



Wie resilient sind unsere Flüsse? – Grundlagen für die Erstellung eines Feststoffmanagementkonzepts am Beispiel der Gail

Sabrina Schwarz · Rolf Rindler · Hannes Poglitsch · Philipp Gmeiner · Helmut Habersack

Angenommen: 19. April 2023 / Online publiziert: 5. Juni 2023
© Der/die Autor(en) 2023

Zusammenfassung Durch Eingriffe in Flussläufe für die Schifffahrt, Schutzfunktionen, menschliche Lebensräume oder durch das Abschmelzen der Gletscher verändert sich zwingend auch der Feststoffhaushalt, wodurch es Flüssen nicht mehr möglich ist, diesen ohne langfristige negative Auswirkungen selbst steuern zu können. Dadurch folgen Sohlhöhenänderungen, die sich in Eintiefungen oder Anlandungen widerspiegeln, die wiederum die Funktion des Flusses als Verkehrswasserstraße, die Hochwasser-Schutzfunktion und die geschaffenen Lebensräume gefährden. Oftmals wird versucht diesen Auswirkungen mit punktuellen Maßnahmen entgegenzusteuern, die dann meistens nur eine kurzfristige positive Wirkung zeigen. Um ein langfristiges, selbststeuerndes und dadurch dynamisches Flusssystem schaffen zu können, welches auch im Einklang mit den genannten Funktionen eines Flusses

steht, sind resiliente Flüsse erstrebenswert. Ein resilienter Fluss befindet sich in einem dynamischen Gleichgewicht von Sedimentüberschüssen und -defiziten. Dafür sollen Feststoffmanagementkonzepte entwickelt werden. Ein funktionierendes Managementkonzept setzt ein umfassendes Verständnis über die Feststofftransportprozesse sowie den Sedimenteintrag und -austrag in einem Flusssystem voraus. Diese Prozesse können durch die Erstellung einer Feststoffbilanz ermittelt werden. Feststoffbilanzen wurden bereits weltweit an Flüssen durchgeführt, wie zum Beispiel am Rhein und der Isar in Deutschland, am Muga in Spanien, an der Rhone in Frankreich oder auch am Yellow River in China. Feststoffbilanzen können in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen erstellt werden. In diesem Artikel wird ein Fallbeispiel über die Grundlagen für die Erstellung eines Feststoffmanagementkonzepts der Gail in Kärnten dargestellt. Als Datengrundlage werden dafür Korngrößenanalysen, Sohlhöhen- und Kubaturanalysen und Analysen über die Geschiebetransportprozesse durchgeführt und damit eine Geschiebebilanz erstellt. Diese wird bereits durchgeführten Maßnahmen und Analysen gegenübergestellt, wodurch feststoffbezogene Abschnitte definiert werden, die die Grundlage für ein aktives und langfristiges Feststoffmanagement darstellen. Maßnahmen für einen resilienten Fluss sind Sedimentpufferzonen, die Remobilisierung von Sedimenten, angepasste Gerinnebreiten, eine angepasste Linieneinführung sowie ein kontinuierliches und langfristiges Feststoffmonitoring.

How resilient are our rivers? – The basis for the establishment of a sediment management concept for the example Gail river

Abstract The human interventions in rivers for waterways, flood protection, land reclamation or the melting of glaciers change the sediment regime. As a result, rivers are unable to self-regulate their sediment regime which causes long-term negative effects. This is followed by changes in riverbed levels, which are reflected as erosion or sedimentation, and endanger the river's function as a waterway, its protective function for human settlements. Attempts are made to counteract these effects with selective measures, which have a short-term positive effect. In order to be able to create a long-term, self-regulating and thus dynamic river system, which is also in balance with the above-mentioned functions of a river, resilient rivers are desirable. A resilient river is in a dynamic sediment balance of surpluses and deficits. Therefore, sediment management concepts should be developed to implement a sediment balance. A functional management concept requires a comprehensive understanding of sediment transport processes and sediment input and output in a river reach. These processes can be determined by developing a sediment budget. Sediment budgets have been conducted on rivers around the world in different time scales and dimensions, for instance on the Rhine and Isar rivers in Germany, the Muga River in Spain, the Rhone River in France, and the Yellow River in China. Sediment budgets can be performed at different temporal and spatial scales. In this paper, a case study on the establishment of the basis for a sediment management concept of the Gail River in Carinthia, Austria is presented. As a data basis, grain size analyses, bed level and cuba-

DI IN S. Schwarz (✉) ·
DI R. Rindler · DI P. Gmeiner ·
Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. H. Habersack
Department für Wasser
– Atmosphäre – Umwelt, Institut
für Wasserbau, Hydraulik und
Fließgewässerforschung, Universität
für Bodenkultur Wien, Am
Brigittenuer Sporn 3, 1220 Wien,
Österreich
sabrina.schwarz@boku.ac.at

DI R. Rindler
rolf.rindler@boku.ac.at

DI P. Gmeiner
philipp.gmeiner@boku.ac.at
Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. H. Habersack
helmut.habersack@boku.ac.at

DI H. Poglitsch
Abteilung 12 – Wasserwirtschaft,
Unterabteilung Hermagor, Amt der
Kärntner Landesregierung, Egger
Straße 26, 9620 Hermagor, Österreich
hannes.poglitsch@ktn.gv.at

Schlüsselwörter Feststoffbilanz ·
Sedimenttransportanalysen ·
Sohlhöhenänderungen · Anthropogene
Einflüsse · Langzeitmonitoring

ture analyses and analyses on bedload transport processes are carried out and thus a bedload budget is established. This is compared with measures and analyses that have already been carried out, thereby defining bedload-related reaches that form the basis for an active, long-term bedload management. Measures for a resilient river can be sediment buffer zones, remobilization of sediments, adapted channel widths and adapted alignment as well as continuous and long-term sediment monitoring.

