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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 103 (2011)

Heft: 2

Artikel: Entladung von Stauseen über Triebwasserfassungen durch Aufwirbeln der Feinsedimente mit Wasserstrahlen

Autor: Althaus, Jolanda Jenzer / De Cesare, Giovanni / Schleiss, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941803

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

Entlandung von Stauseen über Triebwasserfassungen durch Aufwirbeln der Feinsedimente mit Wasserstrahlen

Jolanda Jenzer Althaus, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Die Stauraumverlandung gefährdet weltweit die nachhaltige Nutzung der für die Wasser- und Energieversorgung wichtigen Stausseen. Im Rahmen einer Forschungsarbeit wurde eine neue effiziente Methode zur kontinuierlichen Austragung von Feinsedimenten aus dem Stausee über die Triebwasserfassungen entwickelt. Das Schwergewicht liegt dabei auf dem Austrag der Feinsedimente im Bereich der Auslassorgane bei der Talsperre wo die Sedimente regelmässig in bedeutenden Schichten durch Trübeströme abgelagert werden. Um die Sedimente in die Wasserfassung einziehen zu können, müssen diese vor dem Einlauf dauernd in Suspension gehalten werden. Dazu wird eine Aufwärtsströmung resp. eine entsprechende Turbulenz im Bereich der Fassung benötigt welche die von Trübeströmen antransportierten Feinsedimente am Absetzen hindert. Eine Aufwärtsströmung kann erfolgreich durch Wasserstrahlen mit einer bestimmten Düsenkonfiguration erzeugt werden. Die Strahlen können falls vorhanden mit Wasser von Überleitstollen betrieben werden, welches in vielen Fällen als Wasserfall ungenutzt in den Stausee fällt. Dieses neue Konzept wurde systematisch mit hydraulischen Modellversuchen in einem rechteckförmigen Reservoir überprüft und optimiert. Eine kreisförmige Wasserstrahlanordnung erwies sich dabei als sehr effizient hinsichtlich des Sedimentaustrags. Mit einer optimalen Anordnung der Düsen liess sich auf die Versuchsdauer im Vergleich ohne diese Entlandungsmassnahme die doppelte Sedimentmenge durch die Fassung austragen. Dabei konnte ein Strömungsfeld wie bei einem axialen Mixer generiert werden, welches in der Literatur als sehr vorteilhaft für Suspension angegeben wird. Mit numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, wie die Rotationszellen des axialen Strömungsbilds in einem verlängerten Reservoir unabhängig von dessen Rückwand begrenzt werden. Für praktische Anwendungen ist dieses Resultat sehr erfolgversprechend, da damit erhebliche Feinsedimentvolumen kontinuierlich über die Triebwasserfassung ausgetragen werden könnten. Eine erste Anwendungsskizze für den Stausee Mauvoisin zeigt, dass nur 7% der jährlich in den Totraum des Stausees transportierten Sedimente mittels Wasserstrahlen ausgetragen werden müssten, damit eine solche Wasserstrahlanlage wirtschaftlich wäre. Selbst mit diesem relativ geringen Austrag könnte der Bereich vor der Wasserfassung nachhaltig freigehalten werden. Die maximalen Konzentrationen bleiben in der Grösse derjenigen der Trübeströme, das heisst etwa 5 g/l. Die Wasserstrahlen werden durch die Vermischung die Konzentration eher noch verringern, so dass die Abrasion an den Turbinen sowie Probleme der Ökologie im Unterwasser beherrschbar sein sollten. Bei einer jährlichen Turbinierwassermenge von 100 Mio. m^3 könnten beispielsweise jährlich 100 000 t Feinsedimente aus einem Stausee abgeführt werden, falls mit einer kreisförmigen Wasserstrahlanordnung dauernd in der Nähe der Fassung eine Konzentration von 1 g/l aufrecht erhalten werden kann.

Résumé

Evacuation des sédiments fins d'un réservoir à travers la prise d'eau par la mise en suspension à l'aide de jets. *L'alluvionnement des réservoirs menace globalement l'utilisation durable des réservoirs importants pour l'alimentation en eau et en énergie. Le présent travail de recherche inclue le développement d'une nouvelle méthode efficace d'évacuer de façon continue les sédiments fins du réservoir à travers la prise d'eau. L'accent a été mis sur l'évacuation des sédiments fins aux alentours des organes près de la digue où les sédiments sont régulièrement déposés par des courants de densité dans des couches considérables. Afin de faire entrer les sédiments dans la prise d'eau ils doivent être maintenus en suspension devant l'entrée de celle-ci. Pour ce faire un écoulement montant, respectivement une turbulence correspondante est nécessaire près de la prise d'eau empêchant la déposition des sédiments fins apportés par les courants de densité. Un écoulement montant peut avec succès être généré par des jets d'eau arrangés dans une configuration spécifique. Les jets peuvent être alimentés par de l'eau des affluents, si disponibles. Actuellement, dans beaucoup de cas cette eau se jette non utilisée dans le réservoir comme des chutes d'eau. Ce nouveau concept a été systématiquement testé et optimisé par des essais hydrauliques menés dans un réservoir rectangulaire. Un arrangement circulaire à jets s'est avéré très performant contre l'alluvionnement. Avec une configuration optimale le double taux de sédiments a été évacué en comparaison avec la situation sans jets sur la durée de l'essai. Le champ d'écoulement ainsi créé était identique à celui d'un mélangeur axial, ce qui dans la littérature, est connu pour être favorable à la mise en suspension. Des simulations numériques ont montré que les rotors du champ d'écoulement axial dans un réservoir rallongé s'étaient étendus indépendamment de la paroi arrière du réservoir. Pour des applications pratiques ce résultat est très prometteur puisque des volumes signifiants de sédiments fins pourraient continument être évacués à travers la prise d'eau. Un premier essai d'une implémentation de ces jets et une analyse économique lors d'une étude de cas de Mauvoisin ont montré que même si seulement 7% des sédiments annuellement apportés dans le volume mort du réservoir était évacué par les jets un arrangement circulaire serait économique. Même avec cette évacuation relativement modeste la zone proche de la prise d'eau pourrait être maintenue libre de sédiments. Les concentrations maximales n'excéderont pas celle des courants de densité, i.e. environ 5 g/l. Elles vont plutôt diminuer par l'écoulement introduit par les jets d'eau, de sorte que l'abrasion des turbines et les problèmes écologiques en aval seront contrôlables. Par exemple pour un volume d'eau annuellement turbinée de 100 millions m^3 environ 100 000 t de sédiments fins pourront être évacués du réservoir, au cas où dans la zone de la prise d'eau une concentration de 1 g/l pourrait être maintenue en permanence en suspension par un arrangement circulaire à jet.*

1. Einleitung

Die Stauraumverlandung wird für viele Kraftwerksbetreiber in naher Zukunft eine grosse Herausforderung. Das Nutzvolumen der Stauseen wird durch die Verlandung zunehmend reduziert, wodurch die nachhaltige Bereitstellung der Spitzenenergieproduktion gefährdet wird (Schleiss et al. 2010). Bei den bestehenden Stauseen wird die Verlandungsproblematik oftmals mit nur relativ befristet wirkenden Massnahmen angegangen um Betriebseinschränkungen zu vermeiden. Viele der Massnahmen werden aber mittelfristig ihre Wirksamkeit verlieren, so dass der nachhaltige Betrieb des Speicherraumes gefährdet ist. Die denkbaren Massnahmen gegen die Verlandung von Stauseen sind allgemein bekannt und können grundsätzlich in präventive und retroaktive Massnahmen eingeteilt werden (Schleiss & Oehy, 2002). Die meisten dieser Massnahmen können aber die nachhaltige Nutzung der Stauseen nicht garantieren. Die Verlandung kann oftmals nur mehr oder weniger wirksam verzögert werden. Es werden daher alternative und nachhaltigere Lösungskonzepte angestrebt.

