Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 87 (1995)
Heft: 11-12

Artikel: Optische Vermessung von extrem instationären Wasserströmungen
Autor: Lauber, Guido / Hager, Willi H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940447

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: 23.08.2025

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

Optische Vermessung von extrem instationären Wasserströmungen

Guido Lauber und Willi H. Hager

Kurzfassung

Es wird ein vollautomatisches optisches Messsystem zur Erfassung der Wasserstände in extrem instationären Strömungen vorgestellt. Das System besteht grossteils aus Standardkomponenten, wie sie auf dem Elektronikmarkt angeboten werden. Die Anwendung wird am Beispiel der Talsperrenbruchwelle erläutert.

Abstract: Optical measurement of extremely unsteady open channel flows

An optical measurement system is presented which records flow profiles in extremely unsteady open channel flows. All components of the system are commercially available. The application is illustrated with the Dam-Break Wave.

Einleitung

Instationäre Strömungen besitzen die Eigenschaft, die Abflusstiefe nach Ort und Zeit in erheblichem Masse zu variieren. Bei der Talsperrenbruchwelle zum Beispiel (Bild 1) läuft eine Flutwelle mit hoher Geschwindigkeit durch ein natürliches oder kanalisiertes Bett und lässt an einem unterwasserseitigen Gerinnequerschnitt den Wasserspiegel sprunghaft ansteigen. Zum besseren Verständnis solcher Strömungen und um diesbezügliche Berechnungsgrundlagen bereitstellen zu können, sind oftmals Messungen notwendig.

Da diese Vorgänge in der Natur nur sehr selten und dann meist unerwartet auftreten, werden Untersuchungen an einem zum Naturmassstab verkleinert nachgebildeten physikalischen Modell vorgenommen. Die Übertragbarkeit der so gefundenen Ergebnisse auf den Naturmassstab, d.h. das Ausschliessen sogenannter Massstabseffekte, muss sichergestellt werden.

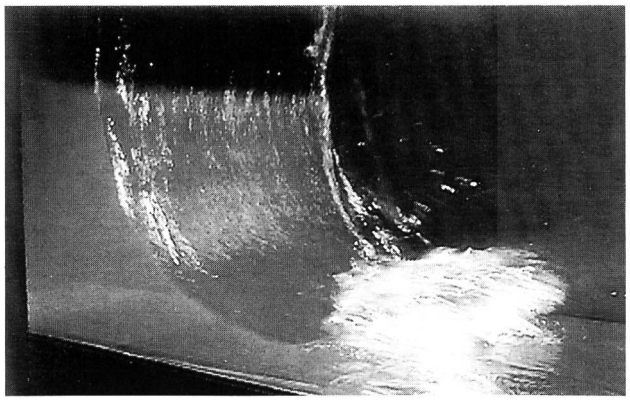
An der VAW wurde ein bis 50 % Gefälle neigbarer, 14 m langer und 0,5 m breiter Kanal gebaut, auf dem die Talsperrenbruchwelle untersucht werden soll. Die Talsperre wird durch eine druckluftbetriebene Aluminiumschütze simuliert, welche beim «Bruch» mit hoher Geschwindigkeit vertikal nach oben katapultiert wird. Eine Flutwelle breitet sich infolgedessen im Modell mit Frontgeschwindigkeiten von bis zu 9 m/s aus. Ohne die Strömung durch Messgeräte stören zu müssen, braucht es zur präzisen Erfassung der Wasserstände ein berührungsloses, effizientes und schnelles Messsystem.

Durch die Fortschritte der Elektronikindustrie in den vergangenen Jahren sind heute Messverfahren als anwenderfreundliche Alternativen vorhanden, welche noch vor wenigen Jahren der riesigen Datenmengen wegen nicht konkurrenzfähig waren. Die digitale Bildverarbeitung stellt heute, als einer dieser Bereiche, eine ausgereifte Grundausstattung für die Vermessung von Videoaufnahmen zur Verfügung, welche sich auch dank dem weiten Einsatzspektrum einer stetig steigenden Nachfrage erfreut.

