinen Damm, der über Jahre hinweg trocken stehen wird und nur bei seltenen Hochwassern eingestaut wird. Es stellte sich daher die Frage, ob die geforderten Dammeigenschaften bzgl. Dichtigkeit, Standfestigkeit und Erosionsverhalten nicht auch mit einem einfacheren Dammaufbau erreicht werden können. Insbesondere auch, da sich der Einbau des Dichtungskerns infolge der geringen Schichtdicken am Hagneckdamm aufwändig gestalten würde. Nach Abschluss der Versuche zum Damm mit Dichtungskern wurde daher ein Damm mit einem Dammkörper aus Feinsand ohne Dichtungskern untersucht. Diese Untersuchung wird nachfolgend beschrieben.

4. Damm aus Feinsand – vereinfachte Variante

4.1 Dammaufbau

Für den Bau des Damms ohne Dichtungskern wurden die gleichen Materialien verwendet, wie beim Bau des Damms mit Dichtungskern. Der Dammkörper (*Bild 9*, [2]) wird aus Feinsand gebaut. Dieses Material mit einem geschätzten Durchlässigkeitskoeffizient von $k = 7.5 \cdot 10^{-5}$ m/s übernimmt die Dichtungsfunktion. Ein Keil aus kohäsivem Kieswaschschlamm (1) wird auf der Aufstandsfläche eingebaut, um eine direkte Durchsickerung zwischen der Dammbasis und der Aufstandsfläche zu erschweren. Zwischen dem Dammkörper und dem Böschungsschutz aus gewaschenem Schotter (4) wird als Filter die Kiessandmischung (3) eingebaut.

Im Vergleich zum Damm mit Dichtungskern wurde beim Damm ohne Kern die Aufstandsbreite bei gleichen Böschungsneigungen um 50 cm gekürzt. Die Dammkrone weist neu eine Breite von rund 71 cm auf. Um ein Austreten der Sickerlinie aus der luftseitigen Böschung zu verhindern, wurde der Filter am Böschungsfuss deutlich verbreitert. Die Dammabmessungen können *Bild 9* entnommen werden.

4.2 Porenwasserspannungen und Durchsickerung bei Einstau

Bild 10 zeigt die mit dem numerischen Modell (Abschnitt 3.2) berechneten Porenwasserspannungen im Damm aus Feinsand für den stationären Zustand mit h_w = 1.0 m. Dargestellt sind sowohl die positiven als auch die im ungesättigten Bereich des Damms vorhandenen negativen Porenwasserspannungen in kN/m^2. Die Dammabmessungen sind *Bild 9* zu entnehmen. Im Gegensatz zum Damm mit Dichtungskern erfolgt der Abbau der Porenwasserspannungen nun kontinuierlich über die Dammbreite.

Der berechnete Sickerwasserdurchfluss im stationären Zustand bei

einem dauerhaften konstanten Wasserspiegel von h_w = 1.0 m beträgt q = 2.1·10^{-5} m^3/s/m. Dieser Durchfluss ist ca. 10-mal grösser als beim Damm mit Dichtungskern. Das unterschiedliche Verhalten der beiden Dammvarianten kann durch das Fehlen des Dichtungskerns und durch die kleineren Abmessungen des Damms ohne Kern erklärt werden. Die schwarzen Pfeile zeigen den Wasserdurchfluss, wobei ersichtlich ist, dass ein Teil des Wassers durch die ungesättigte Zone, d.h. oberhalb der Sickerlinie (blaue gestrichelte Kurve), fliesst. Das durchsickernde Wasser wird durch den verbreiterten Filter am Dammfuss gefasst und über die Schotterschicht am Böschungsfuss nach aussen geführt. Damit im Fussbereich der luftseitigen Böschung keine innere Erosion eintritt, müssen die eingebauten Materialien unbedingt die Filterkriterien einhalten.

