

# Numerische 1D Modellierung des Geschiebehaushaltes an der Öztaler Ache

*Stephan Kammerer, Lukas Vonwiller, Daniel Ehrbar, David Vetsch, Robert Boes*

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Ausbauprojekts Kraftwerk Kaunertal sollen an den beiden Hauptzubringern der Öztaler Ache die Wasserfassungen Vent und Gurgl realisiert werden. In den geplanten Wasserfassungen werden sich die aus dem Einzugsgebiet mobilisierten Feststoffe ablagern, weshalb pro Jahr 1-3 Stauraumspülungen vorgesehen sind.

Anhand numerischer 1D Simulationen wurden die langfristigen Auswirkungen der Stauraumspülungen auf den Geschiebehaushalt der Venter-, Gurgler- und Öztaler Ache untersucht. Für die numerischen Simulationen wurde die Software *BASEMENT* verwendet. Zur Modellierung des Geschiebetransportes wurde die Transportformel nach Smart & Jäggi auf einen Mehrkornansatz erweitert. Die verwendeten Modellansätze kommen verbreitet zur Anwendung und haben sich für vergleichbare Fragestellungen bewährt.

In einem ersten Schritt wurde das Modell des Istzustandes für den Zeitraum 1997-2012 erstellt. Die Geschiebeentnahmen entlang der Öztaler Ache, welche zum Teil aus Hochwasserschutzgründen getätigt werden, spielen dabei eine wichtige Rolle. Im numerischen Modell wurden die Entnahmemengen an den bekannten Baggerstellen als Zeitreihe vorgegeben. In einem zweiten Schritt wurden die geplanten Stauraumspülungen (Planzustand) für denselben Zeitraum simuliert. Durch einen Vergleich der Resultate im Ist- und Planzustand sollte beurteilt werden, inwiefern sich die Reduktion der Schleppkraft auf der Restwasserstrecke bis zur Mündung in den Inn auf die beobachteten Auflandungen, vor allem in den Beckenstrecken der Öztaler Ache, auswirkt. Ausserdem war zu untersuchen, ob und in welchem Masse die heutigen Baggerungen erhöht werden müssen, um unerwünschte Ablagerungen infolge der Stauraumspülungen zu vermeiden. Die schrittweise Vorgehensweise ist entscheidend für die Qualität und Belastbarkeit der Resultate. Die Ergebnisse konnten den Istzustand widerspiegeln und den Planzustand aussagekräftig darstellen.

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Die TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG beabsichtigt den Ausbau des Kraftwerks Kaunertal. Um die gefassten Einzugsgebiete des bestehenden Speichers Gepatsch zu erweitern, sollen an den beiden Hauptzubringern der Öztaler Ache die Wasserfassungen Vent und Gurgl realisiert werden. Die Fassungen werden jeweils durch ein Absperrbauwerk gebildet.

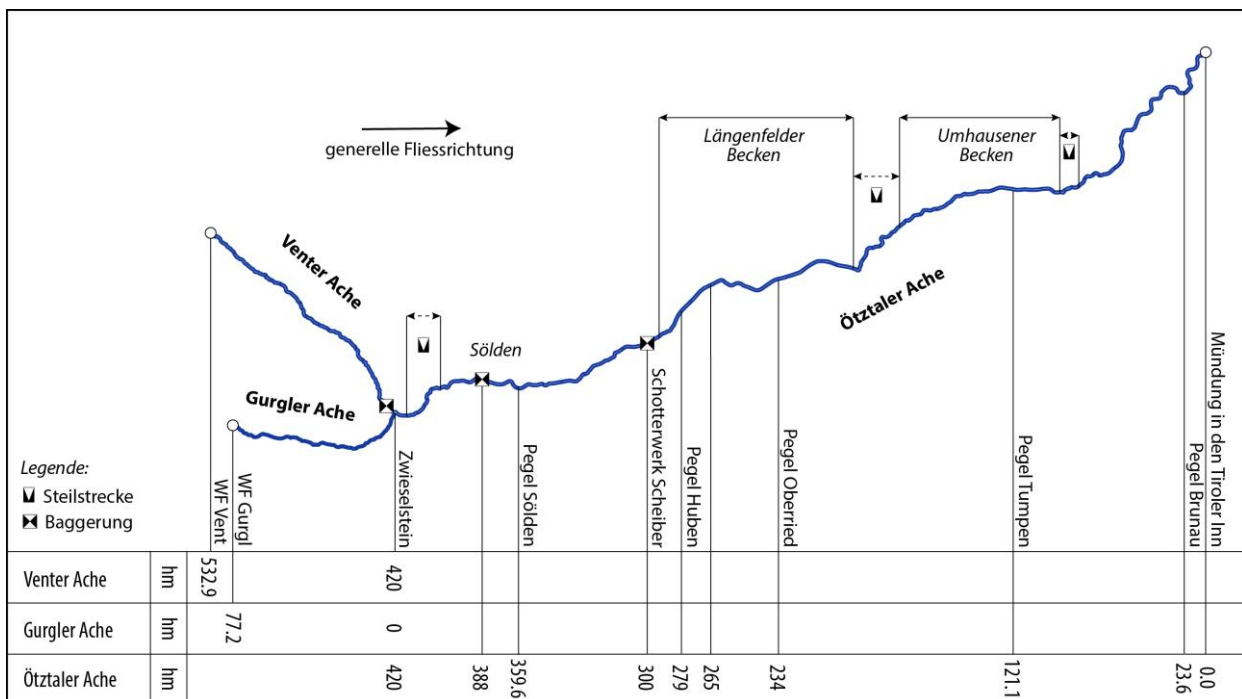
In der vorliegenden Untersuchung werden die Auswirkungen der geplanten Wasserfassungen auf den Geschiebehaushalt der Öztaler Ache mit einem numerischen 1D Modell untersucht. Einerseits werden die aus dem Einzugsgebiet mobilisierten Feststoffe in den Wasserfassungen abgelagert, andererseits wird dem Einzugsgebiet durch die Überleitung in den Speicher Gepatsch Wasser entzogen, sodass für den Sedimenttransport im Ötztal geringere Schleppkräfte vorhanden sind. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, sind geregelte Spülungen der Wasserfassungen vorgesehen. Die Spülungen erfolgen jeweils im abklingenden Ast mitt-

