

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 109 (2017)
Heft: 4

Artikel: Sedimenttransport in der Rheinvorstreckung und im Bodensee aufgrund zukünftiger hydrologischer Randbedingungen
Autor: Ehrbar, Daniel / Mirbach, Stefan / Vertsch, David F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941631>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

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

Sedimenttransport in der Rheinvorstreckung und im Bodensee aufgrund zukünftiger hydrologischer Randbedingungen

Daniel Ehrbar, Stefan Mirbach, David F. Vetsch, Ulrich Lang, Robert Boes

Zusammenfassung

Mehrere Millionen Kubikmeter an Feststoffen werden jährlich durch den Alpenrhein in den Bodensee eingetragen. Zwei Vorstreckungsdämme leiten Wasser und Feinsedimente durch die Flachwasserzone hindurch zu tieferen Bereichen des Sees. Damit wird die Verlandung des Deltas verhindert. Neue Hochwasserstatistiken liefern Hinweise auf deutlich höhere Abflussspitzen bei Extremereignissen. Mit dem geplanten Ausbau des Gerinnes des Alpenrhains im Rahmen des Hochwasserschutzprojekts Rhesi können solche Ereignisse im Rheintal sicher bewältigt werden. Die Auswirkungen der grösseren Wasser- und Sedimentfrachten auf die Rheinvorstreckung und den Bodensee wurden mit numerischen Modellen untersucht. Dabei waren einerseits die Ablagerungsprozesse innerhalb der Vorstreckung von Interesse, welche durch die Interaktion mit dem Bodensee beeinflusst sind. Andererseits können bei Hochwasserereignissen im Mündungsbereich Trübestrome entstehen, welche sich bis zum deutschen Seeufer ausbreiten können.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Rund 90 km nach dem Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein bei Reichenau mündet der Alpenrhein in den Bodensee. Nebst grossen Abflussspitzen von bis zu 2500 m³/s und mehr führt der Alpenrhein grosse Mengen an Sedimenten dem See zu. Die Schätzungen variieren von 1.5 bis 3 Millionen m³ an Feststoffen pro Jahr, wobei einzelne Hochwasserereignisse diesen Eintrag noch wesentlich erhöhen können. Häufig wird der Grossteil des Eintrags bei Hochwassern dem Bodensee zugeführt: während des Hochwassers vom 16. und 17. Juni 2016 wurden beispielsweise rund 35 % der Jahresfracht eingetragen.

Bei der Einmündung des Alpenrhains in den Bodensee wird ein grosser Teil des Strömungsimpulses gedämpft. Dies führt je nach Seestand zu einer deutlichen Abnahme der Sedimenttransportkapazität. Während das Längsgefälle im unteren Rheintal rund 1 ‰ beträgt, nimmt dieses im Mündungsbereich auf 0.3 ‰ ab. Folglich treten Ablagerungen auf, wenn die mitgeführte Sedimentfracht die Transportkapazität übersteigt, und es kommt zur Bildung eines Deltas.

Die Bregenzer, Harder und Fussacher Bucht waren nach der Verlegung der Rheinmündung im Jahr 1900 starken Verlandungen ausgesetzt; es bestand sogar die Befürchtung, dass die Bregenzer Bucht vom restlichen Bodensee abgeschnitten wird. Aus diesem Grund wurde 1972 der Bau der Vorstreckung beschlossen. Durch zwei 180 m auseinander liegende Vorstreckungsdämme wird die Sedimentfracht des Alpenrhains durch die Flachwasserzone hindurch bis zur Haldenkante geführt, wo der tiefere Teil des Bodensees beginnt. Die beiden Dämme erstrecken sich heute rund 4 km weit in den See hinaus. Die weitere Verlandung der Buchten konnte damit verhindert werden.

Das Hochwasserschutzprojekt «Rhesi – Rhein, Erholung und Sicherheit» der Internationalen Rheinregulierung (IRR) sieht nun einen Ausbau der internationalen Strecke des Alpenrhains auf Abflüsse von mindestens 4300 m³/s vor (Schenk et al. 2014). Folglich könnten zukünftig auf

dieser Strecke deutlich grössere Wasser- und Sedimentfrachten im Gerinne abgeführt werden als heute. Das Ziel der hier beschriebenen numerischen Modellierung war es, die Auswirkungen zukünftiger Frachten auf den Mündungsbereich des Alpenrhains und den Bodensee zu untersuchen.

1.2 Modellkonzept und Vorgehensweise

Das Untersuchungsgebiet wurde in das Mündungs- und das Seemodell unterteilt (Bild 1). Aufgrund des vorwiegend fluvialen Charakters der Strömung im Nahbereich der Vorstreckung wurde für die Berechnung ein tiefengemittelttes 2D-Modell mit Sedimenttransport verwendet. Mit dem Mündungsmodell untersuchte die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich, welche Auswirkungen ausserordentliche Hochwasserabflüsse auf die Rheinvorstreckung und die unmittelbar angrenzenden Flachwasserbereiche haben. Ferner konnten Einstromung und örtliche Verteilung der Schwebstoffe im Flachwasserbereich und bei den angrenzenden Buchten bestimmt werden, woraus eine Randbedingung für das Seemodell resultierte. Das 3D-Seemodell wurde durch die Ingenieurgesellschaft Professor Kobus und Partner GmbH (kup) erstellt. Die Aufgabe war die Untersuchung der Ausbreitung der Schwebstoffe im Bodensee. Die Kombination beider Modelle ermöglichte umfas-

