

Eigendynamische Seitenerosion – Prognose und Wirklichkeit

Michael Hengl und Tobias Hafner

Zusammenfassung

An der Salzach im Freilassinger Becken wurde im Frühjahr 2010 flussab einer sohlstützenden Rampe auf knapp 3 km Länge beidseitig die harte Uferverbauung entfernt und ein eigendynamischer Seitenerosionsprozess initiiert. Mit den nunmehr weichen Ufern werden drei Ziele verfolgt: Sohlstabilisierung durch Aufweitung des Flussbetts, temporäre Abdeckung des durch die flussauf gelegene Rampe ausgelösten Geschiebedefizits, Verbesserung der Gewässerökologie.

Da in den Planungen zur Sanierung der Unteren Salzach das Thema Weiche Ufer eine große Rolle spielte, wurde der Prognose möglicher morphologischer Entwicklungen großes Augenmerk geschenkt. Im Einzelnen waren dies ein physikalischer Modellversuch in Wien und das zweidimensionale numerische Geschiebetransportmodell Uferlos der TU München. Ergebnisse der Prognosen waren einerseits mittlere Verschiebungen der Ufer in Abhängigkeit vom Abflussgeschehen und andererseits im Laufe der Zeit in die Salzach eingetragene Geschiebemengen.

Die Hochwässer in den Sommern 2010 (ca. HQ_{30}) und 2013 (größer HQ_{100}) führten wie erwartet zu einer starken eigendynamischen Entwicklung der Salzach im Bereich der Weichen Ufer. Aus den Vermessungen von Flussquerprofilen, die glücklicherweise vor und nach den Hochwässern stattfanden, können nun die prognostizierte und die tatsächlich abgelaufene Gewässerentwicklung verglichen werden. Generell betrachtet ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Darüber hinaus konnten aus den Vermessungsdaten und dem nachvollziehen der Prognose mit den tatsächlich beobachteten Abflussdaten wertvolle Erkenntnisse betreffend die morphologische Entwicklung der Salzach gewonnen werden. Beispielsweise kam es zu einer gewässerökologisch positiven Veränderung der Querprofilgeometrie. Weiters hat sich bestätigt, dass maßgebliche Seitenerosion an der Salzach nur bei Hochwasserereignissen stattfindet.

1 Einleitung

Die Salzach bildet auf ca. 59 km Länge die Grenze zwischen dem Freistaat Bayern und Österreich. Seit Ende des 19. Jahrhunderts ist dieser Gewässerabschnitt so wie viele andere im Alpenraum durch eine stetig fortschreitende Sohlintiefung gekennzeichnet. Neben den negativen Folgen für den Hochwasserschutz hat diese Entwicklung auch negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie und die großflächigen Aulandschaften in den Talräumen (WRS, 1995). Wasserbaulich von besonderer Bedeutung ist, dass der ursprüngliche Kiesfluss Salzach teilweise bereits in die tiefer liegenden geologischen Schichten mit sehr feinkörnigem Untergrund vorgedrungen ist, was den Eintiefungsprozess in den betroffenen Abschnitten noch beschleunigte. Aufbauend auf vorausschauenden, intensiven Planungsprozessen, die die jeweils neuesten Entwicklungen der Wissenschaft nutzten, wurden erste flussbauliche Maßnahmen mit positiven Wirkungen für Wasserbau, Natur und Mensch gesetzt (Hengl et al., 2012).

2 Kurzdarstellung der flussbaulichen Maßnahme

Bei Fluss-km 51,9 wurde im Winter 2009/2010 eine Rampe errichtet und in der flussab anschließenden Strecke, mit einer ursprünglichen Sohlbreite von ca. 100 m und einem Gefälle von 1 ‰, auf ca. 3 km Länge beidseitig die Ufersicherung entfernt (siehe Abb. 1). Auf der rechten Seite wurde gleichzeitig das Ufer strukturiert und damit ein Teil der Aufweitung vorweggenommen.