Im physikalischen Modellversuch mit Massstab 1:1 wurde der Damm nach dem Einbau zuerst 4 Wochen trocken stehen gelassen und anschliessend innerhalb von ca. 2 h bis knapp unter die Oberkante des Feinsandkörpers eingestaut (h_w ≈ 1.0 m). Die Durchsickerung erreichte den luftseitigen Böschungsfuss nach ca. 4 h, worauf ein kontinuierlicher Wasseraustritt einsetzte. Das austretende Wasser war zu jeder Zeit klar, woraus geschlossen werden kann, dass die Filter funktionierten und kein Feinmaterial ausgewaschen wurde.

Um die Durchlässigkeit des Damms unter konstantem Wasserdruck zu untersuchen, wurde der Damm anschliessend während 4 Wochen eingestaut gehalten und die Absenkung des Oberwasserspiegels gemessen. Aus diesen Messungen ergab sich eine Durchsickerung von ca. q = 6.5·10^{-6} m^3/s/m, welche etwa in derselben Grössenordnung liegt, wie die mit dem numerischen Modell berechnete Durchsickerung.

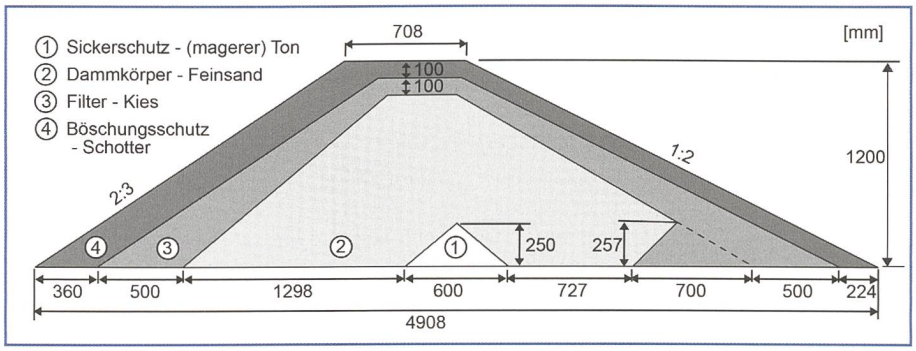


Bild 9. Geometrie und Dammaufbau des erodierbaren Damms aus Feinsand.

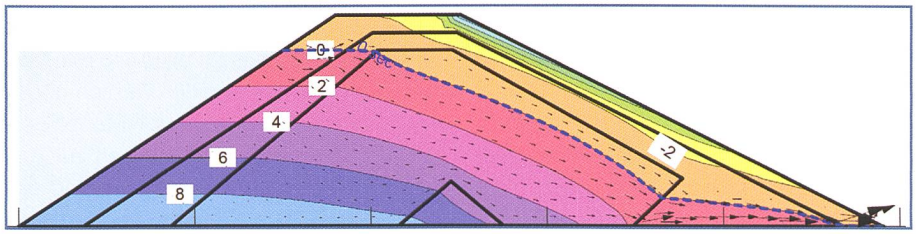


Bild 10. Porenwasserspannungen [kN/m^2] beim Damm aus Feinsand im stationären Zustand bei h_w = 1.0 m.