Keywords Sediment budget · Sediment transport analysis · Bed level changes · Anthropogenic impacts · Long-term monitoring

1 Einleitung

Landschaftsformen, wie Täler und Auen, werden durch die Sedimenttransportdynamiken der Flüsse geprägt. Durch natürliche, wie zum Beispiel Seen, oder anthropogen verursachte Hindernisse in den Fließgewässern wird der Feststoffhaushalt beeinflusst (z.B. Gregory 2006; Frings et al. 2014; Cox et al. 2021; Maaß et al. 2021). Landnutzungsänderungen führen genauso zu Änderungen im Feststoffhaushalt (Kang and Kanniah 2022). Die Errichtung von Querbauwerken (z.B. Rückhaltesperren, Wehranlagen) beeinflusst das Sedimentkontinuum und das Transportvermögen (Marchi et al. 2019). Eine veränderte Transportkapazität verursacht Sohlhöhenänderungen und kann begründet werden durch Geschieberückhalte, eine Veränderung der Sohlbreite, eine Unterbindung der Seitenerosion und eine daraus resultierende Gefälleerhöhung wie zum Beispiel anhand von Regulierungen, eine Abflussbeschleunigung durch den Wegfall von Überflutungsflächen, Sedimententnahmen sowie teilweise eine rückschreitende Erosion infolge durchgeführter Sohlabsenkungen flussab (BMLUF und ÖWAV 2011). Eine Darstellung des Ist-Zustands ist auf jeden Fall erforderlich, bevor Maßnahmen umgesetzt werden können, die eine nachhaltige Verbesserung des Feststoffhaushalts und der Flussmorphologie ergeben (Habersack 2009). Für die Erhebung des Ist-Zustands ist es notwendig, Grundlagendaten wie Korngrößenanalysen, Feststoffeintrag/-austrag (potenzielle Geschiebeeinstöße der Zubringer, Sedimententnah-

men/-zugaben etc.) und Sohlenentwicklungen zu erheben, und es sollten auch Naturmessungen des Feststofftransports durchgeführt werden. Naturmessungen von Geschiebetransportprozessen sind schwer durchzuführen, weshalb zurzeit nur wenige Messdaten hinsichtlich des Geschiebetransports vorliegen. Die Mechanismen des Geschiebetransports sind Gegenstand aktueller Forschung, um die bestehenden Wissenslücken hinsichtlich ihrer Vorhersagbarkeit zu schließen. Deshalb werden vom IWA/BOKU derzeit sieben Geschiebemesstationen betrieben, bei denen kontinuierliche Geschiebedaten erhoben werden (Habersack et al. 2017). Insbesondere in kleinen Einzugsgebieten ist bei gleichem Abfluss eine große Streuung der gemessenen Geschiebetransportraten zu beobachten und verdeutlicht die Sensitivität solcher Einzugsgebiete gegenüber dem Geschiebeeintrag flussauf (Turowski and Rickenmann 2009; Kreisler et al. 2017; Liedermann et al. 2019). Feststoffbilanzierungen durch Transportformeln und -modelle dienen ebenfalls als Grundlage für die Umsetzung von nachhaltigen Maßnahmen. Um diese Formeln und Modelle validieren und kalibrieren zu können, sind wiederum Messungen in der Natur vonnöten. Forschungsprojekte über den Sedimenthaushalt von Fließgewässern werden in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Dimension weltweit durchgeführt (z.B. Habersack and Laronne 2002; Rickenmann and McArdelell 2007; Turowski et al. 2011; Marineau 2012; Rickenmann et al. 2012; Mao et al. 2014; Wyss et al. 2016; Aigner et al. 2017; Geay et al. 2017; Habersack et al. 2017; Heckmann et al. 2017; Kreisler et al. 2017; Hauer et al. 2018; Liedermann et al. 2018, 2019; Comiti et al. 2019; Frings et al. 2019; Bakker et al. 2020; Coviello et al. 2022; Rindler et al. 2023).

Das Ziel dieses Forschungsprojekts war die Erhebung von Grundlagendaten, um in weiterer Folge ein Feststoffmanagementkonzept an der Gail entwickeln zu können. Es werden Analysen zu Korngrößenveränderungen über den Längsverlauf, Geschiebetransportprozessen, Sohlhöhenänderungen und anthropogenen Einflüssen durchgeführt. Durch ein Feststoffmanagementkonzept soll ein resilienter Fluss entwickelt werden, der sich in einem dynamischen Gleichgewicht von Sedimentüberschüssen und -defiziten befindet. Für solch ein Gleichgewicht sind die zentralen

Fragen: „Wie viel, in welcher Korngröße und wo benötigt der Fluss Sedimente?“ und „Welche Breite, welches Sohlgefälle, welche Linienführung und welche Sicherungsmaßnahmen sind auszuführen?“ Für die Identifizierung sowie zeitliche und örtliche Zuordnung von Feststoffproblematiken sind Grundlagendatenerhebungen erforderlich, um das Verständnis der Feststofftransportprozesse zu erweitern und diese auch quantitativ zu erfassen. Die Methoden und das zukünftige Managementkonzept sollen in weiterer Folge an anderen Fließgewässern anwendbar sein.

2 Projektgebiet

Das Projektgebiet liegt im Süden Österreichs im Gailtal in Kärnten. Prägend für das Gebiet ist die geradlinige Form, wodurch das Tal zu einer der auffälligsten Längsfurchen der Ostalpen zählt. Die Gail entspringt in Osttirol am Kartitscher Sattel auf 1525 m ü. A., ist 122 km lang, entwässert ein Gebiet von rund 1400 km² und mündet bei Villach in die Drau. Abb. 1 zeigt eine Übersicht der Lage des Gailtals und der fünf Abschnitte der Gail.