lerer Hochwasserereignisse (HQ1-HQ5), wodurch die Feststoffe aus der Wasserfassung mobilisiert und weiter flussabwärts transportiert werden. Als Betrachtungszeitraum wurde die Periode 1997-2012 (16 Jahre) festgelegt. Der Vergleich zwischen Istzustand und Planzustand (Zustand mit geplanten Fassungen und Spülungen) soll eine Beurteilung der Auswirkungen auf den Geschiebehaushalt der Öztaler Ache ermöglichen.

## 1.2 Untersuchungsraum

Die Öztaler Ache, der Hauptfluss des Ötztals, bildet sich durch den Zusammenfluss der Venter und Gurgler Ache bei Zwieselstein (Abb. 1). Ab Zwieselstein sind es 42 Kilometer, resp. 420 Hektometer, bis zur Mündung in den Inn. Die Hektometrierung (hm) erfolgt gegen die Fließrichtung und ist für die Öztaler Ache und Venter Ache durchgehend gewählt. Für die Gurgler Ache wird ab Zwieselstein eine separate Hektometrierung beginnend bei hm 0 verwendet. Regelmässige Geschiebeentnahmen werden in Zwieselstein (hm 420), in Sölden (hm 388) und beim Schotterwerk Scheiber (hm 300) getätigt.

Die morphologischen Verhältnisse entlang der Fließstrecke sind sehr heterogen. Stufen-Becken Sequenzen in Steilstrecken wechseln sich mit kanalisiertem Trapezprofilen in Siedlungsgebieten und zum Teil verzweigten Gerinnen in flachen Beckenstrecken ab. Das Gefälle variiert von 0.1 % im Bereich der Beckenstrecken bis zu 19 % innerhalb der Steilstrecken.



**Abb. 1** Projektperimeter der numerischen Untersuchung (ohne Seitenzubringer).

## 1.3 Modellkonzept und Vorgehensweise

Zur Kalibrierung eines Feststofftransportmodells werden üblicherweise Gerinnetopografien zu unterschiedlichen Zeitpunkten benötigt. Ausgehend von einer Anfangstopografie werden Simulationen durchgeführt und das Modell dahingehend kalibriert, die Zieltopografie plausibel abzubilden. Da solche topografischen Grundlagen für die vorliegende Untersuchung nicht zur Verfügung standen, mussten für die Kalibrierung grundlegende Annahmen getroffen und auf qualitative Beobachtungen und Erfahrungswerte von Experten sowie auf Erfahrungen aus ähnlichen Projekten zurückgegriffen werden. Gemäss Beobachtungen hat sich die Sohlenlage

über die gesamte Fließstrecke des Projektperimeters in den letzten Dekaden kaum verändert. Es ist davon auszugehen, dass das Gerinne eine stabile Deckschicht aufweist, welche nur während ausserordentlichen Hochwassern grossflächig aufgerissen wird. Zuletzt wurde dies während des Hochwasserereignisses im Jahr 1987 beobachtet. Die Hochwasserabflüsse im betrachteten Zeitraum waren kleiner, weshalb das Gerinne mit vorgegebener Sohlenlage als fixiert angenommen wird. Fragestellungen bezüglich der Sedimentablagerung, der Geschiebeentnahmen und der Sedimentdurchgängigkeit stehen somit im Vordergrund. Zudem wird angenommen, dass die Erosion im Bereich der Steilstrecken (Abb. 1) durch anstehenden Fels und grosse Blöcke im Gerinne verhindert wird.