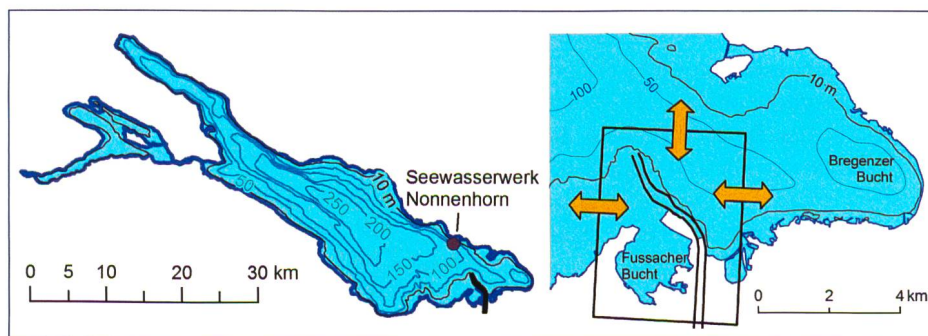


Bild 1. Modellperimeter des Mündungsmodells (rechts) und des Seemodells (links).

sende Aussagen über mögliche Auswirkungen des Ausbauprojekts Rhesi auf die Rheinvorstreckung und den Bodensee.

2. Grundlagen

2.1 Topografie, Hydrologie und Meteorologie

Jährlich wird im Winterhalbjahr die Sohlenlage der Rheinvorstreckung vermessen. Die Daten liegen als Querprofile vor. Der Seegrund wird im Abstand von rund zehn Jahren vermessen. Zum Zeitpunkt dieser Untersuchung waren die Daten der Messkampagne 2008 aktuell. Die Abflussmessdaten werden von der BAFU-Messstation 2473 «Diepoldsau, Rietbrücke» rund 20 km oberstrom der Mündung und die Seewasserstände von der Station 2032 «Obersee, Romanshorn» übernommen. Beide Datensätze dienen als Randbedingung für die Modellierung. Die meteorologischen Randbedingungen (Wind, Lufttemperatur, Luftfeuchte, lang- und kurzweilige Strahlung sowie Niederschlag) stammen aus dem COSMO-Modell, das von Meteo-Schweiz betrieben wird. Das Seemodell benötigt Informationen zu Abfluss, Wassertemperatur und Schwebstoffkonzentration in den Zuflüssen des Bodensees. Nebst dem Alpenrhein wurden Bregenzerach, Dornbirnerach, Leiblach, Rheintal-Binnenkanal (Vorarlberg) und neun weitere Zuflüsse berücksichtigt.

2.2 Feststoffe

Für die Modellierung des Sedimenttransports wurden insgesamt drei Kornklassen verwendet: 4 µm, 30 µm und 300 µm. Die feinste Kornfraktion zu 4 µm wird als Schwebfracht durch die Rheinvorstreckung hindurch transportiert (sog. «wash load») und wurde deshalb im Mündungsmodell nicht berücksichtigt. Umgekehrt konnten im Seemodell die grössten Körner mit einem Durchmesser von 300 µm vernachlässigt werden, da diese nicht über grössere Distanzen transportiert werden, sondern bereits im Nahbereich der Rheinvorstreckung sedimentieren.

Für die Schwebstofffracht des Alpenrheins wurde von einer Verteilung mit 90 % Körner zu 30 µm und 10 % Körner zu 300 µm ausgegangen. Für das Seemodell wurde als Randbedingung eine Zusammensetzung von 80 % zu 30 µm und 20 % zu 4 µm angesetzt. Diese Kornmischungen wurden anhand von Korngrössenverteilungen bestimmt. Im Mündungsbereich des Alpenrheins in den Bodensee wird der Zufluss von Wasser und Schwebstoffen aus dem Mündungsmodell als Randbe-

dingungen an das Seemodell übergeben. Das Seemodell selber gibt keine Daten ans Mündungsmodell weiter.

Da keine kontinuierlichen Schwebstoffmessungen am Alpenrhein für die Kalibrierungs- und Validierungszeiträume vorliegen, wurde, basierend auf 2-mal wöchentlichen Stichproben an der Messstation Lustenau, eine Schwebstoff-Abfluss-Beziehung hergeleitet. Diese berücksichtigt einerseits, dass die Verfügbarkeit an Schwebstoffen begrenzt ist, und andererseits eine Hysterese: Bei ansteigendem Pegel sind die Konzentrationen in der Regel höher als bei vergleichbarem Abfluss bei fallendem Pegel (Asselman 1999). Anhand eines Vergleichs der Messdaten von acht anderen grossen Schweizer Fließgewässern, welche in Alpenrandseen münden, wurde als maximale Schwebstoffkonzentration ein Wert von 10 g/l festgelegt (Tabelle 1). Dies korrespondiert auch mit dem höchsten Messwert von 9.3 g/l, welcher am 3. August 1974 bei der Messstation Diepoldsau gemessen wurde.

