

Patrind Hydropower Project, Pakistan –

Physikalische Modellversuche zur Sedimentbewirtschaftung

Claudia Beck, Nicola Lutz, Adriano Lais und Robert Boes

Zusammenfassung

Die Wasserkraftanlage „Patrind Hydropower Project“ in Pakistan befindet sich zurzeit rund 120 km nordwestlich der Hauptstadt Islamabad im Bau.

Das Anlagenkonzept sieht die Durchleitung von hohen, quarzhaltigen Sedimentfrachten, welche im Himalaya typischerweise zu erwarten sind, als Lösungsansatz zur langfristigen Sedimentbewirtschaftung vor. Das Staubecken direkt vor der Triebwasserfassung, vom Oberwasser durch einen überströmten Kofferdamm abgetrennt, wird als natürliches Absetzbecken zur Entsandung des Triebwassers genutzt. Durchflüsse grösser als die Ausbauwassermenge werden über einen Sedimentumleitstollen flussaufwärts des Kofferdamms direkt ins Unterwasser der Stauanlage abgeleitet.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde im Herbst 2014 von der koreanischen Firma SAMAN Corporation beauftragt, physikalische Modellversuche (Massstab 1:45) zur projektierten Sedimentbewirtschaftung durchzuführen. Dieser Beitrag beschreibt die wichtigsten Eigenschaften der im Modellversuch optimierten Anlage. Dabei werden die Herausforderungen eines am Auslauf regulierten Umleitstollens aufgezeigt.

Weiter werden die Herausforderungen bei der Modellierung von Schwebstoffen diskutiert und die Resultate der Versuche aufgezeigt. Insbesondere wird auf die Wirksamkeit des Entsandungssystems eingegangen, für welches eine jährliche, sequentielle Spülung von Sedimenten durch den Umleitstollen und die Spülung des Absetzbeckens durch die Spüldurchlässe in der Hauptsperre vorgesehen sind.

Die Untersuchungen zeigen, dass das definierte Grenzkorn von 0.2 mm mit dem vorgeschlagenen Entsandungssystem von den Turbinen fern gehalten wird, solange eine ausreichende Speicherkapazität des Stauraums und des Absetzbeckens sichergestellt werden kann. Zusammen mit dem Bauherrn und dem zukünftigen Betreiber wurde ein Betriebskonzept erarbeitet, welches bei Hochwasser das Absenken des Speichers und die Durchleitung von Sedimenten durch den Umleitstollen vorsieht.

1 Projektbeschreibung

1.1 Anlage

Die Hochdruckanlage Patrind HPP ist als Laufwasserkraftwerk konzipiert und hat eine installierte Leistung von 150 MW. Das Kernstück des sich bereits im Bau befindenden Fassungsbauwerks bildet eine 44 m hohe und 115 m lange Gewichtsstaumauer, die mit zwei tiefliegenden Spülschützen (1) sowie einem regulierten Überfallwehr mit zwei Wehrfeldern (2) ausgestattet ist (Abb. 1). Diese vier Felder bilden einerseits die Hochwasserentlastung der Stauanlage, gleichzeitig dienen die Spülschützen aber auch zur jährlichen Spülung von Feinsedimenten, welche sich im natürlichen Absetzbecken vor der Stauanlage (5) ablagern. Überfallklappen

erlauben den Durchlass von Schwemmholz sowie die Abgabe einer Dotierwassermenge. Der Betriebspegel liegt bei 765 m ü. M. und die Sperre wird den Fluss Kunhar zukünftig in einem rund 3.8 km langen, schmalen Stauraum mit einem anfänglichen Speichervolumen von 6 hm³ aufstauen. Die Triebwasserfassung (3) als Seitenentnahme links des Wehres ist auf eine Ausbauwassermenge von 154 m³/s ausgelegt.

Der Stauraum unmittelbar vor der Stauanlage (5), der vom Oberwasser durch einen überströmten Kofferdamm (6) abgetrennt ist, wird aufgeweitet und als natürliches Absetzbecken genutzt. Ein rund 180 m langer, geradliniger Umleitstollen (7) mit Torbogenprofil verbindet den Speicher oberhalb des Kofferdamms mit dem Unterwasser. Er wird zur Ableitung kleinerer Hochwasser und zur Spülung von Sedimenten verwendet und wird mit einer Drucksegmentschütze am Stollenende reguliert (Abb. 2). Der leicht in den Strömungsquerschnitt ragende Einlauf des Umleitstollens befindet sich rund 300 m flussaufwärts der Mauer und 30 m flussaufwärts des Kofferdamms in der rechten Talflanke.

