

## 6 Simulation der Ablagerung von Feinsedimenten auf Vorländern

*Fliessgewässer erstrecken sich über das zugehörige Gerinne hinaus. Die Vorländer und Auen sind aus ökologischer Sicht von besonderem Interesse: Wiederkehrende Überschwemmungen schaffen dort spezielle Bedingungen und fördern unter anderem die Ansiedlung vieler schutzbedürftiger Arten. In diesem Kapitel werden die hydro- und morphodynamischen Prozesse der Feinsedimentablagerung und die entsprechenden numerischen Simulationswerkzeuge vorgestellt. Ein Aspekt, der bei Flussrevitalisierungsprojekten relevant ist.*

**Daniel Conde, Carmelo Juez, Davide Vanzo, Christoph Scheidegger, Giovanni De Cesare und David Vetsch**

### 6.1 Einleitung

Wenn Flüsse und Bäche durch Täler fließen, transportieren sie Wasser zusammen mit beträchtlichen Mengen an anorganischen Sedimenten und organischem Material. Größere Körner wie Geröll und Kies werden als Geschiebe und im engen Kontakt mit dem Flussbett transportiert (Van Rijn 2005). Feinere Körner, in der Regel mit einem maximalen Durchmesser von 2 mm, werden als Schwebstoffe transportiert (Van Rijn 1984) und durch die Strömung in der Schwebe gehalten. Dabei handelt es sich meist um eine Kombination aus Schluff, Ton und Feinsand, deren Konzentration je nach Fliesstiefe variiert: hoch in der Nähe des Flussbetts und abnehmend zur Oberfläche hin. Der Hauptfokus dieses Kapitels liegt auf der Identifizierung und Modellierung der relevanten Prozesse beim Schwebstofftransport, und der Quantifizierung ihrer Auswirkungen auf die Hydro- und Morphodynamik von Fliessgewässern. Dabei konzentrieren wir uns insbesondere auf Vorländer und Auen (Abb. 33), da diese sowohl für den Hochwasserschutz als auch hinsichtlich der ökologischen Funktionen eine wichtige Rolle spielen (Baptista *et al.* 2018).

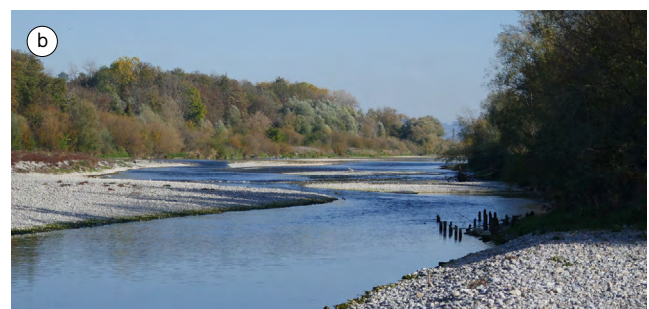
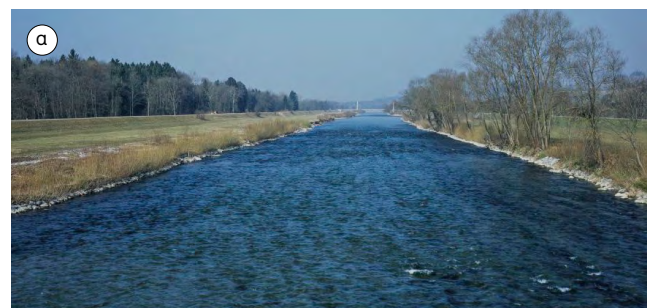
Vorländer stellen den notwendigen Raum zur Verfügung, um auch bei Hochwasser grosse Abflüsse sicher abzuleiten, und helfen somit, menschliche Siedlungen und Aktivitäten zu schützen. Zudem sind sie ein Retentionsraum und erlauben eine vorübergehende Abflussregulierung, den Rückhalt von Treibholz und die Ablagerung von Sedimenten. Bezüglich der ökologischen Funktionen spielen Vorländer eine wichtige Rolle als Verbindungsglied zwischen den Ökosystemen der Fliessgewässer und den angrenzenden terrestrischen Ökosystemen. Eine Vielfalt von auenbewohnenden Arten

besiedelt diese Regionen und reagiert empfindlich auf das sensible Gleichgewicht zwischen Rückhalt von neuem Sediment und der Mobilisierung von altem Material. Die Bewahrung dieser Verbindungen ist für die ökologische Kontinuität von entscheidender Bedeutung.

Die geomorphologische Entwicklung des Fliessgewässers ist eng mit dem Mehrwert der Vorländer verbunden. Ob Erosion oder ob Ablagerung dominiert, wird hauptsächlich

#### Abbildung 33

*Beispiel Thur: (a) Abschnitt mit künstlichem Doppeltrapezgerinne und (b) mit Aufweitung nach der Sanierung.*



Fotos: (a) ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv / Fotograf: R. Huber. (b) VAW, ETH Zürich