Die Trübeströme spielen bei der Verlandung im alpinen Raum eine zentrale Rolle, da diese den grössten Anteil der Feinsedimente bei jährlichen Hochwassern von der Stauwurzel bis zur Talsperre transportieren. Es wurden deshalb schon verschiedene Gegenmassnahmen entwickelt um diese Trübeströme zu beherrschen (Schleiss und Oehy 2002, Oehy und Schleiss 2003).

Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit wurde eine neue, innovative Massnahme untersucht, welche darauf abzielt, die durch die Trübeströme transportierten Feinsedimente durch Zuführen von Fremdenergie in der Nähe der Talsperre und der Triebwasserfassung dauernd in Schwebe zu halten. Die neue Idee besteht darin den ankommenden Trübestrom mit Wasserstrahlen, welche mit am Stauseegrund installierten Düsen erzeugt werden, dauernd zu verwirbeln. Die Schwebstoffe können dann kontinuierlich mit dem Turbinierwasser abgeführt werden. Die Idee überzeugt, wenn man bedenkt, dass ca. 80% der in die tiefen Stauseen eingetragenen Sedimente im Bereich der Feinsedimente liegen (Alam 1999, Sin-niger et al. 1999).

Die im Folgenden vorgestellte Studie setzte sich deshalb zum Ziel die Sedimentkonzentration im Turbinierwasser im Vergleich zur heutigen Konzentration zu erhöhen (Jenzer Althaus 2011). Dazu müssen die vorhandenen Feinsedimente in Schwebe gehalten, respektive das Absetzen der Feinsedimente verringert werden. Um möglichst keine Fremdenergie für die Massnahme zu verwenden, kann die bei grösseren Stauanlagen oft vorhandene aber bisher ungenutzte potentielle Energie von Beileitungen verwendet werden. Dies könnte wie in *Bild 1* dargestellt erfolgen.

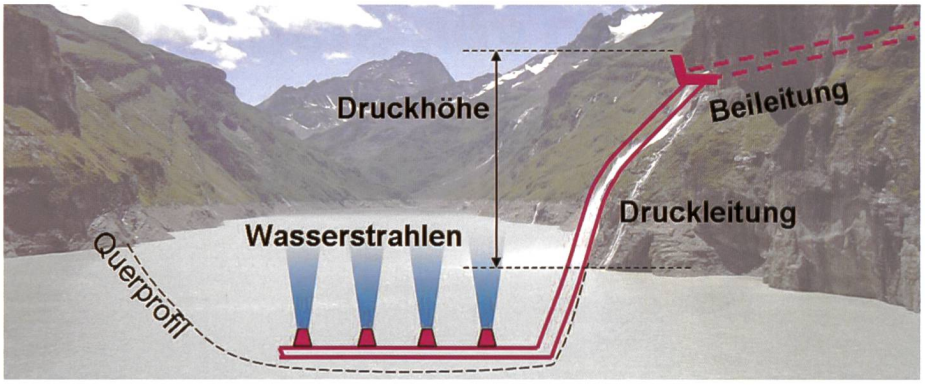


Bild 1. Systemskizze des Funktionsprinzips der Speisung der Wasserstrahlen. Im Hintergrund ein Bild der Stauanlage Mauvoisin mit der Beileitung von Corbassière und Séry.

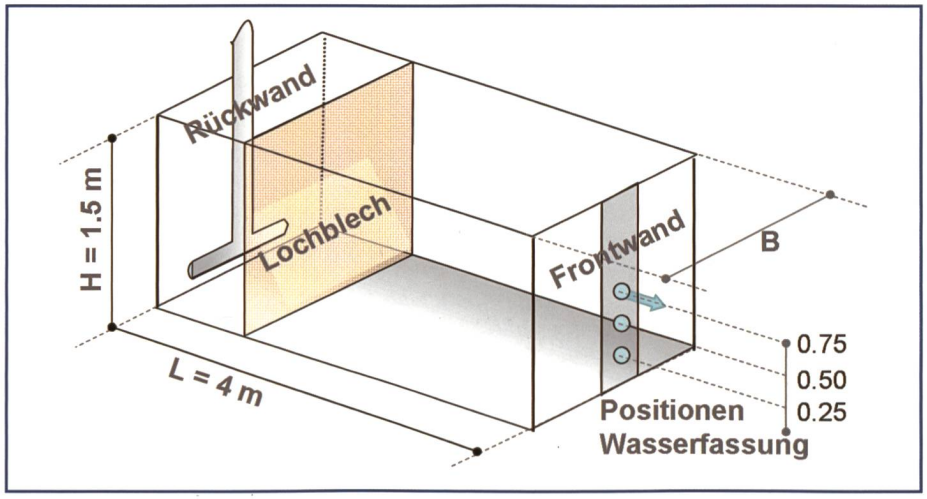


Bild 2. Schema der Versuchsanlage.

Das Wasser der Beileitung wird gefasst und in eine Druckleitung eingeleitet, welche das Wasser zum Seegrund in eine Düsenanlage führt. Dort wird die nun in kinetische umgewandelte Energie mittels Wasserstrahlen in den Stauraum eingeführt. Die gezielte Ausrichtung dieser Wasserstrahlen erzeugt eine künstliche Turbulenz und eine optimale Verwirbelung des umliegenden Wasservolumens, wodurch das Absetzen der Feinsedimente deutlich verlangsamt wird. Selbstverständlich muss dabei die Schwebstoffkonzentration begrenzt werden um Abrasionsprobleme an den hydraulischen Maschinen und ökologische Probleme im Unterwasser zu verhindern (vgl. Abschnitt 4.2).

Die Wirkung solcher Wasserstrahlen auf das Absetzverhalten und Austragen von Feinsedimenten über eine Triebwasserfassung wurde mittels hydraulischer Versuche in einem Laborreservoir unter kontrollierten Randbedingungen untersucht.

2. Hydraulische Experimente

2.1 Versuchsanlage

Das neue Konzept wurde systematisch in einem 2 m breiten, 1.5 m hohen und 4 m langen Laborreservoir experimentell untersucht *(Bild 2)*. Hierbei wurden zwei verschiedene Wasserstrahlkonfigurationen betrachtet, nämlich vier kreisförmig angeordnete Wasserstrahlen *(Bild 3)* sowie eine lineare Anordnung der Wasserstrahlen parallel zur Frontwand des Reservoirs *(Bild 4)*. Mit den Experimenten wurde der Einfluss der Wasserstrahleigenschaften (Düsendurchmesser d_j, Wasserstrahlgeschwindigkeit v_j, Wasserstrahlabfluss Q_j und Wasserstrahlneigungswinkel θ) sowie der geometrische Konfigurationsparameter der Wasserstrahlen auf den Sedimentaustrag systematisch untersucht.

Als Anfangsbedingung der Versuche wurde eine nahezu homogene Sedimentkonzentration mittels Luftblasenschleier erzeugt. Dadurch wird ein stark schwebstoffbelasteter Zustand, einen sogenannten «Muddy layer» nachgebildet, wie er am Ende eines Trübestroms vor einer Staumauer auftritt. Der Wasserspiegel im Reservoir wurde während der Ver-

