

Geschiebemessung an Drau und Isel

Messperiode 2018-2019



Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus

Stubenring 1, 1010 Wien

Projektleitung: H. Habersack

Autorinnen und Autoren: H. Habersack, J. Aigner, R. Rindler, S. Schwarz, M. Tritthart, M. Liedermann

Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien

Fotonachweis: Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung

Wien, 2020. Stand: 3. November 2020

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgeifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an empfaenger@bmlrt.gv.at.

Inhalt

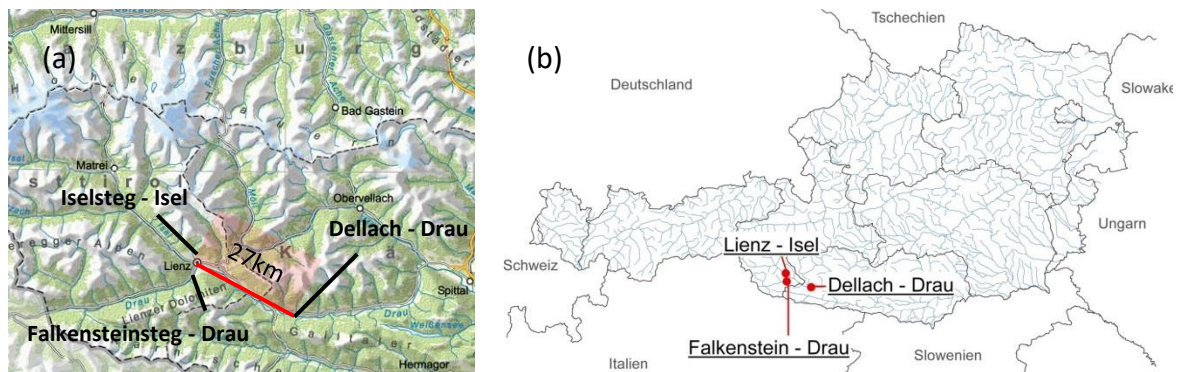
1 Problemstellung und Ziele	4
2 Falkensteinstege/Drau	7
2.1 Hydrologischer Überblick.....	7
2.2 Geschiebemessungen	8
2.2.1 Bewegungsbeginn auf Basis der Geophondaten.....	10
2.2.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Geschiebetransports.....	11
2.2.3 Geschiebetrieb und Geschiebefrachten	12
2.3 Ausgewählte Besonderheiten der Station.....	17
3 Iselstege/Isel.....	19
3.1 Hydrologischer Überblick.....	19
3.2 Geschiebemessungen	20
3.2.1 Bewegungsbeginn auf Basis der Geophondaten.....	21
3.2.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Geschiebetransports.....	22
3.2.3 Geschiebetrieb und Geschiebefrachten	23
3.3 Ausgewählte Besonderheiten der Station.....	28
4 Dellach/Drau.....	30
4.1 Hydrologischer Überblick.....	30
4.2 Geschiebemessungen	31
4.2.1 Bewegungsbeginn auf Basis der Geophondaten.....	32
4.2.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Geschiebetransports.....	33
4.2.3 Geschiebetrieb und Geschiebefrachten	34
4.3 Ausgewählte Besonderheiten der Station.....	40
5 Diskussion der Ergebnisse.....	42
5.1 Geschiebetransportscharakteristik der Messstationen	42
5.1.1 Falkensteinstege/Drau.....	42
5.1.2 Iselstege/Isel	43
5.1.3 Dellach/Drau	44
5.2 Vergleich der Geschiebefrachten im Drau/Isel System.....	44
6 Zusammenfassung und Ausblick	47
Tabellenverzeichnis.....	50
Abbildungsverzeichnis.....	51
Literaturverzeichnis	54
Abkürzungen.....	55

1 Problemstellung und Ziele

Das Bewusstsein über die Bedeutung des Transports von Geschiebematerial für den Wasserbau und die Ökologie ist über die Jahre kontinuierlich angestiegen. Trotzdem sind bis heute viele Fragen bezüglich des Ausmaßes und der Funktionsprozesse dieser Sedimentbewegungen offen. Ein Grund dafür sind vor allem die praktischen Schwierigkeiten in der Durchführung direkter Geschiebemessungen, die eine standardisierte Erfassung des Geschiebetransports oftmals erschweren.

Das Fehlen einer praktikablen Methodik für Geschiebemessungen, sowie das begrenzte Wissen über die Prozesse und Dynamiken des Geschiebetransports führten 2005 im Zuge des „GESCHIEBE“-Projekts zum Bau der Geschiebemessstation Dellach im Drautal. Diese Anlage bildet mit den Messstationen Falkensteinsteg/Drau und Iselsteg/Isel das integrative Geschiebemesssystem Drau/Isel. Die Lage der Geschiebemessstationen im Untersuchungsgebiet zeigen Abbildung 1 a, b. Die wichtigsten hydrologischen Kennzahlen der drei Messstationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Abbildung 1: Lage der Geschiebemonitoring-Stationen in Österreich (a, b)



Ziel des Projektes ist es, ein praxistaugliches Messsystem für alpine Flüsse zu entwickeln, das in der Lage ist, automatisiert und kontinuierlich den Geschiebetrieb über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Weiter sind die Sicherung, Auswertung und Interpretation der Geschiebedaten Teil des Projektes. Ein zusätzlicher wichtiger Punkt ist der Erhalt und gesicherte Betrieb der über Jahre hinweg aufgebauten Geschiebemessanlagen. Durch das gewonnene Prozessverständnis und die ermittelten Geschiebedaten werden verbesserte Grundlagen für die Maßnahmenplanung geschaffen.

Tabelle 1: Hydrologische Übersicht (Hydrographisches Jahrbuch, 2016)

Kennzahlen	Iselsteg/Isel	Falkensteinsteg/Drau	Dellach/Drau
Einzugsgebiet (km ²)	1197,7	668,0	2112,0*
Gefälle (mm ⁻¹)	0,0034	0,01	0,0019
Höhe (m.ü.A)	667,20	679,87	600,04
MQ (m ³ s ⁻¹)	39,2	14,1	62,9*
HHQ (m ³ s ⁻¹)	720 (03.09.1965)	156 (07.10.1998)	850 (03.09.1965)*
NNQ (m ³ s ⁻¹)	3,00 (04.03.1963)	0,69 (20.02.2010)	8,47 (13.02.1999)*
Reihe	1951-2016	1951-2016	1951-2016*

*Angaben vom Pegel
Oberdrauburg

Der Bedarf an Geschiebemessdaten besteht für Planungen in den Bereichen Flussbau, Hochwasserschutz, Wildbach- und Lawinenverbauung, Wasserstraßenmanagement sowie generell bei der Untersuchung von Transportprozessen und bei der Erstellung von langfristigen Geschiebebilanzen. Wichtig ist auch die Bereitstellung von Daten für Fragen in Zusammenhang mit Ökologie und Kraftwerksbau. Naturmessdaten dienen als Grundlage für die Auswahl, Anwendung und Kalibrierung von Geschiebetransportformeln und numerischen Modellen. Weiters können die Daten direkt für die Dimensionierung von flussbaulichen Maßnahmen verwendet werden. Die Datenverfügbarkeit betreffend Geschiebe führt zu optimierten Planungen und nachhaltigeren Lösungen. Umgekehrt werden Maßnahmen auch mit hohem finanziellen Einsatz bei Nichtbeachtung des Feststofftransportes und der damit zusammenhängenden Flussmorphologie langfristig nicht den gewünschten positiven Effekt erzielen. Erst wenn der Feststoffhaushalt der Flüsse als wesentliche Grundlage für die Funktionalität wieder ausgeglichen ist, können Rückbaumaßnahmen, wie Aufweitungen, nachhaltig positive Wirkung zeigen.

Nach einem Messzeitraum von 14 Jahren liegen nun ausführliche Ergebnisse und Erfahrungen mit dem Geschiebemesssystem vor. Eine große Palette an Messdaten, Berechnungen, Analysen und Schlussfolgerungen bestätigen den erfolgreichen Betrieb des Geschiebemonitoringsystems Drau/Isel.

Im vorliegenden Bericht werden die Messergebnisse vorgestellt. Die angewandten Messmethoden und Berechnungsansätze sind gesondert im „Kurzbericht zur Methodik der Geschiebemessungen an Drau und Isel“ zusammengefasst.

Historischer Überblick und Projektperiode

Von 2002 bis 2005 erfolgte die Planung und auch teilweise Installation des Geschiebemonitoringsystems Drau/Isel. 2005 wurde mit dem Bau der ersten beiden Geschiebefallen und der Geophonanlage in Dellach/Drau begonnen. Bereits im Frühjahr 2006 konnten die ersten Messungen durchgeführt werden und in diesem Jahr wurde auch die Geschiebemesstation Iselsteg in Lienz/Isel erbaut. 2008 wurde das Messsystem in Dellach um eine hydraulisch elevierbare Geschiebefalle erweitert. Die Messstation Falkensteinsteg in Lienz/Drau wurde bereits im Jahr 2001 von der TIWAG errichtet und 2006 in das Geschiebemonitoringsystem Drau/Isel aufgenommen. In den Projektperioden von 2005 bis 2018 wurden zahlreiche Messungen, Wartungen und Bauarbeiten durchgeführt (Habersack et al. 2013; Habersack et al. 2017).

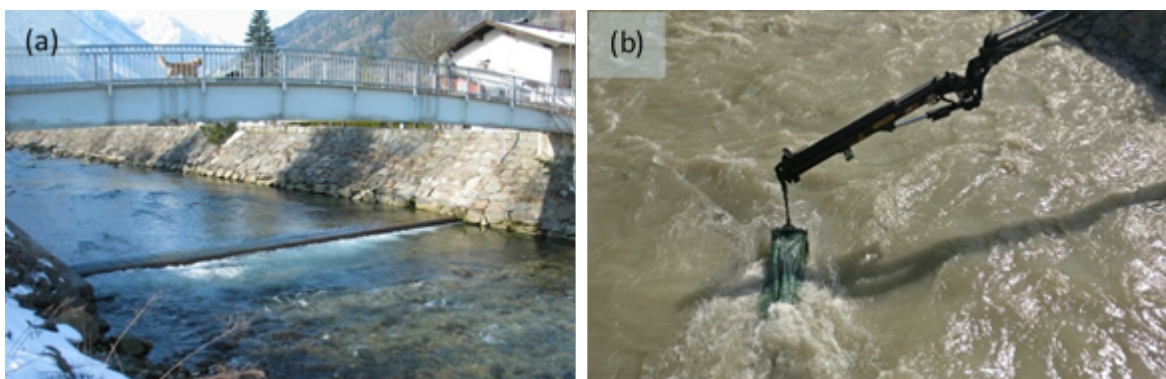
Im Jahr 2018 wurde der Weiterbetrieb (Basisbetrieb) und Erhalt der Geschiebemesstationen an Drau und Isel mit VertreterInnen der Länder Kärnten und Tirol, des BMLRT und des Instituts für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (IWA) der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) bis Ende 2020 fixiert. Folgende Tätigkeiten sind in dieser dritten Projektperiode vorgesehen:

- An den drei Geschiebemesstationen werden jährlich direkte Geschiebemessungen vom IWA durchgeführt. Die Wahl des Messzeitpunkts ist, sofern möglich, auf interessante Abflussereignisse ausgerichtet. Die Ausführung der direkten Messungen geschieht mittels mobiler Fangkörbe und fester Geschiebefallen. Anschließend werden Korngrößenanalysen der gewonnenen Geschiebeprouben durchgeführt.
- Instandhaltung der Geschiebemesanlagen und jährliche Wartung der Geschiebefallen
- Die direkt und indirekt gemessenen Geschiebemesdaten werden auf jährlicher Basis ausgewertet und analysiert. Dafür werden geschieberelevante Parameter (Korngröße, Geschiebetrieb, Geschiebetransport, Geschiebefracht, Bewegungsbeginn) berechnet und dargestellt. Analysen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität werden durchgeführt.
- Für ein umfangreiches Datenmanagement werden eine automatische Datenübertragung der aufgenommenen Geophonmessdaten und eine Einspeisung in eine standardisierte Geophonatenbank am IWA vorgenommen. Qualitätsgeprüfte Zeitreihen der Geophonmessdaten sowie die Ergebnisse und Auswertungen der direkten Geschiebemessungen werden für die Aufnahme in die HyDaMS-Datenbank bereitgestellt.

2 Falkensteinsteig/Drau

Die Messstation Falkensteinsteig liegt an der Oberen Drau im Stadtgebiet von Lienz (Osttirol) und ist etwa 2 km flussauf der Einmündung der Isel situiert. Sie wurde im Jahr 2001 errichtet und verfügt über eine Vielzahl an hydrologischen Messeinrichtungen für die Erfassung von Wasserstand, Wassertemperatur und Schwebstofftransport. Für die kontinuierliche, indirekte Messung des Geschiebetransports wird eine Geophonanlage bestehend aus 16 Geophonen verwendet (Abbildung 2 a). Die Geophondaten werden von einem Industrierechner aufgezeichnet und täglich via UMTS auf einen Server übertragen und automatisch in eine Datenbank eingepflegt. Für die direkte Erfassung des Geschiebetransports (Abbildung 2 b) werden Fangkorbmessungen durchgeführt, wobei an der Station 2 verschiedene Sammlertypen eingesetzt werden (Vent-Sammler und LHS-Sammler). Die relativ geringe Gerinnebreite an der Station und der Einsatz eines großen LKW-Krans erlauben die Durchführung von Dauer- und Profilmessungen.

Abbildung 2: Messstation Falkensteinsteig/Drau (a), Profilmessung mittels Fangkorb (b)

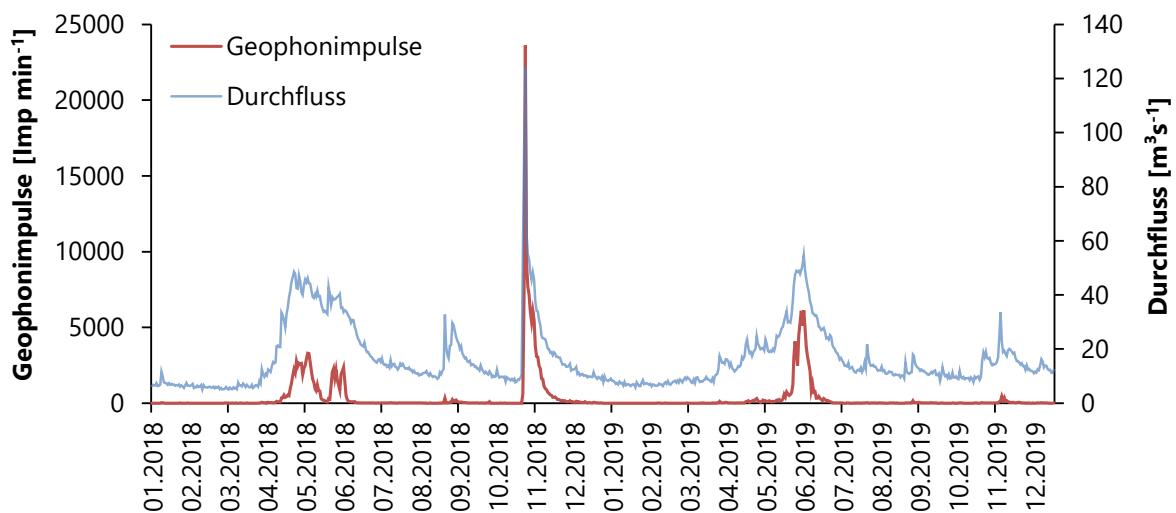


2.1 Hydrologischer Überblick

Abbildung 3 zeigt einen Überblick von Geophonimpulsen und Durchfluss (korrigierte Daten) für die Jahre 2018 und 2019 an der Station Falkensteinsteig/Drau. Typisch für die Obere Drau ist die intensive Schneeschmelze im Mai und Juni, die in beiden Jahren hohen Durchfluss und intensiven Geschiebetransport bedingte. Demgegenüber stellt das Hochwasser Ende Oktober 2018 ein sehr außergewöhnliches Durchflussereignis dar, das zu weitreichenden Verwerfungen im Flusssystem Obere Drau flussauf von Lienz führte. Mit einem Scheitelwert von über $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (etwa HQ_{30}) war es mit Abstand das größte Hochwasserereignis seit Er-

richtung der Geschiebemesstation im Jahr 2001. Durch das Hochwasser wurden beträchtliche Mengen an Sedimenten in das Flusssystem eingetragen (z.B. Galitzenklamm) bzw. mobilisiert. Im Bereich zwischen dem Ende der Restwasserstrecke und der Einmündung der Isel kam es, kurz nach Passage des Hochwasserscheitels, zu massiven Anlandungen der Flusssohle. Bei Schürfen des Wasserbauamts Lienz im November 2018 wurden in diesem Flussabschnitt Anlandungshöhen von etwa 0,5-0,75 m festgestellt. Durch die Überlagerung der Geophonanlage mit Flusssedimenten konnten die Geophone in diesem Zeitraum keine, beziehungsweise nur sehr verzerrte Daten über den Geschiebetransport liefern. Aus diesem Grund wurde eine umfangreiche Datenkorrektur durchgeführt. Aufgrund der langjährigen Messreihe konnten die Daten über eine Durchfluss-Geophon-Beziehung für den vorherrschenden Supply-Zustand korrigiert werden.

Abbildung 3: Jahresganglinie Durchfluss/Geophonimpulse (Tagesmittelwerte), Falkensteinsteig/Drau, 2018 bis 2019



2.2 Geschiebemessungen

Das Jahr 2018 war an der Station Falkensteinsteig von einer intensiven Schneeschmelze sowie dem außerordentlichen Hochwasser (ca. HQ30) Ende Oktober 2018 geprägt. Während der Schneeschmelze wurde daher sowohl eine Dauermessung (7.5.2018 – 20 Einzelmessungen) als auch eine Profilmessung (8.5.2018 – 36 Einzelmessungen) durchgeführt. Die direkten Geschiebemessungen im Zusammenhang mit dem Hochwasser 2018 wurden durch die massiven Anlandungen verzögert. Nachdem ab 11.11.2018 zumindest wieder Teile der Geophonanlage frei waren, konnte am 14.11.2018 eine Dauermessung (20 Einzelmessungen) und am 15.11.2018 eine Profilmessung (29 Einzelmessungen) durchgeführt werden.

Durch den schneereichen Winter 2018/2019 war auch das Frühjahr 2019 durch eine intensive Schneeschmelze mit kontinuierlich hohen Durchflüssen an Drau und Isel gekennzeichnet. Die direkten Geschiebemessungen an der Station Falkensteinsteig wurden im Jahr 2019 am 19. Juni realisiert. Über einen Zeitraum von 6 Stunden wurde eine Profilmessung bestehend aus 43 Einzelmessungen über die gesamte Flussbreite durchgeführt (Abbildung 4). Hierfür wurde der Vent-Sammler mit einer Maschenweite von 8 mm verwendet. Im Anschluss wurden im Zuge einer Dauermessung noch zusätzlich 15 Geschiebeproben in Flussmitte entnommen, wobei Maschenweiten von 4 mm und 8 mm verwendet wurden.

Abbildung 4: Ganglinie Durchfluss/Geophonimpulse 2019 mit dem Messtag am 19.6, Falkensteinsteig/Drau, 16.06 – 24.06.2019 (grün)

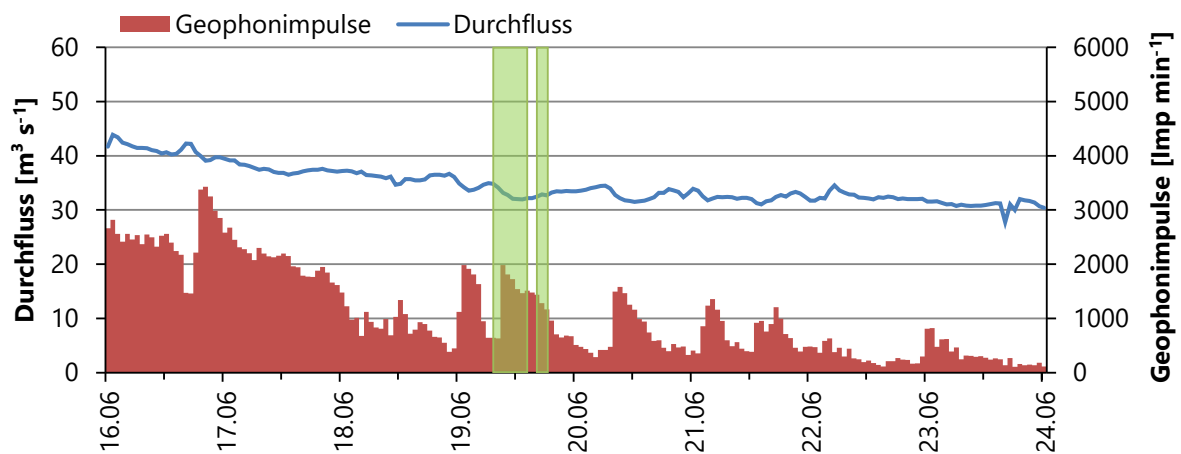


Abbildung 5a zeigt die Entnahme einer Geschiebeprobe während der Schneeschmelze am 7.5.2018. Die Messung wurde mittels Vent-Sammler und 8mm Netz bei einem Durchfluss von $44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durchgeführt. Abbildung 5 b zeigt die Entleerung des Fangnetzes. Bei dieser Einzelmessung wurden nach einer Messdauer von nur 21 Sekunden, 60 kg an Geschiebmaterial mit dem Fänger entnommen.