## 2 Numerisches Modell

Für die numerische Modellierung des Feststofftransports wird das 1D Modul *BASEchain* der Software *BASEMENT* verwendet. Die Flachwassergleichungen werden in *BASEMENT* mit der Finite-Volumen-Methode in Kombination mit einem Riemannlöser numerisch gelöst. Mit den verwendeten numerischen Verfahren ist auch bei schwierigen hydraulischen Verhältnissen, wie beispielsweise Fließwechsel und grossen Froude-Zahlen, eine stabile Berechnung gewährleistet.

### 2.1 Modellaufbau und hydrologische Randbedingungen

Als topografische Grundlage werden die Höheninformationen des Berechnungsgitters eines numerischen 2D Modells der Universität Innsbruck (TIWAG 2012a) verwendet, das auf terrestrischen Vermessungen aus dem Jahr 2009 basiert. Ebenfalls werden die für das 2D Modell verwendeten Beiwerte für die Gerinnerauheit als Grundlage übernommen.

Die Seitenzubringer der Hauptflüsse Gurgler-, Venter- und Ötztaler Ache werden im numerischen Modell in reine Wasserzubringer und geschiebeführende Seitenzubringer unterteilt. Insgesamt werden 64 Seitenzubringer berücksichtigt, von denen 22 als geschiebeführend betrachtet werden. Bei diesen wird zusätzlich zur Wasserquelle eine Sedimentquelle implementiert.

Die Ganglinien der Wasserzubringer wurden im Auftrag der TIWAG mittels eines Niederschlags-Abflussmodells ermittelt und der VAW zur Verfügung gestellt. Die Restwasserabflüsse aus den geplanten Fassungen Vent und Gurgl wurden basierend auf physikalischen Modellversuchen der Universität Innsbruck erstellt und für die Simulationen im Planzustand als obere Randbedingung verwendet.

### 2.2 Geschiebetransport

#### Transportformel

Die stark variierenden Verhältnisse bezüglich Gefälle und Morphologie innerhalb des Ötztals stellen eine grosse Herausforderung bezüglich der Modellierung des Geschiebetransports dar. Für die vorliegenden Gefällsbereiche bietet sich die Transportformel von Smart und Jäggi (1983) zur Berechnung der Geschiebefracht an. Ausgehend von der originalen Formel nach Smart und Jäggi wird in der vorliegenden Untersuchung eine auf mehrere Kornklassen erweiterte Version verwendet (Gleichung 1).

$$q_{b,i} = \frac{4}{(s-1)} \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} J^{0.6} q_s (J - J_{c,i}) \quad [1]$$

$s = \rho_s / \rho$	relative Feststoffdichte [-]
$d_{30}, d_{90}$	charakteristischer Korndurchmesser [m], 30 % resp. 90 % (Gewichtsanteil) des Geschiebematerials weisen einen feineren Korndurchmesser auf.
$J$	Sohlgefälle [-]
$q_s$	Spezifischer Abfluss [m <sup>3</sup> /s/m]

Die spezifische Geschiebetransportrate  $q_{b,i}$  [m<sup>3</sup>/s/m] wird für die einzelnen Fraktionen  $i$  berechnet. Das kritische Sohlgefälle  $J_{c,i}$  entspricht dem Sohlgefälle, bei dem der Geschiebetransport der Fraktion  $i$  einsetzt:

$$J_{c,i} = \frac{\theta_{c,i}(s-1)d_i}{R_S} \quad [2]$$

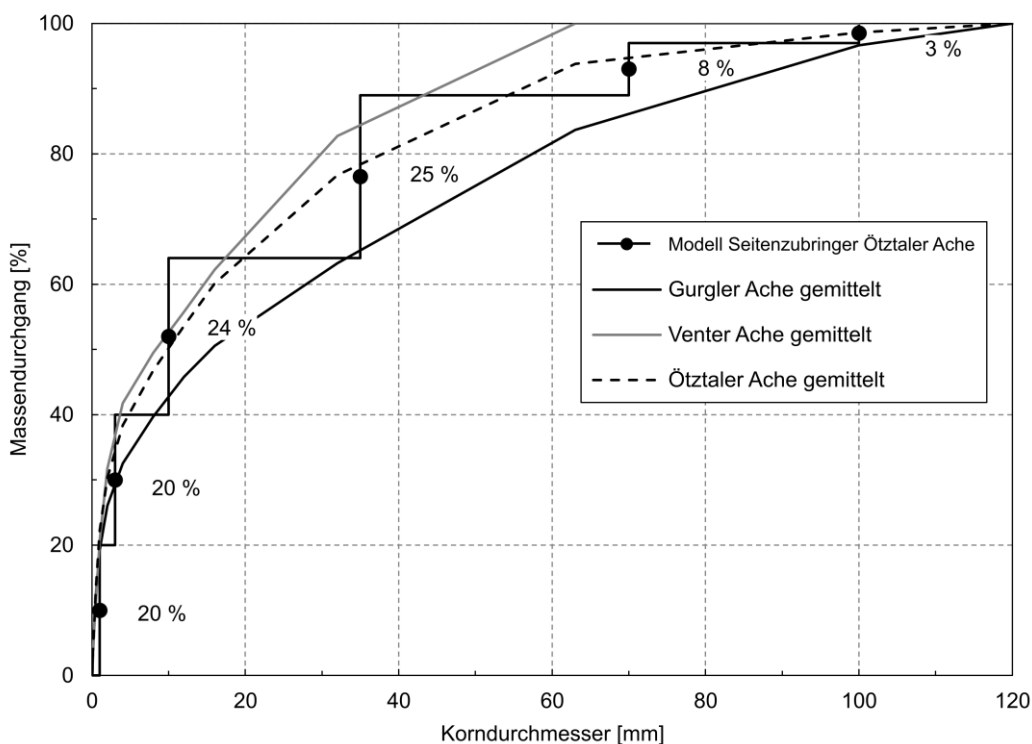
Dabei wird die hydraulische Belastung durch den hydraulischen Radius  $R_S$  und das transportierte Material durch den Korndurchmesser  $d_i$  der Fraktion  $i$ , sowie durch den entsprechenden Shields-Parameter  $\theta_{c,i}$  resp. die dimensionslose kritische Schubspannung der Fraktion  $i$ , berücksichtigt. Die Erweiterung auf fraktionierten Geschiebetransport beinhaltet eine Korrekturfunktion, mit der Abschattung und Expositionseffekte in der Geschiebemischung mit dem Ansatz nach Ashida und Michue (Parker 2008) berücksichtigt werden sollen.

### Geschiebeganglinien

Die Geschiebeganglinien der Gurgler- und Venter Ache sowie aller Seitenzubringer wurden vom Institut für Infrastruktur (IWI) der Universität Innsbruck erstellt. Dabei wurde für repräsentative Querprofile die Transportkapazität gemäss einer Transportformel von Rickenmann abgeschätzt (TIWAG 2012a). Über den Zeitraum 1997-2012 bringen die Venter Ache und ihre Seitenzubringer beim Zusammenfluss in Zwieselstein im Mittel rund 20'000 m<sup>3</sup>/a und die Gurgler Ache inkl. Seitenzubringer rund 12'000 m<sup>3</sup>/a Geschiebe mit sich (Feststoffvolumina ohne Porosität). Im Planzustand erfolgen je nach Sedimentaufkommen 1-3 Stauraumpülungen pro Jahr. Die Geschiebeganglinien der beiden Wasserfassungen wurden anhand physikalischer Modellversuche am IWI definiert und der VAW als obere Randbedingung für die Geschiebetransportsimulationen zur Verfügung gestellt.

### Kornverteilungen

Die mittleren Kornverteilungen für das laufende Geschiebe basieren auf Volumenproben des Unterschicht-Materials entlang der Venter-, Gurgler- und Ötztaler Ache aus dem Jahr 2009. Die mittlere Kornverteilung der Gurgler Ache ist deutlich gröber als diejenige der Venter Ache (Abb. 2). Der mittlere Korndurchmesser des laufenden Materials an der Gurgler Ache beträgt 37 mm und an der Venter Ache 21 mm. Beim Zusammenfluss der Gurgler- und Venter- Ache in Zwieselstein durchmischt sich das Geschiebe, was auch anhand der mittleren Kornverteilungen der Ötztaler Ache ersichtlich ist. Im numerischen Modell werden die Kornverteilungen mit 6 Kornfraktionen der Durchmesser 1, 3, 10, 35, 70 und 100 mm abgebildet.



