

Zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modellierung von Maßnahmen in der Aue im Einzugsgebiet der Mangfall

Susanne Haas und Wolfgang Rieger

Zusammenfassung

Nach dem Hochwasserereignis im Jahr 1999 wurde in Bayern das Aktionsprogramm 2020 für den Hochwasserschutz ins Leben gerufen, das nach dem Ereignis 2013 erweitert wurde. Die bayerische Staatsregierung führt darin den „Natürlichen Rückhalt“ als eines der Handlungsfelder auf. Maßnahmen an Gewässern und in der Aue können ihren Teil zum Hochwasserschutz beitragen. Durch Erhöhung der Rauheit mit Bewuchs im Vorland, durch Veränderung des Fließgewässerquerschnitts und durch Verlagerung des Flusslaufs kann das Retentionspotential erhöht werden. Um die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zu quantifizieren, sind zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle derzeit Stand der Forschung. Sie können die Interaktion zwischen Fließgewässer und Vorland abbilden. Die in bisherigen Studien teilweise getroffenen Vereinfachungen in Bezug auf die Vegetation und die verwendeten Extremszenarien bezüglich Fließgewässerbett werden in diesem Beitrag detaillierter betrachtet. In einem Modell der Oberen Mangfall in den Voralpen werden die drei Maßnahmen abgestufte Auenvegetation, Querprofiländerung und Laufverlängerung in zwei Renaturierungsabschnitten umgesetzt, die sich in ihrer Morphologie bezüglich Gefälle, Gewässertiefe und Gewässerbreite sowie Steigung des Vorlandes unterscheiden. Insbesondere die Auenvegetation soll realitätsnah abgebildet werden. Dafür erfolgt eine Einteilung in gehölzfreie Zone, Weichholzaue und Hartholzaue, die unterschiedlich im Modell klassifiziert sind. Die drei Maßnahmentypen werden zum Teil einzeln, aber auch in Kombination miteinander untersucht. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wird anhand eines hundertjährigen und eines fünfjährigen Hochwasserereignisses quantifiziert. Die Ganglinien am Ende der beiden Renaturierungsabschnitte sowie am Ende des gesamten Flussabschnitts ermöglichen den Vergleich zwischen den Maßnahmenszenarien. Die Auswirkungen der Einzelmaßnahmen in den beiden Abschnitten unterscheiden sich deutlich. Im flacheren ersten Abschnitt wird durch Auenvegetation eine größere Scheitelabminderung erreicht. Im zweiten Abschnitt mit tieferem Bett und steilen Ufern hat die Querprofiländerung die größeren Auswirkungen. In beiden Bereichen sowie im gesamten Flussabschnitt zeigen sich jedoch kombinierte Maßnahmen als das wirkungsvollste Instrument.

1 Einleitung

Das erweiterte Aktionsprogramm 2020plus der bayerischen Staatsregierung beinhaltet für einen nachhaltigen Hochwasserschutz unter anderem das Handlungsfeld „Natürlicher Rückhalt“, dessen Bestandteil Renaturierungsmaßnahmen direkt am Gewässer und an den Ufern sind (StMUV, 2014). Im vorliegenden Beitrag stehen gerade diese Maßnahmen im Fokus und werden hinsichtlich ereignisabhängiger und standortbedingter Möglichkeiten und Grenzen untersucht.

Maßnahmen am Gewässer und in der Aue erhöhen auf unterschiedliche Weise die Retention. Durch Anhebung der Sohle und Aufweitung der Ufer werden Gewässer und Aue stärker vernetzt, was die Retention auf den Aueflächen fördert. Eine Erhöhung der Oberflächenrauheit durch Bewuchs in der Aue unterstützt zusätzlich die fließende Retention. Ein weiteres Retentionspotential kann im Gewässer durch Laufverlängerung aktiviert werden, da die Fließgeschwindigkeit aufgrund des verminderten Fließgefälles reduziert wird.

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Gestaltung der Ufervegetation, die durch ihren erhöhten Rauheitswiderstand direkt Einfluss auf den Wellenablauf hat, eine große Bedeutung für das Retentionspotential von Renaturierungsmaßnahmen hat (Marenbach, 2002, Hellberg, 2006, Rieger, 2012). In diesen Studien wurde die Auenvegetation zumeist mit einem einheitlichen Rauheitsbeiwert angenommen, weshalb in der vorliegenden Untersuchung eine Zonierung der Aue in gehölzfreie Aue, Weichholzaue und Hartholzaue vorgenommen wird. Die Umsetzung einer abgestuften Aue wird sowohl einzeln als auch in Kombinationen mit einer renaturierten Gewässerstruktur, bestehend aus Laufverlängerung und Querprofiländerung, betrachtet, um das spezifische ereignisabhängige Potential zur Hochwasserscheitelabminderung der einzelnen Maßnahmen der Gewässerrenaturierung inklusive ihrer Kombinationen zu ermitteln.

Stand der Forschung zur Simulation des Wellenablaufs im Gewässer und in den Aueflächen sind derzeit zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle. Im Gegensatz zu eindimensionalen Modellen können sie Abflüsse mit unterschiedlichen Strömungsrichtungen und die Interaktion zwischen Hauptgewässer und Vorland abbilden.