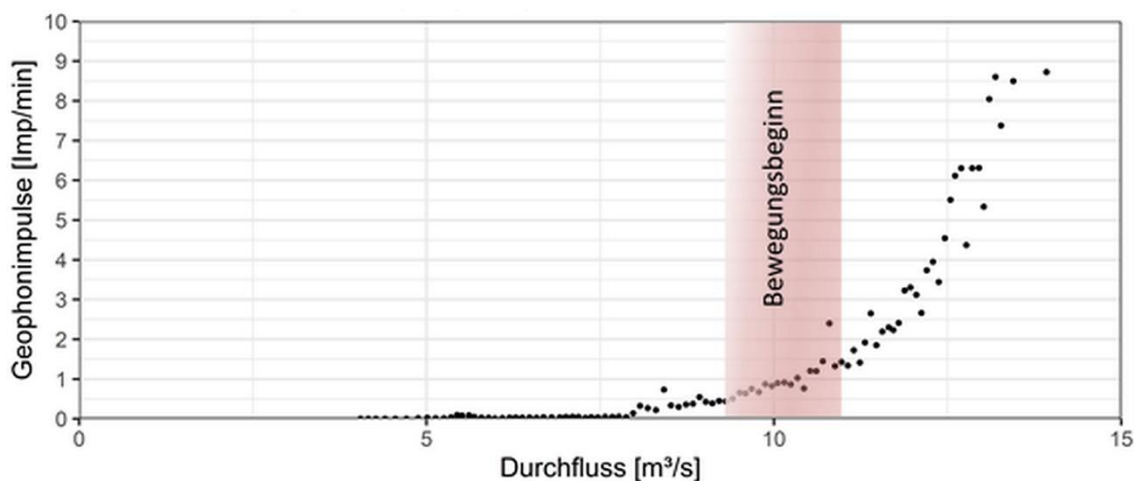
Abbildung 5: Geschiebemessung am 7.5.2018, Falkensteinsteig



2.2.1 Bewegungsbeginn auf Basis der Geophondaten

Mit der Berechnung eines gemittelten Geophon-Messwerts je Durchflussklasse wurde der mittlere Bewegungsbeginn für Geschiebekörner größer 10-30 mm an der Station Falkensteinsteig Drau mit etwa $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ bestimmt (Abbildung 6). Dieser Grenzdurchfluss entspricht etwa 80 % des langjährigen Mittelwassers (MQ) und wurde 2018 an 238 Tagen und 2019 an 246 Tagen überschritten. Seit Inbetriebnahme der Messstation wurde eine ausgeprägte Variabilität im Bewegungsbeginn mit deutlich schwankendem Grenzdurchfluss beobachtet. Diese Variabilität kann auf die sehr episodische Geschiebenachversorgung im Bereich der Messstation zurückgeführt werden.

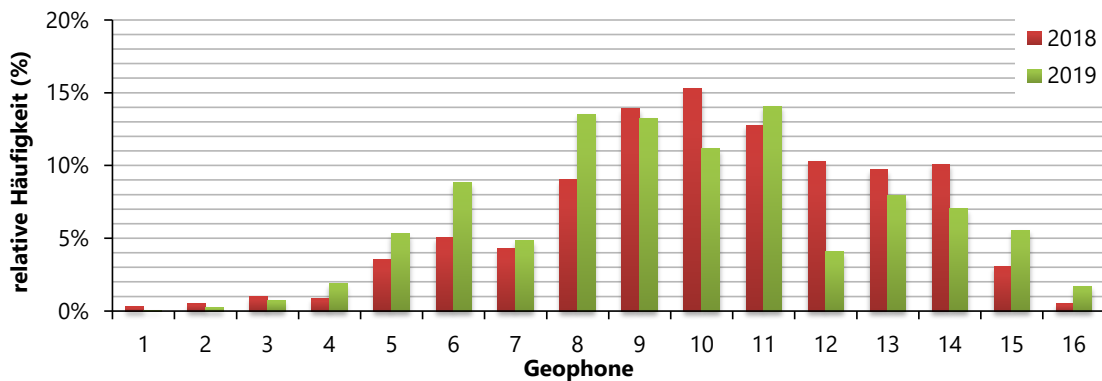
Abbildung 6: Bewegungsbeginn Falkensteinsteig/Drau für Geschiebe größer 10-30 mm, (2001-2019)



2.2.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Geschiebetransports

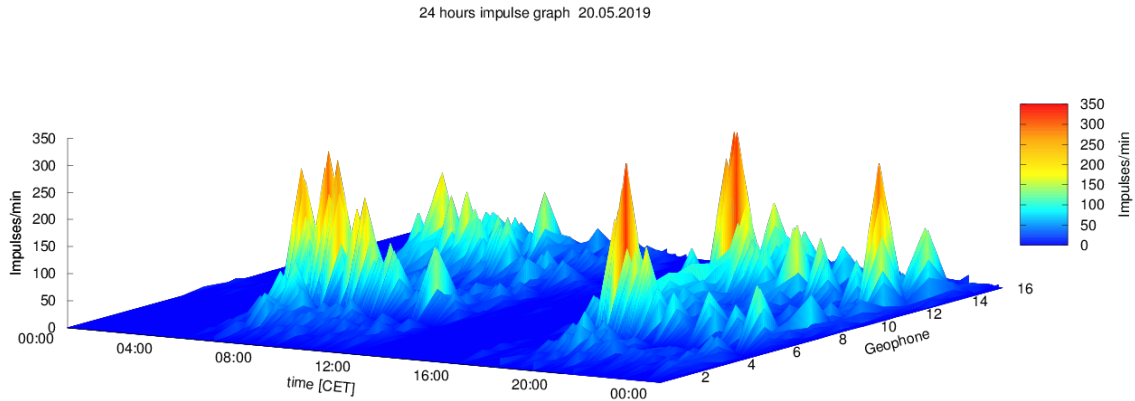
In einem Flussprofil ist der Geschiebetransport nicht gleichmäßig über die gesamte Flussbreite verteilt. Dieses Verhalten wird räumliche Variabilität (Verteilung) bezeichnet. Die räumliche Verteilung des Geschiebetransports an der Station Falkensteinsteig wird in Abbildung 7 für die Jahre 2018 und 2019 dargestellt. Der Großteil des Geschiebetransports tritt zwischen den Geophonen 8 und 14 auf und ist deutlich zum orographisch rechten Ufer hin verschoben. Grund dafür ist das asymmetrische Flussprofil an der Station mit der tiefsten Stelle am orographisch rechten Ufer. In eher nassen Jahren mit viel Geschiebetransport (2018/2019) tritt der der Geschiebetransport vermehrt in Flussmitte auf, in eher trockenen Jahren ist die Verteilung zum rechten Ufer hin verschoben.

Abbildung 7: Räumliche Verteilung des Geschiebetransports; Falkensteinsteig/Drau, 2018 bis 2019



Eine dreidimensionale Visualisierung der Variabilität des Geschiebetransport wird für den 20 Mai 2019 in Abbildung 8 dargestellt. In der Grafik ist eine ausgeprägte räumliche und vor allem zeitliche Variabilität des Geschiebetransports deutlich zu erkennen. Phasen ohne nennenswerten Transport (Bereich 4 Uhr und 16 Uhr) wechseln sich hierbei mit deutlich mobileren Phasen ab (8-12 Uhr, 20-24 Uhr). Grund dafür sind ausgeprägte Schwankungen im Durchfluss, ausgelöst durch den intensiven Schwallbetrieb (Hydropeaking) des Kraftwerks Strassen-Amlach, etwa 2 Kilometer flussauf der Messstation. Durch diese anthropogenen Durchflusssteigerungen wird Geschiebe mobilisiert und flussab transportiert. Wird der Schwallbetrieb eingestellt, reduziert sich der Durchfluss innerhalb kurzer Zeit auf die Restwassermenge, die nicht ausreicht, um Geschiebe in Bewegung zu halten. Auch die räumliche Variabilität des Geschiebetransports über die Flussbreite ist sehr heterogen, wie durch die ungleiche Verteilung der aufgezeichneten Geophonimpulsen je Zeitschritt deutlich wird.

Abbildung 8: Dreidimensionale Darstellung der aufgezeichneten Geophonimpulse, Falkensteinsteg/Drau, 20.05.2019

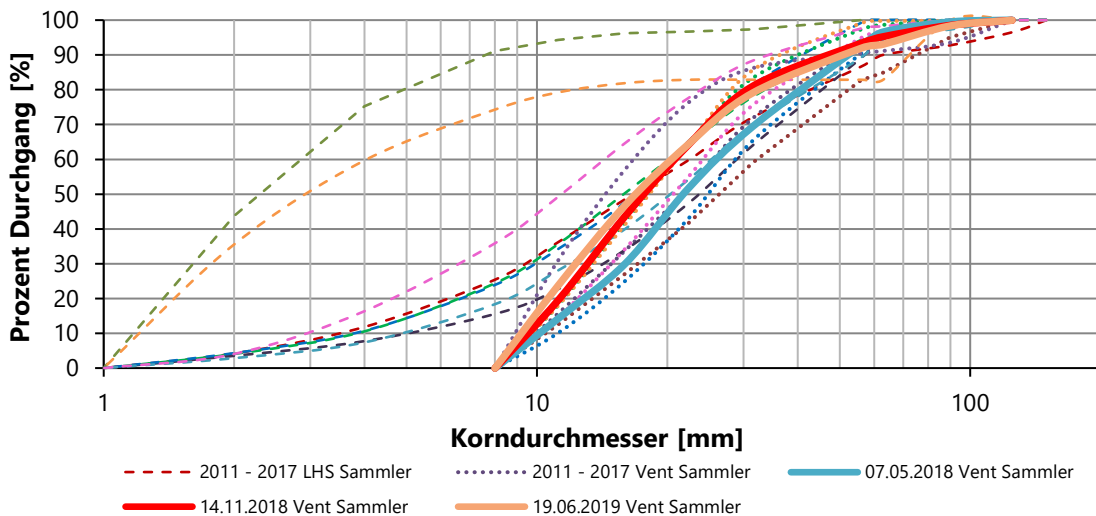


2.2.3 Geschiebetrieb und Geschiebefrachten

2.2.3.1 Geschiebetrieb, Textur

Abbildung 9 zeigt die Korngrößenverteilungen aller Dauermessungen der Jahre 2011 bis einschließlich 2019. Die Messungen in den Jahren 2018/2019 sind hervorgehoben. Für den Vent-Sammler wurden, je nach Durchfluss und Transportintensität, Maschenweiten von 2 mm, 4 mm oder 8 mm eingesetzt. Um die unterschiedlichen Messungen besser miteinander vergleichen zu können, zeigt die Darstellung den Verlauf der Korngrößenverteilung für Geschiebematerial größer 8 mm (punktierte Linien).

Abbildung 9: Kornverteilungen 2011 – 2019 (Dauermessungen); Falkensteinsteg/Drau



Zwischen 2011 und 2017 wurden auch Dauermessungen mit dem Large-Helley Smith Sammler durchgeführt. Da bei diesen Messungen eine Maschenweite von 1 mm verwendet wurde, kann hier der Verlauf der Korngrößenverteilung über das gesamte Größenspektrum dargestellt werden (strichlierte Linien). Die dargestellten Korngrößenverteilungen bilden die Grundlage für die Ermittlung des Geschiebetriebs, der Textur und der Geschiebefrachten.

Textur und Geschiebetrieb wird in Abbildung 10 für eine Dauermessung am 19.06.2019 dargestellt. Durch den relativ intensiven Geschiebetransport (ausklingende Schneeschmelze) konnten bei dieser Messung in einem Zeitraum von nur einer Stunde 15 Einzelmessungen durchgeführt werden. Deutlich zu erkennen ist eine starke zeitliche Variabilität des Geschiebetransports, wobei sich innerhalb weniger Minuten der Geschiebetrieb zum Teil sehr deutlich ändert. Diese Geschiebewellen treten auch bei konstantem Durchfluss auf und besitzen ein Intervall von etwa 25-35 Minuten. Mit steigendem Durchfluss sinkt die Intervalldauer der Geschiebewellen. Für einen besseren Einblick in die transportierten Korngrößen wurde für die Messungen M10-M15 die Maschenweite von 8 mm auf 4 mm reduziert.

Abbildung 10: Dauermessung Falkensteinsteig/Drau, 19.06.2020 – Geschiebetrieb und Textur (Messungen M1-M9 mit 8mm Netz, Messungen M10-M15 mit 4mm Netz)

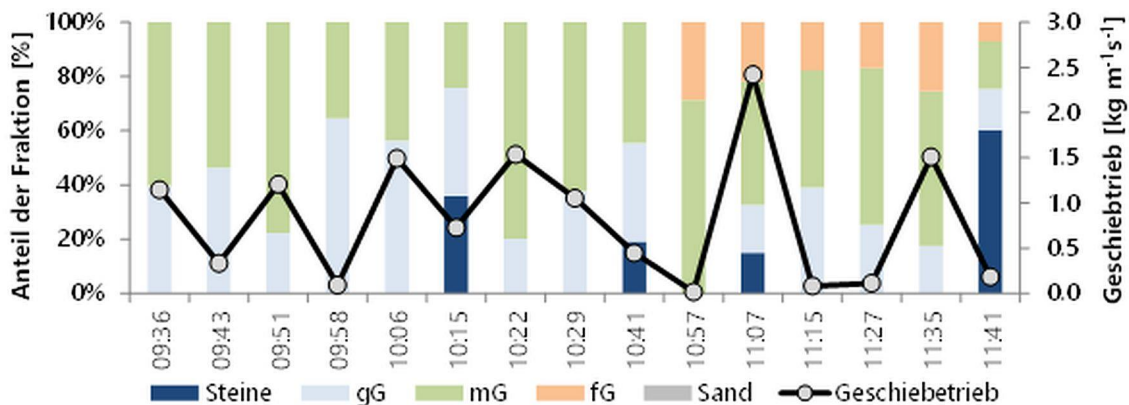
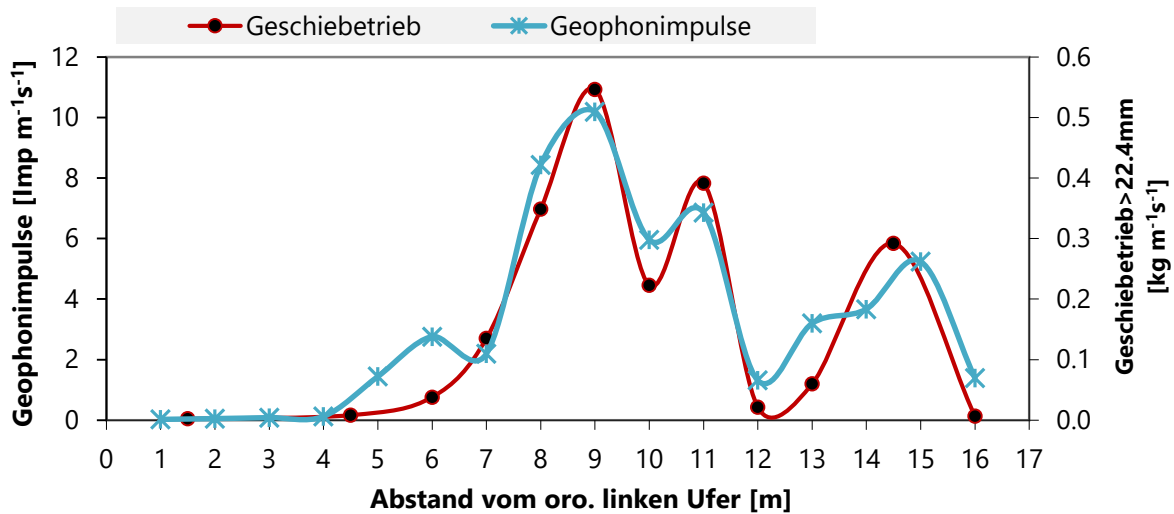


Abbildung 11 zeigt die Breitenverteilung einer Profilmessung mittels 8 mm Netz, die am 19.6.2019 durchgeführt wurde. Zusätzlich dazu ist für den Messzeitraum die Verteilung der aufgezeichneten Geophonimpulse dargestellt. Obwohl die direkte Geschiebemessung einige Meter flussauf der Geophonanlage stattfindet, zeigen beide Messverfahren eine sehr gute Übereinstimmung in der Beschreibung der räumlichen Variabilität des Geschiebetransports an der Station. Die aufgezeichneten Geophonimpulse beschreiben den Geschiebetransport qualitativ und quantitativ gut.

Abbildung 11: Profilmessung Falkensteinsteig/Drau (8mm Netz), 19.6.2019, Breitenverteilung von Geschiebetransport und Geophonimpulsen



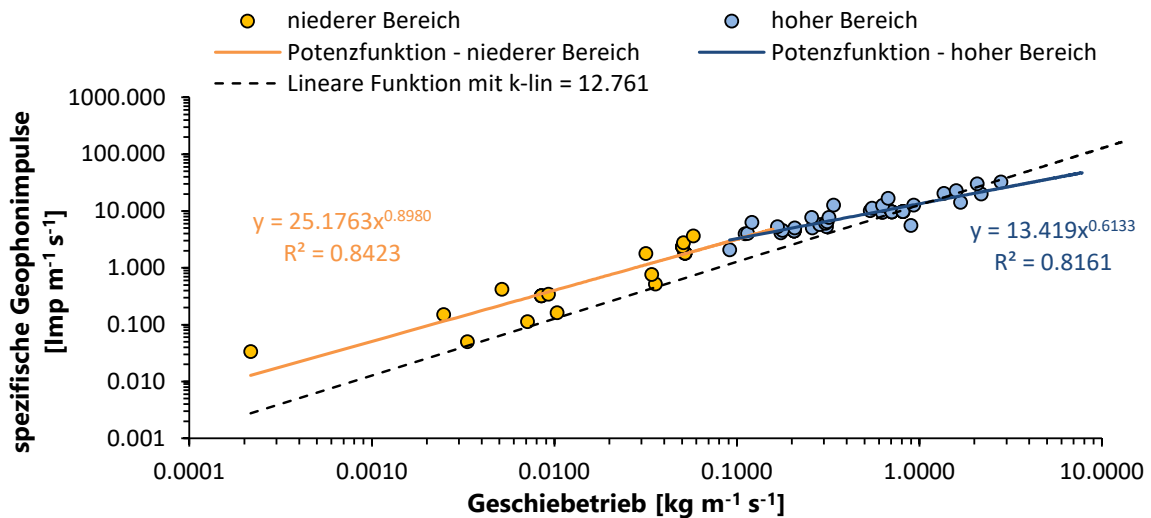
2.2.3.2 Durchfluss/Geschiebetransport-Zusammenhang

Wie bereits zuvor erwähnt, weist der Geschiebetransport an der Station Falkensteinsteig/Drau eine außerordentlich hohe zeitliche Variabilität über das gesamte Durchflussspektrum auf. Grund dafür sind die episodischen Geschiebeeinträge aus der Restwasserstrecke Straßen-Amlach. Aufgrund der deutlich reduzierten Transportgeschwindigkeit von Geschiebe im Vergleich zu Wasser tritt der Geschiebetransport an der Station meist sehr zeitverzögert auf. Stunden und oftmals Tage nach einem Durchflussereignis kommt es hierbei zu einer massiven Steigerung des beobachteten Geschiebetransports (Abbildung 14). Mathematische Beziehungen zwischen Durchfluss und Geschiebetransport an der Station sind daher nur für einen sehr kurzen Zeitraum gültig. Aus diesem Grund wird auf die Berechnung der Geschiebejahresfrachten auf Basis einer Durchfluss-Geschiebe Beziehung verzichtet.

