

ALPENRHEIN – INTERNATIONALE STRETCKE

NACHHALTIGER HOCHWASSERSCHUTZ ZWISCHEN DEN DÄMMEN

Roland Fähr¹, Martin Weiss², Michael Hengl³, Daniel Dietsche⁴ und Robert M. Boes⁵

ZUSAMMENFASSUNG

Im Bereich der internationalen Strecke des Alpenrheins von km 65 bis 91 soll der Hochwasserschutz unter Berücksichtigung der Anliegen von Ökologie, Wasserversorgung und Naherholung verbessert werden. Da sich heute die Siedlungen bis an den Rand der aus dem 19. Jahrhundert stammenden Hochwasserschutzdämme ausdehnen, können Maßnahmen zur Verbesserung der Situation nur zwischen den bestehenden Dämmen realisiert werden. In einer Machbarkeitsstudie wurden verschiedene Maßnahmen anhand eines numerischen Modells evaluiert. Im Vordergrund stand dabei die Nachhaltigkeit der einzelnen Maßnahmen, d.h. deren langfristige Auswirkungen auf die Entwicklung der Rheinsohle und damit auf die Hochwassersicherheit. Aufgrund der Randbedingungen kann die Erhöhung des Schutzziels nur durch eine Erhöhung der Dämme, durch Gerinneaufweitungen resp. Gerinne- und Vorlandabsenkungen oder eine Kombination dieser Maßnahmen erreicht werden. Die numerischen Simulationen zeigen, dass die Rheinsohle ohne Geschiebemanagement nicht stabil gehalten werden kann. Mit Ausnahme von Dammerhöhungen beeinflussen alle baulichen Veränderungen die Entwicklung der Sohlenlage.

Keywords: Nachhaltiger Hochwasserschutz, Flussregulierung, Numerische Simulation, Sedimenttransport

ABSTRACT

The safety against flooding along the lower reach of the Alpine Rhine River should be improved taking into account ecology, water supply and recreation. Today, measures to improve the situation can only be realized in between the existing dams because the settlements extend to the edge of the 19th-century flood protection dikes. In a feasibility study, various measures were evaluated based on numerical modeling. The main focus of the study was on the sustainability of individual measures, i.e. how they affect the long term development of the bed level of the Rhine River and therefore the flood safety. Due to the actual boundary conditions, the higher protection objective can only be achieved by increasing the dikes, by widening the main channel or a combination of these measures. The numerical simulations show that the bed level of the Rhine River cannot be kept stable without sediment management. With the exception of dike raisings, all structural changes affect the development of the bed level and therefore also those of the groundwater table.

Keywords: sustainable flood protection, river training works, numerical simulation, sediment transport

¹ Dr. Roland Fähr. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zurich, Switzerland (e-mail: faeh@vaw.baug.ethz.ch)

² DI Martin Weiss. Internationale Rheinregulierung (IRR), Bauleitung Lustenau, Austria

³ Dr. Michael Hengl. Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung (BAW), Wien, Austria

⁴ DI Daniel Dietsche. Internationale Rheinregulierung (IRR), Baudepartement St. Gallen, Switzerland

⁵ Prof. Dr. Robert M. Boes. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland

DER ALPENRHEIN UND SEINE REGULIERUNG

Die Rheinstrecke zwischen dem Zusammenfluss von Hinter- und Vorderrhein und der Vorstreckungsbauwerke in den Bodensee hat eine Länge von 95 km und wird als Alpenrhein bezeichnet. Auf seinem Lauf überwindet er 189 Höhenmeter und entwässert dabei ein alpines Einzugsgebiet von 6'123 km². Die mittlere jährliche Abflussmenge beträgt 230 m³/s. Die Wasserführung variiert zwischen minimal etwa 40 m³/s und rund 3.000 m³/s im Hochwasserfall. Die Wildbäche im Einzugsgebiet des Rheins trugen in der Periode von 1975-2005 jährlich etwa 128.000 m³ Geschiebe (Ablagerungsvolumen) und rund 2.5 Mio. m³ Schwebstoffe in den Alpenrhein ein (IRR, 2010). Früher waren diese Feststoffeinträge noch größer, weil heute durch die Verbauungen der Wildbäche und in den Stauseen der Stromerzeuger ein Teil der Feststoffe zurückgehalten wird. Durch die Kombination von starkem Gefälle und großem Feststoffeintrag verhielt sich der Alpenrhein in seinem ursprünglichen Zustand wie ein Wildfluss. Bei Hochwasser nahm der Fluss die ganze Talbreite ein, er veränderte seinen Lauf und hinterließ Kies- und Sandablagerungen auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Nach jahrzehntelangen Verhandlungen beschlossen deshalb Österreich und die Schweiz, den Alpenrhein auf der internationalen Strecke zwischen der Illmündung und dem Bodensee zu regulieren. Grundlage dazu war ein 1892 abgeschlossener Staatsvertrag, der zur Gründung der Internationalen Rheinregulierung (IRR) führte. Das Ziel dieser Organisation ist, den Hochwasserschutz für eine Dimensionierungswassermenge von HQ = 3.100 m³/s zu gewährleisten, was etwa einem hundertjährlichen Ereignis entspricht. Der Rhein wurde dazu in ein Doppeltrapezprofil verlegt und um 10 km verkürzt, indem die Schlaufe von Diepoldsau abgeschnitten und mit dem Durchstich von Fussach die Rheinmündung um 8 km nach Osten verlegt wurde (Fig. 1).



Fig. 1 Unterer Bereich des regulierten Alpenrheins mit Blick gegen die Fließrichtung. Die Schlaufe von Diepoldsau wurde abgeschnitten und die Mündung nach Fussach verlegt.

Fig. 1 Lower section of the regulated river Alpine Rhine looking upstream. The meander of Diepoldsau was cut-through and the river mouth relocated to the east.

Durch das größere Gefälle sollte die Transportkapazität für das Geschiebe erhöht werden. Um den Effekt zu verstärken, wurden zusätzlich sogenannte „Sommerdämme“ oder „Mittelgerinnewuhre“ entlang des Mittelgerinnes gebaut. Die Abführung von kleineren Hochwässern wird damit auf das Hauptgerinne konzentriert und die Ablagerungen von Schwebstoffmaterial in den Vorländern vermindert. Trotzdem war die Transportkapazität auf den letzten 15 km oberhalb der Mündung in den Bo-

densee immer noch zu klein. Dies liess sich schon nach wenigen Betriebsjahren anhand der Sohlenanhebungen feststellen. Nachdem die Verlandung von Fussacher, Harder und Bregenzer Bucht zunehmend Sorge bereitete, wurde 1924 in einem zweiten Staatsvertrag vereinbart, die Hochwasserdämme auf dem Schuttkegel der Rheinablagerungen im Bodensee vorzustrecken, um die Schwebstofffracht in tiefere Seebereiche zu leiten. Durch das kleinere Gefälle im Vorstreckungskanal verstärkten sich die Ablagerungen im Mittelgerinne durch rückschreitende Auflandung. Nach langjährigen Modellversuchen wurde deshalb 1954 mit der Umsetzung eines weiteren Staatsvertrags begonnen. Kernpunkt der vorgeschlagenen Maßnahmen war, die Mittelgerinnewuhre von der Illmündung (km 65) bis zum Bodensee (km 90) zu erhöhen und gleichzeitig die Breite des Mittelgerinnes von den ursprünglich 110 m bei km 73 kontinuierlich auf 70 m bei km 90 zu verengen (IRR, 1992).