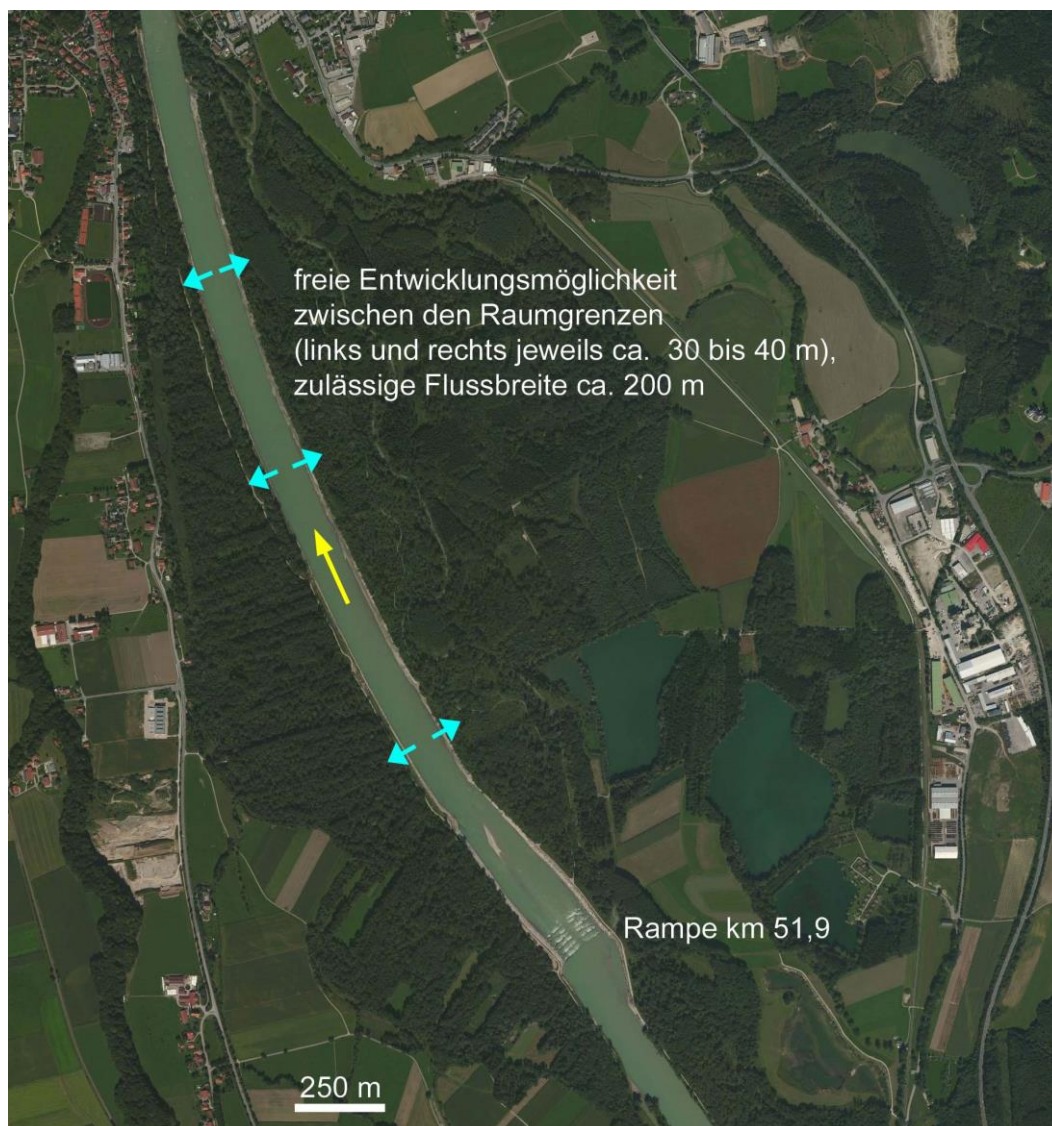


Abb. 1 Übersicht zu den Baumaßnahmen (Quelle Luftbild: Bing)

Das im Anlandungsbereich der ca. 2,7 m hohen Rampe zurückgehaltene Geschiebe würde das flussab bestehende Geschiebedefizit weiter verstärken. Grundidee des in der Wasserwirtschaftlichen Rahmenuntersuchung entwickelten Konzepts ist, dass das durch die Rampe verursachte temporäre Geschiebedefizit durch die Eigendynamik der Salzach in der anschließenden Strecke abgedeckt wird (WRS, 2000). Mit der Seitenerosion ist gleichzeitig eine Aufweitung verbunden die die Sohlbelastung reduziert. Dieses Konzept ist nicht allein auf den hier beschriebenen Standort, sondern grundsätzlich anwendbar, wenn eine verträgliche Bilanz aus Geschieberückhalt und Geschiebemobilisierung hergestellt werden kann.

3 Prognosen

3.1 Physikalisches Modell

Um die Wirksamkeit der oben genannten Grundidee zu bestätigen, wurde ein wasserbaulicher Modellversuch durchgeführt (WRS, 2002). Ziel des Modellversuchs war Aussagen zur Geschwindigkeit und zum Umfang der eigendynamischen Seitenerosion zu gewinnen. Der Modellversuch umfasste eine ca. 2,6 km lange Strecke der Salzach mit Rampe und anschließenden Seitenerosionsbereichen (siehe Abb. 2). Das Modell beschränkte sich in der Breite auf die geplanten Seitenerosionsbereiche. Für Hochwässer mit Ausuferung in die breite Auenlandschaft wurden die Gesamtabflüsse der Salzach auf Basis von numerischen Abflussberechnungen entsprechend der Breitenreduktion angepasst.