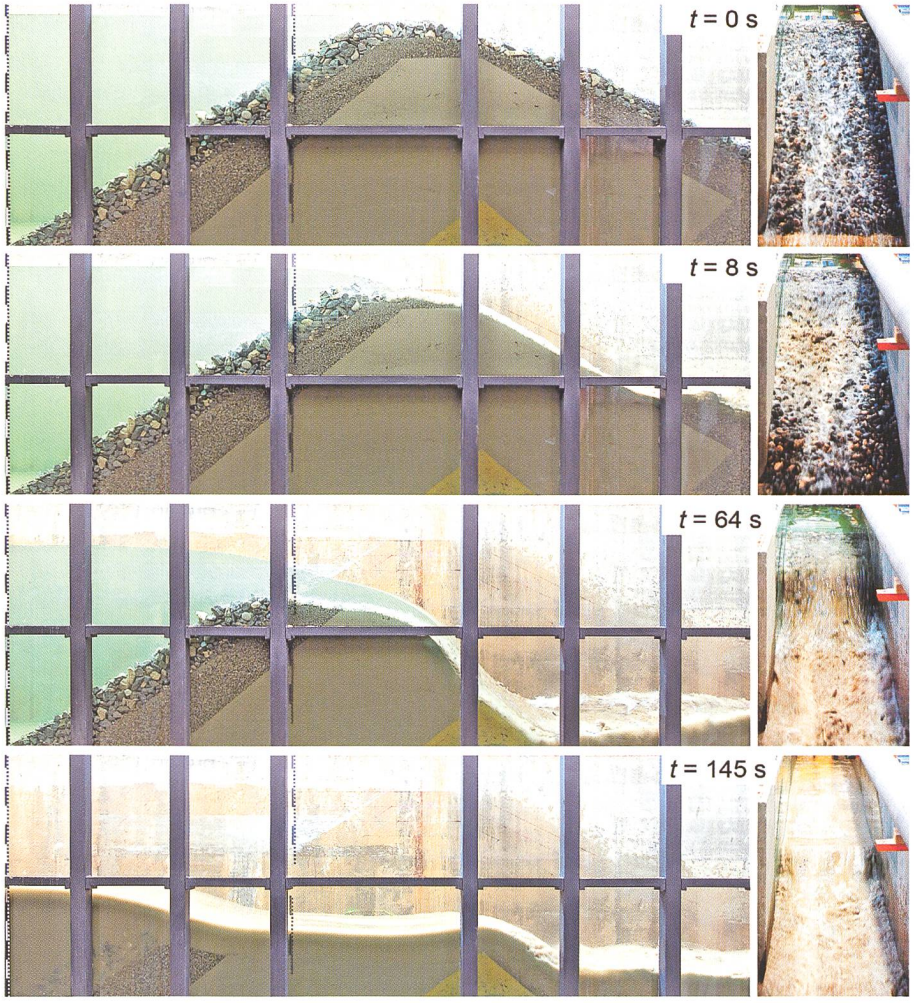


Bild 11. Erosionsverlauf im 1:1-Versuch des Damms aus Feinsand. Links: Seitenansicht, rechts: Ansicht von der Luftseite.

4.3 Erosionsverhalten

Das Erosionsverhalten des Damms aus Feinsand wird nachfolgend anhand eines 1:1-Versuchs dokumentiert. In *Bild 11* ist der Erosionsprozess von der Seite sowie das Abrutschen des Böschungsschutzes von der Luftseite zu sehen. Alle Angaben beziehen sich auf Naturgrössen.

Vor Versuchsbeginn war der Damm während 4 Wochen eingestaut und es kann somit davon ausgegangen werden, dass der Dammkörper gesättigt war. Der Wasserstand wurde von anfangs h_w = 0.9 m allmählich erhöht, bis die Erosion des Damms einsetzte. Eine erste Rutschung des Oberflächenschutzes trat im Modell bei einer Überströmhöhe von $h_ü$ ≈ 2–3 cm auf. Ohne weiteren Anstieg des Wasserstands stabilisierte sich der Oberflächenschutz bei dieser Überströmhöhe jedoch wieder.

Die eigentliche Erosion begann bei $h_ü$ ≈ 5 cm zum so definierten Zeitpunkt t = 0 s. In einem ersten Schritt erodierten der Oberflächenschutz und die Filterschicht aus Kies. Anschliessend setzte die Erosion

des Feinsandes ein. Der Feinsand wurde dabei kontinuierlich erodiert, womit sich im Vergleich zum Damm mit Dichtungskern ein lineares Erosionsprofil ohne Abstürze ergab. Schlagartiges Versagen grösserer Dammteile oder Böschungsbrüche wurden nicht beobachtet. Wiederum wird die Aufstandfläche des Damms durch die Strömung stark beansprucht und muss somit in Natur geschützt werden. Bis zum Erreichen des Dichtungskeils verlief die Erosion ungefähr parallel zur ursprünglichen Böschungsneigung, anschliessend wirkte der Dichtungskeil als Fixpunkt und es folgte eine Rotationserosion. Der Damm flachte ab und wurde innert 145 s bis auf die Höhe des Dichtungskeils abgetragen. Dieser wurde auch bei anhaltender Strömungsbelastung während 1 h nicht erodiert und stützte dadurch die davorliegenden Schichten, so dass sich ein stabiler Endzustand mit einer Dammhöhe von 25 cm einstellte.