2.2.3.3 Geophon/Geschiebetransport- Beziehung

Für die Berechnung des Geschiebetransports und in Folge von Geschiebefrachten auf Basis der aufgezeichneten Geophonimpulse, ist eine Umrechnung zwischen diesen beiden Größen erforderlich. Hierfür wird ein Punktdiagramm erstellt, das den spezifischen Geschiebetransport (direkte Messungen) und die dabei aufgezeichneten Geophonimpulse darstellt. Abbildung 12 zeigt diesen Zusammenhang für die Messstation Falkensteinsteig/Drau und beinhaltet Daten von Geschiebemessungen aus den Jahren 2012 bis 2019.

Abbildung 12: Zusammenhang Geschiebe ($D < 22,4 \text{ mm}$)/Geophonimpulse, Falkensteinsteg/Drau, 2012-2019



Für die Auswertung wurde eine Vielzahl aus Einzelmessungen aus Dauer- und Profilmessungen kombiniert. Da die Geophonanlage nur für gröbere Geschiebekörner sensitiv ist, gilt der präsentierte Zusammenhang für Geschiebematerial größer 22,4 mm. Wurde früher von einem durchgehend linearen Zusammenhang ausgegangen, so zeigen aktuelle Auswertungen, dass die beste Näherung mit einer geteilten Anpassung zweier Potenzfunktionen erreicht werden kann. Die aktuelle Anpassung erlaubt eine deutlich verbesserte Berechnung vor allem von größeren Transportereignissen – diese wurden mit dem linearen Zusammenhang vormals vermutlich unterschätzt.

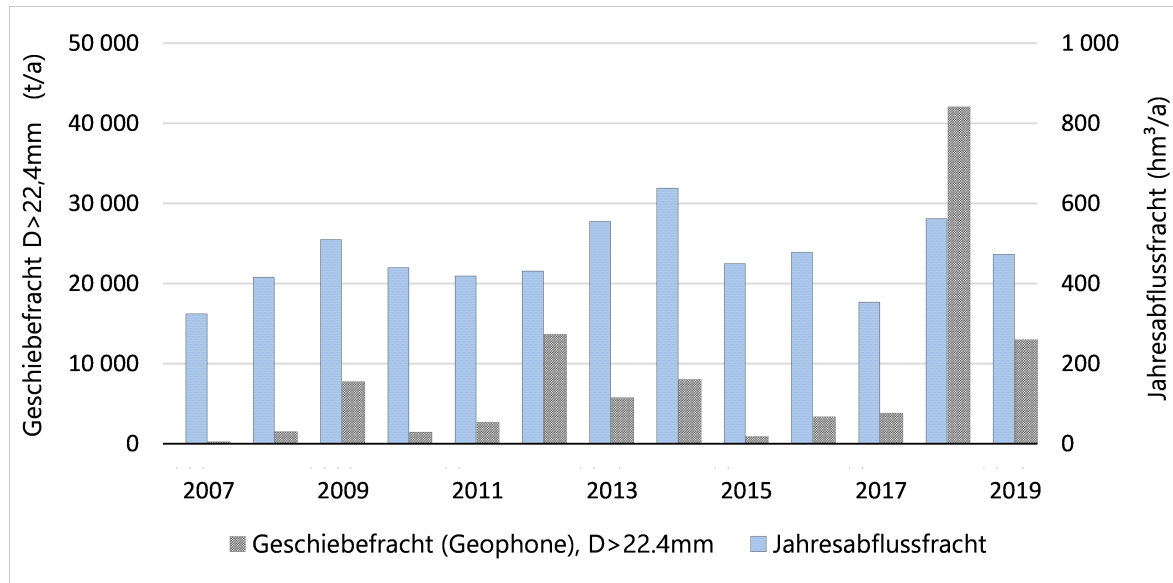
2.2.3.4 Vergleich der Geschiebejahresfrachten

Abbildung 13 zeigt einen Vergleich der Geschiebejahresfrachten ermittelt über die Geophonimpuls/Geschiebe- Beziehung für den Zeitraum 2007 bis 2019. Abbildung 13 zeigt einen grafischen Verlauf der Geschiebe- sowie Durchflussjahresfrachten für denselben Zeitraum.

Die fehlenden Geophondaten im Zeitraum des Hochwasserereignisses 2018 wurden auf Basis bestehender Daten hochgerechnet. Aus diesem Grund ist die angegebene Jahresfracht 2018 ausdrücklich als Schätzwert zu verstehen. Analog zum Geschiebetransport weisen auch die Daten der Jahresgeschiebefrachten eine sehr hohe Variabilität auf. So ist die Jahresfracht 2012 (13700 t) über 15 Mal höher als die Jahresfracht 2015 (900 t). Da die Jahresabflussfrachten eine viel geringere Streuung aufweisen, können die großen Differenzen nicht direkt über die unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen erklärt werden. Vielmehr ist als Ursache der sehr episodische Geschiebeeintrag aus der Restwasserstrecke an-

zuführen, der maßgeblich über die Durchflussbedingungen in diesem Flussabschnitt gesteuert wird. Große Durchflusssteigerungen in der Restwasserstrecke führen hierbei zu einer umfangreichen Mobilisierung von Geschiebe, das in Folge flussab weitertransportiert wird und die Sedimentverfügbarkeit im Bereich der Messstation erhöht.

Abbildung 13: Vergleich der Geschiebejahresfrachten ($D > 22,4$ mm) und der Jahresabflussfrachten, Falkensteinsteig/Drau, 2007-2019



Ist der Durchfluss in der Restwasserstrecke über längere Zeiträume zu gering, so ist diese Geschiebenachversorgung unterbrochen und der Geschiebetransport an der Station Falkensteinsteig sinkt deutlich.

Tabelle 2: Vergleich der Geschiebejahresfrachten (Geophonimpulse), Falkensteinsteig/Drau, 2007-2019

Jahr	Jahresabflussfracht [hm^3/Jahr]	Geschiebefracht $D > 22,4$ mm [t/Jahr]
2007	340	300
2008	470	1500
2009	520	7800
2010	450	1400
2011	450	2700
2012	500	13700
2013	570	5800
2014	690	8000

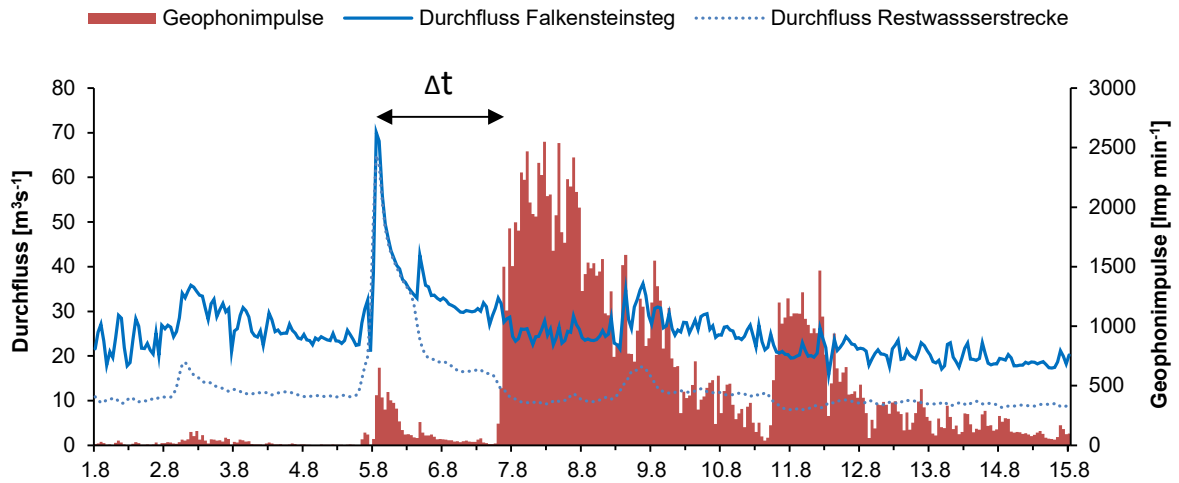
Jahr	Jahresabflussfracht [hm ³ /Jahr]	Geschiebefracht D>22,4mm [t/Jahr]
2015	450	900
2016	480	3400
2017	350	3800
2018	560	42100*
2019	470	13000

2.3 Ausgewählte Besonderheiten der Station

Die Station Falkensteinsteg-Drau zeichnet sich durch einen sehr komplexen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Geschiebetransport aus. Die Analyse der vorhandenen Zeitreihen von Durchfluss und Geophondaten zeigt bei gleichen hydraulischen Bedingungen eine Schwankung des Geschiebetransports von bis zu drei Größenordnungen (Faktor 1000). Grund dafür ist das Auftreten von Geschiebepulsen an der Station. Unter Geschiebepulsen versteht man eine episodische Nachversorgung mit Geschiebematerial. Dabei wird durch eine, oft schlagartige, Erhöhung des zur Verfügung stehenden Geschiebes (z.B. Murenabgang), der Zusammenhang zwischen hydraulischer Beanspruchung und dem daraus resultierenden Sedimenttransport deutlich verändert. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür ist in Abbildung 14 ersichtlich und zeigt ein markantes Hochwasserereignis im August 2015. Etwa zwei Tage nach der Hochwasserspitze wurden hier zwei ausgeprägte Geschiebepulse an der Station registriert und mittels Fangkorbmessungen direkt beprobt. Die auftretenden Geschiebepulse an der Station haben ihren Ursprung in der Restwasserstrecke der Oberen Drau (Pustertal). Durch den Betrieb des Ausleitungskraftwerks Strassen-Amlach sind in diesem Flussabschnitt über weite Teile des Jahres die Durchflussbedingungen nicht ausreichend für die Mobilisierung und den Transport von Geschiebematerial. Durch die limitierte Entnahmemenge des Kraftwerks wird bei Hochwasserereignissen die Restwasserstrecke wiederum verstärkt durchströmt, wodurch es in großem Umfang zu einer Mobilisierung von Geschiebe kommt. Durch die räumliche Distanz zwischen Messstation und Restwasserstrecke (2 km) und der deutlich langsameren Transportgeschwindigkeit von Geschiebekörnern im Vergleich zu Wasser oder Schwebstoff ist eine ausgeprägte Zeitdifferenz (Δt) zwischen Mobilisierung in der Restwasserstrecke und Ankunft an der Messstation zu beobachten. Dadurch ergibt sich eine ausgeprägte Geschiebehysterese im Gegenuhrzeigersinn (Geschie-

bemaximum nach dem Durchflussmaximum). Die Bildung von Geschiebepulsen kann mehrmals pro Jahr beobachtet werden und führt oft zu mittelfristigen Änderungen der Transportzusammenhänge (Aigner et al. 2017). Aus diesem Grund ist die Abschätzung der Geschiebejahresfrachten auf Basis des Durchflusses an der Station nicht zielführend.

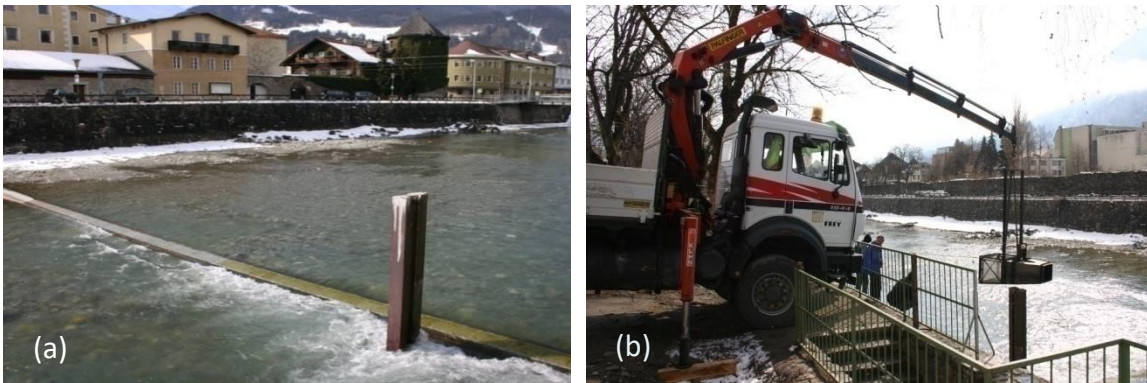
Abbildung 14: Zeitreihe Durchfluss/Geophonimpulse, Falkensteinsteig/Drau, Hochwasser und darauffolgender Geschiebepuls im August 2015



3 Iselsteg/Isel

Die Messstation Iselsteg an der Isel befindet sich im Lienzer Stadtgebiet einige hundert Meter vor der Mündung in die Drau und wurde 2006 errichtet. Geschiebemessungen werden an der Station mittels TIWAG-Sammler im Randbereich des Flussprofils direkt flussab der Geophonanlage durchgeführt (Abbildung 15 a und b). Der Sammler wird durch einen Kran auf eine Führungssäule („Griesssäule“) aufgesetzt und auf die Flusssohle abgesenkt (Abbildung 15 b). Das so gesammelte Geschiebe passiert somit zuvor die Geophonanlage am Geophon 4. Die Station verfügt über eine Geophonanlage mit 32 Geophonen (inkl. Industriecomputer), einen mobilen Geschiebefänger mit austauschbaren Netzen mit unterschiedlichen Maschenweiten, eine Seilanlage für Fließgeschwindigkeitsmessungen mittels eines Ott-Messflügels und für Schwebstoffprobennahmen, eine Trübungssonde, einen Druck- und Schwimmpegel zur Wasserstandsmessung, einer Temperaturmesssonde und eine Fernübertragung der Geophondaten ist durch ein UMTS Modem möglich.

Abbildung 15: Messstation Iselsteg/Isel; Griesssäule und Geophonanlage (a), Messung mit dem Fangkorb (b)

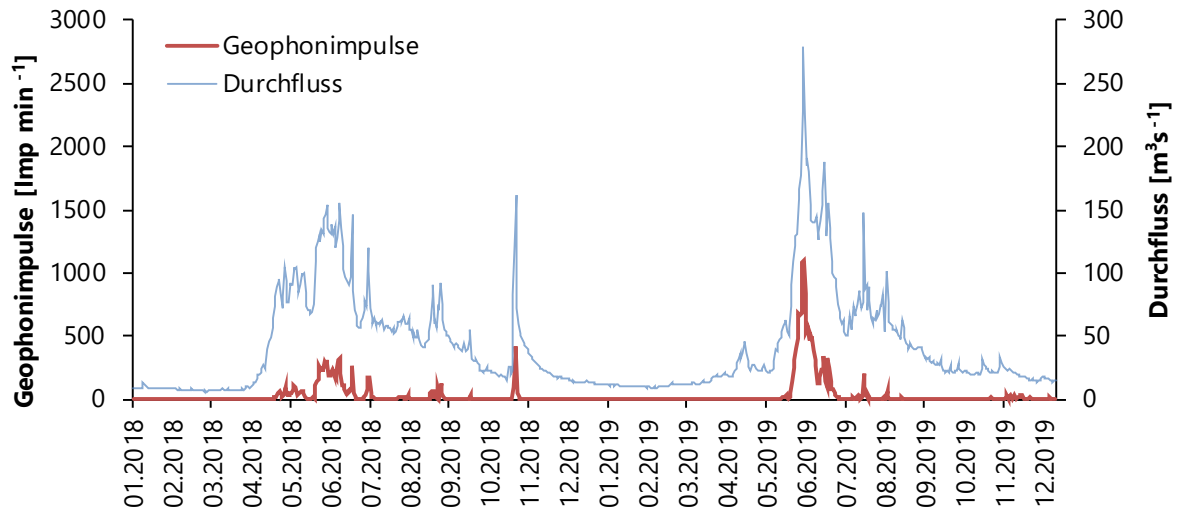


3.1 Hydrologischer Überblick

Abbildung 16 zeigt einen Überblick von Geophonimpulsen und Durchfluss am Iselsteg der Jahre 2018 und 2019. Hydrologisch war das Jahr 2018 an der Isel von einer ausgeprägten Schneeschmelze im Juni, einigen kleineren Durchflussspitzen im Sommer und dem Hochwasserereignis Ende Oktober geprägt. Im Gegensatz zur Drau war der Durchflussanstieg bei dem Hochwasserereignis im Herbst 2018 an der Isel relativ moderat. 2019 setzte die

Schneesmelze etwas später ein und lieferte eine Durchflussspitze von ca. $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Im Sommer kam es zu weiteren, kleineren Durchflussspitzen.

Abbildung 16: Jahresganglinie Durchfluss/Geophonimpulse, Iselsteg/Isel, 2018 bis 2019



3.2 Geschiebemessungen

Die Durchflussverhältnisse an der Station Iselsteg waren im Messjahr 2018 für die Umsetzung von direkten Geschiebemessungen sehr schwierig. Der Geschiebetransport findet normalerweise in Flussmitte (ca. Geophon 12-22) statt. Erst bei Durchflüssen über etwa $160 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ passiert Geschiebematerial relativ regelmäßig das Geophon 4 und wird dort über die Geophonimpulse registriert. Für eine Verwertung der Geschiebemessungen ist eine Detektion des Geschiebes mittels Geophone jedoch unerlässlich, da gesammeltes Geschiebematerial den aufgezeichneten Geophonimpulsen gegenübergestellt wird. Alle großen Durchflussereignisse (größer $160 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) im Messjahr 2018 passierten in den späten Nachtstunden und frühen Morgenstunden die Station. Aus Gründen der Arbeitssicherheit (Totholz, etc.) können jedoch keine Messungen in der Nacht durchgeführt werden.

Durch die besonderen hydrologischen Bedingungen (sehr hoher Durchfluss über mehrere Tage hinweg) im Jahr 2019 konnten die Messkampagnen an der Isel deutlich besser geplant werden. Dadurch konnten Mitte und Ende Juni insgesamt 4 direkte Geschiebemessungen am Iselsteg umgesetzt werden (Abbildung 17 und Abbildung 22). In Summe konnten im Messjahr 2019 71 Einzelmessungen durchgeführt werden. Seit 2008 fanden insgesamt 120 Einzelmessungen an 10 Messtagen statt. Somit konnte 2019 die Anzahl an direkten Geschiebemessungen, vor allem bei hohen Durchflussbedingungen, deutlich erhöht werden. Dies

ermöglicht eine verbesserte Kalibrierung der Geophonimpulse an der Geschiebemesstation.

Abbildung 17: Ganglinie Durchfluss/Geophonimpulse mit den 4 Messtagen im Jahr 2019, Iselsteg/Isel, 01.06 – 01.07.2019

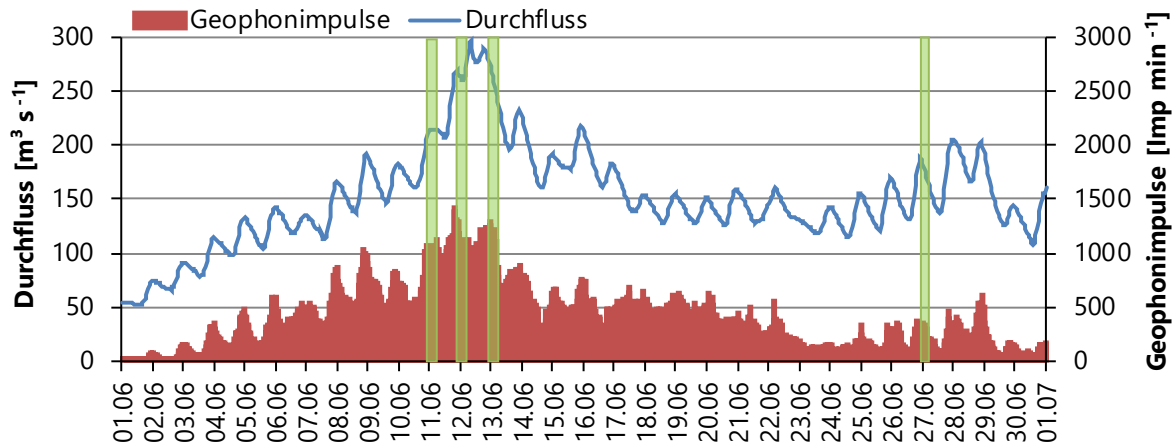


Abbildung 18 a zeigt die Messsituation am 12.06.2019. Anhand der Wasseranschlagslinie an der Grießsäule ist ein hoher Durchfluss erkennbar (vgl. Abbildung 15 a). In Abbildung 18 b ist das gefangene Geschiebematerial mit einem Fängernetz von 8 mm dargestellt. Es sind deutlich größere Fraktionen erkennbar.