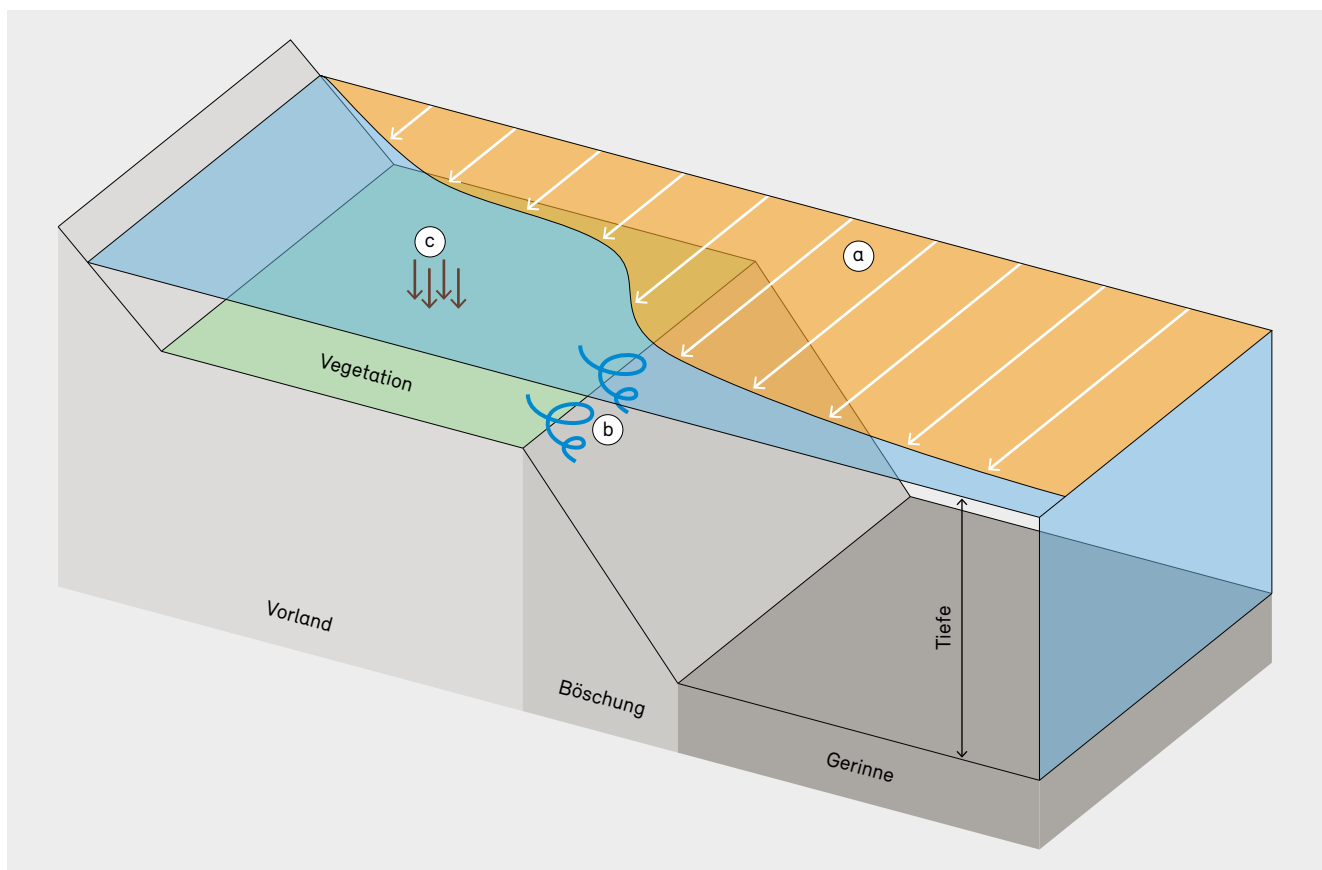
durch den Austausch von Wasser und Feinsedimenten zwischen Hauptgerinne und Vorland gesteuert. Ob das Vorland bewachsen ist, hat einen grossen Einfluss auf diese hydrodynamischen Austauschprozesse, da Vegetation eine Verringerung der Fließgeschwindigkeit gegenüber dem Hauptgerinne bewirkt. Dieses Strömungsmuster entwickelt sich bei allen Vegetationstypen und erzeugt starke tangentiale Kräfte zwischen der Strömung im Flussbett und jener im Vorland, was zur Bildung einer Scherschicht führt (Abb. 34). Diese Schicht weist typischerweise mehrere Wirbel auf, die einen seitlichen Austausch und eine Durchmischung bewirken. Die Quantifizierung dieses lateralen Austausches ist entscheidend für die Abschätzung der effektiven Abflusskapazität eines Flusses, vor allem bei

erhöhten Abflüssen, sowie für die zu erwartenden morphologischen und ökologischen Veränderungen.

Das Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (GSchG, 1991) und die Gewässerschutzverordnung (GSchV, 1998) fordern die Revitalisierung (Abb. 33) von Tausenden von Flusskilometern unter Berücksichtigung von hydromorphologischen und ökologischen Überlegungen. Das politische Ziel ist die Wiederherstellung von Lebensräumen für charakteristische Tiere, Pflanzen und Pilze bei gleichzeitiger Erhaltung oder Verbesserung des Hochwasserschutzes und der Sedimentdynamik. Es besteht also ein Bedarf an robusten Modellen zur Simulation der Morphodynamik von Fließgewässern.

#### Abbildung 34

Typische Konfiguration der Strömung über ein Vorland: (a) Geschwindigkeitsverteilung, (b) Wirbel in der Scherschicht und (c) seitliche Sedimentablagerung.



## 6.2 Numerische Modellierung

Ein numerisches hydro-morphodynamisches Modell liefert, vereinfacht ausgedrückt, eine virtuelle Darstellung der Wasserströmung und des Sedimenttransports. Solche Modelle sind ein weitverbreitetes und anerkanntes Werkzeug im Fluss- und Wasserbau, das in der Praxis vielfache Anwendungen findet. Relevante Fliessgewässer sind Flüsse, Bäche und Mündungsbereiche. Die hier verwendete Software BASEMENT (Vanzo *et al.* 2021) wurde an der VAW der ETH Zürich entwickelt und ist frei erhältlich. Das Herzstück dieser Software ist ein Hydrodynamik-Modul, das hydro- und morphodynamische Prozesse durch verschiedene Modellierungsansätze simulieren kann und Wasserströmung, Reibungskräfte, Turbulenz und Sedimenttransport berücksichtigt.