4.4 Fazit Damm aus Feinsand

Der Damm aus Feinsand zeigte sowohl bei Einstau ohne Überströmung, wie auch im Überströmfall ein zufriedenstellendes Verhalten und erfüllte die gestellten Anforderungen. Die Stabilität des Damms war bei wechselndem Wasserstand jederzeit gegeben, die Durchsickerung gering und das durchsickernde Wasser war klar und zeigte keine Anzeichen von Auswaschungen.

Nach Überströmung des Damms verlief die Erosion schnell und gleichmässig. Der Sickerschutz aus magerem Ton wurde aber in keinem der Versuche erodiert. Der Damm erodierte innert knapp 3 min. bis auf die Höhe des Sickerschutzes und erreichte dann den stabilen Endzustand. Um eine vollständige Erosion des Damms zu ermöglichen, muss der Sickerschutz weggelassen oder in anderer Weise ausgeführt werden. Anstelle eines hohen Dichtungskeils können z.B. mehrere niedrige Dichtungsbahnen angeordnet werden.

5. Schlussfolgerungen

Am Hagneckkanal, der künstlichen Aareableitung zwischen Aarberg und dem Bielersee, wird ein Sanierungsprojekt geplant. Um den Überlastfall zu kontrollieren, ist eine seitliche Entlastung mittels Streichwehr vorgesehen. Die feste Streichwehrkante wird dabei entsprechend tief angeordnet, so dass eine genügende Entlastungskapazität erreicht wird. Um den Anspringpunkt der Entlastung möglichst spät zu aktivieren, ist ein auf das Streichwehr aufgesetzter erodierbarer Damm geplant. Sobald der Damm im Falle eines Extremhochwassers überströmt wird, soll dieser möglichst rasch und vollständig erodieren. Bei Wasserständen unterhalb des Anspringpunkts verhindert eine Dichtung das frühzeitige Versagen des Damms. Die VAW untersuchte in Zusammenarbeit mit dem IGT zwei verschiedene Varianten eines erodierbaren Dammes: einen Damm mit Dichtungskern und einen Damm aus Feinsand.

5.1 Übertragbarkeit der Modellversuche auf die Natur, Anforderungen an den Unterhalt

Das Erosionsverhalten beider untersuchter Varianten hängt massgeblich von den Materialeigenschaften und den Verdichtungsmethoden ab. Obwohl im 1:1-Modell und in Natur die gleichen Materialien zur Anwendung kommen, können aufgrund der unterschiedlichen Einbaumethoden und Bedingungen sowie der Verwitterung und des Bewuchses die Verhältnisse im Modell und in Natur voneinander abweichen.

Im Modell wurde ein zusätzlich vorhandener Oberflächenschutz, z.B. eine Grasnarbe, welche die Erosion des Böschungsschutzes verzögert, nicht modelliert. Insbesondere in der Anfangsphase der Erosion werden dadurch die Erosionszeiten zu schnell abgebildet bzw. setzt die Erosion im Modell bereits bei verhältnismässig kleiner Überströmhöhe ein. Ein starker Bewuchs kann den Oberflächenschutz einerseits so stark stabilisieren, dass die Erosion verhindert wird. Andererseits wird durch eine tiefgreifende Verwurzelung der Dammkörper durchsetzt, was zu einer grösseren Durchsickerung führt und die Gefahr der inneren Erosion erhöht. Der Bewuchs des Dammes muss daher auf jeden Fall kontrolliert werden.