2.3 Szenarien

Um die Auswirkungen des Ausbauprojekts zu untersuchen, wurde zwischen Referenz- und Ausbauszenarien unterschieden. Referenzszenarien können bereits im heutigen Zustand eintreten, d.h., sie sind unabhängig vom Ausbauprojekt. Zu ihnen gehören das HQ₁₀₀ mit einer Abflussspitze von 3100 m³/s sowie Extremereignisse (EHQ = 5800 m³/s), welche mit einem Dambruch oder einem Überströmen der Dämme einhergehen. In diesen Ereignissen treten im Alpenrhein Abflussspitzen von bis zu 4100 m³/s auf, was nahezu einem HQ₃₀₀ von 4300 m³/s entspricht. Die über die Dämme entlasteten Wassermassen fliessen über Land dem Bodensee zu und führen zu einem höheren Seestand. Ausbauszenarien können erst nach der Realisierung von Rhesi auftreten. Zu ihnen gehören das HQ₃₀₀ mit einer Abflussspitze von 4300 m³/s und das Extremereignis ohne Dambruch oder Überströmen der

Dämme (d.h. bordvoller Abfluss). Ergänzend wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss von Randbedingungen zu untersuchen.

3. Modellaufbau

3.1 Mündungsmodell

Für die numerischen Berechnungen des 2D-Mündungsmodells wurde die an der VAW entwickelte Software BASEMENT (Vetsch et al. 2017) eingesetzt, womit die Strömung und der Transport von Feststoffen als Schwebstoff- und Geschiebetransport berechnet werden. Für den Geschiebetransport wurde die Transportformel von Wu et al. (2000) verwendet. Dieser Mehrkorn-Ansatz berücksichtigt Abschattungseffekte und weist bei sehr kleinen Sohlgefällen, wie sie in der Rheinvorstreckung auftreten, eine gute Übereinstimmung mit Natur- und Labormessdaten auf. Das Modellgebiet wurde mit gut 9000 Rechenzellen diskretisiert, welche in der Rheinvorstreckung durchschnittlich rund 300 m² gross sind.

Am Einströmrund wurden Ganglinien für Wasser und Sediment definiert, und als untere Randbedingung wurde die Ganglinie des Seestands angesetzt. Als Initialzustand wurde ein konstanter Abflusszustand vorgegeben, welcher den Ausgangswerten der Ganglinien entspricht.

3.2 Seemodell

Zur Simulation der Prozesse im See wurde das vom Centre for Water Research an der University of Western Australia entwickelte 3D-Modellsystem ELCOM-CAEDYM (Hipsley und Dallimore 2012, Hodges et al. 2012) verwendet, welches bereits bei einer Vielzahl unterschiedlicher Fragestellungen am Bodensee angewendet wurde (z.B. Lang et al. 2008). Das Modell berechnet die Seeströmung sowie die Temperatur- und Leitfähigkeitsverteilung im See. ELCOM wird gekoppelt mit dem Wasserqualitätsmodell CAEDYM, mit dem der Transport

BAFU-Messstation	Datum	Abfluss [m ³ /s]	Jährlichkeit [HQ _x]	SSC _{max} [g/l]
2019 Aare (Brienzwiler)	22.03.1991	48	< HQ ₁	11.7
2109 Lütchine (Gsteig)	10.10.2011	128	HQ ₂	9.8
2020 Ticino (Bellinzona)	25.08.1987	516	< HQ ₁	10.0
2368 Maggia (Locarno)	24.09.1993	1715	HQ ₂	0.9
2469 Kander (Hondrich)	31.07.1993	76	< HQ ₁	8.4
2009 Rhône (Porte du Scex)	16.10.2000	1109	HQ ₆₀	8.2
2372 Linth (Mollis)	23.08.1998	198	HQ ₂	7.9
2056 Reuss (Seedorf)	03.05.2002	284	HQ ₂	6.8

Tabelle 1. Maximal gemessene Schwebstoffkonzentrationen SSC_{max} an acht BAFU-Messstationen vor Alpenrandseen (BAFU, individuelle Datenlieferung).

von Schwebstoffen simuliert werden kann. Der Transport der Schwebstoffe erfolgt durch die Seeströmung, wobei die Auswirkungen auf die Dichte des Seewassers berücksichtigt werden können und somit die Ausbreitung von Dichteströmen simuliert werden kann.

Das Modellgebiet umfasst den gesamten Bodensee. Die horizontale Auflösung des Modellnetzes beträgt $400 \times 400 \text{ m}^2$ mit einer lokalen Verfeinerung auf $100 \times 100 \text{ m}^2$ im Bereich der Mündung des Alpenrheins. Die vertikale Diskretisierung ist tiefenabhängig und beträgt 2.5 m von der Wasseroberfläche bis in 80 m Tiefe, steigt danach bis 110 m stetig an auf 10 m und verbleibt darunter auf diesem Wert. Die vertikal hohe Auflösung im oberen Bereich der Wassersäule ist wichtig, um die Dichteschichtung, interne Wellen und die Ausbreitung des Wassers aus dem Alpenrhein im Modell nachbilden zu können.

Dem Modell werden Randbedingungen zu den hydrologischen Verhältnissen der Zuflüsse sowie zur Meteorologie vorgegeben (siehe *Abschnitt 2.1*). Daten zum Zufluss des Alpenrheins und dessen Schwebstoffkonzentration wurden vom 2D-Mündungsmodell übernommen.

Zur Definition des Anfangszustands der Simulation wurden dem Modell der Wasserstand, Temperaturprofile und die Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule vorgegeben. Die initialen Strömungsgeschwindigkeiten im See sind null, jedoch wurde die erste Woche des Simulationszeitraums als Einschwingdauer angesetzt, damit sich ein realistisches Geschwindigkeitsfeld einstellen konnte (Appt et al. 2004).