**Abb. 2** Kornverteilungen der Hauptzubringer ( • Korndurchmesser der jeweiligen Fraktion im Modell).

### Geschiebeentnahmen

Für die Langzeitsimulationen des Geschiebehaushaltes müssen Geschiebeentnahmen berücksichtigt werden. Diese werden im Modell über eine Senke implementiert. Für die Querprofile der Baggerstellen wird eine Zeitreihe definiert, in der Zeitpunkt und Menge der Geschiebeentnahmen innerhalb der Simulationsperiode vorgegeben werden. Aufzeichnungen über die entnommenen Geschiebevolumina stehen für die bekannten Baggerstellen über den Zeitraum 2000-2010 zur Verfügung.

## 3 Modellierung Istzustand

### 3.1 Hydraulische Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung der Hydraulik erfolgt anhand des Hochwassers vom Juli 2001 (ca. HQ<sub>10</sub>). Um die vorhandenen Pegelmessungen im Modell möglichst gut zu reproduzieren, wird die Rauheit der Böschungen und der Gerinnesohle entsprechend angepasst. Das kalibrierte Modell wird mit den Hochwasserereignissen der Jahre 1997 (kleineres Hochwasser) sowie 1999 (ca. HQ<sub>20</sub>) validiert. Die modellierten Wasserspiegellagen stimmen unter Berücksichtigung der Genauigkeit des Modells und der Randbedingungen (Hydrologie) gut mit den gemessenen Wasserspiegellagen überein.

### 3.2 Definition der Geschiebeentnahmen

Für die Erstellung der Entnahmezeitreihen der Periode 1997-2012 wird die mittlere aufgezeichnete Jahresmenge als massgebende Grösse verwendet. Die definierten Baggervolumina sowie der Vergleich mit den aufgezeichneten Entnahmen sind in Tab. 1 dargestellt.

**Tab. 1** Aufgezeichnete und modellierte Geschiebeentnahmen für den Zeitraum 1997-2012 (Porosität  $p = 0.37$ ).

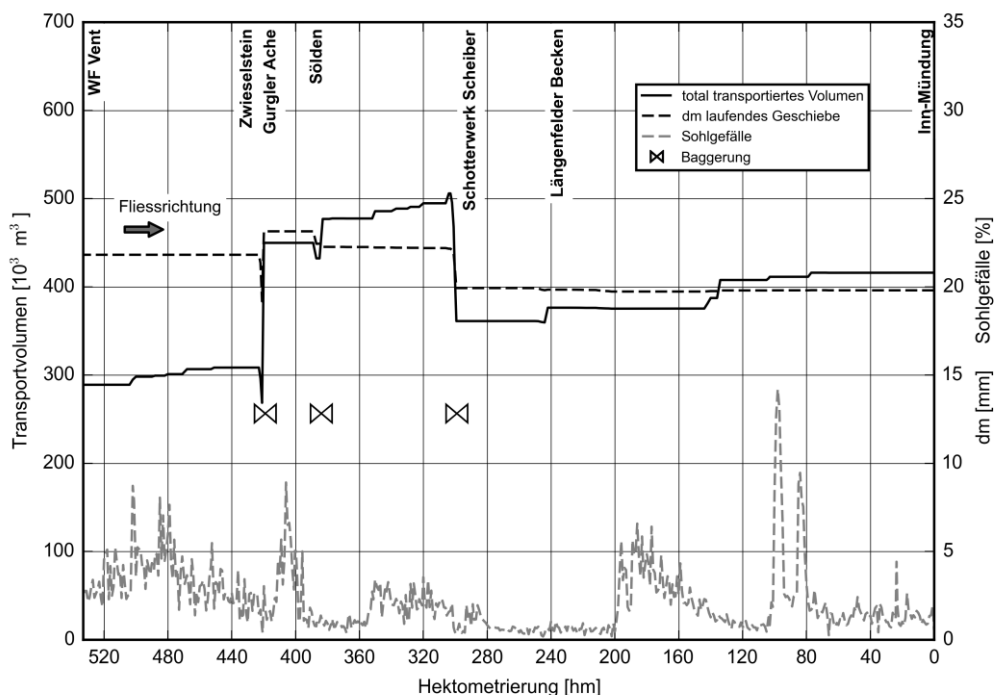
<b>Baggerstelle</b>	<b>Jahresmittel 1997-2012 [m<sup>3</sup>] (Modell inkl. Porosität)</b>	<b>Jahresmittel 1997-2012 [m<sup>3</sup>] (Aufzeichnung inkl. Porosität)</b>
Zwieselstein	4'500	4'300
Sölden	1'730	1'700
Schotterwerk Scheiber	14'400	15'000
<b>Total:</b>	<b>20'630</b>	<b>21'000</b>