Turbulente Grössen spielen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der gesamten Reibungskräfte sowie beim Transport der mitgeführten Stoffe. Zur Quantifizierung der turbulenten kinetischen Energie der Strömung werden energieerhaltende Modelle verwendet. Einfachere und weniger anspruchsvolle Methoden zur Berechnung der turbulenten Grössen können ebenfalls eingesetzt werden. Zur Modellierung der Schwebstofffracht wird ein Advektions-Diffusions-Modell mit bekannten empirischen Formeln aus der Literatur kombiniert (Van Rijn 1984), gemäss denen eine höhere Sohlschubspannung zu einer grösseren Sedimentmobilität führt.

Alle Funktionen von BASEMENT sind in einen intuitiven Workflow implementiert, dank dem Modelliererinnen und Modellierer die hydro- und morphodynamischen Prozesse auf verschiedenen flussbaulichen Skalen effizient simulieren können (Vanzo *et al.* 2021). In diesem Kapitel wird BASEMENT zur Modellierung von kleinräumigen Prozessen genutzt, unterstützt durch experimentelle Beobachtungen im Labor (Juez *et al.* 2019), und dann anhand einer Fallstudie auf Fliessgewässerebene hochskaliert.

## 6.3 Prozesse

Eine Reihe von Laborexperimenten wurde konzipiert und durchgeführt, um den Einfluss der Gerinnegeometrie und allfälliger Vegetation auf dem Vorland

(Vorlandbeschaffenheit) auf die hydro- und morphodynamischen Prozesse in Doppeltrapezgerinnen zu untersuchen (Juez *et al.* 2019). Die Ergebnisse sollen die Entwicklung und Anwendung von numerischen Modellen unterstützen, beispielsweise bei der Planung zukünftiger Wasserbauprojekte, und so dazu beitragen, Probleme im Zusammenhang mit Feinsedimenten zu vermindern. Die Abflüsse in Doppeltrapezgerinnen wurden durch mehrere Tests an einem verkleinerten Modell im Labor des Forschungsinstituts PL-LCH der EPFL physikalisch beschrieben. Die gleichen Tests wurden auch in einem numerischen Modell mit BASEMENT simuliert, um gezielt zu untersuchen und zu verifizieren, welche Parameter am relevantesten sind. Diese sind:

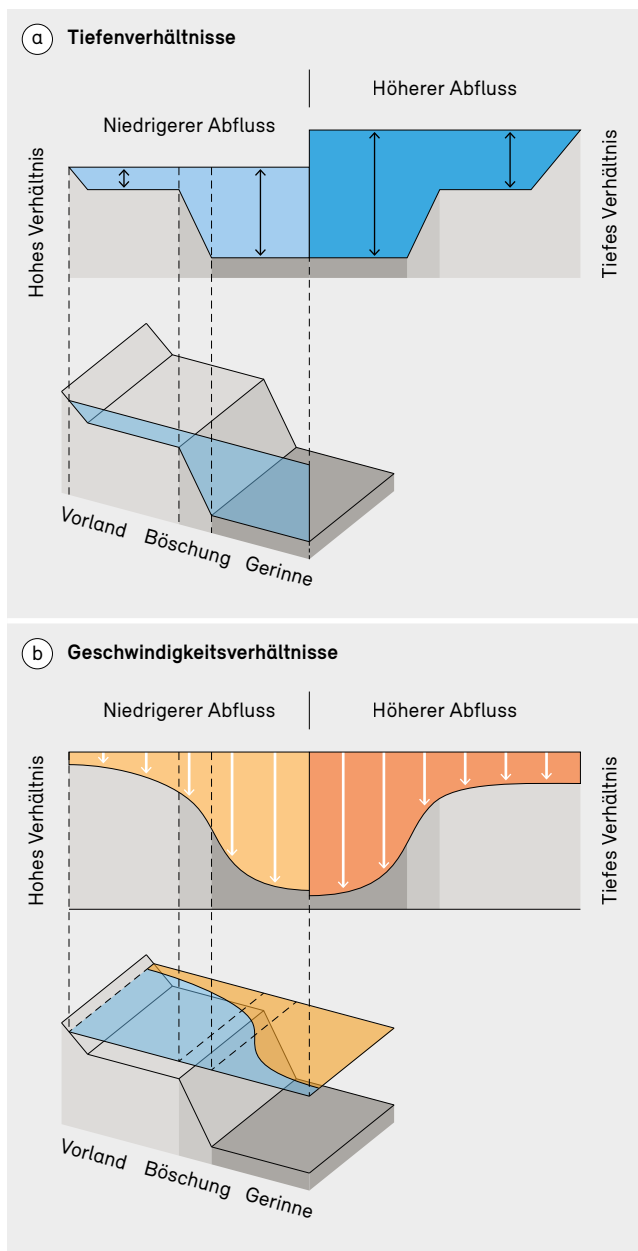
- (i) Tiefenverhältnis: Verhältnis zwischen der Abflusstiefe des Hauptgerinnes und derjenigen des Vorlands
- (ii) Geschwindigkeitsverhältnis: Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Fliessgeschwindigkeit im Hauptgerinne und im Vorland
- (iii) Breitenverhältnis: Verhältnis zwischen der Breite des Vorlands und des Hauptgerinnes
- (iv) Art und Rauheit der Vorlandbeschaffenheit

Das massstäbliche Labormodell und sein virtuelles Gegenstück umfassten ein gerades Gerinne mit einem einseitig angeordneten Vorland, unterschiedlicher Vorlandbeschaffenheit und Instrumenten zur Messung von Fliesstiefe, Oberflächengeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration. Um zuverlässige Messergebnisse zu gewährleisten, wurden alle Messungen unter konstanten und gleichmässigen Strömungsbedingungen aufgezeichnet, wobei die lokalen Tiefen und Geschwindigkeiten zeitlich und räumlich stabil gehalten wurden.