DIE AKTUELLE PROBLEMATIK

Seit der Umsetzung der bisherigen Staatsverträge haben sich die sozialen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen im Bereich der Internationalen Strecke des Alpenrheins wesentlich geändert. Die Bevölkerung ist um einen Faktor vier auf 500.000 angewachsen (Stalzer, 2007). Gleichzeitig hat sich die wirtschaftliche Basis verändert, indem heute die dominierende gewerblich-industrielle Ökonomie wesentlich bedeutender ist als die einstmals ausschließlich landwirtschaftliche Nutzung des Rheintals. Zudem entstanden neue Wirtschaftszweige wie Tourismus und Freizeit. Mit dieser Entwicklung einher ging eine Erhöhung der Vulnerabilität und des Schadenpotenzials.

Im 19. und 20. Jahrhundert standen bei der Planung der Maßnahmen zur Rheinregulierung der Schutz der Bevölkerung und ihres Wirtschaftsraums im Vordergrund. Ökologische Anliegen wurden vernachlässigt. Beispielsweise bedingte der Bau der Hochwasserdämme, dass die zahlreichen seitlichen Zuflüsse außerhalb des Flusskorridors in Binnenkanälen gesammelt und direkt dem Bodensee zugeführt werden mussten. Die Quervernetzung der Lebensräume wurde dadurch über weite Strecken unterbrochen, mit entsprechenden negativen Folgen auf die Biodiversität. Viele aquatische Arten – insbesondere Fische – sind verschwunden. Aber auch die terrestrischen Habitate wurden beeinträchtigt. So verschwanden zum Beispiel flussbegleitende Pflanzen wie die Deutsche Tamariske, weil diese auf Kiesbänke angewiesen sind, die in einem mehrjährigen Zyklus durch Hochwässer umgelagert werden. Auch die vertikale Vernetzung, d.h. die Interaktion zwischen dem Rhein und dem Grundwasser, wurden durch die Fixierung des Flusslaufs und die Veränderung der Sohlenlage beeinflusst.

DAS ENTWICKLUNGSKONZEPT ALPENRHEIN

Um die Situation zu verbessern, wurde unter der Leitung der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein (IRKA) und der IRR ein Gesamtkonzept für die ganze Region Alpenrhein erstellt. Dieses Entwicklungskonzept Alpenrhein (IRKA et al., 2005) sollte eine länderübergreifende Grundlage für die nachhaltige Entwicklung des Lebens- und Wirtschaftsraums des Rheintales und seiner Gewässer sein. Das Ziel der im Konzept entwickelten Handlungsschwerpunkte ist, den Schutz vor Hochwasserereignissen zu verbessern und gleichzeitig den Anliegen der Bereiche Grundwasser, Ökologie und Naherholung besser Rechnung zu tragen.

NEUER STAATSVERTRAG

Seit der weitgehenden Umsetzung des 3. Staatsvertrages von 1954 hat sich die Situation im Gebiet der IRR-Strecke in Bezug auf die Hochwassersicherheit in zweifacher Hinsicht verändert. Zum einen verkleinerte sich die Abflusskapazität innerhalb der Dämme durch die kontinuierliche Auflandung der Rheinsohle unterhalb von km 80. Das in den Staatsverträgen festgelegte Schutzziel von $Q = 3.100 \text{ m}^3/\text{s}$ kann deshalb in Zukunft nur eingehalten werden, wenn dem Rhein – zusätzlich zu den schon heute erfolgenden Baggerungen - Geschiebe entnommen wird. Zum anderen hat das Schadenpotential stark zugenommen. Es wird heute auf mindestens 3 Mia. € geschätzt. Das Schutzziel soll deshalb auf eine Abflusskapazität von $HQ_{300} = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht werden. Da gleichzeitig die im Entwicklungskonzept Alpenrhein empfohlenen Handlungsanweisungen umgesetzt werden sollten, startete die IRR im Rahmen von Interreg IV das Projekt „Nachhaltiger Hochwasserschutz auf der Flussstrecke der

Internationalen Rheinregulierung“. Es sah in einem ersten Schritt vor, Grundlagen für die Verhandlungen eines neuen Staatsvertrages zu erarbeiten. Dabei wurde unter Federführung von IRR, VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich) und BAW (Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung, Wien) sowie unter Beteiligung von verschiedenen Fachingenieuren untersucht, wie sich unterschiedliche bauliche Maßnahmen zur Erhöhung des Schutzzieles auf die künftige Entwicklung der Rheinsohle und des Grundwassers auswirken. Zusätzlich wurden auch geotechnische Aspekte, die bei einer allfälligen Absenkung des Grundwasserspiegels von Bedeutung sind, untersucht und eine Kostenschätzung erhoben (IRR, 2009). Als Resultat zeigte sich, dass die flussbaulichen Maßnahmen zur Erhöhung des Schutzzieles Kosten von 300-400 Mio. € verursachen werden. In einer zweiten Phase wurde dann in einer Machbarkeitsstudie der Einfluss von sieben Maßnahmenvarianten auf die Entwicklung der Rheinsohle untersucht. Damit sollte abgeschätzt werden, wie weit in die Zukunft das gewünschte Schutzziel gewährleistet werden kann (IRR, 2011). Auf diese Aspekte soll in diesem Aufsatz eingegangen werden.

MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER HOCHWASSERSICHERHEIT

Im Entwicklungskonzept Alpenrhein wurden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Hochwassersicherheit evaluiert. Aufgrund der dichten Besiedlung, die bis an die bestehenden Hochwasserdämme heranreicht, lassen sich im hochwassergefährdeten Abschnitt der Internationalen Rheinregulierung zwischen km 70 und dem Bodensee (vgl. Fig. 2) nur Maßnahmen realisieren, die sich auf den Flusskorridor zwischen den Hochwasserdämmen beschränken.