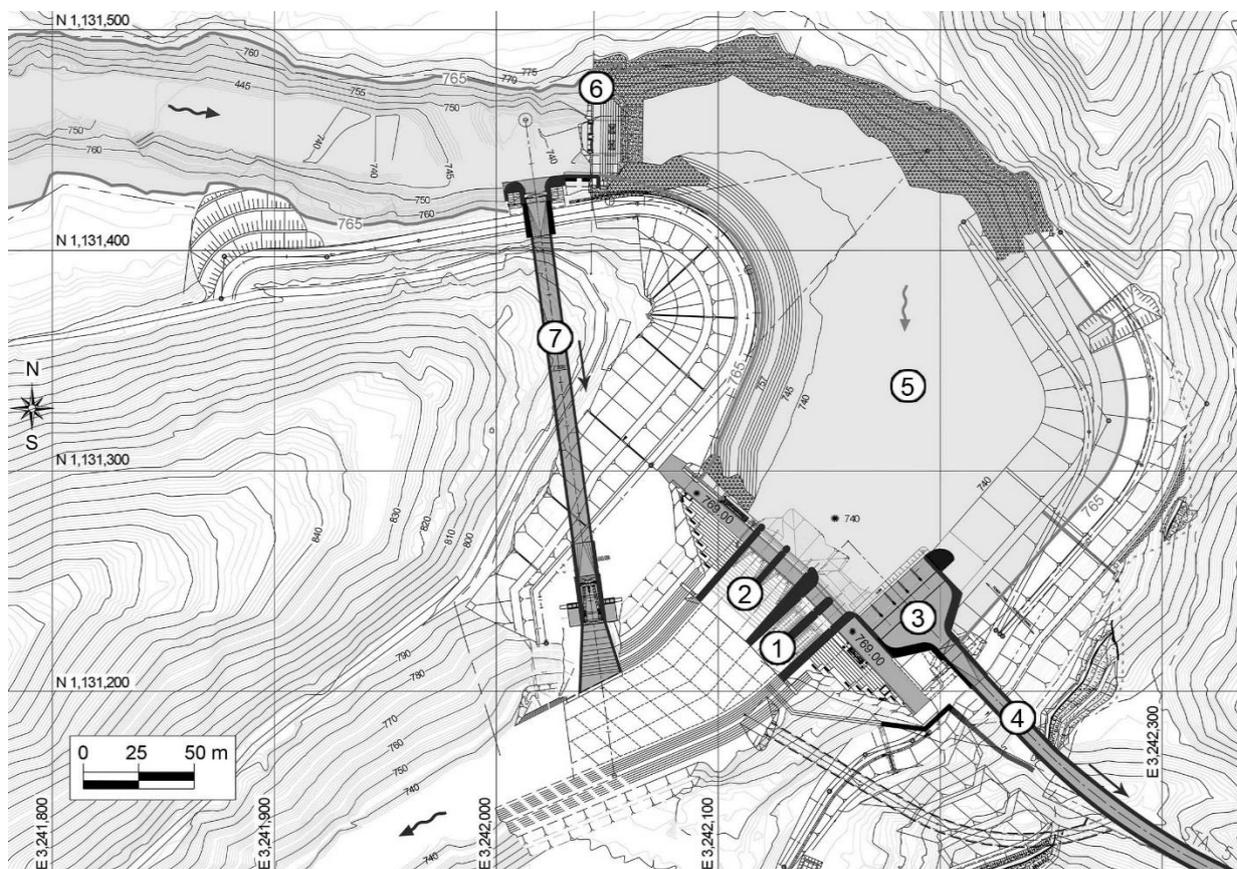


Abb. 1 Plan der Sperre mit den tief liegenden Spülschützen (1), dem regulierten Überfallwehr (2), der Seitenentnahme (3), dem Triebwasserstollen (4), dem natürlichen Absetzbecken (5), dem Kofferdamm (6) und dem Sedimentumleitstollen (7).

1.2 Ursprünglich vorgesehener Betrieb

Die Kraftwerksanlage wird bei einem Betriebspegel von 765 m ü.M. mit einer Wassermenge von 25-154 m³/s betrieben. Mittels Absetzbecken soll der Eintrag von Sedimentpartikeln grösser als ein definiertes Grenzkorn von 0.2 mm in das Triebwasser verhindert werden.

Bei Zuflüssen geringer als 25 m³/s wird der Turbinenbetrieb eingestellt und das Wasser über die Hochwasserentlastung ins Unterwasser abgeleitet. Bei Abflüssen grösser als die Ausbauwassermenge von 154 m³/s wird der Umleitstollen bis zu einem 5-jährlichen Hochwasser (HQ₅)

von 800 m³/s bei laufendem Turbinenbetrieb als Hochwasserentlastung eingesetzt. Das überschüssige Wasser von bis zu rund 650 m³/s und die mittransportierten Sedimente werden durch den Stollen ins Unterwasser weitergeleitet, während der Betriebspegel von 765 m ü.M. durch Regulierung des Umleitstollens gehalten wird. Der Umleitstollen ist deshalb auf einen Abfluss unter Druck von 650 m³/s ausgelegt.

Aufgrund der hohen Sedimentkonzentrationen bei höheren Abflüssen werden die Turbinen ab HQ₅ ausser Betrieb genommen, der Umleitstollen wird geschlossen und das gesamte Hochwasser mit hoher Schwebstofffracht wird über die Wehranlage abgeleitet. Der Stauspiegel wird dabei auf dem Betriebspegel von 765 m ü.M. gehalten. Das Bemessungshochwasser der Hochwasserentlastung von 2'799 m³/s entspricht einem 350-jährlichen Hochwasser (HQ₃₅₀), das Extremhochwasser (EHQ) beträgt 4'061 m³/s.