Die in den Experimenten untersuchten Abflüsse basieren auf einer bekannten Flusshydrologie. Die Ergebnisse zeigten, dass höhere Abflüsse zu niedrigeren Tiefen- und Geschwindigkeitsverhältnissen führen (Abb. 35). Das Geschwindigkeitsverhältnis hängt auch vom Breitenverhältnis ab, wobei in schmalen Gerinnen tiefere Werte (grösseres Breitenverhältnis) auftreten. Der relative Geschwindigkeitsunterschied zwischen Hauptgerinne und bewachsenem Vorland (Abb. 36a) begünstigt das Auftreten von horizontalen Wirbeln, die für den seitlichen Massenaustausch entscheidend sind. Zudem kommt es bei

**Abbildung 35**

Auswirkung von niedrigeren (links) und höheren (rechts) Abflüssen auf (a) Tiefen- und (b) Geschwindigkeitsverhältnisse.



Quelle: VAW, ETH Zürich

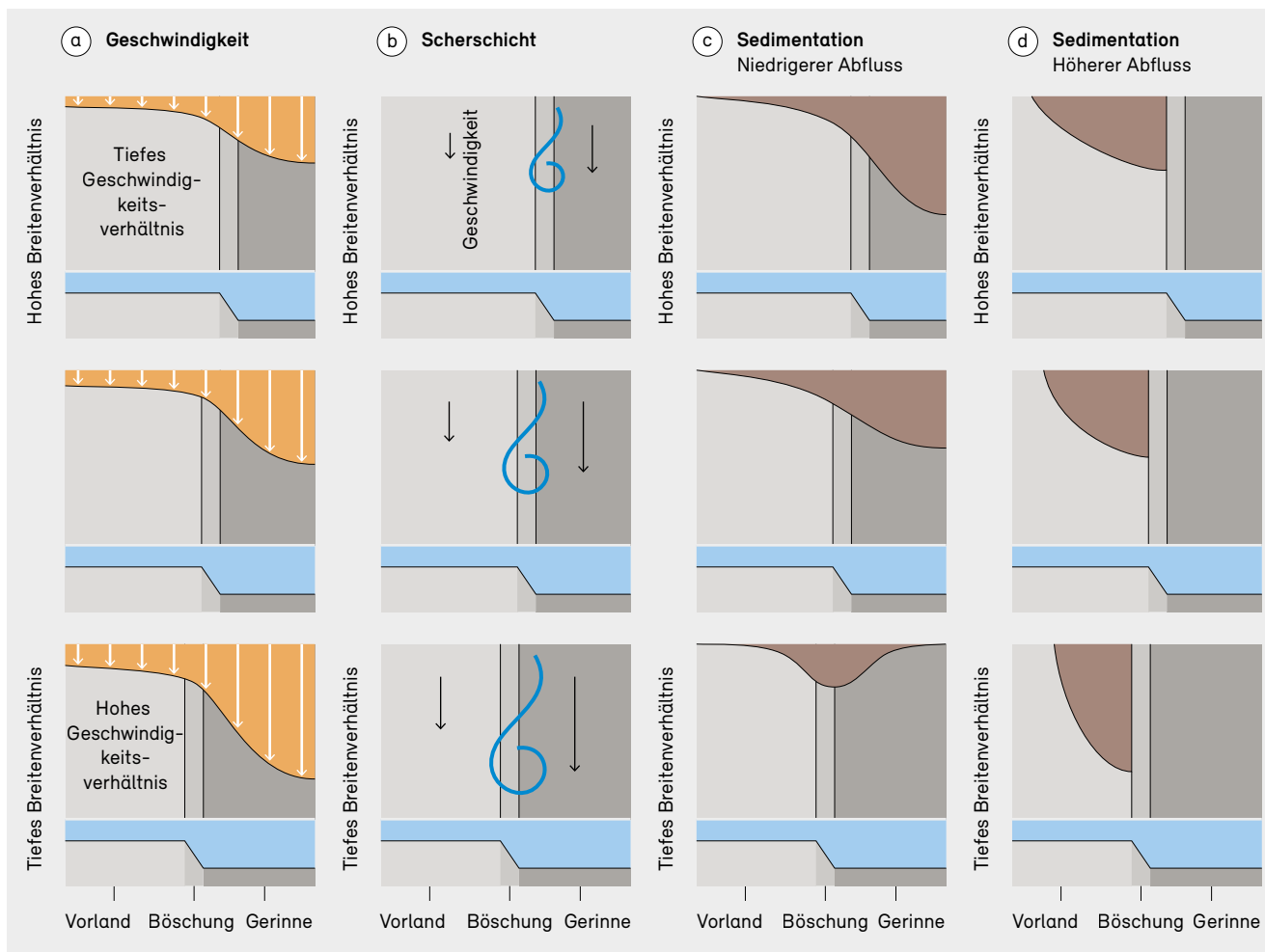
breiteren Hauptgerinnen (geringeres Breitenverhältnis) zu einer grösseren Geschwindigkeitsvariation (dargestellt als Pfeile in Abb. 36a), was zu breiteren Scherschichten und Wirbeln führt (Abb. 36b).