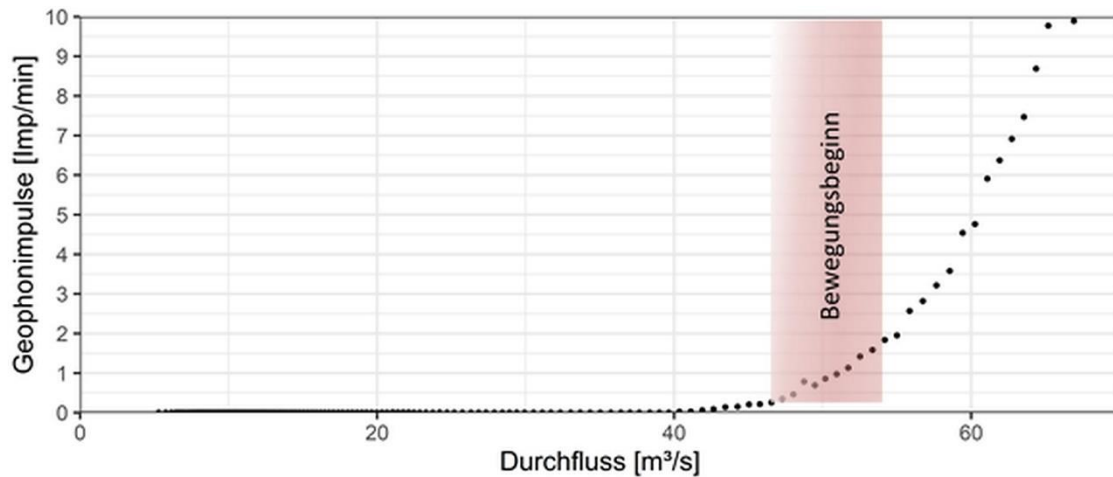
Abbildung 18: Geschiebemessung am 12.06.2019, Iselsteg/Isel



3.2.1 Bewegungsbeginn auf Basis der Geophondaten

Der Bewegungsbeginn für Geschiebekörner größer 10-30 mm an der Station Iselsteg/Isel ist bei etwa $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ zu erkennen. Dieser Durchfluss entspricht etwa 30 % von MQ. Abbildung 19 zeigt den Zusammenhang von Durchfluss und Geophonimpulsen bis zu einem Durchfluss von $70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

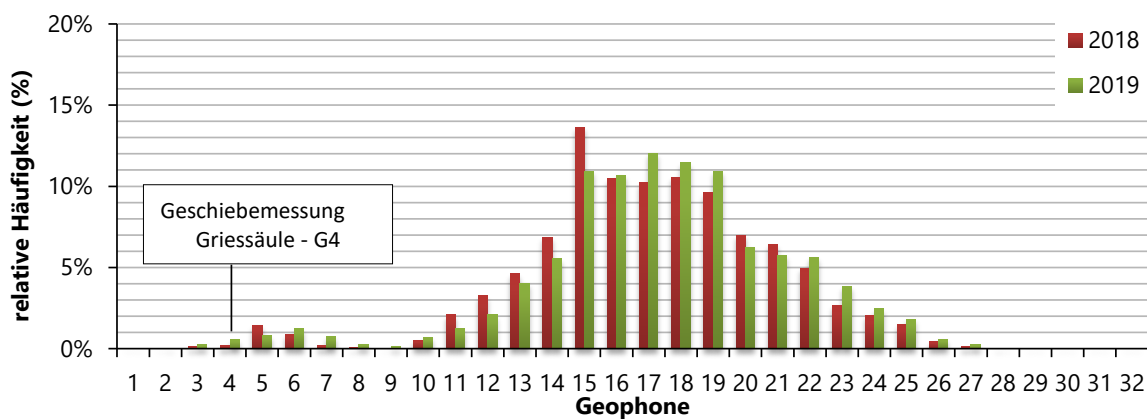
Abbildung 19: Bewegungsbeginn Isel für Geschiebe größer 10-30 mm, (2009-2019)



3.2.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Geschiebetransports

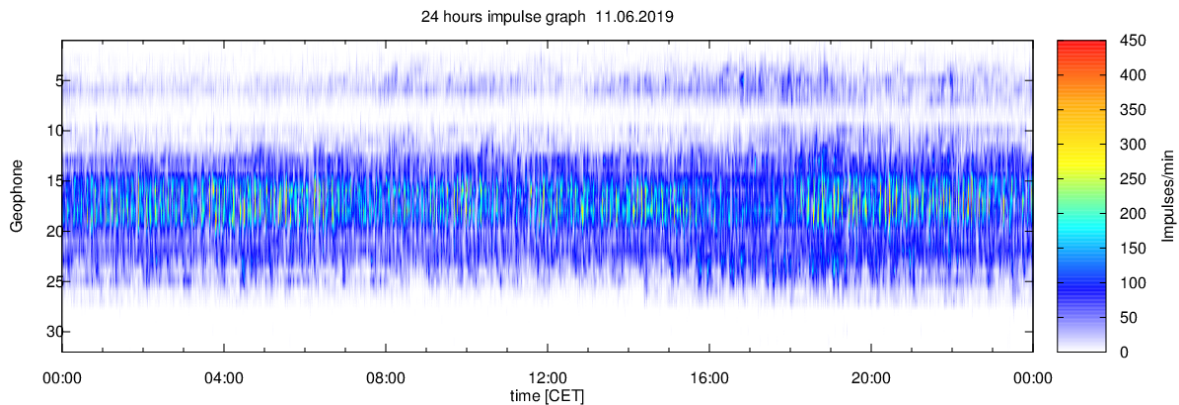
Die räumliche Verteilung des Geschiebetransports am Iselsteg wird in Abbildung 20 für die Jahre 2018 und 2019 gezeigt. Durch die bauliche Ausformung des Flussprofils (tiefste Stelle am orographisch linken Ufer) bilden sich zwei Bereiche mit Geschiebetransport aus. Der Großteil des Geschiebetransports passiert in Flussmitte das Profil. Im Bereich der Griessäule (Geschiebemessungen, orografisch linkes Ufer) befindet sich ein weiterer Bereich mit Geschiebetransport.

Abbildung 20: Räumliche Verteilung des Geschiebetransports; Iselsteg/Isel, 2018 bis 2019



In Abbildung 21 wird der Verlauf der räumlichen Verteilung der Geophonimpulse am 12.06.2019 gezeigt (Datengrundlage 1-Minute Geophonimpulswerte). Durch die aufgetzeichneten Geophonimpulse ist ein deutlicher Geschiebetransport in den zwei „Geschiebetransport-Bereichen“ (vgl. Abbildung 20) erkennbar. An diesem Datum konnte auch eine Geschiebemessung durchgeführt werden.

Abbildung 21: Verlauf der räumlichen Verteilung der Geophonimpulse, Iselsteg/Isel, 11.06.2019



3.2.3 Geschiebetrieb und Geschiebefrachten

2007 bis 2019 wurden 16 erfolgreiche Dauermessungen mit dem TIWAG-Sammler durchgeführt. Es fanden noch weitere Messversuche statt, diese mussten aber aufgrund starken Totholztransports abgebrochen werden. Besonders im Messjahr 2019 konnten mit 4 Dauermessungen und 71 Einzelmessungen die meisten Messungen durchgeführt werden.

3.2.3.1 Geschiebetrieb, Textur

Abbildung 22 zeigt die Korngrößenverteilungen der gesamten Dauermessungen der Jahre 2007 bis einschließlich 2019. Die vier Messungen des Jahres 2019 sind hervorgehoben, die Messungen von 2007 bis 2018 sind als punktierte Linie dargestellt. Für den TIWAG-Sammler können verschiedene Maschenweiten eingesetzt werden. Am 11. und 12. Juni 2019 wurde mit einer Maschenweite von 8 mm und am 13. sowie am 27. Juni 2019 mit einer Maschenweite von 2,5 mm gemessen. Die Korngrößenverteilungen bilden die Grundlage für die Ermittlung des Geschiebetriebs, der Textur und der Geschiebefrachten.

Abbildung 22: Kornverteilungen 2007-2019; Iselsteg/Isel

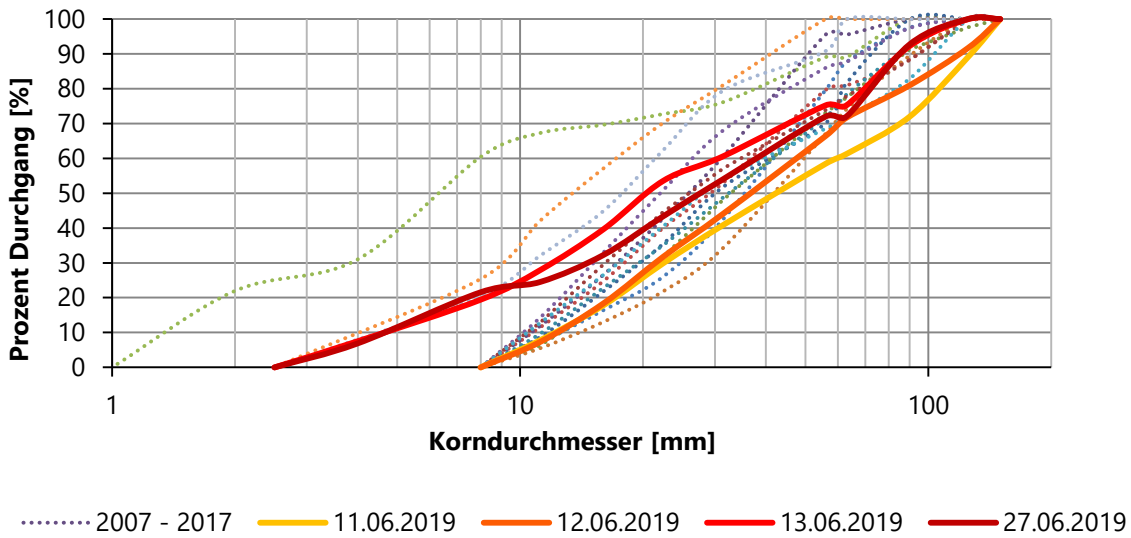
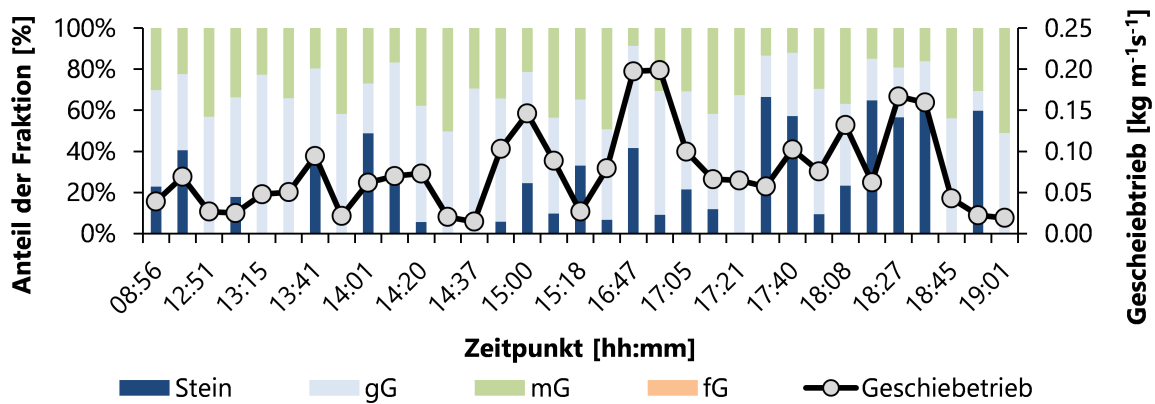


Abbildung 23 zeigt die Textur und den Geschiebetrieb der Dauermessung am 12.06.2019 im Zeitraum von 08:56 bis 19:01. Bei dieser Dauermessung konnten 33 Einzelmessungen mit einer Maschenweite von 8 mm durchgeführt werden.

Abbildung 23: Dauermessung Iselsteg/Isel, 12.06.2019 – Geschiebetrieb, Textur



3.2.3.2 Durchfluss/Geschiebetransport-Zusammenhang

In Abbildung 24 werden die Mittelwerte jeder Einzelmessung den mittleren Durchflüssen während der Messung gegenübergestellt und in einem Punktdiagramm verknüpft, wodurch die Durchfluss/Geschiebetransport- Beziehung für die Station Iselsteg erstellt wird. In Gelb sind die Einzelmessungen des Messjahres 2019 hervorgehoben. Da der Geschiebetransport eine deutliche zeitliche Variabilität aufweist, (auftreten von Geschiebewellen, Geschiebemaxima vor Durchflussmaxima) zeigt der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Geschie-

betransport zwangsweise eine gewisse Streuung auf. Für die Berechnung der Geschiebejahresfracht über den Durchfluss wird eine Potenzfunktion angewandt. Dadurch werden die Geschiebejahresfrachten ab dem Bewegungsbeginn mittels Durchfluss/Geschiebe- Zusammenhang hochgerechnet.

Abbildung 24: Zusammenhang von Durchfluss und Geschiebetransport ($D > 22,4$ mm), Iselsteg/Isel, 2008-2019

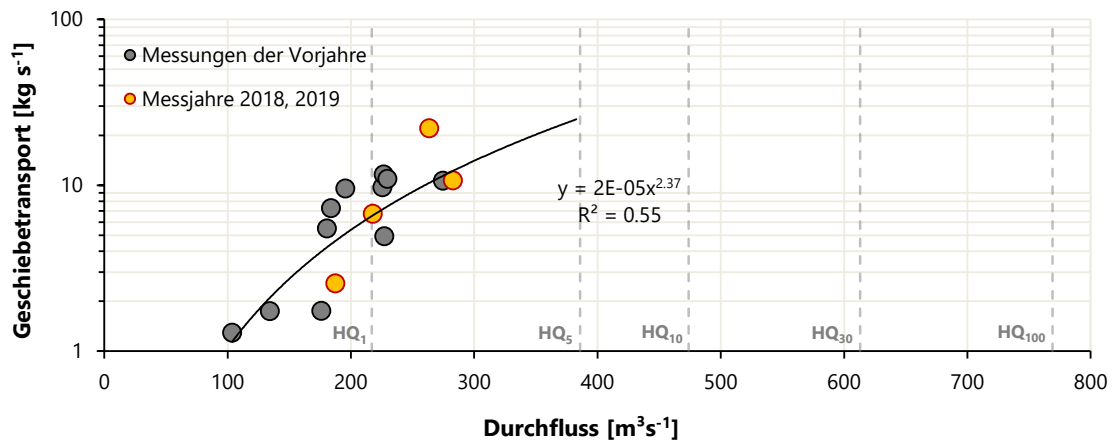
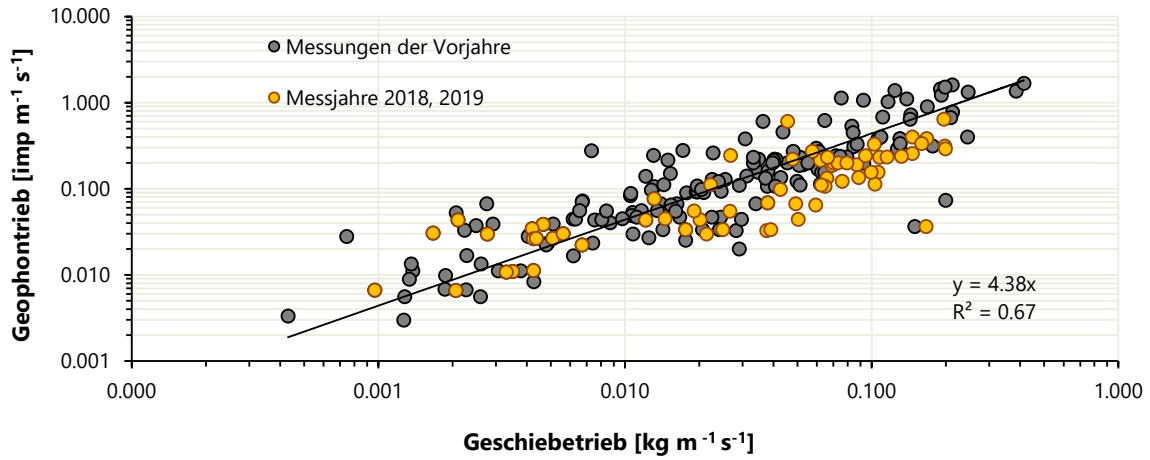


Abbildung 25: Zusammenhang Geschiebe ($D > 22,4 \text{ mm}$)/Geophonimpulse, Iselsteg/Isel, 2008-2019



3.2.3.4 Vergleich der Geschiebejahresfrachten

Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der Geschiebejahresfrachten mit dem Berechnungsansatz über Durchfluss und Geschiebe (basierend auf einer Potenzfunktion) und über die Geophonimpuls-Geschiebe Beziehung im Zeitraum 2007 bis 2019. Abbildung 26 zeigt einen grafischen Vergleich der berechneten Jahresfrachten.

Abbildung 26: Vergleich der Geschiebejahresfrachten ($D > 22,4 \text{ mm}$ und $D > 8 \text{ mm}$), Iselsteg/Isel, 2007-2019

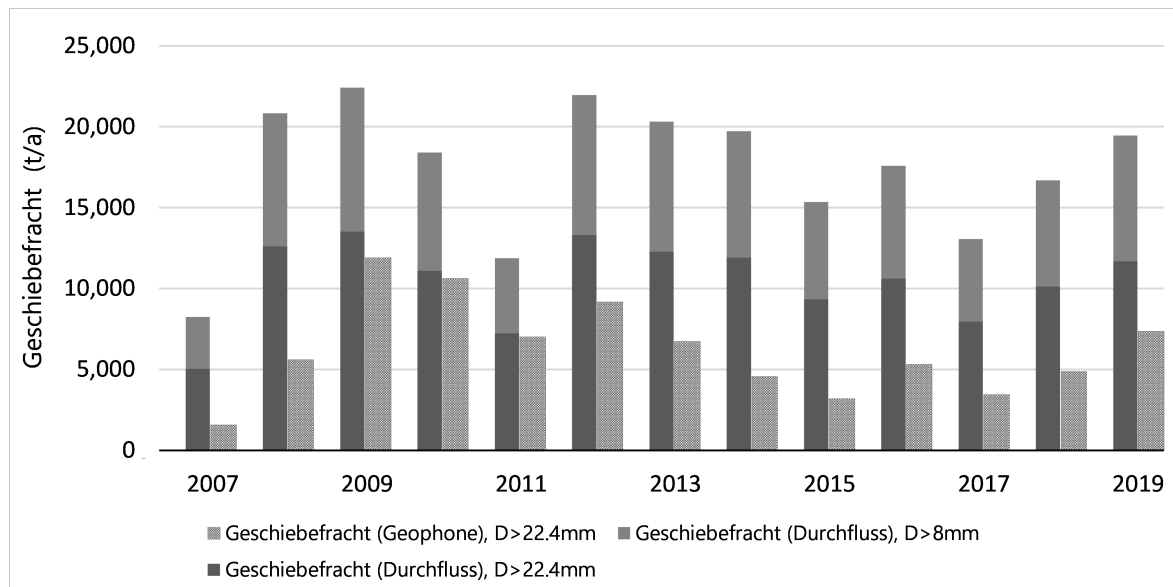


Tabelle 3: Vergleich der Geschiebejahresfrachten, Iselsteg/Isel, 2007-2019

Jahr	Jahresabflussfracht [hm ³ /Jahr]	Durchfluss/Geschiebe		Geophonimpulse/Geschiebe
		Geschiebefracht D>8mm [t/Jahr]	Geschiebefracht D>22,4 mm [t/Jahr]	Geschiebefracht D>22,4 mm [t/Jahr]
2007	1100	8200	5000	1600
2008	1400	20800	12600	5600
2009	1400	22400	13500	11900
2010	1300	18400	11100	10600
2011	1200	11900	7200	7000
2012	1600	22000	13300	9200
2013	1500	20300	12300	6700
2014	1500	19700	11900	4600
2015	1300	15400	9300	3200
2016	1300	17600	10600	5300
2017	1200	13100	8000	3400
2018	1400	16700	10100	4900
2019	1300	19500	11700	7400

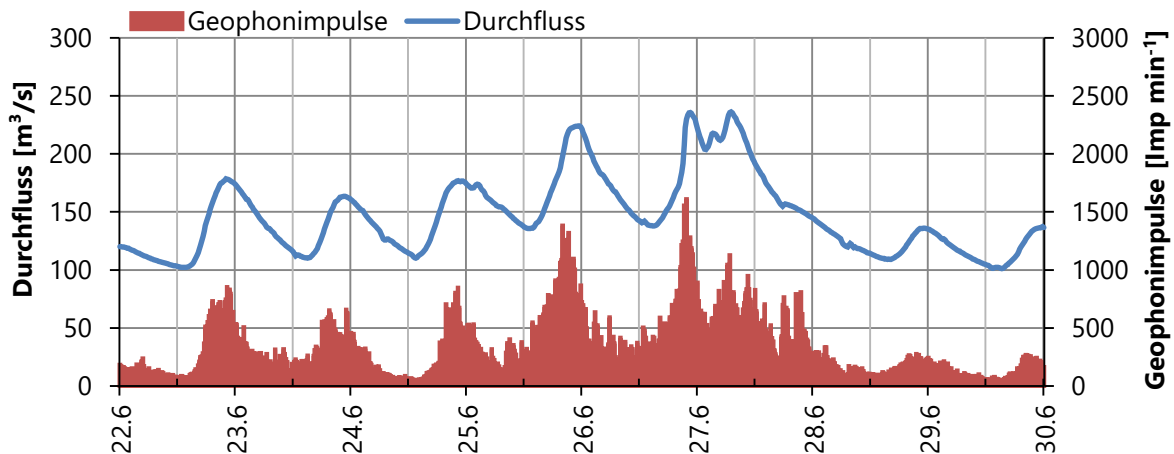
Die Ergebnisse der Frachtenberechnung von Material größer 22,4 mm liegen in einer ähnlichen Größenordnung, weisen jedoch zum Teil deutliche Unterschiede auf. Grundsätzlich geht der Berechnungsansatz auf Basis der Durchflussentwicklung von einem unveränderlichen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Geschiebetransport aus. Demgegenüber basiert die Frachtenberechnung über die registrierten Geophonimpulse auf einer kontinuierlichen, indirekten Beobachtung des Geschiebetransports. Der Vergleich der beiden Berechnungsergebnisse an der Isel weist daher auf Änderungen der Geschiebenachversorgung im Untersuchungszeitraum hin. In den Jahren 2009 bis 2011 bestand vermutlich eine größere Sedimentverfügbarkeit im Bereich der Messstation. Dadurch kam es zu erhöhten Geschiebetransport, der von den indirekten Sensoren aufgezeichnet werden konnte. Seit dem Jahr 2012 scheint die Sedimentverfügbarkeit an der Station wieder abzunehmen, wodurch sich beobachteten Geschiebefrachten deutlich reduzierten. Für die vorherrschende Intensität des Geschiebetransports an der Station ist daher die Entwicklung der Sedimentverfügbar-

keit von großer Bedeutung. Insbesondere die jährlich variierende Schnee- und Gletscherschmelze scheint maßgeblichen Einfluss auf den Geschiebeeintrag und den Geschiebetransport an der Isel zu haben. Darüber hinaus können vor allem ausgeprägte Hochwasserereignisse zu einer umfangreichen Mobilisierung von Geschiebematerial führen und so die Sedimentverfügbarkeit über einen längeren Zeitraum deutlich erhöhen. Die Berechnung der Geschiebefrachten auf Basis der Durchflussentwicklung kann auch für Geschiebe ab einer Korngröße von $D > 8$ mm durchgeführt werden.

