

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	RunSed-CC
Langtitel:	Modelling future runoff and sediment transport in alpine torrents
Zitiervorschlag:	Schöner W., Pessenteiner S., Gaisberger C., Schrei B., Sass O., Krenn P., Kamp N., Schneider J., S. Gegenleithner. 2021. Modelling future runoff and sediment transport in alpine torrents. Endbericht ACRP Projekt Runsed-CC, 37 Seiten.
Programm inkl. Jahr:	ACRP-9, 2017
Dauer:	01.05.2017 bis 30.06.2021
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Wolfgang Schöner/Oliver Sass
Kontaktperson Name:	Wolfgang Schöner
Kontaktperson Adresse:	Heinrichstrasse 36 8010 Graz
Kontaktperson Telefon:	Wolfgang Schöner +43 316 380 8295
Kontaktperson E-Mail:	Wolfgang.schoener@uni-graz.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Technische Universität Graz (Steiermark) Universität Bayreuth (Deutschland) Wildbach- und Lawinenverbauung – Sektion Steiermark West (Steiermark) Climate Change Center Austria (Wien)
Schlagwörter:	Klimawandel, Wildbacheinzugsgebiet, Abfluss, Sedimenttransport, ÖKS15, Szenarien, Laserscanning, Geschiebetransportmodell
Projektgesamtkosten:	249286,00 €
Fördersumme:	249286,00 €

Allgemeines zum Projekt	
Klimafonds-Nr:	KR16AC0K13305
Erstellt am:	10.11.2021

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

(max. 2 Seiten, Sprache Deutsch)

Murartige Hochwasserereignisse (Hochwasserereignisse mit großem Sedimenttransport) in Wildbacheinzugsgebieten gehören zu den bedeutendsten Naturgefahren in den Alpen. In Österreich war das Einzugsgebiet des Schöttlbachs und damit die Stadt Oberwölz (Murtal, Steiermark) sowohl 2011 als auch 2017 von extremen Hochwasserereignissen mit extremem Sedimenttransport betroffen, die große Schäden verursachten. Ob diese Ereignisse bereits eine Auswirkung des Klimawandels waren, ist unklar. Die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels und der damit verbundenen zunehmenden Extremniederschläge auf Hochwasserereignisse in kleinen alpinen Einzugsgebieten ist jedoch eine Herausforderung und das Wissen über die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Sedimenttransport ist noch sehr unzureichend. Ausgehend von dieser Forschungslücke bestand das Hauptziel von Runsed-CC darin, die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf hydrologische und geomorphologische Prozesse in alpinen Wildbacheinzugsgebieten am Beispiel des Schöttlbachs (Steiermark) zu untersuchen. Dieses Ziel wurde erreicht, indem das hydrologische Modell WaSiM mit Klimabeobachtungsdaten (Spartacus, GPARD, Stationsdaten, ...) und Szenariodaten (ÖKS15) betrieben wurde. Anschließend wurden diese Simulationen als Input für die Sedimenttransportmodellierung mit TELEMAC-SISYPHE verwendet. Um die Ziele von Runsed-CC zu erreichen, waren fünf stark miteinander verknüpfte Arbeitspakete (WPs) Teil des Gesamtprojekts. Die Arbeitspakete 1 und 2 lieferten die hydrologische (Arbeitspaket 1) und die Sedimenttransport-Modellkette (Arbeitspaket 2), während Arbeitspaket 3 Validierungsdaten aus laufenden Prozessmessungen lieferte, Arbeitspaket 4 befasste sich mit der Übertragung des Ansatzes auf andere Einzugsgebiete, und Arbeitspaket 5 befasste sich mit der Interaktion mit den Interessengruppen (insbesondere WLW).

Die Ergebnisse von Runsed-CC zeigen, dass Extremniederschläge und Abflüsse im Einzugsgebiet des Schöttlbachs in Zukunft zunehmen werden. Diese Ergebnisse beruhen auf den vorliegenden ÖKS15-Szenarien und der mit ÖKS15 durchgeführten hydrologischen Modellierung (WaSiM). Das Abflussregime des Schöttlbachs wird sich in den kommenden Jahrzehnten aufgrund des prognostizierten Temperaturanstiegs von einem nivalen zu einem mehr pluvial bestimmten Regime (abnehmende Bedeutung von Schneespeicherung und Schneeschmelze) verändern. Die derzeit für Österreich verfügbaren Klimaszenarien (ÖKS15) und die damit durchgeführten Abflusssimulationen zeigen trotz der Bias-Korrektur von ÖKS15 immer noch deutliche Abweichungen von unabhängigen Beobachtungen (Niederschlag, Abfluss) für die Vergangenheit. Aber auch für die verfügbaren Niederschlagsdaten (und abgeleitete Rasterdatensätze)

sowie einige aus Abflussmessungen abgeleitete hydrologische Indikatoren zeigen sich Unsicherheiten in ähnlicher Größenordnung wie für die ÖKS15-Daten.

Im Hinblick auf die Sedimentmodellierung ist anzumerken, dass eine modellbasierte Darstellung aller in Wildbacheinzugsgebieten relevanten Sedimenttransportprozesse eine große Herausforderung darstellt. So sind hochauflösende Modelle, die Erosion durch Niederschlagsintensität, Murgangstransport und fluvialen Geschiebe- und Suspensionstransport gleichermaßen abbilden können, in der Regel zu rechenaufwändig und die Ergebnisse hängen von einer großen Anzahl von Parametern ab. Im Rahmen des Projekts wurden zwei hochauflösende Modelle entwickelt und angewandt. Die beiden Modelle sind in der Lage, unterschiedliche Prozesse darzustellen, die als dominant angesehen werden. Es ist jedoch anzumerken, dass nur das erste Modell (Modell 1 - Geschiebe) zufriedenstellende Ergebnisse für den Sedimentfluss am Schöttlbach liefern konnte. Dieses Modell geht davon aus, dass ein großer Teil des transportierten Materials in Form von Geschiebe vorliegt und erfordert eine genaue Kenntnis des seitlich zugeführten Materials. Diese Form der Modellierung kann daher in Oberwassereinzugsgebieten mit hohem Feinkornanteil und seitlicher Sedimentverfügbarkeit zu großen Unsicherheiten bezüglich des gesamten Sedimentflusses führen. Es könnte also sein, dass Modelle mit vereinfachten Ansätzen eine genauere Darstellung des gesamten Sedimentflusses ermöglichen - vorausgesetzt, es stehen ausreichend Daten zur Kalibrierung und Validierung zur Verfügung. Hinsichtlich der zukünftigen Veränderung des Sedimentaufkommens kann aus Modellierungssicht davon ausgegangen werden, dass die größeren Abflüsse und damit die erhöhten Schubspannungen vorhandene, bisher quasi immobile Sedimentmengen mobilisieren und in Form von Geschiebe transportieren werden.

Im Hinblick auf die Sedimentmobilisierung und die Sedimentfracht in der Zukunft ist eine überproportionale Zunahme der Sedimentfracht zu erwarten, wenn die Häufigkeit der Störereignisse unter die für die Stabilisierung des Wildbachsystems erforderliche Zeit fällt. Dies gilt jedoch nur für Einzugsgebiete mit hoher bis quasi-unendlicher Sedimentverfügbarkeit.

Die Ergebnisse von Runsed-CC haben auch einige klare Lücken für zukünftige Forschung aufgezeigt. Auf allgemeiner und praktischer Ebene sind für die Charakterisierung künftiger Abflüsse bei Extremereignissen zumindest stündliche Niederschlagswerte mit einer räumlichen Auflösung von mehr als 1 km erforderlich, die jedoch derzeit nicht über ÖKS15 verfügbar sind. Hinsichtlich der geomorphologischen Aussagen für das Einzugsgebiet des Schöttlbachs sollten längere Beobachtungszeiträume angestrebt werden, da aufgrund der Singularität der Ereignisse die für die Konsolidierung notwendige Zeitspanne bisher bestenfalls grob abgeschätzt werden kann. Für die Darstellung der Sedimentakkumulation durch die Sedimentmodelle sollten in Zukunft vereinfachte Ansätze bevorzugt werden, die eine langfristige Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes ermöglichen. Darüber hinaus sind weitere Messungen des anfallenden Materials in

Form von Geschiebe und Suspension notwendig, um eine ausreichende Datenbasis für solche Modelle zu schaffen.

2 Executive Summary

(max. 2 Seiten, Sprache Englisch)

Sediment-laden torrential floods (flood events with large sediment transport) are among the most significant natural hazards in the Alps. In Austria, the catchment area of the Schöttlbach and thus the town of Oberwölz (Murtal, Styria) were affected by extreme flood events with extreme sediment transport in both 2011 and 2017, causing extreme damage. If these events have been already an effect of climate change is not clear. However, analysing the impact of climate change and related increasing extreme precipitation on flood events in small alpine catchments is a challenge and knowledge about the subsequent impact on sediment transport is still highly insufficient. Based on this research gap the main objective of Rundsed-CC was to investigate the effects of climate warming on hydrological and geomorphological processes in alpine torrent catchments using the Schöttlbach (Styria) as an example. This goal was achieved by driving the hydrological model WaSiM with climate observation data (Spartacus, GPARD, station data, ...) and scenario data (ÖKS15). Subsequently, these simulations were used as input for sediment transport modelling using TELEMAC-SISYPHE. To achieve the objectives of Rundsed-CC, five strongly interlinked work packages (WPs) were part of the overall project. WPs 1 and 2 provided the hydrological (WP 1) and sediment transport model chain (WP 2), while WP 3 provided validation data from ongoing process measurements, WP 4 dealt with the transfer of the approach to other catchments, and WP 5 dealt with stakeholder interaction (especially WLV).

Rundsed-CC results show that extreme precipitation and runoff will increase in the future in the catchment area of the Schöttlbach. These results are based on the present ÖKS15 scenarios and the hydrological modelling carried out with ÖKS15 (WaSiM). The runoff regime of the Schöttlbach will change from a nival to a more pluvial dominated regime (decreasing importance of snow storage and snowmelt) in the coming decades due to the predicted temperature increase. The climate scenarios currently available for Austria (ÖKS15) and the runoff simulations carried out with them still show significant deviations from independent observations (precipitation, runoff) for the past, despite the bias correction of ÖKS15. However, also for the available precipitation data (and derived raster data sets) as well as hydrological indicators derived from runoff measurements similar values of uncertainty as for the ÖKS15 data are shown.