Die Experimente zeigten, dass zunehmende Reibungsverluste aufgrund von zunehmender Vegetation auf den Vorländern zu einem zunehmenden Geschwindigkeitsverhältnis beitragen. Ein sekundärer Effekt wurde in der Scherschicht beobachtet, wo eine Verminderung ihrer Breite zu einem leichten Anstieg der maximalen Belastungsintensität in engeren, dicht bewachsenen Gerinnen führte. Hinsichtlich der Ablagerung von Schwebstoffen zeigten die Versuche, dass der Abfluss und die entsprechenden Tiefenverhältnisse (Abb. 35) ebenfalls einen erheblichen Einfluss haben. Bei kleineren Abflüssen mit geringerer Abflusstiefe (grösseres Tiefenverhältnis) in bewachsenen Vorländern wurde beobachtet, dass die Sedimentation im Hauptgerinne hauptsächlich durch das Breitenverhältnis gesteuert wird, wobei bei engeren Geometrien mehr Sediment im Gerinne konzentriert wird (Abb. 36c). Bei grösseren Abflüssen mit grösserer Abflusstiefe (geringeres Tiefenverhältnis) wurde festgestellt, dass sich die Sedimente weiter ins Vorland ausbreiten und überwiegend dort abgelagert werden (Abb. 36d), während im Hauptgerinne fast keine Sedimentation auftritt. In einem unbewachsenen Vorland wurde eine stärkere seitliche Ausbreitung von Sedimenten beobachtet, vor allem in engeren Gerinnen (grösseres Breitenverhältnis).

Schliesslich zeigten die Experimente, dass der seitliche Wasser- und Schwebstoffaustausch primär durch die Tiefen- und Breitenverhältnisse und sekundär durch die Rauheit des Vorlands beeinflusst wird. Es wurde beobachtet, dass ein engeres Hauptgerinne einen höheren seitlichen Eintrag aufweist. Dies lässt sich durch die Ausprägung von Wirbeln in der Scherschicht erklären und führt letztlich zu einer verstärkten Sedimentdispersion entlang des Vorlands, vor allem bei kleineren Abflüssen. Der massgebende Faktor sowohl für die hydro- als auch die morphodynamischen Prozesse in einem Doppeltrapezgerinne mit bewachsenem Vorland ist das Geschwindigkeitsverhältnis, während der unbedeutendste Faktor das Vorhandensein von höherer baumartiger Vegetation ist. Dies gilt vor allem für Doppeltrapezgerinne mit einer wie in den Laborexperimenten verwendeten einfachen Geometrie. Für komplexere Geometrien muss das Verhalten separat untersucht werden, entweder mit einem physikalischen oder einem numerischen Modell.

Abbildung 36

Verschiedene Auswirkungen (Draufsicht) eines engeren (grosses Breitenverhältnis) oder breiteren (geringeres Breitenverhältnis) Gerinnes: (a) Geschwindigkeitsverteilungen, (b) Scherschicht und Sedimentationsverteilung bei (c) niedrigerem oder (d) höherem Abfluss.



Quelle: VAW, ETH Zürich

## 6.4 Ökologische Aspekte

Vorländer oder Auengebiete sind Ökosysteme eines Fließgewässers, die von Störungen durch Hochwasser, Sedimenttransport und schwankendes Grundwasser abhängen. Sedimente unterschiedlicher Korngrösse spielen bei der Gestaltung von Lebensräumen eine wichtige Rolle, vor allem, weil die Wasserspeicherkapazität von Sedimenten mit abnehmender Korngrösse zunimmt. Bereiche mit einem hohen Anteil an Feinsedimenten sind wichtige Keimstellen für Pflanzen, Moose und Flechten und bestimmen die Sukzession der Auenvegetation. Starke Abhängigkeiten zwischen Gerinnemorphologie,

Strukturelementen (z. B. Kiesbänken), Schwemmholz und grösseren Steinblöcken bilden ein vielfältiges und seitlich vernetztes Umfeld, das die Entwicklung unterschiedlicher und widerstandsfähiger Ökosysteme ermöglicht.

Angesichts des begrenzten Raums konzentriert sich die Auenrevitalisierung auf hochdynamische Ökosysteme, darunter Kiesbänke und frühe Sukzessionsstadien von Auenwäldern (*Salicion elaeagni*, *Alnion incanae*). Späte Sukzessionsstadien mit Tümpeln und stark ausgetrockneten offenen Flächen (*Psoretea decipiens*, bunte Bodenkrustengemeinschaften), die selten überschwemmt werden, sind gegenwärtig in revitalisierten Auen zu wenig

vertreten. Häufiger Nebel und hohe Luftfeuchtigkeit in diesen ansonsten trockenen Umgebungen begünstigen Lebensgemeinschaften mit Arten wie der mysteriösen Sternchen-Buellie *Buellia asterella*: Sie besiedelt häufig verdichteten, nur selten überfluteten Sandboden. Diese Art ist in der Schweiz ausgestorben und weltweit bedroht.

Die Ergebnisse der oben genannten Experimente zeigen, dass das Vorhandensein höherer Bäume keinen erheblichen Einfluss auf die Hydro- oder Morphodynamik hat. Der Einfluss von Sträuchern wurde im Labor nicht getestet, obwohl ein hohes Vorkommen die Auswirkungen von grasartiger Vegetation verstärken und möglicherweise zu einer grösseren Ablagerung führen könnte. Das Angebot an grossen Strukturelementen ist auch relevant für die Entstehung einer hohen Diversität und die Etablierung der charakteristischen Artenvielfalt von Auen. Grobes Treibholz ist wichtig im Bereich eines verzweigten Gerinnes, wo auch einige selten überschwemmte Standorte geschaffen werden können. Das Anlegen von Kiesbänken und Platzieren von grösseren Steinblöcken an selten überfluteten Stellen könnte die Lebensraumvielfalt in revitalisierten Auen erheblich steigern.

## 6.5 Fallstudie

Wir verwenden einen Abschnitt des Alpenrheins bei Widnau (CH) und Höchst (AT) (Abb. 37) als Fallstudie, um die morphodynamische Simulation von Feinsedimenten in Vorländern zu demonstrieren. Die Quelle des Alpenrheins liegt im Kanton Graubünden in den Schweizer Alpen und auf der internationalen Strecke fliesst der Fluss entlang der Grenze zu Liechtenstein und Österreich in Richtung Bodensee. Aufgrund der dichten Besiedlung und vorhandenen Infrastrukturen stromabwärts der Illmündung ist der Schutz dieser Region vor Hochwasser von grosser Bedeutung: Das Schadenspotenzial wird auf rund 10 Milliarden Franken geschätzt. Laufende Revitalisierungsprojekte haben zum Ziel, die Abflusskapazität des Alpenrheins durch Aufweitungen des Gerinnes zu steigern.