3.3 Ausgewählte Besonderheiten der Station

Die Station Iselsteg/Isel ist von Gletschern im Einzugsgebiet beeinflusst. Abbildung 27 zeigt Ganglinien von Durchfluss und Geophonimpulsen für den Zeitraum der Schneeschmelze im Juni 2016. Sehr deutlich ist ein regelmäßiges tägliches Durchflussmaximum zu erkennen. Dieser ausgeprägte Tagesgang ist auf die Schnee- und Gletscherschmelze zurückzuführen, wobei durch die lange Fließzeit das Durchflussmaximum an der Station Iselsteg erst um etwa Mitternacht auftritt. Wie die Grafik eindrücklich zeigt, ist der Geschiebetransport an der Station, vor allem in den Sommermonaten, maßgeblich von der Schnee- und Gletscherschmelze in den hochalpinen Bereichen des Einzugsgebiets bestimmt.

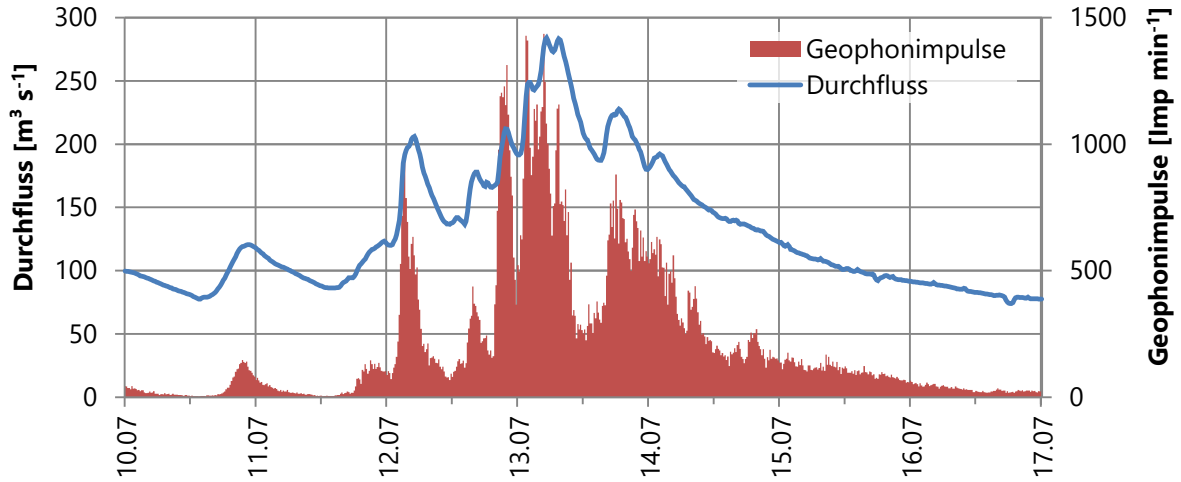
Abbildung 27: Durchfluss- und Geophonimpulsganglinie, Iselsteg/Isel, 22-29 Juni 2016



Eine weitere interessante Auffälligkeit an der Station ist das Vorauseilen des Geschiebetransports im Vergleich zum Durchfluss. Wie in Abbildung 28 ersichtlich, tritt das Geschiebemaximum regelmäßig bei ansteigender Welle auf und nimmt mit fallender Welle deutlich ab. Dies ist vermutlich auf das deutlich höhere Energieliniengefälle bei ansteigendem Durchfluss zurückzuführen. Das Ergebnis der Geschiebemessungen an der Station ist daher

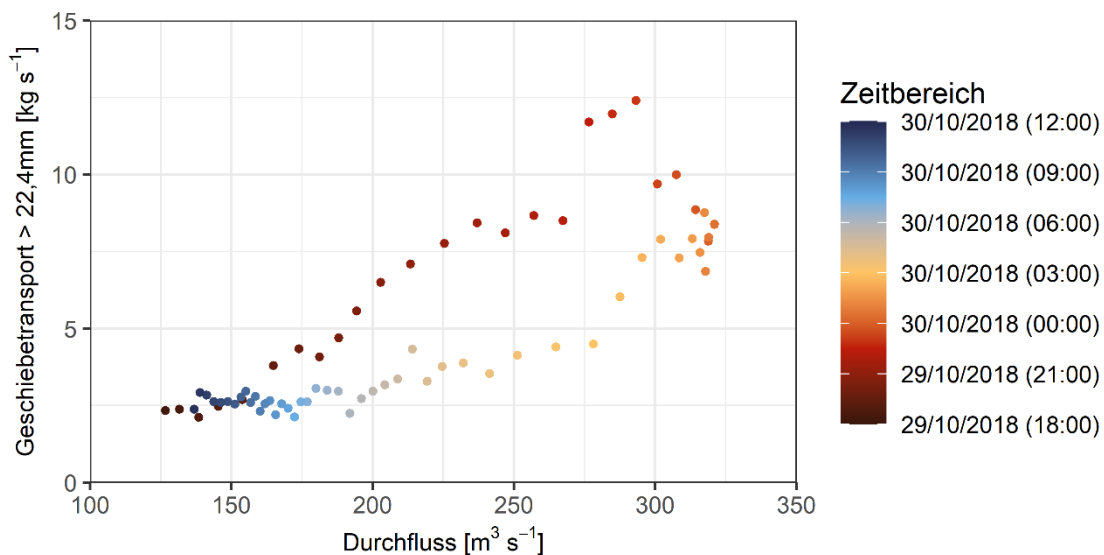
stark von der Entwicklung der Durchflussganglinie abhängig (steigend/konstant/fallend) und liefert, je nach Messzeitpunkt, teilweise deutlich unterschiedliche Messergebnisse.

Abbildung 28: Durchfluss- und Geophonimpulsganglinie, Iselsteg/Isel, 10-17. Juli 2016



Sehr deutlich konnte dieses Vorseilen des Geschiebetransports auch beim Hochwasser 2018 beobachtet werden. Abbildung 29 zeigt während der Passage des Hochwasserscheitels eine markante Geschiebehysterese in Uhrzeigerichtung. Bei gleichem nominalem Durchfluss wurden während der ansteigenden Welle zum Teil mehr als doppelt so hohe Geschiebetransportraten gemessen als bei abklingender Welle.

Abbildung 29: ausgeprägte Geschiebehysterese, Iselsteg/Isel, 29-30. Oktober 2018



4 Dellach/Drau

Die Messstation Dellach/Drau befindet sich in Kärnten, etwa 27 km flussab der Messstationen Falkensteinsteg/Drau (Osttirol). Die Messstation wurde 2006 errichtet und 2008 durch den Bau der elevierbaren Falle erweitert (siehe Abbildung 30 c). Die Messstation besteht aus einer Geophonanlage mit 40 Geophonen, einem Industrierechner, der die Daten verarbeitet und speichert, drei Geschiefefallen wovon eine elevierbar ist, einer Radarsonde zur Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit, zwei optischen Schwebstoffsonden, einem Druckmesspegel, einer kapazitiven Sonde zur Erfassung des Wasserstandes und einer Temperatursonde. Zusätzlich wird das Messsystem durch einen mobilen Messanhänger ergänzt, mit dem der Geschiebetransport mittels LHS-Sammler, die Fließgeschwindigkeit mithilfe eines Ott- Messflügels und Schwebstoffkonzentration mittels USP-Sammler gemessen wird. Die gesamten erfassten Daten werden mittels UMTS Modem an einen FTP- Server der BOKU übertragen. In Abbildung 30 sind die für die Erfassung des Geschiebetransports relevanten Messinstrumente abgebildet.

Abbildung 30: Messstation Dellach/Drau; Geophonanlage (a), Messanhänger (b), Hubfalle (c)

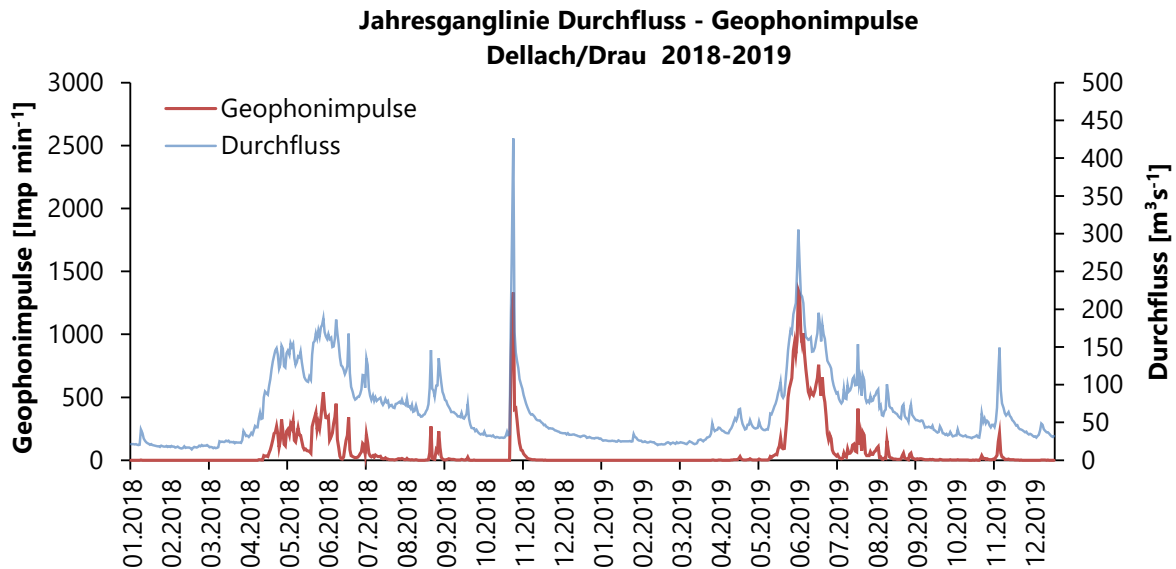


4.1 Hydrologischer Überblick

Abbildung 31 zeigt einen Überblick von Geophonimpulsen und Durchfluss an der Messstation Dellach/Drau der Jahre 2018 und 2019. Hydrologisch war das Jahr 2018 an der Drau von einer ausgeprägten Schneeschmelze im Juni, einigen kleineren Durchflussspitzen im Sommer und einem Hochwasserereignis Ende Oktober (etwa HQ_{30}) geprägt. 2019 setzte die Schneeschmelze etwas später ein und lieferte eine Durchflussspitze von ca. $330 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Im Sommer sowie im Spätherbst kam es zu weiteren, kleineren Durchflussspitzen. Im Juni und Juli 2019 ist eine sehr hohe Impulsrate im Verhältnis zum Durchfluss zu bemerken, was

Rückschlüsse auf den erhöhten Sedimenteintrag durch das Hochwasser im Oktober 2018 zulässt

Abbildung 31: Jahresganglinie Durchfluss/Geophonimpulse, Dellach/Drau, 2018 bis 2019



4.2 Geschiebemessungen

Erstmals konnten 2018 am Messstandort Dellach/Drau Geschiebemessungen bei einem Durchfluss von bis zu $680 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ mit den Geschiebefallen durchgeführt werden. Aufgrund der geringen Durchflussspitzen im Frühjahr und Sommer 2018 standen im Oktober noch alle Geschiebefallen zur Verfügung und so konnte das Hochwasserereignis am 29.10 und 30.10 ausführlich beprobt werden (Siehe Abbildung 32 und Abbildung 33b). Da der Hochwasserscheitel um ca. 03:00 Uhr morgens auftrat, erfolgten die Messungen in der Nacht von 29.10 auf 30.10. Hier ist hervorzuheben, dass diese Messungen aufgrund des hohen Durchflusses sowie der Tageszeit nur mit Geschiebefallen möglich waren. Beim Abklingen der Hochwasserwelle erfolgte am 31.10.2018 noch zusätzlich eine Profilmessung mit dem LHS-Sammler. Im Zeitraum vom 28.05.2018 bis 30.05.2018 wurden zusätzlich zwei Dauer-messungen und eine Profilmessung mit dem LHS-Sammler durchgeführt.

Auch 2019 konnten drei erfolgreiche Fallenmessungen durchgeführt werden. In diesem Jahr erfolgten am 11.06 sowie 12.06 während den, für diese Station, typisch hohen Frühsommer Abflüssen zwei Fallenmessungen (siehe Abbildung 33a). Mit der Messung am 12.06.2019 konnte die Durchflussspitze des Jahres 2019 beprobt werden. Die dritte Fallenmessung des Jahres erfolgte am 23.11 bei einem mittleren Durchfluss von ca. $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ und dauerte 120

Stunden und 34 Minuten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der gemessene Durchfluss nur leicht über dem Bewegungsbeginn lag.

Seit 2007 konnten somit 20 erfolgreiche Geschiebefallenmessungen sowie 17 Profilmessungen am Standort Dellach/Drau durchgeführt werden, die wesentlich zu einem besseren Geschiebetransportprozessverständnis beitragen.

Abbildung 32: Geschiebemessungen während des Hochwassers im Oktober 2018 (Fallenmessungen rot und LHS-Messungen grün markiert)

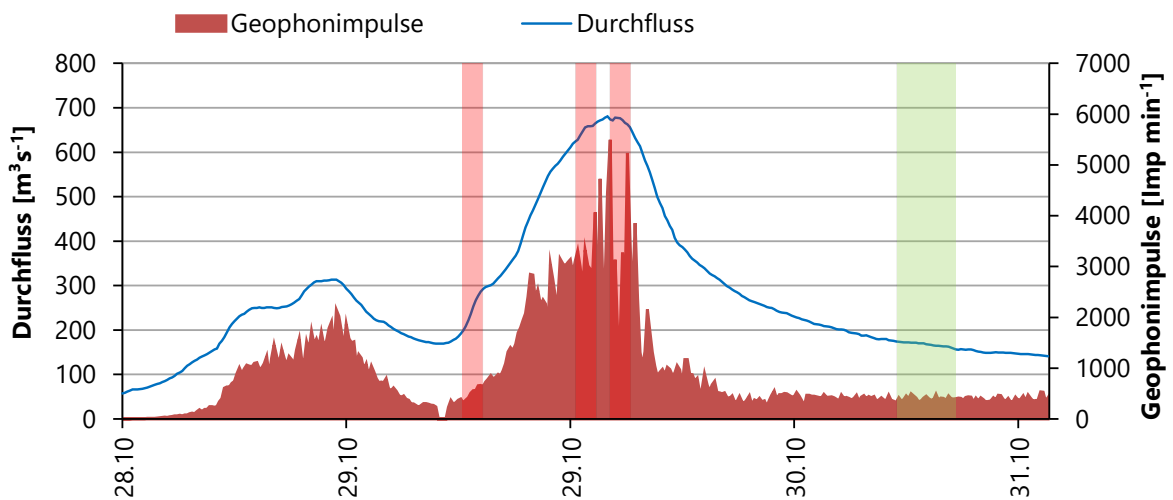


Abbildung 33: Abflusssituation während der Geschiebemessungen am a) 12.06.2019 und b) 30.10.2018

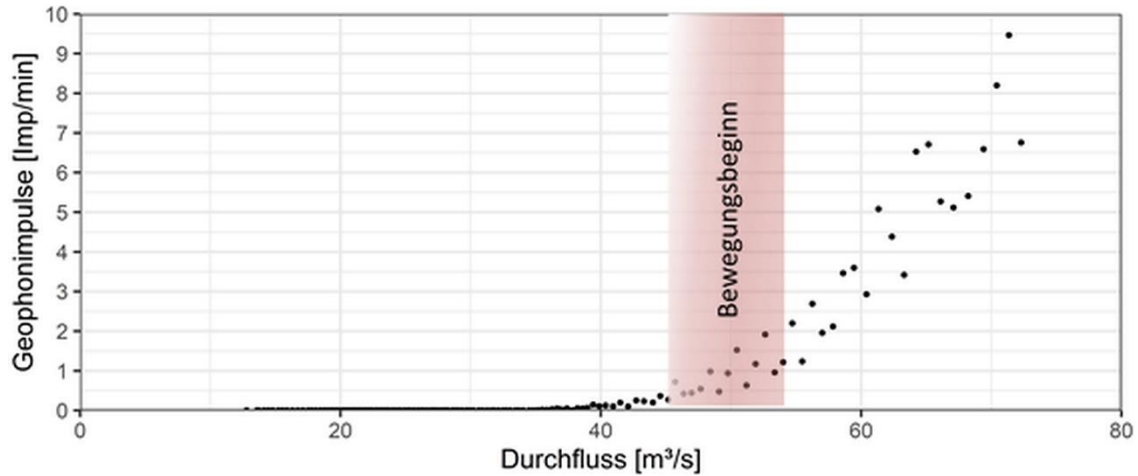


4.2.1 Bewegungsbeginn auf Basis der Geophondaten

Der Bewegungsbeginn für Geschiebekörner größer 10-30 mm an der Station Dellach/Drau ist bei etwa $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ zu erkennen. Dieser Durchfluss entspricht etwa 75 % von MQ und wurde 2018 an 202 Tagen und 2019 an 189 Tagen überschritten.

Abbildung 34 zeigt den Zusammenhang von Durchfluss und Geophonimpulsen bis zu einem Durchfluss von $80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Abbildung 34: Bewegungsbeginn Dellach für Geschiebe größer 10-30mm, (2015-2019)



4.2.2 Räumliche und zeitliche Verteilung des Geschiebetransports

Die räumliche Verteilung des Geschiebetransports an der Station Dellach/Drau wird in Abbildung 35 für die Jahre 2018 und 2019 gezeigt. Die relativen Anteile am Gesamttransport ändern sich im Lauf der Jahre meist nur geringfügig. Generell tritt Geschiebetransport in einem großen Teil des Flussprofils auf (Geophon 7 bis 35). Nur in Uferbereichen, von Geophon 1 bis 6 beziehungsweise Geophon 36 bis 40, werden kaum Geophonimpulse registriert. Die hohe Dynamik des Geschiebetransports führt zu permanenten Umlagerungen der Transportzentren (räumliche Variabilität). Die für direkte Geschiebemessungen verwendeten Geschiebefallen sind hinter den Geophonen 19, 25 und 32 installiert.