Unter diesen Randbedingungen kann die Hochwassersicherheit nur durch eine Vergrößerung des Fließquerschnitts erreicht werden, da das Sohlengefälle schon bei der ersten Regulierung auf den größtmöglichen Wert angehoben wurde. Grundsätzlich kann dies durch eine Absenkung des Mittelgerinnes und/oder der Vorländer sowie durch die Aufweitung des Mittelgerinnes oder eine Erhöhung der Dämme erreicht werden. Die regelmäßig vermessenen Querprofile der Sohle des Alpenrheins auf der IRR-Strecke zeigen, dass die Sohle in den letzten 40 Jahren insgesamt leicht aufgeschottert wurde, die Veränderungen aber so langsam voran schreiten, dass man heute schon fast von einem Gleichgewichtszustand sprechen kann. Das bedeutet, dass - mit Ausnahme von Dammerhöhungen - jede bauliche Maßnahme zur Vergrößerung des Fließquerschnitts die langfristige Entwicklung der Sohle dauerhaft beeinflussen wird.

Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurde die zeitliche Entwicklung der Rheinsohle für die nächsten 50 Jahre mittels numerischer Simulationen abgeschätzt. Dazu wurde die langfristige Wirkung aller grundsätzlich möglichen Maßnahmen, mit denen der Fließquerschnitt vergrößert werden kann, untersucht. Die sieben betrachteten Maßnahmenvarianten unterscheiden sich wie folgt:

Variante Bestand (V1):

Dient als Vergleichsreferenz und umfasst zusätzliche Baggerungen zur langfristigen Aufrechterhaltung des heutigen, staatsvertraglich vereinbarten Hochwasserschutzzieles von $3'100 \text{ m}^3/\text{s}$. Es wurden zwei Fälle mit unterschiedlicher Bewirtschaftung des Geschiebes untersucht.

Variante Dammerhöhung (V2):

Die Vergrößerung des Fließquerschnitts soll durch eine Erhöhung der heutigen Hochwasserschutzdämme erreicht werden. Die Auflandungstendenz soll zudem mit zusätzlichen Geschiebeentnahmen begrenzt werden.

Variante einseitige Aufweitung (V3):

Die Abflusskapazität des Rheins soll durch eine einseitige Aufweitung des Hauptgerinnes und zusätzliche Geschiebeentnahmen auf das neue Schutzziel von $Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$ angehoben werden. Damit verbleibt auf einer Seite die Mittelwuhre, auf der anderen Seite wird sie entfernt.

Variante beidseitige Aufweitung (V4):

Die Vergrößerung des Fließquerschnitts soll durch die Entfernung der Mittelwuhre und die Absenkung beider Vorländer erreicht werden.

Variante Erhöhung der Hochwasserdämme und der Mittelwuhre (V5):

Neben der Vergrößerung des Fliessquerschnitts soll durch die Konzentration der Strömung auf das Hauptgerinne die Anlandungstendenz abgemindert werden.

Variante Kombination von verschiedenen Regelprofilen (V6):

Die Maßnahmen einseitige und beidseitige Aufweitung sowie Dammerhöhung werden in zwei Untervarianten in ihrer örtlichen Abfolge unterschiedlich kombiniert.

Variante Eintiefung (V7):

Hier wird die Vergrößerung des Fliessquerschnitts durch Absenkung und Verbreiterung des Mittelgerinnes erreicht.

NUMERISCHE MODELLE

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden verschiedene 1D- und 2D-Modelle des Alpenrheins erstellt. Die hier dargestellten Untersuchungen zur langfristigen Entwicklung der Sohlenlage basierten auf einem 1D-Modell zwischen der Schwelle bei Buchs (km 50) und dem Ende des Vorstreckungskanaals bei km 95 (Fig. 3). Das Modell musste über die Internationale Strecke nach oberstrom verlängert werden, weil sich einzelne Maßnahmen entsprechend weit flussaufwärts auf die Sohlenlage auswirken. Die Simulationen wurden mit dem Programmpaket BASEMENT durchgeführt, welches an der VAW entwickelt worden ist und gratis von der Website www.basement.ethz.ch heruntergeladen werden

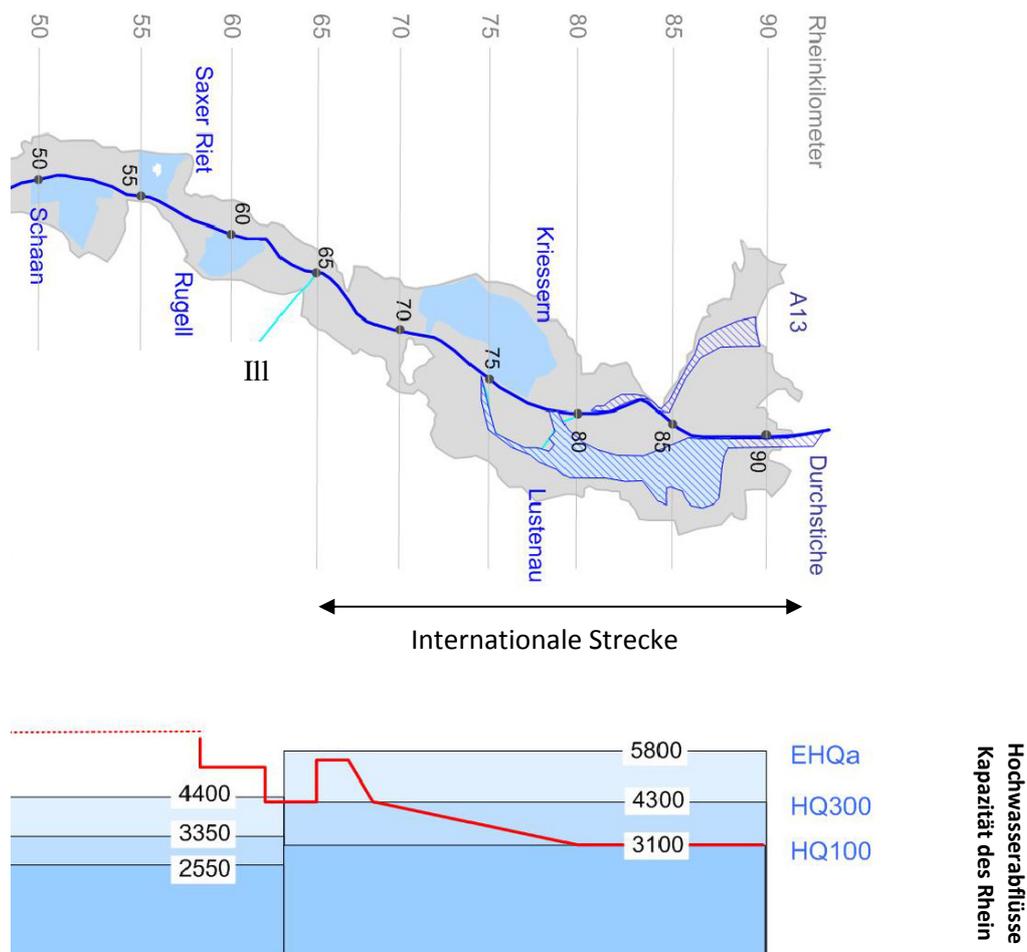


Fig. 2 Ist-Zustand der Abfluss-Kapazität (rote Linie) des Rheins auf der IRR-Strecke.