Hier wird eine beispielhafte Anwendung mit der Simulationssoftware BASEMENT gezeigt. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von km 80,1 bis km 82,6 des Alpenrheins (Abb. 37), wo die Siedlungen bis zum Rand der äusseren Hochwasserschutzdämme reichen. Die Modellierung

umfasst die meisten der in BASEMENT verfügbaren Module, nämlich Hydrodynamik mit Reibungs- und Turbulenzmodellierung sowie Morphodynamik mit Geschiebe- und Schwebstoffmodellierung.

Die Gerinnereibung, respektive die Schubspannung zwischen Sohle und Strömung, wird mit einem empirischen Ansatz unter Verwendung eines Rauheitsbeiwerts berechnet. Vorhandene Vegetation und ihr hydrodynamischer Widerstand werden ebenfalls mit diesem Rauheitsbeiwert berücksichtigt, unabhängig ihres Typs. Die turbulenten Grössen in der Scherschicht zwischen dem Hauptgerinne und dem Vorland werden mit einem «k-ε»-Modell berechnet. In Bezug auf die Sedimentdynamik werden die Ansätze von Meyer-Peter und Müller für Geschiebe und von Van Rijn für Schwebstoffe verwendet (Vetsch *et al.* 2021). Beispielhafte Setup-Dateien für derartige Anwendungen sind auf der BASEMENT-Webseite ([www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch)) zu finden.

Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 38d dargestellt. Als Randbedingungen wird stromaufwärts und

**Abbildung 37**

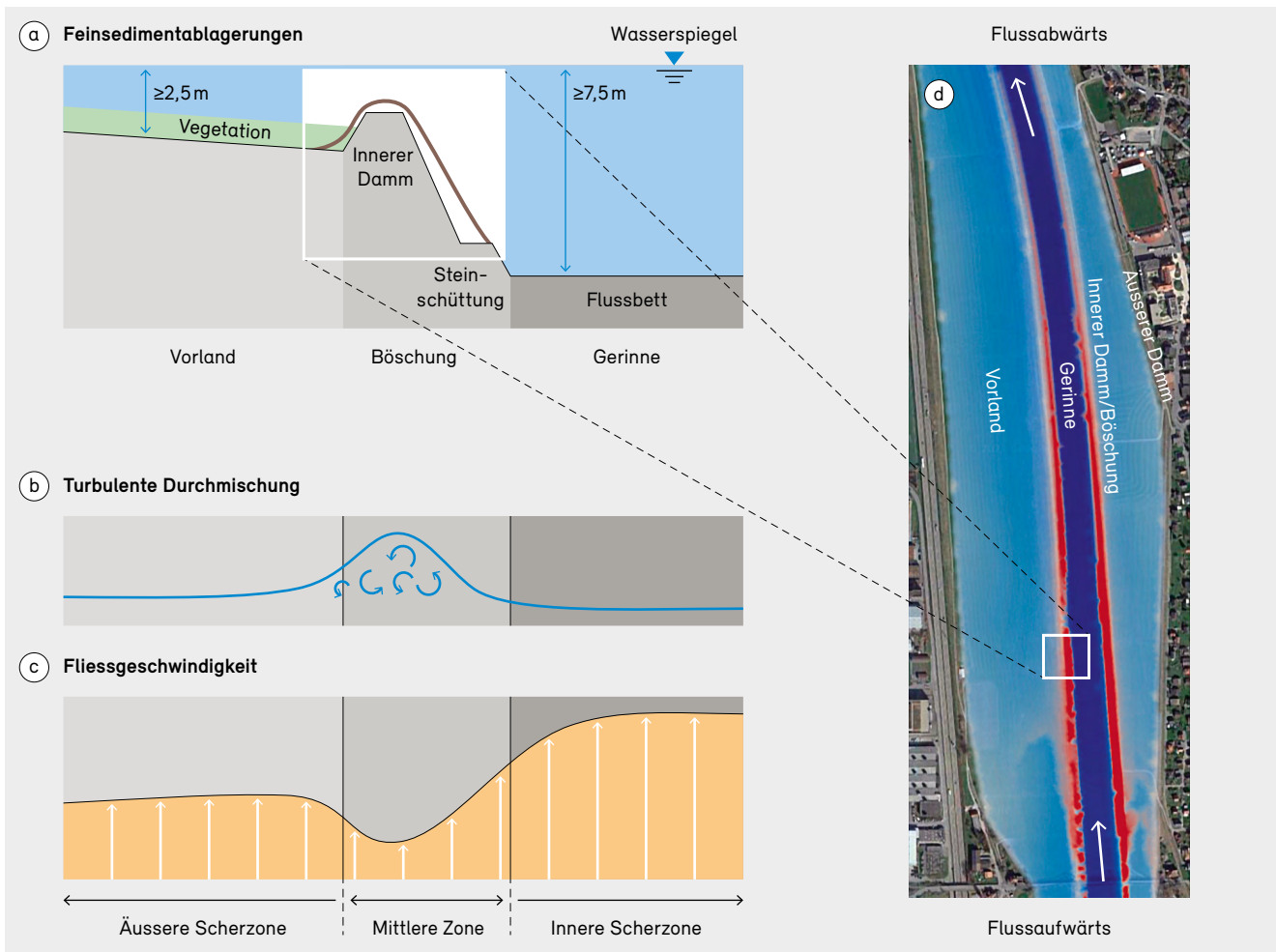
In der Fallstudie betrachteter Flussabschnitt: Alpenrhein bei Widnau (a) bei Niedrigwasser und (b) bei Hochwasser (Blick in Flussrichtung).