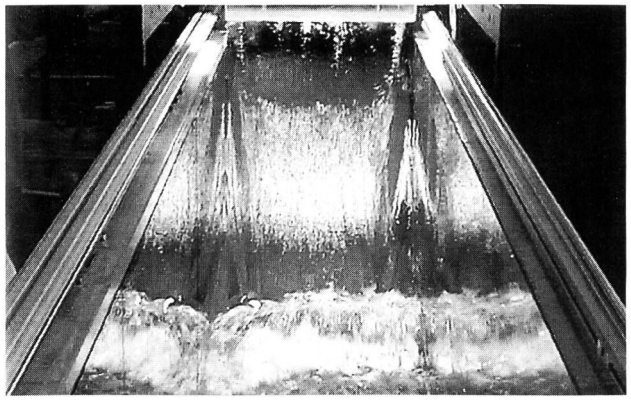
Versuchsablauf

Eine Videokamera wird am Versuchskanal entsprechend Bild 2 positioniert. Gleichzeitig mit dem Öffnungsmechanismus wird auch die Bildaufnahme gestartet, d.h. das erste Video-Bild wird exakt mit dem Auslösezeitpunkt des «Talsperrenbruchs» synchronisiert. Damit ist die Zeit als wichtiger Parameter mit dem Bildzähler bereits direkt bei den Aufnahmen festgehalten. Die Kamera nimmt nun in einem vorgegebenen Zeitraum mit wählbarer Frequenz Bild für Bild auf. Jedes dieser Bilder wird in Echtzeit vom Framegrabber digitalisiert und in den Arbeitsspeicher des PC geladen. Mit einem Datenverwaltungsprogramm werden die Bilder auf der Festplatte abgelegt und stehen dort zur eigentlichen Bildverarbeitung bereit. Für die Auswertung wurde ein «Makro» in der Programmiersprache «Visual Basic» geschrieben, welches die routinemässigen Arbeitsschritte effizient erledigt. Die vom Bildverarbeitungsprogramm gelieferten Daten werden direkt in eine Excel-Datei gespeichert.

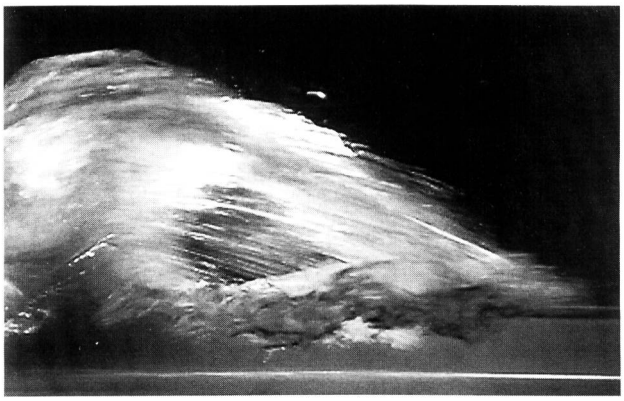
In den folgenden Abschnitten sollen nun die einzelnen Schritte der Vermessung detailliert beschrieben werden.



a)

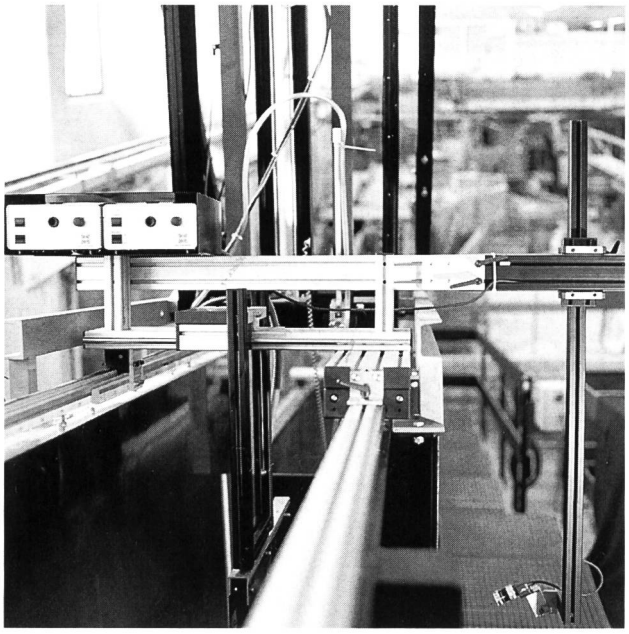


b)