(Ausschnitt aus Bericht A-382, Hunziker, Zarn & Partner AG, Entwicklungskonzept Alpenrhein)

Fig. 2 Discharge capacity of Rhine River (red line) along the reach of the “Internationale Rheinregulierung”.

kann. BASEMENT erlaubt ein- resp. zweidimensionale Simulationen von instationären Strömungen unter Annahme einer beweglichen Sohle. Geschiebe- und Suspensionstransport werden separat behandelt, wobei die Kornverteilung durch eine beliebige Anzahl Korngrößen repräsentiert werden kann.

Im numerischen Modell müssen grundsätzlich für alle gesuchten Größen (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Sohlenkote, Konzentration des suspendierten Materials und Kornverteilung des Sohlenmaterials) die Werte zu Beginn der Simulation (*Anfangsbedingungen*) sowie der zeitliche Verlauf der Unbekannten an den Rändern des betrachteten Modellausschnittes (*Randbedingungen*) vorgegeben werden.

Anfangsbedingungen

Jede Simulation startet zu einem Zeitpunkt, zu dem gemessene Querprofile vorliegen. Damit sind die Anfangswerte der Sohlenkoten definiert. Die Anfangsbedingungen der hydraulischen Größen wurden aufgrund einer Staukurvenrechnung unter Annahme eines Abflusses von $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ ermittelt. Dies entspricht dem Grenzabfluss, ab dem Sediment transportiert wird. Die Kornverteilung des Sohlenmaterials dient als Kalibrierungsgröße.

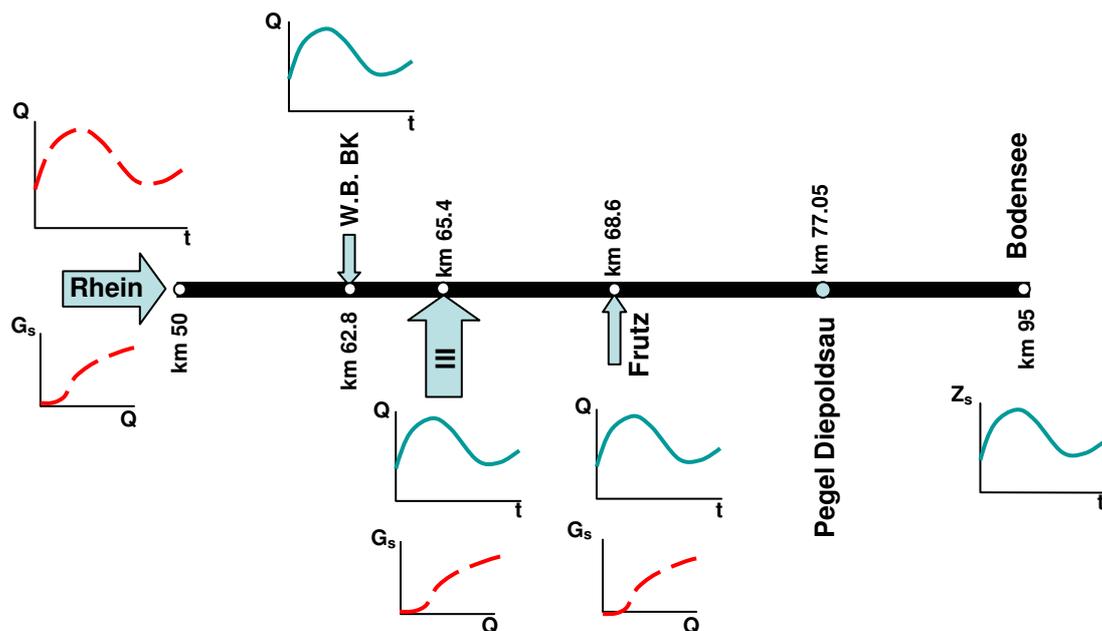


Fig. 3 Schemaskizze des Modellgebiets für die eindimensionalen Berechnungen mit beweglicher Sohle.

Fig. 3 Schematic of the model area for the 1D-simulations with moveable bed.

Randbedingungen

Der Zufluss des Rheins am oberen Ende des Modells wurde aus den Hydrographen der Abflussstationen Diepoldsau und den seitlichen Zuflüssen von Ill, Frutz und Werdenberger Binnenkanal (W.B. BK) abgeleitet. Die Abflusszeitreihen der Zubringer wurden aufgrund von entsprechenden Messstationen in deren Einzugsgebieten aufbereitet. Als untere Randbedingung wird der Verlauf des Bodenseestandes ($Z_s=f(t)$) vorgegeben. Die in Fig. 3 gestrichelt gekennzeichneten Randbedingungen sind aus Messungen abgeleitete Funktionen. Die Menge des zufließenden Geschiebes wurde auf der Basis von Geschiebefunktionen bestimmt. Um die Berechnungszeit für die mehrere Jahrzehnte umfassenden Simulationsperioden zu verkürzen, wurden nur jene Zeitabschnitte berücksichtigt, in denen

maßgebender Geschiebetransport stattfindet. Alle Zeitabschnitte, in denen der Grenzabfluss für den Transportbeginn Q_c beim Pegel Diepoldsau kleiner als $Q_c = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ war, wurden weggelassen. Die Rechenzeit konnte so um etwa ein Drittel gekürzt werden.

Kiesentnahmen

Entsprechend den Vorgaben des 3. Staatsvertrages von 1954 soll die Rheinsohle bei km 90 die Kote von 393.63 m ü.M. nicht übersteigen. Um dies zu erreichen, werden dem Rhein zwischen km 90 und km 91 die Kiesfraktionen und weiter flussabwärts auch noch die Sandfraktionen entnommen. Diese Baggerungen werden im Simulationsmodell als Randbedingung berücksichtigt, indem die entsprechenden Kornfraktionen bei einem Überschreiten der vorgeschriebenen Sohlkoten entfernt werden. Das Transportniveau – und damit der Geschiebezufuß über die Ränder des Modellgebiets – ist dann korrekt, wenn die Aufsummierung der entnommenen Volumina mit den tatsächlich gebaggerten übereinstimmt.

Kalibrierung

Die Gleichungen, mit denen der Strömungs- und Feststofftransport beschrieben wird, enthalten empirische Schließbedingungen (z.B. Beziehungen für Reibungsverluste oder Geschiebetrieb). Die Parameter der Schließbedingungen (z.B. Reibungsbeiwert k_{st} nach Strickler oder Korndurchmesser für Geschiebetriebformel) werden als Kalibrierungsgrößen verwendet. Sie werden im Kalibrierungsprozess so lange variiert, bis die Resultate der numerischen Simulation mit den natürlichen Verhältnissen zufriedenstellend übereinstimmen.