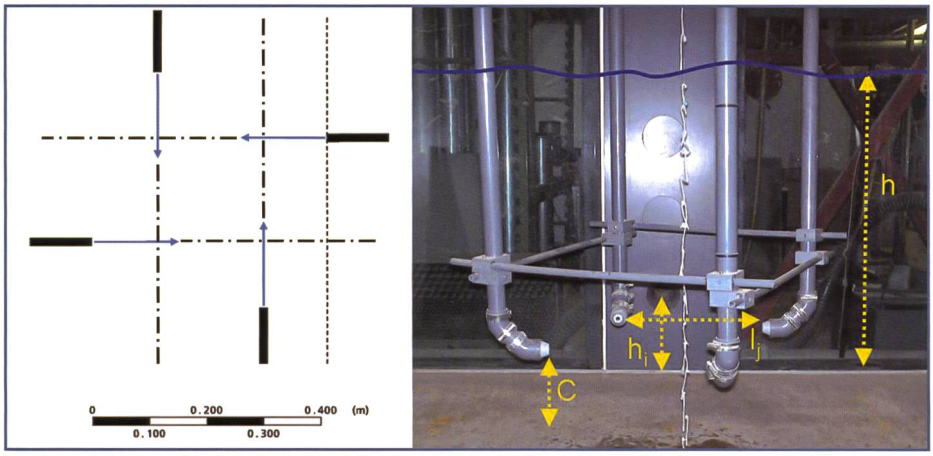
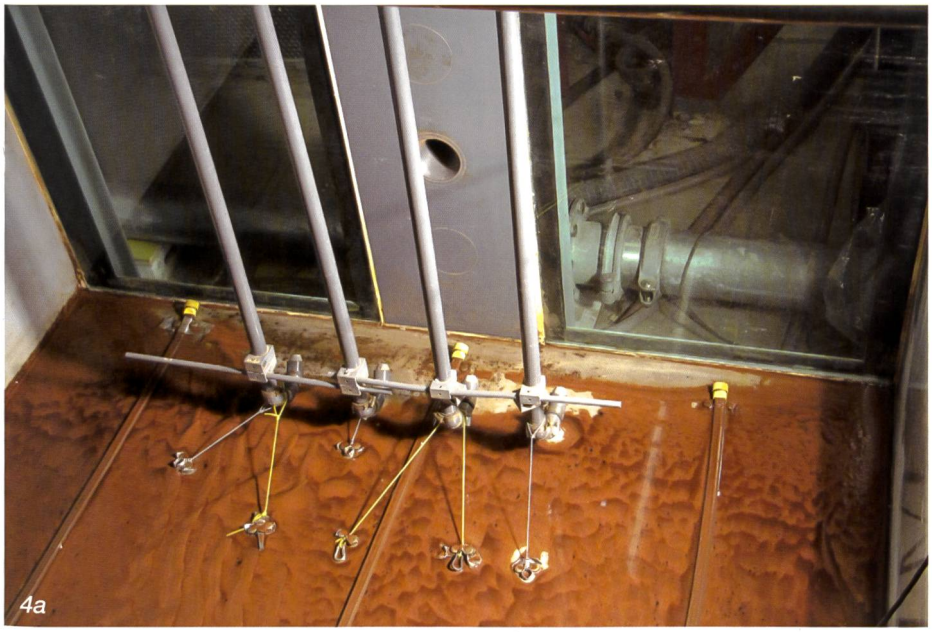


Bild 3. Links: Schematische Draufsicht auf die kreisförmige Wasserstrahlanordnung. Jeder Wasserstrahl zielt rechtwinklig auf die Achse des benachbarten Wasserstrahls. Rechts: Foto der kreisförmigen Wasserstrahlanordnung mit Angabe zur Lage der systematisch variierten geometrischen Parameter.



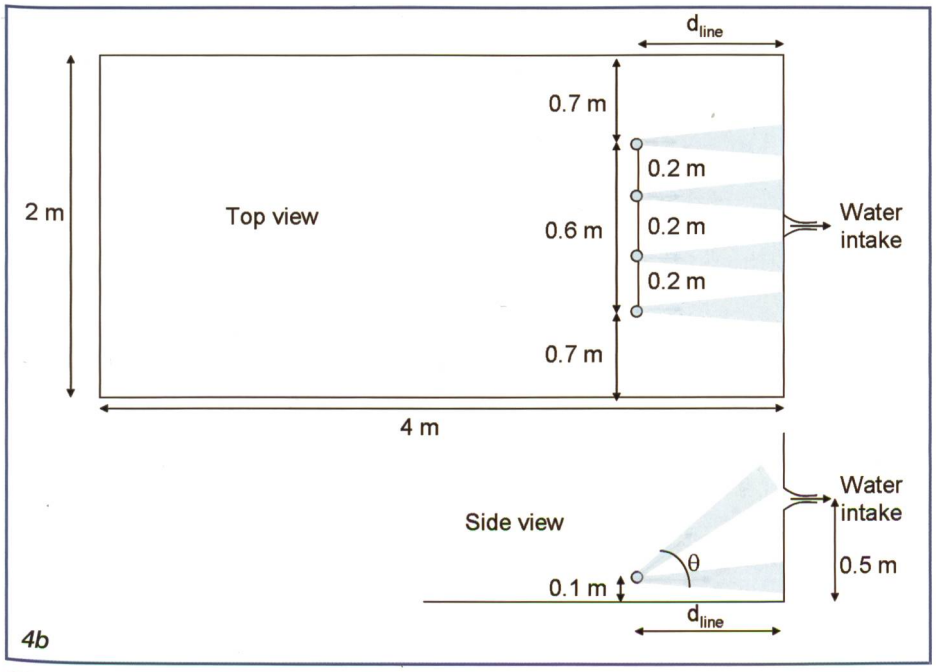


Bild 4. Lineare Wasserstrahlanordnung mit vier Wasserstrahlen, welche auf die Frontwand des Laborreservoirs zielen. a) Foto nach einem Versuch, b) Schema seitlich und Draufsicht.

suche konstant gehalten, indem die durch die Wasserfassung abgeführte Wassermenge durch die Wasserstrahlen (bei Wasserstrahlexperimenten), respektive durch die Rückwand des Reservoirs (Experimente ohne Wasserstrahlen) ersetzt wurde. Trübe- und Strömungsmessungen gaben Aufschluss über die Effizienz des Sedimentaustrages über die Fassung.

2.2 Sedimentaustrag

2.2.1 Definition

Der Sedimentaustrag (*ESR* für Evacuated Sediment Ratio) wird definiert als das Verhältnis des gemessenen ausgetragenen Sedimentgewichts P_{out} zum gemessenen anfänglich dem Reservoir zugegebenen Sedimentgewicht P_{in} und stellt somit das normalisierte zeitliche Integral der entleerten Sedimentmenge dar: $ESR = P_{out}/P_{in}$. Die Angabe des Sedimentaustrags *ESR* dient als Vergleich zwischen den verschiedenen untersuchten Wasserstrahlanordnungen. Analog zum Sedimentaustrag entspricht der im Stauraum verbleibende Sedimentanteil dem Verhältnis des gemessenen abgesetzten Sedimentgewichts zum gemessenen anfänglich zugegebenen Sedimentgewicht P_{in}.

2.2.2 Experimente ohne Wasserstrahlen

Experimente ohne Wasserstrahlen dienten als Referenzkonfiguration und wiesen für eine bestimmte Sedimentkonzentration ein nahezu proportionales Verhältnis zwischen dem Sedimentaustrag und dem Fassungsabfluss auf: Je höher der Abfluss desto höher war der Sedimentaustrag. Für einen konstanten Abfluss konnte der endgültige Sedimentaustrag sowie abgesetzte Sedimentanteil mittels einer einfachen physikalischen Annäherung theoretisch abgeschätzt werden. Die Annäherung berücksichtigt die Absetzgeschwindigkeit und das Strömungsfeld, welches durch den Abfluss durch die Wasserfassung und durch den Zufluss durch die Rückwand des Reservoirs entsteht. Für den Bereich der untersuchten Abflüsse (ΣQ_j = 570 bis 4050 l/h) lag der Sedimentaustrag *ESR* für die Referenzkonfiguration zwischen 0.09 und 0.37 *(Bild 5)*.

2.2.3 Experimente mit Wasserstrahlen

Die kreisförmige Wasserstrahlanordnung stellte sich hinsichtlich des Sedimentaustrags als die effizienteste Konfiguration heraus. Deshalb werden im Weiteren nur Resultate dieser Versuche diskutiert.

Die kreisförmig angeordneten Was-

serstrahlen weisen eine äusserst hohe Mischungseffizienz auf, da sie ein Strömungsfeld wie bei einem axialen Mixer erzeugten. Nach etwa einer halben Stunde lag die Standardabweichung der suspendierten Sedimentkonzentration bei ca. 5%. Dieser Wert wird in der Chemie als homogen erachtet. Daraus folgt, dass weniger Sedimente abgesetzt wurden und daher der Sedimentaustrag bei der grössten untersuchten Abflussmenge (ΣQ_j = 4050 l/h) mit ESR = 0.73 fast doppelt so hoch war wie jener ohne Wasserstrahlen. Auch mit Wasserstrahlen war das Verhältnis zwischen dem Abfluss und dem Sedimentaustrag für die gesamte Versuchsdauer nahezu proportional: mit höherem Abfluss war der beobachtete Sedimentaustrag höher. Der Einfluss des Wasserstrahlimpulses M_j ($M_j = \rho_w \cdot Q_j \cdot v_j$) erwies sich hingegen im untersuchten Bereich als untergeordnet.