Um die ereignisabhängige Wirksamkeit realisierbarer Maßnahmen am Gewässer und in der Aue zu quantifizieren, werden sie in ein Hydro_AS-Modell (Nujic, 1998) der Oberen Mangfall implementiert. Anschließend wird ihre Wirksamkeit zur Scheitelabminderung für zwei Hochwasserereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit ermittelt und innerhalb verschiedener Szenarien verglichen.

2 Untersuchungsgebiet

Die Mangfall ist ein Fließgewässer der Alpenregion circa 50 km südlich von München. Das Untersuchungsgebiet der Oberen Mangfall umfasst den Bereich der Mangfall vom Auslass am Tegernsee bis zum Pegel Valley. Das Einzugsgebiet dieses Flussabschnitts umfasst 118 km². Die Fließstrecke beträgt dabei circa 22 km und hat ein mittleres Fließgefälle von 0,67 %. Der Auslass am Tegernsee liegt bei 726 m ü. NN, der Pegel Valley ist mit einer Höhe von 578 m ü. NN notiert.

Die Mangfall entspringt dem Tegernsee und hat auf ihrer Strecke bis Valley einen großen und einige kleinere Zuflüsse. Der größte Zufluss ist die Schlierach bei Flusskilometer 45,7. Sie erhöht den Abfluss der Mangfall um circa 1/3 der ursprünglichen Wassermenge. Sowohl in der Mangfall als auch in der Schlierach befinden sich Ausleitungen zu den Leitzachwerken.

Im untersuchten Abschnitt der Mangfall gibt es zwei offizielle Pegel. Diese werden in Tabelle 1 mit Hauptwerten und Hochwasserjährlichkeit aufgeführt.

Tab. 1 Hauptwerte und Hochwasserjährlichkeiten der Pegel Schmerold und Valley

Pegel	NQ	MNQ	MQ	MHQ	HQ	HQ5	HQ100	Einheit
Schmerold	0,14	1,69	5,44	54,1	142	82	170	m ³ /s
Valley	0,63	2,16	8,71	45,8	112	58	120	m ³ /s

Das Fließgewässer variiert in seiner Breite auf der gesamten Strecke zwischen 12 und 25 m, wobei es im Süden tendenziell schmaler ist. Die Tiefe der Gewässersohle liegt circa 1,5 bis 4,6 m

unterhalb der Geländekante. Im nördlichen Bereich ist die Mangfall wesentlich stärker eingetieft, während sie im südlichen Bereich in einem flacheren Bett fließt.

Die topographische Karte in Abbildung 1 zeigt das gesamte Einzugsgebiet der Mangfall bis zum Pegel Valley und das Untersuchungsgebiet zwischen Tegernsee und Valley.