Für die Kalibrierung resp. Validierung standen drei Datensätze von gemessenen Querprofilen aus den Jahren 1975, 1995 und 2005 zur Verfügung. Die Kalibrierung erfolgte anhand der Periode von 1995-2005, die Validierung für die Periode von 1975-1995. Als zu kalibrierende Größe wird in erster Linie die Kornverteilung entlang des Gerinnes verwendet. Zusätzlich werden lokale Abweichungen durch moderate Anpassungen des aus der lokalen Kornverteilung abgeleiteten Reibungsbeiwertes angepasst, falls sich dies aufgrund der spezifischen Situation begründen lässt (z.B. bei den Zuflüssen von Ill und Frutz). Die Menge des in das Berechnungsgebiet zufließenden Geschiebes wurde in einer umfassenden separaten Untersuchung (IRR, 2010) bestimmt und wurde deshalb als gegeben angenommen.

Der Feststofftransport wurde mittels eines Mehrkornmodells beschrieben, welches auf acht Kornfraktionen beruht. Die Quantitative Beurteilung der Güte der Kalibrierung erfolgte primär durch einen Vergleich zwischen der simulierten und der gemessenen Sohlenlage von 2005. Zusätzlich wurden auch der dabei erhaltene Verlauf der Kornverteilung im Längenprofil mit entsprechenden Geschiebeprobe sowie die errechneten und tatsächlich gebaggerten Geschiebemengen verglichen.

Fig. 4 zeigt, wie sich die mittlere Sohlenlage zwischen 1995 und 2005 verändert hat. Die Rheinsohle hat sich zwischen km 50 und der Mündung im Mittel um 14.2 cm angehoben. Die mittlere Abweichung zwischen Rechnung und Messung beträgt $\mu = 0.3 \text{ cm}$ bei einer Standardabweichung (d.h. mittleren Fehler an einer Vergleichsstelle) von 22 cm. Die Veränderung der Sohle wird also mit 2 % Genauigkeit berechnet, wobei lokal Abweichungen im Dezimeterbereich auftreten können.

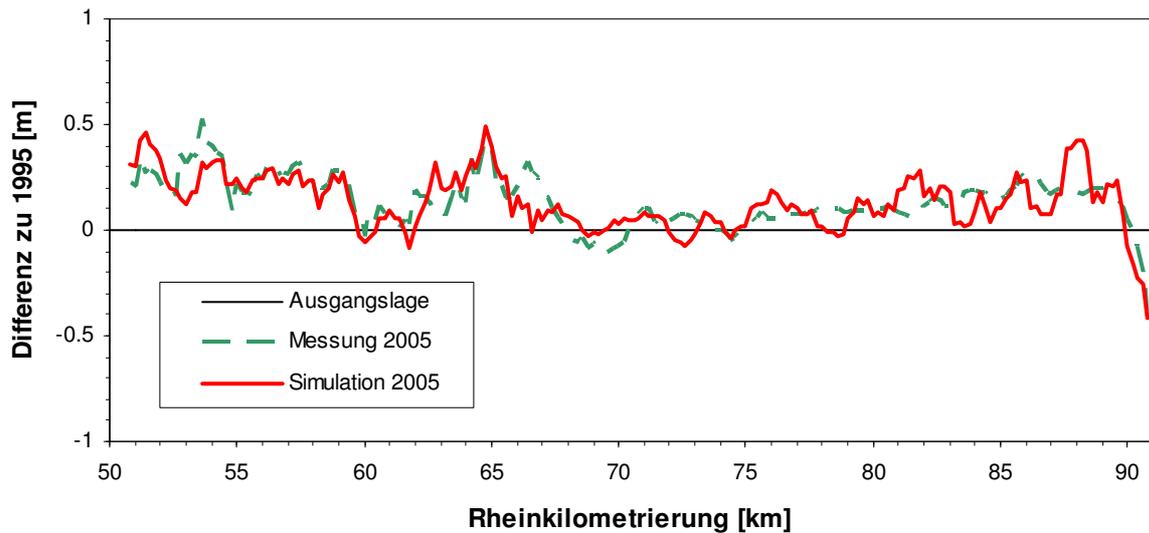


Fig. 4 Veränderung der mittleren Sohlenlagen zwischen 1995 und 2005: Vergleich zwischen den Resultaten des kalibrierten Modells und den Messungen (gleitende Mittel).

Fig. 4 Change of mean bed level between 1995 and 2005.

Dieses Resultat wurde erzielt, indem der 45 km lange Modellbereich des Alpenrheins in 13 Abschnitte mit jeweils gleicher Kornverteilung unterteilt wurde. Der Verlauf der kalibrierten mittleren Korndurchmesser dieser Teilabschnitte ist in Fig. 5 zusammen mit entsprechenden Resultaten von Volumenproben und Linienzahlanalysen dargestellt.

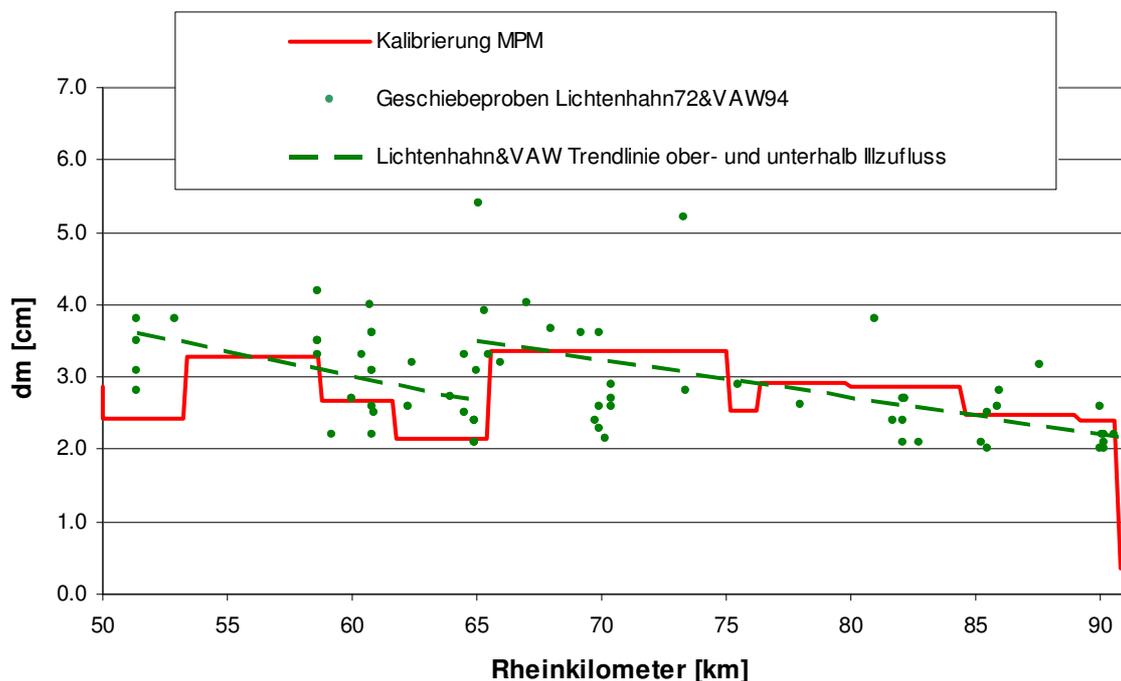


Fig. 5 Verlauf von gemessenen und kalibrierten mittleren Korndurchmessern im Längenprofil des Alpenrheins.