Quelle: IRR

**Abbildung 38**

Schematische Darstellung der Ergebnisse für die aktuelle Situation im Alpenrhein bei  $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ : (a) Querschnittansicht der Sedimentablagerung (braune Linie), (b) turbulente Durchmischung, (c) Geschwindigkeitsverteilung und (d) Draufsicht auf den untersuchten Abschnitt, mit Sedimentablagerung in Rot.



Quelle: VAW, ETH Zürich / Luftbild © swisstopo

stromabwärts Normalabfluss angesetzt. Die Reibungsbeiwerte werden anhand der Pegeldata an der Messstation Diepoldsau kalibriert. Die ermittelten Werte stimmen mit den bekannten Werten für grasbewachsene Vorländer (dies entspricht der heutigen Situation), Gerinne mit Kiesbett und Böschungssicherung aus Steinblöcken überein.

Wie in den Laborexperimenten ist auch hier der Einfluss der turbulenten Prozesse deutlich zu erkennen, wobei sich auf beiden Seiten der inneren Dämme zwei ausgeprägte Scherzonen entwickeln (Abb. 38b), die einen fließenden Geschwindigkeitsübergang zwischen Bereichen mit geringer und hoher Rauigkeit zeigen. Ohne eine sorgfältige

Parametrisierung dieses Prozesses werden die Scherschichten nicht erfasst und die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt ist möglicherweise physikalisch nicht korrekt. Die simulierten Sedimentablagerungsmuster treten tendenziell entlang der gerinneseitigen Böschung der inneren Dämme auf (Abb. 38a), wobei bei einer Überströmung bei höheren Abflüssen ( $> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) eine zusätzliche, wenn auch geringfügigere Sedimentation in den Vorländern auftritt. Zwar ist die Geometrie dieses Systems nicht vergleichbar mit der in den Laborexperimenten verwendeten, aber das gleiche Verhalten wurde bei den jüngsten Hochwassern in den Jahren 2005 und 2009 beobachtet und ist auch in Bezug auf die Geschwindigkeitsmuster realistisch, da Bereiche mit niedrigeren

Geschwindigkeiten zu höheren Ablagerungsraten führen (Abb. 38a, b). Es werden zwei Abflussszenarien betrachtet –  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  und  $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  –, die den Strömungsverhältnissen des Haupt- respektive des Doppeltrapezgerinnes entsprechen. Für die Randbedingung stromaufwärts wird die durchschnittliche jährliche Schwebstoffkonzentration des Alpenrheins verwendet.

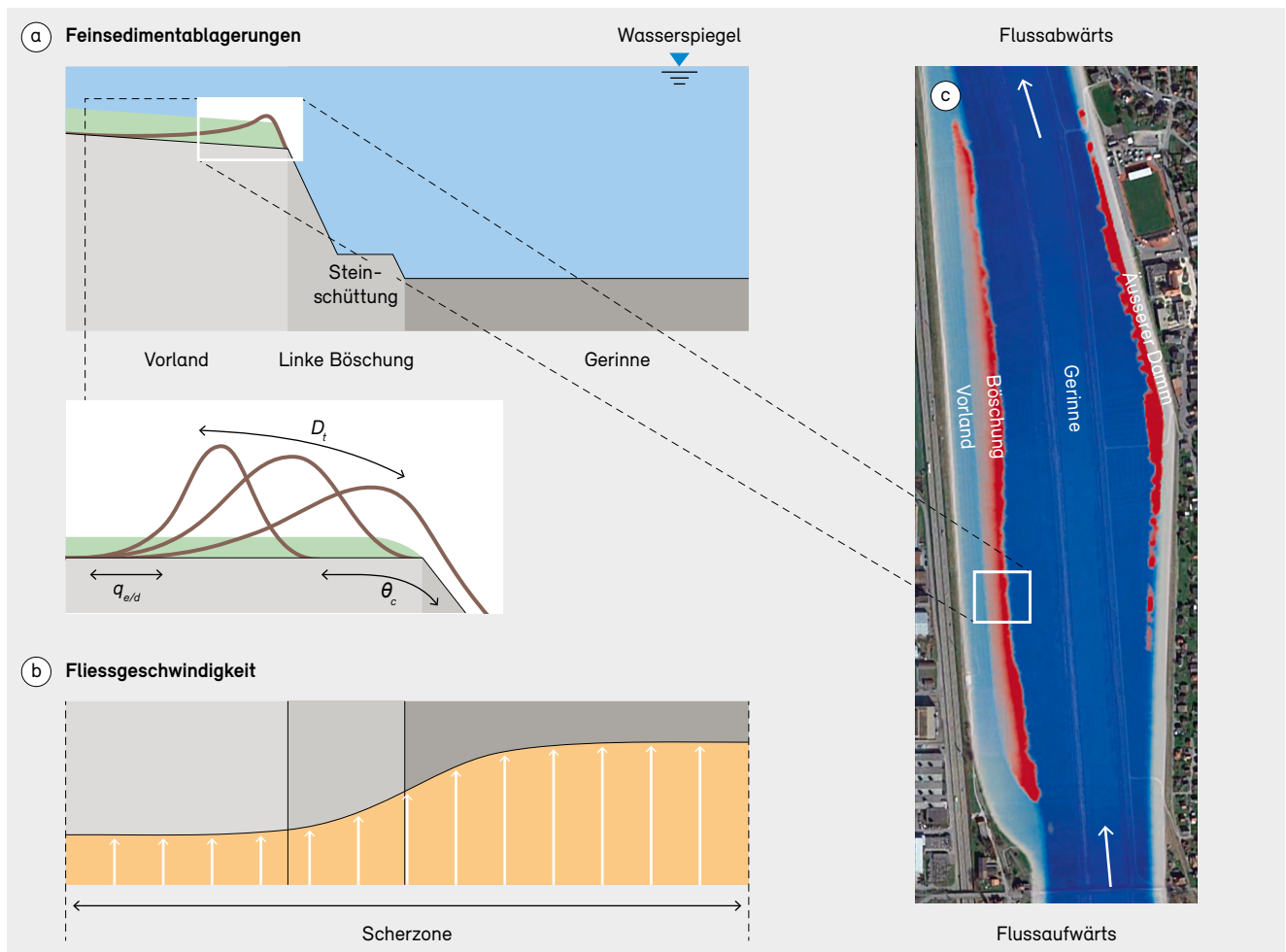
Die abgelagerte Sedimentmenge nimmt mit zunehmendem Abfluss zu, was darauf hinweist, dass die Sedimentverfügbarkeit eine wichtige Rolle spielt und die Wahrscheinlichkeit, dass nachfolgende Hochwasser frühere Ablagerungen in den Vorländern wegschülen, vermindert ist. Das wahrscheinliche