With regard to sediment modelling, it should be noted that a model-based representation of all sediment transport processes relevant in torrent catchments represents a major challenge. For example, high-resolution models that can equally represent erosion due to rainfall intensity, mudflow transport and fluvial bedload and suspension transport are usually too computationally complex and the results depend on a large number of parameters. Within the project, two high-resolution models were developed and applied. The two models are able to represent different processes that are considered dominant. It should be noted, however, that only the first model (Model 1 - Bedload) was able to provide satisfactory results for the sediment flow at the Schöttlbach. However, this model assumes that a large part of the transported material is in the form of bedload and requires precise knowledge of the laterally added material. This form of modelling can thus lead to large uncertainties regarding the total sediment flow in headwater catchments with a high proportion of fines and lateral sediment availability. It could thus happen that models with simplified approaches allow a more accurate representation of the entire sediment flow - provided that sufficient data are available for calibration and validation. With regard to the future change in sediment volumes from a modelling perspective, it can be assumed that the larger discharges and thus the increased shear stresses will mobilise existing sediment volumes that have been quasi immobile to date and transport them in the form of bedload.

With respect to sediment mobilisation and sediment load in the future, a disproportionate increase in sediment load is to be expected if the frequency of disturbance events falls below the time required for stabilisation of the torrent system. However, this only applies to catchments with high to quasi-infinite sediment availability.

Results from Runsed-CC also identified some clear gaps for future research. At a general and practical level, for the characterisation of future runoff during extreme events, at least hourly values of precipitation at spatial resolution of higher than 1km are necessary, which, however, are currently not available through ÖKS15. With respect to geomorphological conclusions for the Schöttlbach catchment, longer observation period should be aimed for, as due to the singularity of the events, the time span required for consolidation can so far only be roughly estimated at best. For representation of sediment accumulation by the sediment models in the future, simplified approaches that allow a long-term view of the entire catchment should be preferred. Furthermore, further measurements of the material accumulating in the form of bedload and suspension are necessary to provide a sufficient data basis for such models.

3 Hintergrund und Zielsetzung

In Österreich gehören Murgang-ähnliche Hochwasserereignisse (Hochwasserereignisse mit großem Sedimenttransport) zu den bedeutendsten Naturgefahren. Im Jahr 2015 standen zum Beispiel rund 80 % aller 167

Katastrophenereignisse in Wildbach-Einzugsgebieten in direktem Zusammenhang mit Wasser (Hübl et al. 2016). Wildbachverbauungen in alpinen Einzugsgebieten sind daher weit verbreitet im Alpenraum, um Menschen und Infrastruktur zu schützen. Der Klimawandel in den österreichischen Alpen macht es jedoch notwendig, die Schutzmaßnahmen zu erweitern und neu zu bewerten. Zukunftsprojektionen des Alpenklimas zeigen zunehmende Niederschläge im Winter und längere Trockenperioden im Sommer (Gobiet et al. 2014). Darüber hinaus werden stärkere konvektive Niederschlagsereignisse im Sommer prognostiziert, sowohl allgemein als auch für das Untersuchungsgebiet im oberen Murtal (ClimCatch 2014). Die Analyse der Auswirkungen zunehmender extremer Niederschläge auf Hochwasserereignisse in kleinen alpinen Einzugsgebieten ist jedoch nach wie vor eine Herausforderung, und das Wissen über die nachfolgenden Auswirkungen auf den Sedimenttransport ist nach wie vor unzureichend. Das Einzugsgebiet des Schöttlbachs und damit die Stadt Oberwölz (Murtal, Steiermark) waren sowohl 2011 und 2017 von extremen Hochwasserereignissen mit extremen Sedimenttransport betroffen, die extremen Schaden verursachten. Die Region wurde daher ausgewählt um in Zusammenarbeit mit lokalen Stakeholdern (insbesondere der WLV) das Prozessverständnis zu Hochwasserereignissen und Sedimenttransport in einem Wildbacheinzugsgebiet zu verbessern und mögliche Szenarien durch den Klimawandel für die Zukunft zu zeichnen.

Ziel von Runsed-CC war es

- (i) die zukünftigen Abflüsse und den Sedimenttransport in einem alpinen Einzugsgebiet unter Verwendung der neuesten Klimaprojektionen (ÖKS15) abzuschätzen,
- (ii) sie im Lichte der damit verbundenen Modellunsicherheiten zu betrachten und
- (iii) das Potenzial für die Übertragung der Ergebnisse auf andere alpine Einzugsgebiete zu testen.

Das Ausmaß des Geschiebetransports wird durch die Fließeigenschaften des Gerinnes und dem Sedimentangebot bestimmt. Die Transportraten nehmen in der Regel nichtlinear zu und können sich um sieben Größenordnungen unterscheiden (Haschenburger 2013). Es gibt mehrere Nachteile, die die Simulation und Vorhersage des Sedimenttransports in Wildbacheinzugsgebieten erschweren: (a) Die Beziehung zwischen Niederschlag, Abfluss und Sedimenttransport ist in der Regel eine Blackbox, und auch der Beitrag der Schneeschmelze und der Wassersättigung des Bodens zum Spitzenabfluss ist schwer vorherzusagen. (b) Der Spitzenabfluss hängt stark von der Position der konvektiven Zellen im Einzugsgebiet ab; daher können die an einer einzelnen Station gemessenen Niederschlagsintensitäten irreführend sein. (c) Das Zusammenspiel von intensiven, konvektiven Niederschlagsereignissen (die Sediment an den Hängen, aber nicht im Gerinne mobilisieren können), lang anhaltenden Niederschlägen (die das Gegenteil bewirken können) und zehner- oder hundertjährigen Regen- und Hochwasserereignissen (die sowohl Hänge als auch Gerinne betreffen) ist sehr komplex (z. B. Wetzel 1994). (d) Der Sedimenttransport wird stark von verschiedenen Parametern wie dem Sedimentangebot im Einzugsgebiet und

Verteilungseffekten der Schubspannungen beeinflusst (Yager et al. 2012b); gemessene Sedimenttransportraten in Wildbächen können daher bei ähnlichen Abflussbedingungen um mehrere Größenordnungen variieren (z. B. Bathurst et al. 1987, Hegg und Rickenmann 1999). (e) Die Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen von einem Einzugsgebiet auf ein anderes ist aufgrund der unterschiedlichen Topographie, Lithologie, Sedimentverfügbarkeit, Landnutzung und Niederschläge generell schwierig.

4 Projektinhalt und Ergebnisse

(max. 20 Seiten)

4.1 Niederschlags-Abfluss Modellierung (AP1)

Datenbereitstellung, Datenaufbereitung

In einem ersten Schritt wurden die für die hydrologische Modellierung notwendigen Datensätze erstellt. Dies beinhaltete Analyse, Reformatierung und Resampling von meteorologischen Stationsdaten aus dem Vorläuferprojekt ClimCatch (B175084; Sass et al., 2015) sowie die Korrektur der Abflussdaten mit einer simplen Shift Anpassung (Subtraktion der offset-Werte unter Annahme eines über die Jahre hinweg unveränderten Trockenwetterabflusses). Räumliche Landnutzungsdaten (CORINE land cover CLC2006, Büttner and Kosztra, 2007) sowie Bodendaten (EBOD (2006); Hydrological Atlas of Austria, BMLFUW (2007)) wurden auf ihre Eignung für die Verwendung mit dem hydrologischen Modell untersucht und mittels Literaturwerten (Boden: Carsel und Parrish, 1988) in WaSiM (Schulla, 2017) kompatible Datenformate gebracht. EBOD Daten sind für weniger als ein Drittel der Einzugsgebietsfläche des Schöttlbachs vorhanden und auch die ausgewiesenen Flächen weisen eine hohe Inhomogenität auf. Aufgrund dieser Unsicherheiten bezüglich der Bodenparametrisierung wurden zusätzliche Feldmessungen zur Erhebung der Bodentextur durchgeführt (Holzknecht, 2018). Zur Bestimmung der schneebedeckten Flächen wurden MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) Daten vom NASA Server (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) heruntergeladen und die für das Einzugsgebiet relevante Kachel extrahiert. ÖKS15 Klimaszenarien wurden vom CCCA Datenserver heruntergeladen und für die Verwendung in WaSiM präprozessiert.



Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung des Ausmaßes (a) und des Zeitpunkts (b) des jährlichen Maximalniederschlags im Einzugsgebiet des Schöttlbachs.

Abfluss-Simulationen für den Schöttlbach bis 2050/2100

Um die ÖKS15 Daten räumlich und zeitlich konsistent nutzen zu können, erfolgte die hydrologische Modellierung mit Modellversionen unterschiedlicher zeitlich-räumlicher Auflösung. Dazu haben wir zunächst Langzeitsimulationen (1961-2100) für das größere Gebiet des Wölzerbachs (wovon der Schöttlbach ein Teileinzugsgebiet darstellt) mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Tag auf einem 1 km x 1 km Gitter durchgeführt. Die Erweiterung des Untersuchungsgebiets ermöglichte es, zusätzliche Abflussmessungen der EHYD Station Niederwölz zur Modell-Kalibrierung und -Validierung zu verwenden. Die Kalibrierung des 1 km Modells erfolgte in einer Kombination aus manueller Konfiguration unter Verwendung des SCA-UA Algorithmus (Duan et al., 1992) in einem Split-Sampling Ansatz durch Maximierung einer Linearkombination aus gewöhnlicher sowie logarithmischer Nash Sutcliffe Effizienz (Moriassi et al., 2007; Nash and Sutcliffe 1970). Im Projekt STARC-Imapct (Maraun, 2019) wurde die Verwendung der ÖKS15 Szenarien in der Klimaimpactforschung mithilfe eines Pflanzenwachstumsmodells getestet, die Eignung der ÖKS15 Daten in hydrologischen Klimawandelfolgenstudien wurde bislang jedoch noch nicht systematisch untersucht. Um Unsicherheiten bei der Verwendung der ÖKS15 Szenarien in hydrologischen Analysen aufzuzeigen, haben wir anhand des Wölzerbachs und der Raab analysiert, inwieweit die Modelle in der Lage sind, vergangene hydro-meteorologische Charakteristika und Abflüsse abzubilden (Peßenteiner et al., 2021). Dazu haben wir WaSiM mit observations-gestützten Daten (Stationsdaten ZAMG/AHYD, Gitterdaten GPARD/SPARTACUS) und Klimamodelldaten (bias-korrigierte ÖKS15, unkorrigierte EURO-CORDEX Daten) angetrieben und simulierte Abflüsse sowie weitere hydro-meteorologische Indikatoren (wie z.B. Trocken- und Feuchtperioden, Schneeanteil am Gesamtniederschlag etc.) untereinander verglichen. Gemessene Abflüsse dienen als Langzeit-Referenz. Unsere Analysen haben gezeigt, dass die ÖKS15 Daten grundsätzlich für die Anwendung in hydrologischen Klimafolgenforschungen geeignet sind. Für die meisten der von uns untersuchten Indikatoren wird durch die Biaskorrektur ein deutlicher Mehrwert gegenüber den unkorrigierten EURO-CORDEX Daten erzielt. Jedoch bleibt aufgrund von Unsicherheiten in den gegitterten Beobachtungsdaten GPARD und SPARTACUS und der

Korrekturmethodik selbst ein hydrologisch relevanter Teil des Bias bestehen, welcher bei den Zukunftssimulationen mitbedacht werden sollte.