4. Kalibrierung und Validierung

4.1 Mündungsmodell

Das Mündungsmodell wurde anhand des Jahres 2005 kalibriert. In diesem Jahr trat ein Abfluss von $2252 \text{ m}^3/\text{s}$ auf, was einem rund 30-jährlichen Hochwasser entspricht. Die Validierung wurde anhand des Jahres 2008 mit Abflussspitzen von maximal $1331 \text{ m}^3/\text{s}$ (2-jährliches Ereignis) durchgeführt. Sowohl bei der Kalibrierung als auch bei der Validierung wurde über ein Zeitfenster von einem halben Jahr gerechnet, in welchen Sedimentvolumina von 2.296 Mio m^3 (Kalibrierung) resp. 5.183 Mio m^3 (Validierung) eingetragen wurden. Als Zielgrößen wurde einerseits die Volumenveränderung innerhalb der Rheinvorstreckung und andererseits die davon abgeleitete Grösse der Verände-

Kalibrierungsgrösse	Kalibrierung HW 2005		Validierung HW 2008	
	Natur	Modell	Natur	Modell
Volumenänderung [m^3]	-161 000	-148 000	170 000	176 000
mittlere Sohlenlage [m]	-0.26	-0.25	0.24	0.23

Tabelle 2. Vergleich der Naturmessdaten «Natur» mit den im numerischen Modell berechneten Werten «Modell».

rung der mittleren Sohlenlage verwendet. Unter Berücksichtigung der Entnahmevolumina infolge Baggerungen ergeben sich die Resultate aus *Tabelle 2*, welche in sehr guter Übereinstimmung mit den Naturmessdaten stehen.

Das numerische Modell zeigt auf, dass die Rheinvorstreckung grundsätzlich einer Auflandungstendenz ausgesetzt ist – dies kommt in einem Jahr wie 2008 mit kleinen Hochwasserspitzen zum Ausdruck (*Bild 3*). Nur grosse Hochwasserereignisse wie 2005 führen dazu, dass grosse Mengen Sohlenmaterial erodiert werden und am Ende des Jahres eine Erosion anstatt einer Auflandung verbleibt. 82 % (Kalibrierung) resp. 83 % (Validierung) der am oberen Modellrand der Rheinvorstreckung zugegebenen Sedimente werden ohne

Interaktion mit der Sohle durch diese hindurchtransportiert und direkt dem Seemodell übergeben. Das Modell ist in der Lage, mit exakt denselben Parametern die beiden gänzlich unterschiedlichen Situationen zu erfassen.

4.2 Seemodell

Für die Kalibrierung des Seemodells wurde das Hochwasserereignis vom August 2005 verwendet, infolge dessen sich im See ein Dichtestrom ausgebildet hat, der bis an die tiefste Stelle im See vorgedrungen ist. Die Schwebstoffprozesse im Modell wurden so parametrisiert, dass Temperatur und Geschwindigkeit des Dichtestroms möglichst exakt nachgebildet werden. Dabei hat sich gezeigt, dass sich insbesondere die Parametrisierung der Sedimentations-

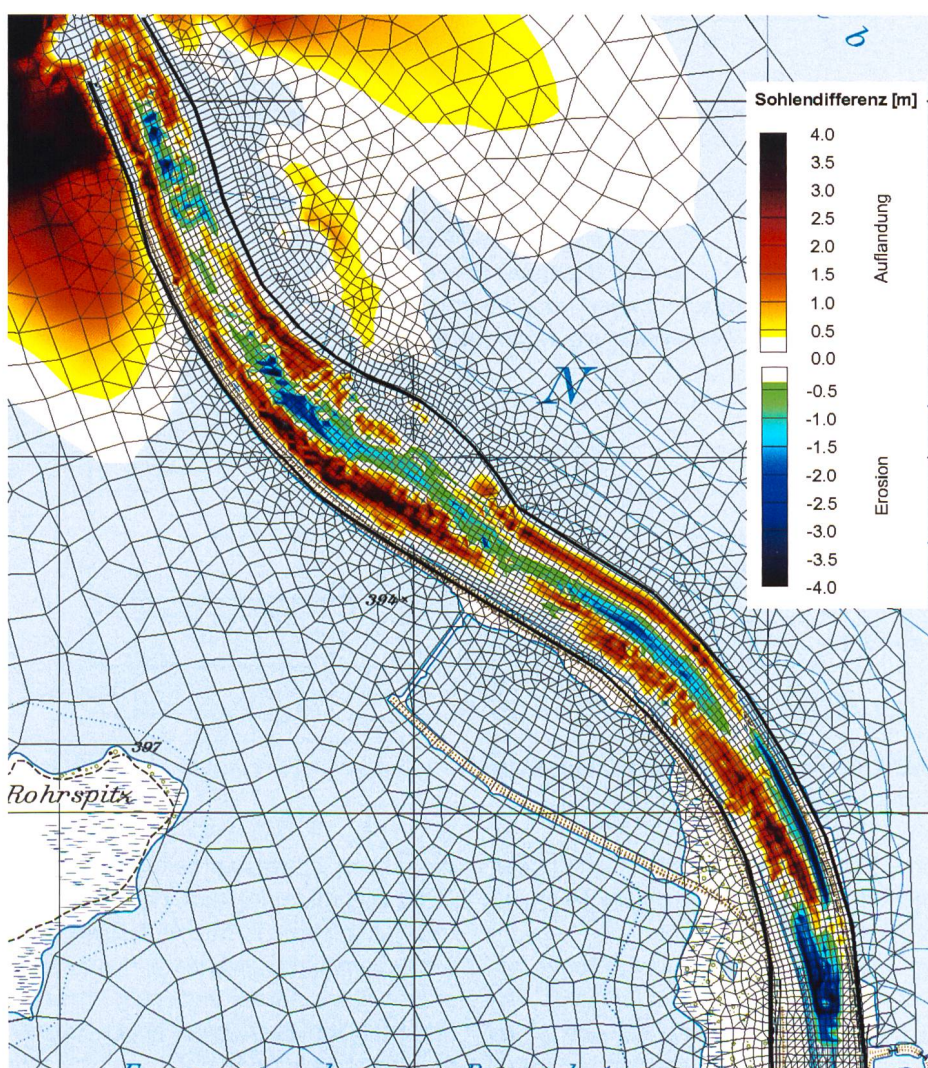


Bild 2. Sohlenveränderungen nach dem Validierungsereignis HW 2008.