Hinzu kommt, dass im Gegensatz zu den Experimenten ohne Wasserstrahlen, bei jenen mit Wasserstrahlen eine Resuspension, das heisst Aufwirbeln von abgesetzten Sedimenten, beobachtet wurde. Resuspension setzte ein, sobald stationäre Strömungsbedingungen erreicht waren. Sie wurde für Abflussmengen beobachtet, welche grösser als ein experimentell ermittelter Fassungsabflussschwellenwert (ca. 2000 l/h) sind. Die beobachtete zeitliche Entwicklung der Resuspensionsrate lässt vermuten, dass schliesslich alle anfänglich im Versuchsreservoir vorhandenen Sedimente ausgetragen werden.

Folgende dimensionslose, normalisierte, optimale geometrische Parameterkombination konnte mit den Versuchen gefunden werden: Abstand der Wasserstrahlen zum Reservoirboden: C/B = 0.175, Höhe der Wasserfassung h_i/B = 0.25, Abstand des Strahlkreiszentrums zur Frontwand des Reservoirs d_{axis}/B = 0.525, Abstand zwischen zwei benachbarten Wasserstrahlen l_j/B = 0.15, Wasserstrahlneigungswinkel θ = 0° und Wasserhöhe im Reservoir h/B = 0.6 (*Bild 3* rechts). Unter optimalen Bedingungen und der höchsten untersuchten Abflussmenge (ΣQ_j = 4050 l/h) wurde nach vier Stunden ein Sedimentaustrag von ESR = 0.73 erreicht. Ohne Wasserstrahlen und der gleichen Abflussmenge durch die Wasserfassung betrug der Sedimentaustrag nur ESR = 0.37.

In Abhängigkeit der Versuchsdauer bewirkte eine Abweichung eines einzelnen Parameters in der untersuchten Bandbreite von 60 bis 200% gegenüber der optimalen Anordnung eine Verringerung des Sedimentaustrages von bis zu 40%.

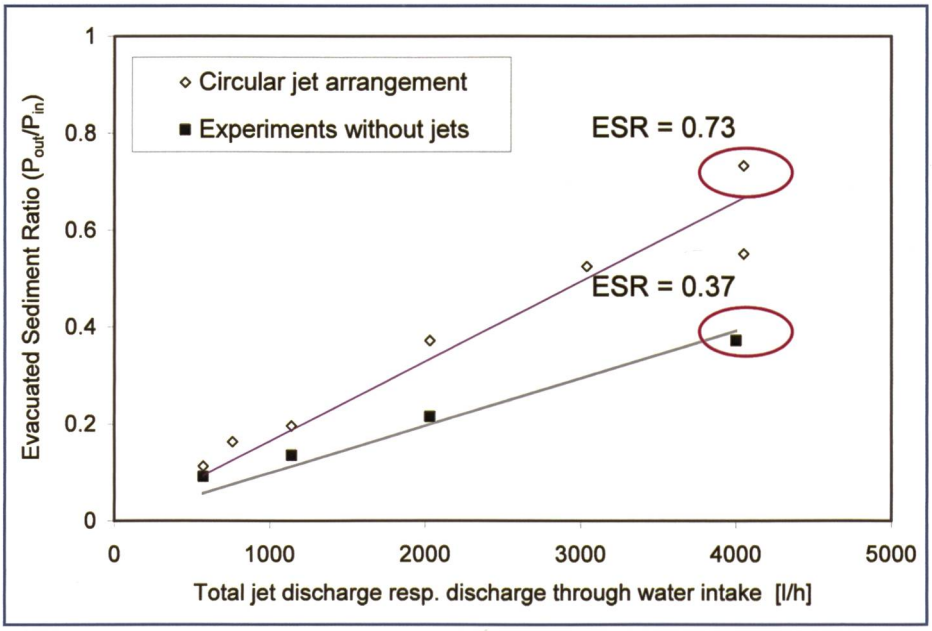


Bild 5. Sedimentaustrag in Funktion des Abflusses für die kreisförmige Wasserstrahlanordnung im Vergleich zu den Experimenten ohne Wasserstrahlen für eine Versuchsdauer von vier Stunden.

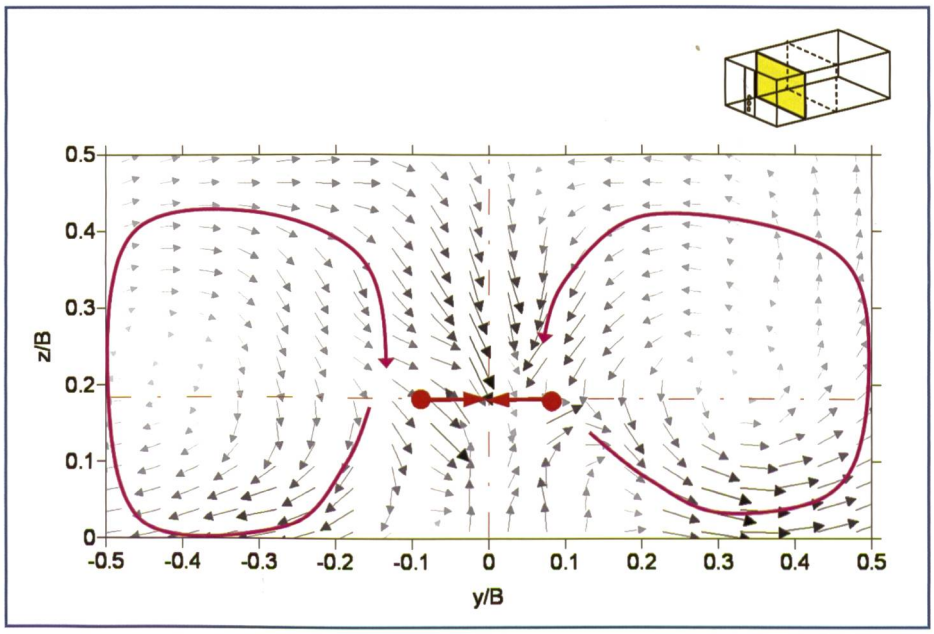


Bild 6. Axiales Strömungsbild im Beckenquerschnitt, verursacht durch die optimale kreisförmige Wasserstrahlanordnung für den höchsten untersuchten Abfluss.

2.3 Strömungsbild

Das durch die optimale Wasserstrahlkonfiguration erzeugte Strömungsbild im Beckenquerschnitt *(Bild 6)* war wie bereits erwähnt ähnlich jenem eines axialen Mixers, welches in der Literatur als günstig für Suspension angegeben wird (Sharma & Shaikh 2003). Im Beckenlängsschnitt entstand bei höheren Abflüssen eine einzelne Zirkulationszelle zwischen den Wasserstrahlen und der Wasserfassung. Dies entspricht ebenfalls dem axialen Strömungsbild *(Bild 7)*. Für kleinere Abflüsse glich das Strömungsbild jedoch demjenigen eines radialen Mixers *(Bild 7)*.