Durch die zeitliche Niederschlagsverteilung zählt das Einzugsgebiet der Gail zu den niederschlagsreichsten Gebieten in Österreich. Denn durch den Einfluss des mediterranen Klimas gibt es im Niederschlag und in der Wasserführung ein Maximum in den Monaten Juni und Juli sowie im Oktober und November, wobei letzteres ausgeprägter ist und regelmäßig zu größeren Hochwässern führt (Amt der Kärntner Landesregierung 2001). Die jüngsten Hochwässer in den Jahren 2014 (HQ₁₂), 2018 (bis zu HQ₁₅) und 2020 (HQ₁₁) fanden jeweils in den Herbstmonaten statt.

3 Methoden

Das Ziel ist die Erstellung der Grundlagen für ein Feststoffmanagementkonzept. Für ein aktives Feststoffmanagement werden Grundlagendaten benötigt, die mithilfe einer Feststoffbilanz erhoben werden. Dafür werden die Einträge aus den Wildbächen und eine Abschätzung der Rückhalte der Bauwerke, Geschiebefrachten durch direkte Geschiebemesungen, Sohlhöhenänderungen und Korngrößenanalysen sowie Sedimententnahmen und -zugaben ermittelt.

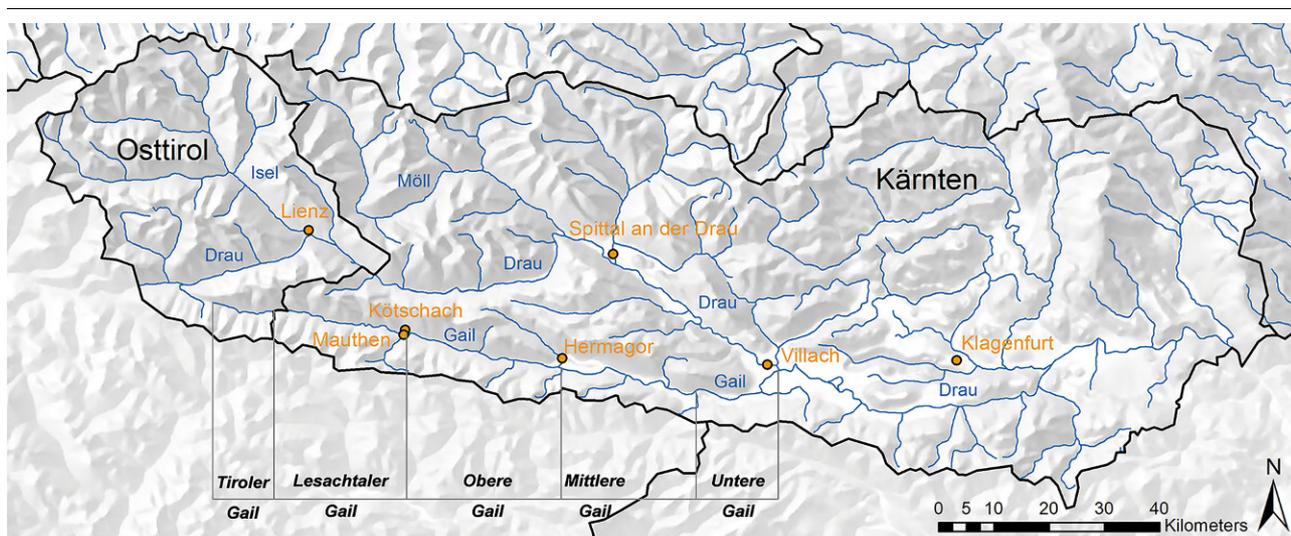


Abb. 1 Übersichtskarte von Kärnten und Osttirol mit den fünf Abschnitten der Gail (Tiroler Gail, Lesachtaler Gail, Obere Gail, Mittlere Gail und Untere Gail). (Quelle: BMLFUW 2007, überarbeitet)

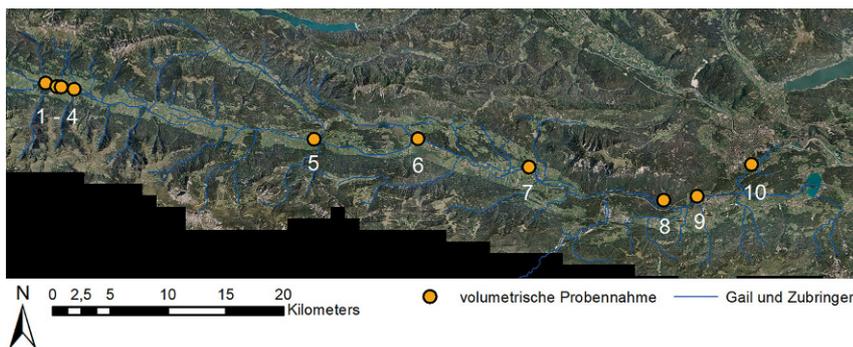


Abb. 2 Übersicht der Probenentnahmestellen der volumetrischen Geschiebeproben von Flusskilometer 3 (Stelle 10) bis Flusskilometer 73,1 (Stelle 1). (Quelle Gewässernetz: Land Kärnten, überarbeitet)

3.1 Korngrößenanalysen

Das wesentlichste Merkmal zur Charakterisierung von Geschiebe ist der Korndurchmesser. Aus einem Kornmisch lässt sich mittels Siebanalyse die Korngrößenverteilung bestimmen, die als Grundlage für die Berechnung und Modellierung des Feststofftransports dient.

2018 und 2019 wurden volumetrische Großproben der Deck- und Unterschicht an zehn Standorten mithilfe eines Baggers entnommen und gesiebt (Abb. 2).

Durch Kieswerk- und Siebturmsiebungen (für Sedimente kleiner 10 mm) wurden die Korngrößenverteilungen ermittelt und mit den früheren Auswertungen der Jahre 1992 und 1994 (Zotl und Erber 1996) verglichen. Die Korngrößenverteilungen der Zubrin-

ger wurden mit der Software Basegrain (Detert und Weitbrecht 2013) photographisch ermittelt und mittels Linienzahlanalysen nach Fehr (1987) validiert (IB Kapeller 2021).