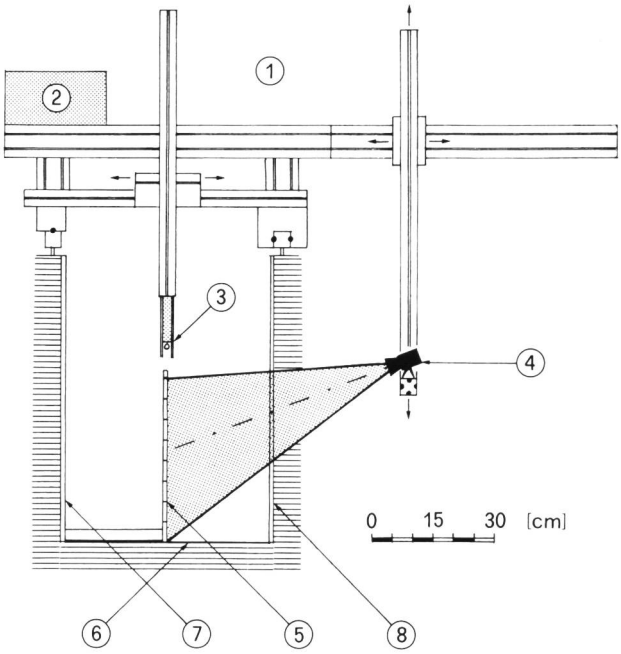


c)

Bild 1. Extrem instationäre Strömungen am Beispiel der Talsperrenbruchwelle.
a) Seitenansicht, b) Frontansicht, c) Längsschnitt durch die Frontwelle.



a)



b)

Bild 2. Versuchsanordnung des Vermessungssystems.
a) Ansicht Messanlage, b) Querschnitt Messanlage: 1 Messwagen, 2 Kaltlichtquelle, 3 Linienlicht, 4 Video-Kopfteil, 5 Strichmaske in Kanalachse, 6 Kanalboden (PVC schwarz), 7 Kanalrückwand (PVC schwarz), 8 Kanalfrontseite (Glas).

Bildaufnahme und Bildverwaltung

Bei der Videokamera setzen wir einen Interline-Transfer-CCD-Bildwandler XC-77RR von Sony ein. Sie besteht aus einem Kamera-Kopfteil und einer über Kabel verbundenen Steuereinheit. Es kann zwischen Halb- und Vollbildern und einer Belichtungszeit von $^1/_{60}$ bis $^1/_{10000}$ s gewählt werden. Die Kamera liefert nach Videostandard 25 Vollbilder pro Sekunde. Zur Aufnahme von sehr schnellen Vorgängen erlaubt sie aber auch das Umschalten auf den Halbbildmodus. Hier wird nur jede zweite Bildzeile gelesen, dafür können bis 50 Aufnahmen pro Sekunde gemacht werden.

Dieser Kameratyp zeichnet sich beim mobilen Einsatz entlang eines Kanals neben den technischen Vorzügen auch dadurch aus, dass einzig der 44 mm lange und knapp 200 g leichte Kamerakopf mitbewegt werden muss. Dieser ist auf einer präzisen Linearführung der Marke ITEM montiert und kann darauf bequem von einem Querschnitt zum nächsten gefahren werden.

Zur Aufnahme und Archivierung der Bilder wird eine von der Imagic AG unter dem Namen «Image Access» angebotene Software benutzt, welche in unserem speziellen Fall einiger Anpassungen bedurfte.