Abbildung 35: Räumliche Verteilung des Geschiebetransports; Dellach 2018 bis 2019

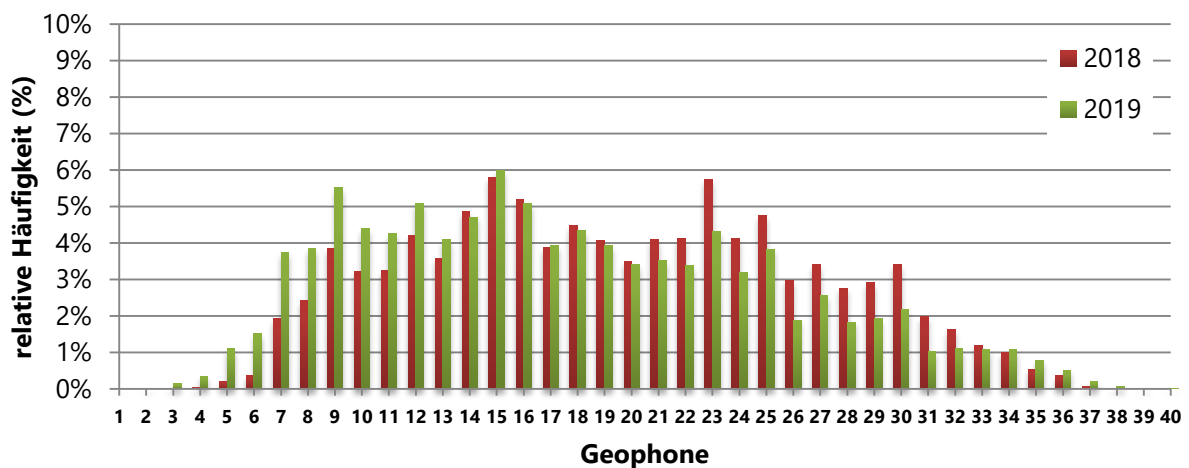
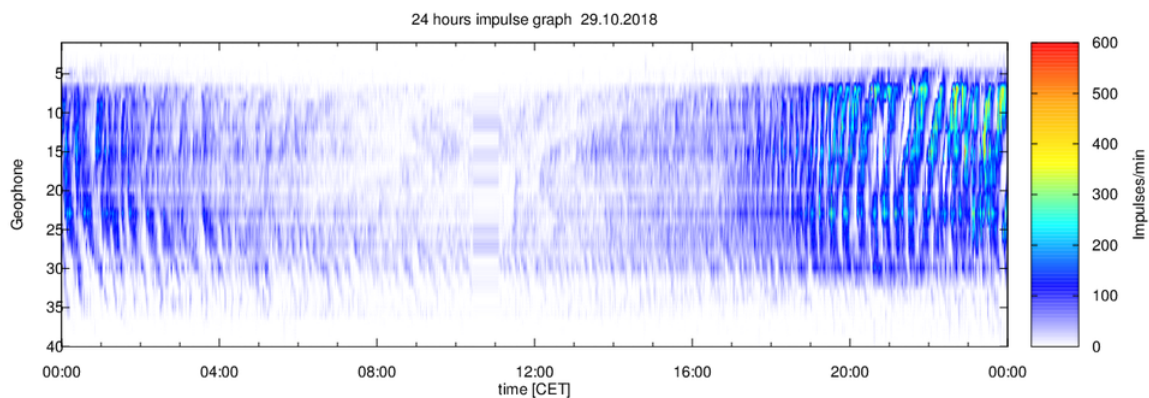


Abbildung 36 zeigt den Verlauf der räumlichen sowie zeitlichen Verteilung der Geophonimpulse am 29.10.2018 während des ansteigenden Astes des Hochwassers (Datengrundlage 1-Minuten Geophonimpulswerte). Durch die aufgezeichneten Geophonimpulse ist ein Anstieg des Impulsvorkommens über die Breite erkennbar. Auch eine zeitliche Variabilität des Geschiebetransports ist unter anderem durch das Auftreten von Geschiebewellen zu beobachten. Hier variiert der Wellenabstand in Abhängigkeit von Durchfluss und Positionierung des Geophons im Profil. An diesem Datum konnte auch eine Geschiebefallenmessung durchgeführt werden.

Abbildung 36: Verlauf der räumlichen Verteilung der Geophonimpulse, Dellach/Drau, 29.10.2018



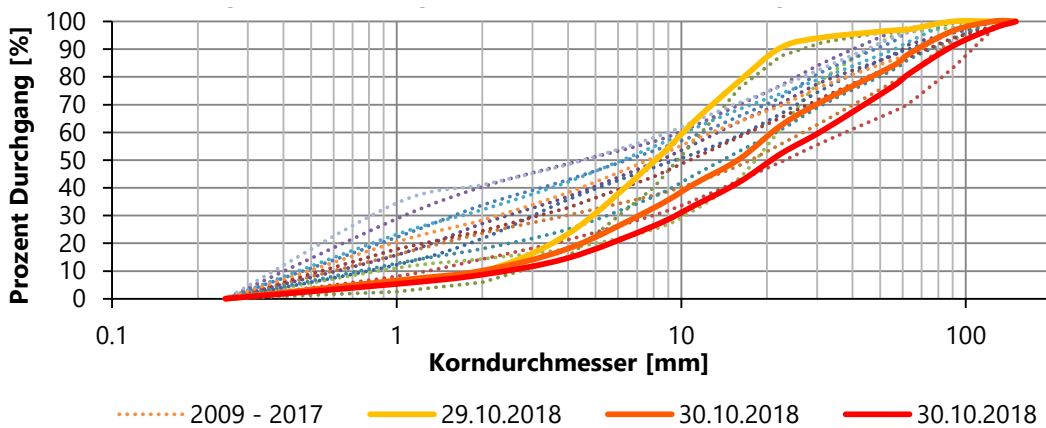
4.2.3 Geschiebetrieb und Geschiebefrachten

2007 bis 2019 wurden siebzehn erfolgreiche Profilmessungen mit dem LHS-Sammler und zwanzig erfolgreiche Geschiebefallenmessungen durchgeführt. Seit 2016 konnten jährlich mindestens drei erfolgreiche Fallenmessungen durchgeführt werden. 2018 war es erstmals an der Drau möglich bei einem Durchfluss von $645-680 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ zu messen.

4.2.3.1 Geschiebetrieb, Textur

Abbildung 37 zeigt die Korngrößenverteilungen aller Fallenmessungen der Jahre 2009 bis einschließlich 2019. Die Korngrößenverteilungen bilden die Grundlage für die Ermittlung des Geschiebetriebs, der Textur und der Geschiebefrachten.

Abbildung 37: Kornverteilungen der Fallenmessungen von 2009 – 2018, Dellach/Drau



4.2.3.2 Profilmessungen

Bei Profilmessungen wird (analog zu Durchflussmessungen) der Geschiebetrieb an verschiedenen Messlotrechten gemessen und über die Profildbreite integriert. Im Zuge des Geschiebemonitorings an der Messstation Dellach/Drau wurden 17 Profilmessungen mit dem Large Helley-Smith Sammler durchgeführt. Es wurden Geschiebetransportraten zwischen $0,2$ und 40 kgs^{-1} und maßgebende Korndurchmesser zwischen $6,02$ und $29,54 \text{ mm}$ gemessen. In Abbildung 38 ist als Beispiel die Profilmessung vom 31.10.2018 dargestellt. Es wurde eine Geschiebetransportrate von $12,1 \text{ kgs}^{-1}$ bei einem mittleren Durchfluss von $154 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ gemessen. In Flussmitte sowie auf der orografisch rechten Flussseite konnte deutlich mehr Material gefangen werden, was auf zwei ausgeprägte Geschiebestraßen hinweist. Abbildung 39 zeigt die Textur des Geschiebematerials. Bei dieser Messung konnte eine homogene Verteilung der Kornklassen festgestellt werden.

Abbildung 38: Profilmessung Dellach/Drau 31.10.2018 – Geschiebetrieb

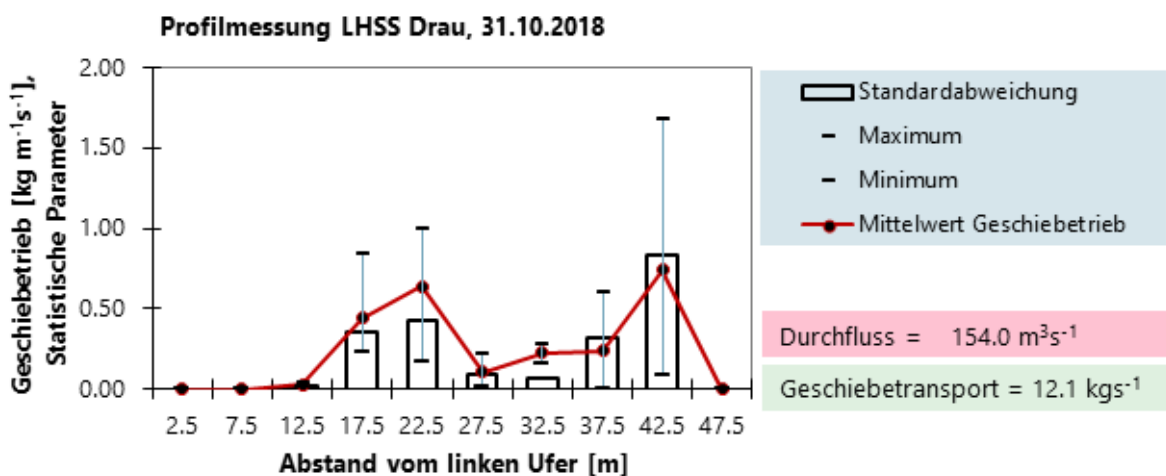
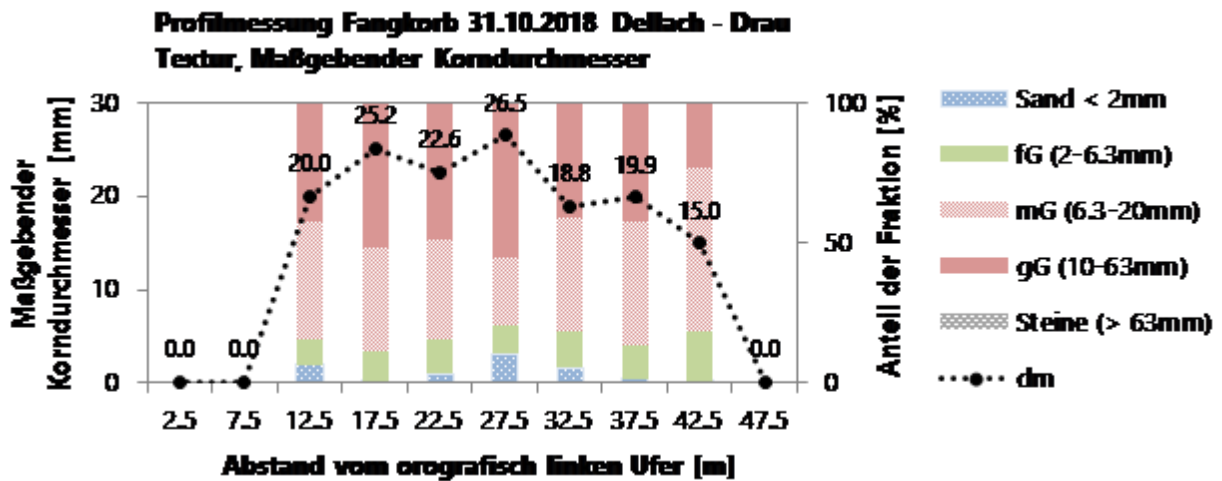


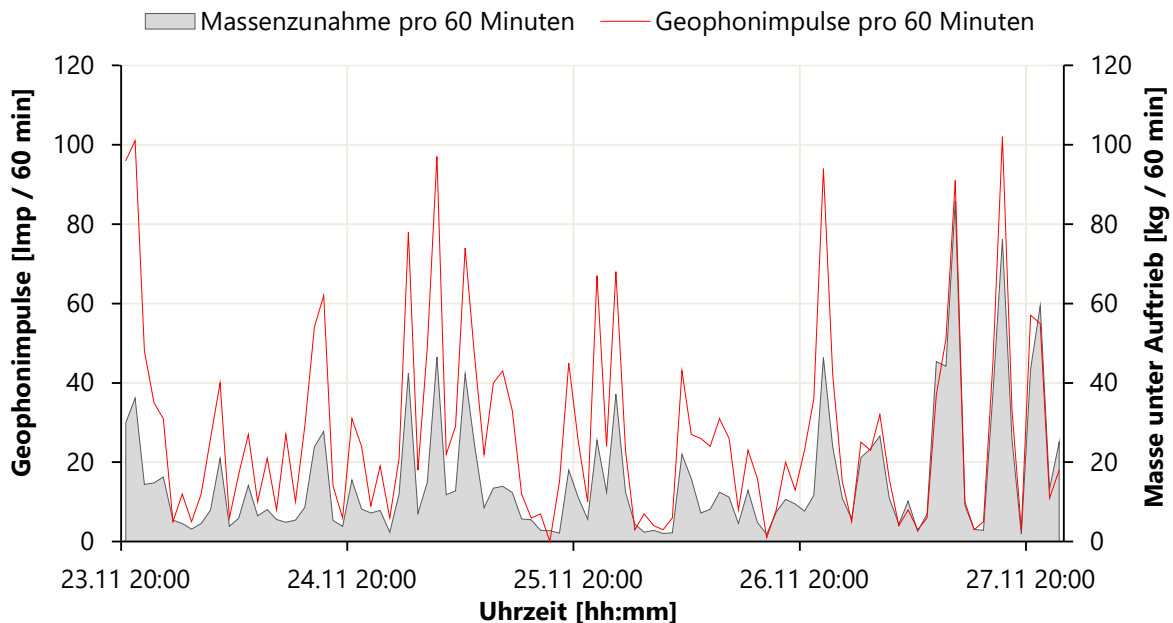
Abbildung 39: Profilmessung Dellach/Drau 31.10.2018 –Textur



4.2.3.3 Fallenmessungen

Abbildung 40 zeigt exemplarisch die Geschiebefallenmessung mit der Falle 2 vom 23.-28.11.2019. Hier ist die Massenzunahme, die durch die Wiegezellen aufgezeichnet wird, den Geophonimpulsen des Geophons 25 gegenübergestellt. Aufgrund der Dauer der Messung wurden 60 Minuten Mittelwerte gebildet. In der Grafik ist gut zu erkennen, dass die Spitzen der Massenzunahme sowie der Geophonimpulse zeitgleich auftreten, was die gute Funktionalität der Anlagen bestätigt.

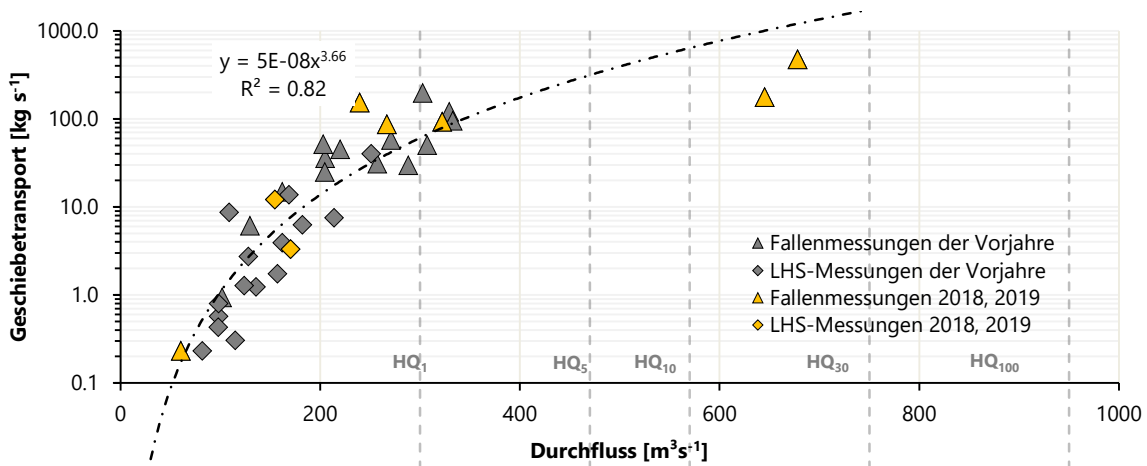
Abbildung 40: Zusammenhang des Massenzuwachses und der Geophonimpulse während der Fallenmessung am 23.11-27.11.2019



4.2.3.4 Durchfluss/Geschiebetransport- Zusammenhang

Die Ergebnisse der Geschiebetransportmessungen werden mit dem Durchfluss verknüpft und eine Regression zwischen den beiden Größen berechnet. Abbildung 41 zeigt beispielhaft den Zusammenhang für $D > 1$ mm. Die Datenpunkte, die im Zuge der Messungen der Jahre 2018 und 2019 entstanden, sind in der Abbildung 41 gelb markiert.

Abbildung 41: Zusammenhang von Durchfluss und Geschiebetransport ($D > 22,4$ mm), Dellach/Drau, 2008-2019

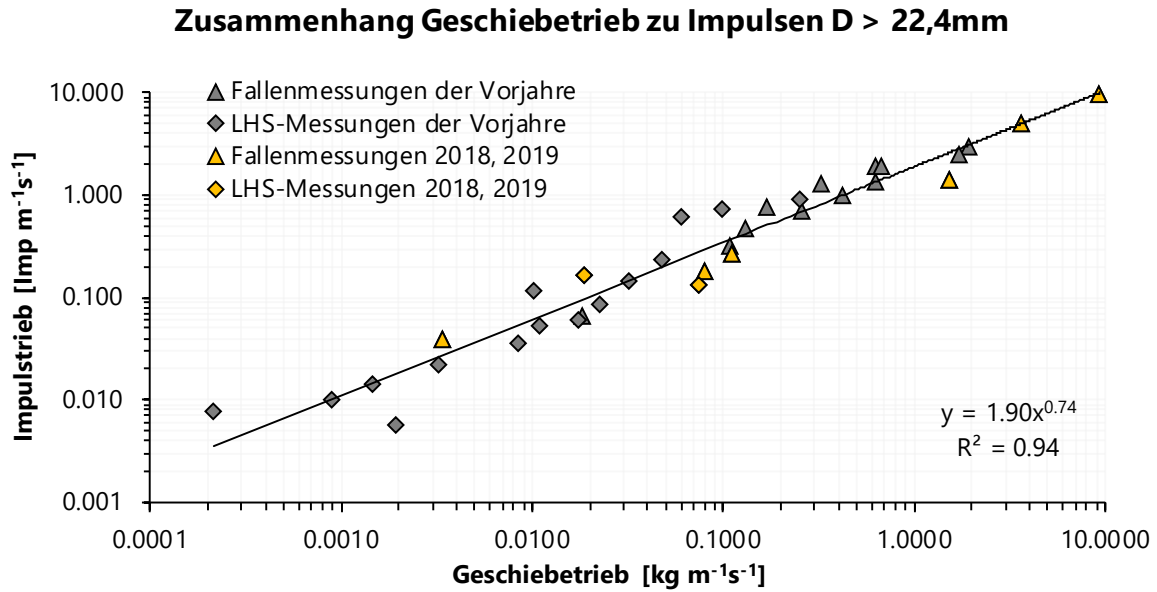


Mit Hilfe einer Potenzfunktion (rating curve) kann somit die Geschiebefracht der Fraktionen $D > 1$ mm, $D > 8$ mm und $D > 22,4$ mm anhand des Durchflusses kalkuliert werden.

4.2.3.5 Geophon/Geschiebetransport- Beziehung

Abbildung 42 zeigt ein Punktdiagramm von gesammeltem Geschiebematerial größer 22,4 mm und den dabei aufgezeichneten Geophonimpulsen. Mit Dreiecken sind die Ergebnisse der Fallenmessungen, mit Vierecken die Ergebnisse der Fangkorbmessungen dargestellt. Um eine Korrelation zu ermöglichen, wurden die Daten beider Messmethoden jeweils auf einen Meter Flussbreite umgerechnet. Die Datenpunkte, die durch die Messungen 2018 und 2019 generiert wurden, sind in Abbildung 42 gelb gekennzeichnet. Durch den ermittelten Zusammenhang zwischen direkt gemessenem Geschiebetransport und Geophonimpulsen können die Geophone kalibriert werden. Dadurch können wiederum die Geschiebefrachten $D > 22,4$ mm für den Standort Dellach/Drau ermittelt werden.