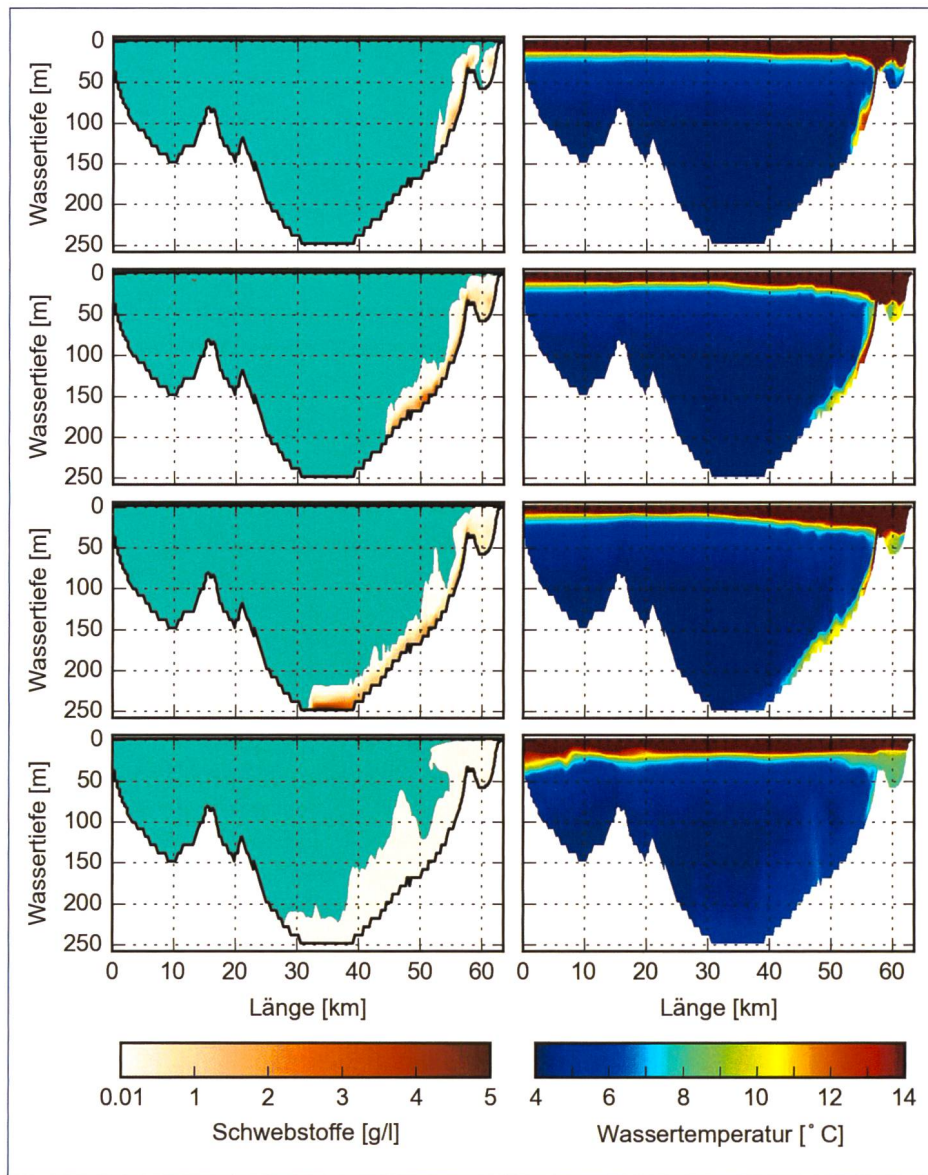


Bild 3. Längsschnitt durch den Bodensee mit berechneten Schwebstoffkonzentrationen (links) und Wassertemperaturen (rechts) 0, 6, 14 und 62 Stunden nach dem Spitzenabfluss im Alpenrhein beim Hochwasserereignis im August 2005.

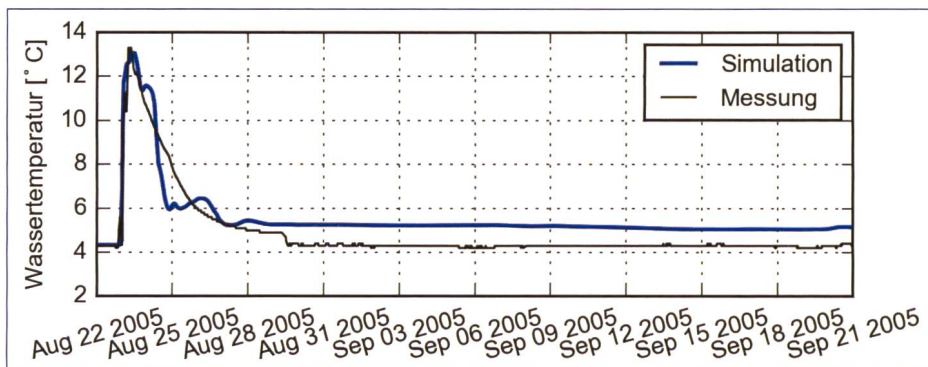


Bild 4. Gemessene und berechnete Wassertemperaturen an der Verankerung WH in 140 m Wassertiefe.

und Erosionsprozesse der feinen Sedimentfraktion sensitiv auf die Modellergebnisse auswirkt.