Dieses Programm erlaubt es, den PC als virtuellen Videorecorder einzusetzen. Es können Bilder, welche von der Videokamera aufgenommen werden, in Echtzeit digitalisiert und im Arbeitsspeicher zwischengelagert werden. Der «Videorecorder» kann komfortabel per Maus auf der graphischen Benutzeroberfläche bedient werden und verfügt über folgende Funktionen: «Aufnahme», «Stop», «Einzelbildschaltung vor», «Einzelbildschaltung zurück» und «Zeitlupe» mit wählbarer Bildfrequenz. Zudem kann man aus einer Vielzahl von Bildformaten im Halb- oder Vollbildmodus auswählen. Durch die Koppelung von Bildaufnahme und Öffnung der Schütze werden beide Funktionen durch Betätigung der Bildaufnahmetaste synchron gestartet. Sind einmal eine vorbestimmte Anzahl Bilder im Arbeitsspeicher des PC zwischengelagert, können diese am Monitor einzeln oder als Sequenz begutachtet werden. Die gewünschten Aufnahmen sind durch einfaches Anklicken mit der Maus bequem auf der Festplatte abzulegen. Bei grösseren Bildmengen erweist sich auch die automatische Bildnumerierung als hilfreich. Eine übersichtlich gestaltete Benutzeroberfläche erleichtert zudem die Verwaltung und Zuordnung verschiedener Bildserien in vom Benutzer definierbare Datenmappen.

Jeder Versuch, die Bildverarbeitung als Messsystem einzusetzen, steht und fällt mit der Beleuchtung. In unserem Fall möchten wir die Flutwelle entlang der Kanalachse vermessen, denn hier ist die Strömung am wenigsten durch Randeinflüsse wie Reibung und Oberflächenspannung gestört. Mit einem Linienlicht der Firma Volpi AG lässt sich hierzu ein dünner Lichtschnitt durch die Strömung legen. Wir erzeugen damit quasi einen Längsschnitt der Welle.

Der Kontrast zwischen der beleuchteten Linie und dem Hintergrund wird zusätzlich durch zwei Massnahmen verbessert. Einerseits wird das Wasser mit «Fluorescein» grün eingefärbt, wodurch der vom Linienlicht beleuchtete Teil stärker reflektiert. Andererseits wird der zu vermessende Kanalabschnitt durch Abdeckplatten vor Tageslicht geschützt, was den nicht direkt beleuchteten Teil zusätzlich abdunkelt. Bild 3a zeigt eine daraus resultierende Aufnahme, wie sie zur Vermessung gelangt.

Bildvermessung

Die Auswertung der Aufnahmen wird mit dem Bildverarbeitungsprogramm «KS 400» der Firma Kontron Elektronik GmbH vorgenommen. Dieses Softwarepaket bietet von automatischer Kantendetektion bis zu den Fast-Fourier-Transformationen (FFT) alles, was zur professionellen Bildanalyse notwendig ist.

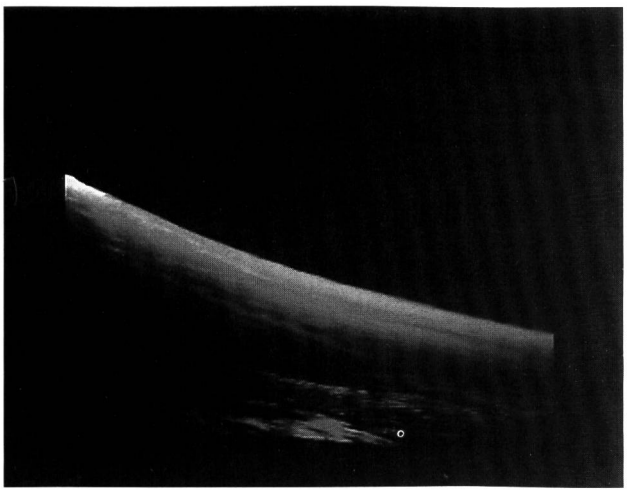
Die Bilder werden zuerst durch verschiedene Funktionen bearbeitet und schliesslich in eine binäre Form gebracht. Die gewünschten Längen können in der Einheit Pixel (Bildpunkte) automatisch vermessen werden. Zur Umrechnung der Anzahl Pixel in ein Längenmass (mm) braucht es ein Eichmass, welches direkt als Verhältnis mm/Pixel oder graphisch über ein Eichbild eingegeben werden kann.