Abbildung 42: Zusammenhang Geschiebe (D>22,4mm) – Geophonimpulse Dellach/Drau, 2008-2019



4.2.3.6 Vergleich der Geschiebejahresfrachten

Tabelle 4 zeigt einen Vergleich der Geschiebejahresfrachten, der verschiedenen Fraktionen mit dem Berechnungsansatz über Durchfluss und Geschiebe (basierend auf einer Potenzfunktion) und über die Geophonimpuls/Geschiebe- Beziehung im Zeitraum 2007 bis 2019. In Abbildung 43 werden die Jahresfrachten in einem grafischen Vergleich verdeutlicht.

Abbildung 43: Vergleich der Geschiebejahresfrachten, Dellach/Drau, 2007-2019

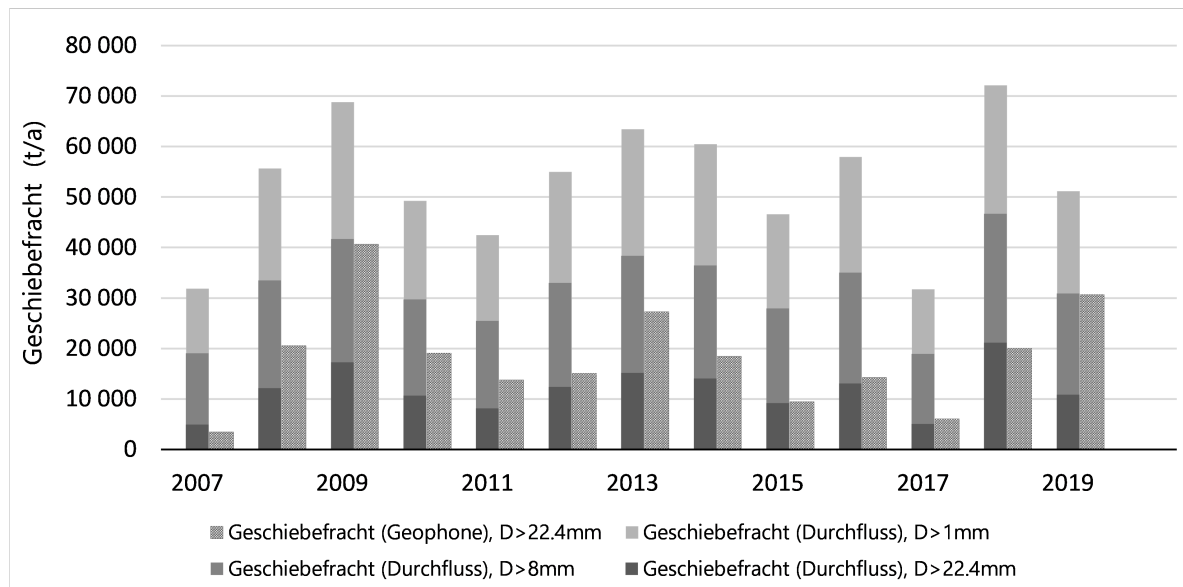


Tabelle 4: Vergleich der Geschiebejahresfrachten, Dellach Drau, 2007-2019

Jahr	Jahresabflussfracht [hm ³ /Jahr]	Durchfluss/Geschiebe			Geophonimpulse Geschiebe
		Geschiebefracht D>1mm [t/Jahr]	Geschiebefracht D>8mm [t/Jahr]	Geschiebefracht D>22,4mm [t/Jahr]	Geschiebefracht D>22,4mm [t/Jahr]
2007	1600	31900	19000	4900	3500
2008	2000	55700	33500	12200	20600
2009	2200	68800	41700	17300	40700
2010	1900	49300	29700	10700	19100
2011	1800	42500	25500	8100	13800
2012	2200	55000	33000	12400	15100
2013	2300	63500	38300	15200	27300
2014	2400	60500	36400	14100	18500
2015	2000	46600	27900	9200	9500
2016	2000	57900	35000	13100	14300
2017	1600	31800	19000	5100	6100
2018	2100	72200	46700	21200	20000
2019	1900	51200	30900	10900	30700

Die Ergebnisse der Frachtenberechnung von Material größer 22,4 mm sind meist ähnlich, obwohl sich die Berechnungsansätze deutlich unterscheiden. Im Jahr 2019 fällt hier insbesondere auf, dass die über die Geophone ermittelte Jahresfracht deutlich über der durch den Durchfluss ermittelten Jahresfracht liegt, was auf eine erhöhte Materialverfügbarkeit, bedingt durch das Hochwasser im Oktober 2018, hindeutet.

4.3 Ausgewählte Besonderheiten der Station

An der Messstation Dellach ist vor allem hervorzuheben, dass das verwendete Messsystem, für einen Fluss in der Größenordnung der Drau, einzigartig ist. Vor allem die Möglichkeit den Geschiebetransport mit den Geschiebefallen **direkt** zu messen, ist besonders. Nur durch diese Messmethodik konnten erstmal Messungen bei einem Durchfluss, wie beim Oktoberhochwassers 2018, durchgeführt werden. Abbildung 44 gibt einen Überblick über die Morgenstunden nach dem Hochwasser am 30.10.2018. Bei einem solchen Abfluss wären direkte Messungen mit Geschiebefängern aufgrund der Fließgeschwindigkeiten sowie des erhöhten Wildholzaufkommens nicht mehr möglich.

Abbildung 44: Überflutungsfläche im Bereich der Messtation Dellach/Drau



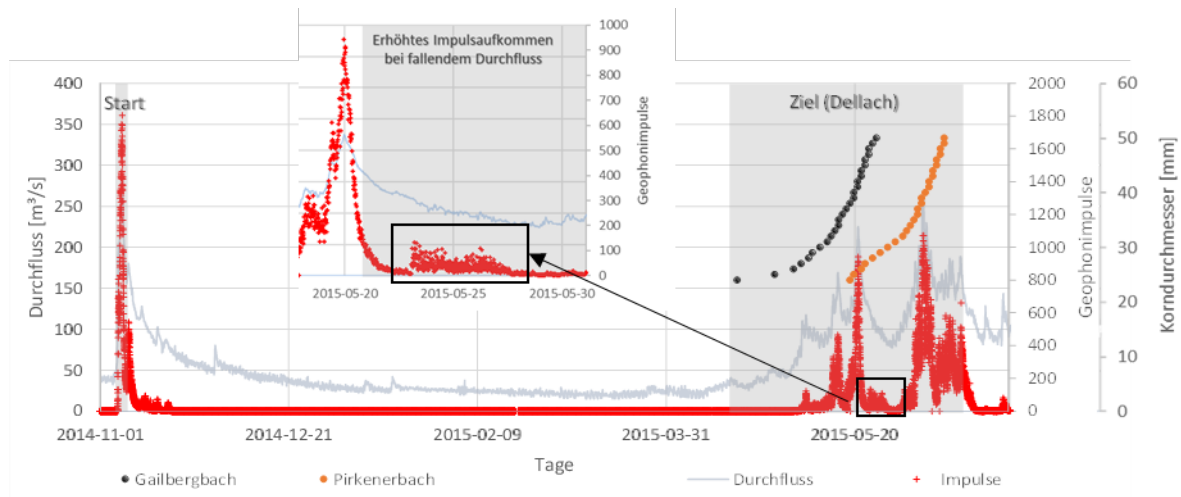
Die Sedimentprobenentnahme aus den Geschiebefallen erfolgt immer in der Niederwasserphase im Frühjahr und gestaltet sich sehr aufwendig. In Abbildung 45 a) sind die geöffneten Geschiebefallen sowie ein Wartungsdamm ersichtlich. Eine weitere Besonderheit ist die elevierbare Falle, bei der die Probennahmen bei Wasserständen bis zu einem Meter, möglich sind (siehe Abbildung 45 b)

Abbildung 45: a) Wartung im Frühjahr, b) Wartung der elevierbaren Geschiebefalle



In der Datenanalyse im Jahr 2018 und 2019 wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Detektion von Geschiebeeinstößen und die Ermittlung von Transportweiten gelegt. Als Beispiel hierfür dient das Ereignis vom 6.11.2014, bei dem vor Ort Geschiebeeinstöße vom Gailbergbach und Pirknerbach in die Drau beobachtet wurden. Der Mündungsbereich des Gailbergbachs befindet sich 4,5 km, und der des Pirknerbach 7,5 km flussauf der Geschiebemesstation Dellach/Drau. Im Zuge der Datenanalyse wurde versucht diese Geschiebeeinstöße in den Geophondaten zu identifizieren. Ein erhöhtes Impulsaufkommen bei verhältnismäßig niedrigen Durchflüssen ist im Zeitbereich von 24-30.05.2015 zu erkennen. Um diese Beobachtung zu validieren, wurde die Geschiebetransportgeschwindigkeit mithilfe der im Hymocares Projekt (Klösch et al. 2019) explizit aufgrund von Tracerdaten an der Drau, angepassten Formel berechnet (siehe Formel 1). Die Kalkulation der Transportweiten wurde mit 06.11.2014 gestartet und der ermittelte Ankunftszeitpunkt der verschiedenen Korngrößen (b-Achse 20-50 mm) an der Messstation Dellach/Drau wurde für den Gailbergbach in Abbildung 46 mit schwarzen Punkten und für den Pirknerbach mit roten Punkten markiert. Der Zeitbereich, in dem die berechneten Kornfraktionen in Dellach ankommen, wurde grau hinterlegt. Dieser Bereich deckt sich mit der Zeitperiode, in der ein erhöhtes Impulsaufkommen stattfand. Dies zeigt wiederum, dass Änderungen im Geschiebehaushalt durch Geophone detektierbar sind.

Abbildung 46: Ereignisanalyse 06.11.2014, Durchfluss, Impulse und berechnete Ankunftszeit



Formel 1: Transportgeschwindigkeitsformel Drau

$$V_u = 0.21 e^{3.63 \left(\frac{d}{d_{50}}\right)} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \left[\frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d} - 0.021 \left(\frac{d}{d_{50}}\right)^{-0.485} \right]^{\frac{3}{2}}}$$

5 Diskussion der Ergebnisse

Für viele praktische Fragestellungen zum Thema Geschiebe ist eine bestmögliche Abschätzung der transportierten Geschiebefrachten von großer Bedeutung. Anhand der erhobenen Messdaten an den Stationen Falkensteinsteig/Drau, Iselsteig/Isel und Dellach/Drau konnten im Zuge dieses Projekts die Geschiebejahresfrachten für den Zeitraum 2007 bis 2019 ermittelt werden.

An der Station Falkensteinsteig wurde die Abschätzung der Geschiebefrachten nur über die registrierten Geophonimpulse, an den Stationen Iselsteig und Dellach sowohl über die Geophonimpulse als auch über den Durchfluss durchgeführt. Aus diesem Grund werden für einen Vergleich aller Messstationen die Ergebnisse der Geschiebefrachtberechnung über die Geophonimpulse herangezogen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass im Unterschied zur Bestimmung mit Hilfe des Durchflusses, keine Annahme über die zeitliche Variabilität getroffen wird und somit Änderungen im Transportverhalten (Beispiel Falkensteinsteig) keine Auswirkung auf das Ergebnis haben.

5.1 Geschiebetransportscharakteristik der Messstationen

5.1.1 Falkensteinsteig/Drau

Der Geschiebetransport sowie die Geschiebefrachten an der Station Falkensteinsteig weisen eine sehr hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf und sind nur bedingt vom Durchfluss abhängig. Der sehr episodische Geschiebeeintrag aus der Restwasserstrecke erhöht die Sedimentverfügbarkeit der Drau in großem Umfang und steuert dadurch maßgeblich das Ausmaß der transportierten Geschiebemengen. Erhöhte Durchflussbedingungen in der Restwasserstrecke sowie intensive Niederschlagsereignisse in den Zubringern der Restwasserstrecke sind für die Geschiebemobilisierung entscheidend. Im Laufe der letzten Projektperiode konnte mithilfe von Profilmessungen die Kalibrierung der Geophone an der Station erheblich verbessert werden, wodurch die berechneten Jahresfrachten deutlich belastbarer sind. Da die Geschiebeprobe jedoch einige Meter flussauf der Geophonanlage entnommen werden, sind der Qualität der Kalibrierbeziehung physikalische Grenzen gesetzt. Das Hochwasser 2018 war das mit Abstand größte Durchflussereignis seit Errichtung der Station und hat zu einer umfangreichen Mobilisierung von Sedimenten im Einzugsgebiet geführt.

Da die Geophonanlage an der Station Falkenstein während dem Ereignis zu einem großen Teil verlandet ist, mussten die „fehlenden“ Geophondaten auf Basis bestehender Daten ersetzt werden. Die Grundidee für die Datenkorrektur besteht in der Annahme, dass für diesen Zeitraum Geschiebetransport nahe oder an der Transportkapazität stattfand. Da diese Hypothese nicht direkt nachgeprüft werden kann, ist die entsprechende Geschiebefracht im Zuge des Hochwassers 2018 mit gewissen Unsicherheiten verbunden und daher mit Vorsicht zu verwenden. Die Größenordnung der berechneten Geschiebefracht ist aber durchaus realistisch. An dieser Stelle ist anzumerken, dass nach dem Hochwasser 2018 im gesamten Stadtgebiet von Lienz etwa 30000 t angelandetes Geschiebematerial aus der Drau entnommen wurden. Etwa die Hälfte davon entfällt auf die Strecke unterhalb der Messstation Falkensteinsteig. Diese umfangreiche Geschiebeentnahme ist bei Überlegungen zur Geschiebebilanz Drau/Isel zu berücksichtigen.

5.1.2 Iselsteg/Isel

Obwohl die Station **Iselsteg** ein fast doppelt so großes Einzugsgebiet sowie die 3 bis 4-fache Abflussfracht im Vergleich zur Station Falkensteinsteig aufweist, sind die mittleren Jahresgeschiebefrachten relativ ähnlich. Die auffällig geringen Geschiebefrachten an der Station Iselsteg könnten daher auf ein Abflachen der Kalibrierfunktion bei erhöhtem Transport hinweisen. Die vorhandenen Daten sind derzeit aber noch sehr gut mit einer linearen Kalibrierfunktion zu beschreiben. Zukünftige Geschiebemessungen bei hohem Durchfluss beziehungsweise bei hohen Geschiebetransportraten könnten diesbezüglich Klarheit schaffen. Weiters könnten die relativ geringen Geschiebefrachten auf ein methodisches Problem hinweisen, da direkte Geschiebemessungen an der Isel derzeit nur in Ufernähe (Grießsäule) möglich sind. Bereiche mit intensivem Geschiebetransport in Profilmitteln können daher nicht beprobt werden und weisen daher eine gewisse Unsicherheit auf. Ein weiterer Grund für die, in Relation zur Station Falkensteinsteig, geringen Geschiebefrachten an der Isel könnte in der unterschiedlichen Geologie zu finden sein. Gneis, das vorherrschende Gestein im Einzugsgebiet der Isel, hat eine höhere Erosionsstabilität als Dolomit oder Kalkstein (Parker, 1991). Durch die geringere Erosionsrate wird die Sedimentverfügbarkeit im Fluss reduziert, wodurch schlussendlich die geringeren Geschiebejahresfrachten erklärt werden könnten.

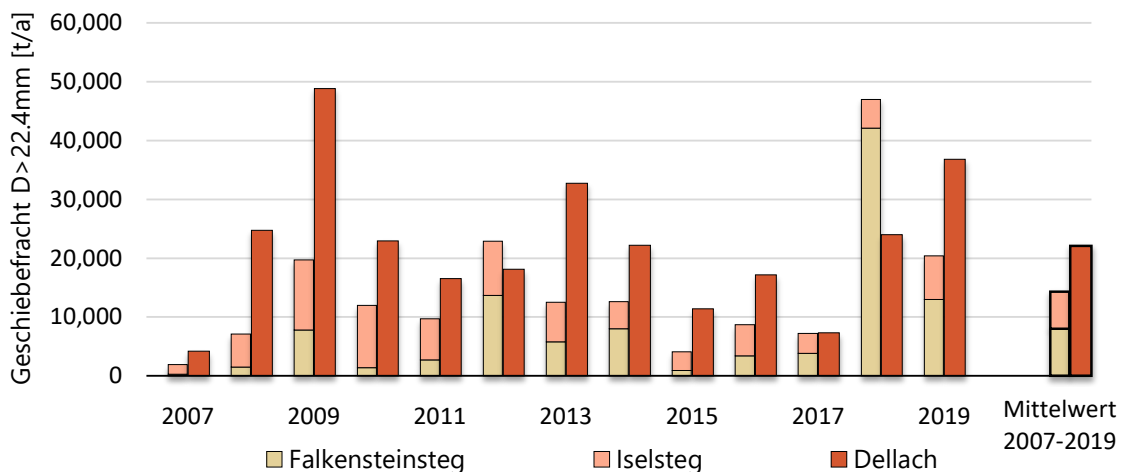
5.1.3 Dellach/Drau

An der Station **Dellach** ist der Geschiebetransport maßgeblich vom Durchfluss beeinflusst. So beweist die Drau am Messstandort Dellach durch die Einzugsgebietsgröße und die Distanz zu Oberlieger-Kraftwerken eine gewisse Resilienz gegenüber Geschiebeüberschuss sowie Defiziten. Jedoch hat das Hochwasser 2018 gezeigt, dass die Drau über ein höheres Transportpotential verfügt und ein gewisses Geschiebedefizit vorherrschte. Das ist vor allem im Jahr 2019 ersichtlich, indem die Geschiebefracht im Verhältnis zur Durchflussfracht ungewöhnlich hoch war – ein Indiz für umfangreichen Sedimenteintrag im Oberlauf. Ein Vorteil der Messstation ist, dass zwei direkte Messsysteme verwendet werden können. Bei Durchflüssen bis zu 200 m³ kommt vor allem der LHS-Sammler zum Einsatz; höhere Ereignisse werden mit den Geschiebefallen beprobt. Dadurch ist man in keinem Durchflussbereich limitiert. In der Vergangenheit traten immer wieder Verlandungsprobleme bei den Geschiebefallen durch den intensiven Schwebstofftransport (Gletscherschliff) sowie intensivem Abrieb an, der Strömung ausgesetzten, Metallteilen auf. Durch fortwährende Modifikationen an den verschiedenen Fallen-Bauteilen sowie intensiven Wartungsarbeiten konnten diese Probleme aber in den letzten Jahren entschärft werden.

5.2 Vergleich der Geschiebefrachten im Drau/Isel System

In Abbildung 47 sind für den Zeitraum 2007 bis 2019 die Geschiebejahresfrachten der Stationen Falkensteinsteig und Iselsteig (gestapelte Balken) sowie die Jahresfracht an der Station Dellach (Rostbraun) dargestellt. Die präsentierten Geschiebefrachten beziehen sich auf Geschiebematerial $D > 22,4$ mm und wurden aus kalibrierten Geophondaten errechnet.

Abbildung 47: Vergleich der Geschiebefrachten ($D > 22,4$ mm), aus Geophondaten berechnet, 2007-2019



Die Teileinzugsgebiete Falkensteinsteg und Iselsteg stellen gemeinsam etwa 88 % des gesamten Einzugsgebiets in Dellach dar. Der durchschnittliche Anteil an der Jahresabflussfracht in Dellach beträgt für die Stationen Falkensteinsteg und Iselsteg in Summe etwa 93 %. Für den Zeitraum 2007 bis 2017 lag die gemeinsame mittlere Jahresgeschiebefracht der Messstationen Falkensteinsteg und Iselsteg bei etwa 62 % der mittleren Jahresgeschiebefracht von Dellach und lies die Vermutung offen, dass der Geschiebetransport an den Messstationen in Lienz unterschätzt wird. Mit Hilfe der Kalibrierungsdaten der Messperiode 2018 und 2019 konnte die Abschätzung des Geschiebeeintrags der Oberlieger-Stationen im Vergleich zur vorigen Projektperiode deutlich verbessert werden.

Durch das außerordentliche Hochwasser im Herbst 2018 kam es im gesamten Flusssystem Drau/Isel zu einer umfangreichen Mobilisierung von Sedimenten. Vor allem an der Oberen Drau wurden beträchtliche Mengen an Geschiebe eingetragen, die im Stadtgebiet von Lienz zu weiträumigen Verlandungen führten. Der Vergleich der Geschiebefrachten im gesamten Messzeitraum 2007 bis 2019 ist daher stark von diesem Ereignis im Herbst 2018 geprägt. Dieser massive Geschiebeeintrag wird nun sukzessive im Flusssystem weitergetragen und beeinflusst zusehends die Transportbedingungen flussab. Durch die außerordentlich hohe Geschiebefracht an der Station Falkensteinsteg im Jahr 2018 ergibt sich nun ein ausgeglicheneres Verhältnis im langjährigen Vergleich zwischen den Oberliegern und Unterliegern (vgl. Mittelwert 2007-2019 in Abbildung 47 bei 78%).