3.2 Kubatur- und Sohlhöhenänderung

Für eine Analyse der morphologischen Entwicklung wurde eine Ursache-Wirkungs-Analyse unter Verwendung vorhandener historischer Daten (inkl. Randbedingungen wie beispielsweise Bergsturz) sowie Aufzeichnungen der Flussregulierungen und Rückbaumaßnahmen durchgeführt. Hinsichtlich der Hydromorphologie wurden die Änderungen der Flusssohle bis zum Jahr 2018 analysiert. Grundlage hierfür waren die Querprofilvermessungen, welche von der Landesregierung Kärnten, Abteilung Wasserwirtschaft zu Verfügung

gestellt wurden. Die Berechnung der Sohlhöhen- bzw. Volumenänderungen erfolgte mittels profilbasierter Methode. Grundlage waren Querprofilvermessungen, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten in denselben Querprofilen durchgeführt wurden. Die Vermessungspunkte in jedem Profil wurden zur besseren Vergleichbarkeit und Vereinfachung der Berechnung auf das jeweilige Querprofil projiziert. Für zwei zeitlich aufeinanderfolgende Aufnahmen wurde anschließend die Änderung der vertikalen Querschnittfläche in den Profilen infolge Anlandung oder Erosion berechnet.

Ausgehend von der Annahme, dass die Flächenänderungen in den jeweiligen Profilen auch repräsentativ sind für den Flussabschnitt dazwischen, wurde in weiterer Folge die Volumenänderung berechnet. Diese errechnet sich für den jeweiligen Bereich zwischen zwei Profilen aus dem Mittelwert der vertikalen Differenzflächen multipliziert mit der Distanz zwischen den betrachteten Profilen. Für die Berechnung wurde eine gleiche gemeinsame Breite über alle Jahre herangezogen. Die profilweise Interpolation bietet die Möglichkeit einer volumenmäßigen Betrachtung in Einzelementen, wodurch Volumenänderungen für verschiedene Abschnitte und Zeiträume berechnet werden können. Durch anschließendes Aufsummieren der Einzelemente wird eine kumulierte Änderung des Sedimentvolumens ermittelt.



Abb. 3 Übersicht der Geschiebemesstation 1 an der Oberen Gail (a), der Geschiebemesstation 2 an der Mittleren Gail (b) mit jeweils Blick flussab und der LHS-Geschiebesammler im Messeinsatz (c)



Abb. 4 Geschiebeablagerungsplatz (GAP) der Gail von Flusskilometer 70,8–72,5 mit Blick flussauf (a) und flussab (b)

3.3 Sedimenttransportanalysen

Für die Beurteilung einer Sedimentproblematik sind detaillierte Grundlagendaten zum Feststofftransport essenziell. Der Geschiebetransport wird mit direkten Geschiebemessungen (z. B. Habersack et al. 2001; Kreisler et al. 2014; Liedermann et al. 2019) mit einem LHS (Large Helley-Smith, Abb. 3c)-Geschiebesammler (Helley and Smith 1971) an zwei Standorten (Abb. 3a, b) in den Jahren 2019 und 2020 ermittelt, um den Geschiebeinput bzw. -output zu erfassen. Aus den Aufzeichnungen in den Archiven der Kärntner Landesregierung geht hervor, dass bei Messstation 1 ab 1955 bereits Geschiebemessungen mit dem Fänger „Enns fein“ durchgeführt und aufgrund von fehlendem Geschiebetrieb 1959 eingestellt wurden.

Die Geschiebeprobieren der Jahre 2019 und 2020 werden nach der Messung mittels Siebanalyse ausgewertet und geben Aufschluss über die Textur und die Geschiebemengen. Die Erfassung der Korngrößen ist durch die Größe des

Einlaufbereichs, die Maschenweite des Sammelnetzes und die hydrologischen Bedingungen (Messen im Hochwasserfall nicht möglich) begrenzt. Mit einer Geschiebetransport-Durchfluss-Beziehung wird eine Geschiebeganglinie aus dem Durchfluss berechnet, die nach Aufsummierung die Geschiebefrachten liefert (z. B. Gray et al. 2010; Bunte et al. 2012; Rickenmann et al. 2012; Habersack et al. 2017). Der Geschiebeeintrag der 28 maßgebenden Zubringer wurde nach Rickenmann (1990, 2001) ermittelt (IB Kapeller 2021).

3.4 Anthropogene Einflüsse

Anthropogene Eingriffe in den Feststoffhaushalt führen zu einer zunehmenden Beeinflussung des Flusssystems. Eine Unterbrechung des Längskontinuums kann langfristig negative Auswirkungen, wie beispielsweise Sohlentiefungen, flussab zur Folge haben (Habersack et al. 2013). Für ein langzeitliches Feststoffmanagementkonzept wurden den anthropogenen Einflüssen

– wie ein im Jahr 1907 errichteter Geschiebeablagerungsplatz (GAP, Abb. 4), Sedimententnahmen bis 2011, Flussaufweitungen, Profilsertüchtigungen und die Errichtung einer Sohlrampe im Jahr 2009 – die Änderungen der Flusssohle und der Korngrößen gegenübergestellt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Korngrößenanalysen

Mit der volumetrischen Probenahme 2018 wurden 41 t und 2019 15 t Gail-Sedimente gesiebt. In Abb. 5 werden die charakteristischen Korngrößen der Oberen, Mittleren und Unteren Gail der Untersuchungen der Jahre 1992/94, 2018 und 2019 gegenübergestellt. Durch den Vergleich der Korngrößen der 1990er-Jahre (in Blau) mit 2018 (in Orange) sind eine Vergröberung im Oberlauf und Verfeinerungstendenzen bis zum Geländeknick im Bereich der Unteren Gail erkennbar. Das deutet darauf hin, dass die Gail den d_{90} nicht flussab transportieren konnte und dass z. B. ein Zubringer im Mittellauf feines Material einträgt. Genauso können aber auch die Feinanteile im Oberlauf ausgewaschen worden sein. Im Jahr 2019 wurden 5 Standorte beprobt (in Grün), um den Einfluss des Hochwasserereignisses 2018 auf die Korngrößenverteilung zu ermitteln. Im Bereich der Oberen und Mittleren Gail ist zwischen 2018 und 2019 eine Verfeinerung des Sohlmaterials deutlich erkennbar. Der d_{50} im Oberlauf nähert sich dem Zustand in den 1990er-Jahren, was einerseits auf die Sohlrampe, die 2009 erbaut und 2018 durch das Hochwasser

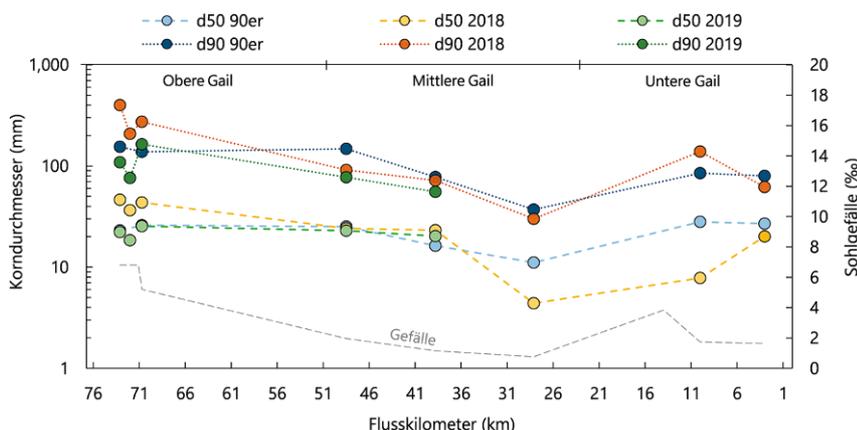


Abb. 5 Gegenüberstellung der charakteristischen Korngrößen d_{50} (strichlierte Linien) und d_{90} (punktierter Linien) der 1990er-Jahre (hell- und dunkelblau), von 2018 (gelb und orange) und von 2019 (hell- und dunkelgrün) mit dem Sohlgefälle (grau strichlierte Linie) der Gail

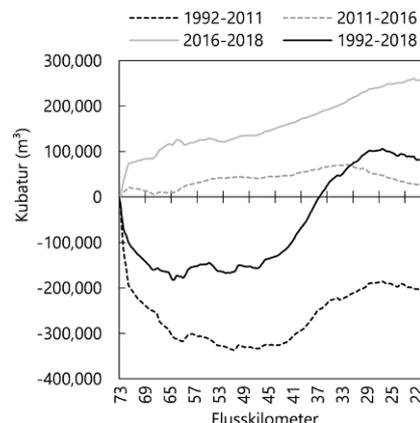


Abb. 6 Summenbilanz von Flusskilometer 72,5–20,4 der Zeitepochen 1992–2011 (schwarz strichlierte Linie), 2011–2016 (grau strichlierte Linie), 2016–2018 (graue Linie) und 1992–2018 (schwarze Linie)

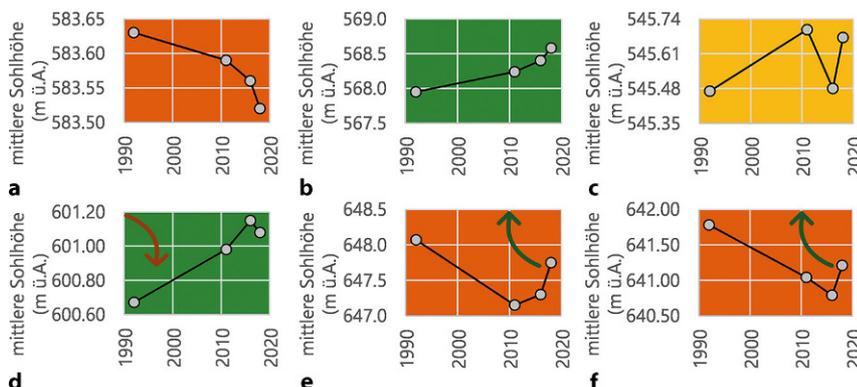


Abb. 7 Betrachtung der Einzelprofile und deren mittlerer Sohlhöhen in den Jahren 1992, 2011, 2016 und 2018 eines Profils mit Eintiefung (a), Anlandung (b) und eines ausgeglichenen Profils (c) sowie eines Profils mit Anlandung und Eintiefungstendenzen seit 2018 (d), Eintiefung und Anlandungstendenzen seit 2016 (e) und Eintiefung mit Anlandungstendenzen seit 2018

zerstört wurde, und andererseits auf das Aufreißen der Deckschicht und Freiwerden von Feinmaterial der Unterschicht zurückzuführen ist.

4.2 Kubatur- und Sohlhöhenänderung

Die Sohlentwicklung der Gail wurde bereits ab den 1930er-Jahren durch Niederwasseraufnahmen dokumentiert. Laut Zottl und Erber (1996) sind in der Sohle der Oberen Gail bis auf einen natürlichen Störeinfluss durch die Mündung eines Zubringers und anthropogen bedingte Störungen im Untersuchungszeitraum von 1978 bis 1994 nur geringe Sohländerungen ersichtlich. Die Untersuchungen der Sohlhöhen der Mittleren Gail im Zeitraum von 1926 bis 1992 zeigen in ferner Vergangenheit einen Wechsel von Erosionen

und Anlandungen sowie Trends, die durch die anthropogenen Eingriffe an der Gail und den Zubringern beeinflusst war, wohingegen die Sohle der Mittleren Gail bis 1992 als relativ stabil bezeichnet wurde (Zottl und Erber 1993).

Abb. 6 zeigt die in Richtung flussab aufsummierten Kubaturen der profilbasierten Auswertung und gibt einen Überblick über Anlandungen (ansteigende Kurve) und Erosionen (abfallende Kurve) in den Epochen 1992–2011, 2011–2016, 2016–2018 und 1992–2018 von Flusskilometer 72,5–20,4. Die Kubaturänderungen von 1992–2011 (schwarz strichlierte Linie) zeigen im Oberlauf bedingt durch Sedimententnahmen eindeutige Erosionsbereiche, einen folgenden Bereich mit Erosionen und Anlandungen im Wechselspiel und ab

ca. Flusskilometer 46 resultieren durch ein abnehmendes Gefälle bis Flusskilometer 20,4 Anlandungen. Die anschließende Epoche von 2011–2016 (grau strichlierte Linie) zeigt ein komplett konträres Bild, das hauptsächlich mit dem Einstellen der Sedimententnahmen im Jahr 2011 und dem Hochwasser 2014 begründet werden kann. Im Vergleich zur vorangegangenen Epoche sind durch das Ende der Sedimententnahmen im Oberlauf bis Flusskilometer 71 Anlandungen zu beobachten. Einem anschließenden Erosionsbereich folgen überwiegend Anlandungen bis Flusskilometer 32, und weiter flussab bis Flusskilometer 20,4 zeigen sich fast ausschließlich Profile mit Erosionen. Die Kubaturänderungen von 2016–2018 (graue Linie) nach dem Hochwasserereignis im Jahr 2018 zeigen, bis auf vereinzelte Flussabschnitte, klare Anlandungsbereiche. Vor allem im Oberlauf wurden diese durch die zerstörte Sohlrampe und die Materialumlagerungen durch das Hochwasser verursacht. Die aufsummierte Kubatur von 1992 und 2018 (schwarze Linie) zeigt einen vergleichbaren Verlauf wie die der Epoche 1992–2011, der Sedimentaustrag fällt aber – durch das Einstellen der Sedimententnahmen sowie der Hochwässer 2014 und 2018 und der daraus resultierenden Materialumlagerungen und punktuellen Maßnahmen – wesentlich geringer aus.

Um mehr als zwei Profilaufnahmen und eine langfristige Entwicklung der Flusssohle besser darstellen zu können, wurden die mittleren Sohlentwicklungen eines jeden Profils der Jahre 1992,

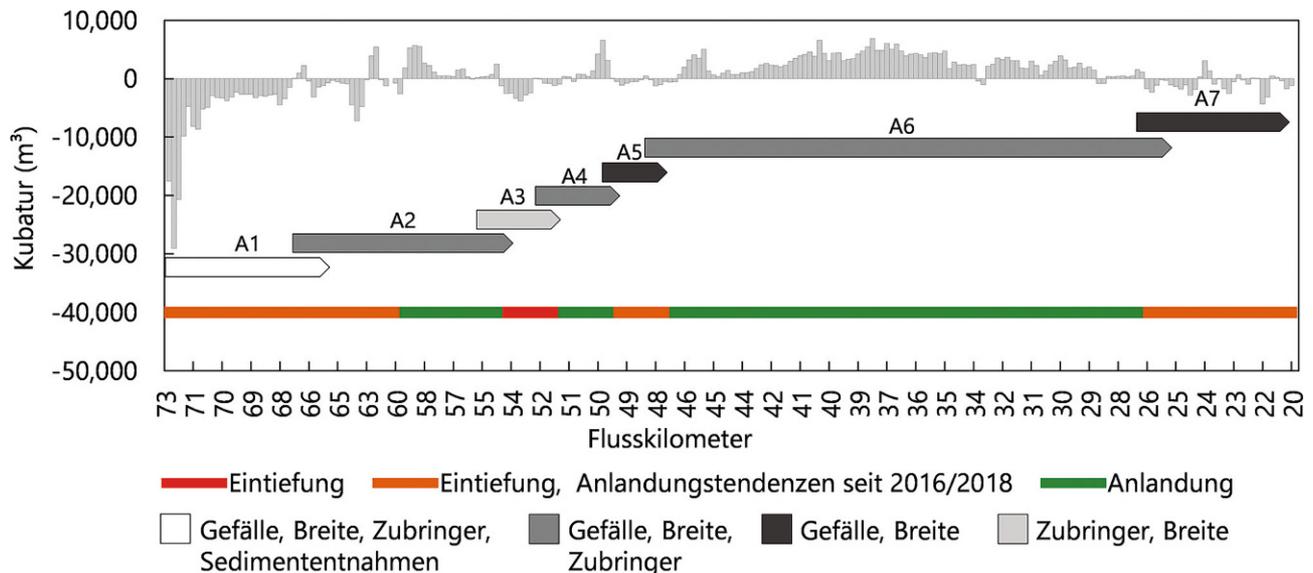


Abb. 10 Feststoffbezogene Abschnitte (A1–A7 in grauen, horizontalen Balken) der Gail mit Kubaturänderungen zwischen 1992 und 2018 (in grauen, vertikalen Balken) und definierte Bereiche mit Eintiefung (rot), Eintiefung und Anlandungstendenz seit 2016/2018 (orange) und Anlandung (grün) auf Basis der Betrachtung der Einzelprofile und deren mittleren Sohlhöhenänderung

ten und neu konstruierten Wetzmann-Wehr sowie erneute Profilaufnahmen entlang der gesamten Gail notwendig. Die Planungsarbeiten des übergeordneten Projekts „GE-RM Gail“ (Gewässerentwicklung und Risikomanagementkonzept des Gailflusses) stehen kurz vor dem Abschluss und das darin enthaltene Maßnahmenprogramm sieht die Ausarbeitung eines Feststoffmanagementkonzepts zur Entwicklung einer resilienten Gail vor.

5 Ausblick und Möglichkeiten für resilientere Flüsse

Resilienz von Fließgewässern bedeutet ein selbststeuerndes Flusssystem. Dafür soll ein Feststoffmanagementkonzept entwickelt werden, damit die darin inkludierten Maßnahmen mit Feststoffdefiziten und -überschüssen umgehen können und ein dynamisches Gleichgewicht erreicht wird.

Für ein ausgeglichenes Flusssystem sind Sedimentpufferzonen, in denen die Remobilisierung von Feststoffen gewährleistet ist und gleichzeitig das Hochwasserrisiko minimiert wird, unabdingbar. Eine Gewährleistung von Sedimentremobilisierung kann durch innovative Steuerelemente geschaffen werden. Ein selbststeuerndes System reduziert Instandhaltungskosten, da die Maßnahmen den Feststoffhaushalt bei verschiedenen hydraulischen Bedingungen, wie z. B. Hochwasser oder

Niederwasser, eigenständig regeln. Dabei kommt der Sohlbreite, den Ufersicherungen und dem Raum für eisdynamische Entwicklungen große Bedeutung zu. Dazu ist eine passende Linienführung und ein adäquates Sohlgefälle in Wechselwirkung mit den Sohlbreiten die Voraussetzung. Auf Basis von Maßnahmenentwicklungen und numerischen Simulationen und/oder Modellversuchen sollen durch eine Optimierung der Flussbreite und Anpassung der Linienführung/des Sohlgefälles Anlandungen und Erosionen im Gleichgewicht gehalten und auch der laterale Sedimenttransport gefördert werden. In Bereichen, in denen ein Management des Flusssystems erforderlich ist, können kontrollierte Sedimententnahmen oder aktive Sedimentzugaben umgesetzt werden. Die Gesamtentwicklung soll in lang- und kurzzeitlichen Perioden mit Sohlaufnahmen beobachtet werden, um die Zielerreichung der Maßnahmen zu dokumentieren und negative Auswirkungen auf die Flusssohle zu verhindern. Für ein resilientes Flusssystem ist die Einbeziehung der Sedimentrückhalte und die Durchgängigkeit der Querbauwerke ein weiterer wichtiger Aspekt. In Bereichen mit Geschiebedefiziten kann die Geschiebeverfügbarkeit mittels Durchgängigkeit von Querbauwerken der Zubringer gefördert werden. Mit ökologischen Strukturen, wie Altarmenbindungen, kann auch das Ökosystem gestärkt werden.

Für ein langfristig sinnvolles Feststoffmanagementkonzept ist ein fortlaufendes, langzeitliches Feststoffmonitoring sowie die Zusammenarbeit von Wasserbau, Wildbach- und Lawinenverbauung, Kraftwerkssektor sowie Ökologie unerlässlich.

Danksagung Die Studie „Grundlagendaten für ein Feststoffmanagementkonzept an der Gail“ wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML, vormals BMNT) und von der Landesregierung Kärnten, Abteilung Wasserwirtschaft finanziell unterstützt. Wir danken der Abteilung Wasserwirtschaft, Unterabteilung Hermagor für die fachliche Unterstützung sowie für die Bereitstellung von Daten.