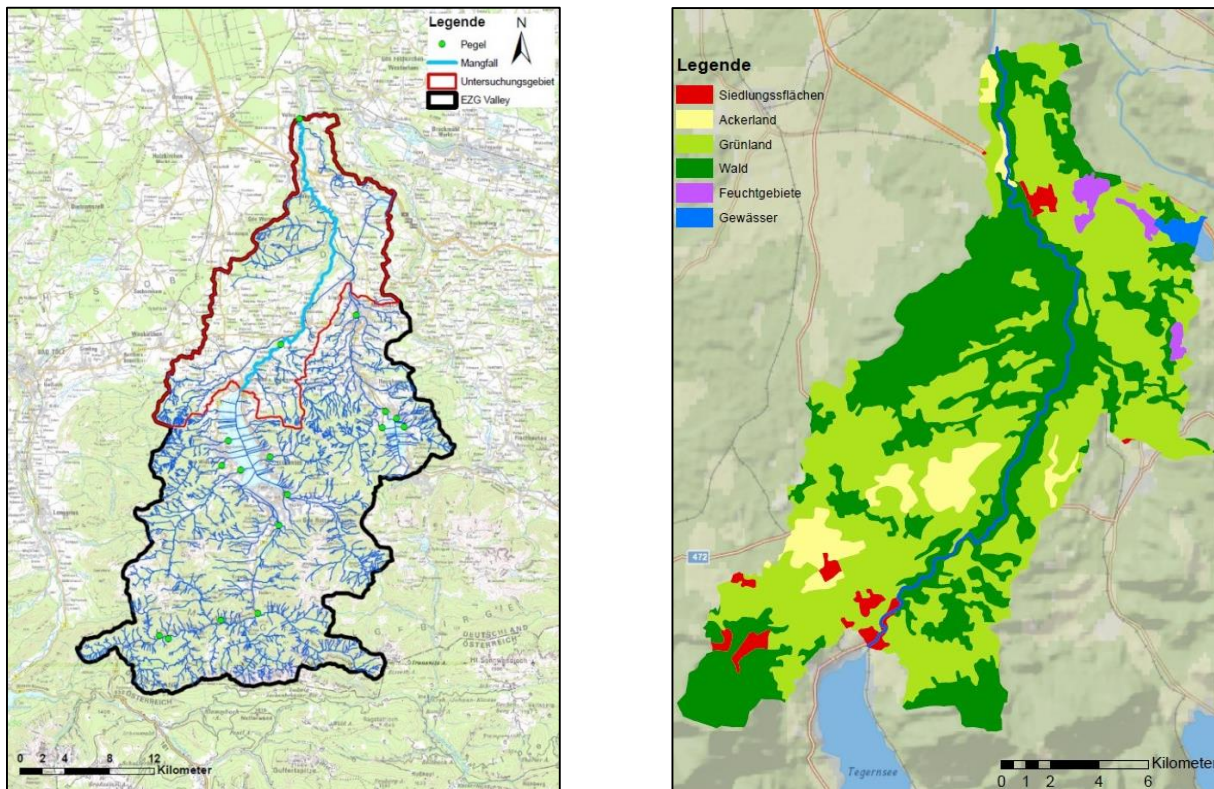


Abb. 1 Untersuchungsgebiet der Oberen Mangfall

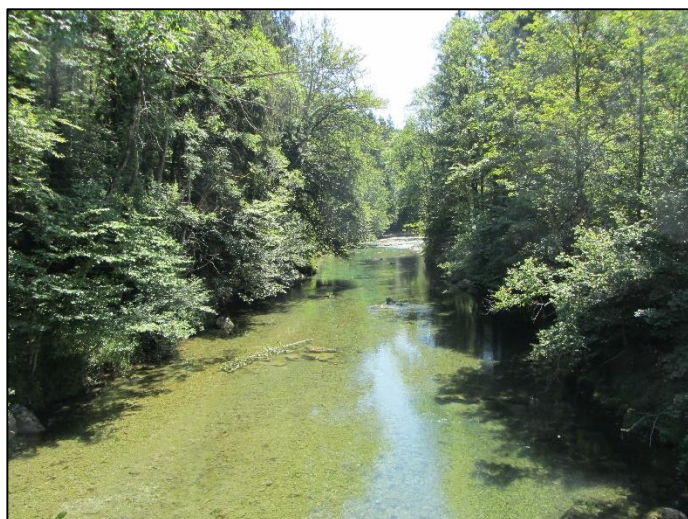


Abb. 2 Mangfallufer am Pegel Valley

Tab. 2 Landnutzung am Ufer

Landnutzung Ufer	Anteil
Nadelwald	53,3 %
Mischwald	32,2 %
Siedlungsflächen	6,2 %
Grünland	4,5 %
Landwirtschaft	3,8 %

Die Landnutzungsverteilung im Untersuchungsgebiet wird gleichermaßen stark von Wald und Grünland dominiert. Acker- und Siedlungsflächen machen nur einen geringen Anteil aus. Bei Betrachtung des Uferbereichs der Mangfall in Abbildung 2 wird jedoch deutlich, dass entlang des Gewässers die überwiegende Landnutzungsart Wald ist (siehe Tabelle 2). Mit einem Wald-Anteil von über 80 % spielen Grünland, Siedlungen und Ackerflächen eine untergeordnete Rolle.

3 Modellierung von Auengestaltungsmaßnahmen

Das Untersuchungsgebiet wurde gewählt, da innerhalb des übergeordneten Projekts der Fokus zunächst auf voralpine Regionen gelegt wurde. Es eignet sich insbesondere dadurch, dass die Landnutzung auf Grund des geringen Anteils an Siedlungsstrukturen die Realisierung von Renaturierungsmaßnahmen begünstigt. Der am Ufer vorhandene Wald kann für die zonierte Auenvegetation als Vergleichsszenario dienen. Durch die vorliegende trapezförmige Geometrie des Gerinnes können Querprofiländerungen wirksam umgesetzt werden.

Das in dieser Untersuchung verwendete zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modell Hydro_AS-2D ist als für die Beantwortung der Fragestellung geeignet anzusehen, da es sich in bisherigen Untersuchungen zu Gewässerrenaturierungen (Schwaller, 2005, Rieger, 2012 u.a.) wie auch in der bayerischen Wasserwirtschaft zur hinreichend genauen Erstellung von Hochwassergefahrenkarten bewährt hat. Durch sein flexibles trianguläres und rektanguläres Berechnungsnetz ist es in der Lage, auch kleinräumige Strukturänderungen wie Aufweitungen oder Mäanderschleifen und die daraus resultierenden Strömungsvorgänge realitätsgetreu abzubilden. Zusätzlich ist es ein gutes Instrument zur Simulation der Interaktion zwischen Gewässer und Aue, da eine kleinräumig differenzierte Auenvegetation über entsprechende Rauheitswerte parametrisiert werden kann und Querströmungen wie auch die Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit abgebildet werden können.

Am Flusslauf der Oberen Mangfall werden für die Umsetzung von Renaturierungsszenarien drei Maßnahmentypen im Modell umgesetzt. Dazu liegt ein Hydro_AS Modell des Wasserwirtschaftsamtes (WWA) Rosenheim mit Vermessungsdaten aus den Jahren 2003 und 2013 vor, das mit den Daten des Juni-Hochwassers 2013 kalibriert wurde. Es erfolgte eine Anpassung des Modells durch Kopplung mit einem hydrologischen Modell des Gebiets zur diffusen und damit realitätsgetreuen Zugabe der Zuflussrandbedingungen. Diese wurden dazu im Abstand von 500 m gesetzt und enthalten jeweils die Ganglinien des hydrologischen Modells und damit sowohl den konzentrierten Abfluss der Teileinzugsgebiete entlang der Mangfall als auch die seitlichen Zuflüsse zur Mangfall.

3.1 Umsetzungsbereiche der Maßnahmen

Für die Renaturierungsmaßnahmen wurden zwei Flussabschnitte gewählt. Der Renaturierungsabschnitt 1 ist mit Vorlauf 3,0 km lang, ebenso wie der Renaturierungsabschnitt 2 zwischen den beiden Kontroll-Querschnitten. Die Breite des Flussbetts liegt im ersten Abschnitt zwischen zwölf und 25 m, der zweite Abschnitt weist 17 bis 25 m Breite auf. Bei der Tiefe des Flussbetts gibt es deutliche Unterschiede. Im ersten Abschnitt liegt die Sohle 1,50 bis 2,00 m unterhalb des Ufers, ganz am Ende tritt ein kurzer Bereich mit einer Tiefe von 4,00 m auf. Im Gegensatz dazu liegt die Sohle im zweiten Abschnitt dauerhaft tiefer. Dies variiert zwischen 2,50 und 4,60 m, wobei die tiefen Bereiche deutlich überwiegen. Das mittlere Gefälle der Sohle im ersten Abschnitt liegt bei 0,5 % und ist damit flacher als im zweiten Abschnitt mit 0,7 %. Wesentlich flacher ist auch das umliegende Vorland im ersten Abschnitt. Dort können sich deutliche Überflutungsbereiche ausbilden. Im zweiten Abschnitt hingegen verläuft das Gelände auch nach dem Übergang von Sohle zu Ufer schon nah am Fluss relativ steil.

3.2 Auenvegetation

Ein Bestandteil der Renaturierung ist die Veränderung der Vegetation am ufernahen Gewässerbereich sowie auf den Überflutungsflächen. Der Bewuchs im Ausgangsmodell des WWA ist primär durch Wald mit einem Rauheitswert von $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gekennzeichnet.

Ziel der Umgestaltung ist es, eine realitätsnahe abgestufte Aue am Gewässer und im Vorland abzubilden. Dafür wurden nach Koenzen (2002) und Ellenberg (1998) verschiedene Zonen der Auenvegetation im Modell realisiert (siehe Abbildung 4). Die äußersten Elemente des Gewässers wurden als gehölzfreie Zone mit einer Krautschicht mit dem Stricklerwert $18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ belegt. Darauf folgt am Ufer eine Röhrichtzone, die die gewässernahen Bereiche mit einem Stricklerwert von $12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ beschreibt. Der anschließende Weidenbewuchs mit einem Stricklerwert von $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ dehnt sich etwa über ein Drittel der Fläche aus, die von einem hundertjährigen Ereignis überflutet wird. Im Anschluss wird der bestehende Wald verdichtet und mit einem Stricklerwert von $8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ belegt, beziehungsweise andere Landnutzung in Wald umgewandelt. Die Rauheitswerte sind Nujić (1998) und LfU BW (2002) entnommen.

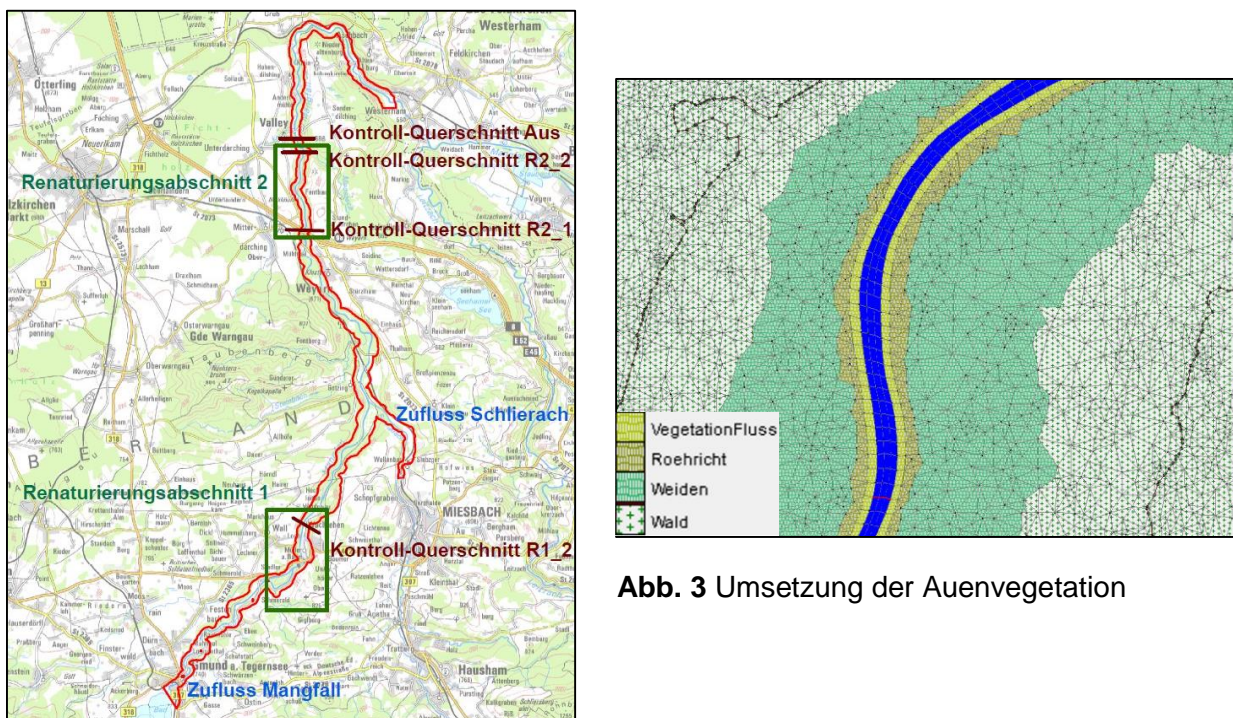


Abb. 3 Umsetzung der Auenvegetation

Abb. 3 Übersicht des hydraulischen Modells

3.3 Querprofiländerung

Eine Änderung der Struktur des Querprofils des Flusses setzt sich in der Regel aus einer Aufweitung der Ufer und der Anhebung der Sohle zusammen. Eine Verbreiterung der Ufer in der Natur bewirkt eine natürliche Sedimentablagerung, die zu einer Erhöhung der Sohle führt. Dadurch wird der Fließquerschnitt zum einen durch die Verbreiterung vergrößert, jedoch durch die Anhebung in gewisser Weise auch reduziert. Aussagen über die Änderung des Querschnitts sind daher nur spezifisch möglich. Die Umsetzung im Modell erfolgte in beiden Abschnitten gleichermaßen mit einer konstanten Erhöhung der Sohle und mit einer gleichmäßigen Aufweitung des Uferbereichs. Die Änderung des Profils kann als eher konservativ beschrieben werden.

3.4 Laufverlängerung

Die Länge einer Fließstrecke bedingt das Gefälle des Gewässers. Begradigte Flussabschnitte verbinden auf kürzestem Weg den höchsten und niedrigsten Geländepunkt und bewirken so ein hohes Fließgefälle, das die Fließgeschwindigkeit des Wassers erhöht. Durch die Umsetzung von Mäandern kann die Fließstrecke verlängert werden und das Fließgefälle wird dadurch vermindert. Langsamere Fließgeschwindigkeiten begünstigen das Ausuferndes Gewässers und ermöglichen die Retention im Auebereich.

Grundlage für die Laufverlängerung im Modell sind historische Karten, die die ehemaligen Verläufe zeigen sowie die Topographie des vorliegenden Geländes. Für die Umsetzung wurde für beide Renaturierungsabschnitt ein neuer Flusslauf erstellt und in den Bereich eingefügt (siehe Abbildung 5). Zu beachten ist hierbei der Anschluss des neuen Modellteils sowie die Zuweisung der Landnutzungsform für neuen und alten Fließweg. Da der Wellenablauf nicht in den Altarmen, sondern im neuen Flussbett analysiert werden soll, wurde das Flussbett des ehemaligen Gewässers auf Geländehöhe gesetzt.

Im ersten Renaturierungsabschnitt wurde das Gewässer von 2500 m auf 2720 m verlängert. Dies bedingt eine Gefällereduzierung von 8,3 %. Im zweiten Renaturierungsabschnitt wurde durch die Laufverlängerung von 2950 m auf 3250 m eine Reduktion des Gefälles um 8,6 % erreicht.

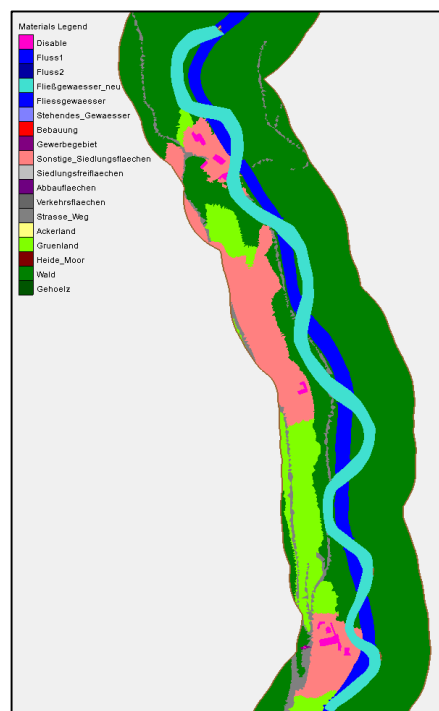


Abb. 4 Mäandrierung im Abschnitt 2

3.5 Modell-Input und -Output

Zur Bewertung der Maßnahmen wurden im Modell zwei Ereignisse untersucht. Die Welle eines fünfjährigen Ereignisses stammt aus dem Frühjahr 2006 und bildet die etwa viertägige Spitze eines Hochwassers ab. Der Scheitelabfluss betrug hier 57 m³/s. Das zweite Ereignis entspricht dem Kalibrierungsereignis, dem Juni-Hochwasser 2013 mit einem Umfang von circa neun Tagen und einem Spitzenabfluss von 132 m³/s.

Die ablaufenden Ganglinien wurden an mehreren Kontroll-Querschnitten im Modell erfasst, welche in Abbildung 3 dargestellt sind. Es handelt sich dabei um eine Prüfstelle nach dem ersten Renaturierungsabschnitt, jeweils eine Prüfstelle vor und nach dem zweiten Renaturierungsabschnitt sowie eine letzte Kontrolle am Ende des Untersuchungsgebiets am Pegel Valley.

3.6 Betrachtete Szenarien

Die bisher aufgeführten Maßnahmen wurden zum Teil einzeln umgesetzt, vielfach aber auch in Kombination untersucht. Die meisten Szenarien konnten sowohl für das fünfjährige als auch für das hundertjährige Ereignis berechnet werden. Einen Überblick darüber gibt Tabelle 3.

Tab. 3 Übersicht über die Szenarien

Szenario	Jährlichkeit	Auenv egetation	Querprofil	Laufverlängerung
5.O	HQ ₅	-	-	-
5.A	HQ ₅	X	-	-
5.Q	HQ ₅	-	X	-
5.AQ	HQ ₅	X	X	-
5.QL	HQ ₅	-	X	X
5.AQL	HQ ₅	X	X	X
100.O	HQ ₁₀₀	-	-	-
100.A	HQ ₁₀₀	X	-	-
100.Q	HQ ₁₀₀	-	X	-
100.AQ	HQ ₁₀₀	X	X	-
100.AQL	HQ ₁₀₀	X	X	X

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse zunächst für die beiden Renaturierungsabschnitte betrachtet und im Anschluss die Auswirkung auf den gesamten untersuchten Bereich analysiert.

4.1 Ergebnisse der beiden Renaturierungsabschnitte

Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Scheitelveränderung in den beiden Renaturierungsabschnitten. Die Ganglinien werden am Ende von Abschnitt 1 und am Ende von Abschnitt 2 verglichen. Durch den Einfluss des ersten Renaturierungsabschnitts entsprechen sich die Ganglinien zu Beginn von Abschnitt 2 nicht exakt, jedoch bilden die ermittelten Werte die Tendenz der Scheiteländerung sehr gut ab.

Tab. 4 Scheitelveränderung in den Renaturierungsabschnitten

Szenario	R1 - HQ ₅	R1 - HQ ₁₀₀	R2 - HQ ₅	R2 - HQ ₁₀₀
Auenv egetation	- 1,4 %	- 2,7 %	+ 0,9 %	- 0,9 %
Querprofiländerung	+ 0,2 %	+ 2,5 %	- 0,5 %	- 1,3 %
Auenv egetation, Querprofiländerung	- 4,8 %	- 0,8 %	+ 1,6 %	- 3,7 %
Querprofiländerung, Laufverlängerung	- 0,2 %	-	- 0,6 %	-
Auenv egetation, Querprofiländerung, Laufverlängerung	- 4,7 %	- 4,3 %	- 0,6 %	- 3,7 %

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Renaturierungen eine Scheitelabminderung bis zu 5 % zu erwarten ist (Rieger, 2012). Die hier aufgeführten Ergebnisse befinden sich in diesem Rahmen. Einige Werte liegen im Unsicherheitsbereich der Modellierung.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass im Renaturierungsabschnitt 1 die Veränderung der Auenv egetation als Einzelmaßnahme einen größeren Effekt hat als die Änderung der Querprofilstruktur. Im Renaturierungsabschnitt 2 dahingegen wirkt sich unter den Einzelmaßnahmen die Querprofiländerung stärker aus als die Auenv egetation.

Bei den kombinierten Maßnahmen wird deutlich, dass die Auenvegetation grundsätzlich eine sehr große Rolle bei der Abminderung des Scheitels spielt. Im ersten Abschnitt wird die größte Scheitelreduzierung bei einem fünfjährigen Ereignis in Kombination mit einer Querprofiländerung erreicht. Die Umsetzung der Laufverlängerung hat dabei einen äußerst geringen Einfluss. Zum Vergleich wirkt die zusätzliche Querprofiländerung im Falle eines hundertjährigen Ereignisses jedoch entgegen und nur die Kombination aller drei Maßnahmen bringt eine annähernd so große Abminderung wie beim fünfjährigen Ereignis. Offensichtlich ist in jedem Fall, dass die Kombination von Maßnahmen ein größeres Potential der Scheitelabminderung bietet.

In Renaturierungsabschnitt 2 mit dem steileren und tieferen Flussbett und dem steigenden Vorland zeigt sich bei der Kombination aus Auenvegetation und Querprofiländerung zunächst ein ungleiches Bild für die beiden Ereignisse. Im Fall des fünfjährigen Hochwassers stellt sich diese Maßnahme als negativ dar. Bei einer hundertjährigen Überflutung kann die Kombination aus den beiden eine große Abminderung bewirken. Wie schon im ersten Abschnitt beim fünfjährigen Ereignis ist der Einfluss der Laufverlängerung zu vernachlässigen. Gleiches gilt im Abschnitt 2 beim fünfjährigen Hochwasser für eine Kombination aus Querprofiländerung und Laufverlängerung. Der Vergleich der Kombination aller drei Maßnahmen mit der Maßnahmenkombination Auenvegetation und Querprofil weist in diesem Fall darauf hin, dass der Einfluss der Laufverlängerung gering ist.

4.2 Ergebnisse des gesamten Flussabschnitts

Am finalen Kontrollquerschnitt können die maximalen Scheitelwerte bei Umsetzung der Szenarien in beiden Renaturierungsabschnitten abgelesen werden. Sie sind in Tabelle 5 dargestellt. Einfluss haben auf die resultierende Abflussganglinie am Ende des gesamten Flussabschnitts nicht nur die unterschiedlichen Auswirkungen der Maßnahmen in den beiden Renaturierungsabschnitten, sondern auch mögliche Überlagerungen von Wellen durch den Zufluss der Schlierach zwischen den Renaturierungsabschnitten.

Tab. 5 Scheitelveränderung über den gesamten Flussabschnitt

Szenario	HQ ₅	HQ ₁₀₀
Auenvegetation	- 0,4 %	- 2,6 %
Querprofiländerung	- 0,3 %	+ 0,8 %
Auenvegetation, Querprofiländerung	- 2,4 %	- 2,0 %
Querprofiländerung, Laufverlängerung	- 0,3 %	-
Auenvegetation, Querprofiländerung, Laufverlängerung	- 2,4 %	- 1,9 %

Im Fall eines fünfjährigen Hochwassers ist der Unterschied der Auswirkung der Einzelmaßnahmen Auenvegetation und Querprofiländerung gering. Bei einem hundertjährigen Hochwasser kann jedoch die Auenvegetation eine deutliche Abminderung erzielen, während die Querprofiländerung insgesamt zu einer leichten Erhöhung des Maximalabflusses führt.

Am fünfjährigen Ereignis erkennt man den starken Einfluss der Auenvegetation bei den kombinierten Maßnahmen. Hiermit können die größten Scheitelabminderungen erreicht werden.

Es zeigt sich ebenso wieder, dass die Laufverlängerung kaum Auswirkungen hat. Beim hundertjährigen Ereignis zeigen die kombinierten Maßnahmen den erhöhenden Einfluss der Querprofiländerung und bestätigen die geringe Wirkung der Laufverlängerung.

4.3 Diskussion

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich die Auswirkungen der Maßnahmen in den beiden Renaturierungsabschnitten aufgrund der vorherrschenden Standortbedingungen maßgeblich unterscheiden. Der gesamte Flussabschnitt wird nicht nur durch die morphologischen Gegebenheiten, sondern zusätzlich vom Zufluss der Schlierach beeinflusst.

Die abgestufte Auenvegetation wirkt in unterschiedlicher Weise. Die Krautschicht im Gewässer selbst bewirkt eine erhöhte Rauheit im Gegensatz zur Sohle. Das anschließende Röhricht verringert die Rauheit geringfügig, wenn dort zuvor Wald auftrat. Die Weiden weisen in Bezug auf die Rauheit keinen Unterschied zu einer vorigen Waldvegetation auf, der abschließende Wald wurde jedoch mit einer höheren Rauheit angesetzt. Daher ist mit unterschiedlichen Auswirkungen im Gerinne, an der Böschung und im Überflutungsbereich zu rechnen. Durch eine erhöhte Rauheit im Gerinne wird die Fließgeschwindigkeit verringert, womit sich der Wasserstand erhöht. In den dadurch erwirkten größeren Überflutungsbereichen kommt die Rauheit des verdichteten Waldes zum Tragen. Insgesamt kann dadurch eine Reduktion des Abflussscheitels erreicht werden. Allerdings spielt die Topographie eine große Rolle. Wegen des tieferen Flussbetts und des steileren Geländes wirkt sich die Auenvegetation im zweiten Renaturierungsabschnitt nicht so stark aus. Dass die Vegetation am Ufer einen großen Einfluss hat, zeigten auch Marenbach (2002), Schwaller (2005), Hellberg (2006) sowie Rieger (2012).

Die Querprofiländerung besteht aus zwei Anteilen. Die Anhebung der Sohle um einen absoluten Wert hat in den beiden Renaturierungsabschnitten aufgrund der unterschiedlichen Tiefe des Flussbetts unterschiedlich starke Auswirkungen. Im zweiten Abschnitt führt die Uferaufweitung eher zu einem größeren Fließquerschnitt, der es ermöglicht, dass das Wasser langsamer fließt. Im Renaturierungsabschnitt 1 kann keine Abminderung des Scheitels durch diese Maßnahme ermittelt werden. Im Vergleich zu den Betrachtungen von Schwaller (2005) handelt es sich jedoch um eine konservative Veränderung, die damit geringere Auswirkungen hat.

Die Verlagerung des Fließwegs mit Verringerung des Längsgefälles zeigt in der vorliegenden Studie bei den meisten Szenarien kaum Auswirkungen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Schwaller (2005) überein.

Die Wirkung von kombinierten Maßnahmen stimmt häufig mit der Überlagerung des Einflusses der Einzelmaßnahme überein. Im ersten Renaturierungsabschnitt erzielen Querprofiländerung und Auenvegetation sowie alle drei Maßnahmen gemeinsam die größten Scheitelabminderungen. Im zweiten Renaturierungsabschnitt ist dies nur beim hundertjährigen Ereignis der Fall. Dies lässt sich durch die vergrößerte Überflutungsfläche beim HQ_{100} erklären, die die Retention durch die Auenvegetation aktiviert. Für den gesamten Flussabschnitt bewirken die kombinierten Maßnahmen bei einem fünfjährigen Hochwasserereignis die größte Scheitelreduktion, bei einem hundertjährigen Hochwasser fällt der Unterschied zwischen den Szenarien mit Auenvegetation gering aus. Die Effekte gleichen sich in gewisser Weise über den gesamten Flussabschnitt aus, weswegen die Reduktion hier auch geringer ausfällt. Sowohl die unveränderten Abschnitte als auch der Zufluss der Schlierach beeinflussen das Gesamtabflussgeschehen zusätzlich.

5 Fazit und Ausblick

Der Einfluss von unterschiedlichen Maßnahmen der Gewässerrenaturierung im hydrodynamisch-numerischen Modell konnte für den betrachteten Abschnitt der Oberen Mangfall nachgewiesen und quantifiziert werden. Für zwei unterschiedliche Ereignisse konnten die Auswirkungen von abgestufter Auenv egetation, Querprofiländerungen, Laufverlängerung sowie unterschiedlichen Kombinationen der Maßnahmen ermittelt werden. Es zeigte sich, dass die Wirkung einer Maßnahme stark von den vorherrschenden morphologischen Bedingungen abhängt und bei unterschiedlich großen Ereignissen variiert. Der Einfluss der Auenv egetation ist sehr deutlich, während eine Laufverlängerung in den meisten Fällen kaum Wirkung zeigt. Insgesamt zeigte sich, dass die Kombination von Maßnahmen weitgehend wirkungsvoller ist wie die Umsetzung von Einzelmaßnahmen.

Wie eingehend schon erläutert wurde in bisherigen Untersuchungen die Ufervegetation häufig als pauschal angenommen. Durch die abgestufte Auenv egetation konnte ein erster Schritt in Richtung einer detaillierteren Analyse der Wirksamkeit des Retentionspotentials der Auenv egetation vorgenommen werden. Da der Einfluss der lokal vorliegenden Bedingungen auf die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen der Gewässerrenaturierung jedoch sehr hoch ist, sind weitere Untersuchungen zu einer realitätsnahen Aue in Abhängigkeit von beeinflussenden Parametern nötig. Die Querprofiländerung wurde in diesem Modell sehr konservativ durchgeführt und sollte bei weiteren Untersuchungen stärker variiert werden.

Das Modell betreffend fiel bei der Modellierung auf, dass insbesondere die Abbildung von Auenv egetation eingeschränkt möglich ist. Die Vegetation wird über die Landnutzung und damit einen Stricklerwert definiert, der weder in der Jahreszeit noch bei unterschiedlichen Wasserständen variabel ist. Die Auswirkungen dieser Abhängigkeiten sollten, wenn möglich, in Zukunft betrachtet werden.

Literatur

- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht, Stuttgart.
- Hellberg, C. (2006): Renaturierung von Fließgewässern unter Beachtung des Hochwasserschutzes, Universität Hannover, Hannover.
- Koenzen, U. (2005): Fluss- und Stromauen in Deutschland: Typologie und Leitbilder, Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- LfU BW (2002): Hydraulik naturnaher Fließgewässer, LfU BW, Karlsruhe.
- Marenbach, B. (2002): Der Beitrag naturnaher Retentionsmaßnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- Nujić, M. (1998): Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen, Univ. der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Rieger, W. (2012): Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, Univ. der Bundeswehr München, München.
- Schwaller, G., Tölle, U. (2005): Einfluss von Maßnahmen der Gewässerentwicklung auf den Hochwasserabfluss, LfW, München.

StMUV (2014): Hochwasserschutz: Aktionsprogramm 2020plus, StMUV, München.

Kartenmaterial: Geobasisdaten, Bayerische Vermessungsverwaltung (2015); National Geographic, Esri, DeLorme, HERE, UNEP-WCMC, USGS, NASA, ESA, METI, NRCAN, GEBCO, NOAA, increment P Corp. (2016)

Anschrift der Verfasser

Susanne Haas, M.Sc.

Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, TU München

Arcisstr. 21, D-80333 München

susanne.haas@tum.de

Dr.-Ing. Wolfgang Rieger

Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, TU München

Arcisstr. 21, D-80333 München

wolfgang.rieger@tum.de