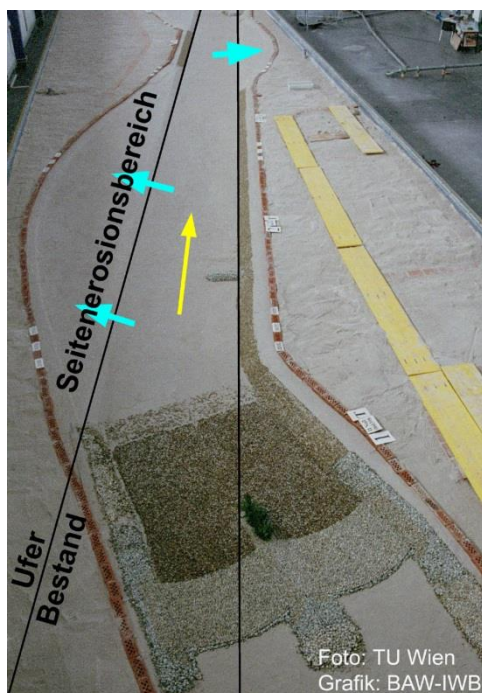


Abb. 2 Modellversuch im Maßstab 1:50 vor Versuchsbeginn

Das Modell wurde mit einer Abfolge von stationären Abflüssen und Hochwasserwellen belastet. Die mit den Versuchen abgedeckte Zeitspanne entsprach 18 Jahren in der Natur. Es zeigte sich, dass eine maßgebliche Eigendynamik erst ab ca. $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($HQ_1 = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$) zu erwarten ist. Weiters nimmt die Seitenerosionskraft mit zunehmender Breite ab. Das Endergebnis des Modellversuchs ist der Abb. 3 zu entnehmen. Die Abbildung zeigt auf der linken Achse die je Kilometer Uferlänge jährlich zu erwartende Menge an Kies aus der Seitenerosion. Auf der rechten Achse ist die Zunahme der Gewässerbreite für eine Kiesmächtigkeit von im Mittel 3 m dargestellt. Diese Umrechnung war notwendig, da der Modellversuch nur mit homogenem Salzachgeschiebe betrieben werden konnte. In der Natur ist das Vorland aber mit Feinsand überdeckt, der keinen Beitrag für die Sohlstabilität leistet. Der Anstieg der Seitenerosion nach 6 Jahren ist darauf zurückzuführen, dass im Modell strömungslenkende Maßnahmen getestet wurden um die Eigendynamik bei Bedarf wieder zu stärken.

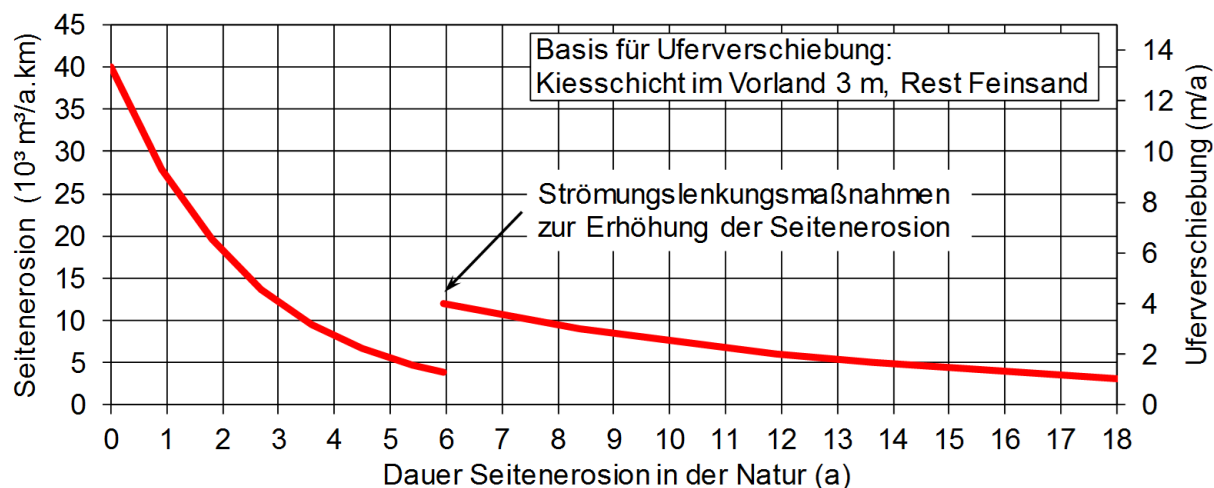


Abb. 3 Prognose der Seitenerosion aus dem physikalischen Modellversuch

3.2 Numerisches Modell

Die numerischen Berechnungen wurden 2004 am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München durchgeführt, mit dem Ziel, die bisherigen Planungen zum Uferschutz der WRS zu optimieren. Auf Basis numerischer Simulationen wurden die zu erwartenden Aufweitungsraten, die Breitenentwicklungen und die morphologischen Prozesse bei einer eigendynamischen Gewässerentwicklung nach Entfernung der Uferverbauung untersucht. Verwendet wurde ein zweidimensionales tiefengemittelttes Finite-Elemente-Modell, welches am Lehrstuhl um Ansätze des Geschiebetriebs sowohl im Ufer- als auch im Sohlbereich erweitert wurde (Details in Hafner (2008) und Schmutz (2003)). Die Berechnung des Geschiebetriebs erfolgte auf Basis einer modifizierten Meyer-Peter/Müller-Formel im Rahmen eines Ein-Kornansatzes über den mittleren Korndurchmesser. Fraktionierter Geschiebetransport und damit auch mögliche Abpflasterungen wurden somit nicht berücksichtigt. Die Uferstabilität und der Böschungsbruch wurden über einen einfachen Ansatz auf Basis des Reibungswinkels implementiert. Böschungsbewuchs oder Kohäsion sind nicht berücksichtigt.

Simuliert wurde die Strecke zwischen Fluss-km 51,6 und Fluss-km 49,6 mit einer idealisierten Gerinnegeometrie, welche sich im Wesentlichen auf das Hauptgerinne beschränkte. Auf die Vorländer mit ihren Rinnenstrukturen wurde verzichtet und als Korrektur die Abflussanteile des Vorlandes ebenfalls bei den morphologischen Berechnungen entsprechend abgezogen. Bei größeren Abflüssen tritt aufgrund der unterstromigen Laufener Enge ein deutlicher Rückstau auf. Dieser wurde über eine entsprechende W - Q -Beziehung am unteren Modellrand mit berücksichtigt. Die damaligen Planungen und somit auch die Simulationen sahen lediglich eine einseitige Aufweitung auf bayerischer Seite vor.