Wie man aus Bild 2 entnehmen kann, ist die Kamera über der Wasseroberfläche angeordnet. Dies ist notwendig, da-

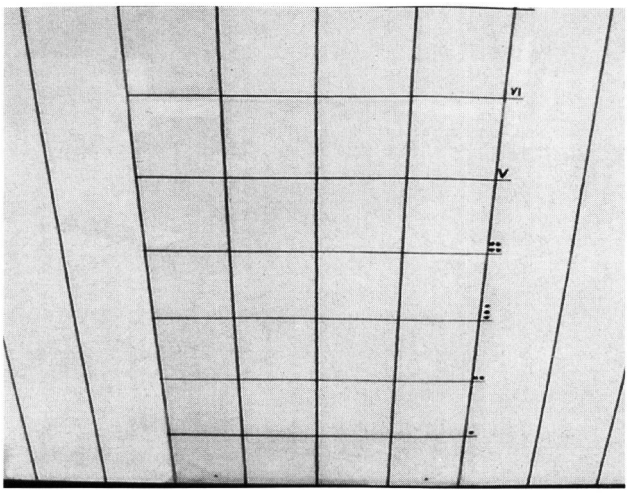
mit bei schwankendem Wasserspiegel die zu vermessende Linie an der Wasseroberfläche nicht einmal durch die Luft und ein anderes Mal durch das Wasser aufgenommen wird. Ansonsten müsste im zweiten Fall bei der Vermessung die unterschiedliche Brechung der Lichtstrahlen berücksichtigt werden. Um trotzdem den vollen Bildausschnitt der Kamera auszunützen, muss deren optische Achse gegenüber der Horizontalen leicht geneigt werden.

Aus dieser Schiefstellung resultiert aber eine aus vermessungstechnischen Gründen unangenehme perspektivische Ansicht der zu vermessenden Schnittfläche. Wie aus Bild 3b ersichtlich, liegen einerseits die Messquerschnitte im Längsschnitt gegeneinander «schräg» und andererseits führen sie bei der Vermessung von vertikalen Längen zu einer nichtlinearen Skalierung. Diese zwei Probleme wurden wie folgt gelöst:

- Die Messquerschnitte werden mit einer Strichmaske definiert (Bild 3b). Die Höhen müssen dann vom Schnittpunkt Wasseroberfläche/Strichmaske senkrecht zur Sohle vermessen werden.
- Für die nichtlineare Beziehung zwischen der Anzahl Pixel auf dem perspektivischen Bild und der gesuchten Höhe h (cm) kann auf empirischem Weg eine quadratische Funktion der Form



a)



b)

Bild 3. Vermessung der Welle.
a) Längsschnitt einer mit Linienlicht beleuchteten Welle, b) Strichmaske mit 50-mm-Raster (perspektivisch).

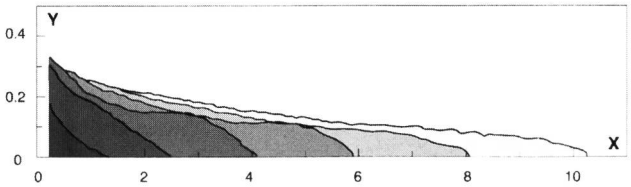


Bild 4. Talsperrenbruchwelle bei Kanalgefälle J_s = 20 % auf hydraulisch glatter Sohle. Stauhöhe h_0 = 600 mm und Zeitschritt Δt = 240 ms; mit $Y = h/h_0$ und $X = x/h_0$.

$$p = a\,h^2 + b\,h \qquad (1)$$

mit p als Anzahl Pixel und a bzw. b als zu bestimmende Faktoren formuliert werden.