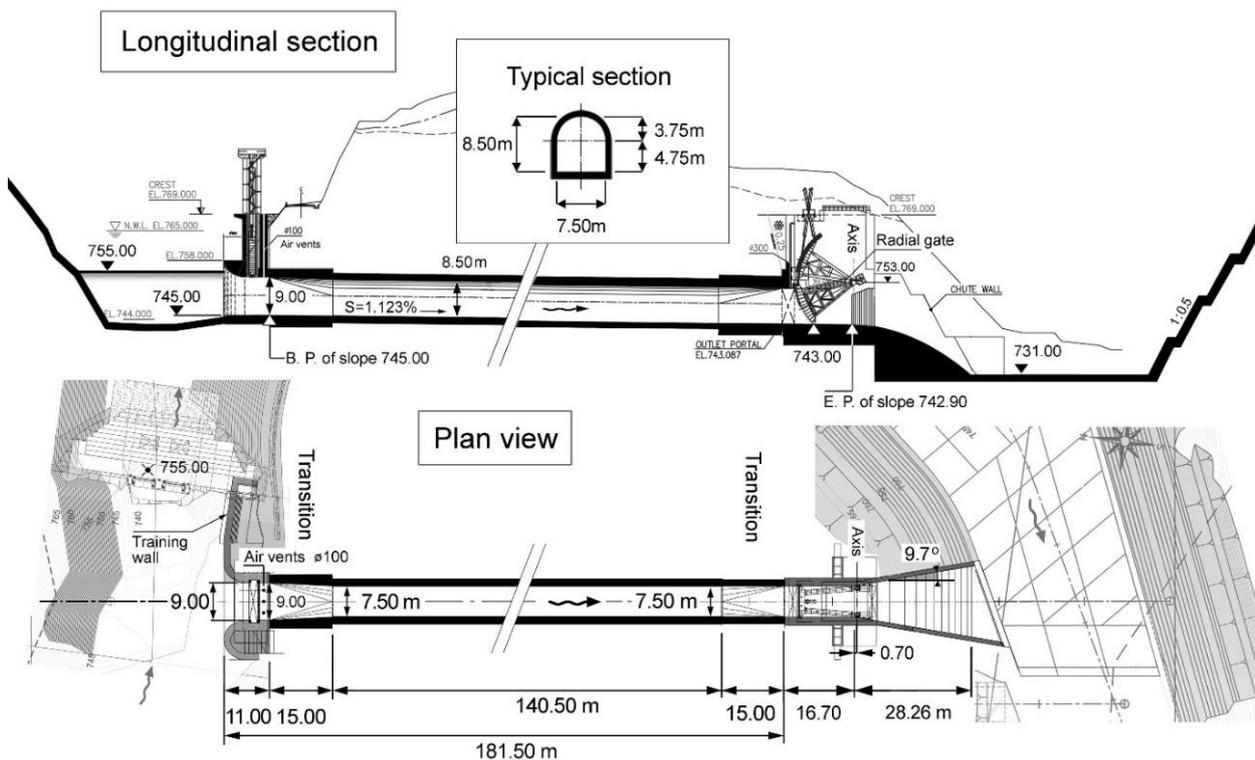


Abb. 2 Längsschnitt und Grundriss des am physikalischen Modell optimierten Umleitstollens

1.3 Sedimentbewirtschaftung

Aufgrund des im Vergleich zur mittleren Jahresabflussfracht von rund 4730 hm³ geringen Speichervolumens mit einer Speicherkennziffer von $6/4730 = 0.0013$ eignet sich der Stauraum von Patrind für eine regelmässige Spülung mit Absenken des Wasserspiegels (Sumi 2000). Die mittlere Jahressedimentfracht beträgt 1.64 hm³. Das vorgesehene Sedimentbewirtschaftungskonzept beinhaltet daher die jährliche Spülung des Stauraums und des Absetzbeckens. Das Spülen erfolgt unter Freispiegelabfluss. Der Stauraum wird dazu jeweils in den Sommermonaten mit einem maximalen Abfluss von 400 m³/s komplett abgesenkt, gefolgt von einer Umlagerung und Spülung der groben Sedimente durch den Umleitstollen. Anschliessend wird der Stollen geschlossen und die Spülschützen der Wehranlage geöffnet, um den Wasserspiegel im Absetzbecken reguliert vollständig abzusenken. Die abgelagerten Feinsedimente werden anschliessend während rund 24 Stunden aus dem Absetzbecken ins Unterwasser gespült. Die

gegenseitige Lage und Ausrichtung von Triebwasserfassung und Spülschützen erlaubt eine Spülung des Stauraums unmittelbar vor dem Einlauf der Fassung.

Durch das jährliche, sequentielle Spülen von Stauraum und Absetzbecken soll ein Speichervolumen von 3 hm^3 langfristig erhalten bleiben. Die Effizienz der Spülung ist abhängig von der Beziehung zwischen Spüldurchfluss und minimalem Absenkspiegel. Mit einem zu kleinen Abfluss können die abgelagerten Sedimente nicht mobilisiert werden. Ein zu hoher Abfluss hingegen führt aufgrund der Abflusskapazität der Spülschützen resp. des Umleitstollens zu einem Rückstau und somit zu verminderten Transportkapazitäten. Berechnungen zeigen, dass der optimale Spülabfluss daher bei $150 - 200 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt. Gleichzeitig liegt dieser Wert deutlich unter dem einjährigen Hochwasserabfluss (HQ_1) von rund $340 \text{ m}^3/\text{s}$ und kann daher auch über eine ausreichende Dauer für die Spülung genutzt werden.