Neben einzelnen Hochwasserwellen und konstanten Abflüssen wurde auch die Dekade „1957 bis 1966“ simuliert. Da nennenswerte Aufweitungen erst ab $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ auftraten, wurde die Ganglinie der Dekade vorab um die Abflüsse $<400 \text{ m}^3/\text{s}$ (nicht mehr geschieberelevant) reduziert und die verbleibenden Werte bis $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ gemittelt, um nicht unnötige Rechenzeit bei den lang vorherrschenden unbedeutenden Abflusszuständen zu verlieren.

Abb. 4 zeigt mittlere prognostizierte Aufweitungsraten (einseitige Aufweitung), welche aus den Simulationen eines HQ_{10} und eines HQ_{100} ermittelt wurden. Die Aufweitungsgeschwindigkeit nimmt aufgrund des Rückstaus aus der Laufener Enge ab ca. $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ wieder ab. Diese

Aufweitungsraten sind jedoch nur eine Momentaufnahme, da mit zunehmender Breitenentwicklung die Seitenerosionskraft nachlässt. Dies lässt sich an den Simulationen der Dekade „1957 – 1966“ erkennen.

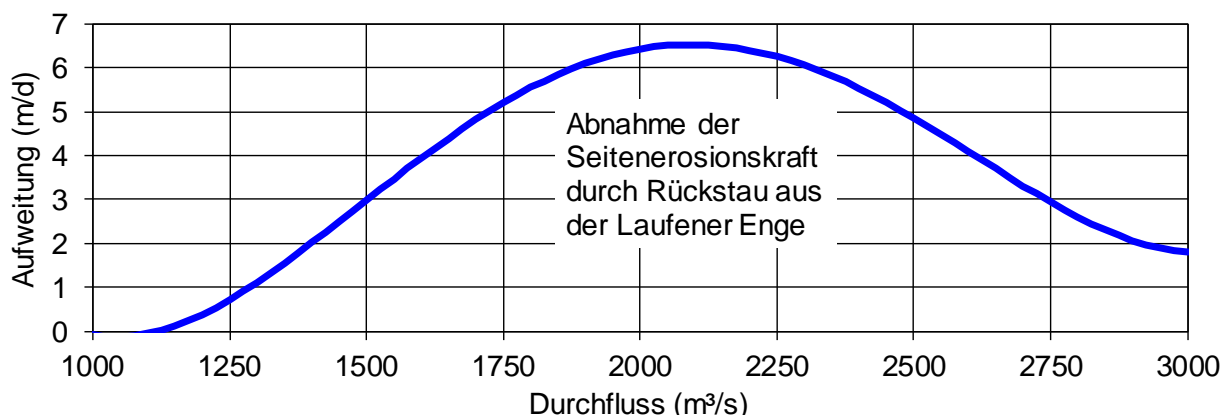


Abb. 4 Uferverschiebung in Abhängigkeit vom Abfluss aus dem numerischen Modell

Das Modell wurde zweimal mit der Dekade „1957 – 1966“ beschickt. Die Abb. 5 zeigt die verwendete idealisierte Ganglinie mit den Hochwasserwellen sowie die Breitenzunahme bei Fluss-km 50,8 und 50,2. Während bei der Erstbelastung rund 10 – 12 m Aufweitung eintraten, kam es bei der Zweitbelastung nur noch zu rund 5 m zusätzlicher Aufweitung.