WaSiM Langzeitsimulationen für den Wölzerbach wurden in der 1 Tag/1 km Auflösung von 1961/1971 (je nach RCM) bis 2100 für die beiden Konzentrationspfadsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 durchgeführt. Beide Szenarien zeigen einen deutlichen und für alle Modelle signifikanten Anstieg der mittleren Tagestemperaturen (Einzugsgebietsmittel). Während sich der Anstieg in RCP4.5 auf 0.22 °C/Dekade (Ensemble-Median) in der Periode 2021-2100 beläuft, zeigt sich für RCP8.5 ein deutlich höherer Anstieg von 0.39 °C/Dekade. Im Hinblick auf die jährlichen Niederschlagssummen zeigt sich im Mann-Kendall Test ($\alpha=0.05$) für beide Szenarien kein einheitlicher Trend zwischen den dreizehn ÖKS15 Modellen (RCP4.5, kein Trend: 9/13 Modellen, signifikant ansteigender Trend: 4/13 Modellen, signifikant fallender Trend: 0/13 Modellen; RCP8.5, kein Trend: 9/13 Modellen, signifikant ansteigender Trend : 3/13 Modellen, signifikant fallender Trend: 1/13 Modellen) in der Periode 2021-2100. Wird der vergangene Zeitraum ab 1971 mitberücksichtigt (Periode 1971-2100) zeigen neun von dreizehn Modellen einen signifikant ansteigenden Trend der jährlichen maximalen Tagesniederschläge, vier von dreizehn Modellen keinen Trend (Mann-Kendall Test, $\alpha=0.05$). Im Vergleich zur Vergangenheit treten diese Maxima für einige Modelle vermehrt im Winter und Frühling auf, was die Wahrscheinlichkeit für Regen-auf-Schnee Ereignisse erhöhen könnte (Abbildung 1).

Um den Einfluss geänderter Temperaturen und Niederschläge auf die Hydrologie des Einzugsgebiets zu untersuchen, wurden verschiedene hydrometeorologische Indikatoren nach Ekström et al. (2018) verwendet. Während extreme Niedrigabflüsse (Low99; Niedrigwasserabfluss, 99stes Perzentil) in RCP4.5 im Vergleich zur historischen Periode 1971-2000 konstant bleiben, zeigen extreme Hochwasserabflüsse (High01; Abfluss > 1stes Perzentil) für alle Zukunftsperioden (2021-2050, 2051-2080, 2071-2100) einen Anstieg (bis zu 10%). Auch die mittlere Frequenz von Spitzenabflüssen (Frequenz von Abflussspitzen mehr als dreimal so groß wie der Monatsmedian; Pennino et al., 2016), ein Indikator für die Abflussvariabilität eines Einzugsgebiets, steigt in beiden Szenarien an (bis zu 40%).

Simulation von Extremereignissen in der Vergangenheit

Trotz einer hohen Modellgüte des 1 km, 1 Tagesmodells, konnten aufgrund grober Auflösung, geringer Dichte meteorologischer Stationen, Fehlern in Zusammenhang mit der Interpolationsmethodik und der Kalibrierung für mittlere Abflüsse vergangene Hochwasserereignisse der Stadtchronik nicht zufriedenstellend modelliert werden. In einem weiteren Schritt haben wir daher die räumlich-zeitliche Auflösung des Modells auf 1 Stunde und 100m erhöht und für die jüngste Vergangenheit (seit 2008) im Schöttlbach betrieben. In diesen Zeitraum fallen auch die beiden Extremereignisse 2011 und 2017. Zusätzlich zu den Daten Stationsdaten, wurden Daten von INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis system; Haiden et al. 2011) verwendet. Bei der

manuellen Re-Kalibrierung wurde dabei auf eine angemessene Darstellung der Abflussspitzen geachtet. Für das Ereignis 2011 wurden Spitzenabflüsse zwischen 90 m³/s und 100 m³/s (Hübl et al., 2012) geschätzt, während 2017 mehrere innerhalb von drei Tagen über das Einzugsgebiet hinwegziehende Gewitterzellen ein multi-peak event mit Maximalabflüssen um die 80m³/s (WLV 2019, persönliche Kommunikation) ausgelöst haben. Die von WaSiM modellierten Abflussspitzen (nur Wasser, keine Sedimente) stimmen gut mit diesen Schätzungen überein (Abbildung 2).

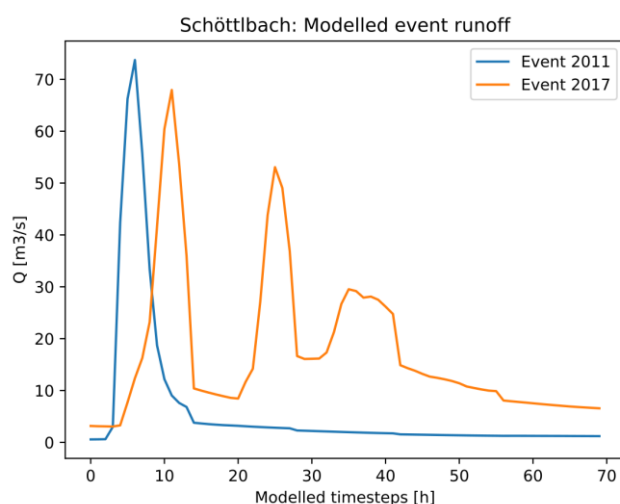


Abbildung 2: Modellierter Abfluss für die beiden Extremereignisse 2011 und 2017.

Um zukünftige Abflusssimulationen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung durchführen zu können, haben wir Temperatur und Niederschlag von täglicher zu stündlicher Auflösung disaggregiert. Für die Temperatur wurde dabei ein sinusoidaler Ansatz nach Förster et al. (2016) unter Verwendung von Tagesminimum-, Tagesmaximum- und Tagesmitteltemperatur, verwendet. Der Niederschlag wurde mithilfe eines Fragmentansatzes ähnlich Winter et al. (2019) disaggregiert (Peßenteiner und Schöner, in preparation). Weiters wird derzeit der GAN (erzeugende gegnerische Netzwerke)-Ansatz von Peßenteiner und Scher (2020) weiterentwickelt spezifisch für den Schöttlbach weiterentwickelt. Zur Erstellung von Storylines extremer zukünftiger Abflüsse, wurden die jeweils größten Niederschlagsereignisse für jedes der dreizehn ÖKS15 Modelle (RCP4.5) herangezogen und für jedes Ereignis jeweils 15 Zufallsrealisationen erstellt. Zusätzlich dienten ein Gleichverteilungsszenario (24h Niederschlag auf den ganzen Tag gleichmäßig verteilt) sowie ein 1h-Szenario (Gesamtniederschlag fällt innerhalb einer Stunde) als Extrem-Referenzen. In den Szenarien zeigen sich große Unterschiede zwischen den einzelnen Modellrealisationen (Spitzenabflüsse zwischen HQ5 und >> HQ300 bei gleichbleibender 24h Summe). Als realistischer Indikator für der Multimodell-Median für zukünftig zu erwartende Spitzenabflüsse herangezogen. Mit Abflüssen um die 150m³/s entspricht dieser einem HQ150 Ereignis.

Unsicherheitsanalyse

Unsicherheiten sind in allen Levels der Modellkette vorhanden. Die Unsicherheiten der Klimamodellszenarien wurden zu Beginn unserer Modellierung eingehend untersucht (Peßenteiner et al., 2021). Durch die Verwendung aller Ensemblemitglieder des ÖKS15 Datensatzes werden strukturelle Unsicherheiten, verschiedene Parameterisierungsschemata, sowie verschiedene Formen der atmosphärischen Gleichungen und abgebildete Systemprozesse der Klimamodelle berücksichtigt. Unsicherheiten in den Subtagesdaten des Niederschlags werden durch unterschiedliche Disaggregierungsrealisationen abgedeckt. Analysen von Parameter-Sensitivitäten zeigten die größten Unsicherheiten im hydrologischen Modell in den Boden- und Grundwasserparametern (Abbildung 3).

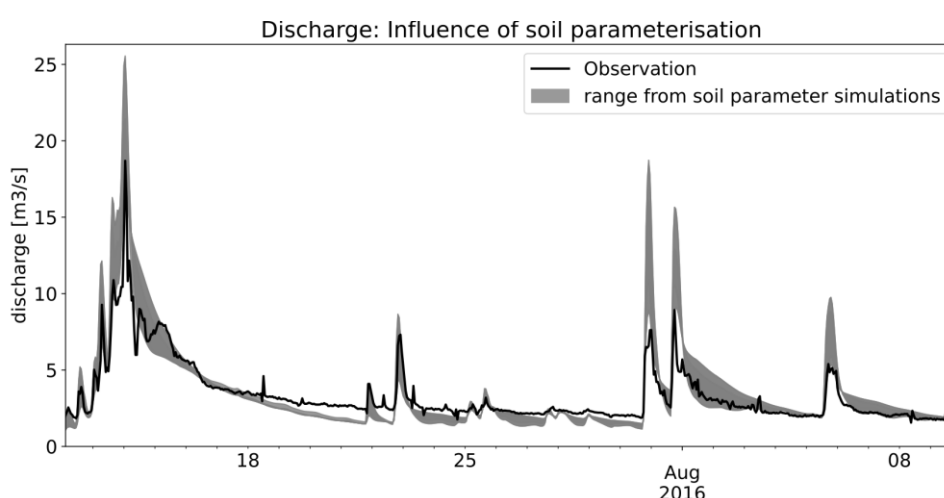


Abbildung 3: Unsicherheiten im Abfluss durch die Verwendung verschiedener in der Literatur verfügbarer Pedotransferfunktionen.