Bild 3 zeigt den vom Modell berechneten Dichtestrom anhand der Schwebstoffkonzentrationen und Wassertemperaturen im Längsschnitt durch den See. Die Ergebnisse verdeutlichen,

dass die typischen Ausbreitungsprozesse eines Dichtestroms vom Modell qualitativ erfasst werden. Das mit Schwebstoffen angereicherte, wärmere Flusswasser strömt aufgrund der höheren Dichte im Vergleich zum Seewasser als turbulenter Dichtestrom entlang der Seesohle bis zum tiefsten Punkt des Sees. Aufgrund abneh-

mender Geschwindigkeiten und zunehmender Sedimentation der Schwebstoffe nimmt die Dichte des Dichtestroms ab und dieser bricht zusammen. Das wärmere Wasser steigt zusammen mit der feinen Schwebstofffraktion auf.

Anhand zweier Messverankerungen des Instituts für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg konnte der durch das Hochwasserereignis ausgelöste Dichtestrom an der Seesohle identifiziert werden. Die Verankerung FU liegt an der tiefsten Stelle des Bodensees in 252 m Tiefe in einer Entfernung von mehr als 20 km von der Rheinmündung, die Verankerung WH liegt in 140 m Wassertiefe ca. 5 km von der Mündung entfernt. Bild 4 vergleicht die gemessenen und mit dem Modell berechneten Wassertemperaturen an der Verankerung WH. Kurz nachdem im Alpenrhein der Spitzenabfluss auftrat, steigt die Wassertemperatur an der Verankerung schlagartig von 4,5°C auf 13°C. Sowohl der Zeitpunkt als auch die Höhe des Anstiegs werden vom Modell genau nachbildet.

Das Seemodell berechnet auch die durch Sedimentations- und Erosionsprozesse auftretenden Änderungen der Sohlhöhen. Bild 5 zeigt die entsprechenden Ergebnisse als Folge des Hochwasserereignisses vom August 2005. Im unmittelbaren Mündungsbereich des Alpenrheins dominieren Erosionsprozesse, während in etwas grösserer Entfernung Bereiche mit Erosion und Sedimentation alternieren. In den Randzonen des Dichtestroms dominiert die Erosion.

In Folge von Hochwasserereignissen im Alpenrhein auftretende Dichteströme sind, je nach Ausmass und Ausbreitung, oft auch an den Trinkwasserentnahmen im See anhand erhöhter Trübungswerte erkennbar. Dies trifft insbesondere auf die nur wenige Kilometer von der Mündung des Alpenrheins am Nordufer in 60 m Wassertiefe gelegene Entnahme des Seewasserwerks Nonnenhorn zu (Lage siehe Bild 1). Zur Validierung des Modells wurde der Zeitraum von Mai bis Oktober 2008 nachgebildet und die vom Modell berechneten Schwebstoffkonzentrationen und Wassertemperaturen an der Entnahme Nonnenhorn mit Messwerten verglichen (Bild 6). Im Mai, Juli und September 2008 konnten deutliche Trübungs- und Temperaturanstiege als Folge von Dichtestrom-Ereignissen an der Entnahme verzeichnet werden. Diese werden vom Modell nachgebildet. Die berechneten Wassertemperaturen und Trü-

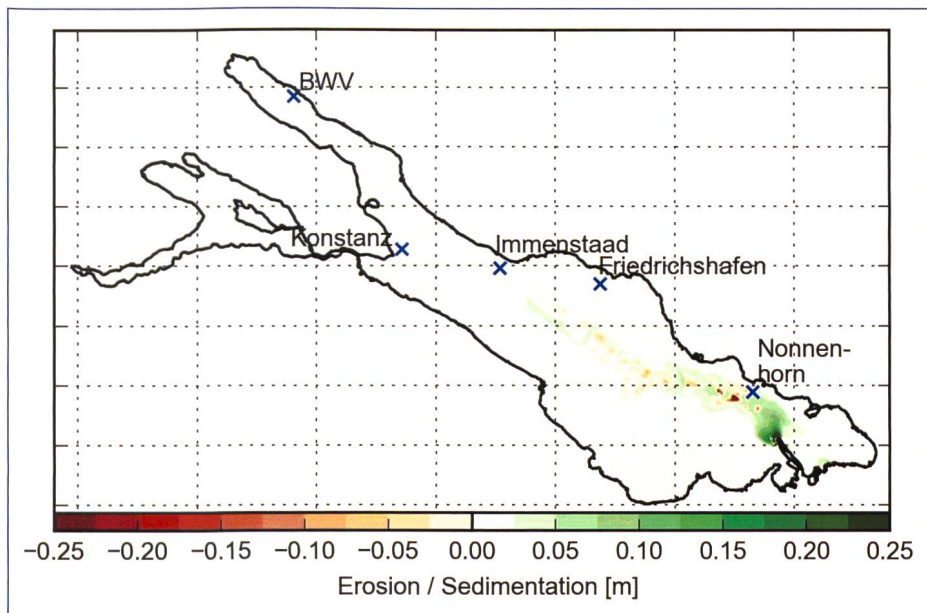


Bild 5. Berechnete Änderungen der Sohlhöhen als Folge des Hochwasserereignisses vom August 2005.