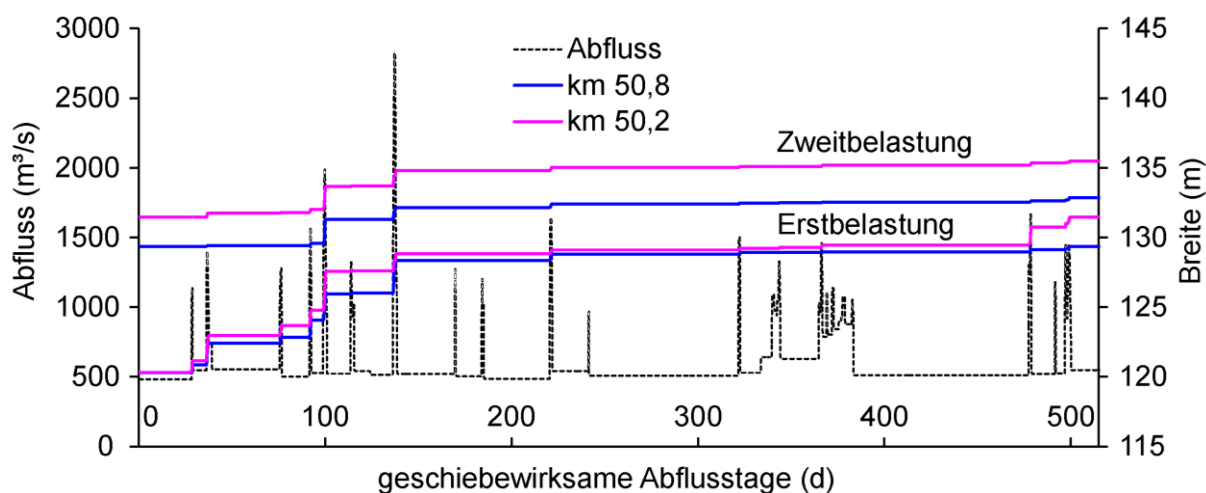


Abb. 5 Breitenentwicklung für Profil 50,8 und 50,2 für Erst- und Zweitbelastung

Um die damaligen 2004 erstellten Aufweitungsprognosen auf die realen gemessenen Veränderungen bei den Ereignissen 2010 und 2013 übertragen zu können sind folgende Sachverhalte zu berücksichtigen: Die Aufweitungsgeschwindigkeiten in Abb. 4 sind auf eine einseitige Ufererosion bezogen. In der Ausführung wurden aber auf beiden Seiten die Uferversteinungen entfernt. Die Aufweitungsraten in Abb. 4 müssen folglich verdoppelt werden. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass mit der Entfernung der Uferversteinung im Jahr 2010 bereits 15 m Uferaufweitung maschinell hergestellt wurden. Berücksichtigt man die Ergebnisse der Dekaden-Berechnungen, so ist davon auszugehen, dass mit diesen 15 m vorweggenommenen Aufweitungen die Aufweitungsraten in Abb. 4 grob zu halbieren sind. Fazit: Die beiden Effekte „beidseitige Aufweitung“ und „vorweggenommene maschinelle Aufweitung“ sind gegenläufig und heben sich in etwa auf, so dass mit den Aufweitungsraten

der Abb. 4 die Prognose des Zeitraums 2010 bis 2013 durchgeführt werden kann (siehe Kapitel 5).

4 Eigendynamische Gewässerentwicklung

Bereits im ersten Jahr nach Abschluss der Bauarbeiten trat in der Salzach ein 30-jährliches Hochwasser auf und drei Jahre später kam es zu einem über 100-jährlichen Ereignis (siehe Abb. 6).

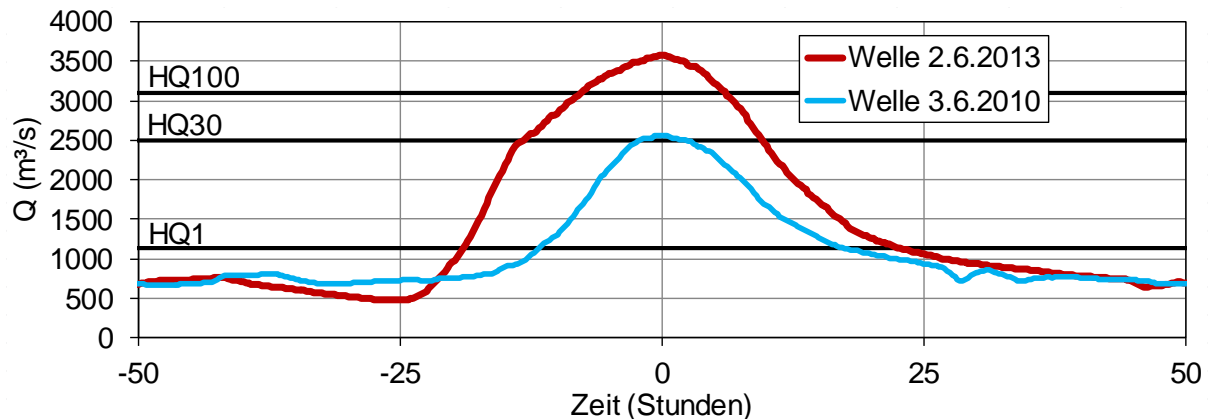


Abb. 6 Hochwasserwellen 2010 und 2013 im Vergleich (Pegel Laufen)

Kurz nach Fertigstellung der Baumaßnahmen im Frühjahr 2010 und nach den beiden Hochwässern wurden Flussquerprofile im Abstand von 200 m vermessen. Abb. 7 zeigt zwei ausgewählte Querprofile. Die Veränderungen im Bereich der Ufer von 2005 bis März 2010 sind auf die Baumaßnahmen zurückzuführen (entfernen der Ufersicherung sowie Strukturierung der Uferbereiche). Die Pfeile zeigen die Uferverschiebungen bis Ende 2013, ausgehend von der Aufnahme 2005.