Ergebnis ist ein kontinuierlicher Ablagerungsprozess in den Vorlandbereichen neben den Dämmen, wenn diese bei Abflüssen  $> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  überflutet werden, ebenso wie an den Böschungen, selbst bei Abflüssen  $< 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Dadurch verringert sich die Abflusskapazität des Gerinnes. Bei den Referenzszenarien beträgt die Gesamtablagerung nach kurzen Hochwasserereignissen (48 h) 0,8 bis 1,6 % (8000 bis 16 000  $\text{m}^3$ ) des vorhandenen Abflussbereichs des Vorlands.

Diese Anwendung zeigt, wie BASEMENT genutzt werden kann, um den aktuellen und zukünftigen Unterhaltsbedarf in Abhängigkeit der Verhältnisse auf den Vorländern zu bewerten. Ein einfaches Setup, wie hier beschrieben,

**Abbildung 39**

Schematische Darstellung der Ergebnisse für den revitalisierten Flussabschnitt bei  $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ : (a) Querschnittansicht der Sedimentablagerung (braune Linie) und Einfluss der Modellparameter, (b) Geschwindigkeitsverteilung und (c) Draufsicht auf den untersuchten Abschnitt, mit Sedimentablagerung in Rot. Die dargestellten Parameter sind: turbulente Diffusion ( $D_t$ ), kritische Sohlschubspannung ( $\theta_c$ ) und vertikale Austauschrate ( $q_{e/d}$ ).





kann auch bei der Planung künftiger Revitalisierungsprojekte eingesetzt werden. Als Beispiel nehmen wir eine revitalisierte Konfiguration des gleichen Flussabschnitts (Abb. 39c), wobei die Modelle und Annahmen der ersten Anwendung beibehalten werden. Eine solche Konfiguration umfasst eine starke Aufweitung des Hauptgerinnes, eine vollständige Aufhebung des rechten und eine Verkürzung des linken Vorlands um etwa die Hälfte. Bei hohen Abflüssen ( $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) zeigen die Ergebnisse eine einzige Scherschicht (Abb. 39b) und eine überwiegende Ablagerung von Feinsedimenten auf dem noch vorhandenen linken Vorland (Abb. 39a, c), die je nach Konfiguration des Sedimenttransport-Moduls 0,4 bis 0,9 % der vorhandenen Abflussfläche ( $2000$  bis  $4500 \text{ m}^3$ ) beträgt. Bei geringeren

Abflüssen ( $< 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) erfolgt die Ablagerung hauptsächlich an den Böschungen und im Hauptgerinne.

Die wichtigsten Parameter (Abb. 39a) in diesem Beispiel sind die turbulente Durchmischung ( $D_t$ ), die kritische Sohlschubspannung ( $\theta_c$ ) und die vertikale Austauschrate ( $q_{e,d}$ ). Die turbulente Durchmischung ist der wichtigste Proxy für den Massenaustausch zwischen Hauptgerinne und Vorland und fördert den seitlichen Sedimenteintrag und die Dispersion im Vorland. Die kritische Sohlschubspannung steuert den Beginn des Sedimenttransports und verlagert die Ablagerung vom Hauptgerinne in die Seitenbereiche. Die übrigen Parameter bestimmen die Erosions- und Ablagerungsraten von Schwebstoffen im Vorland.

### Box 9: In der Praxis – Beseitigung von Feinsedimenten aus Vorländern

*Daniel Dietsche und Mathias Speckle, Internationale Rheinregulierung (IRR)*

Der in diesem Kapitel beschriebene Abschnitt des Alpenrheins fällt in den Zuständigkeitsbereich der Internationalen Rheinregulierung (IRR), gemäss der sich das rasche Beseitigen von Sedimenten nach Hochwassern, d. h. deren Ausbaggerung und Rückführung in das Hauptgerinne, als ausgesprochen wirksam erwiesen hat. Äste und Wurzelmaterial werden in den Mündungsbereich transportiert und zur ökologischen Landschaftsgestaltung verwendet. Das abgelagerte Sediment kann auch zu einem späteren

Zeitpunkt entfernt werden, aber es braucht eine regelmässige Überwachung und Vorhersagen, um sicherzustellen, dass die bemessene Abflusskapazität bewahrt wird. Beobachtungen zufolge führt Vegetation dazu, dass mehr Sediment abgelagert wird, selbst bei niedrigen Wasserständen. Dieses praktische Beispiel zeigt, dass genaue Instrumente zur Vorhersage der abgelagerten Sedimentmenge und zur Erprobung möglicher Lösungen für deren Beseitigung erforderlich sind. Die fortschrittlichen numerischen Möglichkeiten von BASEMENT unterstützen Behörden und private Ingenieurbüros dabei, die Fliessgewässer in der Schweiz sicher und ökologisch nachhaltig zu entwickeln.