Um im Fall einer stark ausgebildeten Grasnarbe den Erosionsbeginn zu beschleunigen, soll die Dammkrone daher an einzelnen Stellen mit Betonplatten, welche lokal den Bewuchs des Damms verhindern, abgedeckt werden. Wenn ein Extremhochwasser erwartet wird, können diese Betonplatten mit einem Bagger weggehoben werden, wodurch leicht erodierbare Abschnitte entstehen, die als Initialbreschen wirken können. Generell ist jedoch ein kontinuierlicher Unterhalt, regelmässiges Mähen sowie das Entfernen von grösseren Gebüschen für die Funktion des erodierbaren Damms unerlässlich. Die im Modellversuch beobachteten Erosionszeiten können nur erreicht werden, wenn ein Bewuchs des Damms gänzlich verhindert wird.

Der Oberflächenschutz weist an der Krone und auf der Luftseite eine Dicke von nur 10 cm auf, was etwa 3 Lagen Schottersteinen entspricht. Da der Damm direkt neben einem hoch frequentierten Wander- und Veloweg liegt, besteht die Gefahr, dass der Oberflächenschutz nach und nach abgetragen wird. Somit sind anthropogene Beschädigungen des Damms nicht auszuschliessen. Lokale Beschädigungen können bereits bei Starkregen zu Erosionen führen und den Damm destabilisieren. Der Damm sollte daher eingezäunt, regelmässig überwacht sowie beim Auftreten grösseren Fehlstellen ausgebessert werden.

5.2 Überblick und Wahl der Varianten

Die Durchsickerungs- und Stabilitätsberechnungen sowie die Modellversuche haben die grundsätzliche Machbarkeit einer gezielten Erosion sowohl des Damms mit Dichtungskern als auch des Damms aus Feinsand aus geotechnischer und hydraulischer Sicht bestätigt.

Es sei jedoch anzumerken, dass zur Gewährleistung einer genügenden Böschungsstabilität der Wasserseite der Böschungsschutz einen Reibungswinkel von $\varphi' > 45°$ aufweisen muss. Dieser Wert kann mit einem gewaschenen und gebrochenen Schotter erreicht werden, wenn dieser beim Einbau gut verdichtet werden kann. Die Einbaumethode ist entsprechend zu wählen und, falls ein genügender Verdichtungsgrad nicht erreicht wird, ist die wasserseitige Böschungsneigung zu reduzieren.

Der ermittelte Wert der Durchsickerung ist bei der Variante Damm aus Feinsand (q = 21 ml/s/m) ca. 10-mal höher als bei der Variante Damm mit Dichtungskern. Der Damm ohne Kern ist somit einer grösseren Beanspruchung durch Sickerwasser ausgesetzt. Damit keine innere Erosion eintritt, ist besonders bei dieser Variante auf die Einhaltung der Filterbedingungen zu achten. Dabei ist eine Entmischung des Filtermaterials durch eine geeignete Einbaumethode und einen günstigen Einbauwassergehalt zu vermeiden.

Die relativ kleinen Abmessungen des erodierbaren Damms stellen grosse Anforderungen an die Bauausführenden. Eine gute Verdichtung ist unerlässlich, damit lassen sich die Verformungen minimieren, die Durchlässigkeit herabsetzen sowie die erforderlichen Werte der Scherfestigkeit erreichen.

Die Erosion des Dammes erfolgte bei allen durchgeführten Versuchen zuverlässig und kontrolliert. Der Erosionsstart verlief für beide Varianten ähnlich. Der

Böschungsschutz begann bei einer Überströmhöhe von wenigen Zentimetern ein erstes Mal zu rutschen, stabilisierte sich aber bis zum weiteren Wasserspiegelanstieg wieder. Die eigentliche Erosion setzte bei einer Überströmhöhe von ca. 5–7 cm ein.