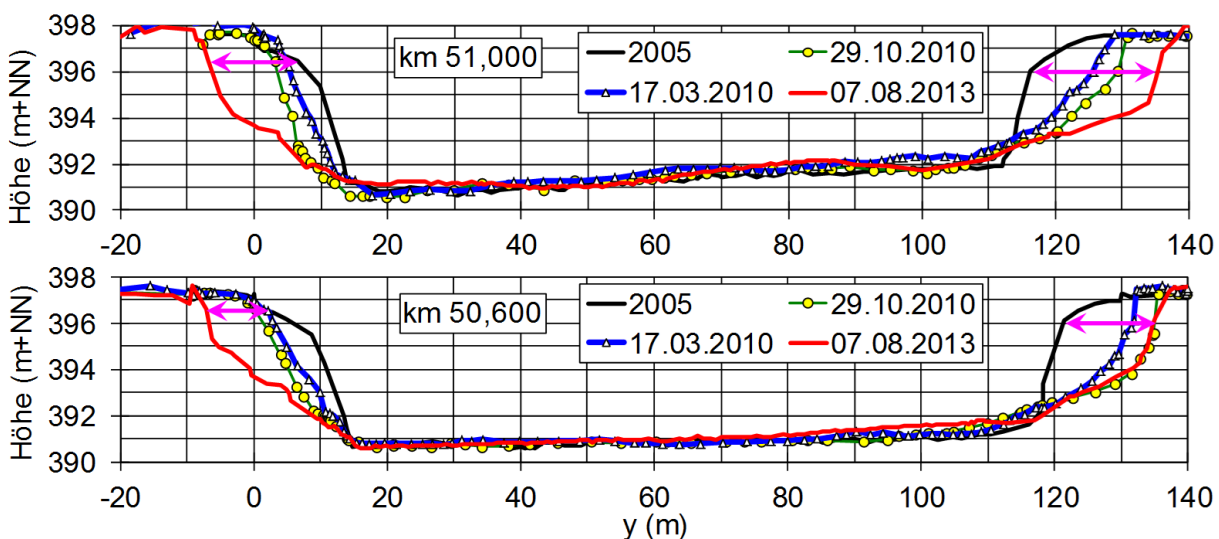


Abb. 7 Morphologische Entwicklung in zwei ausgewählten Querprofilen (Darstellung ca. 3,5-fach überhöht)

Wie Abb. 7 zu entnehmen ist, erfolgt die Eigendynamik im Gewässerverlauf unterschiedlich. Beispielsweise führte das extreme Hochwasser 2013 im km 50,6 rechtsufrig zu keiner Erosion. Die Profilgestalt hat sich durch die Eigendynamik gewässerökologisch rasch Vorteilhaft

verändert (Hengl et al., 2012). Ursprünglich war im Bereich der Anschlaglinie bei Nieder- und Mittelwasser bis zur Sohle das Ufer sehr steil. Nun ist der Übergang vom Ufer zur Sohle deutlich flacher woraus eine bessere Vernetzung von terrestrischen und aquatischen Lebensräumen folgt. Weiters entstanden ökologisch wertvolle Flachwasserzonen.

Positiv für die Sohlstabilität wirkt die mittlere Anhebung der Sohle im Aufweitungsbereich um 24 cm, die auch mit einer Zunahme des Sohlgefälles von 1 ‰ auf 1,2 ‰ verbunden ist.

5 Prognose und Messdaten im Vergleich

Grundlage für den Vergleich bilden die Ergebnisse aus der numerischen und physikalischen Modellierung. Während das numerische Modell einen direkten Zusammenhang zwischen Höhe des Abflusses und Aufweitung herstellte, lieferte das physikalische Modell nur für mittlere Abflussjahre gültige Werte. Tatsächlich liefen 2010 und 2013 aber überdurchschnittliche Hochwasserereignisse ab. Um die Anwendbarkeit der Prognose aus dem physikalischen Modellversuch zu prüfen, erfolgte in einem ersten Schritt ein Vergleich der Geschiebetransportkapazitäten in der Salzach in den Jahren 2010 bis 2013 mit der langjährigen mittleren Transportkapazität aus dem Zeitraum 1951 bis 2002. Trotz des 30-jährlichen Hochwassers 2010 lag die Geschiebetransportkapazität in diesem Jahr mit 90 % nahe am Vergleichswert (siehe Abb. 8). Zusammen mit dem trockenen Jahr 2011 und dem großen Hochwasser 2013, ergibt sich eine dem langjährigen Mittel entsprechende Transportkapazität. Es ist also zulässig das Ergebnis des physikalischen Modellversuchs direkt auf die Messdaten anzuwenden.

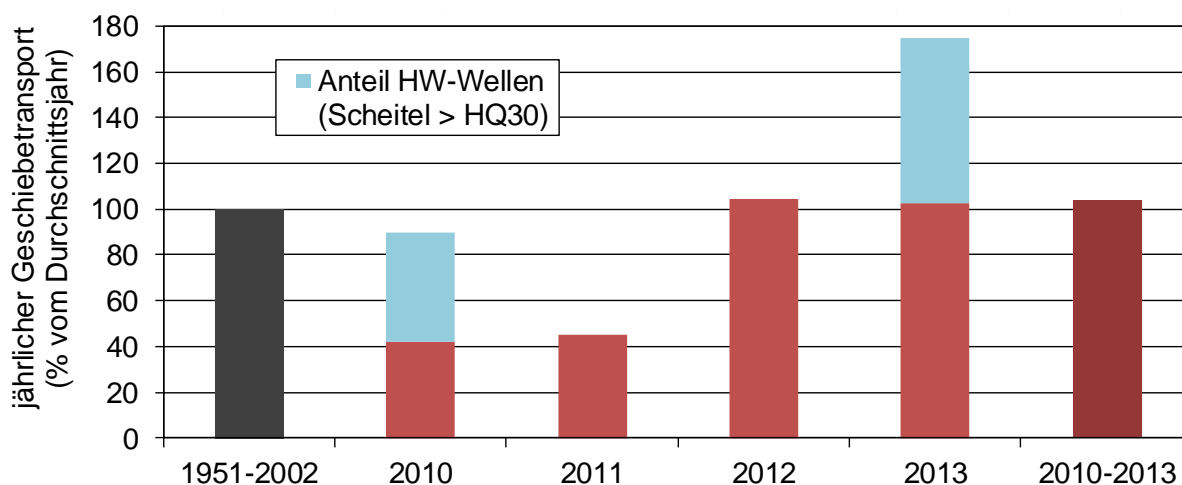


Abb. 8 Vergleich der Geschiebetransportkapazitäten 2010 bis 2013 mit dem langjährigen Mittel aus 1951 bis 2002