Vergleicht man den Anteil der Geschiebefrachten einzelner Jahre (Abbildung 47), so treten zum Teil sehr hohe Schwankungen auf. Dies ist ein klarer Hinweis darauf, welche Bedeutung die langjährige Erfassung des Geschiebetransports für Fragestellungen zur Geschiebebilanzierung eines Flusssystems haben. Die bestehende Differenz im Vergleich der Geschiebefrachten Lienz-Dellach wird vermutlich von den Drau-Zubringern im Zwischeneinzugsgebiet in die Drau eingetragen. Um diese Annahme zu plausibilisieren, wurden im Rahmen einer Masterarbeit (Schwarz, 2019) eine Massenbilanzierung durchgeführt und das Transportpotential der Zubringer bestimmt. Dabei stellte sich heraus, dass vor allem die rechtsufrigen Zubringer aus dem kalkalpinen Raum das Potential haben, beträchtliche Geschiebemengen zu liefern und die Bilanz auszugleichen.

Die derzeitigen mittleren Geschiebejahresfrachten von 2007 bis 2019 sind als Zwischenergebnis zu betrachten und mit einigen offenen Fragestellungen verknüpft. Beispielsweise wurden nach dem Hochwasserereignis 2018 große Mengen an abgelagertem Geschiebe aus der Oberen Drau entnommen – diese Entnahme muss bei einer etwaigen Geschiebebilanzierung

zierung für das Flusssystem Drau/Isel berücksichtigt werden. Weiters zeigen die Geschiebedaten der Drau in Dellach eine, im Vergleich zum Durchfluss, außerordentlich hohe Geschiebefracht für das Jahr 2019. Diese Änderung der Transportcharakteristik an der Station basiert auf einer deutlichen Steigerung der Sedimentverfügbarkeit, dessen Ursprung derzeit noch nicht gesichert bestimmt werden kann. Möglicherweise ist der Anstieg auf den Geschiebeeintrag lokaler Zubringer sowie einer totalen Umwälzung der Gewässersohle (Aufreißen der Deckschicht) zurückzuführen. Alternativ könnte die erhöhte Sedimentverfügbarkeit auch deutlich weiter entfernten Ursprungs sein. Anhand von Ereignisanalysen und einer ersten Tracerstudie (Klösch et al. 2019) wurde festgestellt, dass das Geschiebe in Abhängigkeit von Korngröße und Durchflussbedingungen über ein Jahr von Lienz bis Dellach (etwa 30 km) benötigt. Der beobachtete Anstieg an der Station Dellach könnte also bereits durchaus vom massiven Geschiebeeintrag an der Drau flussauf von Lienz stammen. Die Datenlage ist derzeit aber noch zu unsicher, um diese Hypothese zu belegen. Jedoch können sich die Geschiebemesdaten der nächsten Jahre diesbezüglich als sehr wertvoll erweisen, um die Transportgeschwindigkeit von Geschiebe während und nach Hochwasserereignissen zu bestimmen. Die Beantwortung dieser Fragestellung am Fallbeispiel Drau/Isel ist auch für viele andere Flussgebiete interessant, wie die Extremereignisse der letzten Jahre zeigen. Darüber hinaus könnte ein besseres Verständnis der Transportgeschwindigkeit von Geschiebe helfen abzuschätzen, in welcher Zeitspanne sich Änderungen in der Geschiebeverfügbarkeit (Maßnahmen im Einzugsgebiet) flussab fortpflanzen.

All diese Erkenntnisse zeigen deutlich, dass ein Prozess wie der Geschiebetransport nur durch langjährige Zeitreihen ausreichend beschrieben werden kann. Darüber hinaus ermöglicht eine langfristige Geschiebedatensammlung die Auswirkung lokaler Einflüsse (Landnutzungsänderungen) aber auch globaler Einflüsse (Klimawandel) auf den Sedimenttransport eines alpinen Flusssystems zu beobachten. Die Geschiebedaten der Drau/Isel Messstationen können daher zu einem besseren Verständnis für das Flusssystem beitragen und zukünftige Entwicklungen für Geschiebedefizite sowie Überschüsse abschätzen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das integrative Geschiebemonitoringsystem Drau/Isel ist mittlerweile seit über einem Jahrzehnt in Betrieb und liefert einen weltweit beispiellosen Einblick in das Transportverhalten eines großen, alpinen Flusssystemes. Das Konzept basiert auf einer Kombination direkter und indirekter Geschiebemessmethoden, wodurch die Vorteile der verschiedenen Messsysteme optimal miteinander verknüpft werden und ein umfassendes Bild über den Geschiebetransport im Drau/Isel System gewonnen wird. Geophonanlagen übernehmen hierbei die indirekte Erfassung des Geschiebetransports und liefern kontinuierliche, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Datenreihen über dessen Intensität. Die direkten Geschiebemessungen mittels Geschiebefängern und Geschiebefallen, ergänzen das Datenspektrum mit Kornverteilung, Geschiebetrieb beziehungsweise Geschiebetransport und dienen in weiterer Folge der Kalibrierung der Geophone.

An allen Messstationen tritt durch die Bildung von Geschiebewellen eine natürliche Pulsation des Geschiebetransports bei konstantem Durchfluss auf, die ein Intervall von etwa 25 bis 35 Minuten besitzt. Diese natürliche auftretende Pulsation des Geschiebetransports ist auch bei konstanten Durchflussbedingungen sehr deutlich nachzuweisen. Weiters konnte eine intensive Reaktion des Geschiebetransports, bedingt durch starke Durchflussänderungen, wie sie natürlich durch Gletscherschmelze oder anthropogen durch Schwallbetrieb von Wasserkraftanlagen vorkommen, festgestellt werden. Durch Änderungen in der Geschiebeverfügbarkeit konnte, vor allem an der Drau flussauf von Lienz, die Bildung von Geschiebepulsen beobachtet werden, die oftmals eine deutliche Erhöhung der beobachteten Transportmengen nach sich ziehen.

Die Messdaten der letzten Jahre zeigen, dass die zeitliche Entwicklung des Geschiebetransports oftmals nicht synchron mit der Durchflussentwicklung ist. An der Station Iselsteg/Isel werden regelmäßig Geschiebehysterisis im Uhrzeigersinn beobachtet, bei denen das Geschiebemaximum vor dem Durchflussmaximum stattfindet. Demgegenüber kommt es an der Station Falkensteinsteg/Drau häufig zu Geschiebehysterisis im Gegenuhrzeigersinn. Durch die oftmals verzögerte Geschiebenachversorgung aus der Restwasserstrecke tritt das Geschiebemaximum hier teilweise deutlich nach dem Durchflussmaximum auf.

Der Bewegungsbeginn des Geschiebetransports tritt an der Station Falkensteinsteg bei etwa 18 % unter, an der Station Iselsteg bei etwa 30 % über und an der Station Dellach bei

etwa 25 % unter dem mittleren Jahresdurchfluss auf. Diese Schätzwerte sind aus den kontinuierlichen Geophondaten berechnet und geben den statistischen Transportbeginn von Geschiebekörnern einer Größe von etwa 2 cm wieder. Der ermittelte Transportbeginn liegt teilweise deutlich unter den klassischen Annahmen aus der Literatur und schwankt über die Jahre in Abhängigkeit der Sedimentverfügbarkeit

Auch die räumliche Verteilung des Geschiebetransports zeigt mitunter eine ausgeprägte Variabilität. Oftmals konzentriert sich die Geschiebebewegung auf bestimmte Bereiche des Flussprofils, wobei die Lage dieser „Geschiebestraßen“ über die Zeit durchaus veränderlich ist. Allgemein ist mit steigendem Durchfluss auch eine deutliche Erhöhung der geschiebewirksamen Breite festzustellen.

Für die Berechnung der Geschiebefrachten wurden zwei verschiedene, voneinander unabhängige Berechnungskonzepte entwickelt und verwendet. Die Jahresfrachten werden nun einerseits über eine Durchfluss-/Geschiebe-Beziehung, andererseits über kalibrierte Geophone berechnet und liefern für die Stationen Iselsteg und Dellach gute, vergleichbare Ergebnisse. Durch die Vielzahl an direkten Geschiebemessungen konnten umfangreiche Untersuchungen und Analysen zur Kornverteilung und Textur vorgenommen werden.

Für die Analyse der zugrundeliegenden Geschiebetransportprozesse sind aber vor allem Transportwerte auf Basis kalibrierter Geophondaten von unschätzbarem Wert. Die Kombination aus direkten und indirekten Daten erlaubt einen zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Einblick einer ansonsten unsichtbaren Transportdynamik. Sedimentologische Veränderungen des Flusssystemes können so direkt beobachtet werden ohne Annahmen über die Geschiebeversorgung oder räumliche sowie zeitliche Variabilität treffen zu müssen. Die vorliegenden Geschiebedaten des Drau/Isel Systems weisen ganz klar auf die große Bedeutung der Geschiebeverfügbarkeit hin, die alle Eigenschaften des Geschiebetransports maßgeblich beeinflusst. Der Einfluss von variabler Geschiebeversorgung, typisch für natürliche Fließgewässer, ist bis heute erst unzureichend erforscht und verstanden. Natürlich auftretende Geschiebeeinstöße können die gesamte Transportcharakteristik eines Flusses temporär deutlich verändern, wie die wiederkehrenden Geschiebepulse an der Oberen Drau zeigen. Durch das intensive Hochwasser im Herbst 2018 kam es im gesamten Flusssystem Drau/Isel zu einer umfangreichen Mobilisierung von Sedimenten. Dieser massive Geschiebeeintrag wird nun sukzessive im Flusssystem weitergetragen und beeinflusst zusehends die Transportbedingungen flussab. Durch die absehbaren sedimentologischen Veränderungen im Flusssystem ist die nächste Messperiode im Geschiebemesssystem Drau/Isel von spezieller Bedeutung.

Seit einigen Jahren finden Daten über den Transport von Feinsedimenten (Schwebstoffe) Eingang in das Hydrographische Jahrbuch. Für die erfassten Geschiebedaten wurde in der letzten Projektperiode eine Einpflegung in die HyDaMS- Datenbank des hydrographischen Zentralbüro umgesetzt. Derzeit wird an der Gestaltung einer Geschiebe-Jahrbuchseite gearbeitet, die in naher Zukunft veröffentlicht werden soll. Dadurch werden die gewonnenen Geschiebedaten einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt sowie ein langfristiger Erhalt der Messdaten gesichert.

Der vorliegende Bericht belegt deutlich die Funktionsfähigkeit des integrativen Geschiebemesssystems Drau/Isel. Dieses einzigartige Monitoringsystem ermöglicht, durch die Vielzahl an gewonnenen Messdaten, ein besseres Verständnis des Transports von Geschiebmaterial und allen damit verknüpften Prozessen. Die Funktionsweise des integrativen Geschiebemesssystems Drau/Isel ist auf andere Fließgewässer übertragbar und erfüllt alle Ziele eines modernen Geschiebemonitoringsystems. Die ermittelten Geschiebedaten verbessern die Grundlagen für Maßnahmenplanungen an Flüssen wesentlich und weisen sehr anschaulich auf die Bedeutung eines verbesserten Prozessverständnisses hin. Darüber hinaus werden praxistaugliche Methoden aufgezeigt, die Geschiebemessungen in einem größeren Umfang ermöglichen. Die bisher gesammelten Erfahrungen zeigen deutlich das Potential dieses Messsystems auf und finden Eingang in die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der Messmethodik. Geschiebemessungen sind und bleiben eine der größten Herausforderungen in der Erfassung von Fließgewässerprozessen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hydrologische Übersicht (Hydrographisches Jahrbuch, 2016).....	5
Tabelle 2: Vergleich der Geschiebejahresfrachten (Geophonimpulse), Falkenstein/Drau, 2007-2019	16
Tabelle 3: Vergleich der Geschiebejahresfrachten, Iselsteg/Isel, 2007-2019.....	27
Tabelle 4: Vergleich der Geschiebejahresfrachten, Dellach Drau, 2007-2019	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Geschiebemonitoring-Stationen in Österreich (a, b).....	4
Abbildung 2: Messstation Falkensteinsteig/Drau (a), Profilmessung mittels Fangkorb (b) ...	7
Abbildung 3: Jahresganglinie Durchfluss/Geophonimpulse (Tagesmittelwerte), Falkensteinsteig/Drau, 2018 bis 2019.....	8
Abbildung 4: Ganglinie Durchfluss/Geophonimpulse 2019 mit dem Messtag am 19.6, Falkensteinsteig/Drau, 16.06 – 24.06.2019 (grün)	9
Abbildung 5: Geschiebemessung am 7.5.2018, Falkensteinsteig.....	10
Abbildung 6: Bewegungsbeginn Falkensteinsteig/Drau für Geschiebe größer 10-30 mm, (2001-2019).....	10
Abbildung 7: Räumliche Verteilung des Geschiebetransports; Falkensteinsteig/Drau, 2018 bis 2019	11
Abbildung 8: Dreidimensionale Darstellung der aufgezeichneten Geophonimpulse, Falkensteinsteig/Drau, 20.05.2019	12
Abbildung 9: Kornverteilungen 2011 – 2019 (Dauermessungen); Falkensteinsteig/Drau ...	12
Abbildung 10: Dauermessung Falkensteinsteig/Drau, 19.06.2020 – Geschiebetrieb und Textur (Messungen M1-M9 mit 8mm Netz, Messungen M10-M15 mit 4mm Netz).....	13
Abbildung 11: Profilmessung Falkensteinsteig/Drau (8mm Netz), 19.6.2019, Breitenverteilung von Geschiebetransport und Geophonimpulsen	14
Abbildung 12: Zusammenhang Geschiebe (D<22,4 mm)/Geophonimpulse, Falkensteinsteig/Drau, 2012-2019.....	15
Abbildung 13: Vergleich der Geschiebejahresfrachten (D>22,4 mm) und der Jahresabflussfrachten, Falkensteinsteig/Drau, 2007-2019	16
Abbildung 14: Zeitreihe Durchfluss/Geophonimpulse, Falkensteinsteig/Drau, Hochwasser und darauffolgender Geschiebepuls im August 2015	18
Abbildung 15: Messstation Iselsteig/Isel; Gießsäule und Geophonanlage (a), Messung mit dem Fangkorb (b).....	19
Abbildung 16: Jahresganglinie Durchfluss/Geophonimpulse, Iselsteig/Isel, 2018 bis 2019.	20
Abbildung 17: Ganglinie Durchfluss/Geophonimpulse mit den 4 Messtagen im Jahr 2019, Iselsteig/Isel, 01.06 – 01.07.2019	21
Abbildung 18: Geschiebemessung am 12.06.2019, Iselsteig/Isel.....	21
Abbildung 19: Bewegungsbeginn Isel für Geschiebe größer 10-30 mm, (2009-2019).....	22
Abbildung 20: Räumliche Verteilung des Geschiebetransports; Iselsteig/Isel, 2018 bis 2019.....	22

Abbildung 21: Verlauf der räumlichen Verteilung der Geophonimpulse, Iselsteg/Isel, 11.06.2019	23
Abbildung 22: Kornverteilungen 2007-2019; Iselsteg/Isel.....	24
Abbildung 23: Dauermessung Iselsteg/Isel, 12.06.2019 – Geschiebetrieb, Textur	24
Abbildung 24: Zusammenhang von Durchfluss und Geschiebetransport ($D > 22,4$ mm), Iselsteg/Isel, 2008-2019	25
Abbildung 25: Zusammenhang Geschiebe ($D > 22,4$ mm)/Geophonimpulse, Iselsteg/Isel, 2008-2019	26
Abbildung 26: Vergleich der Geschiebejahresfrachten ($D > 22,4$ mm und $D > 8$ mm), Iselsteg/Isel, 2007-2019	26
Abbildung 27: Durchfluss- und Geophonimpulsanglinie, Iselsteg/Isel, 22-29 Juni 2016...	28
Abbildung 28: Durchfluss- und Geophonimpulsanglinie, Iselsteg/Isel, 10-17. Juli 2016...	29
Abbildung 29: ausgeprägte Geschiebehysterese, Iselsteg/Isel, 29-30. Oktober 2018	29
Abbildung 30: Messstation Dellach/Drau; Geophonanlage (a), Messanhänger (b), Hubfalle (c).....	30
Abbildung 31: Jahresganglinie Durchfluss/Geophonimpulse, Dellach/Drau, 2018 bis 2019.....	31
Abbildung 32: Geschiebemessungen während des Hochwassers im Oktober 2018 (Fallenmessungen rot und LHS-Messungen grün markiert)	32
Abbildung 33: Abflusssituation während der Geschiebemessungen am a) 12.06.2019 und b) 30.10.2018	32
Abbildung 34: Bewegungsbeginn Dellach für Geschiebe größer 10-30mm, (2015-2019) ..	33
Abbildung 35: Räumliche Verteilung des Geschiebetransports; Dellach 2018 bis 2019	33
Abbildung 36: Verlauf der räumlichen Verteilung der Geophonimpulse, Dellach/Drau, 29.10.2018	34
Abbildung 37: Kornverteilungen der Fallenmessungen von 2009 – 2018, Dellach/Drau....	35
Abbildung 38: Profilmessung Dellach/Drau 31.10.2018 – Geschiebetrieb.....	35
Abbildung 39: Profilmessung Dellach/Drau 31.10.2018 –Textur.....	36
Abbildung 40: Zusammenhang des Massenzuwachses und der Geophonimpulse während der Fallenmessung am 23.11-27.11.2019.....	36
Abbildung 41: Zusammenhang von Durchfluss und Geschiebetransport ($D > 22,4$ mm), Dellach/Drau, 2008-2019	37
Abbildung 42: Zusammenhang Geschiebe ($D > 22,4$ mm) – Geophonimpulse Dellach/Drau, 2008-2019	38
Abbildung 43: Vergleich der Geschiebejahresfrachten, Dellach/Drau, 2007-2019.....	38
Abbildung 44: Überflutungsfläche im Bereich der Messtation Dellach/Drau	40
Abbildung 45: a) Wartung im Frühjahr, b) Wartung der elevierbaren Geschiebefalle	40

Abbildung 46: Ereignisanalyse 06.11.2014, Durchfluss, Impulse und berechnete Ankunftszeit	41
Abbildung 47: Vergleich der Geschiebefrachten ($D > 22,4$ mm), aus Geophondaten berechnet, 2007-2019.....	44

Literaturverzeichnis

Aigner, Johann/Kreisler, Andrea/Rindler, Rolf/Hauer, Christoph/Habersack, Helmut (2017): Bedload pulses in a hydropower affected alpine gravel bed river. *Geomorphology*, 291, S. 116-127.

Habersack, Helmut/Aigner, Johann/Rindler, Rolf/Schwarz, Sabrina/Tritthart, Michael (2020): Kurzbericht zur Methodik der Geschiebemessungen an Drau & Isel. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (Hg.). Universität für Bodenkultur. Wien

Habersack, Helmut/Aigner, Johann/Kreisler, Andrea/Rindler, Rolf/Seitz, Hugo/Tritthart, Michael (2013): Geschiebemessungen an Drau und Isel 2007 – 2012 Endbericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hg.). Universität für Bodenkultur. Wien

Habersack, Helmut/Aigner, Johann/Rindler, Rolf/Schwarz, Sabrina/Kreisler, Andrea/Tritthart, Michael (2020): Geschiebemessungen an Drau und Isel 2007-2017, Jahresbericht 2017. Universität für Bodenkultur. Wien

Klösch, Mario/Dunst, Roman/Pessenlehner, Sebastian/Stephan, Ursula/Rindler, Rolf/Gmeiner, Philipp/Habersack, Helmut (2019): Technical note on the evaluation of physical and ecological effects of river restoration works, Case studies: Drau, Mur, Salzach (Austria). D.T3.3.1 HyMoCARES
https://www.alpinespace.eu/projects/hymocares/download/deliverable_final_version/d_t3_3_1_austria.pdf

Parker, Gary (1991): Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering* (117), S.131-149.

Schwarz, Sabrina (2019): Massenbilanzierung im Bereich des integrativen Geschiebemesssystems Drau-Isel. Diplomarbeit/Masterarbeit am Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (IWA), Universität für Bodenkultur BOKU, pp 124

Abkürzungen

Abk.	Abkürzung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
Art.	Artikel
usw.	und so weiter
V_u	Transportgeschwindigkeit Drau
d	transportierter Korndurchmesser
d_{50}	mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht
ρ_s	Dichte Sediment
ρ	Dichte Wasser
g	Erdbeschleunigung
τ	Sohlschubspannung

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus

Stubenring 1, 1010 Wien

bmlrt.gv.at