2 Physikalische Modellversuche

2.1 Ziele

In einem ersten Teil sollten an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich mittels hydraulischen Versuchen ohne Sedimentzugabe die Pegel-Abfluss-Beziehung der verschiedenen Entlastungsbauwerke aufgezeigt, die Strömungsverhältnisse im Absetzbecken, im Ober- sowie im Unterwasser und die Anströmung zum Turbineneinlauf untersucht werden. Die Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten, die Druckverteilung über die Wehrrücken und das Kavitationsrisiko waren zu bestimmen. Die Strömungsverhältnisse im Umleitstollen bei Druckabfluss und Freispiegelabfluss sollten dokumentiert und optimiert werden. Das übergeordnete Ziel dieser Untersuchungen war die hydraulische Optimierung einzelner Anlageteile.

In einer zweiten Phase waren im Rahmen von Sedimentversuchen die nachhaltige Sedimentbewirtschaftung mit Hochwasserganglinien und Spülsequenzen mit Feinsedimenten und Geschiebe nachzubilden, zu beurteilen und zu optimieren.

2.2 Modell

Im Herbst 2014 wurde an der VAW ein physikalisches Modell der Stauanlage Patrind im Massstab 1:45 erstellt. Dabei wurde das Ähnlichkeitsgesetz nach Froude angewendet. Das Modell bildet die Hauptsperre mit der Hochwasserentlastung und der Triebwasserfassung, das natürliche Absetzbecken, den Kofferdamm, den Sedimentumleitstollen, und den Flusslauf jeweils 300 m flussauf- und flussabwärts ab (Abb. 3). Die Topographie wurde in einem Mauertrog fest nachgebaut und entspricht dem ursprünglichen Zustand ohne Sedimentablagerungen. Der Umleitstollen ist aus Plexiglas gefertigt, sodass die verschiedenen Strömungszustände beobachtet und dokumentiert werden können.

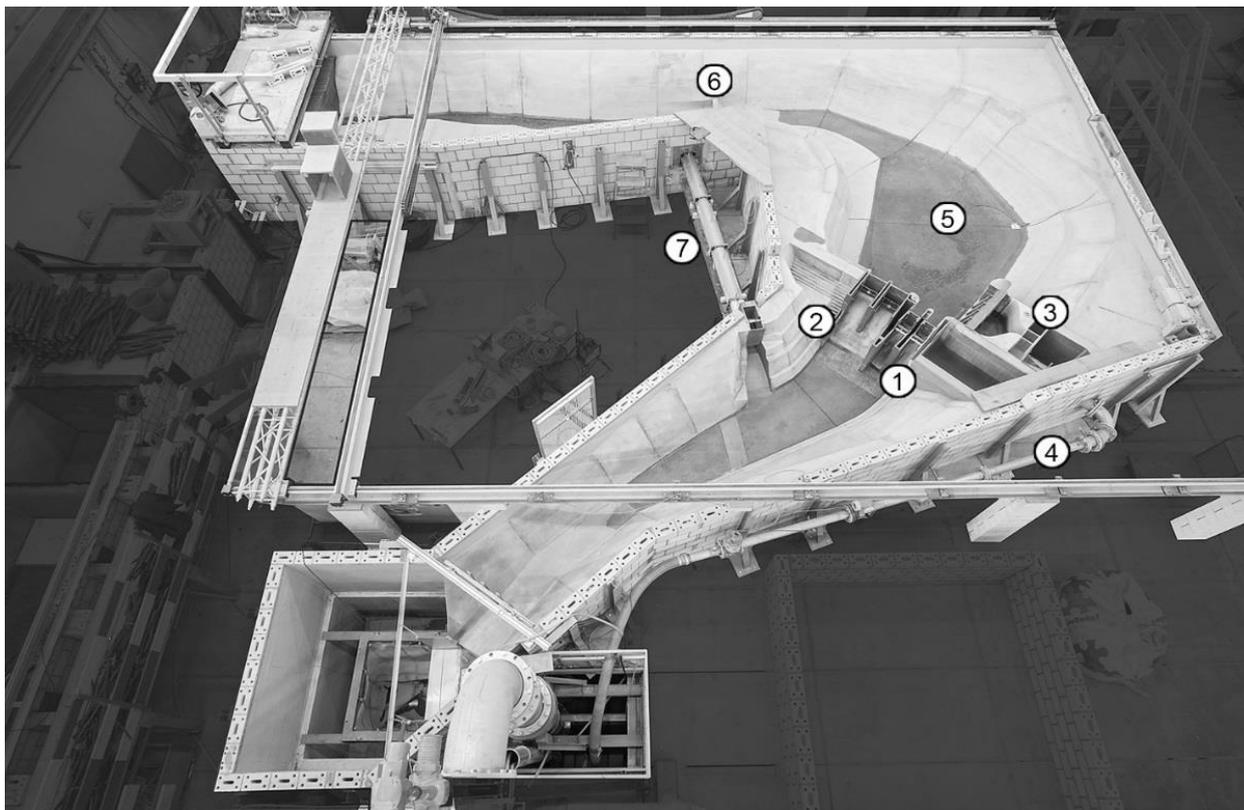


Abb. 3 Physikalisches Modell der Stauanlage im Massstab 1:45 an der VAW. (1) Spülschützen, (2) reguliertes Überfallwehr, (3) Seitenentnahme, (4) Triebwasserstollen, (5) natürliches Absetzbecken, (6) Kofferdamm, (7) Sedimentumleitstollen

2.3 Modellsediment

Die Transportprozesse von Geschiebe und Feinsedimenten werden bei der Wehranlage Patrind getrennt untersucht. Während der Fokus des Geschiebetransports bei der Deltabildung und der Umleitung durch den Stollen liegt, sind bei Feinsedimenten das Absetz- und Resuspensionsverhalten im natürlichen Absetzbecken die relevanten abzubildenden Prozesse. Da numerische Simulationen von HR Wallingford zeigen, dass Silt- und Tonpartikel in Schwebelage, ohne sich abzusetzen, durch den Stauraum transportiert werden, konzentrieren sich die Modellversuche mit Feinsedimenten ausschliesslich auf die Sandfraktion.