Funding Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative

Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Aigner, J., Kreisler, A., Rindler, R., Hauer, C. & Habersack, H. (2017): Bedload pulses in a hydropower affected alpine gravel bed river. *Geomorphology*, 291, 116–127.
- Amt der Kärntner Landesregierung (Hrg.) (2001): 125 Jahre Gailregulierung – Wasserwirtschaft im Wandel der Zeit. Klagenfurt.
- Bakker, M., Gimbert, F., Geay, T., Misset, C., Zanker, S. & Recking, A. (2020): Field Application and Validation of a Seismic Bedload Transport Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125. <https://doi.org/10.1029/2019jf005416>.
- BMLFUW (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien
- BMLFUW und ÖWAV (2011): Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Wien
- Bunte, K., Abt, S. R., Potyondy, J. P. & Swingle, K. W. (2012): A Comparison of Coarse Bedload Transport Measured with Bedload Traps and Helley-Smith Samplers. *Geodinamica Acta*, 21, 53–66.
- Comiti, F., Mao, L., Penna, D., Dell'agnese, A., Engel, M., Rathburn, S. & Cavalli, M. (2019): Glacier melt runoff controls bedload transport in Alpine catchments. *Earth and Planetary Science Letters*, 520, 77–86.
- Coviello, V., Vignoli, G., Simoni, S., Bertoldi, W., Engel, M., Buter, A., Marchetti, G., Andreoli, A., Savi, S. & Comiti, F. (2022): Bedload Fluxes in a Glacier-Fed River at Multiple Temporal Scales. *Water Resources Research*, 58. <https://doi.org/10.1029/2021wr031873>.
- Cox, J. R., Huismans, Y., Knaake, S. M., Leuven, J. R. F. W., Vellinga, N. E., Vegt, M., Hoitink, A. J. E. & Kleinmans, M. G. (2021): Anthropogenic Effects on the Contemporary Sediment Budget of the Lower Rhine-Meuse Delta Channel Network. *Earth's Future*, 9. <https://doi.org/10.1029/2020ef001869>.
- Detert, M. & Weitbrecht, V. (2013): User guide to gravelometric image analysis by Basegrain. *Advances in River Sediment Research—Fukuoka et al. (eds)*, 1789–1796.
- Fehr, R. (1987): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 105, 6.
- Frings, R. M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014): Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena*, 122, 91–102.
- Frings, R. M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S. & Hoffmann, T. (2019): From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*, 196, 102830.
- Geay, T., Belleudy, P., Gervaise, C., Habersack, H., Aigner, J., Kreisler, A., Seitz, H. & Laronne, J. B. (2017): Passive acoustic monitoring of bed load discharge in a large gravel bed river. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 528–545.
- Gray, J. R., Laronne, J. B. & Marr, J. D. G. (2010): Bedload-Surrogate Monitoring Technologies.
- Gregory, K. J. (2006): The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79, 172–191.
- Habersack, H. (2009): Feststoffhaushalt, Flussmorphologie, ökologischer Zustand und Hochwasserschutz. Hintergrundpapier NGP, Wien.
- Habersack, H. & Laronne, J. (2002): Evaluation and Improvement of Bed Load Discharge Formulas based on Helley-Smith Sampling in an Alpine Gravel Bed River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 5, 484–499.
- Habersack, H., Wagner B., Schoder, A., Hauer, CH. (2013): Die Bedeutung von Feststoffhaushalt und Sedimentdurchgängigkeit für eine nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 65, 354–361.
- Habersack, H., Kreisler, A., Rindler, R., Aigner, J., Seitz, H., Liedermann, M. & Laronne, J. B. (2017): Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers. *Geomorphology*, 291, 80–93.
- Habersack, H., Schwarz, S., Rindler, R., Haimann, M., Gmeiner, P. & Liedermann, M. (2020): Feststoffbilanzierung Hochwasser 2018 Gail. Projektbericht, im Auftrag des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus (BNT) und Land Kärnten Abteilung 12 – Wasserwirtschaft. Wien
- Habersack, H. M., Nachtnebel, H. P. & Laronne, J. B. (2001): The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river. *Journal of hydraulic research* 39, 125–133.
- Hauer, C., Wagner, B., Aigner, J., Holzapfel, P., Flödl, P., Liedermann, M., Tritthart, M., Sindelar, C., Pulg, U., Klösch, M., Haimann, M., Donnum, B. O., Sticker, M. & Habersack, H. (2018): State of the art, shortcomings and future challenges for a sustainable sediment management in hydropower: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 40–55.
- Heckmann, T., Haas, F., Abel, J., Rimböck, A. & Becht, M. (2017): Feeding the hungry river: Fluvial morphodynamics and the entrainment of artificially inserted sediment at the dammed river Isar, Eastern Alps, Germany. *Geomorphology*, 291, 128–142.
- Helley, E. & Smith, W. (1971): Development and Calibration of a Pressure-Difference Bedload Sampler. *US Geological Survey*, 73–108. <https://doi.org/10.3133/ofr73108>.
- Kang, C. S. & Kanniah, K. D. (2022): Land use and land cover change and its impact on river morphology in Johor River Basin, Malaysia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101072.
- IB Kapeller (2021): Ermittlung und Beurteilung des mittleren jährlichen Feststoffeintrages aus den Zubringerbächen in die Gail, Flkm 0,00–109,00. Projektbericht mit Ergebnissen. Stockenboi, 2021.
- Kreisler, A., Aigner, J., Liedermann, M. G. & Habersack, H. (2014): Geschiebemessung in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 66, 297–305.
- Kreisler, A., Moser, M., Aigner, J., Rindler, R., Tritthart, M. & Habersack, H. (2017): Analysis and classification of bedload transport events with variable process characteristics. *Geomorphology*, 291, 57–68.
- Liedermann, M., Gmeiner, P., Kreisler, A., Tritthart, M. & Habersack, H. (2018): Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 514–523.
- Liedermann, M., Aigner, J., Kreisler, A., Klösch, M., Rindler, R., Gmeiner, P., Pessenlehner, S., Tritthart, M., Hauer, C. & Habersack, H. (2019): Forschung zu alpinen Sedimentprozessen als Basis für ein verbessertes Feststoffmanagement unter Berücksichtigung extremer Ereignisse. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 71, 148–159.
- Maaß, A.-L., Schüttrumpf, H. & Lehmkuhl, F. (2021): Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today's river restorations. *Environmental Sciences Europe*, 33. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00561-4>.
- Mao, L., Dell'agnese, A., Huincane, C., Penna, D., Engel, M., Niedrist, G. & Comiti, F. (2014): Bedload hysteresis in a glacier-fed mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 964–976.
- Marchi, L., Comiti, F., Crema, S. & Cavalli, M. (2019): Channel control works and sediment connectivity in the European Alps. *Sci Total Environ*, 668, 389–399.
- Marineau, M. (2012): Surrogate Bedload Monitoring Using Hydrophones in the Gravel-Bedded Cedar River, Washington.
- Rickenmann, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *ETH Zürich*.
- Rickenmann, D. (2001): Comparison of bedload transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, 37, 3295–3305.
- Rickenmann, D. & McArdell, B. W. (2007): Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1362–1378.
- Rickenmann, D., Turowski, J. M., Fritschi, B., Klaiber, A. & Ludwig, A. (2012): Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1000–1011.
- Rindler, R., Schwarz, S., Liedermann, M., Shire-Peterlechner, D., Kreisler, A., Aigner, J., Tritthart, M. & Habersack, H. (2023): Effective transport width—A methodology to describe the spatial variability of bedload transport. *International Journal of Sediment Research*, 38, 294–301.
- Turowski, J. M. & Rickenmann, D. (2009): Tools and cover effects in bedload transport observations in the Pitzbach, Austria. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 26–37.

Turowski, J. M., Badoux, A. & Rickenmann, D. (2011): Start and end of bedload transport in gravel-bed streams. *Geophysical Research Letters*, 38. <https://doi.org/10.1029/2010gl046558>.

Wyss, C. R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J. M., Weitbrecht, V. & Boes, R. M. (2016): Measuring Bed Load Transport Rates by Grain-Size Fraction Using the Swiss Plate

Geophone Signal at the Erlenbach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142, 04016003.

Zottl, H. & Erber, H. (1993): Gewässerbetreuungs-konzept Gail. Wasserwirtschaftliche Bearbeitung. Feststoffhaushalt der Gail (Teil 4). Wien.

Zottl, H. & Erber, H. (1996): Gewässerbetreuungs-konzept Gail. Wasserwirtschaftliche Bearbeitung. Feststoffhaushalt der Gail (Teil 2). Wien.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.