4.2 Sedimenttransport Modellierung (AP2)

Adaptierungen Sedimenttransportmodul - Modell 1 - Geschiebe

Im Rahmen des Projektes wurde die Open Source Modellierungsumgebung TELEMAC-MASCARET v8.p2.r0 (Hervouet, 2007) dahingehend weiterentwickelt, um die Abbildung der relevanten Sedimenttransportprozesse in Wildbächen zu ermöglichen. Die implementierten Ansätze erlauben eine Berechnung des fluvialen Geschiebetransports und des gravitationsgetriebenen, murartigen Transports (Taccone et al., 2018). Tabelle 1 gibt eine Übersicht der implementierten und adaptierten Ansätze

Tabelle 1: Implementierte und Adaptierte Ansätze

Kurzbeschreibung	Literatur	Anmerkung
Variable Power Equation für die Quantifizierung des Fließwiderstands	Ferguson (2007)	
Schubspannungspartitionierung	Einstein (1942), Meyer-Peter Mueller	

	(1948), Rickenmann und Recking (2011)	
Randbedingungen für TELEMAC-2D und SISYPHE	-	
Quellterme für die Zugabe von lateralem Sediment	-	
Geschiebetransportformel	Rickenmann (1991)	
Infiltration	Green und Ampt (1911)	Implementiert von Taccone et al. (2018); adaptiert für v8.p2.r0
Murartiger Sedimenttransport		Implementiert von Taccone et al. (2018); adaptiert für v8.p2.r0

Ansätze adaptiertes Geschiebetransportmodell

Das als Geschiebe transportierte Material verhält sich proportional zu den auftretenden Schubspannungen, welche sich aus den auftretenden Fließwiderständen in der Berechnungsdomäne ermitteln lassen. Der in Form von Sohlreibung auftretende Fließwiderstand wird zumeist über logarithmische Fließwiderstandsgesetze (z.B. Colebrook-White 1937, Hey 1979, Smart & Jäggi 1983 oder Keulegan 1938) oder über Potenzgesetze (z.B. Manning-Strickler) quantifiziert. Ein Großteil der vorhandenen Fließwiderstandsformeln wurde somit unter der Annahme einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung über die Tiefe hergeleitet. Bei geringen relativen Wassertiefen ($h/D < 4.0$), wie das bei Wildbächen oft der Fall ist, kann es zu Abweichungen vom logarithmischen Geschwindigkeitsprofil kommen. Der Fließwiderstand kann hier über eine Mischweglänge, die mit der Partikelgröße skaliert, abgebildet werden. Dieser Ansatz resultiert in einem linearen Zusammenhang des Fließwiderstandes im Verhältnis zur relativen Wassertiefe (Nikora et al. 2001 oder Lawrence 2000). Rickenmann und Recking (2011) bewerteten gängige Fließwiderstandsformeln anhand eines Datensatzes aus 2890 Naturmessungen. In ihren Versuchen konnte die beste Übereinstimmung mit der „Variable Power Equation (VPE)“ Ferguson (2007) erzielt werden. Diese Fließwiderstandsformel kombiniert einen linearen Ansatz bei geringer Wassertiefe mit einem Potenzgesetz für größere Abflüsse. Der Ansatz wurde in das 2D hydrodynamische Modell TELEMAC-2D implementiert (siehe Tabelle 1). Die aus der Hydrodynamik abgeleiteten Schubspannungen werden üblicherweise nicht zur Gänze für die Berechnung des Geschiebestroms herangezogen. Die gesamten Schubspannungen werden hier in einen „Basiswiderstand“ und in einen „zusätzlichen Widerstand“ unterteilt, wobei für die Berechnungen des Geschiebestroms nur der Basiswiderstand herangezogen wird. Um dies berücksichtigen zu können, wird SISYPHE um einen gängigen Ansatz für die Schubspannungspartitionierung erweitert (siehe Tabelle 1). Für die Quantifizierung des Geschiebestroms wurde eine für steile Gerinne entwickelte Geschiebetransportformel (Rickenmann, 1991) in das morphologische Modell SISYPHE implementiert. Die Zugabe von Geschiebe am Modelleinlauf wurde über

die Implementierung einer Gleichgewichtsrandbedingung in SISYPHE realisiert. Das über Hangrutschungen und von kleinen Seitengräben zugeführte Feinmaterial kann über im Rahmen des Projektes entwickelte Randbedingungen, die eine direkte Zugabe von Geschiebe an den Berechnungsknoten erlauben, abgebildet werden.

Validierung Geschiebetransportmodell

Die Validierung des adaptierten Geschiebetransportmodells erfolgte mithilfe eines im Labor durchgeführten Gerinneversuches (Recking et al. 2008, Gegenleithner et al. 2020). Für die Validierung der implementierten Fließwiderstandsformel (VPE) wurden 44 Versuchsanordnungen mit variablem Durchfluss und unterschiedlichen Gerinneneigungen numerisch untersucht. Die Ergebnisse wurden mit dem Manning-Strickler Potenzgesetz verglichen, wobei die Rauheit aus der Korngröße nach Meyer-Peter & Müller (1948) abgeleitet wurde. Der Vergleich gemessener und berechneter Wassertiefen bei unterschiedlichen Gerinneneigungen (Abbildung 4) zeigt, dass der Fließwiderstand bei zunehmender Gerinneneigung, was eine geringere relative Wassertiefe impliziert, mit der VPE Fließwiderstandsformel besser abgebildet werden kann.

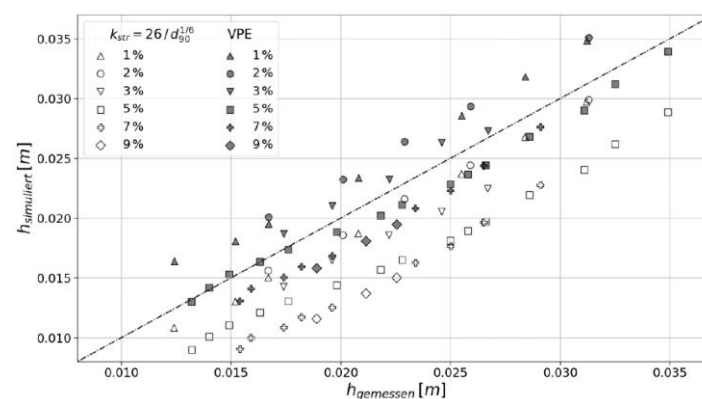


Abbildung 4: Vergleich zwischen im Versuchsgerinne gemessener und simulierter Wasserspiegel (Gegenleithner et al. 2020)

Für die Validierung des Geschiebetransports wurde lediglich eine Versuchsanordnung untersucht. Es wurde jener Geschiebestrom ermittelt, bei dem sich die Sohle im Gleichgewicht befindet. Der Sedimenttransport wird dabei über den dimensionslosen Geschiebetransport ϕ ausgedrückt. Der Geschiebetransport, bei dem sich die Sohle im Gleichgewicht befindet, wurde numerisch zu $\phi = 0.13647 [-]$ ermittelt. Aus den Laborversuchen geht ein dimensionsloser Geschiebetransport von $\phi = 0.09443 [-]$ hervor. Die Abweichungen hinsichtlich des Geschiebestroms können zufolge Unsicherheiten der berechneten Schubspannungen, des Transportbeginns, der Transportformeln, etc. entstehen. Die gemessene Equilibriumskonzentration konnte numerisch durch eine Abminderung der wirkenden Schubspannungen um 13 % erzielt werden. Generell konnten sowohl die Hydrodynamik als auch die Morphodynamik der Gerinneversuche mit den implementierten Ansätzen zufriedenstellend abgebildet werden.

Geschiebe inklusive gravitationsgetriebener Transport - Modell 2 - Gravitation inklusive Geschiebe

Zur Abschätzung des Geschiebestroms inklusive lateraler Zubringer wurde das Geschiebetransportmodell um ein gravitationsgetriebenes Transportmodell erweitert. Dieses Modell wurde von Taccone et al. (2018) implementiert und im Rahmen des Projekts für TELEMAC v8.p2.r0 adaptiert. Das Modell berechnet die Infiltration auf Einzugsgebietsskala, evaluiert ein Stabilitätskriterium und routet die Sedimentmasse mithilfe eines Finiten Volumen Solvers. Die Kopplung zwischen dem hydrodynamischen Abfluss, dem murartigen Transport und dem fluvialen Geschiebetransport erfolgt auf Zeitschrittbasis. Dazu wird in einem ersten Schritt der Reinwasserabfluss numerisch abgebildet. Anschließend werden die Erosionen und Anlandungen zufolge Gravitation berechnet und die Ergebnisse an das Geschiebetransportmodell übergeben. Im Geschiebetransportmodell werden die Erosionen und Anlandungen der einzelnen Korngrößen berechnet und mit den Erosionen und Anlandungen des Gravitationstransports überlagert. Im Anschluss wird die Korngrößenverteilung aktualisiert. Die Validierung des Programmcodes erfolgte hierbei mithilfe einer synthetisch generierten numerischen Modellanordnung.

Modellierung vergangener Ereignisse und Unsicherheiten

Die Modellierung der historischen Ereignisse wurde mithilfe der in M 2.1 entwickelten Modelle durchgeführt. Es ist jedoch anzumerken, dass das kombinierte Modell (Modell 2 – Gravitation inklusive Geschiebe) die im Zuge der Ereignisse anfallenden Sedimentmengen nur unzureichend abbilden konnte. Gründe dafür sind die große Anzahl der Kalibrierungsparameter und die Inhomogenitäten und Anzahl der Parameter im Einzugsgebiet. Das Geschiebetransportmodell (Modell 1- Geschiebe) hingegen konnte die Prozesse quantitativ gut abbilden. Die Sedimentkubaturen wurden für die Ereignisse 2011 und 2017 am bestehenden Rückhaltebecken (inklusive kleiner Teil der oberwasserseitigen Fließstrecke) berechnet und mit gemessenen und beobachteten Werten verglichen. Zur Quantifizierung der Unsicherheiten in der Modellierung wurden verschiedene Modellparameterkombination (numerische Lösungsverfahren, Ansätze, etc.) sowie leichte Abweichungen in der physikalischen Abbildung des Einzugsgebietes (Korngrößen, lateraler Sedimenteintrag, Felsstrecken, etc.) untersucht. Es zeigte sich, dass die Menge des zugegebenen Materials von den Seitenhängen den größten Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Der Unsicherheitsbereich des anfallenden Geschiebes wurde anschließend über zwei Extremszenarien eingegrenzt. Beim ersten Szenario wird kein laterales Material in der Berechnungsperiode zugegeben. Beim zweiten Szenario wird jener lateraler Sedimentzufluss zeitlich konstant zugeführt, der die maximale Transportkapazität des Flusses gerade noch nicht überschreitet. Tabelle 2 zeigt die simulierten Unsicherheitsbereiche der Ereignisse 2011 und 2017.