### 3.3 Sensitivitätsanalyse

Mit einer Sensitivitätsanalyse wird das Verhalten des numerischen Modells bezüglich veränderter Randbedingungen untersucht, um die Plausibilität der getroffenen Annahmen zu stützen. Das Modell reagiert sensitiv auf die Veränderung der verwendeten Kornverteilungen. Bei einer Vergröberung verstärken sich Ablagerungen entlang der Fließstrecke, bei einer Verfeinerung hingegen verringern sie sich. Die Notwendigkeit der Geschiebeentnahmen bereits im Istzustand kann anhand der Simulation einer Nullvariante aufgezeigt werden. Wird das Geschiebe nicht an den Baggerstellen entnommen, erhöhen sich die dauerhaften Ablagerungen deutlich, vor allem innerhalb der Flachstrecken.

### 3.4 Resultate Istzustand

Im Transportdiagramm der Venter- und Öztaler Ache (Abb. 3) sind die Geschiebeentnahmen (lokal sinkendes Transportvolumen) und der Eintrag durch die Seitenzubringer (lokal ansteigendes Transportvolumen) zu erkennen. Ausserdem ist im Diagramm der mittlere Korndurchmesser  $d_m$  des laufenden Geschiebes dargestellt. Durch den Eintrag des groben Materials aus der Gurgler Ache bei hm 420.64 erhöht sich der mittlere Korndurchmesser auf ca. 23 mm. Der mittlere Korndurchmesser des laufenden Geschiebes am unteren Modellrand bei der Mündung in den Inn beträgt knapp 20 mm. Das grobe Material der Kornfraktion  $d = 100$  mm wird vorwiegend bei den Baggerstellen abgelagert und entnommen und gelangt somit nur in geringem Masse bis zur Mündung in den Inn.



**Abb. 3** Transportdiagramm Venter- und Öztaler Ache für den Istzustand 1997-2012, Transportvolumen ohne Porosität.

## 4 Modellierung Planzustand

### 4.1 Geschiebeentnahmen im Planzustand

Dauerhafte Auflandungen sind dort problematisch, wo der Abflussquerschnitt bereits limitiert ist und dadurch die Gefährdung durch Hochwasserereignisse zusätzlich verstärkt würde. Entlang der modellierten Fließstrecke sind vor allem die Flachstrecke bei Sölden (hm 380) und das Längenfelder Becken (vgl. Abb. 3) als sensibel zu betrachten. Ausgehend von den Geschiebeentnahmen des Istzustandes werden die Baggermengen im Planzustand schrittweise erhöht (Tab. 2). Ziel ist es, trotz verstärkter Auflandungstendenzen, tiefere maximale Wasserspiegel-lagen als im Istzustand zu erreichen.

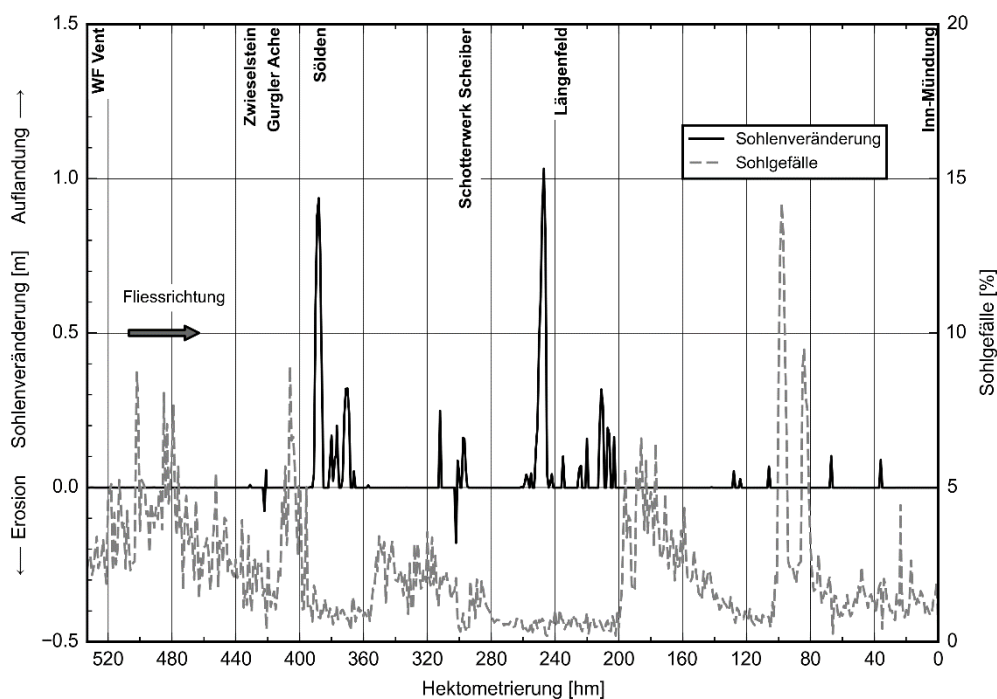
**Tab. 2** Modellerte Geschiebeentnahmen im Planzustand ( $V_{Plan}$ ) und Vergleich mit den Geschiebeentnahmen im Istzustand ( $V_{Ist}$ ) für den Zeitraum 1997-2012 ( $p = 0.37$ ).