Eine vollständige Erosion konnte weder beim Damm mit Dichtungskern noch beim Damm aus Feinsand garantiert werden. Beim Damm mit Dichtungskern wurde der Damm nur in einzelnen kleinmassstäblichen Versuchen komplett erodiert. Bei den 1:1-Versuchen blieb ein Reststück des Kerns mit einer Höhe von ca. 30 cm stehen. Der Damm aus Feinsand erodierte bis auf die Höhe des Dichtungskeils. Für den untersuchten Keil von 25 cm lag die Dammhöhe im stabilen Endzustand somit ähnlich hoch wie beim Damm mit Dichtungskern. Durch die Verkleinerung des Dichtungskeils bzw. die Verwendung eines Dichtungsteppichs kann die Höhe des verbleibenden Dammreststückes beim Damm aus Feinsand aber weiter reduziert werden.

Bild 12 zeigt den im Modell ermittelten Erosionsverlauf der beiden Varianten im 1:1-Versuch. Während der Damm mit Dichtungskern stufenweise erodierte – auf Phasen mit schneller Erosion infolge Abbrechen eines Kernstücks folgten Phasen mit einer konstanten Dammhöhe, bis der Kern wieder ausreichend unterspült und destabilisiert war, um ein nächstes Mal abzubrechen – erfolgte die Erosion des Damms aus Feinsand kontinuierlich mit einer gleichmässigen Erosionsgeschwindigkeit. Die Erosionszeit bis zum Erreichen des stabilen Endzustandes betrug für den Damm mit Dichtungskern ca. 4 bis 7 min und für den Damm aus Feinsand knapp 3 min. Für den Damm mit Dichtungskern wurde zudem eine dreidimensionale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Bresche von ca. 1 m/min ermittelt. Der Damm aus Feinsand wird eine schnellere seitliche Erosionsgeschwindigkeit aufweisen.

Die Erosionszeit in Natur ist massgeblich von der Bausausführung, dem Wasserstand in der Aare sowie von Unterhalt und Bewuchs abhängig. Da der Damm mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht über seine gesamte Länge von 300 m überströmt wird, sind zudem die Anordnung und Anzahl an Initialbreschen für die Erosionsgeschwindigkeit massgebend. Zuerst erfolgt die vertikale Erosion bei den vorgesehenen Initialbreschen und danach die laterale Erosion. Die Erosionsgeschwindigkeit kann somit durch die Anzahl der Initialbreschen gesteuert werden.

Beide Dammaufbauten erfüllen generell die gestellten Anforderungen an Dichtigkeit und rasche Erosion. Im vorliegenden Fall des Hagneckkanals, bei dem der erodierbare Damm einerseits nur selten eingestaut ist und andererseits nur kleine Abmessungen aufweist, entschied sich der Auftraggeber aufgrund der positiven Versuchsresultate im Konsens mit der VAW und dem IGT für die Variante des Dammes aus Feinsand. Dieser erlaubt insbesondere einen einfacheren und damit wirtschaftlicheren Bau des erodierbaren Dammes, ohne dabei dessen Funktionalität einzuschränken.

Der Dammaufbau mit Dichtungskern, wie er aus der Literatur bekannt ist, zeichnet sich insbesondere durch eine höhere Dichtigkeit aus. Zudem ist der Aufbau praktisch beliebig nach oben skalierbar. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet er sich insbesondere für höhere Dämme mit häufigem Einstau, z.B. als Notentlastung bei Stauanlagen.

Die Untersuchung konnte somit bestätigen, dass erodierbare Dämme für unterschiedliche Anwendungsbereiche eine zuverlässige und naturnahe Massnahme zur Bewältigung des Überlastfalls darstellen. Die Ausführungsart kann dabei den örtlichen Gegebenheiten und Bedürfnissen angepasst werden. Der Erosionsprozess kann sehr gut vorausgesagt werden. Die exakte Erosionsdauer stellt hingegen eine Unsicherheit dar, da sie von den effektiven Einbauverhältnissen und dem Zustand des Dammes infolge Verwitterung und Bewuchs abhängig ist. Ein kontinuierlicher Unterhalt des Dammes ist daher unerlässlich.