Ein Vorteil dieser Methode liegt darin, dass zur Vermessung die genaue Kameraposition nicht bekannt sein muss. Durch das Eichbild können nämlich die auf den Messquerschnitten liegenden Bildpunkte direkt einer Koordinate zugeordnet bzw. umgerechnet werden. Die Kamera bzw. die optische Achse muss einzig die Kanalachse im rechten Winkel schneiden, damit keine Verzerrungen auftreten. Dies ist aber anhand des Eichbildes recht einfach kontrollierbar.

Da sich die optische Geometrie durch Verschieben des Kamerakopfes von einem Schnitt zum andern nicht verändert, ist nur eine Eichfunktion und ein Strichmaskenbild nötig. Kleine Verdrehungen beim Versetzen führen unter Umständen am Kanalboden zu einer Verschiebung der Nullinie. Diese wird aber in jeder Kameraposition durch Vermessen der Lichtlinie auf trockener Kanalsohle neu bestimmt.

Alle Funktionen der Bildverarbeitung und der Vermessung sind in einem «Makro» programmiert, so dass jeweils eine Serie Bilder automatisch bearbeitet und die gesuchten Daten geliefert werden. Die erhaltenen Resultate können ebenfalls über das «Makro» in eine Excel-Datei geschrieben werden und liegen dort zur Auswertung bereit.

Talsperrenbruchwelle als Beispiel

Es werden im genannten Projekt die Wasserstände einer Talsperrenbruchwelle in Abhängigkeit von Kanalneigung und Sohlenreibung untersucht. Sind die Abflusstiefen nach Zeit und Ort mit einer wählbaren Diskretisierung bekannt, können daraus verschiedene Parameter wie Durchfluss oder Frontgeschwindigkeiten abgeleitet werden.

Zur Quantifizierung der Talsperrenbruchwelle werden alle 50 mm etwa achtmal pro Sekunde die Wasserstände erfasst. Der Abstand zwischen Kamera und Kanal wurde so gewählt, dass pro Kameraposition ein Bereich von 20 cm oder 5 Messquerschnitten abgedeckt wird. Dies auch mit Rücksicht auf die Messgenauigkeit, welche aufgrund der beschränkten Kameraauflösung mit zunehmendem Abstand abnimmt.

Eine mögliche Darstellungsform der Daten zeigt Bild 4. Die Werte gelten bei einer Kanalneigung von 20 % auf hydraulisch glatter Sohle. Auf der Ordinate ist der Relativabstand zur Schütze $X = x/h_0$ mit der Stauhöhe h_0 dimensionslos gemacht und auf der Abszisse die entsprechende dimensionslose Abflusstiefe $Y(t) = h(t)/h_0$ aufgetragen. Die Zeitschritte zwischen den verschiedenen Kurven betragen jeweils Δt = 240 ms, d.h. t [ms] = 240, 480, ..., 1440, was mit der Ähnlichkeit nach *Froude* bei einer Stauhöhe von h_0 = 600 mm und der Erdbeschleunigung g = 9,81 m/s² das dimensionslose Zeitintervall $\Delta T = \Delta t \times \sqrt{g/h_0} = 0{,}240 \times \sqrt{9{,}81/0{,}60} \approx 1$ ergibt.

Schlussfolgerungen

Die störungsfreie Vermessung von extrem instationären Wasserströmungen, wie sie beim Bruch einer Talsperre auftreten, stellt hohe Anforderungen an ein Messsystem. Das vorgestellte Bildvermessungssystem eignet sich vorzüglich zur quantitativen Erfassung von solchen nach Ort und Zeit rasch variierenden Abflüssen. Das an der ETH entwickelte Verfahren wird beschrieben und durch ein Beispiel erläutert.

Verdankungen

Die Firma Imagic AG, Glattbrugg ZH, hat die gesamte Messanlage inklusive Hard- und Software zusammengestellt. Die Software, namentlich das «Image Access», ist eine Eigenentwicklung der Firma. Wir möchten uns bei *Robert Schürmann* und *Urs Gomez* für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Der Messwagenaufbau mit den Linearführungen System ITEM wurde von der Firma Zihlmann Systembau, Würenlos AG, hergestellt und montiert. Hier möchten wir uns bei *W. Wachter* für die stets effiziente und angenehme Zusammenarbeit ebenfalls bedanken.