Geschiebe und Schwebstoffe können im Massstab 1:45 nicht mit demselben Material modelliert werden. Die charakteristischen Korndurchmesser des Geschiebes liegen bei $d_{m,Natur} = 71 \text{ mm}$ und $d_{90,Natur} = 150 \text{ mm}$. Die Kornverteilung dieses Sohlenmaterials kann modellähnlich gemäss der Umrechnung nach Zarn (1992) mit Sand (Dichte: 2.65 t/m^3) nachgebildet werden.

Feinsedimente hingegen fallen bei einer Verkleinerung mit Massstab 1:45 in den kohäsiven Korngrössenbereich und verhalten sich daher nicht mehr modellähnlich. Für die Sedimentations- und Spülversuche ist es essentiell, das Absetz- und Resuspensionsverhalten, d.h. die Sinkgeschwindigkeit sowie die kritischen Schubspannungen nach Shields (1936) korrekt abzubilden. Die Feinsedimente werden daher mithilfe eines Ersatzmaterials mit verzerrtem Grösse-Dichte-Verhältnis modelliert. In diesem Fall werden gemahlene Walnussschalen verwendet, welche bereits bei anderen Modellversuchen erfolgreich eingesetzt wurden (Kantoush 2008, Jenzer Althaus 2011). Das Granulat hat mit 1.15 t/m^3 eine deutlich geringere Dichte als Sand, sodass der Durchmesser des einzelnen Kornes grösser gewählt werden kann (0.2 - 0.45 mm im Modell), um die benötigte Sinkgeschwindigkeit zu erreichen. Mit diesem Ersatzmaterial gelingt

es, das physikalische Verhalten des 0.2 mm-Grenzkorns im hydraulischen Modellversuch abzubilden.

3 Turbinenbetrieb

Der Turbinenbetrieb wird bis zu einem HQ₅ aufrechterhalten, indem der Betriebspegel bei 765 m ü. M. gehalten und Abflüsse grösser als die Ausbauwassermenge von 154 m³/s reguliert durch den Umleitstollen abgeleitet werden.

Während des HQ₅ bildet sich ein ausgeprägter Einlaufwirbel vor dem Umleitstollen, der zu Luft einträgen in den Stollen führt. Durch Teilöffnung der Schütze am Ende des Stollens kann das intermittierende Ausblasen solcher Lufteinschlüsse unerwünschte Druckschläge am Segment schütz verursachen. Aufgrund des Baufortschritts und den topographischen Gegebenheiten können keine Wirbelunterdrückungsmassnahmen in Betracht gezogen werden. Deshalb werden die notwendigen Entlüftungsvorrichtungen an der Stollendecke vor der Schütze aufgrund des berechneten Luftetrags dimensioniert.

Die Anordnung der Hauptsperre am Ende einer ausgeprägten Rechtskurve bewirkt grossräumige Zirkulationen im Staubereich des Absetzbeckens. Der Pfeiler am linken Widerlager der Triebwasserfassung, welcher in der Optimierungsphase am physikalischen Modell seitens VAW anstelle einer scharfkantigen Seitenwand vorgeschlagen wurde, führt zu einer gleichmässigen Anströmung der Seitenentnahme.

Durch die Messung der Fliessgeschwindigkeiten und der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen, kann die Sinkgeschwindigkeit und der zurückgelegte Weg des zulässigen Grenzkorns ($d = 0.2$ mm) abgeschätzt werden. Dabei gilt gemäss Bagnold (1966), dass sich ein Korn absetzt, falls $w' = v_z + w - v_z' > 0$, wobei v_z die Fliessgeschwindigkeit in vertikaler Richtung, w die Sinkgeschwindigkeit nach Zanke (1982) und v_z' die Standardabweichung der Geschwindigkeitsschwankungen darstellen.

Die durchgeführten Untersuchungen und Messungen zeigen, dass die Fliessgeschwindigkeiten im natürlichen Absetzbecken im Fall des Normalbetriebs sowie während des HQ₅ ausreichend gering sind, sodass sich das Grenzkorn von 0.2 mm über die Länge des Absetzbeckens absetzen kann. Die Sedimentuntersuchen haben zudem gezeigt, dass sich die in der Strömung mittransportierten Sedimente im Rotationszentrum in der Mitte des Absetzbeckens ablagern.

4 Strömungsverhältnisse und Deltabildung bei grossen Hochwassern

Die Querschnittsverengung im Bereich des Umleitstolleneinlaufs und des Kofferdamms führt im Hochwasserfall zu einem Rückstau im Oberwasser von rund 2 m. Am Kofferdamm bildet sich ein unvollkommener Überfall aus. Die Zirkulationsströmung im Absetzbecken führt zu einer asymmetrischen Anströmung der Hochwasserentlastung, deren Kapazität jedoch ausreicht, um das EHQ problemlos durchzuleiten.