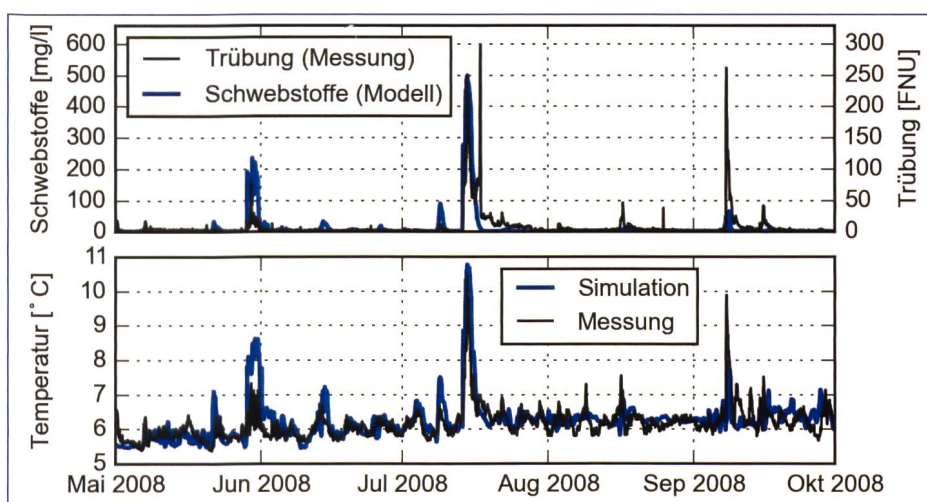


Bild 6. Gemessene Trübung und berechnete Schwebstoffkonzentration (oben) und gemessene und berechnete Wassertemperatur (unten) an der Trinkwasserentnahme des Seewasserwerks Nonnenhorn in 60 m Wassertiefe von Mai bis Oktober 2008.

bungen wurden beim ersten Ereignis im Mai überschätzt, im September dagegen unterschätzt. Die Ursache hierfür liegt in einer ungenauen Quantifizierung der über den Rhein einströmenden Schwebstoffe und deren Korngrößenverteilung, die entscheidend für eine gute Nachbildung im Modell ist. Die verwendete Schwebstoff-Abfluss-Beziehung ist mit Unsicherheiten behaftet, da insbesondere bei Abflüssen über 600 m³/s erst wenige Messwerte vorhanden sind. Daher sind weitere Messungen und Untersuchungen notwendig, um diese Größen besser quantifizieren und beschreiben zu können.

5. Szenarien

Bei den Referenzszenarien (Abflussspitzen $\geq$ HQ₁₀₀) treten grundsätzlich Erosionen innerhalb der Rheinvorstreckung auf. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen

der Kalibrierung: grosse Abflussspitzen sind in der Lage, beträchtliche Mengen an Sohlenmaterial zu erodieren und in den See auszutragen. Rund 90 % der eingebrachten Schwebstoffe werden bei den Ausbauszenarien (Abflussspitzen $\geq$ HQ₃₀₀ nach Realisierung des Ausbauprojekts) durch die Rheinvorstreckung hindurchtransportiert.

Die Simulationen der Szenarien zeigen, dass bei einem tiefen Ausgangsseestand die Erosionen grösser ausfallen als bei hohem Seestand. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen: bei einem tiefen Seestand treten die dämpfende Wirkung des Bodensees und der Rückstau effekt weiter unterstrom in der Rheinvorstreckung ein als bei einem hohen Seestand. Dadurch wird die Rheinvorstreckung bei tiefem Seestand länger durch die dynamischen Prozesse des Alpenrheins be-

einflusst und die Erosionen dauern länger an und fallen grösser aus. Die Dammoberkante respektive die Standfestigkeit der Dämme ist entscheidend; bei einer Breusche im Damm ändert sich das Verhalten grundsätzlich. Die über eine Bresche entlasteten Sedimente werden nur über kurze Distanzen transportiert und relativ rasch abgelagert. In diesem Fall kann aufgrund des verringerten Abflusses innerhalb der Rheinvorstreckung die Sedimentfracht nicht mehr im selben Umfang transportiert werden, weshalb wesentlich höhere Auflandungen eintreten können.

Im Seemodell treten zwei verschiedene Arten von Dichteströmen auf: sogenannte Underflows und Interflows. Erstere breiten sich entlang des Seegrunds aus, Letztere schichten sich unterhalb der Sprungschicht (Metalimnion) ein. Die Sprungschicht bildet den Übergang zwischen der oberen Wasserschicht (Epilimnion) und der unteren (Hypolimnion). Die Schwebstoffkonzentrationen im Bodensee sind im Nahbereich der Mündung von Underflows, mit zunehmender Entfernung von der Mündung durch Interflows bestimmt. Niedrige Seestände verstärken die Ausbildung von Underflows und hemmen die Ausbildung von Interflows.

Im Seemodell beschränken sich die Unterschiede zwischen Referenz- und Ausbauszenarien auf die Extremereignisse; für das HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar. Ein EHQ im heutigen Referenzzustand hätte eine seitliche Entlastung über die Dämme im Rheintal zur Folge, wodurch die Abflussspitze bei der Mündung und damit auch die Sedimentfracht reduziert würden. Im Ausbaustand würde diese Spitze aber innerhalb des Gerinnes abtransportiert, und damit wären die Belastungen deutlich grösser. Die Entstehung von Dichteströmen wird dadurch begünstigt. Entscheidend für die Schwebstoffkonzentrationen im See ist aber nicht nur der Zufluss an Wasser und Sediment, sondern ebenso der Seestand.