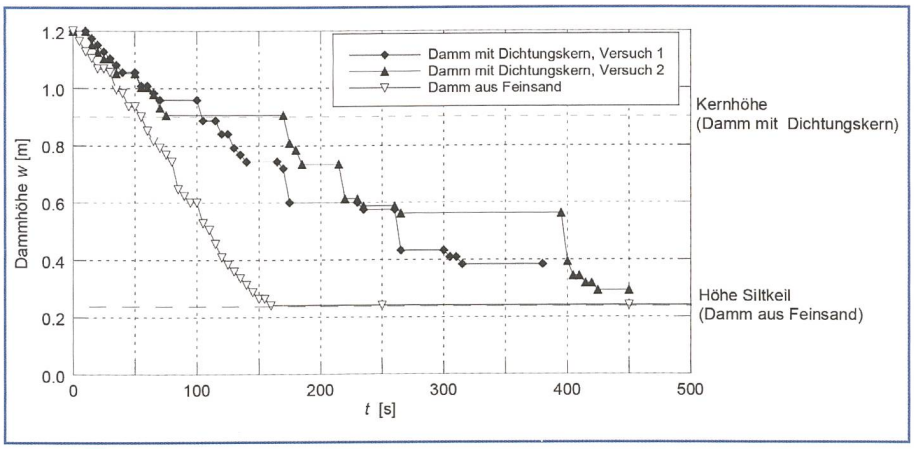


Bild 12. Erosionsverlauf des Damms mit Dichtungskern und des Damms aus Feinsand in den 1:1-Versuchen.

Danksagung

Die VAW und das IGT bedanken sich beim Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern für den Auftrag sowie beim Geoplan Team Hutzli Kluser für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

Chee, S.P., Zaghloul, N.A. (1971). Erosion of fuse plug embankments. Transaction of the engineering institute of Canada 14 (1), 1–4.

Engels, E.T., Sheerman-Chase, A. (1985). Design and operation of a fuse-plug spillway in Swaziland. Water Power and Dam Construction 37 (6), 26–28.

Gosschalk, E.M. (1988). Reservoir Engineering : Guidelines for practice. Thomas Telford Books, Reston, USA.

Khatsuria, R.M. (2005). Hydraulics of spillway and energy dissipators. Dekker, New York, USA.

Projet DIFUSE Volet A, B, C et D/ CTI 4898.1 (2004). Digues fusibles et submersibles pour la protection contre les crues. Projektberichte. Laboratoire de Constructions Hydrauliques – EPFL, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, Ecole d'ingénieurs de Genève.

Pugh, C.A. (1985). Hydraulic model studies of a fuse plug embankment. REC-ERC-85-7, USBR, USA.

USBR (1987). Guidelines for using fuse plug embankments in auxiliary spillways. U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, USA.

VAW (2010). Erodierbarer Damm Hagneckkanal: Hydraulische Modellversuche und Geotechnische Beurteilung. Projektbericht, unveröffentlicht.

Anschrift der Verfasser

Esther Höck, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092 Zürich, schmocker@vaw.baug.ethz.ch

Pierre Mayor, Institut für Geotechnik (IGT), ETH Zürich, CH-8093 Zürich

H. Erne Metallbau AG

CH-5316 Leuggern, Steiächer

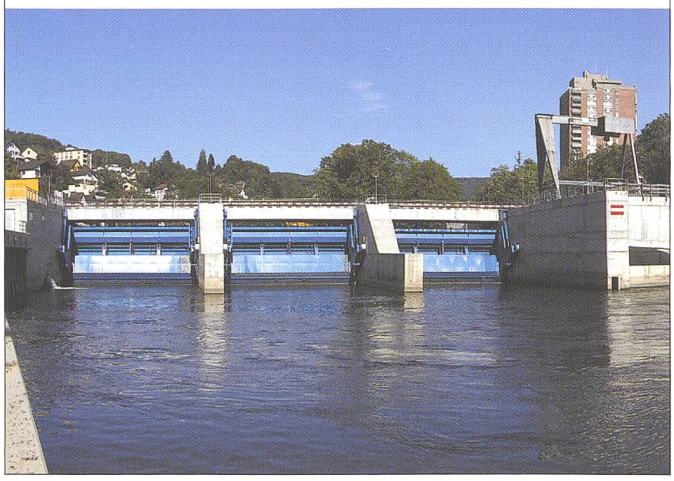
Tel. +41 56 268 00 20 • Fax +41 56 268 00 21 • erne@h-erne.ch

www.h-erne.ch

Metall-/Stahlbau • Stahlwasserbau
Sonderkonstruktionen • Umwelttechnik
Anlage- und Apparatebau • Montagen/Revisionen