Tabelle 2: Ergebnisse historische Ereignisse

Ereignis	Gemessen/Beobachtet	Min.	Max.
----------	---------------------	------	------

2011	~ 15000 m ³ Hübl et al. (2012)	10100 m ³	23828 m ³
2017	~ 30000 m ³ siehe AP3	14800 m ³	31730 m ³

Die im Rahmen des Ereignisses 2011 simulierten Anlandungen im Rückhaltebecken sind in Abbildung 5 dargestellt. Die linke Abbildung zeigt die Anlandungen für jenes Szenario, bei dem von einem lateralen Sedimenteintrag von 0 m³ ausgegangen wurde. Die rechte Abbildung zeigt das Szenario mit maximalem lateralem Sedimenteintrag.

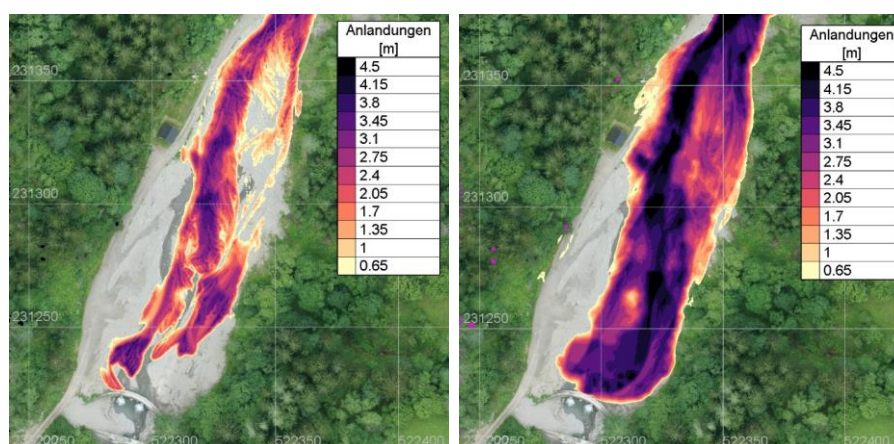


Abbildung 5: Anlandungen Ereignis 2011; links: min. lateraler Sedimenteintrag, rechts: max. lateraler Sedimenteintrag

Szenariosimulationen

Im Rahmen der Szenariosimulationen wurde das kalibrierte Geschiebemodell (Modell 1 - Geschiebe) mit den Zukunftsszenarien aus M 1.4 betrieben. Für die simulierten Szenarien zeigten sich Anlandung im Bereich des Rückhaltebeckens (inkl. lateralem Sedimenttransport) bis zu 38000 m³. Die zukünftige Aufteilung des Sedimentvolumens in Suspension und Geschiebe wurde dabei über die Rouse-Zahl, die von den resultierenden Schubspannungen abhängt, berücksichtigt. Ein höherer Abfluss, wie das bei den simulierten Zukunftsszenarien der Fall ist, kann somit größere Korngrößen in Suspension transportieren. Somit wird das gesamte Transportvolumen über eine reine Betrachtung des Geschiebetransports höchstwahrscheinlich unterschätzt, wobei dies schwer zu quantifizieren ist.

Zusätzliche Betrachtungen in der Modellierung des Sedimenttransports

Die Auswertung der modelltechnischen Unsicherheiten wurde im vorherigen Kapitel dargestellt. Generell kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass die Unsicherheiten in der modelltechnischen Quantifizierung des gesamten Sediments mit steigender Neigung signifikant zunehmen. Ein Grund dafür ist die zu hinterfragende Validität der verfügbaren Modellansätze, wie zum Beispiel die Anwendbarkeit der Flachwassergleichungen (Van Emelen et al. 2014 oder

Denlinger und O'Connell 2008), oder die zumeist unter Laborbedingungen hergeleiteten empirischen Ansätze für den Geschiebestrom. Eine weitere Quelle für Unsicherheiten ist die hohe Variabilität der Eingangsdaten, wie zum Beispiel der Abfluss, die verfügbare Geometrie, Geologie, etc. Des Weiteren sind signifikante Unsicherheiten zufolge Aufteilung des gesamten Sedimentstroms in Geschiebe und Suspension zu erwarten. So kann der Feinanteil, der im Rahmen der Geschiebemodellierung nicht berücksichtigt werden kann, über 50 % des gesamten Sedimenttransports betragen.

4.3 Messung von Sedimentverfügbarkeit, -mobilisierbarkeit und -transport (AP3)

Die Bestimmung von räumlich-zeitlichen Erosions- und Depositionsmustern erwies sich als wesentlich komplexer und zeitaufwändiger als ursprünglich veranschlagt. Dies liegt vor allem am unvorhersehbaren, katastrophalen Flutereignis von 2017, bei dem Infrastruktur zerstört wurde und enorme Umgestaltungen im Tal stattfanden. Um darauf zu reagieren, wurde mit zusätzlichen Geldmitteln (WLV) eine post-event Befliegung mittels UAV-borne Laserscanning durchgeführt. Die damit erzielten Daten sind erheblich umfangreicher und genauer als die der ursprünglich geplanten UAV-Luftbildbefliegungen. Im Ausgleich dazu konnte das Ziel 3.1 nicht erreicht werden, da durch das Flutereignis zahlreiche Referenzpunkte verloren gingen. Auch die SIS-Infrastruktur (Ziel 3.3) wurde eingeschottet oder beschädigt. Ein neuer Anlauf erforderte den Einbau eines festen Querbauwerks, von dem noch keine vollständigen Datensätze vorliegen.

Sedimentmobilisierung von Erosionsflächen

Das kontinuierliche Monitoring von Erosionsflächen wurde durch das Flutereignis von 2017 stark erschwert. An mehreren Positionen wurden sämtliche Referenzpunkte zerstört, so dass ein Oberflächenvergleich (vor/nach dem Ereignis) nicht mehr möglich war. Dennoch zeigen sich verschiedene grundsätzliche Ergebnisse:

- An allen sechs noch bearbeiteten Erosionsanrissen wurde ein typischer Jahresgang festgestellt. Sedimente werden hauptsächlich im Winter von den Hängen mobilisiert und am Hangfuß abgelagert. Diese temporären Sedimentspeicher werden im Sommer bei kleinen und mittleren Flutereignissen aufgenommen und abtransportiert (Abb. 6).
- Das 2017er Ereignis hat sämtliche im Gerinne akkumulierten Zwischenspeicher ausgeräumt und die Hangabschnitte stark erodiert und übersteilt.
- Die Erosionsleistung in "normalen" Jahren (2014 – 2016) liegt an den beobachteten Erosionsanrissen bei 0,11 – 0,21 m/a. Bei einer kartierten Gesamtfläche von Anrissen zwischen dem Rückhaltebecken und der Schöttlkapelle von 5590 m² ergibt sich ein jährlicher Hangabtrag von ca. 600 – 1200 m³.

- Im Jahr 2017 stieg dieser Wert an den beobachteten Flächen auf das etwa Vierfache (0,46 – 0,73 m/a). Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Fläche der Erosionsanrisse sich zumindest verdoppelt hat. Es ergibt sich ein Hangabtrag von ca. 5000 – 8000 m³.

Die auf diese Weise ermittelten Werte liegen etwa eine Zehnerpotenz unter den tatsächlich mittels ULS-Befliegung gewonnenen Volumina (s.u.), was daran liegt, dass völlig neue Ufererosionsbereiche sowie Rinnenerosion an den Hängen entstanden sind. Für die Ermittlung der Gesamterosion während eines Extremereignisses sind die räumlich begrenzten Beobachtungsflächen daher untauglich.

Mit den Airborne Laserscanning (ALS)-Daten (Aug. 2012), die im Zuge der ersten steiermarkweiten Befliegung von 2008 bis 2014 aufgenommen wurde, liegen qualitativ gute flächendeckende Ausgangsdaten vor. In Kooperation mit WLW – Sektion Scheifling konnte im November 2018 ein weiterer auf Laserscanning basierender Datensatz organisiert und finanziert (ca. 12 T€) werden. Im Gegensatz zum ALS-Basisdatensatz wurde die zweite Punktwolke mit einem UAV (Drohne) auf der ein mobiler Laserscanner montiert ist (UAV-borne Laserscanning – ULS) aufgenommen. Bei der verwendeten Drohne handelte es sich um einen RiCOPTER von der Firma Riegl Laser Measurement System. Der eingesetzte Laserscanner war der Riegl VUX-1LR. Durch die geringe Flughöhe und den größeren Aufnahmewinkel von 330° sind UAV-Befliegungen besonders für schmale und tief eingeschnittene Talbereiche geeignet. Aufgrund des Aufnahmezeitpunktes (Nov. 2018) und der geringen Flughöhe konnten Punktdichten von über 100 pt/m² erzielt werden.