Baggerstelle	Jahresmittel 1997-2012 [ $m^3$ ] (Modell inkl. Porosität)	1997-2012 [-] Faktor ( $V_{Plan}/V_{Ist}$ )
Zwieselstein	9'840	2.2
Sölden	4'100	2.4
Schotterwerk Scheiber	15'300	1.1
<b>Total:</b>	<b>29'240</b>	<b>1.4</b>

## 4.2 Resultate Planzustand

Im Gegensatz zum Istzustand bleiben im Planzustand signifikante Auflandungen bis zum Ende der Simulationsperiode am 31.12.2012 bestehen (Abb. 4). Im oberen Modellabschnitt gilt dies insbesondere für die Baggerstelle bei Sölden (hm 388) und für die nachfolgende Flachstrecke. Wie gross die Sohlenveränderungen zum Ende eines Jahres ausfallen, hängt nicht nur von der eingetragenen Geschiebemenge, sondern auch vom Zeitpunkt des Eintrags ab. Erfolgt dieser relativ spät im Jahr, können die Ablagerungen häufig erst im darauffolgenden Frühjahr, bei den ersten grösseren Abflüssen wieder mobilisiert werden.

Im unteren Abschnitt der Öztaler Ache (Längenfelder Becken) wird durch die Ablagerungen im Bereich von hm 247 ein Gefällswechsel in der Ausgangstopografie ausgeglichen. Dies führt zu einer lokalen Erhöhung des Gefälles und somit auch zur Erhöhung der Geschiebetransportkapazität im Modell. Somit kann im Planzustand trotz verringerter Abflussspitzen laufendes Geschiebe durchgeleitet werden.

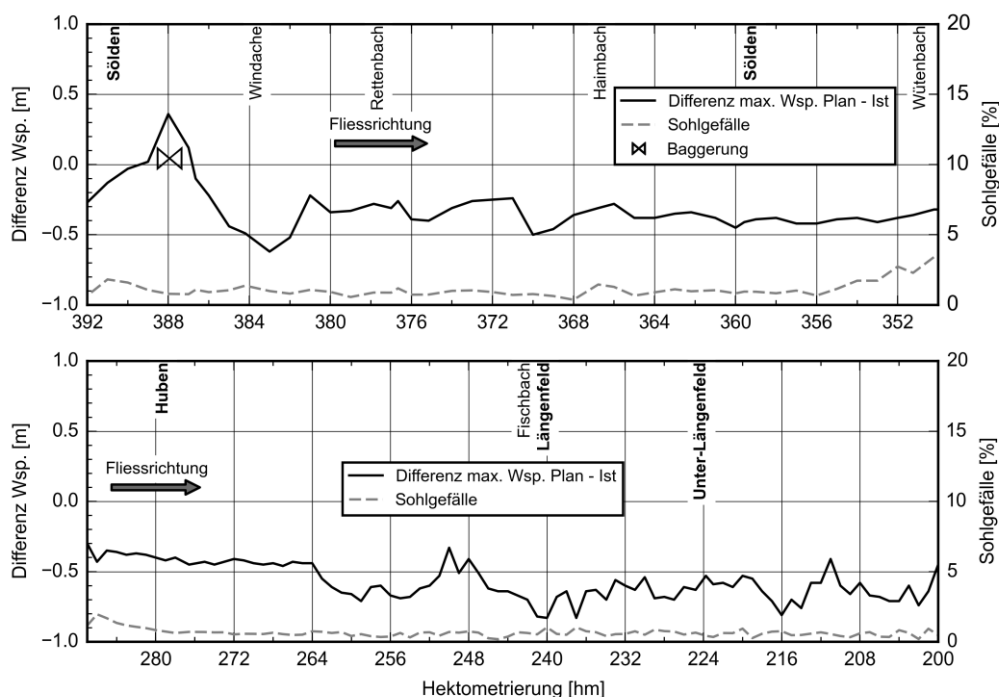


**Abb. 4** Differenzendiagramm Venter- und Öztaler Ache für den Planzustand 1997-2012.

Innerhalb der Flachstrecke bei Sölden liegen die maximalen Wasserspiegellagen im Planzustand etwa 0.2-0.6 m tiefer als im Istzustand (Abb. 5, oben). Dies gilt mit Ausnahme der Baggerstelle bei Sölden (hm 388), wo das Maximum des Istzustandes, bedingt durch den grossen Geschiebeeintrag der Venter Ache im Jahr 2003, geringfügig überschritten wird. Dies ist tolerierbar, da die Differenz zwischen der maximalen Wasserspiegellage und der Dammkote an dieser Stelle über 2 m beträgt.