6. Schlussfolgerung

Die Auswirkungen zukünftiger Abfluss- und Sedimenteinträge in den Mündungsbereich des Alpenrheins und den Bodensee wurden mit numerischen Simulationen untersucht. Mit einem tiefengemittelten 2D-Modell konnten die vorwiegend fluvialen Prozesse innerhalb der Rheinvorstreckung modelliert werden. Die Sedimentflüsse, welche im numerischen Modell die Rheinvorstreckung verlassen, wurden als Randbedingung für ein 3D-Seemodell

verwendet. In diesem konnten die Ausbreitungen der feinen Schwebstoffe im Bodensee abgebildet werden. Zur Kalibrierung und Validierung wurden zwei Hochwasserereignisse simuliert und mit Naturmessdaten verglichen, wie z. B. von Querprofil- und Seegrundaufnahmen oder Temperatur- und Trübungsmessungen im Bodensee.

Die Rheinvorstreckung ist grundsätzlich einer Auflandungstendenz ausgesetzt. Dies zeigt u. a. die Validierung mit dem 2-jährlichen Hochwasserereignis des Jahres 2008. Bei grossen und extremen Abflüssen hingegen können mehrere 100 000 m³ der abgelagerten Sedimente wieder mobilisiert und in den See ausgebracht werden. Deshalb kann innerhalb eines Jahres eine Erosion beobachtet werden, wie dies u. a. bei der Kalibrierung mit dem 30-jährlichen Hochwasserereignis des Jahres 2005 gezeigt wurde. Über 80 % der Sedimentfracht des Alpenrheins werden durch die Rheinvorstreckung hindurchtransportiert. Diese sehr feinen Sedimente werden in den Bodensee eingetragen, ohne dass sie sich in der Rheinvorstreckung absetzen.

Aufgrund des stark Schwebstoffbeladenen Zuflusses des Alpenrheins kann es im Bodensee zu Dichteströmen kommen, welche mit dem Seemodell simuliert werden können. Die Dichteströme führen mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit warmes Oberflächenwasser zum Seegrund. Der gemessene Temperaturanstieg von bis zu 8 °C in 140 m Tiefe wurde gemessen und simuliert. Die Übereinstimmung von gemessenem und simuliertem Temperaturanstieg ist bei grossen Hochwasserereignissen besser als bei kleinen.

Die Resultate zeigen, dass die numerischen Modelle in der Lage sind, die

wesentlichen Prozesse korrekt zu erfassen. Beide Modelle ermöglichen damit grundsätzliche Aussagen zu den Auswirkungen baulicher Massnahmen am Alpenrhein – wie sie im Rahmen des Ausbauprojekts Rhesi projiziert werden – oder an der Rheinvorstreckung. Die Simulationen von Szenarien mit zukünftig zu erwartenden Abflüssen zeigen, dass das Ausbauprojekt Rhesi aus morphologischer Sicht keine negativen Auswirkungen auf den Wasser- und Sedimenttransport in der Rheinvorstreckung und im Bodensee haben wird. Des Weiteren bilden die beiden Modelle eine Ausgangslage für weiterführende längerfristige numerische Simulationen der Mündungs-, Delta- und See-Entwicklung.

Dank

Die Studie wurde von der Internationalen Rheinregulierung (IRR) in Auftrag gegeben. Die Autoren gratulieren der IRR zu ihrem 125-jährigen Bestehen.

Literatur

Asselman, N. E. M. (1999). Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine. *Hydrological Processes* 13(10): 1437–1450.

Appt, J., Imberger, J., Kobus, H. (2004). Basin-scale motion in stratified Upper Lake Constance. *Limnology and Oceanography* 49(4): 919–933.

Hipsey, M. R., Antenucci, J. P., Hamilton, D. (2012). Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3.2 Science Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.

Hodges, B., Dallimore, C. (2012). Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM. v2.2 Science Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.

Lang, U., Kobus, H., Mehlhorn, H. (2008): BodenseeOnline als Entscheidungs- und Unterstützungssystem. *Wasserwirtschaft* 98(10):45–48.

Schenk, D., Schatzmann, M., Meng, A., Schälchli, U. (2014). Zukunft Alpenrhein – Definition Freibord und Überlastfall. Proc. Symposium «Wasserbau und Flussbau im Alpenraum», VAW-Mitteilungen 228 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich: 629–641.

Vetsch, D. F., Siviglia, A., Ehrbar, D., Facchini, M., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vonwiller, L., Gerber, M., Volz, C., Farshi, D., Müller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Faeh, R. (2017). System Manuals of BASEMENT, Version 2.7. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, <http://www.basement.ethz.ch> [28.08.2017]

Wu, W., Wang, S., Jia, Y. (2000). Nonuniform Sediment Transport in Alluvial Rivers. *Journal of Hydraulic Research* 38(6): 427–434.

Anschrift der Verfasser

Daniel Ehrbar, ehrbar@vaw.baug.ethz.ch,

Dr. David Vetsch, Prof. Dr. Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich

Hönggerberggring 26, CH-8093 Zürich

Stefan Mirbach, mirbach@kobus-partner.com

und Dr. Ulrich Lang

Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner

GmbH (kup), Hessbrühlstrasse 21,

DE-70565 Stuttgart