Das ursprünglich angedachte Betriebskonzept sah vor, den Betriebspegel von 765 m ü.M. bei jedem Hochwasserereignis durch Regulierung der Spülschützen und des Überfallwehrs zu halten, um die Triebwasserfassung nach dem Ereignis möglichst rasch wieder in Betrieb nehmen zu können. Die physikalischen Modellversuche haben gezeigt, dass die geringen Transportkapazitäten bei diesem Konzept zu hohen Auflandungen und Deltabildung führen. Gelangt das vorstossende Delta in die Nähe des Kofferdamms, liegt die Höhe des Deltas deutlich über der Kofferdammkrone. Grobes Geschiebe wird über den Kofferdamm ins Absetzbecken transpor-

tiert, wo es nur mittels Baggerung wieder entfernt werden kann (Abb. 4, oben). Aufgrund der grossen Fliesstiefen setzt sich beim geplanten Betriebskonzept das Grenzkorn von 0.2 mm sowohl oberhalb des Kofferdamms als auch im Absetzbecken ab (Abb. 4, unten). Die Ablagerungen sind im Zentrum der Rotationsströmung in der Mitte des Absetzbeckens am höchsten.

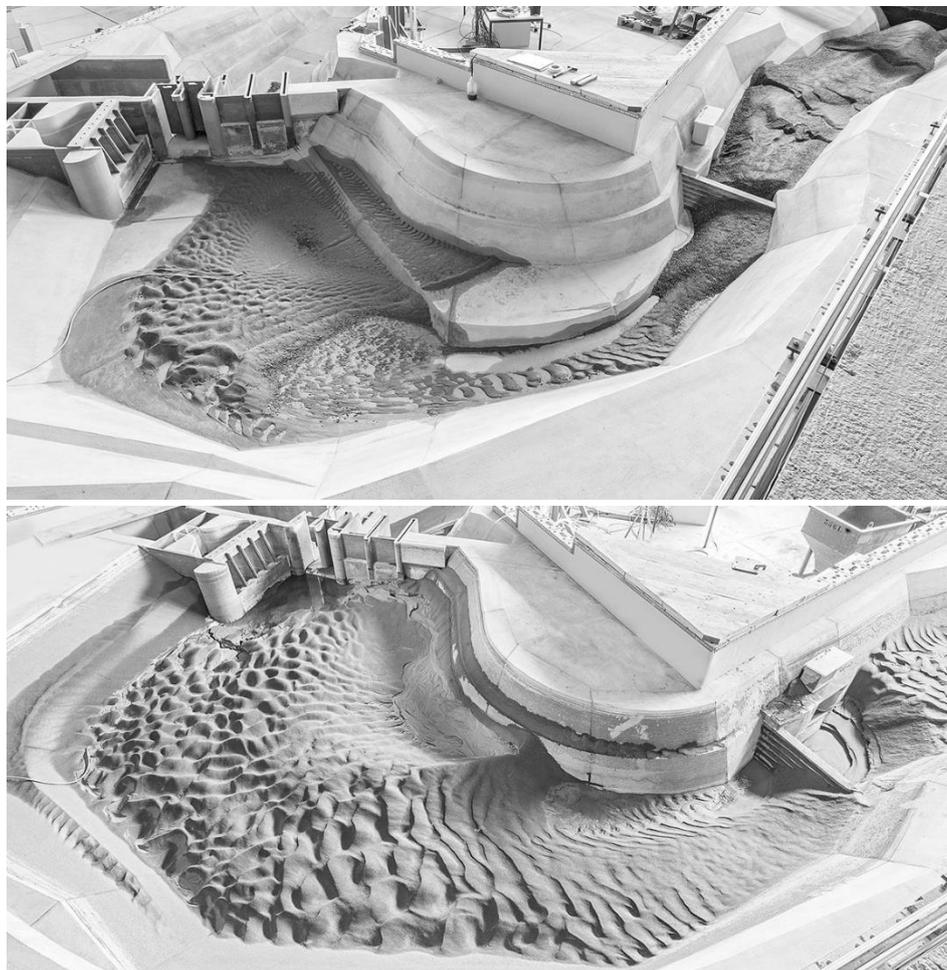


Abb. 4 Oben: Verlandungsmuster von Geschiebe nach dem Bemessungshochwasser (HQ₃₅₀). Unten: Verlandungsmuster des Grenzkorns ($d = 0.2$ mm) im natürlichen Absetzbecken nach einem HQ₂₀, modelliert mit gemahlene Walnusschalen.

5 Stauraumpülung

Die Modellversuche des jährlichen Spülprozesses im Stauraum zeigen bei hohen Ablagerungen nach Hochwasserereignissen eine grosse Spülwirkung im Modellperimeter. Das resultierende Verlandungsmuster nach der Spülung der in Abb. 4 gezeigten Ablagerungen nach Hochwasserereignissen ist in Abb. 5 dargestellt. Ausgehend vom Einlauf des Umleitstollens bildet sich durch Rückwärtserosion eine Erosionsrinne, welche sich durch Seitenerosion verbreitert. Die Sohlenlage am Ende der Spülung wird durch die Kapazität des Umleitstollens bestimmt, sodass alle Spülversuche in einem Gleichgewichtsgefälle im Speicher von rund 0.6% resultieren (siehe Abb. 6), was ungefähr dem heutigen durchschnittlichen Sohlgefälle des Flusses Kunhar entspricht.