Das Strömungsbild wird nicht nur durch die Grösse des Abflusses sondern auch durch den Abstands der Wasserstrahlen vom Tankboden C/B beeinflusst. Dies wurde bereits von Sharma und Shaikh (2003) für klassische mechanische Mixer beobachtet. Sie stellten fest, dass sich für klassische axiale Mixer das Strömungsbild bei grösseren Bodenabständen von axial zu radial veränderte. Analog dazu war mit den Wasserstrahlen für grössere Abstände, C/B = 0.25, das Strömungsbild im Beckenquerschnitt wie auch im Beckenlängsschnitt radial. Folglich war der entsprechende Sedimentaustrag geringer. Für den kleinsten untersuchten Bodenabstand, C/B = 0.1, wurden wie bei Sharma und Shaikh im Längs- und Querschnitt axiale Strömungsbilder beobachtet. Ob-

schon Sharma und Shaikh (2003) für den kleinsten Bodenabstand eine maximale Sedimentsuspension erhielten, war der Sedimentaustrag mit den Wasserstrahlen kleiner als mit dem höheren optimalen Bodenabstand $C/B = 0.175$. Dies kann mit der unterschiedlichen Versuchsanlage erklärt werden. Sharma und Shaikh (2003) hatten ein geschlossenes Rührsystem, während in der vorliegenden Studie fortlaufend das über die Fassung entnommene sedimenthaltige Wasser mit klarem ersetzt wurde.

2.4 Wirksamkeit der optimalen Wasserstrahlkonfiguration

Das Verhältnis zwischen dem mittels Wasserstrahlen erzielten Sedimentaustrag ESR_{jet} und dem ohne Wasserstrahlen erzielten Sedimentaustrag $ESR_{no\ jets}$ bestimmt die Wirksamkeit der Wasserstrahlen (Gl. 1).

$$Efficiency\ (Wirksamkeit) = \frac{ESR_{jet}}{ESR_{no\ jets}} \qquad 1$$

Für die optimale Wasserstrahlkonfiguration konnte eine Wirksamkeit von 1.7 aufgrund von zeit- und abflussunabhängigen empirischen Verhältnissen ermittelt werden. Wird die Wirksamkeit mittels gemessener Daten bestimmt, hängt sie von der Zeit und den Abflussmengen ab *(Bild 8)*. Am Ende der instationären Phase und zum Zeitpunkt der Resuspension lag die Wirksamkeit bei ca. 1.5. Mit der grössten untersuchten Abflussmenge ($\Sigma Q_j = 4050$ l/h) erreichte sie nach vier Stunden Versuchsdauer einen Wert von nahezu zwei.

3. Numerische Simulationen

Numerische Simulationen mit dem Programm ANSYS-CFX 12 (basierend auf der Navier-Stokes-Gleichung) wurden für verschiedene Untersuchungen durchgeführt: (i) einphasige (Wasser ohne Sedimente) Untersuchung von Strömungsinstabilitäten, (ii) Ausdehnung der Rotationszellen bei doppelter Reservoirlänge (einphasig), (iii) die experimentellen Versuche wurden mit den optimalen geometrischen Parametern zweiphasig (Wasser mit Sedimenten) nachgerechnet, (iv) die durch eine mögliche Wasserstrahlenkonfiguration erzeugten Strömungsverhältnisse im Stauvolumen Mauvoisin wurden simuliert. Die Simulationen (i) haben einerseits gezeigt, dass Strömungsinstabilitäten für die optimale Wasserstrahlanordnung nur in geringem Masse auftreten und vernachlässigbar sind. Das charakteristische axiale Strömungsbild bleibt stabil. Einzig die Zentren der axialen Rotationszellen wandern auf und ab, so wie es auch in den experimentellen Versuchen beobachtet wurde *(Bild 9)*.

Zudem zeigte sich (ii) dass weder die Rotationszellen des axialen Strömungsbildes in einem verlängerten Reservoir durch dessen Rückwand begrenzt werden, noch dass die Energie der Wasserstrahlen im Reservoirfernbereich abgebaut wird. Hingegen entsteht analog zu den Versuchen von Riess und Fanneløp (1998) eine Rezirkulationszelle mit einer Länge von zwischen vier bis acht mal den Abstand der Wasserstrahlen zum Tankboden.

(iii) Die zweiphasigen numerischen Simulationen der Versuchsanlage konnten die Resultate der experimentellen Versuche bestätigen *(Bild 10)*.

(iv) Die Geschwindigkeitsvektoren in *Bild 11* zeigen die Strömungen im Stausee Mauvoisin mit einer ersten Wasserstrahlkonfiguration nach ca. sieben Stunden physikalischer Simulationszeit. Das generierte Strömungsbild ist offensichtlich radial. Um ein axiales Strömungsfeld zu generieren muss die Wasserstrahlkonfiguration in einem weiteren Schritt noch besser der Seegeometrie angepasst werden. Auch ist die lokale Strömung im Be-

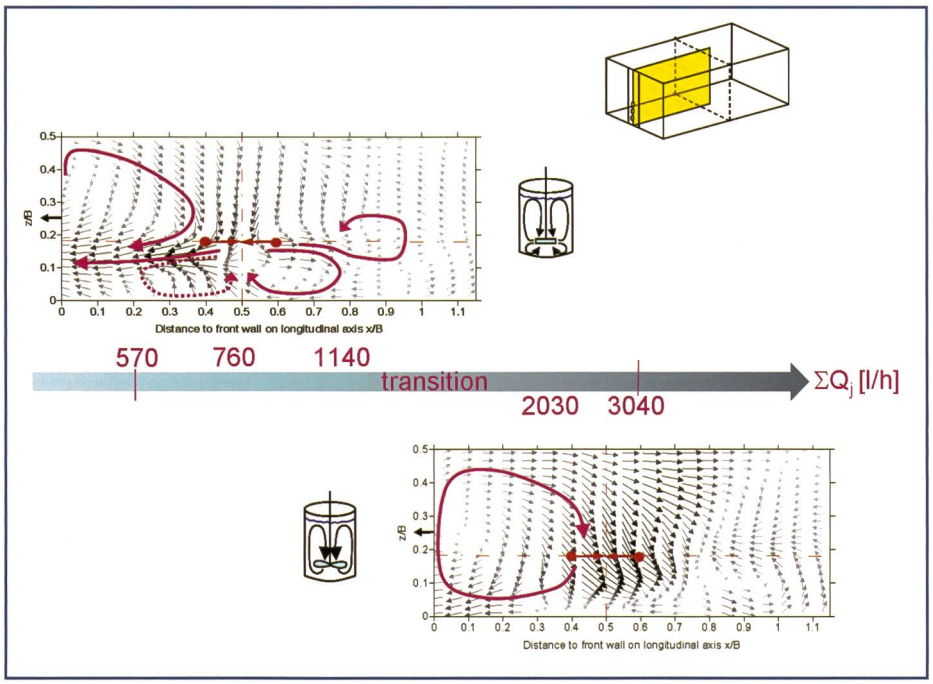


Bild 7. Strömungsbilder im Beckenlängsschnitt gemessen während Versuchen mit der optimalen kreisförmigen Wasserstrahlkonfiguration. Bei kleineren Abflüssen ist das Strömungsbild radial, bei höheren Abflüssen ist es axial. Y-Achse: normalisierte Höhe, x-Achse: normalisierte Distanz zur Frontwand des Laborreservoirs.

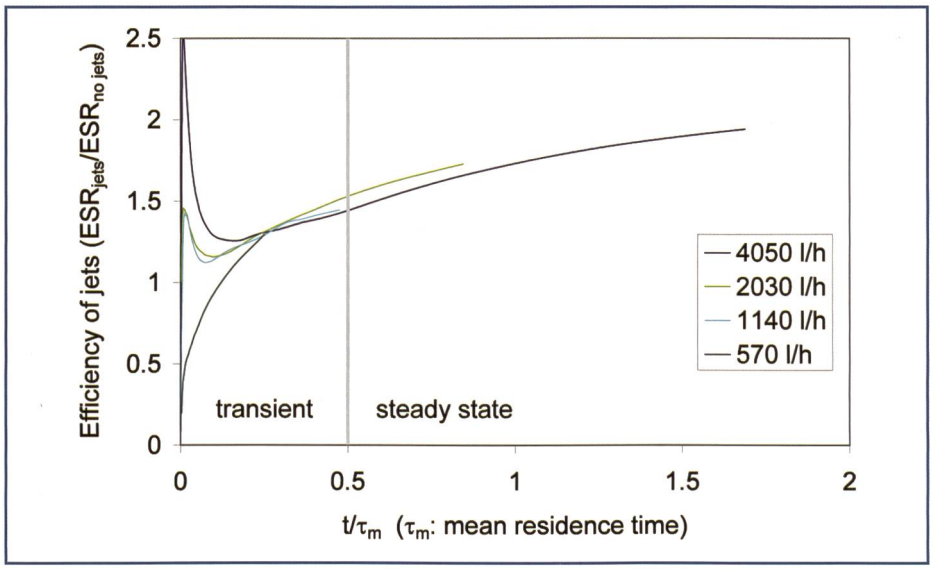


Bild 8. Wirksamkeit (Efficiency) der Wasserstrahlen, als Verhältnis des Sedimentaustrags erzielt mit respektive ohne Wasserstrahlen, in Funktion der dimensionslosen Zeit.