Im Abschnitt des Längenfelder Beckens, wo das Gefälle der Öztaler Ache fast durchgehend weniger als 1 % beträgt (Abb. 5 unten), liegt der maximale Wasserspiegel im Planzustand überall unterhalb dem des Istzustands. Die Absenkung beläuft sich auf 0.3-0.8 m und schliesst auch den besonders flachen Bereich bei hm 247 ein.





**Abb. 5** Differenz (Planzustand – Istzustand) der maximalen Wasserspiegellagen im Betrachtungszeitraum 1997-2012 innerhalb der Flachstrecke bei Sölden (oben) sowie im Längenfelder Becken (unten).

## 5 Schlussfolgerungen

Das numerische Modell für den Istzustand vermag das Transportverhalten entlang der FlieBstrecke für den Zeitraum 1997-2012, unter Berücksichtigung der aufgezeichneten Geschiebeentnahmen, plausibel wiederzugeben. Die Baggerungen sind erforderlich, um Ablagerungen innerhalb der Flachstrecken, insbesondere im Längenfelder Becken, zu verhindern. Für den Planzustand resultiert damit eine Vergleichsgrundlage, um die Auswirkungen auf den Geschiebehaushalt zu untersuchen.

Im Planzustand werden die Abflussmengen der Venter-, Gurgler- und Ötztaler Ache durch den Rückhalt in den Fassungen reduziert und der Geschiebeeintrag am oberen Modellrand erfolgt stossweise. Mit dem Betrieb der Wasserfassungen Vent und Gurgl ergeben sich zwei massgebende Veränderungen. Einerseits wird aufgrund der Abflussreduktion das Transportvermögen auf der Restwasserstrecke reduziert, was in Verbindung mit dem stossweisen Geschiebeeintrag während der Spülung der Fassungen zu einer erhöhten Auflandungstendenz führt, andererseits verringern sich die maximalen Wasserspiegellagen infolge der reduzierten Spitzenabflüsse. Durch die Erhöhung der Geschiebeentnahmen konnte erreicht werden, dass der Effekt der verringerten Wasserspiegellagen nicht durch die erhöhten Aufladungen kompensiert wird. Somit resultiert für den Planzustand eine Verbesserung der Situation bezüglich der Hochwassersicherheit. Dass dies nicht nur für die regulären Abflüsse und Geschiebeeinträge der Jahre 1997-2012, sondern auch für aussergewöhnliche Ereignisse gilt, konnte mit zusätzlichen Szenarienrechnungen für das Hochwasser 1987 sowie mit Ereignissimulationen einzelner Seitzubringer gezeigt werden.

## Danksagung

Die VAW bedankt sich bei der TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG für den Auftrag zur numerischen Modelluntersuchung des Geschiebehaushalts der Ötztaler Ache. Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts „Ausbau Kraftwerk Kaunertal“ durchgeführt und bilden die Grundlage für diesen Beitrag.

## Literatur

- BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Version 2.5. © ETH Zurich, VAW, Vetsch D., Siviglia A., Ehrbar D., Facchini M., Gerber M., Kammerer S., Peter S., Vonwiller L., Volz C., Farshi D., Mueller R., Rousselot P., Veprek R., Faeh R., 2006-2015.
- Parker, G. (2008). Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice, *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110*, Chapter 3: Transport of gravel and sediment mixtures, 165-252.
- Smart, G.M., Jaeggi, M.N.R. (1983). Sedimenttransport in steilen Gerinnen. *VAW-Mitteilung Nr. 63*. (D. Vischer, Hrsg.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- TIWAG (2012a). Ausbau Kraftwerk Kaunertal. Fachbeitrag Feststoffhaushalt. Umweltverträglichkeitserklärung. *Technischer Bericht*. TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck.

## Anschrift der Verfasser

Stephan Kammerer (korrespondierender Autor)

[kammerer@vaw.baug.ethz.ch](mailto:kammerer@vaw.baug.ethz.ch)

Lukas Vonwiller

Daniel Ehrbar

Dr. David Vetsch

Prof. Dr. Robert M. Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Hönggerbergring 26

CH-8093 Zürich