Der Spülprozess und die Spülwirkung der Feinsedimente im Absetzbecken hängen von dem vorliegenden Verlandungsmuster ab. Durch die grossräumige Zirkulationsströmung im Absetzbecken, entstehen die grössten Ablagerungen im Zentrum des Absetzbeckens. Hohe Turbulenzen unterhalb des Kofferdamms führen zu Resuspension (Abb. 5, unten). In den Bereichen

entlang des rechten Ufers, wo die Ablagerungen im natürlichen Absetzbecken am geringsten sind, bildet sich gleich zu Beginn der Spülung durch die Spülschützen eine Erosionsrinne aus. Durch die vorgegebene Kurvenströmung und die hohen Geschwindigkeiten an der Kurvenaußenseite der Erosionsrinne verbreitert sich diese zum linken Ufer hin. Sobald die Seitenerosion das linke Ufer erreicht hat, nimmt die Spülwirkung schlagartig ab. Eine initiale Erosionsrinne am rechten Ufer des Absetzbeckens begünstigt somit die Mobilisierung der Ablagerungen im gesamten Absetzbecken.



Abb. 5 Verbleibende Verlandung nach der jährlichen Spülung mit $Q = 150 - 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Oben: Spülung der Geschiebeablagerungen durch den Umleitstollen nach einem HQ_{350} . Unten: Spülung der Feinsedimente durch die Spüldurchlässe nach einem HQ_{20} , modelliert mit gemahlene Walnussschalen.

6 Optimierung des Betriebs

Der Modellperimeter deckt nur 300 m des insgesamt 3800 m langen Speichers ab. Es ist daher nicht trivial, aus den Resultaten der Modellversuche auf die langfristigen Auswirkungen des Betriebskonzepts auf die Entwicklung des aktiven Speichervolumens zu schliessen. Aus diesem Grund hat die VAW zusätzlich Simulationen mit einem 1-D numerischen Modell durchgeführt. Wie sich in den physikalischen Modellversuchen bzw. in den begleitenden numerischen Simulationen gezeigt hat, führt das angedachte Betriebskonzept zu hohen Auflandungen im Bereich der Stauwurzel und zu einer Verminderung der aktiven Speicherkapazität im Fall eines grossen Hochwasserereignisses. Die VAW hat dem Betreiber daher ein angepasstes Betriebskonzept empfohlen, welches die unregulierte Durchleitung von Hochwassern durch die voll-

ständig geöffneten Entlastungsbauwerke (Spülschützen, Überfallwehr und insbesondere Umleitstollen) vorsieht. Damit einhergehend wird der Wasserspiegel im Speicher während des Hochwassers abgesenkt, sodass die Bildung eines mächtigen Deltas verhindert wird. Die hohen Transportkapazitäten an der Stauwurzel können genutzt werden, um grosse Sedimentfrachten weiterzuleiten und vorgängig abgelagerte Sedimente zu mobilisieren. Mit diesem Konzept werden die natürlichen Strömungsverhältnisse und der Geschiebehalt im Fluss für die kurze Dauer des Hochwasserereignisses wieder hergestellt. Gleichzeitig wird mit der Durchleitung von grossen Sedimentfrachten das Erosionspotential im Unterwasser reduziert. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass lufteinziehende Wirbel vor dem Umleitstollen durch die hohen, transversalen Fließgeschwindigkeiten unterdrückt und Teilöffnungen der Segmentschütze verhindert werden können. Ungünstige Luftpneumatische Einschlüsse vor der teilgeöffneten Schütze werden somit minimiert. Mit einem angepassten Betrieb des Stollens und der Hochwasserentlastungen können zudem transiente Strömungsverhältnisse im Stollen beim Übergang von Freispiegel zu Druckabfluss reduziert werden.

Mit Modellversuchen verschiedener Hochwasserereignisse wurde aufgezeigt, dass die Ablagerungen mit dem angepassten Betriebskonzept aufgrund des abgesenkten Wasserspiegels auf einem deutlich tieferen Niveau gehalten werden können (Abb. 6). Die erhöhte Transportkapazität über dem Geschiebedelta führt dazu, dass das im Modell zugegebene Geschiebe über den Verlandungskörper weitertransportiert wird. Sobald die Sedimente den Umleitstollen erreichen, werden sie durch den vollständig geöffneten Stollen ins Unterwasser gespült.

