

# Hydroökologie und nachhaltiges Auenmanagement

## 2D-Modellierung und räumliche Multikriterienanalyse zur Entscheidungshilfe bei Revitalisierungen

Michael Doering, Martina Blaurock, Silvia Oppliger, Steffen Schweizer

### Zusammenfassung

Die Sandey-Aue im Kanton Bern, Schweiz, ist eine Aue von nationaler Bedeutung und aufgrund ihres dynamischen Abflussregimes und ihrer vielfältigen Habitatstrukturen ökologisch von besonderem Interesse. Allerdings ist das naturnahe System durch Wasserkraftnutzung, landwirtschaftliche Nutzung und insbesondere durch Massnahmen zum Hochwasserschutz beeinträchtigt. Damit verbunden ist eine signifikante Reduktion der Auendynamik. Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes «HyflooS» wurden in der Sandey-Aue mithilfe eines hydraulischen 2D-Modells unterschiedliche Revitalisierungsmassnahmen simuliert, räumlich mittels GIS analysiert und mit einer Multikriterienanalyse ausgewertet. Damit lassen sich die Auswirkungen von verschiedenen Revitalisierungsmassnahmen auf das System, sowohl in ökologischer als auch soziökonomischer Hinsicht, unter Berücksichtigung der Hochwassergefährdung vorhersagen und bewerten. Dieser verknüpfte Ansatz bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Interessen in Bezug auf die zu erwartenden Auswirkungen von Revitalisierungsmassnahmen möglichst objektiv zu analysieren, verschiedene Zielsetzungen gegeneinander abzuwägen und geeignete Massnahmen zu priorisieren. Zudem ermöglicht dieses Vorgehen die Lücke zwischen der Bewertung des Ist-Zustandes eines Fliessgewässers und der Erfolgskontrolle nach der Umsetzung von Revitalisierungsmassnahmen zu schliessen.

(HyFlooS)» der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften – ZHAW und den Kraftwerken Oberhasli AG – KWO in Zusammenarbeit mit weiteren verschiedenen Interessengruppen aus Wissenschaft (Eawag, Epfl, University of Montana, USA, National Institut of Biology, Slovenien), Behörden (Bafu, Abteilung Naturförderung Kanton Bern) und Praxis (Auenberatungsstelle, eQcharta GmbH). Im Rahmen des Projekts werden integrative Methoden ausgearbeitet, um die Veränderungen von komplexen Auensystemen durch potentielle Revitalisierungen auf Landschaftsebene mithilfe der Kombination aus Indikatorenbildung, Modellierung und Monitoring zu bewerten, vorherzusagen, zu beobachten und gegebenenfalls anzupassen. Dabei werden am Fallbeispiel der Sandey-Aue im Berner Oberland Möglichkeiten untersucht, wie sich verschiedene ökologische und sozioökonomische Interessen im Sinne eines integrativen und nachhaltigen Gewässermanagements vereinbaren lassen (siehe Doering et al. 2013).

Das hier beschriebene Teilprojekt beschäftigt sich insbesondere mit der Modellierung als effizientes Werkzeug, um einerseits ökologische Auswirkungen von Revitalisierungen qualitativ und quantitativ vorherzusagen, und andererseits die Konsequenzen auf den Hochwasserschutz abzuschätzen. Dazu wurde ein verknüpfter Ansatz aus hydraulischer 2D-Modellierung, GIS-basierter räumlicher Bewertung und einer Multikriterienanalyse gewählt (Bild 1). Dieser integrative Ansatz soll einen bedeutenden Beitrag zur Entscheidungshilfe im Planungsprozess leisten, und unabhängig von der hier gewählten Fallstudie auch auf andere Revitalisierungsprojekte anwendbar sein.

### 1. Einleitung und Zielsetzung

Flussrevitalisierungen sind i.d.R. komplexe Vorhaben, bei denen der Hochwasserschutz, die Gewässerdynamik und die Ökologie eine zentrale Rolle spielen. Dabei bewegen sich Revitalisierungsmassnahmen und flussbauliche Massnahmen an Gewässern in einem Spannungsfeld zwischen den Bereichen Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft (BWG 2001; Woolsey et al., 2005). Ökologische Aufwertungen können somit nur dann erfolgreich umgesetzt werden, wenn weiterhin der Hochwasserschutz gewährleistet bleibt und Nutzungskonflikte berücksichtigt werden (Woolsey et al., 2005). Ebenfalls gilt es, im Zuge eines nachhaltigen Gewässermanagements die Massnahmen zu priorisieren, bei denen der Nutzen für die Natur im Verhältnis zum Aufwand gross ist (Göggel 2012). Das hohe Konfliktpotenzial zwischen unterschiedlichen Interessen der Beteiligten und sich widersprechende Zielsetzungen erschweren dabei oft die Planungen. Zudem bestehen häufig relativ grosse Unsicherheiten über die Konse-

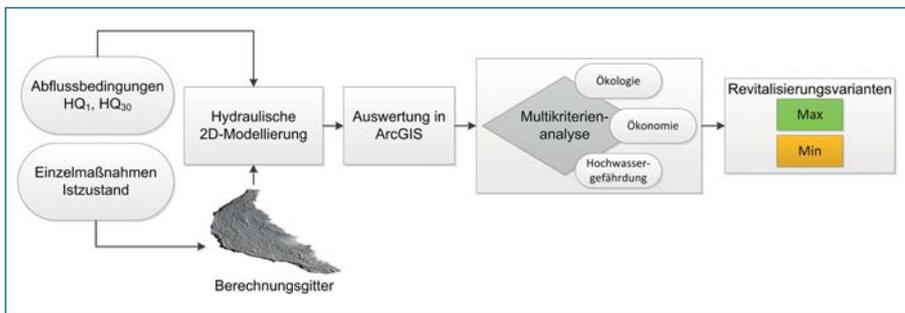
quenzen der Massnahmen und deren Nutzen aufgrund der Komplexität der Systeme (Reichert et al. 2007).

In diesem Zusammenhang sind hydraulische Simulationen ein sehr gut geeignetes Werkzeug, um flussbauliche Massnahmen und ihre Folgen zu analysieren. Sie eignen sich insbesondere zur Hochwasservorsorge (Rousset et al. 2012). Mit ihrer Hilfe können aber auch hydraulische und morphologische Parameter untersucht werden (Vonwiller et al., 2010; Rousset et al., 2012), die es ermöglichen, ökologische Potenziale unterschiedlicher Projektvarianten abzuschätzen. Dabei kann die Auswertung der Daten GIS-basiert erfolgen und mit einer Multikriterienanalyse gekoppelt werden. Damit lassen sich die Konsequenzen verschiedener Massnahmen objektiv bewerten und vergleichen.

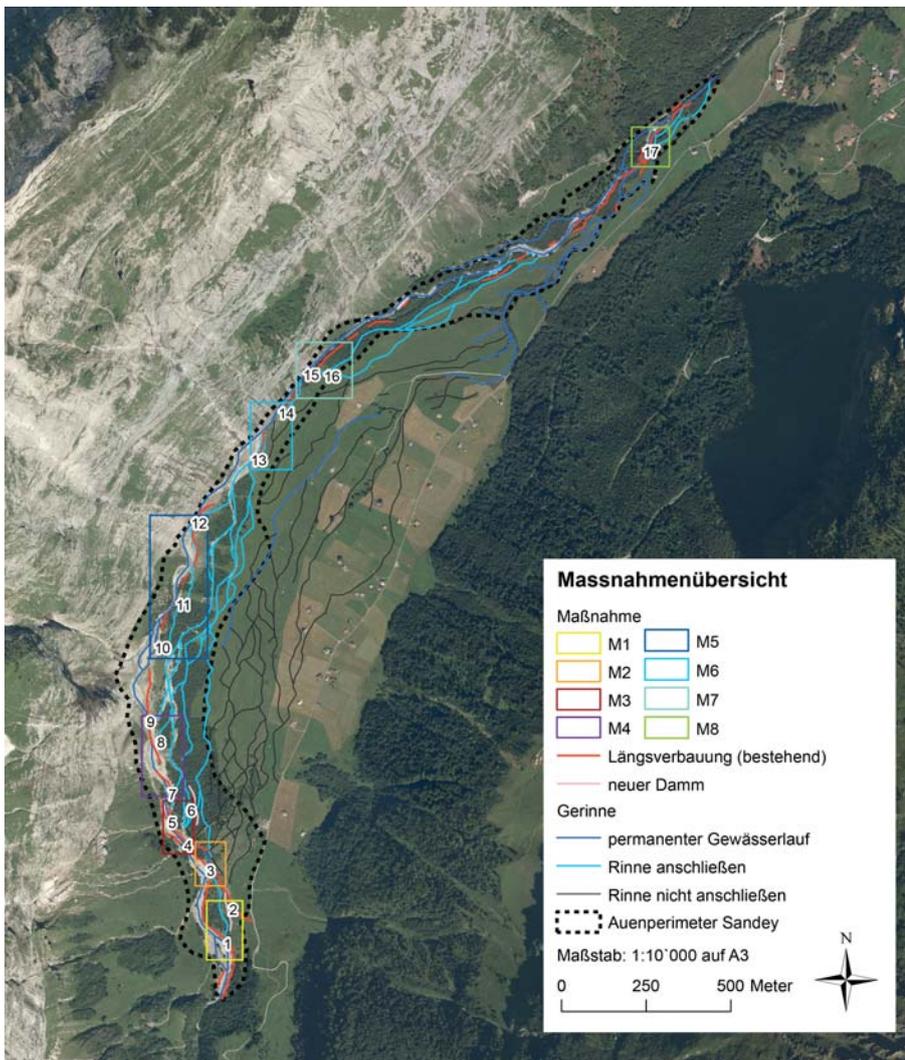
Die vorliegende Arbeit ist Teil des seit 2011 bestehenden angewandten Forschungsprojektes «Ökohydrologie und nachhaltiges Auenmanagement-Hydroecology and Floodplain Sustainability

### 2. Methoden

Um den hier gewählten Ansatz auf seine Praxistauglichkeit hin zu testen, wurde in



**Bild 1. Vorgehensweise für die Entwicklung von Revitalisierungsvarianten aus Einzelmaßnahmen mithilfe einer Verknüpfung aus Modellierung, Raum- und Multikriterienanalyse zur Integration von Ökologie, Ökonomie und Hochwasserschutz.**



**Bild 2. Übersicht über die vorgeschlagenen Revitalisierungen. Zur näheren Erläuterung der einzelnen Massnahmen siehe Tabelle 1.**

einem ersten Schritt ein konkretes Fallbeispiel ausgewählt (Kap. 2.1).

## 2.1 Untersuchungsgebiet

Aufgrund der guten Datengrundlage und der morphologischen und hydrologischen Beeinträchtigungen eignet sich die Auenlandschaft Sandey (Berner Oberland – Ost) sehr gut als Modellökosystem. Trotz ihres naturnahen Zustandes weist die Aue heute durch Massnahmen zum Hochwasserschutz, landwirtschaftliche Nutzung und

Wasserkraftnutzung Beeinträchtigungen auf, was eine Einschränkung der Auendynamik zur Folge hat. Darüber hinaus ist die Sandey-Aue eine Aue von nationaler Bedeutung, die aufgrund ihres dynamischen Abflussregimes und ihren vielfältigen Habitatstrukturen in ökologischer Hinsicht von besonderem Interesse ist (Bild 2). Eine detaillierte Beschreibung der Sandey-Aue findet sich in Blaurock, 2012, Doering et al., 2012 und 2013.

## 2.2 Definition potenzieller Revitalisierungsmassnahmen

Basierend auf einer Vorstudie, Feldbegehung, Analysen von historischen Luftbildern und der Topographie (Doering et al., 2012; Pauccaud und Roulier, 2012) wurden verschiedene Revitalisierungsmassnahmen vorgeschlagen. Ziel der Massnahmenvorschläge ist es, dem Gewässer mehr Raum zur eigendynamischen Entwicklung zu geben sowie durch die Reaktivierung von Seitengerinnen die laterale Vernetzung von Gerinne und Aue zu fördern. Bei der Planung der Massnahmen wird der Hochwasserschutz (insbesondere von landwirtschaftlich wertvollen Flächen und Privateigentum) mit berücksichtigt. Die konkreten Massnahmenvorschläge sind in Bild 2 und Tabelle 1 dargestellt bzw. erläutert.

## 2.3 Hydraulische 2D-Modellierung

Als topographische Datengrundlage für die hydraulischen Modellierungen (BASEMENT 2.2; Fäh et al., 2011) dient ein digitales Geländemodell (DGM) der Sandey-Aue (Auflösung 2 x 2 m; Höhengenaugigkeit 5 cm; LiDAR-Flug am 23.03.2011). Aus dem DGM wurde ein Berechnungsgitter mit der Software SMS 10.1 (Aquaveo, 2010) erstellt. Im Bereich um das Hauptgerinne und die Nebengerinne im Auenperimeter wurde eine Knotendistanz von einem Meter gewählt und damit Zellgrößen von 0.5 bis 1 m<sup>2</sup> erreicht. Ausserhalb des Perimeters nimmt die Zellgrösse zu, und insgesamt beträgt die mittlere Zellgrösse des Berechnungsgitters 3.4 m<sup>2</sup>. Den einzelnen Zellelementen wurden je nach Untergrund verschiedene Rauigkeitsbeiwerte zugeordnet, die aus Linienzahlanalysen (Fehr, 1987) des Sediments (für Kiesflächen) und aus Literaturangaben (für Auwald und Grasflächen) entnommen wurden. Die Zuordnung der einzelnen Flächen basierte auf dem Orthofoto der Sandey-Aue von 2007 (Doering et al., 2012). Eine Überprüfung der hydraulischen Modellierung erfolgte in drei Schritten: Visueller Vergleich der Resultate mit Fotoaufnahmen des Hochwassers im Oktober 2011, Vergleich mit den Ergebnissen eines 1D-Modells (HEC-RAS; US Army Corps of Engineers, 2012) sowie durch eine Analyse des Einflusses von Änderungen des Rauigkeitsbeiwert für Kiesflächen auf die berechnete Wassertiefe und Geschwindigkeit. Daraus ging hervor, dass das Modell die Überflutung mit ausreichender Genauigkeit darstellt (Oppliger, 2012).

In einem nächsten Schritt wurden die verschiedenen Revitalisierungsmass-

nahmen (z.B. Dammentfernung und Gerinneanschluss) im Berechnungsgitter abgebildet. Dafür wurden die Knotenpunkte und damit die modellierte Topographie manuell angepasst. Alle Simulationen wurden unter stationären Bedingungen durchgeführt, d.h. die Abflussmenge am Zufluss ändert sich nicht mit der Zeit und die Simulation wird durchgeführt, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird, bei dem sich die hydraulischen Parameter im Modell nicht weiter verändern. Für alle Simulationen wurde das Gewässerbett als statisch und undurchlässig angenommen, d.h. Geschiebetransport und Flussbettumlagerungen sowie Grundwasseraustausch wurden nicht berücksichtigt. Für jede Zelle des Berechnungsgitters wurden die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s), Wasserspiegellage (m) und Wassertiefe (m) berechnet. Diese Daten wurden anschliessend in ein Geografisches Informationssystem (ArcGis 10.0; ESRI, 2012) importiert. Basierend auf diesen GIS-Daten erfolgten weitere Analysen und Verschneidungsvorgänge mit relevanten ökologischen und sozioökonomischen geografischen Daten (siehe Kapitel 2.5 und 2.6).

#### 2.4 Simulierte Abflussbedingungen

Als Eingangsdaten für die Simulationen wurden unterschiedliche Abflussbedingungen (Niedrigwasser bis 100-jähriges Hochwasser) festgelegt (Tabelle 2). Die dafür nötige Dauerlinie wurde anhand von vierjährigen Pegeldata aufgestellt (vgl. Blaurock, 2012), die Hochwasserabflüsse wurden anhand mehrerer Methoden (Niederschlagsauswertungen, Hochwasserstatistik und hydrologische Regionalisierung) ermittelt (Schmoker, 2010, Oppliger, 2012).

#### 2.5 Ökologische Indikatoren

Zur ökologischen Bewertung wurden Indikatoren ausgewählt, die für die strukturelle Charakterisierung von Fließgewässern und Auen geeignet sind, einen Vergleich der Revitalisierungsmassnahmen zulassen, hydraulisch modelliert und im GIS direkt bestimmt werden können (Tabelle 3).

#### 2.6 Sozioökonomische Aspekte

Die sozioökonomische Bewertung basiert in erster Linie auf dem Hochwasserschutz. Dabei wurden die bei Hochwasserereignissen betroffenen landwirtschaftlichen Nutzflächen nach ihrem futterbaulichen Wert klassifiziert (hoch, mittel, tief; Dietl, 1981). Ausserdem wurden die Eigentumsverhältnisse (Privatparzellen) berücksich-

Massnahme	Beschreibung
M1	Öffnung des inneren Schutzdammes an <b>Punkt 1</b> und Anschluss des versperrten Gerinnes. Einbringen einer zusätzlichen Sicherung an <b>Punkt 2</b> , die an den äusseren Schutzdamm anschliesst
M2	Öffnung der Längsverbauung an <b>Punkt 3</b> und Anbinden des versperrten Gerinnes
M3	Zwei lokale Öffnungen an <b>Punkt 4</b> und an <b>Punkt 5</b> (M3a) um ein Nebengerinne, das den Auwald versorgt, anzuschliessen. Einbringen eines neuen Längsdammes an <b>Punkt 6</b> , der einen kleinen Nebenarm versperrt (Variante M3b)
M4	Öffnung der Längsverbauungen an den <b>Punkten 7, 8 und 9</b> als weitere Verbindungsstellen für das Nebengerinne, das den Auwald durchfließt
M5	Drei lokale Öffnungen an den <b>Punkten 10, 11 und 12</b>
M6	Anschluss von zwei kleinen Seitengerinnen an <b>Punkt 13</b> und <b>Punkt 14</b>
M7	Anschluss des Nebengerinnes, das den Auwald umfließt, durch eine lokale Öffnung am Punkt 15 (M7a). Durchstich an <b>Punkt 16</b> und damit Anschluss eines weiteren Gerinnes (M7b)
M8	Entfernung der Verbauung an <b>Punkt 17</b> und Anschluss des Gerinnes

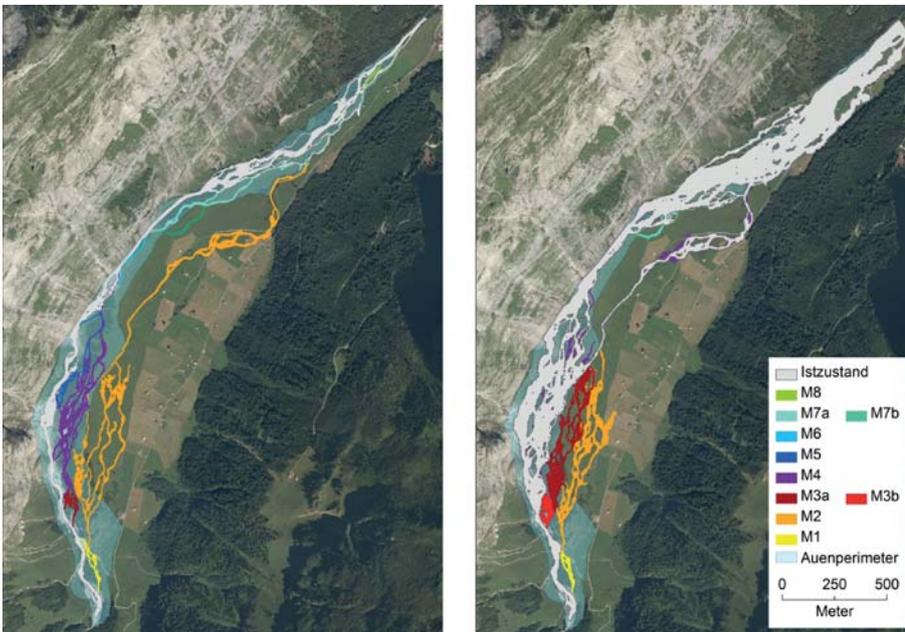
**Tabelle 1. Beschreibung der einzelnen vorgeschlagenen Revitalisierungsmassnahmen (vgl. Bild 2).**

	Q (m <sup>3</sup> /s)	Erreicht oder überschritten (Tage/Jahr)	Beschreibung	Bedeutung
HQ100	230		mittleres 100-jähriges Hochwasser	Gefahrenprävention
HQ30	100		mittleres 30-jähriges Hochwasser	Gefahrenprävention
HQ10	50		mittleres 10-jähriges Hochwasser	Gefahrenprävention
HQ1	16.3	1	mittleres jährliches Hochwasser	Gefahrenprävention, ökologisch bedeutsam für Auenlandschaften
Q5	6.9	5	Abflussmenge, die während 5 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird	Bedeutsam für Auenvegetation (insbesondere Hartholzau)
Q10	5.6	10	Abflussmenge, die während 10 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird	Bedeutsam für Auenvegetation (insbesondere Weichholzau)
Q30	4.1	30	Abflussmenge, die während 30 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird	Bedeutsam für Auenvegetation (insbesondere Kiesbänke)
MQ	1.9	152	mittlerer Abfluss	Mittelwassersituation
Q182	1.4	182	Median	Bedeutsam zur Beschreibung der aquatischen Habitatvielfalt
Q347	0.35	347	Abflussmenge, die während 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird	Niedrigwassersituation

**Tabelle 2. Ausgewählte Abflüsse für die Simulationen der 2D-Modellierung.**

Ökologischer Indikator	Beschreibung
Überflutungsfläche	beeinflusst die Verfügbarkeit von Uferhabitaten während verschiedener Abflussereignisse (Hochwasserrefugien) beschreibt die laterale Vernetzung beeinflusst die Funktion von organischen Kreisläufen
Überflutete Auwaldfläche	beschreibt die laterale Vernetzung in Bezug auf die Auwaldvegetation beeinflusst die Funktion von organischen Kreisläufen
Uferlänge	beschreibt die laterale Vernetzung beeinflusst die Funktion von organischen Kreisläufen
Braiding Index	beschreibt die Komplexität des Gewässers
Anzahl Verzweigungen	beschreibt die Komplexität des Gewässers
Wasserspiegelbreitenvariabilität	steht im Zusammenhang mit der Verteilung der Abflusstiefen und Geschwindigkeiten beschreibt die Variabilität der Flussmorphologie
Variabilität der Fließgeschwindigkeiten	beeinflusst den Geschiebehalt und die Verfügbarkeit von aquatischen Habitaten beschreibt die morphologische und hydraulische Variabilität
Variabilität der Abflusstiefen	beeinflusst den Geschiebehalt und die Verfügbarkeit von aquatischen Habitaten beschreibt die morphologische und hydraulische Variabilität
Hydrologisch Morphologischer Index der Diversität - H MID	beschreibt die morphologische und hydraulische Diversität

**Tabelle 3. Ausgewählte ökologische Indikatoren und ihre Bedeutung (zusammengestellt nach [Friend und Sinha, 1993; Van der Nat et al., 2002; Woolsey et al., 2005; Gostner und Schleiss, 2011]).**



**Bild 3. Darstellung der Überflutungsflächen der einzelnen Massnahmen (M1 bis M8) im Vergleich zum Ist-Zustand: Simulation bei HQ1 (links) und HQ30 (rechts).**

Kriterium	Abfluss	Indikator	Gewichtung
Ökologie	HQ1	Überflutungsfläche	0,25
		überflutete Auwaldfläche	0,2
		Uferlänge	0,1
		Braiding Index	0,1
		Anzahl der Verzweigungen	0,05
		SCb (Wasserspiegelbreitenvariabilität)	0,1
		SCh (Variabilität der Abflusstiefen)	0,1
		SCv (Variabilität der Fließgeschwindigkeiten)	$\Sigma = 1$
		Ökonomie	HQ1
Fb-Wert "tief"	0,1		
Fb-Wert "mittel"	0,25		
HQ30	betroffenes Weideland gesamt		0,15
	Fb-Wert "tief"		0,15
	Fb-Wert "mittel"		0,25
		$\Sigma = 1$	
Hochwassergefährdung	HQ30	betroffene Parzellenfläche	0,5
		betroffene Parzellenfläche mit mittlerer bis starker Intensität	0,5
		$\Sigma = 1$	

**Tabelle 4. Übersicht der verwendeten Indikatoren und deren Gewichtung in der Multikriterienanalyse.**

tigt. Auf Basis der Intensität eines Hochwasserereignisses (Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit je Gitternetzfläche; BUWAL, 1997; ARE, 2005) sind Gefahrenkarten erstellt worden, die so eine Einschätzung der Hochwassergefährdung erlauben.

### 3. Revitalisierungsvarianten

Im Folgenden wird der Prozess zur Identifikation geeigneter Revitalisierungsvarianten kurz beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in *Blaurock*, (2012).

#### 3.1 Entwicklung der Varianten

Um eine geeignete Auswahl an Massnahmenkombinationen (im folgenden Revitalisierungsvarianten genannt) zu treffen, wurden in einem ersten Schritt alle vorge-

schlagenen Massnahmen (M1–M8, *Tabelle 1* und *Bild 2*) einzeln simuliert und beurteilt (*Bild 3*; *Tabelle 1*).

Für eine erste ökologische Abschätzung ist der Fokus auf den Anschluss von Seitengerinnen sowie auf die Überflutungsflächen im Auenperimeter gelegt worden. Als Bezugsgrösse dafür wurde das HQ1 gewählt, d. h. dass mindestens einmal im Jahr dynamische Prozesse ausserhalb des Hauptgerinnes stattfinden. Um die sozioökonomischen Auswirkungen grob abzuschätzen, wurde die Überflutung (Kap. 2.6) eines HQ30 betrachtet.

Um die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der Massnahmen objektiv miteinander vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse in einer Multikriterienanalyse einander gegenübergestellt. Die ökologischen Indikato-

ren wurden hierfür dem Bereich Ökologie, die betroffenen landwirtschaftlichen Nutzflächen und Privatparzellen dem Bereich Ökonomie/Hochwassergefährdung zugeteilt.

#### 3.3 Multikriterienanalyse

Für die Multikriterienanalyse wurde der Ansatz des Weighted Product Model (WPM) nach *Bridgman*, (1922) und *Miller und Starr* (1969) verwendet. Diese Methode erlaubt es, mehrere Indikatoren mit unterschiedlichen Einheiten zu normalisierten Indexwerten zusammenzufassen und diese als Vergleichsbasis heranzuziehen. Als Referenzwert wurde der Ist-Zustand verwendet und die Indikatorwerte der Massnahmen jeweils am Indikatorwert des Ist-Zustandes normalisiert. Für die Bereiche Ökologie, Ökonomie und Hochwassergefährdung ist jeweils eine Evaluationsmatrix erstellt worden. Bei einer Erhöhung der Indikatorwerte gegenüber dem Ist-Zustand erhöht sich der Indexwert. Anhand der unterschiedlichen Indizes konnten die Massnahmen für jeden Bereich in eine Rangfolge gebracht und objektiv miteinander verglichen werden.

Die Gewichtung der Indikatoren richtet sich nach der Aussagekraft der berücksichtigten Kriterien. So sind die ökologischen Indikatoren Anbindung von Seitengerinnen und überflutete Auwaldfläche bei einem einjährigen Hochwasser (HQ1) entscheidende Faktoren für die Anbindung der Aue und erhalten eine hohe Gewichtung. Da die Indikatoren Uferlänge, Anzahl der Verzweigungen sowie Breiten-, Abflusstiefen- und Fließgeschwindigkeitsvariabilität bei Mittelwasserstand aussagekräftig sind (*Woolsey et al.*, 2005; *Vonwiller et al.*, 2010), gingen sie mit einer geringeren Gewichtung in die Analyse ein (*Tabelle 4*).

Im Bereich Ökonomie wurden die Flächen mit einem mittleren futterbaulichen Wert (Fb-Wert «mittel») höher gewichtet als Weideflächen mit einem geringen futterbaulichen Wert (Fb-Wert «tief»). Für den Bereich Hochwassergefährdung wurde neben der Überflutungsfläche in Bezug auf die betroffenen Privatparzellen auch die Fläche mit mittlerer (Tiefe 0.5–2 m oder Tiefe  $\times$  Geschwindigkeit 0.5–2 m<sup>2</sup>/s) bis grosser Intensität (Tiefe >2 m oder Tiefe  $\times$  Geschwindigkeit >2 m<sup>2</sup>/s) berücksichtigt, um dem erhöhten Gefährdungspotenzial solcher Flächen Rechnung zu tragen (*Tabelle 4*).

#### 3.4 Auswahl der Varianten

Anhand der Ergebnisse der Multikriterien-

analyse wurden zwei ökologische Varianten («Min» = Fokus auf möglichst geringe Überflutungsfläche und «Max» = Fokus auf ökologischen Nutzen unter Berücksichtigung des Hochwasserschutzes) entwickelt. Nach der Auswahl der Revitalisierungsvarianten «Max» und «Min» wurden zusätzliche Simulationen bei verschiedenen Abflussbedingungen berechnet.

#### 4. Ergebnisse der Revitalisierungsvarianten

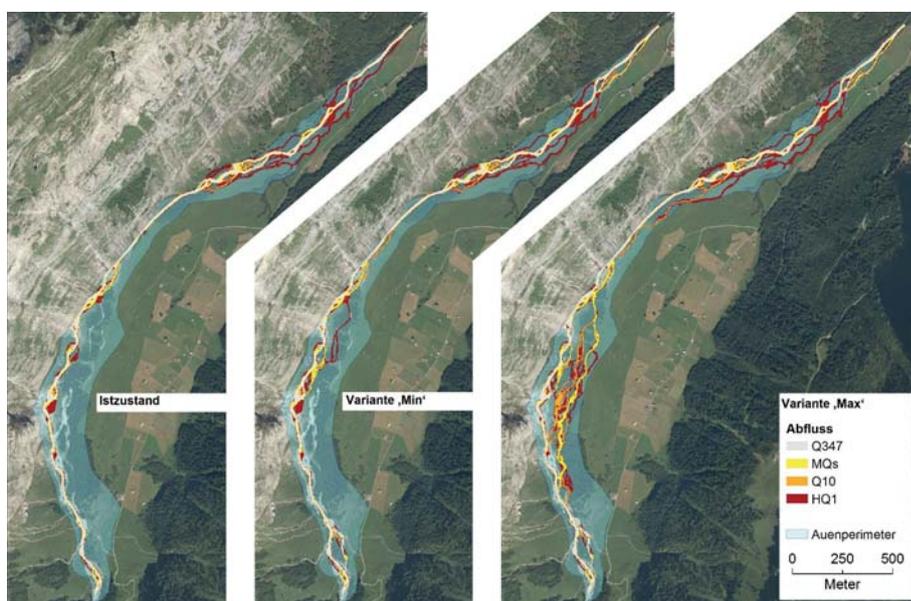
Aufgrund der hohen Anzahl an durchgeführten Simulationen werden hier nur die wichtigsten Simulationsergebnisse (Überflutungsflächen und Gefährdung) beispielhaft für bestimmte Abflusssituationen erläutert. Die Überflutungsflächen sind für HQ1, Q10, MQs sowie Q347 für den Ist-Zustand und die Revitalisierungsvarianten (Bild 4) dargestellt. Die simulierten Gefährdungen der untersuchten Varianten sind für HQ1 in Bild 5 veranschaulicht.

Beim Ist-Zustand werden im oberen Bereich der Aue Abflüsse bis einschliesslich einem einjährigen Hochwasser (HQ1) im Hauptgewässerbett abgeführt, da die seitlichen Beschränkungen ein Ausuferen des Gewässers verhindern. Nur im unteren Bereich der Aue bilden sich bei HQ1 Seitengerinne aus. Die Variante «Max» zeigt gegenüber dem Ist-Zustand eine deutliche Erhöhung an Überflutungsflächen. Hier werden im oberen Bereich der Aue mehrere Seitengerinne, die den Auwald durchziehen, angeschlossen. Dies geschieht bereits bei mittlerem Sommerwasserabfluss (MQs). Flächen ausserhalb des Auenperimeters werden bei HQ1 nicht von der Überflutung betroffen. Durch die Variante «Min» werden nur einzelne Seitengerinne, die nahe am Hauptgewässerbett liegen, angeschlossen. Ein Anschluss der Gerinne findet überwiegend erst bei HQ1 statt. Die Unterschiede in den Überflutungsflächen der Variante «Min» gegenüber dem Ist-Zustand sind daher bei allen Wasserständen gering (Bild 4).

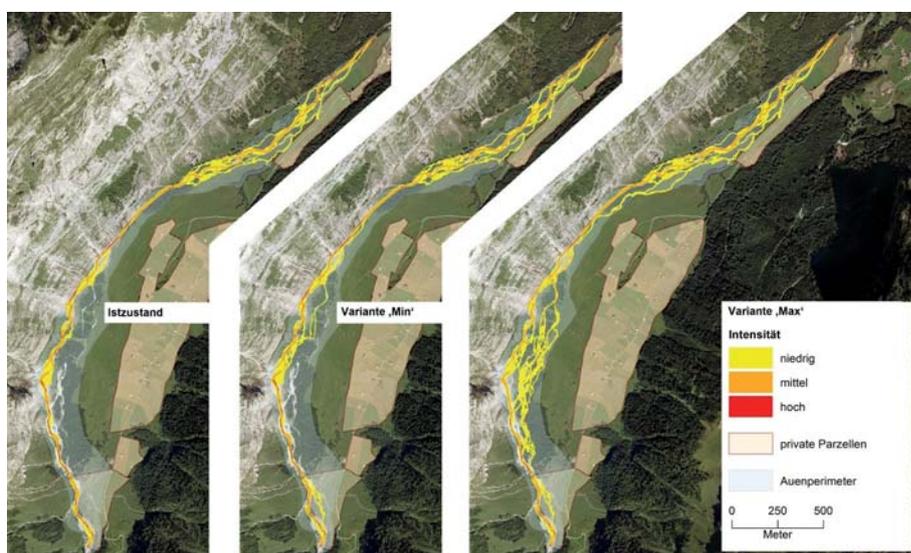
Insgesamt erfolgt die Überflutung bei einem HQ1 bei beiden Varianten in niedriger Intensität ausserhalb des Hauptgerinnes, wodurch die Gefährdung als gering einzustufen ist; private Parzellen werden nicht betroffen (Bild 5).

##### 4.1 Ökologische Indikatoren

Die Variante «Max» zeigt eine deutliche Erhöhung der Indikatoren Überflutungsfläche, überflutete Auwaldfläche, Uferlänge, Braiding-Index und Anzahl der Verzweigungen gegenüber dem Ist-Zustand. Bei den Indikatoren zur Erfassung der hydraulischen-morphologischen Variabilität (Breiten-, Tiefen- und Geschwindigkeitsvariabilität sowie HMLD) sind die Unterschiede weniger deutlich. Die Variante «Min» zeigt im Allgemeinen nur geringe Unterschiede in allen erhobenen Indikatoren im Vergleich zum Ist-Zustand (Bild 6; ausgewählte Beispiele, für Details siehe Blaurock, 2012).



**Bild 4. Simulierte Überflutungsflächen für unterschiedliche Abflüsse im Vergleich: «Ist-Zustand» (links), Variante «Min» (mitte), Variante «Max» (rechts). Die einzelnen Überflutungsflächen der Abflüsse wurden für diese Darstellung übereinandergelagert.**



**Bild 5. Simulierte Überflutungsintensitäten bei HQ1 für den Ist-Zustand, für die Varianten «Min» und «Max».**

Insbesondere bei der Variante «Max» sind die Unterschiede in den Überflutungsflächen der Variante «Min» gegenüber dem Ist-Zustand sind daher bei allen Wasserständen gering (Bild 4).

##### 4.2 Sozioökonomische Indikatoren

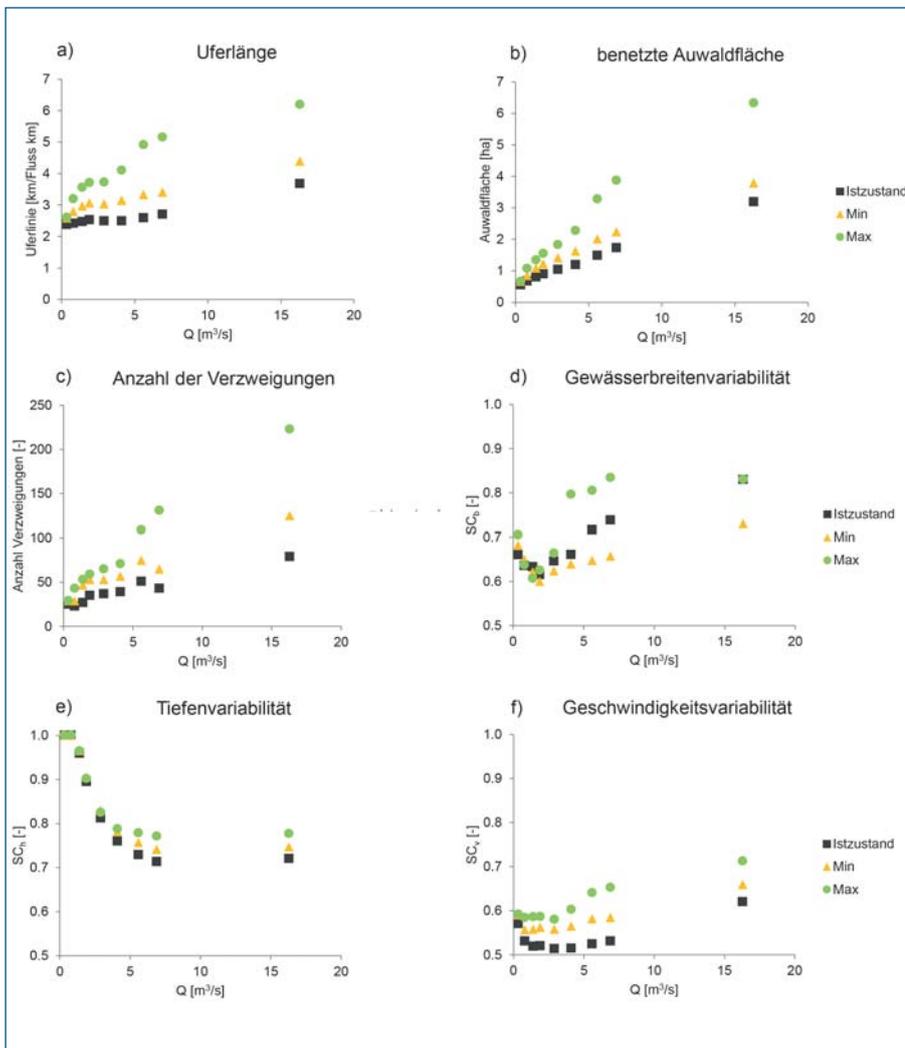
Hinsichtlich der betroffenen Weideflächen ergeben sich für die Variante «Max» bei HQ1 und HQ10 signifikante Unterschiede, sowohl zum Ist-Zustand als auch zur Variante «Min» (Bild 7 a, b). So erhöht sich bei Variante «Max» die Überflutungsfläche von Gebieten mit einem mittleren futterbaulichen Wert um 0.4 (HQ1) resp. 1.4 ha (HQ10). Mit zunehmender Hochwasserintensität reduzieren sich die Unterschiede im Überflutungsraum zwischen den einzelnen Varianten (Bild 7 c, d).

Der Flächenanteil, der in der Gefahrenzone mit erheblicher Gefährdung/starke Intensität klassifiziert wird, liegt für den Ist-Zustand bei 0.35 ha (bei HQ10) resp. 0.85 ha (bei HQ100) und nimmt auch bei den Varianten «Min» und «Max» nur unwesentlich zu (Bild 8 b und c).

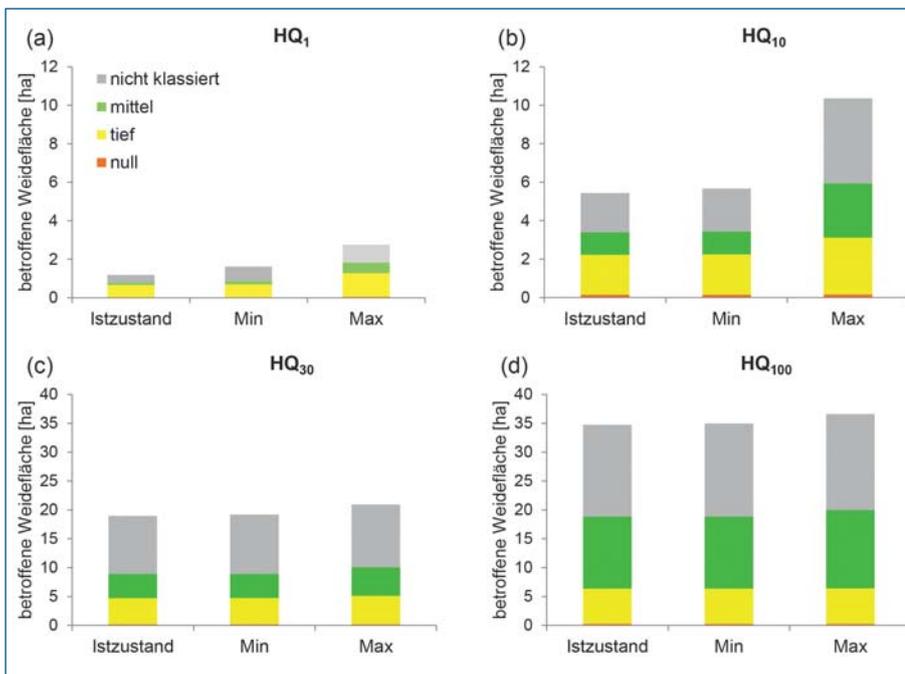
Die Auswertungen zeigen, dass bei der Variante «Min» die Hochwassergefährdung gegenüber dem Istzustand nur geringfügig zunimmt. Allerdings können damit ökologische Verbesserungen nur in einem gewissen Umfang erwartet werden. Demgegenüber kann mit der Variante «Max» ein

##### 4.3 Synthese

Die Auswertungen zeigen, dass bei der Variante «Min» die Hochwassergefährdung gegenüber dem Istzustand nur geringfügig zunimmt. Allerdings können damit ökologische Verbesserungen nur in einem gewissen Umfang erwartet werden. Demgegenüber kann mit der Variante «Max» ein



**Bild 6. Vergleich der erhobenen ökologischen Indikatoren für den Ist-Zustand, Variante «Max» und Variante «Min»: (a) Uferlänge, (b) benetzte Auwaldfläche, (c) Anzahl der Verzweigungen, (d) Gewässerbreitenvariabilität, (e) Tiefenvariabilität, (f) Geschwindigkeitsvariabilität. SC = Standardisierter Variationskoeffizient.**



**Bild 7. Betroffene Weideflächen unterschieden nach ihrem futterbaulichen Wert (nicht klassiert, mittel, tief, null) bei Hochwasserereignissen verschiedener Jährlichkeiten: (a) HQ₁, (b) HQ₁₀, (c) HQ₃₀, (d) HQ₁₀₀.**

deutlich höherer Revitalisierungseffekt erreicht werden. Dies allerdings auf Kosten der Hochwassergefährdung.

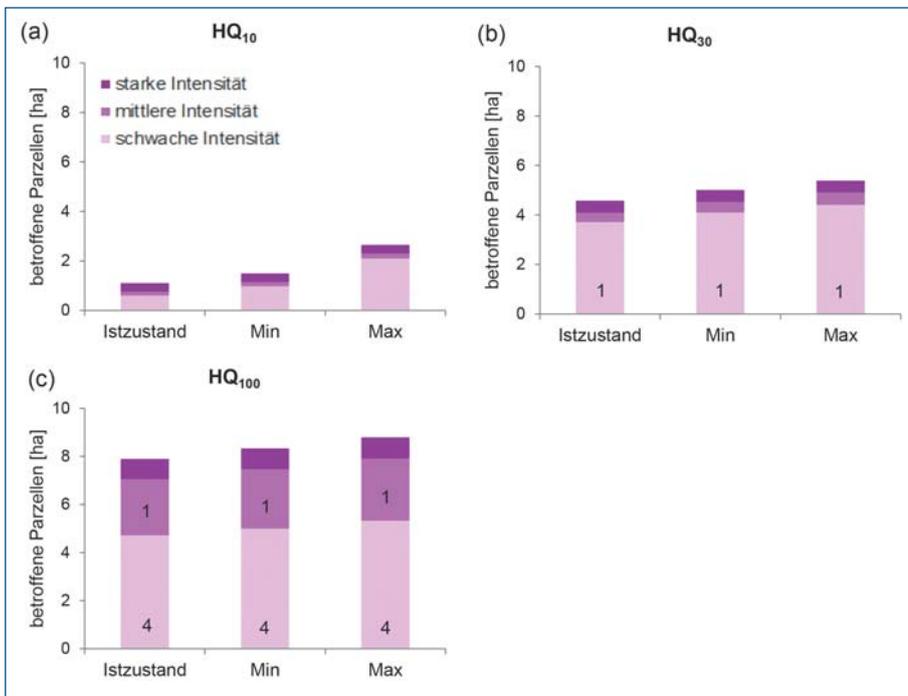
Der hier gewählte Ansatz erlaubt, sowohl die ökologischen als auch die sozioökonomischen Belange zu quantifizieren. Grundsätzlich können so Landverhandlungen und Revitalisierungsplanungen effizient und transparent angegangen und letztlich die Akzeptanz bei allen Beteiligten erhöht werden.

Im Fall der Sandey wäre auch die Errichtung neuer Schutzdämme ausserhalb des aktiven Teils der Aue denkbar. Damit könnte dem Urbachwasser innerhalb des Auenperimeters mehr Raum für eine eigendynamische Entwicklung zur Verfügung gestellt werden und gleichzeitig die Hochwassergefährdung ausserhalb der Aue auf dem heutigen Niveau erhalten bleiben (Bild 9).

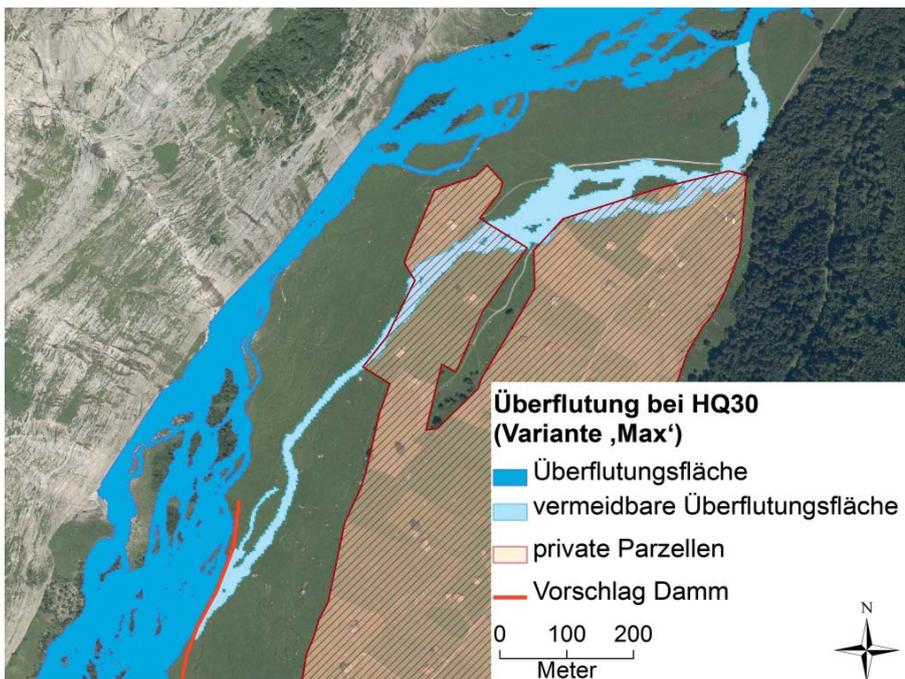
#### 4. Diskussion und Fazit

Das hier verwendete 2D-Modell und dessen Auflösung erlauben eine sehr genaue Darstellung der Überflutungssituation in der Aue. Allerdings lassen sich mit diesem Ansatz bisher keine Erosions- und Depositionsvorgänge simulieren. Da allerdings Sedimentmodellierungen mit grossen Unsicherheiten verbunden sind und in einem komplexen Gewässersystem wie der Sandey-Aue ohne Felddaten zu Geschiebeprozessen nicht mit ausreichender Genauigkeit nachstellbar sind, ist eine Annahme eines statischen Gewässerbettes zu rechtfertigen. Auch die Interaktion des Gewässers mit dem Grundwasser konnte durch die Annahme eines statischen Gewässerbettes nicht berücksichtigt werden. Der Austausch von Grundwasser kann jedoch für das Überschwemmungsmanagement in der Sandey-Aue von gewisser Bedeutung sein, da einige Nebengerinne in der Aue von Grundwasser versorgt werden und Abflüsse unterhalb der Hochwasserschutzbauten fließen können. Allerdings ist davon auszugehen, dass unterirdische Abflüsse geringere Schäden auf den Weideflächen verursachen als Überflutungen, die Sedimente mit sich führen (Pauccaud und Roulier, 2012). Da die ökologischen Indikatoren vor allem für sommerliche Abflüsse betrachtet wurden und in dieser Jahreszeit der Grundwasseraustausch von untergeordneter Bedeutung ist, ist auch diese Vereinfachung gerechtfertigt.

Für die Erstellung von Dauerlinien wird in der Regel ein grosses Kollektiv an Jahren (mindestens 10 Jahre) betrachtet, um abgesicherte Aussagen treffen zu können (Strobel und Zunic, 2006). Die Er-



**Bild 8. Betroffene private Parzellenflächen unterschieden nach der Intensität (schwach, mittel, stark), mit der sie bei unterschiedlichen Hochwasserereignissen erfasst werden: (a) HQ<sub>10</sub>, (b) HQ<sub>30</sub>, (c) HQ<sub>100</sub>. Die Anzahl der betroffenen Gebäude pro Intensität ist als Zahl in die jeweiligen Säulen eingetragen.**



**Bild 9. Vorschlag für einen neuen Damm (rote Linie), um Flächen ausserhalb des Auenperimeters vor Hochwasser zu schützen.**

stellung der Dauerlinie aus einer Zeitreihe von nur vier Jahren ist daher mit einigen Unsicherheiten verbunden. Da die Dauerkurve in dieser Arbeit jedoch vor allem dazu diente, das zeitliche Spektrum der gemessenen Jahresabflüsse erfassen zu können, ist dieser Ansatz im Rahmen einer ersten Abschätzung zulässig.

Für die Entwicklung der Revitalisierungsvarianten (Kap. 2.2) wurden die Einzelmassnahmen in Bezug auf ihre öko-

logischen und sozioökonomischen Auswirkungen in einer Multikriterienanalyse mit dem Ansatz des Weighted-Product-Model (WPM) (Bridgman 1922; Miller und Starr, 1969) gegenübergestellt. Der Vorteil des WPM-Ansatzes besteht darin, dass die verwendeten Indikatoren normalisiert werden können und die jeweilige Einheit eines Indikators entfällt. Da bei Multikriterienanalysen die Gewichtung der verwendeten Indikatoren eine bedeutende Rolle

spielt, sollte diese auf Expertenwissen und Literaturangaben gestützt werden (Rohde et al., 2006). In dieser Arbeit orientierte sich daher die Gewichtung der ökologischen Indikatoren nach deren Bedeutung beim simulierten Abfluss (entnommen aus Woolsey et al., 2005). Für die Bereiche Ökonomie und Hochwassergefährdung ergaben Gespräche mit Spezialisten, dass sich der futterbauliche Wert und die potenzielle Gefährdung (Intensität) als Kriterien für die Gewichtung am besten eignen.

Allerdings zeigen insbesondere die Indikatoren zur hydraulisch-morphologischen Variabilität eine eher geringe Sensitivität, da es sich bei der Fallstudie um eine bereits heterogene und naturnahe Aue handelt. Diese Indikatoren müssten somit in ihrer Anwendung in komplexen Auenlandschaften überarbeitet und angepasst werden. Ausserdem beruhen die hier angewendeten Indikatoren auf strukturellen, physikalischen Gegebenheiten und können daher nur indirekt auf Ökosystemprozesse übertragen werden. Sie wurden aber in zahlreichen Studien erfolgreich mit biologischen Parametern in Verbindung gebracht (z. B. in Opperman et al., 2010, Alp et al., 2011, Larned et al., 2007). Diesbezüglich ist aber eine weitere Verknüpfung mit Felddaten wichtig, da eine Wiederherstellung der strukturellen Heterogenität nicht zwingend zu einer Erhöhung der Biodiversität führen muss (Palmer et al., 2010) und um damit die Aussagekraft der Indikatoren in Hinsicht auf Auenysteme wie hier der Sandey verbessern zu können.

Grundsätzlich dürfte sich der hier vorgestellte Ansatz auch für andere Flussrevitalisierungen eignen, insbesondere für Vorstudien und als effizientes Hilfsmittel bei konkreten Planungen sowie in der Entscheidungsfindung.

#### Danksagung

Ein grosser Dank geht an zahlreiche Personen, die aktiv am Projekt mitarbeiten, es fachlich und finanziell unterstützen und/oder das Manuskript kritisch durchgelesen haben. Hier sind zu nennen: Jan Baumgartner (KWO), Simone Blaser (Eawag), Yvonne Döring, Tom Gonser (Eawag), Christian Hossli (eQcharta), Manfred Kummer (BAFU), Franziska von Lerber (ANF Bern), Matthias Meyer (KWO), Nataša Mori (NIB Slowenien), Christopher T. Robinson (Eawag), Christian Roulier (Service conseil Zones alluviales – Auenberatungsstelle), Anton Schleiss (Epfl-LCH), Diego Tonolla (BAFU)

#### Literatur

Alp, M., T. Karpati, S. Werth, W. Gostner, C. Scheidegger, A. Peter (2011): Erhaltung und

- Förderung der Biodiversität von Fließgewässern. «Wasser Energie Luft», 103. Jahrgang (Heft 3): 216–223.
- Aquaveo* (2010): The Surface Water Modeling System (SMS). Version 10.
- ARE* (Bundesamt für Raumentwicklung) (2005): Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. Bern. <http://www.are.admin.ch/themen/raumplanung/00244/00432/00434/index.html?lang=de> [05.11.2012].
- Blaurock, M.* (2012): Hydraulische Modellierungen von Revitalisierungsmaßnahmen an der Sandey-Aue: Entscheidungshilfe für eine nachhaltige Auenentwicklung. Diplomarbeit Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.
- Bridgman, P. W.* (1922): Dimensional Analysis. Yale University Press, New Haven, CT: 112 S.
- BUWAL* (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (1997): Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei Raumwirksamen Tätigkeiten (Empfehlungen, 1997). <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00786/index.html?lang=de> [05.09.2012]
- BWG* (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern, Wegleitungen des BWG. Biel. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00804/index.html?lang=de> [04.11.2012].
- Dietl, W., Berger, P., M. Offner* (1981): Die Kartierung des Pflanzenstandortes und der futterbaulichen Nutzungseignung von Naturwiesen. FAP, AGFF, Reckenholz, Zürich. 43 S.
- Doering, M., Schweizer, S., Blaurock, M., Oppliger, S., Fuchs, M., C. T. Robinson* (2013): Hydroökologie und nachhaltiges Auenmanagement – Die Sandey-Aue als Modellökosystem für eine Konzeptstudie. «Wasser Energie Luft». 105. Jahrgang (Heft 1).
- Doering, M., Blaurock, M., C. T. Robinson* (2012): Landscape transformation of an Alpine floodplain influenced by humans: historical analyses from aerial images. *Hydrological Processes*, 26: 3319–3326.
- Environmental Systems Research Institute* (2010): ArcGis. Version 10.0.
- Fehr, R.* (1979): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 87/105.
- Fäh, R., R. Müller, P. Rousselot, C. Volz, L. Vonwiller, D. Vetsch* (2011): System Manuals of BASEMENT (Version 2.2). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.
- Friend, P. F., R. Sinha* (1993): Braiding and meandering parameters. In *Braided Rivers*, J. L. Best and C. S. Bristow (ed.), Geological Society, London: 105–111.
- Göggel, W.* (2012): Revitalisierung Fließgewässer. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. (BAFU) Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1208: 42 S.
- Gostner, W., A. Schleiss* (2011): Der hydromorphologische Index der Diversität. «Wasser Energie Luft», 103. Jahrgang (Heft 4): 327–336.
- Larned, S., T. Datry, C.T., Robinson* (2007): Invertebrate and microbial responses to inundation in an ephemeral river reach in New Zealand: effects of preceding dry periods. *Aquatic Sciences*, 69(4): 554–567.
- Miller, D. W., M. K. Starr* (1969): Executive Decisions and Operations Research. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ. 607 S.
- Opperman, J. J., R. Luster, B. A. Mckenney, M. Roberts, A. W. Meadows* (2010): Ecologically functional floodplains: Connectivity, flow regime, and scale. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 46(2): 211–226.
- Oppliger, S.* (2012): Restoration analysis of the Sandey floodplain using 2D hydraulic modeling. Masterarbeit, EPFL.
- Palmer, M. A., H. L. Menninger, E. Bernhardt* (2010): River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? *Freshwater Biology*, 55 (Suppl. 1): 205–222.
- Pauccaud, G., C. Roulier* (2012): Bewertung Sandey, Dynamik, Vegetation und Weiden. Auenberatungsstelle (unveröffentlicht). 12 S.
- Reichert, P., M. Borusk, M. Hostmann, S. Schweizer, C. Spörri, K. Tockner, B. Truffer* (2007): Concepts of decision support for river rehabilitation. *Environmental Modelling & Software*, 22: 188–201.
- Rohde, S., M. Hostmann, A. Peter, K. C. Ewald* (2006): Room for rivers: an integrative search strategy for floodplain restoration. *Landscape and Urban Planning*, 78: 50–70.
- Rousselot, P., D. Vetsch, R. Fäh* (2012): Numerische Fließgewässermodellierung. In: *Merckblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie*. BAFU (Bundesamt für Umwelt), Bern. Merckblatt 7.
- Schmoker, M.* (2010): Kleinwasserkraftwerk Urbach. Technischer Bericht. Masterarbeit, EPFL.
- Schweizer, S., H. Zeh Weissman* (2011): Restwassersanierung der genutzten Gewässer im Oberhasli. «Wasser Energie Luft», 103. Jahrgang (Heft 1): 25–30.
- Strobel, T., F. Zunic* (2006): Wasserbau: aktuelle Grundlagen – Neue Entwicklungen. Springer, Verlag, Berlin. 604 S.
- US Army Corps of Engineers* (2012): HEC-RAS. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Van Der Nat, D., A. P. Schmidt, K. Tockner, P. J. Edwards, J. V. Ward* (2002): Inundation dynamics in braided floodplains: Tagliamento River, Northeast Italy. *Ecosystems*, 5(7): 636–647.
- Vonwiller, L., V. Weitbracht, M. Von Pfuhlstein, R. Boes* (2010): Flussbauliches Monitoring am Flaz- Hydraulische 2D-Modellierung und ökologische Bewertung. «Wasser Energie Luft», 102. Jahrgang(Heft 2): 108–112.
- Woolsey, S., C. Weber, T. Gonser, E. Hoehn, M. Hostmann, B. Junker, C. Roulier* (2005): Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fließgewässerrevitalisierungen. Publikation des Rhone-Thur-Projektes. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ. 112 S.

#### Anschrift der Verfasser

Dr. *Michael Doering*, Leiter Forschungsgruppe Ökohydrologie, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften – ZHAW  
Grüntal, Postfach, CH-8820 Wädenswil  
[michael.doering@zhaw.ch](mailto:michael.doering@zhaw.ch)  
und eQcharta GmbH, Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf, [doering@eqcharta.ch](mailto:doering@eqcharta.ch)

*Martina Blaurock*, Bayerisches Landesamt für Umwelt. Referat 63 «Flussbauliche Grundlagen, Hydromorphologie, Hydraulik» Bürgermeister-Ulrich-Strasse 160, D-86179 Augsburg  
[martina.blaurock@lfu.bayern.de](mailto:martina.blaurock@lfu.bayern.de)

*Silvia Oppliger*, Hunziker Betatech AG  
Jubiläumsstrasse 93, CH-3005 Bern  
[silvia.oppliger@hunziker-betatech.ch](mailto:silvia.oppliger@hunziker-betatech.ch)

Dr. *Steffen Schweizer*, Leiter Fachstelle Ökologie, Kraftwerke Oberhasli AG  
Postfach 63, CH-3862 Innertkirchen  
[steffen.schweizer@kwo.ch](mailto:steffen.schweizer@kwo.ch)