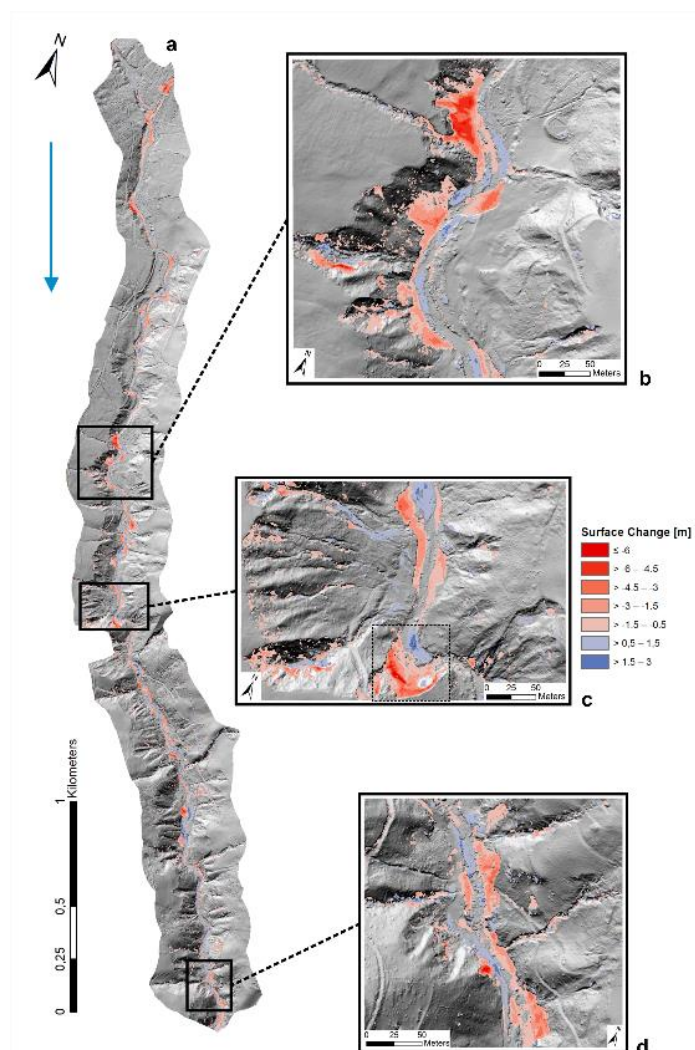


Abbildung 6: Ergebnisse der Change Detection-Analyse im Mittelabschnitt des Schöttlbaches

Der ULS-Datensatz beschränkt sich auf die geomorphologisch aktivsten Bereiche entlang des Schöttlbaches und Krumegger Baches im südlichen Abschnitt des Einzugsgebietes (ca. 5 km²) (Abb. 6). Klar erkennbar sind die hohen vertikalen Erosionsbeträge (bis nahe 10 m) im unteren Teil der Einhänge sowie punktuelle Feilenerosion in den Oberhängen. Im Gerinnebett kam es durch den hohen Sedimenttransport zu einer leichten Netto-Akkumulation. Die quantitative Analyse im Gesamtgebiet diente als Inputgröße für die Sedimentbilanzierung (Abb. 7). Nicht abgedeckte Bereiche aus den oberen Teilen des Einzugsgebiets wurden dabei mittels einer 2018 durchgeführten geomorphologischen Kartierung und einer GIS-basierten Konnektivitätsanalyse abgeschätzt. Die Ergebnissen wurden mit externen Daten der WLV (Ausbaggerungsmengen am Rückhaltebecken) kombiniert. Auf Basis der Laserscanning-Datensätze und der genannten Ergänzungen wurde ein Sedimentbudget für die Jahre 2012 bis 2018 erstellt, wobei das das Extremereignis aus dem Jahr 2017 quantitativ die bedeutendste Veränderung bewirkt hat.

Auf Basis einer Fehler- und Unsicherheitsanalyse wurde jeder Rasterzelle der Digitalen Geländemodelle (DGM) je nach Grad der Unsicherheit kategorisiert. Die errechneten Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse fungieren als Schwellenwerte zwischen nachweisbarer geomorphologischer Veränderung und Veränderung, die sich innerhalb des errechneten Unsicherheitsspektrums befindet und daher nicht in der Volumenberechnung berücksichtigt wird. Für Berechnung von Erosion und Akkumulation wurde ein eigenes Python-basiertes QGIS-Tool (QCD) geschrieben, das auch eine graphische bzw. kartographische Darstellung der geomorphologischen Veränderungen ermöglicht.

Unter Berücksichtigung aller ausgearbeiteten Datensätze konnte ein ganzheitliches Sedimentbudget für das Wildbachereignis vom 4. Und 5. August 2017 erstellt werden, das mit den Schätzungen der mobilisierten Kubatur seitens der WLV gut übereinstimmt. In Summe wurden im Zuge dieses Extremereignisses weit über 100.000 m³ Material im Einzugsgebiet mobilisiert, wovon der Großteil außerhalb des Untersuchungsgebietes abgelagert wurde (Abb. 7).

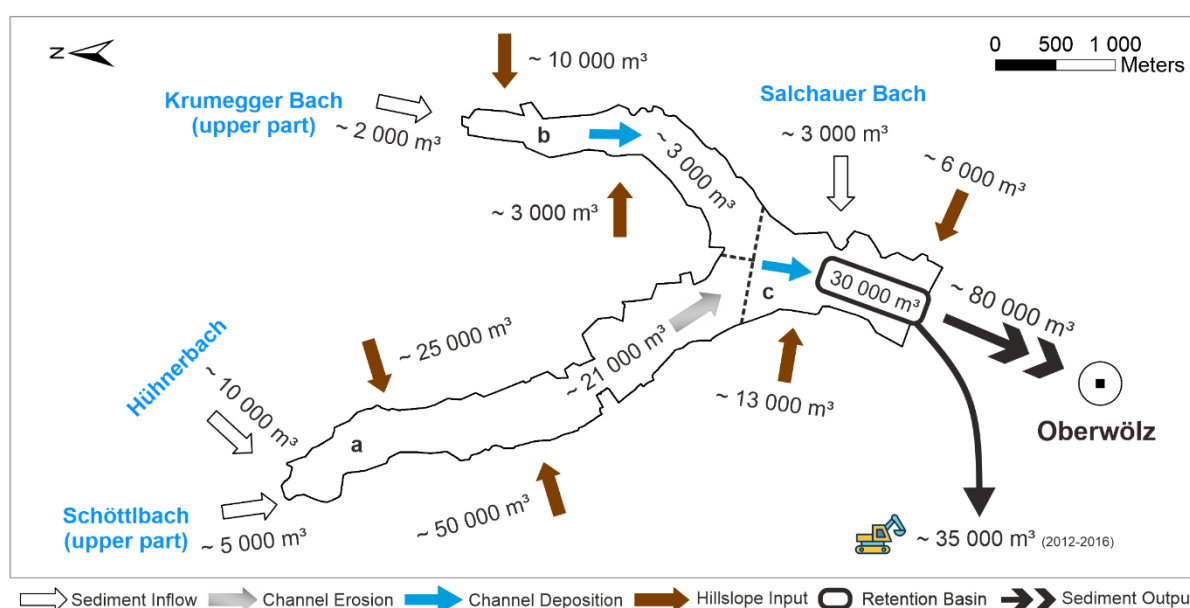


Abbildung 7: Sedimentbilanz der Jahre 2012 bis 2018. Es kam zu Hangerosion im Umfang von 107 Tm³, Zufuhr aus nicht im Scan abgedeckten Seitenbächen von 20 Tm³ und Nettoerosion in der Tiefenlinie von 18 Tm³. Das vor dem Extremereignis 2017 transportierte Material wurde größtenteils im Rückhaltebecken sedimentiert und von dort ausgebagert (35 Tm³). Damit wurde im Extremereignis ca. 110 Tm³ ausgetragen, von denen nur 30 Tm³ im Rückhaltebecken zurückgehalten werden konnten.

Aufgrund der unterschiedlichen hydro-meteorologischen Bedingungen der Extremwetterereignisse von 2011 und 2017 ist ein Vergleich anhand ihrer Abflussspitzen praktisch nicht möglich. Auch eine Gegenüberstellung der mobilisierten Kubaturen lässt sich nur bedingt durchführen, da sich das geomorphologische System des Einzugsgebietes nach dem Ereignis im Juli in einer instabilen Phase befunden hat. Das bedeutet, dass sich das Schöttlbachtal in einem sensitiveren Zustand gegenüber Extremereignissen befindet, bis sich

Hangneigungen von Erosionsanrissen wieder auf ein nicht kritisches Niveau eingestellt haben, Pioniervegetation sich wieder ansiedeln konnte und/oder Uferanbrüche sich wieder stabilisieren konnten. Während dieses systemkritischen Übergangszustand, in dem Sedimentherde aufgerissen, Hangmursysteme aktiv und Schotterterrassen und Uferanbrüche instabil sind, ist von einer stark erhöhten Sedimentspende des lokalen geomorphologischen Systems auszugehen.

Kritisch wird die Situation vor allem dann, wenn Ereignisse mit hohen Jährlichkeiten binnen kurzer Zeit (<10 y) aufeinander folgen und das Wildbachsystem erhöhte Sedimentmengen zur Verfügung stellen kann. Dies hat zur Folge, dass auch Ereignisse geringerer Jährlichkeit Kubaturen an Sediment mobilisieren können, die den Wert des errechneten Bemessungsereignis (HQ150) der WLV übersteigen können.

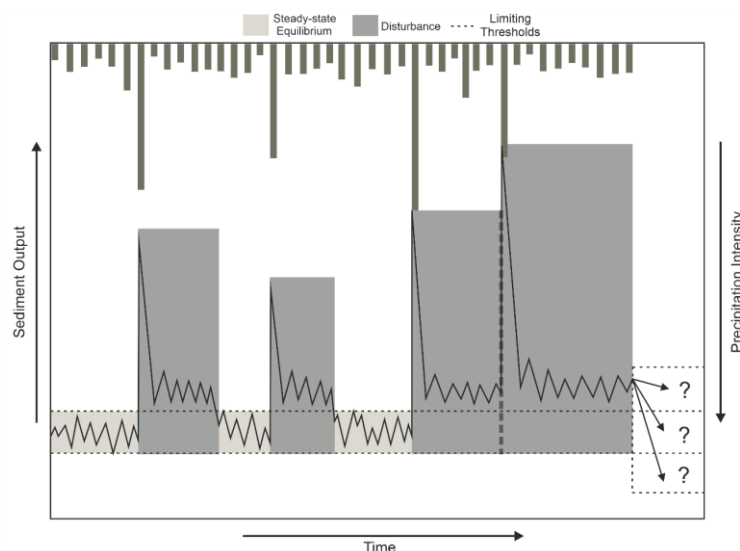


Abbildung 8: Konzeptionelle Darstellung möglicher Kippunkte im Wildbachsystem. Bei einem ausreichenden Abstand zwischen Störungsereignissen (= Starkregen) kann das System nach einer Phase gestörter Bedingungen (dunkelgrau) wieder in seinen Gleichgewichtszustand zurückfinden (hellgrau). Bei zu eng aufeinander folgenden Ereignissen wird kann das Folgeereignis bei gleicher Intensität eine stärkere Reaktion hervorrufen.