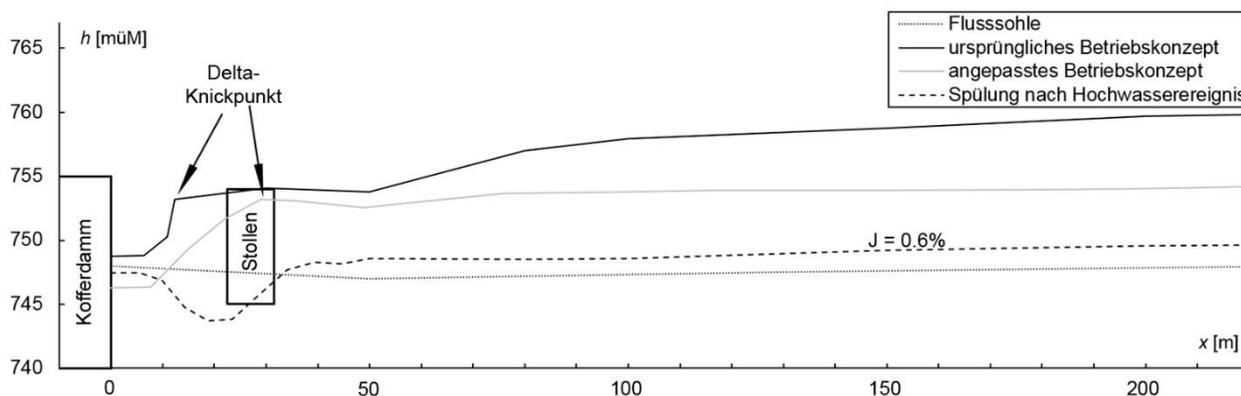


Abb. 6 Längsprofil der Verlandung im Modellperimeter flussaufwärts des Kofferdamms nach dem Bemessungshochwasser ($H_{Q_{350}} = 2'799 \text{ m}^3/\text{s}$) und nach der jährlichen Spülung anschliessend an das Ereignis.

Die numerischen Simulationen bestätigen die Ergebnisse der Modellversuche. Vor allem an der Stauwurzel können die Ablagerungen mit dem angepassten Betriebskonzept auf einem tieferen Niveau gehalten werden. Insbesondere wird verhindert, dass das Geschiebedelta in das aktive Speichervolumen vorrückt. Der jährliche Spülvorgang, der nach wie vor empfohlen wird, unterstützt die Umlagerungen der Sedimente im Speicher, sodass sich vom Delta-Knickpunkt ausgehend ein konstantes Sohlgefälle ähnlich dem heutigen, mittleren Gefälle des Flusses einstellt. Der definierte, optimale Spüldurchfluss von $150 - 200 \text{ m}^3/\text{s}$ legt den Knickpunkt des Geschiebedeltas fest, welcher sich langfristig vor dem Umleitstollen einstellen wird (Abb. 6).

7 Schlussfolgerungen

In Regionen mit besonders hohen, quarzhaltigen Sedimentfrachten zeigen gewöhnliche Entsanderbauwerke insbesondere bei hoher Ausbaumassmenge häufig unzureichende Resulta-

te. Aufgrund der Erfahrungen und dem enormen Turbinenverschleiss bei bereits in Betrieb stehenden Kraftwerken hat deshalb bei Projekten im Himalaya ein Umdenken stattgefunden. Der Bereich direkt vor dem Einlauf zur Triebwasserfassung wird als natürliches Entsanderbecken genutzt. Idealerweise wird die Bauumleitung so konzipiert, dass sie später zu einem Umleitstollen umfunktioniert werden kann. Insgesamt lassen sich dadurch signifikant Kosten einsparen. Gleichzeitig wird die Geschiebedurchgängigkeit sichergestellt, ohne dass das Geschiebe in den Nahbereich der Triebwasserfassung gelangt, wo es nur mit hohen Spülabflüssen wieder zu remobilisieren wäre.

Mithilfe der physikalischen Modellversuche an der VAW konnten die hydraulischen Kapazitäten und Strömungsbedingungen an der Stauanlage Patrind bestätigt und optimiert werden. Weiter wurden die Vorteile der Durchleitung von hohen Sedimentfrachten während Hochwasserereignissen aufgezeigt. Das Konzept der Kombination aus natürlichem Absetzbecken und Umleitstollen erweist sich dafür aus den oben genannten Gründen als besonders geeignet. Mit dem optimierten Betriebskonzept, welches während Hochwassern die Absenkung des Speichers durch den vollständig geöffneten Umleitstollen vorsieht, kann die Höhenlage des Geschiebedeltas im Stauwurzelbereich herabgesetzt und die hohen Sedimenteintragsfrachten direkt ins Unterwasser gespült werden. Dank des im Vergleich zum Abfluss geringen Speichervolumens ist der Betriebspegel nach einem Hochwasser schnell wieder erreicht, sodass keine massgeblich längeren Betriebsausfälle zu verzeichnen sind als mit dem ursprünglich angedachten Konzept. Mit dem optimierten Betriebskonzept können ungünstige Strömungsverhältnisse im Umleitstollen, die eine Folge der Anordnung der Schütze am Ende des Stollens sind, reduziert werden.

Literatur

Bagnold, R.A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, Prof. Paper 422-1, U.S. Geological Survey, Washington

Jenzer Althaus, J. (2011): Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet Induced Flow. Thesis 4927, Communication N°45 (A. Schleiss, ed.), LCH, EPF Lausanne

Kantoush, S.A. (2008): Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments, PhD thesis 4048, Communication N°37 (A. Schleiss, ed.), LCH, EPF Lausanne

Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung; Mitteilung 26, Preussische Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau.

Sumi T. (2000): Flushing efficiency on sediment flushing operation in Reservoirs, Journal of Japan Society of Dam Engineers, Kyoto

Zanke, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung; Springer-Verlag, Berlin

Zarn, B. (1992): Lokale Gerinneaufweitung - eine Massnahme zur Sohlenstabilisierung der Emme bei Utzenstorf; VAW-Mitteilung 118 (D. Vischer, ed.), VAW, ETH Zürich

Anschrift der Verfasser

Claudia Beck (korrespondierende Autorin, beck@vaw.baug.ethz.ch)

Nicola Lutz (lutz@vaw.baug.ethz.ch)

Adriano Lais (lais@vaw.baug.ethz.ch)

Robert Boes (boes@vaw.baug.ethz.ch)

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich