

# Der Mensch und die Flusslandschaften – Rolle natürlicher Flusslandschaften

Status und Perspektiven im Donauraum

Thomas Hein, Verena Kucera-Hirzinger, Stefan Preiner, Friedrich Schiemer,  
Gabriele Weigelhofer

## Zusammenfassung

Fließgewässer spielen eine große Rolle für die Stoffkreisläufe, da sie die Einträge aus dem Einzugsgebiet transportieren, transformieren und letztlich die ökologischen Verhältnisse bis zu den Küsten beeinflussen. So konnte auch für die Donau gezeigt werden, dass in den 60er und 70er Jahren die erhöhten Nährstoffeinträge und rezent die veränderte Zusammensetzung der Einträge die Algenproduktion in den Küstenregionen des Schwarzen Meeres nachhaltig beeinflusst hat. Daraus ergibt sich, dass der Zusammenhang zwischen Aktivitäten im Einzugsgebiet, Defiziten in der Funktionalität in den Flusslandschaften selbst und den Auswirkungen in Küstenregionen systemisch betrachtet werden muss. Um langfristige und großräumige Wirkzusammenhänge und die hierarchisch ineinander wirkenden Prozesse zu verstehen und im Management umzusetzen, sind nicht nur Untersuchungen auf Einzugsgebietebene notwendig, sondern auch auf Skalenebenen darunter. So hängt der Nährstofftransport nicht nur von der Verteilung der Einträge aus punktuellen und diffusen Quellen und deren Behandlung vor Eintritt in das Fließgewässernetzwerk ab, sondern auch von der Abbaukapazität und Retentionsleistung in der Flusslandschaft.

Innerhalb der Flusslandschaften sind das räumliche Angebot und die zeitliche Verfügbarkeit von Retentionsräumen und deren Vernetzung in der Landschaft für die Ausprägung der Stoffkreisläufe entscheidend. Vor allem in Übergangszonen zwischen einzelnen morphologischen Untereinheiten sind die biogeochemisch aktivsten Abschnitte lokalisiert. Diese Übergangszonen oder Ökotonbereiche sind daher nicht nur für die Artenvielfalt per se eine entscheidende Komponente sondern auch für den Stoffumsatz auf der Landschaftsebene essentiell. Auen mit ihren Wasserkörpern und Uferzonen sind z.B. diese Areale; wo Nährstoffe physikalisch, chemisch und biologisch zurückgehalten bzw. durch biologische Aktivität transformiert und teilweise dadurch auch langfristig der Flusslandschaft entzogen werden (z.B. Prozess der Denitri-

fikation). Eingetragene Stoffe werden in Biomasse aufgebaut und erhöhen die Produktivität der Augewässer und steigern dadurch den Nährstoffrückhalt und daher das Selbstreinigungspotential der Flusslandschaft. Diese Nährstofftransformationen finden in Retentionsbereichen bei verringerter Strömungsgeschwindigkeit und großen aktiven Oberflächen besonders intensiv statt. Wesentlich für die Effizienz und Ausprägung der unterschiedlichen Prozesse ist der hydrologische Austausch, oberflächlich und durch das Grundwasser sowie die morphologischen Strukturen.

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit der Rolle von Retentionsräumen für die Nährstoffdynamik, die Algenproduktion, die Dynamik des organischen Materials und planktische Prozesse in großen Flüssen und beleuchtet die Bedeutung von hydrologischem Austausch für diese Ökosystemfunktionen in der Flusslandschaft der Donau-Auen östlich von Wien. Es wird ein Fallbeispiel vorgestellt, wo die Veränderungen im hydrologischen Austausch durch Restaurationsmaßnahmen untersucht wurden. Die entwickelten ökohydrologischen Modelle können die Wirkungen der hydrologischen Vernetzung auf die Nährstoff- und Kohlenstoffdynamik prognostizieren. Die Bedeutung unterschiedlicher Quellen des organischen Materials konnte anhand von stabilen Isotopenverhältnissen differenziert werden. Die Rolle der Primärproduktion für das planktische Nahrungsnetz und die Interaktion zwischen suspendierter und strukturgebundener Primärproduktion wurde für restaurierte Gewässersysteme im Detail untersucht.

Die Formulierung von Management- und Restaurierungskonzepten für große Flüsse benötigt ein profundes Verständnis der ökologischen Funktionsfähigkeit des Gewässersystems. Das präsentierte Fallbeispiel von aktuellen Restaurierungsprogrammen entlang der österreichischen Donau zeigt die Verbesserung dieser Funktionsfähigkeit durch erhöhten lateralen hydrologischen Austausch zwischen dem Hauptgerinne und ehemaligen Seitenarmen.

## **Einleitung**

Fließgewässer, die Bindeglieder zwischen dem terrestrischen und marinen Bereich, sind von zentralem Interesse für das Verständnis der globalen biogeochemischen Kreisläufe von Nährstoffen und organischem Material (Bennett *et al.* 2001; Seitzinger *et al.* 2002; Townsend-Small *et al.* 2005). Obwohl die jährliche Menge an Kohlenstoff, die in die Meere transportiert wird, um rund 4 Größenordnungen geringer ist als der gesamte vorhandene Pool in den Meeren, wirken sich Veränderungen im Koh-

lenstofftransport und erhöhte Nährstoffeinträge (z.B. für Stickstoff; Gruber & Galloway 2008) deutlich auf die Küstenregionen bzw. in weiterer Folge auch auf andere Meeresregionen aus (Alexander *et al.* 2000; Schmidt 2001). So konnte für die Donau gezeigt werden, dass seit den 1960er-Jahren die erhöhten Nährstoffeinträge und – vor allem rezent wirksam – auch deren veränderte Zusammensetzung die Algenproduktion in den Küstenregionen des Schwarzen Meeres nachhaltig beeinflussten (WWF 1999; Ittekkot *et al.* 2000). Daraus ergibt sich, dass die Zusammenhänge zwischen Aktivitäten im Einzugsgebiet, Defiziten in der Funktionalität der Flusslandschaften und den Auswirkungen in den Küstenregionen systemisch und integrativ betrachtet werden müssen (Kroiss *et al.* 2003). Um langfristige und großräumige Wirkungszusammenhänge und die hierarchisch miteinander vernetzten Prozesse zu verstehen und im Management umzusetzen, sind nicht nur Untersuchungen auf Einzugsgebietebe- ne notwendig, sondern auch auf Skalenebenen darunter. So hängt der Nährstofftransport nicht nur von der Verteilung der Einträge aus punktuellen und diffusen Quellen und deren Behandlung vor Eintritt in das Fließgewässernetzwerk ab, sondern auch von der Abbaukapazität und der Retentionsleistung in der Flusslandschaft (Hein *et al.* 2005; Mulholland *et al.* 2008).

Die Funktionalität und die Intaktheit eines Flusssystemes werden durch Einzugsgebietsfaktoren, durch das Abflussregime, sowie durch die Effizienz der Stofftransformation und, damit verbunden, des Selbstreinigungspotentials bestimmt. Überschwemmungsflächen bzw. Auegebiete, die mit dem Fluss in hydrologischer Verbindung stehen, steigern die Stofftransformation erheblich. Ein wesentliches Bestreben rezenter ökologischer Konzepte zur Funktion lotischer Ökosysteme ist es daher (River Continuum Concept – Vannote *et al.* 1980), diese lateralen Austauschvorgänge in Relation zur hydrologischen Situation in das Verständnis des gesamten fluvialen Netzwerkes zu integrieren (Tockner *et al.* 2000; Thorp & Casper 2003; Junk & Wantzen 2004; Thorp *et al.* 2006). In diesem Zusammenhang ist die Frage der Skalierungsebenen sehr entscheidend, speziell da Fließgewässersysteme einen hierarchischen gegliederten und vernetzten Aufbau haben (Frissell *et al.* 1986). Da sich die unterschiedlichen Skalierungsebenen auf die Funktionen des Fließgewässernetzwerkes auswirken, ist ein Ansatz notwendig, der eine Verbindung zwischen diesen Skalierungsebenen (Einzugsgebiet, Abschnittsebene) schafft (vgl. McClain *et al.* 2003). Die Spezifität und die Interaktion zwischen den Betrachtungsebenen gelten auch für menschliche Einflüsse, die auf die Ökosysteme wirken, und reichen dort von globalen („global change“ – Thuiller 2007) bis hin zu regionalen und lokalen Wirkungen, die ebenfalls vernetzt analysiert werden müssen (Vitousek *et al.* 1997; Wade 2006).

Die drastischen wasserwirtschaftlichen Eingriffe (Regulation und Dammbauten) der letzten 100 Jahren führten in allen großen europäischen und nordamerikanischen Flüssen gerade im hydrologischen Regime und in der Vernetzung mit dem Umland zu starken Veränderungen einzelner Flussabschnitte, aber auch ganzer Flusssysteme (Tockner & Stanford 2002; Nilson 2005). Negative ökologische Entwicklungstendenzen wurden durch die Kanalisierung des Abflusses auf ein eingegengtes Profil mit befestigten Ufern, Sohleintiefungen, Abtrennungen von Nebenarmen oder die Vereinheitlichung der Uferbereiche initiiert und führten langfristig zur Reduktion der Landschaftsvielfalt (Reckendorfer *et al.* 2005). Auch entlang der Donau ist ein Verlust von 80 % der vitalen Auflächen feststellbar (WWF 1999). Landnutzungsänderungen und eben Regulierungseingriffe führten dazu und bedeuten auch für die restlichen 20 % teilweise drastische Veränderungen (z.B. für die Donau-Auen östlich von Wien – Schiemer 1995). Um dieser Entwicklung zu begegnen, ist es notwendig, Restaurierungsmaßnahmen wie auch Managementkriterien auf Basis ökologischer Konzepte zu erarbeiten (Palmer *et al.* 2005).

Ein zentraler Faktor auf der Flussabschnittsebene für das Verständnis der Prozesse in Fluss-Au-Systemen ist die hydrologische Vernetzung zwischen dem Fluss und den begleitenden Überschwemmungsgebieten (Junk *et al.* 1989). Ausmaß, Länge und Dynamik der Vernetzung werden vom hydrologischen Regime des Flusses und den geomorphologischen Gegebenheiten gesteuert und bestimmen Austausch- und Produktionsprozesse in der gesamten Flusslandschaft (Tockner *et al.* 1999; Preiner *et al.* 2008). Im Wesentlichen lassen sich dazu drei interagierende Prinzipien formulieren, die ausschlaggebend für die Funktionalität dieses Landschaftsraumes sind:

- Transfer von Nährstoffen und Akkumulation von organischem Material steuert den Nährstoffumsatz
  - Aufenthaltszeiten und verfügbare Kontaktflächen beeinflussen den Nährstoffumsatz
- Extreme hydrologische Ereignisse verändern die Ausgangs- und Umsatzbedingungen durch geänderte Flusspfade

Daher sind das räumliche Angebot und die zeitliche Verfügbarkeit von Retentionsräumen und deren Vernetzung in der Landschaft für die Ausprägung der Stoffkreisläufe entscheidend (Hein *et al.* 2005). Vor allem in Übergangszonen zwischen einzelnen morphologischen Untereinheiten sind die biogeochemisch aktivsten Abschnitte lokalisiert (McClain *et al.* 2003). Diese Übergangszonen oder Ökotonbereiche sind daher nicht nur für die Artenvielfalt per se eine entscheidende Komponente, sondern auch

für den Stoffumsatz auf der Landschaftsebene essentiell. Auen, Uferzonen und so genannte hydrologische „Totzonen“ zählen zu diesen Arealen, in denen Nährstoffe physikalisch, chemisch und biologisch zurückgehalten bzw. durch biologische Aktivitäten transformiert und teilweise dadurch auch langfristig der Flusslandschaft entzogen werden (z.B. Prozess der Denitrifikation – Pinay *et al.* 2007). Eingetragene Stoffe werden in Biomasse umgebaut und erhöhen die Produktivität der Augewässer, aber der Abbau läuft in diesen Gewässerbereichen intensiv ab. Diese Prozesse beeinflussen den Nährstoffrückhalt und daher das Selbstreinigungspotential der Flusslandschaft positiv (Hein *et al.* 1999). Diese Nährstofftransformationen finden in Retentionsbereichen bei verringerter Strömungsgeschwindigkeit und großen aktiven Oberflächen besonders intensiv statt (Pusch *et al.* 1998). Wesentlich für die Effizienz und die Ausprägung der unterschiedlichen Prozesse sind der hydrologische Austausch, der oberflächlich und über das Grundwasser bzw. das Interstitial stattfindet, sowie die morphologischen Gegebenheiten in der Flusslandschaft.

In diesem Zusammenhang sind extreme hydrologische Ereignisse bedeutend, die nicht nur morphologische Veränderungen herbeiführen, sondern auch den hydrologischen Austausch und die Stoffdynamik im Fluss (z.B. Zessner *et al.* 2005); Zweimüller *et al.*, 2008) sowie in den Auegebieten beeinflussen (Hein *et al.* 2005). Neben Hochwässern sind natürlich auch extreme Niederwasserphasen von Bedeutung und verändern z.B. nachhaltig die Vegetationsstruktur im aquatischen Bereich (Sparks & Spink 1998) oder den Stickstoffumsatz (Welter *et al.* 2005). Vor allem der Wechsel zwischen terrestrischen und aquatischen Phasen ist für den Stoffumsatz ein entscheidender Faktor (Baldwin & Mitchell 2000).

Diese skizzierten Konzepte und die involvierten Fragestellungen bedingen eine intensive Vernetzung der wissenschaftlichen Disziplinen Hydrologie und Ökologie, die in Form einer Querschnittsdisziplin der Hydro-Ökologie bzw. Ökohydrologie in den letzten Jahren immer stärkere Beachtung findet (z.B. Wood *et al.* 2007). Diese konzeptuelle Basis wird genutzt, um konkret gemeinsame Fragestellungen und Modellentwicklungen zu forcieren, die auch für Fragen der Auswirkungen anthropogener Eingriffe zunehmend an Bedeutung gewinnen (Schiemer & Reckendorfer 2004). Die erwarteten Zusammenhänge zwischen hydrologischer Vernetzung und deren Wirkungen auf Ökosystemkomponenten und die Formulierung in mechanistischen Modellen lassen sich in idealer Weise durch eine Verbindung hydrologischer und ökologischer Parameter erreichen.

Zielsetzung in diesem Artikel ist es daher, das Fallbeispiel der Gewässervernetzungsmaßnahmen im Donau-Abschnitt zwischen Wien und der slowakischen Gren-

ze, den Bereich des Nationalpark Donau-Auens, in eine größere Sichtweise zu integrieren und die Wirkung von Restaurationsmaßnahmen (in einem hydromorphologisch beeinträchtigten Fluss-Auen-System) zu zeigen. Im Speziellen wird der Frage nachgegangen, welchen Effekt die durch die Regulierungsmaßnahmen veränderte hydrologische Konnektivität in diesem Abschnitt der Donau auf die hydrochemische Situation, den Nährstofftransport und die Dynamik des partikulären organischen Materials hat. Folgende Punkte standen für die Analyse des Fallbeispiels der Donau-Auen im Vordergrund und sollen in weiterer Folge einen Beitrag zu einem tieferen Verständnis der ökologischen Funktionen von Flüssen liefern, um langfristig diese Ökosysteme in ihrer Funktion zu erhalten:

- (1) Einfluss der hydrologischen Vernetzung auf die Bedingungen in den Augewässern und das Retentionsverhalten neu vernetzter (restaurierter) Augewässer
- (2) Kurzfristige Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen auf die chemische und biologische Situation in Augewässern
- (3) Signifikanz unterschiedlicher Quellen organischen Materials für die Stoffbilanz von Flussauen

An der österreichischen Donau entlang der freien Fließstrecke östlich von Wien lassen sich Auegebiete in der Lobau und bei Regelsbrunn unterscheiden, die einen unterschiedlichen Vernetzungsgrad zum Fluss in Abhängigkeit von der Geomorphologie und der geographischen Distanz zum Fluss sowie zu den Einströmbereichen aufweisen. In diesen Bereichen bestehen noch ausgeprägte hydrologische Gradienten zwischen dem Fluss und den Augewässern, die sich aus diesem Grund für die Untersuchung dieser Themenstellung eignen. Die Arbeit basiert auf Untersuchungen zwischen 1995 und 2005.

## **Fallbeispiel Nationalpark Donau-Auen**

### **Geomorphologische Situation der Flusslandschaft und untersuchte Augewässersysteme im Nationalpark Donauauen**

Bis zur großen Donauregulierung war die Donau unterhalb Wiens in Haupt-, Neben- und Altarme gegliedert, deren Abflusskapazität stark wechselte (Furkationstypus, Mohilla & Michlmayr 1996). Durch die Regulierung 1875 erfolgte allerdings eine Einschränkung des Hochwasserabflussgebietes auf das Gebiet zwischen den Dämmen (bzw. der rechtsufrigen Hochkante) von 350 km<sup>2</sup> auf 95 km<sup>2</sup> (Hohensinner *et al.*

2004). Trotz der tiefgreifenden Veränderungen während der letzten 120 Jahre zählen die Flussauen der freien Fließstrecke östlich von Wien zu den letzten großflächigen Resten dieses Landschaftstypus in Europa (Reckendorfer *et al.* 2005). Bereits jetzt erfüllt das Gebiet die strengen IUCN-Kriterien eines Nationalparks, da die naturnahen Prozessabläufe in einem vergleichsweise hohen Maß gewährleistet sind. Eine Inventur der Fauna und Flora unterstreicht die Bedeutung dieser Stromlandschaft als international bedeutender Kreuzungspunkt eines Ost-West und Nord-Süd ausgerichteten Landschaftskorridors, der überregionale Ausbreitungs- und Austauschvorgänge von Lebensgemeinschaften in einer ansonsten weitgehend verarmten Landschaft ermöglicht und somit eine hohe Biodiversität garantiert. Darüber hinaus ist das Auengebiet als Rückzugsgebiet für viele an Feuchtgebiete gebundene Tier- und Pflanzenarten in einer ökologisch stark verarmten Kulturlandschaft von Bedeutung (Abb. 1).

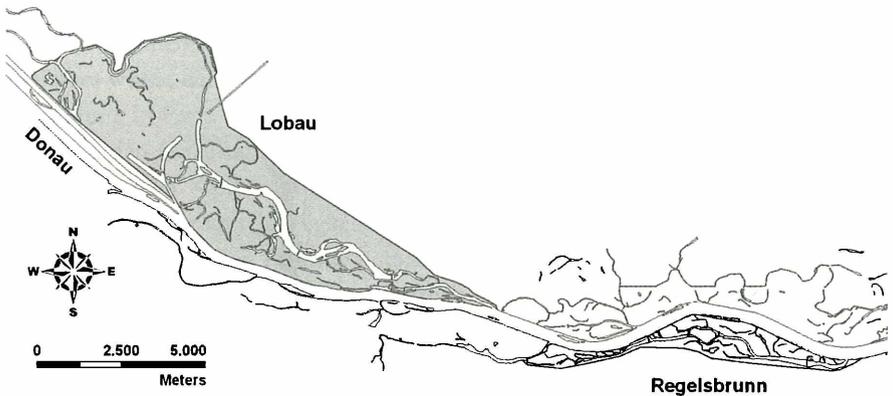


Abb. 1: Untersuchungsgebiet südöstlich von Wien im Nationalpark Donauauen, Fläche Regelsbrunn: 570 ha, Lobau: 3500 ha

Die Auswirkungen der Regulierungsmaßnahmen beeinflussten vor allem die langfristigen Entwicklungen deutlich (Reckendorfer *et al.* 2005). Über weite Bereiche ist heute die Habitatverfügbarkeit für verschiedene Lebensgemeinschaften im Fluss eingeschränkt; die natürliche Auenrandzone ist von der Hochwasserdynamik abgeschnitten. Die Errichtung von Traversen und einem Uferbegleitweg führte in den donaunahen Nebenarmen zu einer deutlichen Veränderung der hydrologischen Vernetzung. Im Inundationsgebiet kam es daher in Folge zu einer Verschiebung, von mehrheitlich

durchströmten Altarmen vor der Regulierung zu isolierten und angebundenen (d.h. nur am unteren Ende mit der Donau verbundenen) Nebengewässern. Dieser negativen ökologischen Entwicklungstendenz wurde durch eine Restaurierung der ursprünglichen Vernetzungsmuster zwischen dem begradigten Flusskanal und den Augewässern im Bereich Regelsbrunn begegnet (Schiemer *et al.* 2001; Reckendorfer *et al.* 2005). Hinsichtlich ihrer Vernetzung mit dem Strom lassen sich demzufolge zwei Gruppen mit hohem Anbindungsgrad, aber differenter Vernetzungscharakteristik (durchströmt vs. angebunden) unterscheiden (Abb. 2). Isolierte Augewässer werden nur bei mehrjährigen Hochwasserereignissen vom Fluss erreicht. Die Anbindungshäufigkeit wurde anhand der Höhe der Einströmbereiche und der Überschreitungshäufigkeit des Donauwasserstandes für ein Regeljahr bestimmt.

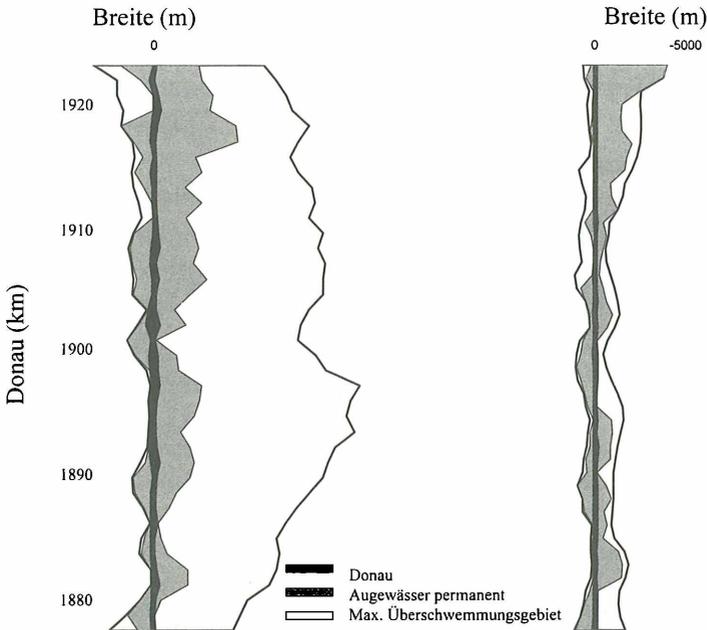


Abb. 2: Berechnung der Flächen zum Hauptarm der Donau, den permanenten Wasserflächen und der maximalen Überschwemmungsfläche zwischen den Flusskilometern 1880 und 1920, basierend auf historischen Karten (Pasetti 1859) vor der großen Donauregulierung 1875 (linke Grafik) und nach der Regulierung Ende des 20. Jhs. (Reckendorfer, nicht veröff. Bericht), modifiziert nach Hein *et al.* 2005.

Das Nationalparkgebiet besteht aus einer Reihe gut abgrenzbarer Flussauensegmente, die sich bezüglich ihrer Anbindung an die Donau und ihres Potentials zur Verbesserung des ökologischen Zustands deutlich unterscheiden. Letzteres bezieht sich auf die aquatischen Habitate, deren Lebensgemeinschaften und Verlandungstendenzen (Hein *et al.* 2005). Das Regelsbrunner Altarmsystem bot sich wegen der relativ dynamischen Anbindung an den Fluss und wegen der vergleichsweise geringen technischen Maßnahmen, die zur Rückgestaltung erforderlich waren, für dieses erste, groß angelegte Restaurierungsprogramm an (Schiemer *et al.* 1999). Trotz der bestehenden Vernetzung bei Hochwasser bereits vor den Maßnahmen, existierten ökologische Defizite aufgrund des abgesenkten Wasserstands im Altarmsystem unterhalb Mittelwasser. Betrachtet man die Habitatentwicklung im Augebiet in den letzten 100 Jahren, so zeigt sich eine drastische Reduktion des Gewässernetzes, ein starker Rückgang der Flachwasserzonen und Schotterflächen sowie eine deutliche Verschiebung von Pionierstandorten in Richtung Auwald bzw. von dynamisch angebundenen zu stagnierenden Altarmen (Schiemer & Reckendorfer 2004). Im Rahmen des Gewässervernetzungsprojektes wurde der Uferbegleitweg an mehreren Stellen, an denen eine natürliche Anbindung in Form von Durchflussgräben bestand, abgesenkt (Abb. 3). Zusätzlich wurde an den fünf Einströmbereichen ein kontrollierbarer Kastendurchlass auf ein Niveau von MW – 0,5 m eingebaut. Durch die Absenkung von Traversen bzw. die Verbesserung ihrer Durchlässigkeit wurde die Durchflutung deutlich erhöht und die Wasserretention in den Altarmen stark herabgesetzt (Tockner & Schiemer 1997; Tockner *et al.* 1998). Vor der Durchführung der Restaurierungsmaßnahmen war das Augebiet nur an wenigen Tagen durchflossen. Seitdem ist das Altarmsystem durchschnittlich über 200 Tage im Jahr angebunden. Die Durchflussmengen variieren derzeit von  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  bei Mittelwasser bis zu mehr als  $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  bei Hochwasser.



Abb. 3: Karte der Restaurationsmaßnahmen im Auenbereich Regelsbrunn. © Nationalpark Donau-Auen

## Nationalpark Donau-Auen: Ausegmente mit unterschiedlicher Vernetzung

### Hydrologische Vernetzung und Auswirkungen auf das Retentionsverhalten von Augewässern

Zur Analyse der hydrologischen Bedingungen wurden Pegelstände, deren Schwankungen und relative Frequenzen herangezogen (z.B. Hein *et al.* 1999; Schiemer & Reckendorfer 2004). Die hydrologische Vernetzung wird durch die Distanz zum Strom, die Art der Verbindung und die zeitliche Dynamik charakterisiert und zeigt in dynamischen und weniger stark vernetzten Ausegmenten, wie z.B. der Lobau, grundsätzlich den gleichen Trend (Abb. 4). Im durchströmten Regelsbrunner Altarmsystem sowie in der angebundnen, nicht renaturierten Lobau nimmt mit zunehmender Entfernung (400 m bis 1000 m) die Anbindungsdauer und -frequenz (10 % bis 1 %) deutlich ab. Die Bedeutung unterschiedlicher Dotationsquellen für die einzelnen Augewässer verschiebt sich mit der Entfernung vom Abflussgeschehen von Donau-Oberflächenwasser zu Donau gespeistem Grundwasser. Die grundwasserdominierte Konnektivität prägt bei Mittelwasser die Nährstoffsituation in den meisten Aubereichen, vor allem in der Lobau.

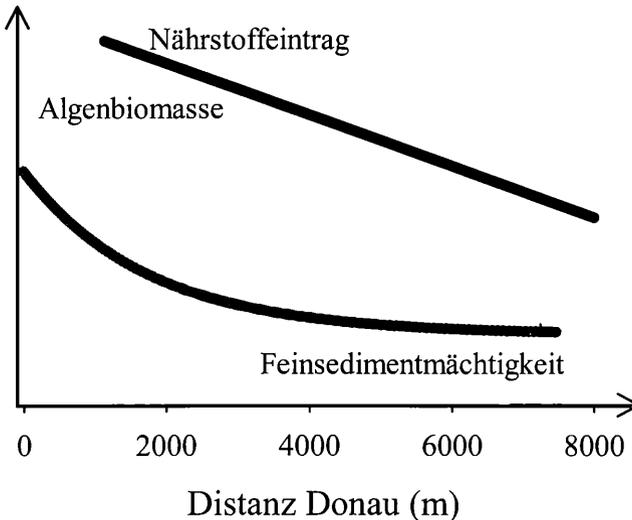


Abb. 4: Schematische Darstellung der Sediment-, Nährstoff- und Biomassen der planktischen Algen, basierend auf Erhebungen in den Auen zwischen 1991 und 2006.

Da die hydrologische Vernetzung bzw. die Distanz zum Fluss die Nährstoffchemische Situation und in weiterer Folge auch die Produktivität der Altarme bedingt, lassen sich aus der chemisch-biologischen Situation von Augewässern Rückschlüsse auf deren hydrologische Vernetzung machen. In den Augewässern sind mit zunehmender Distanz zur Donau bzw. mit abnehmenden Einfluss des donaubürtigen Wassereintrags abnehmende mittlere Nährstoffgehalte und Algenbiomassen (dargestellt als das photosynthetisch wichtige Pigment Chlorophyll-a) sowie geringere Feinsedimentauflagen festzustellen (Reckendorfer & Hein 2006; Hein *et al.* 2004). Ein signifikanter Anstieg der anorganischen Feinpartikelkonzentration kann nur bei oberflächiger Verbindung mit der Donau beobachtet werden, während bei Nährstoffen auch Sicker- bzw. Grundwasserzutritte, hier in erster Linie bei Nitrat, zu deutlich erhöhten Konzentrationen in den Altarmen führen.

Generell ist die Donau durch hohe Seston- ( $80 \text{ mg L}^{-1}$ ) und hohe Nährstofffrachten (im Mittel:  $3 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$ ,  $50 \text{ } \mu\text{g L}^{-1} \text{ P-PO}_4$  für den Zeitraum 1997–2004 für die Messstelle Wildungsmauer (Aschauer *et al.* 2006) charakterisiert. Die Retentionsleistung der beiden Ausegmente (Regelsbrunn – restauriert und damit im Stofffluss aktiviert bzw. Lobau – abgedämmt und daher inaktiv) zeigt deutliche Unterschiede für die dominanten gelösten und partikulär gebundenen Nährstoffe (Abb. 5). Im Vergleich der Aufnahmeleistung zeigt Regelsbrunn deutliche höhere Aufnahmemengen, bei Nitrat, der dominierenden Stickstofffraktion, bei Wasserführungen um Mittelwasser und bei Phosphor, partikulär gebundener Phosphor, die dominierende Fraktion bei höheren Wasserführungen. Die Mengen liegen im Prozentbereich der gesamten Transportmenge, die Retentionsleistung für Phosphor steigt allerdings parallel mit den Transportmengen im Fluss an (siehe Zessner *et al.* 2005). In der Lobau können gelöste Stoffe erst bei höheren Wasserführungen, partikuläres Material überhaupt nur äußerst eingeschränkt aufgenommen werden. Die verstärkte Vernetzung der Regelsbrunner Au führt zu einer gesteigerten Aufnahme von Nährstoffen. Die Restaurierung der hydrologischen Vernetzung hat die Retentionskapazität dieses Auenbereichs wieder aktiviert.

### **Nährstoffverhältnisse und Reaktionen des Planktons in Abhängigkeit zu hydrologischen Impulsen**

Die hydrologische Vernetzung beeinflusst nicht nur die mittleren Konzentrationen und die Entwicklungstrends über längere Zeiträume, sondern wirkt auch unmittelbar bei Hochwasserereignissen bzw. beim Pulsieren des Wasserstandes in Flusslandschaf-

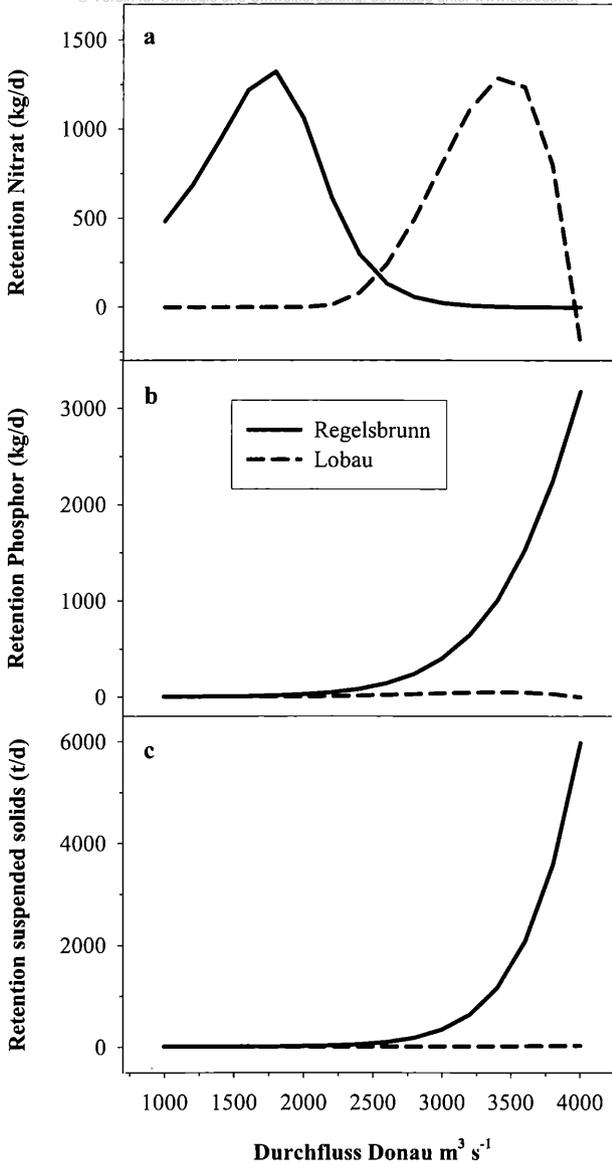


Abb. 5: Zusammenhang von Donaudurchfluss und Retentionsvermögen für Nitrat (a), Phosphor (b) und Feinpartikel (suspended solids) (c) in Regelsbrunn (durchgezogene Kurve) und in der Lobau (strichlierte Kurve); aus Hein et al. in Vorbereitung.

ten. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 6 zusammengeführt. Die durchschnittliche Aufenthaltszeit des Wassers in den verschiedenen Becken des Altarmsystems wird hierbei durch das „Wasseralter“ dargestellt, das Alter des Donau-Wassers wird mit Null angesetzt. Das Wasseralter liegt bei Hochwasser bei unter einem Tag und steigt mit sinkendem Wasserspiegel wieder an. Während dieser Veränderung nehmen die Partikelkonzentrationen sehr rasch ab, Sedimentationsprozesse dominieren. Nährstoffkonzentrationen nehmen innerhalb von wenigen Tagen (ca. eine Woche) ab, hier sind biologische Prozesse (z.B. Aufnahme durch Algen) entscheidend. Die Nährstoffabnahme hängt auch mit dem Aufbau von Algenbiomasse zusammen (Hein *et al.*

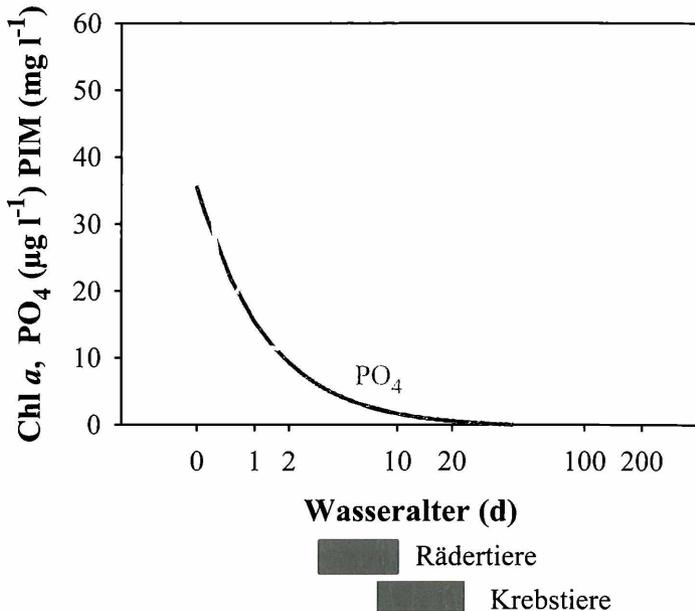


Abb. 6: zeigt den Zusammenhang von verschiedenen Eigenschaften des Wasserkörpers in Abhängigkeit vom „Wasseralter“. Dieser funktionale Zusammenhang ist auf einem sehr umfassenden Untersuchungsmaterial begründet, das im Verlauf der letzten 5 Jahre in verschiedenen Augenbieten der Donau erhoben worden ist (Hein *et al.* 1999; Tockner *et al.* 1999; Baranyi *et al.* 2002). Der hohe Schwefelstoffgehalt und die hohen Phosphorkonzentrationen des Donauwassers nehmen in den Altarmen innerhalb der ersten Tage bereits stark ab, während Chlorophyll a und die bakterielle Biomasse ansteigen. Der Parameter Wasseralter erweist sich als sehr geeignet um die Sukzession von Phytoplankton und Zooplankton zu beschreiben bzw. Phasen zu unterscheiden, in denen die Kontrolle von Prozessabläufen von abiotischen Gegebenheiten auf biotische Interaktionen (dargestellt anhand der Balken für Räder- und Krebstiere unterhalb der Grafik) übergeht (Hein *et al.* 2004).

2005). Bei kurzfristigen Hochwasserereignissen kommt es aufgrund der extrem erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten zur Auswaschung der planktischen Lebensgemeinschaft und andererseits zu maximalen Nährstoffkonzentrationen. Daraus ergibt sich kurzfristig eine Sequenz, wo die Algen durch Umweltfaktoren kontrolliert werden (Abb. 7; Hein *et al.* 2004). Erst mit einem Wasseralter von länger als eine Woche können dann Organismen des Zooplanktons (Rädertiere und planktische Krebschen) das Phytoplankton beweidn und so die Biomassen wieder reduzieren (vgl. Baranyi *et al.* 2002; Keckeis *et al.* 2003).

Bei länger dauernde Vernetzung mit der Donau können in Regelsbrunn erhöhte Produktionsraten festgestellt werden, eine kontinuierliche Nährstoffversorgung bei mittleren Retentionszeiten begünstigt die planktische Primärproduktion. Im Ver-

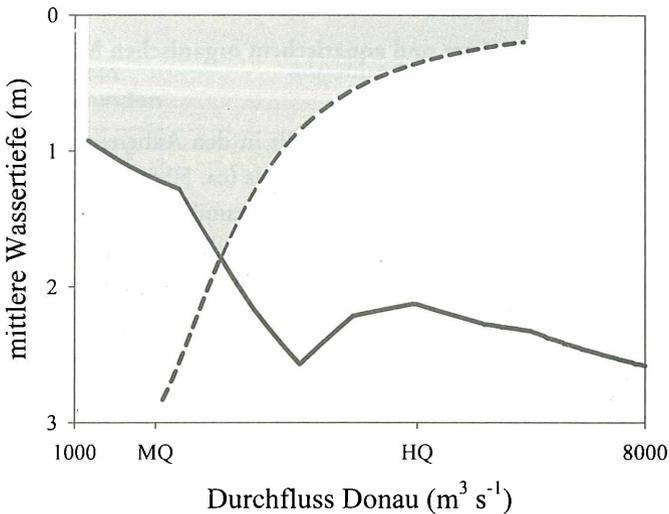


Abb. 7: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Durchfluss der Donau und mittlerer Tiefe sowie der Kompensationstiefe für Primärproduktion im Regelsbrunner Altarmsystem. Die mittlere Tiefe wurde anhand des hydrologischen Modells von (Reckendorfer & Steel 2004) bestimmt. Das Lichtklima im Gewässer wurde durch zwei statistische Zusammenhänge ausgedrückt: der signifikante Zusammenhang zwischen Durchfluss der Donau und Schwebstoffgehalt ( $r^2 = 0.81$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 2615$ ), und dem signifikanten Zusammenhang zwischen Schwebstoffgehalt und dem Attenuationskoeffizienten (Maß der Lichtabschwächung) im Seitenarm ( $r^2 = 0.70$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 180$ ). Die Daten stammen aus den Jahren 1997–2000. Strichlierte Linie zeigt Kompensationstiefe, durchgezogene Linie die mittlere Tiefe. Grau hinterlegtes Feld zeigt die euphotische Zone; mod. (Hein *et al.* 2005).

gleich verschiedener Ausysteme (Regelsbrunn, Lobau) zeigt sich, dass die unterschiedliche hydrologische Situation nicht nur Effekte auf die physikalische und chemische Situation der Augewässer hat, sondern auch die Zusammensetzung des Planktons wesentlich beeinflusst (Baranyi *et al.* 2002; Riedler *et al.* 2006). Das autotrophe Kompartiment (planktische Algen) dominiert die gesamte Planktonbiomasse in den untersuchten dynamischen Systemen. Für das Metazooplankton zeigte sich, dass mit steigender hydrologischer Isolation vom Strom die Zooplanktonbiomasse deutlich ansteigt (Hein *et al.* 2003). In der Lobau dominieren die heterotrophen Kompartimente das Plankton. Das Verhältnis Phytoplankton zu Bakterioplankton spiegelt diesen Trend wieder und liegt in der Donau durchschnittlich bei 8,2, in Regelsbrunn bei 6,1 und in der Lobau bei 2,7.

### **Signifikanz von terrestrischem und aquatischem organischem Material in restaurierten Augewässern**

Partikuläres organisches Material (POM) stellt in den Aubereichen einen wesentlichen Bestandteil des gesamten organischen Pools (ca. 50 %) dar. Die wesentlichen Einflussgrößen, die die Zusammensetzung und Dynamik bestimmen, sind der allochthone Eintrag versus die autochthone Produktion. In Augewässern unterliegt der POM Pool einer ausgeprägten Fluktuation dieser beiden Kohlenstoffquellen in Abhängigkeit von der hydrologischen Vernetzung (Hein *et al.* 2003).

Anhand des C:N Verhältnisses (Kohlenstoff zu Stickstoffverhältnis), der stabilen Isotopenverteilung und der Differenzierung zwischen lebendem und totem organischen Material lassen sich die bestimmenden Elemente für die POM Konzentration und Zusammensetzung in hydrologisch beeinflussten Augewässern ermitteln. Der Eintrag aus der Donau ist durch hohe C:N Verhältnisse, wie auch hohe  $\delta^{13}\text{C}$  Signaturen, gekennzeichnet. Diese Charakteristika finden sich bei Hochwassersituationen auch in Augewässern. In der Lobau zeigt das geringe C:N Verhältnis wie auch die sehr negativen  $\delta^{13}\text{C}$  Signaturen, dass das organische Material größtenteils aquatischen Ursprungs ist. Mit steigender Retentionszeit nimmt die Bedeutung der autochthonen Produktion auch im dynamischeren Ausystem Regelsbrunn zu. Ab einer mittleren Retentionszeit von 10 d dominiert das autochthon produzierte organische Material den POM Pool in Regelsbrunn und kann damit einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Selbstreinigungskapazität des gesamten fluvialen Netzwerkes leisten (Hein *et al.* 2003). Eingetragene Nährstoffe werden rasch in Algenbiomasse umgebaut und sind

folgend für das Nahrungsnetz nutzbar, die Auen sind auch im aquatischen Bereich durch eine erhöhte Produktivität charakterisiert (Hein *et al.* 2005).

Das partikuläre organische Material in der freien Wassersäule wird durch gewässerinterne Prozesse kontrolliert. Basierend auf den Messungen von Preiner *et al.* (2008) lassen sich nun die Umsatzmengen an organischem Material in der Regelsbrunner Au und in der Donau miteinander vergleichen und zwar zu unterschiedlichen hydrologischen Phasen (Abb. 8). Es zeigt sich, dass mit steigender Vernetzung der aquatisch produzierte Anteil abnimmt. Während bei niederen Wasserständen benthische Algen den Aufbau von organischem Material kontrollieren, sind bei mittleren Vernetzungsbedingungen planktische Algen von Bedeutung. Nur während der kurzen Hochwasserphasen dominiert terrestrisches Material in der Wassersäule. Im Vergleich zur Donau sind die Mengen nur bei Hochwasser quantitativ von Bedeutung, es wird eine bedeutende Menge an Material im Ausystem deponiert.

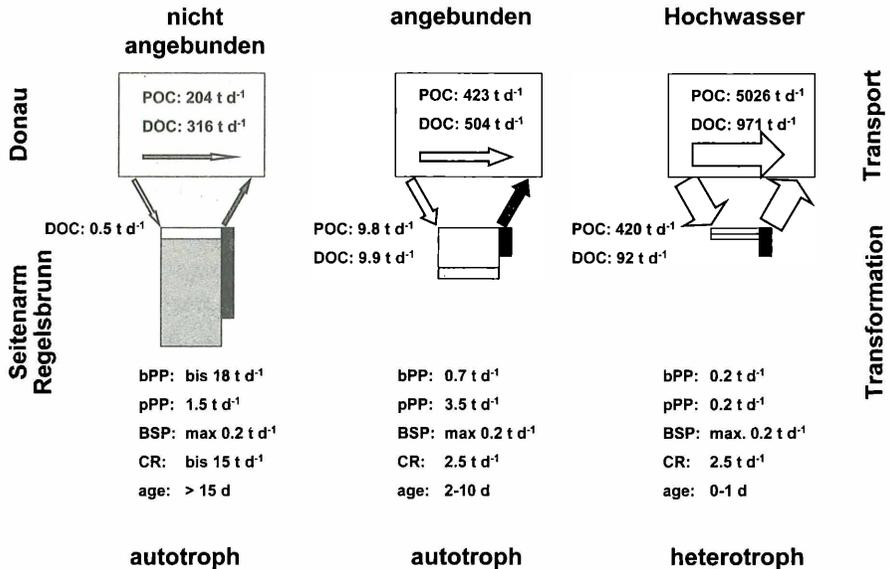


Abb. 8: Kohlenstoff-Transport, -Assimilation und -Abbau im Seitenarmsystem von Regelsbrunn (Wasserfläche: 1 Mio. m<sup>2</sup> bei Mittelwasserbedingungen). (DOC) gelöster organischer Kohlenstoff; (POC) partikulärer organischer Kohlenstoff; (bPPP) benthische Primärproduktionsleistung; (pPPP) pelagische Primärproduktionsleistung; (BSP) bakterielle Sekundärproduktion; (CR) Respiration (gesamt); (age) Wasseralter – Zeit, die Wasser durchschnittlich Seitenarmsystem verbringt, Wasseralter in der Donau = 0; modifiziert nach Preiner *et al.* 2008.

Das Ausystem Regelsbrunn fungiert daher als ein „Hot spot“ aquatischer Produktivität, aus dem infolge eines intensivierten hydrologischen Austausches mit der Donau autochthon produzierte Stoffe auch in den Hauptstrom gelangen. Die erhöhte Produktivität im Ausystem kommt folglich auch den Lebensgemeinschaften im Fluss zu Gute.

## Perspektiven

Flusslandschaften stellen seit jeher attraktive Lebensräume für die Menschen dar. Der im Zuge des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums zunehmende Nutzungsdruck auf die Einzugsgebiete sowie auf die Flüsse selbst (Intensivierung der agrarischen Nutzung, Aufbau städtischer Infrastrukturen) und die daraus folgende Eindämmung der Auendynamik durch wasserbauliche Maßnahmen, wie Regulierungen und Stauhaltungen, führten in der Vergangenheit zu starken Beeinträchtigungen dieser Ökosysteme. Landschaftsökologische Funktionen, wie Wasserrückhalt, Stoffkreisläufe, Produktions- und Abbauprozesse, und die Ansprüche charakteristischer Lebensgemeinschaften wurden angesichts der gesellschaftlichen Ansprüche nicht nachhaltig berücksichtigt. Demografischen, politischen, ökonomischen und klimatischen Trends zufolge wird dieser Nutzungsdruck in den nächsten Jahren noch weiter ansteigen. Die Zerstörung der restlichen Feuchtgebiete bis zum Jahr 2025 ist daher ein realistisches Bedrohungsszenario (Tockner & Stanford 2002).

Ein modernes, ökologisch orientiertes Gewässermanagement, wie es in der Gewässervernetzung im Nationalpark Donau-Auen angewandt wurde, bezieht die landschaftsökologischen Funktionen von Fließgewässern in die Betrachtung mit ein. Die Restaurierung der hydrologischen Konnektivität zwischen Fluss und Au, sowohl über den begleitenden Grundwasserkörper als auch über die Oberflächengewässer, wurde hier als einer der wichtigsten Schritte zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems erkannt. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass in dynamischen Aubereichen eine Re-Integration des Inundationsgebietes in das Abflussgeschehen zu durchaus positiven ökologischen Effekten führen kann. Eine Voraussetzung dafür ist, dass sich die Verlandungstendenz des Altarmsystems noch in einem umkehrbaren Stadium befindet und die Öffnung des Systems eine erhöhte Durchgängigkeit in den Altarmen einschließt.

Die Ergebnisse zeigen weiters, dass ein kombinierter ökohydrologischer Ansatz die Auswirkungen von Veränderungen der Rahmenbedingungen auf unterschiedlichen

Ebenen effizienter darstellen und Entwicklungstrends auf Prozess- und Organismenebene präziser prognostizieren kann als eine rein sektorale Betrachtungsweise. Als wichtigster Parameter des entwickelten ökohydrologischen Modells stellte sich das „Wasseralter“ in den einzelnen Becken heraus, das die durchschnittliche Aufenthaltszeit des Wassers in den Becken widerspiegelt. Das Wasseralter trägt den verschiedenen Routen, mit denen das Wasser in das Augebiet gelangt, und den Austauschprozessen zwischen den verschiedenen Altarmen Rechnung und kann somit direkt zu verschiedenen limnologischen Prozessabläufen in Beziehung gebracht werden.

Ein modernes integratives Gewässermanagement berücksichtigt jedoch nicht nur die geomorphologische und ökologische Funktionsfähigkeit der Gewässer auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen, sondern versucht zusätzlich, diese mit den verschiedenen gesellschaftlichen Bedürfnissen und Nutzungsansprüchen, wie Hochwasserschutz, Trinkwassergewinnung, Schifffahrt oder Erholungsnutzung, in Einklang zu bringen (Abb. 9, Poole 2002). Der sich entwickelnde ökologisch orientierte Wasserbau erfordert dabei das gemeinsame Bemühen von Hydrologie, Wasserbau, Ökologie und Naturschutz sowie Sozioökonomie basierend auf einem profunden Verständnis der Funktionsabläufe in den Fluss-Aulandschaften. Ein derartiges Konzept wird im Nationalpark Donau-Auen im Bereich der Lobau durch das derzeit laufende Projekt „Optima Lobau“ (Programm ProVision des BMwf) verwirklicht. Gerade in diesem Teil des Nationalparks treffen vielfältige, teilweise widersprüchliche ökologische und sozioökonomische Forderungen aufeinander. Um diesen Ansprüche in gleicher Weise gerecht werden zu können, werden die verschiedenen Funktionsaspekte der Flusslandschaft in einem interdisziplinären Ansatz und unter Bezugnahme auf aktuelle und historische Bedingungen in natürlichen dynamischen Referenzökosystemen miteinander in Beziehung gebracht. Ein wichtiger Schritt zu Managementlösungen ist dabei die Integration der Forschungsaktivitäten in den Entscheidungsfindungsprozess regionaler und überregionaler Entscheidungsträger im Rahmen eines transdisziplinären Dialogs (Abb. 10). Basierend auf miteinander vernetzten geomorphologischen, hydrologischen und ökologischen Prognosemodellen werden im Rahmen des Projektes „Optima Lobau“ in einem iterativen und partizipativen Prozess zwischen Wissenschaft und Management verschiedene Optionen an gewässerbaulichen Renaturierungsmaßnahmen für einen urbanen Aubereich in den Donau-Auen vergleichbar dargestellt, die auf der einen Seite eine ausreichende Dynamik zur Förderung der natürlichen ökologischen Prozesse gewährleisten und auf der anderen Seite die bestehenden Nutzungsinteressen nicht einschränken. Dieser Ansatz stellt somit wichtigen Schritt für das Gewässermanagement dar, indem es sich der Frage der öko-



logischen Notwendigkeit und der sozialen Verträglichkeit einer wieder eingeführten Dynamik in einem urbanen Auegebiet stellt. Die konsequente Weiterführung des Ansatzes bedeutet nicht nur die Koppelung von Struktur und Funktion eines Ökosystems, sondern muss auch die Anliegen des Menschen (die Nutzung) gleichwertig mitbearbeiten.

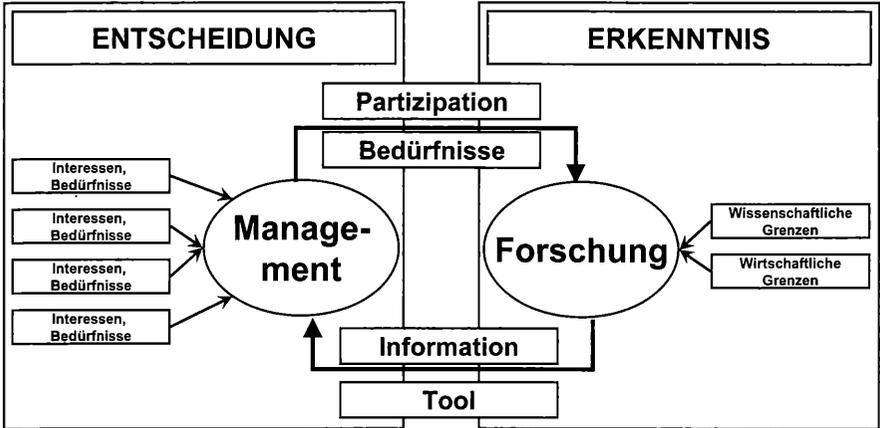


Abb. 10: Inter- und transdisziplinärer Ansatz zur Lösungsfindung im Dialog von Forschung und Management.

Basierend auf diesem lokalen Ansatz, ist der nächste Schritt auch regional und auf Einzugsgebietsebene diese Interaktion zu verstehen und dann in die folgenden Handlungsschritte zu übernehmen. Die vorhandenen Studien zeigen, dass es aus Sicht der Nährstofffrachten, dem Zustand der Auegebiete und den Ansprüchen und Veränderungen in den nächsten 20 Jahren entscheidend ist, dass Potential dieser Ökosysteme wieder zu aktivieren. Nur funktionierende Ökosysteme, in diesem Fall Auegebiete, sind eine nachhaltige Basis für unsere gesellschaftliche Entwicklung.

## Danksagung

Ich möchte mich für die freundliche Einladung zur Tagung in Jochenstein im Oktober 2007 bedanken, die perfekte Organisation und die spannenden Gesprächen zu denen Gelegenheit bei diesem Treffen des Vereins für Ökologie und Umweltforschung war.

Weiters ist den KollegInnen gedankt, ohne die Kooperation mit ihnen wäre unsere Forschungsarbeit nicht möglich gewesen. In diesem Sinne möchte ich auch allen Fördergebern danken, die unsere Forschungsarbeit unterstützt haben: FWF (P19907), BMwf (ProVision No 133–260), BMVIT, via donau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft m.b.H., Nationalpark Donau-Auen, Land Wien und Niederösterreich, ÖK der IAD.

## Literatur

- Alexander, R.B., R.A. Smith & G.E. Schwarz (2000). Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico. *Nature* **403** (6771): 758–761.
- Aschauer, A., I. Zieritz, R. Wimmer, K. Deutsch & A. Chovanec (2006). WGEV Datenband Fließgewässer, Umweltbundesamt, BMLFUW, Referat VII/1a.
- Baldwin, D.S. & A.M. Mitchell (2000). The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: A synthesis. *Regulated Rivers: Research & Management* **16**: 457–467.
- Baranyi, C., T. Hein, C. Holarek, S. Keckeis & F. Schiemer (2002). Zooplankton biomass and community structure in a Danube River floodplain system: effects of hydrology. *Freshwater Biology* **47**: 473–482.
- Bennett, E.M., S.R. Carpenter & N.F. Caraco (2001). Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: A global perspective. *Bioscience* **51** (3): 227–234.
- Frissell, C.A., W.J. Liss, C.E. Warren & M.D. Hurley (1986). A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* **10**: 199–214.
- Gruber, N. & J.N. Galloway (2008). An earth system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* **451**: 293–296.
- Hein, T., C. Baranyi, G.J. Herndl, W. Wanek & F. Schiemer (2003). Allochthonous and autochthonous particulate organic matter in floodplains of the River Danube: the importance of hydrological connectivity. *Freshwater Biology* **48**: 220–232.
- Hein, T., C. Baranyi & W. Reckendorfer (2004). Einfluss von Öffnungsmaßnahmen auf die hydrochemische Situation und die planktischen Prozesse in einem dynamischen Ausystem. *Zoo. Bot.* **34**: 31–47.
- Hein, T., C. Baranyi, W. Reckendorfer & F. Schiemer (2004). The impact of surface water exchange on the nutrient and particle dynamics in side-arms along the River Danube, Austria. *Science of the Total Environment* **328** (1–3): 207–218.
- Hein, T., G. Heiler, D. Pennetzdorfer, P. Riedler, M. Schagerl & F. Schiemer (1999). The Danube restoration project: functional aspects and planktonic productivity in the floodplain system. *Regulated Rivers: Research & Management*. **15**: 259–270.
- Hein T., Blaschke A. P., Haidvogl G., Hohensinner S., Kucera-Hirzinger V., Muhar S., Preiner S., Reiter K., Schuh B., Weigelhofer G. & I. Zsuffa (2006): Optimised management strategies for the Biosphere reserve Lobau, Austria - based on a multi criteria decision support system: using ecohydrological model approaches. *Ecohydrology and Hydrobiology*, **6**, 25–36.

- Hein, T., W. Reckendorfer, J. Thorp & F. Schiemer (2005). The role of slackwater areas for biogeochemical processes in rehabilitated river corridors: examples from the Danube. *Archiv für Hydrobiologie, Large Rivers* 15 (1–4): 425–442.
- Hohensinner, S., H. Habersack, M. Jungwirth & G. Zauner (2004). Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: The Danube River (1812–1991). *River Research and Applications* 20 (1): 25–41.
- Ittekkot, V., C. Humborg & P. Schäfer (2000). Hydrological alterations and marine biogeochemistry. A silicate issue? *BioScience* 50 (9): 776–782.
- Junk, W.J., P.B. Bayley & R.E. Sparks (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Internat. Large River Symp., Canad. Spec. Publ. of Fish. and Aquatic Sci.*
- Junk, W.J. & K.M. Wantzen (2004). The Flood Pulse Concept: New Aspects, Approaches, and Applications – an Update. *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*. R. L. Welcomme and T. Petr. Bang kok, FAO. 2: 117–149.
- Keckeis, S., C. Baranyi, T. Hein, C. Holarek, P. Riedler & F. Schiemer (2003). The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube. *Journal of Plankton Research* 25 (3): 243–253.
- Kroiss, H., C. Lampert & M. Zessner (2003). Flussgebietmanagement am Beispiel des Nährstoffmanagements im Donaueinzugsgebiet. *Wiener Mitteilungen* 183: 1–23.
- McClain, M.E., E.W. Boyer, C.L. Dent, S.E. Gergel, N.B. Grimm, P.M. Groffman, S.C. Hart, J.W. Harvey, C.A. Johnston, E. Mayorga, W.H. McDowell & G. Pinay (2003). Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems* 6 (4): 301–312.
- Mohilla, P. & F. Michlmayr (1996). *Donautlas Wien: Geschichte der Donauregulierung auf Karten und Plänen aus vier Jahrhunderten = Atlas of the Danube River Vienna*. Wien, Österr. Kunst- u. Kulturverl.
- Mulholland, P.J., A.M. Helton, G.C. Poole, R.O. Hall, S.K. Hamilton, B.J. Peterson, J.L. Tank, L.R. Ashkenas, L.W. Cooper, C.N. Dahm, W.K. Dodds, S.E.G. Findlay, S.V. Gregory, N.B. Grimm, S.L. Johnson, W.H. McDowell, J.L. Meyer, H.M. Valett, J.R. Webster, C.P. Arango, J.J. Beaulieu, M.J. Bernot, A.J. Burgin, C.L. Crenshaw, L.T. Johnson, B.R. Niederlehner, J.M. O'Brien, J.D. Potter, R.W. Sheibley, D.J. Sobota & S.M. Thomas (2008). Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading. *Nature* 452 (7184): 202–U46.
- Nilson, E. (2005). A multitemporal land cover information system as supporting tool for geomorphological research on Central European river systems. *Geophysical Research Abstracts* 7.
- Palmer, M.A., E.S. Bernhardt, J.D. Allan, P.S. Lake, G. Alexander, S. Brooks, J. Carr, S. Clayton, C.N. Dahm, J.F. Shah, D.L. Galat, S.G. Loss, P. Goodwin, D.D. Hart, B. Hassett, R. Jenkinson, G.M. Kondolf, R. Lave, J.L. Meyer, T.K. O'Donnell, L. Pagano & E. Sudduth (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* 42 (2): 208–217.
- Pinay, G., B. Gumiero, E. Tabacchi, O. Gimenez, A.M. Tabacchi-Planty, M.M. Hefting, T.P. Burt, V.A. Black, C. Nilsson, V. Iordache, F. Bureau, L. Vought, G.E. Petts & H. Decamps (2007). Patterns of denitrification rates in European alluvial soils under various hydrological regimes. *Freshwater Biology* 52 (2): 252–266.

- Poole, G.C. (2002). Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness within the river discontinuum. *Freshwater Biology* 47 (4): 641–660.
- Preiner, S., I. Drodzowski, M. Schagerl, F. Schiemer & T. Hein (2008). The significance of side-arm connectivity for carbon dynamics of the River Danube, Austria. *Freshwater Biology* 53 (2): 238–252.
- Pusch, M., D. Fiebig, I. Brettar, H. Eisenmann, B.K. Ellis, L.A. Kaplan, M.A. Lock, M.W. Naegeli & W. Traunspurger (1998). The role of micro-organisms in the ecological connectivity of running waters. *Freshwater Biology* 40 (3): 453–495.
- Reckendorfer, W., Hein, T. (2006): Morphometrie, Hydrologie und Sedimentologie in der Unteren Lobau Wissenschaftliche Reihe des Nationalpark Donau-Auen, 4, 1–46.
- Reckendorfer, W., R. Schmalfluss, C. Baumgartner, H. Habersack, S. Hohensinner, M. Jungwirth & F. Schiemer (2005). The Integrated River Engineering Project for the free-flowing Danube in the Austrian Alluvial Zone National Park: contradictory goals and mutual solutions. *Archiv für Hydrobiologie Supplement* 155 (1–4): 613–630.
- Reckendorfer, W. & A. Steel (2004). Auswirkungen der hydrologischen Vernetzung zwischen Fluss und Au auf Hydrologie, Morphologie und Sedimente – Effects of hydrological connectivity on hydrology, morphology and sediments. *Abh. Zool.-Bot. Ges. Österreich* 34: 19–30.
- Riedler, P., C. Baranyi, T. Hein, S. Keckeis & M. Schagerl (2006). Abiotic and biotic control of phytoplankton development in dynamic side-arms of the River Danube. *Archiv für Hydrobiologie. Supplementband. Large rivers* 16 (4): 577–594.
- Schiemer, F., C. Baumgartner & K. Tockner (1999). Restoration of floodplain rivers: The Danube restoration project. *Regulated Rivers Research & Management* 15: 231–244.
- Schiemer, F., H. Keckeis, W. Reckendorfer & G. Winkler (2001). The “inshore retention concept” and its significance for large rivers. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 135 (2–4): 509–516.
- Schiemer, F. & W. Reckendorfer (2004). Das Donau-Restaurierungsprojekt. Ökologische Auswirkungen. Wien, Verlag der Zoologisch-Botanische Gesellschaft in Österreich.
- Schiemer, F. (1995). Revitalisierungsmaßnahmen für Augewässer-Möglichkeiten und Grenzen. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 101: 383–398.
- Schmidt, W. F. (2001). Ecology – A true-blue vision for the Danube. *Science* 294 (5546): 1444ff.
- Seitzinger, S.P., R.V. Styles, E.W. Boyer, R.B. Alexander, G. Billen, R.W. Howarth, B. Mayer & N. Van Breemen (2002). Nitrogen retention in rivers: model development and application to watersheds in the northeastern USA. *Biogeochemistry* 57/58 (1): 199–237.
- Sparks, R.E. & A. Spink (1998). Disturbance, succession and ecosystem processes in rivers and estuaries: effects of extreme hydrologic events. *Reg. Rivers Res. & Manag.* 14: 155–159.
- Thorp, J.H. & A.F. Casper (2003). Importance of biotic interactions in large rivers: An experiment with planktivorous fish, dreissenid mussels and zooplankton in the St Lawrence River. *River Research and Applications* 19 (3): 265–279.
- Thorp, J.H., M.C. Thoms & M.D. Delong (2006). The riverine ecosystem synthesis: biocomplexity in river networks across space and time. *River Research and Applications* 22 (2): 123–147.
- Thuiller, W. (2007). Climate change and the ecologist. *Nature* 448: 550–553.
- Tockner, K., F. Malard & J.V. Ward (2000). An extension of the flood pulse concept. *Hydrological Processes* 14: 2861–2883.

- Tockner, K., D. Pennetzdorfer, N. Reiner, F. Schiemer & J.V. Ward (1999). Hydrological connectivity, and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river-floodplain system. *Freshw. Biol.* 41: 521–535.
- Tockner, K. & F. Schiemer (1997). Ecological aspects of the restoration strategy for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. *Global Ecology and Biogeography Letters* 6: 321–329.
- Tockner, K., F. Schiemer & J.V. Ward (1998). Conservation by restoration: The management concept for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. *Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystems*.
- Tockner, K. & J.A. Stanford (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation* 29 (3): 308–330.
- Townsend-Small, A., M.E. McClain & J.A. Brandes (2005). Contributions of carbon and nitrogen from the Andes Mountains to the Amazon River: Evidence from an elevational gradient of soils, plants, and river material. *Limnology and Oceanography* 50 (2): 672–685.
- Vannote, R., G. Minshall, K. Cummins, J. Sedell & C. Cushing (1980). The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130–137.
- Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco & J.M. Melillo (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277 (5325): 494–499.
- Wade, A.J. (2006). Monitoring and modelling the impacts of global change on European freshwater ecosystems. *Science of the Total Environment* 365: 3–14.
- Welter, J.R., S.G. Fisher & N.B. Grimm (2005). Nitrogen transport and retention in an arid land watershed: Influence of storm characteristics on terrestrial-aquatic linkages. *Biogeochemistry* 76 (3): 421–440.
- Wood, P.J., Hannah, D.M. & J.P. Sadler (2007). *Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future*. Wiley, USA.
- WWF (1999). Evaluation of wetlands and floodplains areas in the Danube river basin. Final report of the Danube Pollution Reduction Programme.
- Zessner, M., C. Postolache, A. Clement, A. Kovacs & P. Strauss (2005). Considerations on the influence of extreme events on the phosphorus transport from river catchments to the sea. *Water Science and Technology* 51 (11): 193–204.
- Zessner, M., C. Schilling, O. Gabriel & U. Heinecke (2005). Nitrogen fluxes on catchment scale: the influence of hydrological aspects. *Water Science and Technology* 52 (9): 163–173.
- Zweimüller, I., Zessner M. & T. Hein (2008). Effects of climate change on nitrate transport in a large river: the Austrian Danube as an example. *Hydrological Processes*, 22 (7): 1022–1036.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Umwelt - Schriftenreihe für Ökologie und Ethologie](#)

Jahr/Year: 2009

Band/Volume: [34](#)

Autor(en)/Author(s): Hein Thomas, Kucera-Hirzinger Verena, Preiner Stefan, Schiemer Fritz, Weigelhofer Gabriele

Artikel/Article: [Der Mensch und die Flusslandschaften - Rolle natürlicher Flusslandschaften. 113-137](#)