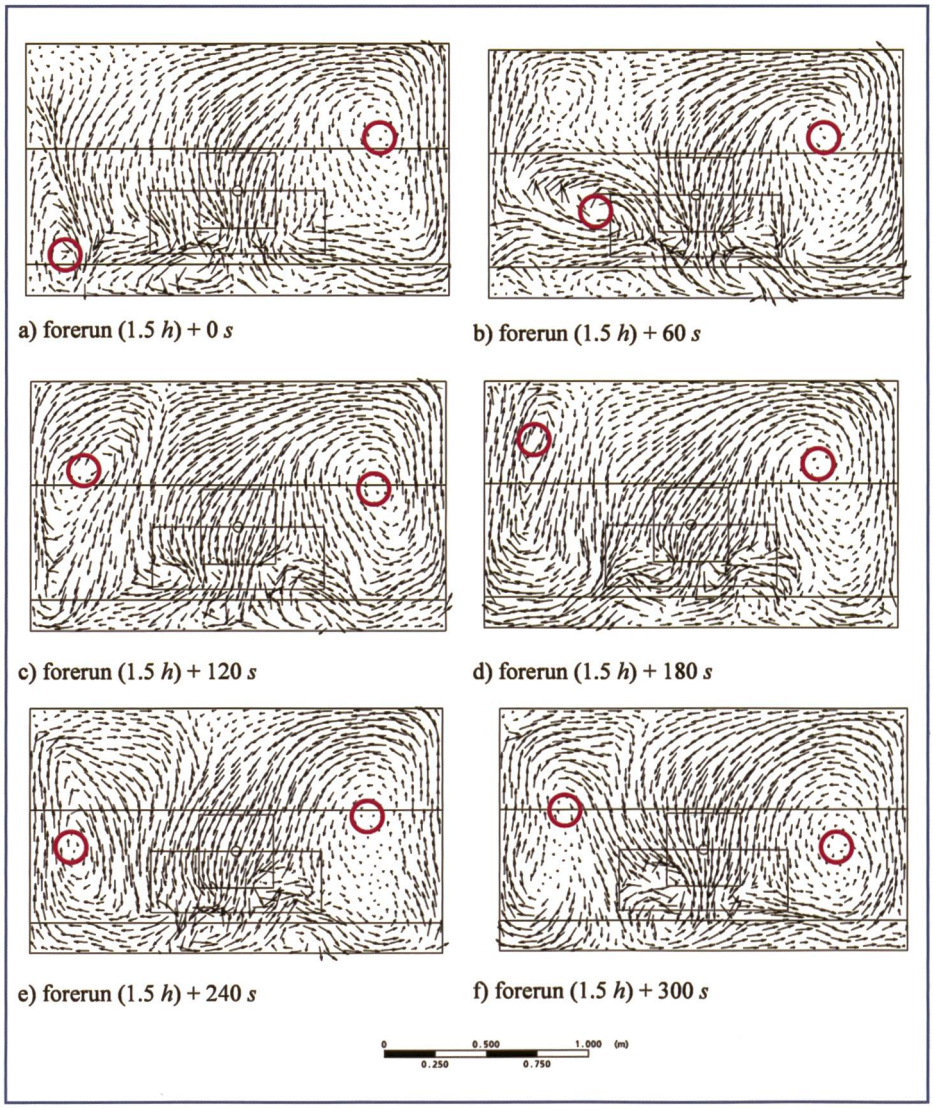


Bild 9. Zeitsequenz des numerisch simulierten Strömungsbildes in der Querebene (C/B = 0.175, h_i/B = 0.25). Von a) bis f): Instationärer Vorlauf (1.5 h) + 0 s, 60 s, 120 s, 180 s, 240 s, 300 s. Die Wasserfassung ist durch den kleinen Kreis angegeben. Die Rotationszellen sind durch die grösseren roten Kreise gekennzeichnet.

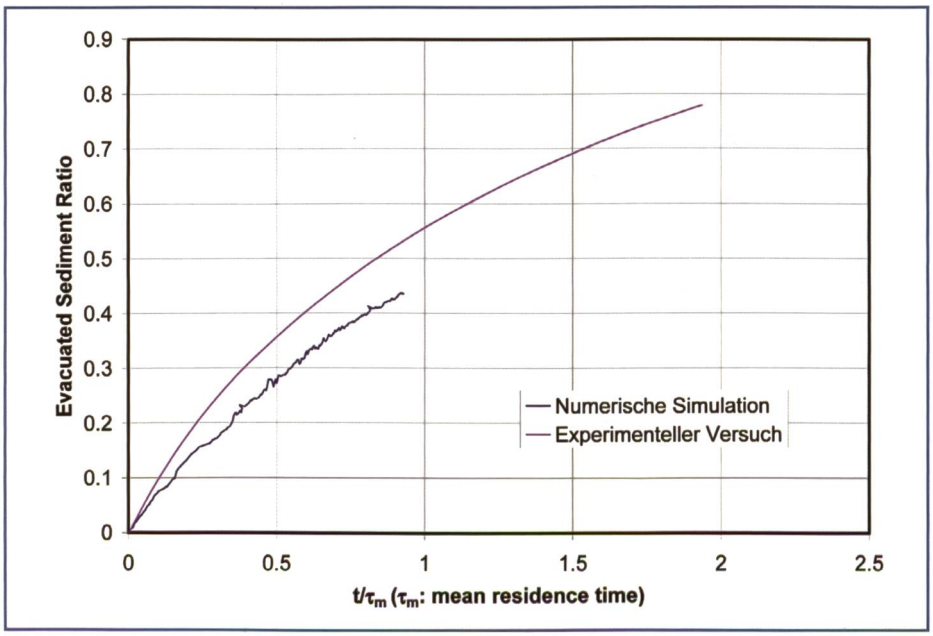


Bild 10. Vergleich zwischen den Resultaten des Sedimentaustrags in Funktion der dimensionslosen Zeit einerseits erhalten mittels numerischer Simulation und anderseits mittels experimenteller Versuche. Fassungsabfluss $\Sigma Q_j = Q_{out}$ = 4050 l/h. Optimale kreisförmige Konfiguration.

reich der Wasserfassung vom durch den Wasserstrahl erzeugten Strömungsfeld entkoppelt. Es wird angenommen, dass mit einer längeren Simulationszeit die beiden Strömungsfelder einander beeinflussen werden.

4. Erste Überlegungen für eine praktische Anwendung

4.1 Fallbeispielskizze

Im Rahmen der Fallstudie Mauvoisin (mit einer 250 m hohen Bogenmauer) wurde in einer ersten Annäherung die Resultate der physikalischen Experimente in den Naturmassstab übertragen. Ausgehend von den Zuflüssen und der Fallhöhe des vorhandenen linksufrigen Beileitungsstollens (Corbassière und Séry) wurde die Kreisanordnung der Wasserstrahlen mit einer Düsen-Froude-Zahl von 38 vorgeschlagen. Allerdings ist der Stauraum demzufolge etwa drei mal breiter als bei den optimalen experimentellen Bedingungen im Laborreservoir. Aufgrund der Resultate der numerischen Simulationen hinsichtlich der Rezirkulationszelle (Abschnitt 3, Teil ii) kann aber davon ausgegangen werden, dass die Rotationszellen der durch die Wasserstrahlen verursachten Strömung räumlich auch ohne Rück- und wahrscheinlich auch ohne Seitenwände begrenzt sind.