Momentan ist noch ungeklärt, ob systeminterne und -kritische Kippunkte aufgrund mehrerer kurz aufeinander folgenden Extremereignisse erreicht werden und welche Konsequenzen das nach sich zieht (siehe Abb. 8). In Einzugsgebieten mit quasi unlimierter Sedimentverfügbarkeit, wie dem Schöttlbachtal, ist anhand unserer Ergebnisse mit nichtlinear ansteigender Sedimentfracht bei einer höheren Frequenz von Störungsereignissen zu rechnen. Die Übertragbarkeit auf andere Wildbachsysteme ist jedoch aufgrund der sehr individuellen Sedimentverfügbarkeit weiterhin schwierig.

Unsicherheiten in Digitalen Geländemodellen (DGM)

Um Laserscanning-Daten, die mit unterschiedlichen Spezifikationen und Plattformen (ALS, ULS) erfasst wurden, für geomorphologische Studien optimal nutzen zu können, bedarf es einer umfassenden Unsicherheits-Analyse (Kamp et. al., submitted). Diese Analyse wurde auf Basis von Wheaton et al. (2010) für das Schöttlbach-Einzugsgebiet entwickelt. Die Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgebiete konnte mit den Wildbacheinzugsgebieten Lorenzerbach und Schwarzenbach (SA2; Niedere Tauern) und Josefbach und Rettenbach (SA3; Grazer Bergland) verifiziert werden (siehe Abb. 10).

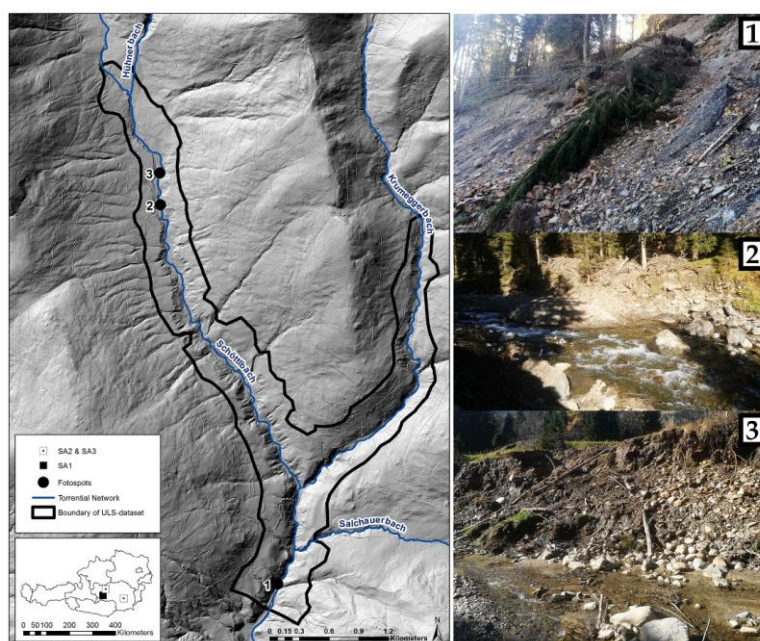


Abbildung 10: Relief-Darstellung des DGMs des Schöttlbach Einzugsgebiets inklusive Standort der für die Verifikation der Unsicherheits-Analyse verwendeten Untersuchungsgebiete Lorenzerbach und Schwarzenbach (SA2) und Josefbach und Rettenbach (SA3) (GIS Steiermark, 2021 & Fotos von Stefan Gsell, 2017)

Alle Untersuchungsgebiete wurden in den letzten Jahren von Starkniederschlägen heimgesucht, die katastrophale Ereignisse mit erheblichen Schäden an Siedlungen und Infrastruktur zur Folge hatten. Wie bereits im WP3 beschrieben, wurden zur Untersuchung des Schöttlbach ALS-Daten mit ULS-Daten verglichen. Auch wenn sich das technische Setup von Airborne und UAV-borne Laserscanning ähnelt, so variieren diese zwei Datensätze dennoch erheblich in ihrer Qualität, Genauigkeit und Punktdichte (siehe Tabelle 3). Aus diesem Grund ist eine detaillierte Unsicherheits-Analyse unabdingbar. Zur Verifikation der Analyse wurden einerseits zwei ALS-Datensätze mit nahezu identischen Aufnahmeparametern in den Wildbacheinzugsgebieten Lorenzerbach und Schwarzenbach herangezogen und mit Ergebnissen aus den Wildbacheinzugsgebieten Josefbach und Rettenbach verglichen. In diesem Fall wurden ebenfalls zwei ALS-Datensätze aus unterschiedlichen Befliegungsperioden miteinander verglichen, allerdings wies der jüngere Datensatz eine deutlich höhere Genauigkeit und Punktdichte auf.

	Airborne Laserscanning	UAV-borne Laserscanning
Laserscanning Plattform	Riegl LMS Q560	Riegl VUX-1LR
Fluggerät	Helicopter	UAV
Wellenlänge [nm]	1500	1500
Genauigkeit / Präzision des Scanners [mm]	20/20	15/10
Scan-Winkel [°]	45	330
Flugzeitraum	August / September 2012	November 2018
Vertikale Genauigkeit [cm]	15	7
Horizontale Genauigkeit [cm]	40	7
Punktdichte der Bodenpunkte [pts/m ²]	8	57
Flughöhe [m über Grund]	~ 130 - 1300	~ 90
Footprint [cm]	30	4

Tabelle 3: Technische Parameter der zwei Punktwolken aus dem Schöttlbach Einzugsgebiets

Um die optimale Anwendbarkeit der Laserscanning-Daten gewährleisten zu können, wurden alle originalen Punktwolken erneut prozessiert, gefiltert und klassifiziert. Anschließend wurden die DGMs mithilfe der Software LAsTools interpoliert. Zusätzlich wurden aus den Punktwolken alle für die Unsicherheits-Analyse notwendigen Input-Parameter mittels GIS-Analyse ermittelt.

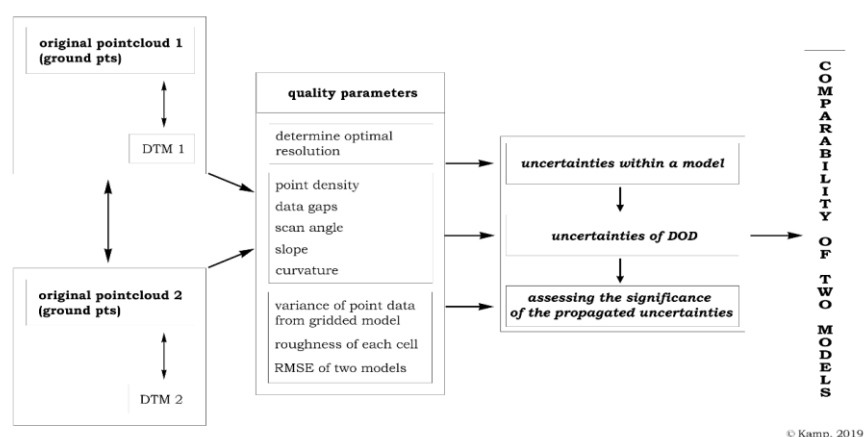


Abbildung 11: Schematischer Aufbau der Unsicherheits-Analyse

Das Ergebnis der Unsicherheits-Analyse zeigt, dass auch wenn die Datengrundlagen unterschiedlich sind, so kann die Vergleichbarkeit der DGMs in den untersuchten Gebieten gewährleistet werden (siehe Abb. 11). Über 80 % der Rasterzellen der DGMs weisen eine hohe bzw. sehr hohe Genauigkeit und somit geringe Höhenfehler (e.g. Schöttlbach: <0.2 m) auf. Was jedoch bei weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden muss, ist die schlechtere Qualität der Rasterzellen im und entlang des Flusskörpers (siehe Abb. 11). Geomorphologische Untersuchungen in diesem Bereich sind etwas kritischer zu betrachten. Für

genauere Details und Beispiele zur Analyse wird auf Kamp et al. (submitted) verwiesen.

Eine wichtige Grundlage dieser Arbeit war eine GIS-Analyse aller steirischen Wildbacheinzugsgebiete auf Basis diverser Parameter wie Landbedeckung (LISA), Anteil von quartären Sedimenten (eingeschränkt durch die geringe Genauigkeit der Geologischen Karte 1:50.000), Relieffaktor, Waldanteil, Hangneigung, Bemessungsniederschlag und bekannte/ausgelöste Katastrophenevents (siehe Abb. 12). Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass jedes Wildbacheinzugsgebiete sehr individuelle Eigenschaften hat und es nicht möglich ist, ohne umfangreiche lokale Nachkartierungen Ergebnisse von einem Gebiet auf andere zu übertragen.