Fig. 5 Longitudinal profile of measured and calibrated grains sizes.

Die Kalibrierung der Kornverteilungen erfolgte auf der Basis der Geschiebetriebformel von Meyer-Peter & Müller (MPM, 1948). Es wurden auch andere Geschiebetriebformeln getestet. Diese zeigten aber eine schlechtere Übereinstimmung mit den entnommenen Geschiebeprouben. Zum Beispiel ergab die von Hunziker adaptierte MPM-Formel (Hunziker, 1995) systematisch zu kleine mittlere Korn-

durchmesser. Das gute Abschneiden der MPM-Formel erstaunt nicht, weil diese anhand der Verhältnisse der hier betrachteten Strecke des Alpenrheins entwickelt worden ist.

Die Sensitivität der verschiedenen freien Parameter (Geschiebezufuhr, Kornverteilung, k_{St} -Wert) im Hinblick auf die Prognostizierbarkeit der Sohlenlagen wurde ebenfalls untersucht. Diese sowie die Validierung können aber im Rahmen dieses Artikels nicht dargestellt werden. Als Fazit lässt sich festhalten, dass sich die Beschreibung des Feststofftransportes - im Vergleich zur Reinwasserbetrachtung – in viel größerem Masse auf empirische Beziehungen abstützt. Da diese zudem meist nur unter Laborbedingungen abgeleitet werden können, weil kontinuierliche Naturmessungen kaum existieren, ist das Modell mit beweglicher Sohle mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die Menge des zukünftigen – und damit unbekanntes - Geschiebeaufkommens birgt aber die größten Unwägbarkeiten. Gleichzeitig ist dies auch die wichtigste Randbedingung. Bei der Interpretation der Resultate sind diese Umstände zu berücksichtigen.

PROGNOSEN DER SOHLENENTWICKLUNG

Ausgehend vom Zustand von 2005 wurden die möglichen Sohlenentwicklungen bis ins Jahr 2060 für die sieben erwähnten Maßnahmenvarianten simuliert. Die Zuflussrandbedingung wurde konstruiert, indem die elfjährige Kalibrierungsperiode von 1995-2005 fünfmal wiederholt wurde. Aus Platzgründen beschränken wir uns im Folgenden auf die beispielhafte Wiedergabe von Ergebnisausschnitten der Varianten beidseitige Aufweitung (V4) und Absenkung des Mittelgerinnes (V7).

Variante beidseitige Aufweitung

Wie Fig. 6 anhand eines schematischen Querprofils zeigt, ist bei dieser Variante vorgesehen, die Mittelgerinnewuhre zu entfernen und das Vorland soweit abzusenken, dass der Fliessquerschnitt um 400 m^2 vergrößert wird.

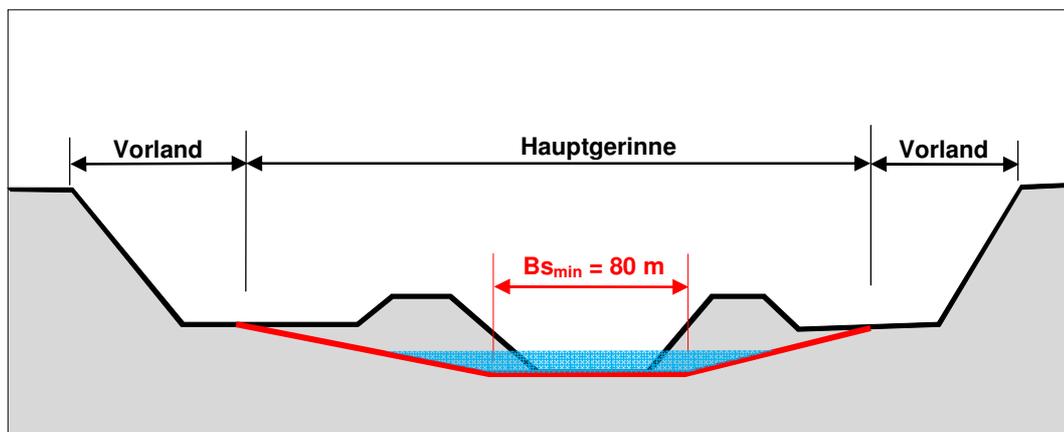


Fig. 6 Schemaskizze zur Maßnahme „Beidseitige Gerinneaufweitung“. Die Mittelgerinnewuhre werden entfernt und das Vorland beidseitig soweit abgeflacht, dass der Fliessquerschnitt um 400 m^2 vergrößert wird. Die minimale Sohlbreite beträgt $B_{s_{\min}} = 80 \text{ m}$.

Fig. 6 Schematic of cross-section depicting the variant „two-sided widening“.

Fig. 7 zeigt, wie sich die Sohle aufgrund dieser Maßnahme entwickeln würde. Dargestellt ist die Differenz der zu erwartenden Lage der mittleren Sohle von 2060 im Vergleich zur Ausgangslage von 2005. Zusätzlich wurde die entsprechende Sohlenlage eingezeichnet, die sich ergeben würde, wenn man den heutigen Zustand beibehielte (Variante Bestand V1). Die Sohle hebt sich bei beiden Varianten an, im Fall der Aufweitungsvariante (V4) allerdings wesentlich stärker, vor allem im Bereich der Illmündung. Dort muss mit Anlandungen von mehr als 3 m gerechnet werden, die sich zudem über den Bereich der internationalen Strecke rheinaufwärts auswirken.