Abb. 9 zeigt den Vergleich zwischen Messung und Prognose. Als Vergleichswert wird die über die gesamte Länge und aus beiden Ufern zusammengesetzte mittlere Uferverschiebung gewählt. Ansatzpunkt ist die Vermessung vom März 2010 mit einer im Zuge des Baus vorweggenommenen Uferverschiebung von ca. 15 m. Die Messdaten passen überraschend gut mit den Prognosemodellen zusammen. Aus dem in Abb. 4 dargestellten Ergebnis des numerischen Modells war es möglich mit den tatsächlich gemessenen Abflüssen den Verlauf der Seitenerosion zu berechnen. Interessant ist, dass das Jahr 2011 mit geringer Geschiebetransportkapazität infolge zweier Abflussspitzen von 1250 und 1320 m³/s rechnerisch zu einer geringfügigen Aufweitung führt, während das durchschnittliche Jahr 2012 mit etwas kleineren Abflussspitzen von 1070 und 1040 m³/s keine Aufweitung ergibt. Dies hängt mit der oben beschriebenen Beziehung zwischen Durchfluss und Aufweitung zusammen (Abb. 4). Der

eigendynamische Aufweitungsprozess wird also maßgeblich von den Zeiträumen mit Durchflüssen deutlich über $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ beeinflusst. Da der Geschiebetransport aber bereits ab ca. $300 \text{ m}^3/\text{s}$ einsetzt, ist die obige Aussage, dass die Prognose aus dem physikalischen Modell aufgrund der vorhandenen mittleren Geschiebetransportraten direkt anwendbar ist, somit nicht in vollem Ausmaß gültig. Vielmehr scheinen die im Modellversuch auch enthaltenen großen Hochwässer maßgebend zu sein. Nach dem Hochwasser 2010 war die beobachtete Aufweitung geringer als auf Basis der Modelle prognostiziert. Ursache dafür ist, dass während des Hochwassers 2010 links eine alte Ufersicherung freigelegt wurde, die den Seitenerosionsprozess einschränkte (siehe Abb. 10).

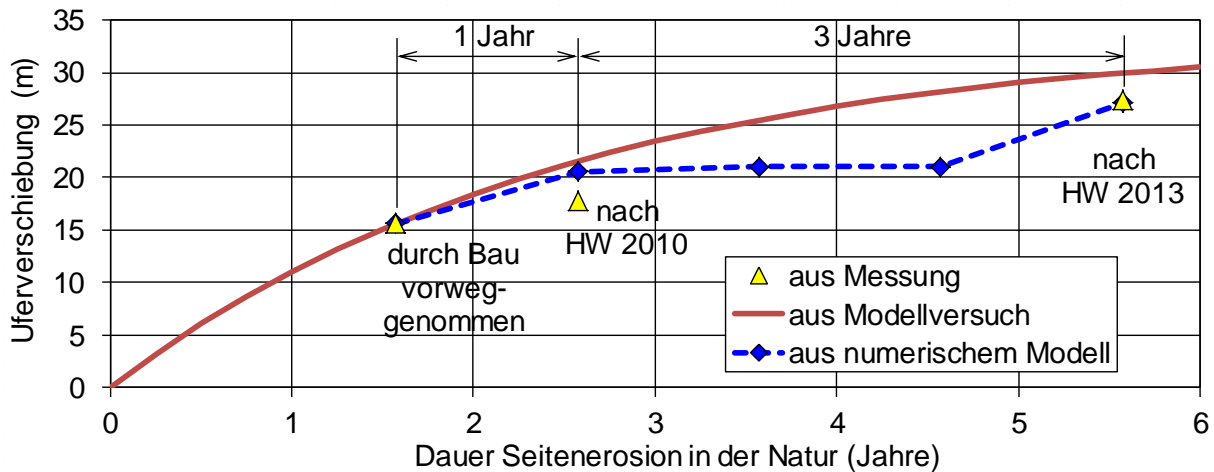


Abb. 9 Gemessene Uferverschiebung im Vergleich mit den Prognosen aus physikalischem Modellversuch und numerischem Modell Uferlos



Abb. 10 Holzpfähle einer beim Hochwasser 2013 freigelegten alten Ufersicherung im Bereich des linken Ufers

6 Bewertung der Ergebnisse

Der vierjährige Beobachtungszeitraum für die eigendynamische Gewässerentwicklung der Salzach ist für eine vollständige Evaluierung der gesetzten Maßnahmen zu kurz. Die bisherigen Messungen zeigen jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Prognose. Für den Vergleich herangezogen wurden allerdings nur die über den gesamten Abschnitt gemittelten Uferverschiebungen. Lokal verläuft die Seitenerosion aber sehr unterschiedlich (siehe Abb. 11). Dies gilt sowohl für den Längsverlauf als auch für die Aufteilung zwischen linkem und rechtem Ufer. Unmittelbar flussab der Rampe war bisher die Erosion am rechten

Ufer deutlich größer als am linken und mehr als doppelt so groß wie die mittlere Uferverschiebung. 800 m weiter flussab übertraf die Erosion am linken Ufer jene auf der rechten Seite. Die negative Uferverschiebung in Fluss-km 50,4 könnte auf einen Lagefehler in der Vermessung zurückzuführen sein.