Aufgrund der Experimente kann mit Sicherheit gesagt werden, dass mit einer kreisförmigen Wasserstrahlanordnung wesentlich mehr Sedimente ausgetragen werden als ohne Wasserstrahlen. Darüber hinaus kann der Stauraum im Bereich der Wasserfassung langfristig von Sedimenten frei gehalten werden und folglich ihr Verstopfen verhindert werden. Mit weiterführenden numerischen Simulationen mit der reellen Stauseegeometrie können das Strömungsbild bestimmt und der zu erwartende Sedimentaustrag abgeschätzt werden.

Die physikalischen Modellversuche und eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Fall Mauvoisin haben gezeigt, dass auch wenn nur 7% der jährlich in den Totraum eingetragenen Sedimente (155 000 m^3) mittels der Wasserstrahlen ausgetragen werden können, die kreisförmige Wasserstrahlanordnung bei geschätzten Investitionskosten von ca. 1 Mio. CHF bereits wirtschaftlich ist. Mit den entsprechenden jährlichen Amortisations- und Betriebskosten könnte man mittels Saugbaggerung sofern überhaupt möglich lediglich 5000 bis 10 000 m^3/a austragen. Das Aufwirbeln der Feinsedimente mit einer kreisförmigen Wasserstrahlinstallation ist also eine kos-

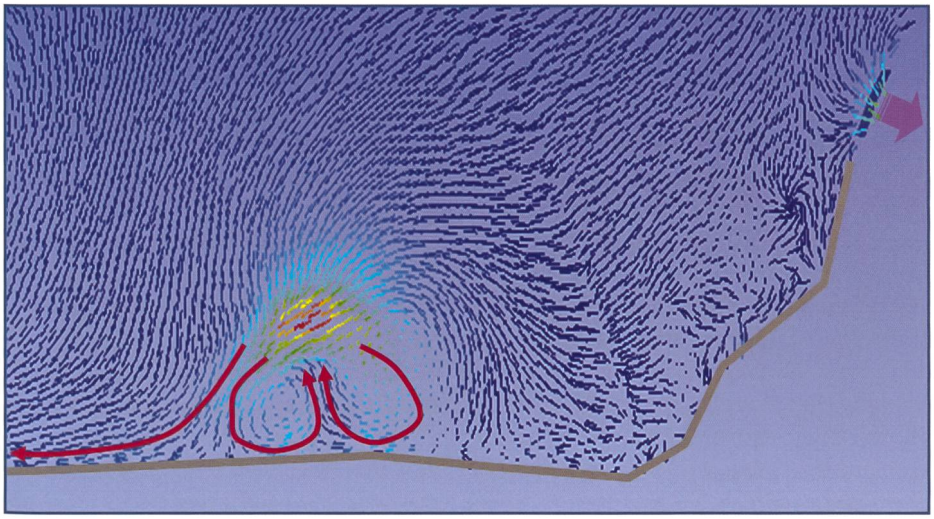


Bild 11. Geschwindigkeitsvektoren mit Farbcode in vertikalem Längsschnitt durch die Wasserstrahlkonfiguration und die Wasserfassung.

tengünstige und wirksame alternative Lösung für die Stauraumentlandung.

4.2 Auswirkungen im Unterwasser

Die Konzentration der Schwebstoffe liegt in alpinen Stauseen ausserhalb des Auftretens der Trübeströme bei rund 1–2 mg/l. Bei einer günstigen geometrischen Anordnung der Wasserstrahlen hinsichtlich der Lage der Staumauer und der Fassung sowie einer optimalen Wahl der Strahlstärke ist zu erwarten, dass auf lange Dauer sicher drei bis vier mal mehr Sedimente über die Fassung ausgetragen werden als für den Referenzfall ohne Wasserstrahlen. Die maximalen Konzentrationen bleiben in der Grösse der Konzentrationen der vor der Staumauer reflektierten und mit dem Umgebungswasser vermischten Trübeströme (etwa 5 g/l). Die Wasserstrahlen werden durch die Vermischung die Konzentration eher noch verringern, so dass die Abrasion an den Turbinen sowie Probleme der Ökologie im Unterwasser beherrschbar sein sollten. Allerdings könnten kurzzeitig während des Auftretens der Trübeströme grössere Feinsedimentkonzentrationen auftreten. Diese Ereignisse sind aber zeitlich begrenzt und treten je nach Einzugsgebiet selten bis ein paar Mal pro Jahr ein. Die Konzentrationen im Trübestrom variieren sehr stark und wurden zwischen 200 und 70 000 mg/l gemessen (De Cesare 1998). Zu erwähnen ist, dass solch grosse Sedimentkonzentrationen auch bei einem natürlichen Hochwasser vor dem Bau der Staumauer auftraten.

Der Verschleiss der Turbinen wird durch mehrere gleichzeitig bestehende Faktoren bestimmt: Sedimentkonzentration, Quarzgehalt im Sediment, Grösse und Form der Sedimentpartikel, relative Aufprallgeschwindigkeit auf das Laufrad und die Beschichtung des Laufrads. Entsprechend sind auch die Grenzwerte der Sedimentkonzentration für jedes Laufrad verschieden. Boes (2010) bestimmte für eine Anlage der TIWAG am Dorferbach einen Grenzwert von 1100 mg/l, wobei bei höheren Sedimentkonzentrationen die Anlage abgestellt wurde um Abrasionsschäden zu vermeiden. Die mit neuartigen Materialen beschichteten Laufräder der Hochdruckturbinen halten heute Sedimentkonzentrationen von 2–5 g/l und mehr über normale Revisionszyklen (drei bis fünf Jahre) stand (Grein et al. 1996). Das (2005) gibt die für Indien kritischen Konzentrationsgrenzwerte in Abhängigkeit der Fallhöhe für unbeschichtete Räder wie folgt an: 530 mg/l für Fallhöhen $H < 150$ m und 400 mg/l für $H \geq 150$ m.

Abgesehen von den Spülungsrichtlinien gibt es bis heute bezüglich der Biota in der Schweiz keine Sedimentkonzentrationsgrenzwerte. Für Spülungen variieren diese Werte von Kanton zu Kanton und sind teils zeitlich abgestuft (Kanton Wallis). Gemäss Staub (2000) liegen die Grenzwerte für Spülungen zwischen 5000 und 10 000 mg/l. Bucher (2002) zitiert in einem umfangreichen Werk Forschungsarbeiten, welche den Einfluss der Sedimentkonzentration auf Fische untersuchten. Bucher erwähnt, dass bei einer permanenten Belastung durch Sedimente die Konzentration von 80 mg/l kritisch ist für die Fische. Unter dieser Belastung treten die ersten Schäden auf. Sedimentkonzentrationen höher als 400 mg/l führen zu beträchtlichen Schäden an der Fischpopulation. Analog zum Turbinenverschleiss sind jedoch auch hier mehrere gleichzeitig bestehende Faktoren an den Schäden der Fische mitverantwortlich: Sedimentpartikelgrösse und -kantigkeit, physikalische und chemische Charakteristiken der Sedimente, Wassertemperatur, Altersstufe der Fische, Akkli-