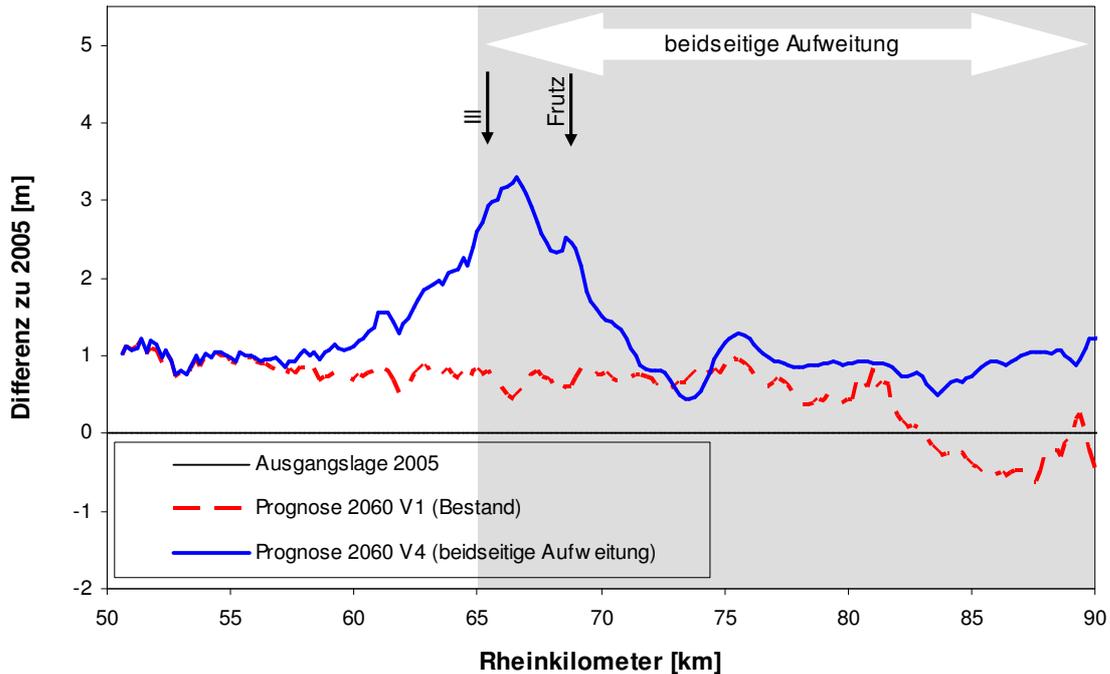


Fig. 7 Prognose der Sohlenentwicklung für die Variante beidseitige Aufweitung (Kurven geglättet). Zum Vergleich Variante V1, bei der der heutige Zustand beibehalten wird.

Fig. 7 Expected mean bed level for the year 2060 in case of a two-sided river widening (V4) and for a situation where the actual state will not be changed (V1).

Betrachtet man die zugehörigen Hochwasserspiegel (Fig. 8), zeigt sich, dass die starke Sohlenanhebung durch den größeren Fließquerschnitt der Aufweitungen kompensiert wird. Der Freibord wird für die Variante beidseitige Aufweitung im Mittel sogar besser eingehalten.

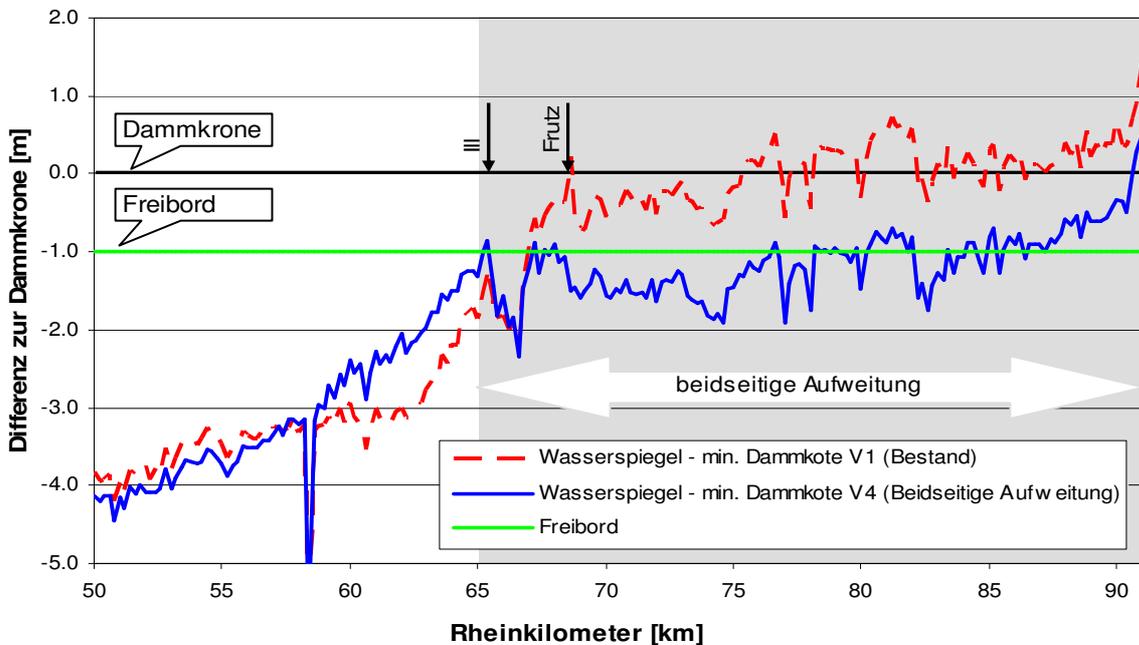


Fig. 8 Differenz zwischen Wasserspiegellage und der Kote der Dammkrone für das neue Dimensionierungshochwasser von $Q = 4.300 \text{ m}^3/\text{s}$ basierend auf der Rheinsohle von 2060.

Fig. 8 Difference between water level and dike crest computed for the estimated bed level in the year 2060.

Variante Eintiefung

Bei dieser Maßnahmenvariante wird im Wesentlichen mit einer um 3.0 m tiefer gelegten Sohle gestartet (ausgehend von der Sohlenlage von 2005). Wie Fig. 9 zeigt, ist dies keine nachhaltige Maßnahme. Das ausgehobene Mittelgerinne füllt sich kontinuierlich wieder auf und nach wenigen Jahrzehnten wird sich wieder die ursprüngliche Sohlenlage einstellen. Der weitere Sohlenentwicklungsprozess verläuft analog zur Variante 1 und bietet somit nur temporär Vorteile für den Hochwasserschutz.