Wir sind Spezialisten für den Stahlwasserbau

- Wehranlagen
- Druckleitungen
- Rechenanlagen
- Gleitschützen
- Notverschlüsse
- Schlauchwehre
- Revisionen



Für Informationsfluss in geordneten Bahnen.

buag-Kommunikations-Full-Service

Für die Konzeption und Realisation von Dokumentationen, Publikationen, Berichten und Broschüren steht Ihnen ein Team von Fachleuten mit einer nahtlosen Netzwerkstruktur zur Verfügung, die sich flexibel auf Umfang und Art Ihres Informationsprojektes einstellen können. Sie halten so Ihren Informationsfluss, aber auch Ihre Budgets in geordneten Bahnen. Informieren Sie sich unter www.buag.ch und verlangen Sie die Broschüre «Die Kommunikation der Information» oder rufen Sie einfach Tel. 056 484 54 54 an.

HSR
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL
FHO Fachhochschule Ostschweiz

SITEC – Ihr Kraftwerks-Institut

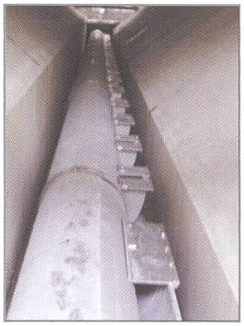
Forschung und Entwicklung für Sicherheit im Betrieb

Institut für Anlagen- und Sicherheitstechnik **SITEC**
Prof. Jürg Meier — juerg.meier@hsr.ch
Oberseestrasse 10 — CH-8640 Rapperswil
T ++41 (0)55 222 43 51 — ++41 (0)79 372 16 66
F ++41 (0)55 222 43 59 — www.sitec.hsr.ch

Wir liefern:

für ***Mess-, Endschalter-*** und ***Wegmessmodule***:
Engineering und komplette Fertigungsunterlagen für die Sicherheit und Produktivität Ihrer Anlagen

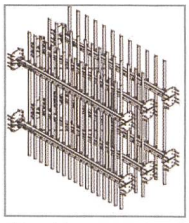
für ***Entsanderanlagen*** System HSR:
Engineering, patentierte Abzüge, Spülschieber, Sedimentmessungen, Beruhigungsrechen

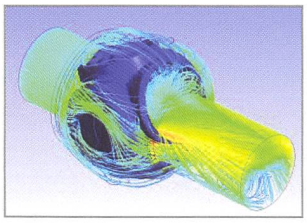

Entsander-Neuanlage

Messmodul

Wir leisten Engineering für Betreiber und Hersteller:

Konstruktion, Statische und dynamische Überprüfungen, Bemessungen, Antriebskräfte, Strömungssimulationen, Sanierungsvorschläge, Ausschreibungen, Qualitätssicherungen / Abnahmen, Sicherheit nach MRL 2006/42/EG und DIN 19704, weitere Unterstützungen


Beruhigungsrechen


Konstruktion gemäss MRL 2006/42/EG

Wir bilden aus:

Kurs ***Betriebsführung und Instandhaltung***
Kurs ***Stahlwasserbau*** (Abschlussorgane, Druckleitungen, usw.)

Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Association suisse pour l'aménagement des eaux
Associazione svizzera di economia delle acque

Zertifiziertes Managementsystem SQS ISO 9001

Ihr Kraftwerks – Institut
auf dem Stand der Technik
praxisorientiert & unabhängig

Entwicklung Engineering Prüfingenieure **SITEC**