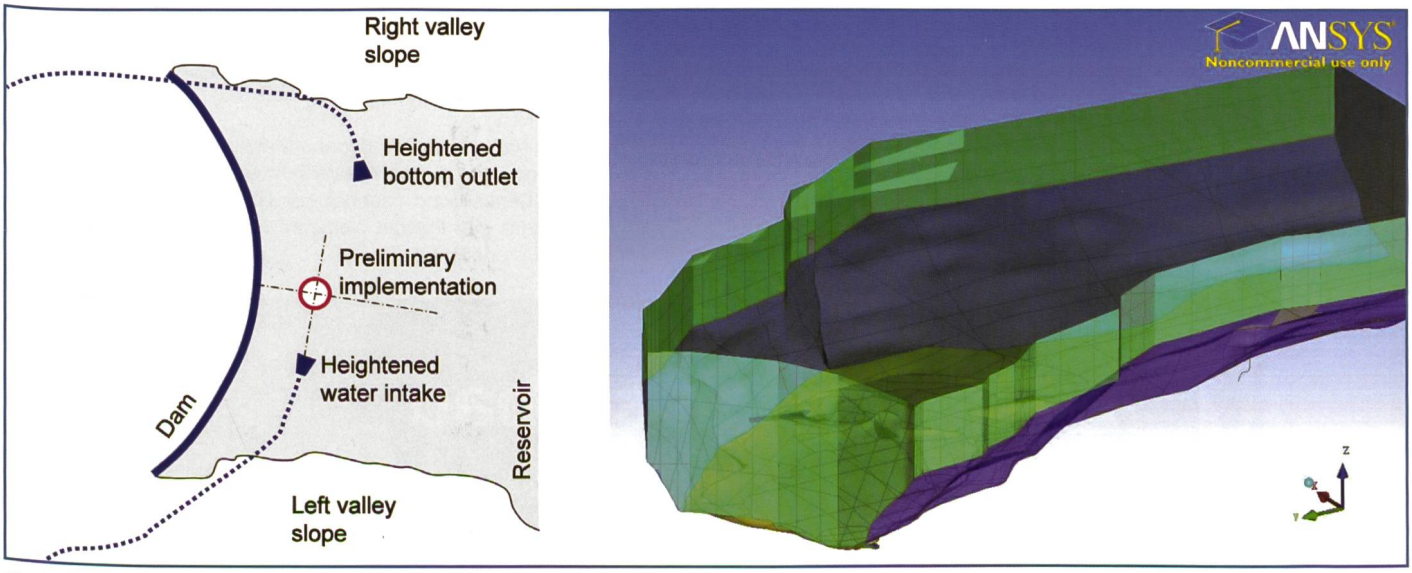


Bild 12. Links: Schema der skizzierten Lage der Wasserstrahlanordnung für die Staumauer Mauvoisin. Rechts: Geometrie des unteren Teils des Stauraumes Mauvoisin für die numerische Simulation.

matisierungsfähigkeit, Aussetzungsdauer, Geschwindigkeit des Belastungsanstiegs und andere Stressfaktoren.

5. Schlussfolgerungen

Mit über dem Beckengrund angeordneten Wasserstrahlen können die Feinsedimente in einem Reservoir erfolgreich am Absetzen gehindert und sogar aufgewirbelt werden. Mit den Versuchen im Laborreservoir konnten mittels der Wasserstrahlen die ausgetragene Sedimentmenge im Vergleich ohne Massnahme über eine Versuchsdauer von nur vier Stunden verdoppelt werden. Die optimale Wasserstrahlanordnung ist kreisförmig und verursacht ein Strömungsbild ähnlich jenem eines axialen Mixers, welches aus der Literatur als sehr günstig für Suspension bekannt ist. Falls vorhanden kann als Energiequelle eine Beileitung aus einem benachbarten Einzugsgebiet verwendet werden. Bereits mit relativ geringen Strahlabflüssen werden die Feinsedimente verwirbelt, und der Bereich vor der Wasserfassung von Sedimenten kann langfristig frei gehalten werden. Eine solche Wasserstrahlanlage ist kostengünstig und verglichen mit anderen konventionellen Entlandungsmassnahmen wie Saugbaggerung wirtschaftlich und effizient. Die Verlandung kann wirksam verzögert und die Nachhaltigkeit des Nutzvolumens für die Spitzenergieproduktion länger gewährleistet werden. Negative Auswirkungen auf die Turbinenabrasion und die Flora und Fauna im Unterwasser können mit einer entsprechenden Auslegung der Wasserstrahlinstallation, allerdings mit einer allfälligen Effizienzeinbusse, verhindert werden. Spitzenwerte der ausgetragenen Sedimentkonzentrationen können problemlos gebrochen werden.

Bei einer jährlichen Turbinierwassermenge von 100 Mio. m^3 könnten beispielsweise jährlich 100 000 t Feinsedimente aus einem Stausee abgeführt werden, falls mit einer kreisförmigen Wasserstrahlanordnung dauernd in der Nähe der Fassung eine Konzentration von 1 g/l aufrecht erhalten werden kann. Dies unterstreicht die hervorragende Wirksamkeit der vorgeschlagenen alternativen Massnahme gegen die Verlandung in alpinen Stauseen.

Verdankung

Das Forschungsprojekt «Massnahmen gegen die Verlandung von Stauseen» wurde von swisselectric research unterstützt.

Literaturverzeichnis

Alam, S. (1999). «The influence and management of sediment at hydro projects.» Hydropower & Dams, 3, 54–57.

Boes, R. (2010). «Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -korngrössenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Peltonturbine.» «Wasser Energie Luft – eau énergie air», 102. Jahrgang (Heft 2), 101–107.

Bucher, R. (2002). «Feinsedimente in schweizerischen Fliessgewässern, Einfluss auf die Fischbestände.» Fischnetz-Publikation, Projekt Fischrückgang Schweiz, Teilprojekt Nr. 01/07.

Das, D. (2005). «Prospects and problems in hydropower development in India.» LCH, ed., Lausanne, Script of LCH-Conference.

De Cesare, G. (1998). Alluvionnement des retenues par courants de turbidité, Thèse No. 1820 et Communication 7, Ed. A. Schleiss, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), EPFL.

Grein, H., Schachenmann, A. (1992): Solving problems of abrasion in hydroelectric machine-ry. Water Power & Dam Construction, 8; p. 19–24.

Jenzer, J. (2011). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet induced flow. Thèse No. 4927 et Communication 44, Ed. A. Schleiss, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), EPFL.

Oehy Ch., Schleiss A. (2003): «Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen mit Hindernissen, Gitter, Wasserstrahl- und Luftblasenschleier», «Wasser Energie Luft – eau énergie air», 95. Jahrgang (Heft 5/6), pp. 143–152, 2003.

Oehy Ch., Schleiss A. (2002). Einfluss von Hindernissen auf das Fliessverhalten von Trübeströmen am Beispiel des Grimselsees. Proceedings Int. Symposium 7.–9. Oktober 2002: Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, VAW, ETH, Zürich, pp. 51–60.

Riess, I. R., and *Fannelop, T. K.* (1998). «Recirculating Flow Generated by Line-Source Bubble Plumes.» Journal of Hydraulic Engineering, 124(9), 932–940.

Schleiss, A., and *Oehy, C.* (2002). «Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit». «Wasser, energie, luft – eau, énergie», air, 94. Jahrgang (Heft 7/8), 227–234.

Schleiss, A., De Cesare, G., and *Jenzer Althaus, J.* (2010). «Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft.» «Wasser Energie Luft – eau énergie air», 102. Jahrgang (Heft 1), 31–40.

Sharma, R. N., and *Shaikh, A. A.* (2003). «Solids suspension in stirred tanks with pitched blade turbines.» Chemical Engineering Science, 58, 2123–2140.

Anschrift der Verfasser

Jolanda Jenzer Althaus, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss

EPFL-ENAC-LCH, Station 18

CH-1015 Lausanne, Tel. +41 21 693 2385

jolanda.jenzer@iub-ag.ch

giovanni.decesare@epfl.ch

anton.schleiss@epfl.ch

xeloba

Der Individualität verpflichtet

Unsere Mandantin ist ein etabliertes und traditionelles Bauunternehmen im Espace Mittelland. Die Kernkompetenzen liegen im Neubau, in der Sanierung und im Unterhalt von Verkehrswegen sowie im Wasserbau. Innovationskraft, unternehmerisches Denken und nachhaltiges Handeln entlang der gesamten Wertschöpfungskette bilden das Fundament. Für die Weiterentwicklung des strategischen Geschäftsfeldes Wasser suchen wir eine Persönlichkeit als

Leiter/in Wasserbau

Bauen im Einklang mit der Natur

Weitere Informationen finden Sie unter www.xeloba.ch – Rubrik Technik. Gerne beantworten wir Ihre Fragen unter 031 839 04 04. Wir sichern Ihnen absolute Diskretion zu.