Adresse der Verfasser: dipl. Bau-Ing. ETH/SIA *Guido Lauber* und PD Dr. *Willi H. Hager,* dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, VAW, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.

Sanierung der Reaktordeponie Mühletobel-Kehlhof in Berg TG

Deponieoberflächen-Abdichtung mit einer Tondichtungsbahn

Peter Winiger

Seit der Wiederinbetriebnahme der Deponie wurden bereits 1,6 Mio Franken in die Sanierung und den Ausbau der Deponie durch den «Zweckverband Kehlhof» investiert. Die Bauherrschaft hat für die Planung der Sanierungs- und Erweiterungsarbeiten das Ingenieurbüro Meier und Partner AG, Weinfelden, beauftragt.

Damit wird für die nächsten Jahre die Entsorgung des Deponiegutes in der Region sichergestellt.

Bild 1. Verlegung der Dichtungsmatte Bentofix D 4000 direkt auf der Gasdränage aus Glassand.

Bild 2. Kantenabspachtelung der Dichtungsmatte Bentofix D 4000.

Da der alte Deponieteil keine Basisabdichtung hat, wird der vorhandene Abfallkörper schon heute mit einer Oberflächenabdichtung versehen. Diese Oberflächenabdichtung muss den Randbedingungen in bezug auf Gas- und Wasserdichtigkeit, Setzungen, Abdichtung in Etappen usw. entsprechen.

Das eingesetzte Oberflächen-Abdichtungssystem Bentofix D 4000 besteht aus einer faserarmierten, mineralischen Tondichtungsbahn im Sandwich-Prinzip zwischen zwei Vliesstoffen. Dabei dient als Dichtungskern eine Schicht Natrium-Bentonit in Pulverform.

Die Abdichtung hat die gleichen Dichtigkeitswerte wie eine mehrere Dezimeter dicke Lehmschicht, ist jedoch nur rund 2 cm dick. Das System weist neben dem Volumengewinn den Vorteil auf, dass es unter Baustellenbedingungen und ohne Spezialgeräte einfach verlegt werden kann. Zudem ist es setzungsunempfindlich und der Einbau weitestgehend witterungsunabhängig.

Im Kehlhof wird diese Abdichtungsbahn über einer Schicht aus Glassand eingebaut, welche der Deponieentgasung dient. Der Glassand besteht aus gemahlenem Flaschenglas aus den Sammelcontainern der Gemeinden. So ist es möglich, ein lokales Abfallprodukt beim Bau sinnvoll einzusetzen. Zur gezielten Ableitung des Niederschlagswassers liegt direkt auf der Dichtungsbahn als Flächendränage die Dränmatte Secudrän 316 DS 600. Diese weist ein Flächengewicht von 1200 g/m^2 auf, das Wirrgelege wird stumpf verlegt, und die überstehenden Vliesstoffstreifen bildet die Überlappung und den Verbund der einzelnen Bahnen.

Auf den abgedichteten Flächen wird direkt auf die Flächendränage eine ein bis zwei Meter dicke Bodenschicht aufgebracht, worauf einerseits Bachgehölze, andererseits landwirtschaftliche Flächen entstehen.

Die Sanierung der Deponie läuft in den nächsten Jahren weiter. Dazu wird das Waldtobel nördlich der Deponie gerodet. Nach dessen teilweiser Auffüllung mit sauberem Aushub wird es möglich, dass der zurzeit eingedolt unter der Deponie hindurchfliessende Bach wieder an die Oberfläche geholt werden kann. Ein Teil des neuen Bachlaufs wurde bereits am Ostrand der Deponie erstellt. Die neue Bachstrecke endet mit einem Wasserfall, der im Endzustand eine stattliche Höhe von neun Metern aufweisen wird.

Die Deponie ist jeweils vormittags geöffnet und betreut. Besichtigungen sind auf Voranmeldung hin möglich.

Adresse des Verfassers: *Peter Winiger,* gbu Öko-Handels AG, Schuppisstrasse 13, Postfach, CH-9016 St. Gallen.