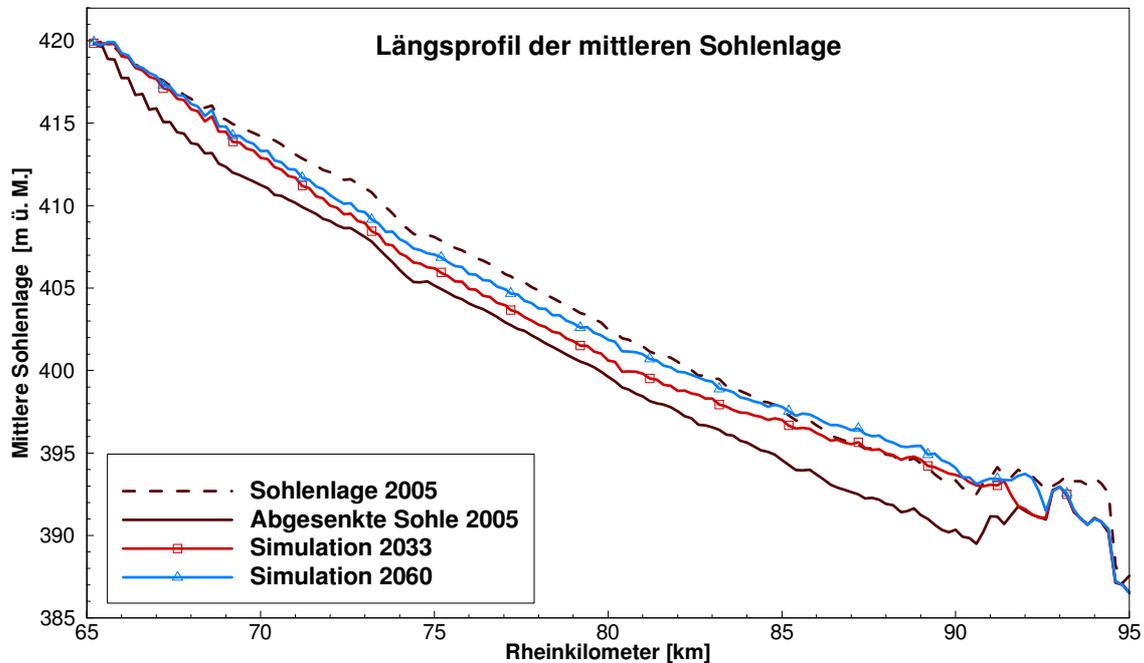


Fig. 9 Zeitliche Entwicklung der Sohlenlage. Die Simulation startet mit der um 3 m abgesenkten Sohlenlage von 2005.

Fig. 9 Temporal development of mean bed level.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im modernen Flussbau versucht man, die verschiedenen Nutzungsinteressen und den Hochwasserschutz sowie die Ökologie gleichwertig zu behandeln. Numerische Modelle erlauben, die verschiedenen Ansprüche besser aufeinander abzustimmen und so eine insgesamt optimierte Lösung zu erhalten. Die in der Machbarkeitsstudie des Alpenrheins untersuchten Maßnahmenvarianten zeigen auf, dass erhebliches Optimierungspotential besteht. Mit den numerischen Modellen kann die zukünftige Veränderung der Sohlenlage prognostiziert und – gekoppelt mit Grundwassermodellen – deren Auswirkung auf die Grundwassernutzung abgeschätzt werden. Verschiedene Maßnahmen, wie die Aufweitung des Gerinnes, die Erhöhung der Dämme oder eine Geschiebemanagement lassen sich so miteinander vergleichen und optimieren. Da der Fluss als Ganzes und nicht nur einzelne lokale Maßnahmen betrachtet werden, können die Wirkungszusammenhänge aus ganzheitlicher Sicht aufgezeigt und die Entscheidungsfindung versachlicht werden.

Die Prognoserechnungen für das Jahr 2060 zeigen, dass grundsätzlich eine Tendenz zur Auflandung besteht. Bei der Variante Dammerhöhung (V2) entwickelt sich die Rheinsohle entsprechend der Beibehaltung des heutigen Zustandes. Die abgelagerten Geschiebemengen sind aber etwas kleiner. Aufweitungen (einseitig (V3), beidseitig (V4) oder streckenweise bei der Kombination von verschiedenen Regelprofilen (V6)) führen an den entsprechenden Stellen zu deutlich verstärkter Sohlenanhebung. Dafür sind die Aufwendungen zur Bewirtschaftung des Geschiebes anfänglich geringer, weil weniger gebaggert werden muss. Die Variante mit Erhöhung der Mittelwuhre (V5) verhindert Auflandungen weitgehend, so dass ein Großteil des Sediments im Bereich der Internationalen Strecke durchtransportiert

tiert wird und oberhalb der Vorstreckung durch Baggerung entnommen werden muss. Die Variante Eintiefung (V7) ist nicht nachhaltig. Das ausgebaggerte Gerinne füllt sich wieder mit Sediment auf, was praktisch einer Rückkehr zum aktuellen Zustand entspricht.

Die Güte der Modelle wurde anhand der unterschiedlichen Verhältnisse von Kalibrierungs- und Validierungsperiode aufgezeigt. Das Antwortspektrum der prognostizierten Sohlenentwicklungen hängt vor allem von der Menge des eingetragenen Geschiebes ab. Diese kann sich je nach betrachteter Zeitperiode um rund 100% unterscheiden. Der Eintrag beträgt pro Jahr ca. 60.000 bis 120.000 m³. Im Vergleich zu diesen Unsicherheiten sind andere Aspekte der Modellgenauigkeit von untergeordneter Bedeutung. Wenn die Unsicherheiten der Randbedingungen mittels einer Sensitivitätsanalyse eingegrenzt werden, liefern die Modelle in einer vergleichenden Betrachtung zuverlässige Ergebnisse.

REFERENZEN

- Hunziker R. (1995). Fraktionsweiser Geschiebetransport, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Mitteilung 138, ETH, Zürich.
- IRR (1992). Der Alpenrhein und seine Regulierung. Internationale Rheinregulierung 1892 -1992. Buchs Druck und Verlag, Buchs.
- IRKA und IRR (2005). Entwicklungskonzept Alpenrhein. Kurzbericht. Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Internationale Rheinregulierung.
- IRR (2009). Alpenrhein Internationale Strecke: Nachhaltiger Hochwasserschutz innerhalb der Dämme – Unterlagen für die Verhandlungen des 4. Staatsvertrages. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie: VAW-Bericht 4262-3.
- IRR (2010). Alpenrhein Reichenau – Illmündung: Ermittlung des Feststoffaufkommens. Hunziker, Zarn & Partner AG: Bericht Nr. A-504.1.
- IRR (2011). Alpenrhein Internationale Strecke: Nachhaltiger Hochwasserschutz innerhalb der Dämme – Machbarkeitsuntersuchung. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie: VAW-Bericht 4262-4.
- Meyer-Peter E., Müller R. (1948). Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Congress, Stockholm, Sweden: 39-64.
- Stalzer W. (2007). Alpenrhein 2100 – vom Gestern zum Morgen im Alpenrheintal. Zukunftsworkshop der Gemeinsamen Rheinkommission vom Juni 2006. Wasser Energie Luft – Eau Energie Air, Jg. 99, Nr. 4, 2007: 297-302.