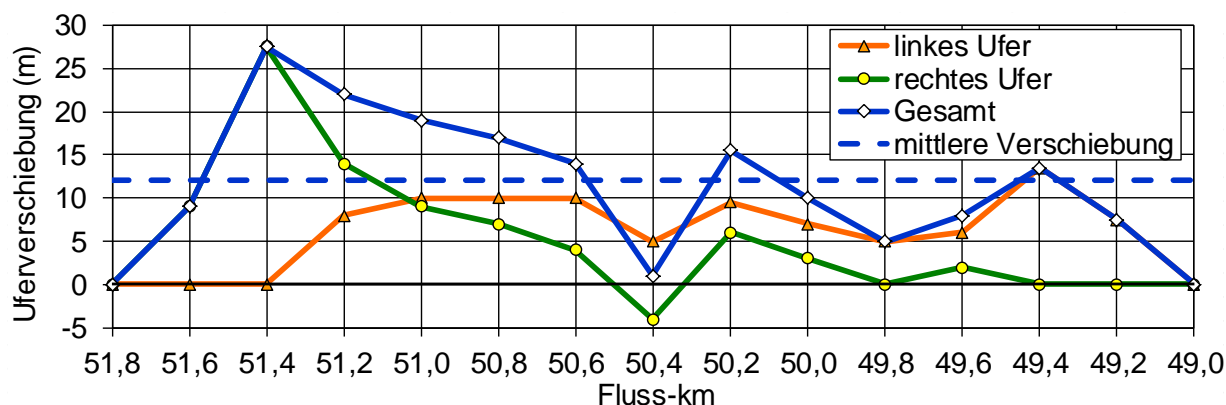


Abb. 11 Gemessene Uferverschiebungen im Längsverlauf

Ein besseres Gesamtbild ist erst nach 2020 zu erwarten, wenn entsprechend dem physikalischen Modellversuch die Seitenerosion ohne zusätzliche Initialmaßnahmen weitgehend abgeklungen sein sollte. Voraussetzung dazu ist aber, dass auch entsprechende Hochwässer mit Spitzenabflüssen deutlich über $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ auftreten. In diesem Zusammenhang offen ist auch noch die Frage ob in ruhigeren Abflusszeiten die Vegetation an den Ufern so stark zunimmt, dass dadurch eine weitere Seitenerosion bei Hochwasser gebremst wird. Zu erwarten ist dies vor allem am rechten Ufer, das tendenziell einer Innenbogensituation entspricht.



Abb. 12 Weiche Ufer, ca. 1 Monat nach dem Hochwasser 2013

Beeinflusst wird der Seitenerosionsprozess auch durch die Inhomogenitäten im Untergrund, die mit der historischen Entwicklung der Salzach als verzweigtes Flusssystem zusammenhängen. Von dieser Seite und angesichts der vielen Vereinfachungen sowohl in der physikalischen als auch in der numerischen Modellierung kann die gute Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung von kritischer Seite als auch mehr oder weniger zufällig interpretiert werden. Deutlich

größeres oder deutlich feineres Geschiebe in den Seitenerosionsbereichen hätte auch zu anderen Entwicklungen führen können.

Die bisherige positive Wirkung der eigendynamischen Aufweitung ist nicht nur wasserbaulich zu sehen. Die ursprünglich hart verbauten und unzugänglichen Ufer haben auch deutlich an ökologischer Qualität gewonnen (siehe Abb. 12).

Literatur

Hafner, T (2008). Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München – Nr. 117.

Hengl, M.; Aufleger, M.; de Mas, V.; Eggertsberger, J.; Hafner, T.; Michor, K.; Mühlbauer, M.; Raudaschl, S.; Schuardt, W.; Spannring, M.; Unterlercher, M.; Wiesenegger, Ch. (2012). Eigendynamische Aufweitungen an der Unteren Salzach - vom Konzept bis zu den ersten Erfahrungen. Österr. Wasser und Abfallwirtschaft, Heft 7-8/12, S 401-410. DOI 10.1007/s00506-012-0009-7.

Schmautz, M (2003). Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München – Nr. 96.

WRS (1995). Bericht zu Phase I: Bestandsanalyse. Stand der Untersuchung zu Phase II: Maßnahmenplanung Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Salzach. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.

WRS (2000). Zusammenfassende Darstellung und Bewertung der Lösungsvarianten. Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Salzach. Amt der Salzburger Landesregierung, Salzburg.

WRS (2002). Physikalisches Modell Sohlrampe mit Mäanderstrecke. Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Salzach. Amt der Salzburger Landesregierung, Salzburg.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Dr. Michael Hengl
Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung
Severingasse 7, A-1090 Wien
michael.hengl@baw.at

Dr.-Ing. Tobias Hafner
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2, D-81925 München
tobias.hafner@stmuv.bayern.de