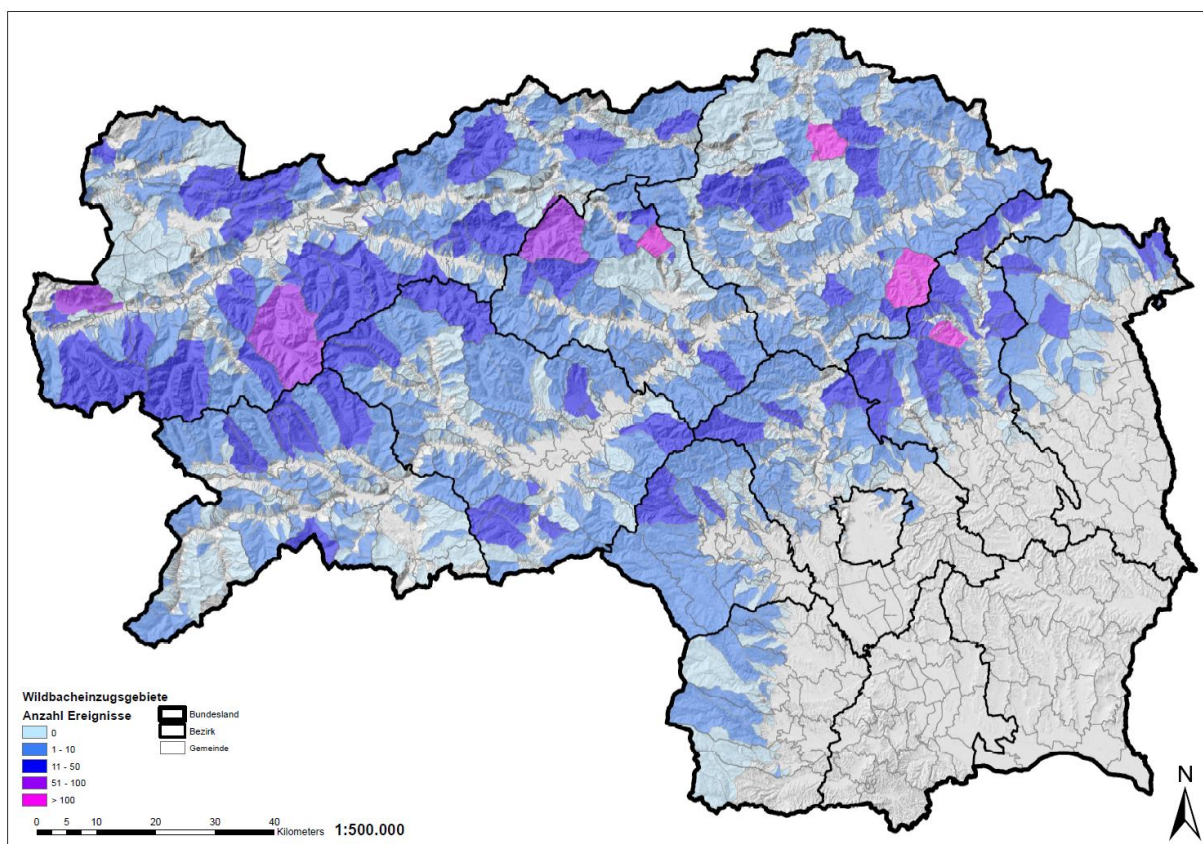


Abbildung 12. Anzahl der bekannten Katastrophenevents in Wildbacheinzugsgebieten der Steiermark

4.5 Management und Dissemination (AP5)

Disseminierungsaktivitäten von Runsed-CC sind detailliert unter Punkt 8 beschrieben und werden daher hier nicht näher ausgeführt.

In Ergänzung zu Punkt 8 ist noch anzuführen, dass die Arbeiten von Runsed-CC in enger Kooperation mit der WLV-Sektion West (Scheifling) durchgeführt wurden und Ergebnisse sowohl mit der WLV als auch mit der Gemeinde Oberwölz diskutiert wurden. Der erste Kontakt und die erste Abstimmung mit der WLV fand bereits zu Projektbeginn im Rahmen eines Workshops and der WLV in Scheifling statt. Für eine Abstimmung der Ergebnisse diente aber insbesondere der Runsed-CC

Abschlussworkshop am 29. Oktober in Oberwölz. Die Runsed-CC Simulationsergebnisse zeigen, dass, vor dem Hintergrund der durch den Klimawandel zu erwartender Verschärfung der Hochwassersituation und des Sedimenttransportes in der Zukunft, der Neubau der Geschieberückhaltesperre im Bereich des Schöttlbachs eine notwendige und vorausschauende Maßnahme zum Schutz der Stadt Oberwölz war.

Um die Ergebnisse des Projektes auch der interessierten breiten Öffentlichkeit und weiteren Stakeholdern näherzubringen, wurde ein Runsed-CC Factsheet für die CCCA-Factsheetreihe entworfen (das Factsheet ist derzeit in Begutachtung durch die WLV).

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Schlussfolgerungen:

Extremniederschläge und Abfluss

Extremniederschläge und Abflüsse nehmen basierend auf den vorliegenden ÖKS15 Szenarien und der mit ÖKS15 durchgeführten hydrologischen Modellierung (WaSiM) im Einzugsgebiet des Schöttlbachs in Zukunft zu. Das Abflussregime des Schöttlbachs wird sich, auf Grund des prognostizierten Temperaturanstiegs, in den kommenden Dekaden verändern, von einem nivalen zu einem stärker pluvial dominierten Regime (zurückgehende Bedeutung der Schneespeicherung und der Schneeschmelze). Die derzeitig zur Verfügung stehenden Klimaszenarien für Österreich (ÖKS15) und damit durchgeführten Abflusssimulationen zeigen trotz Biaskorrektur von ÖKS15 noch deutliche Abweichungen zu unabhängigen Beobachtungen (Niederschlag, Abfluss) für die Vergangenheit. Jedoch zeigt sich auch für die vorliegenden Niederschlagsdaten (und abgeleiteten Rasterdatensätzen) sowie Abflussmessungen für manche hydrologischen Indikatoren eine Unsicherheit in ähnlicher Größenordnung wie für die ÖKS15 Daten.

Sedimentmodellierung

Hinsichtlich der Sedimentmodellierung ist festzuhalten, dass eine modelltechnische Abbildung aller in Wildbacheinzugsgebieten maßgebenden Sedimenttransportprozesse eine große Herausforderung darstellt. So sind hochaufgelöste Modelle, die Erosionen zufolge Regenintensitäten, murartigem Transport sowie fluvialen Geschiebe- und Suspensionstransport gleichermaßen abbilden können meist zu rechenaufwändig und die Ergebnisse sind von einer hohen Anzahl von Parametern abhängig. Im Rahmen des Projektes wurden zwei hochaufgelöste Modelle entwickelt und angewandt. Die beiden Modelle sind in der Lage verschiedene als dominant angesehene Prozesse abzubilden. Es ist jedoch

anzumerken, dass nur das erste Modell (Modell 1 - Geschiebe) zufriedenstellende Ergebnisse für den Sedimentstrom am Schöttlbach liefern konnte. Dieses Modell geht jedoch davon aus, dass ein Großteil des transportierten Materials in Form von Geschiebe anfällt und setzt genaue Kenntnisse über das lateral zugegebene Material voraus. Diese Form der Modellierung kann somit in Kopfeinzugsgebieten mit hohem Feinanteil und lateraler Sedimentverfügbarkeit zu großen Unsicherheiten hinsichtlich des gesamten Sedimentstroms führen. Es könnte somit vorkommen, dass Modelle mit vereinfachten Ansätzen eine genauere Abbildung des gesamten Sedimentstroms ermöglichen – vorausgesetzt es stehen ausreichend Daten für die Kalibrierung und Validierung zur Verfügung. Hinsichtlich der zukünftigen Veränderung der Sedimentmengen aus modelltechnischer Sicht kann davon ausgegangen werden, dass die größeren Abflüsse und somit die erhöhten Schubspannungen vorhandene bis dato quasi unbewegliche Sedimentmengen mobilisieren und in Form von Geschiebe transportieren.

Sedimentmobilisierung und Sedimentfracht

Für die Zukunft ist mit einem überproportionalen Anstieg der Sedimentfracht zu rechnen, falls die Frequenz der Störungsereignisse die Zeitspanne unterschreitet, die für die Stabilisierung des Wildbachsystems benötigt wird. Dies gilt jedoch nur für Einzugsgebiete mit hoher bis quasi-unendlicher Sedimentverfügbarkeit.

5.2 Empfehlungen und Forschungsbedarf:

Hydrologie:

- Für die Charakterisierung des zukünftigen Abflusses während Extremereignisse sind zumindest Stundenwerte des Niederschlags notwendig, die jedoch derzeit durch ÖKS15 nicht vorliegen. Es sollte möglichst umgehend an der Bereitstellung solcher Datensätze im Rahmen von ACRP gearbeitet werden.

Geomorphologie:

- Im Schöttlbach-Gebiet ist eine höhere Beobachtungsdauer anzustreben, da aufgrund der Singularität der Ereignisse die für die Konsolidierung erforderliche Zeitspanne bisher allenfalls grob geschätzt werden kann.

Sedimentmodellierung:

- Für eine Abschätzung des in Zukunft anfallenden Sediments sind vereinfachte Modelle, die eine Langzeitbetrachtung des gesamten Einzugsgebiets erlauben, zu bevorzugen. Des Weiteren sind weitere Messungen des in Form von Geschiebe und Suspension anfallenden Materials notwendig, um eine ausreichende Datengrundlage für solche Modelle zu bieten.

Prinzipiell ist zu empfehlen das umfangreiche Monitorings (Meteorologie, Hydrologie, Sedimenttransport) im Bereich des Schöttlbachs, das gemeinsam mit

den Modellstudien bereits zu einem umfangreichen Prozessverständnis geführt hat, weiterzuführen und in ein langfristiges Monitoring überzuführen.

C) Projektdetails

6 Methodik

Es war Hauptziel von Rundsed-CC die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf hydrologische und geomorphologische Prozesse in alpinen Wildbach-Einzugsgebieten am Beispiel des Schöttlbachs (Steiermark) zu untersuchen, sowie die Übertragbarkeit auf andere Einzugsgebiete in Österreich zu testen. Dieses Ziel wurde erreicht, indem das hydrologische Modell WaSiM mit Klimabeobachtungs- (Spartacus, GPARD, Stationsdaten, ...) und Szenariodaten (ÖKS15) angetrieben wurde. Anschließend wurden diese Simulationen als Input für eine Sedimenttransportmodellierung mittels TELEMAC-SISYPHE verwendet. Die Sedimenttransportmodellierung konnte zumindest teilweise mittels beobachteter Sedimentvolumina validiert werden.

Die Übertragung auf andere Einzugsgebiete in Österreich wurde für den Abfluss für das Raab-Einzugsgebiet getestet, für den Sedimenttransport wurde ein GIS-Ansatz unter Verwendung topografischer und geologische Faktoren, sowie Vegetation und Landnutzungsmerkmale getestet.

Zur verbesserten Messung von Sedimenttransport in Fließgewässern wurde ein System mit Sedimentimpakt-Sensoren entwickelt und unter Laborbedingungen getestet.

Um die Ziele von Rundsed-CC zu erreichen waren fünf stark miteinander verknüpfte Arbeitspakete (WPs) Teil des Gesamtprojektes. Die Arbeitspakete 1 und 2 lieferten die hydrologische (Arbeitspaket 1) und die Sedimenttransport-Modellkette (Arbeitspaket 2), während Arbeitspaket 3 Validierungsdaten aus laufenden Prozessmessungen liefert, Arbeitspaket 4 sich mit der Übertragung des Ansatzes auf andere Einzugsgebiete befasste und Arbeitspaket 5 sich mit der Interaktion mit Stakeholdern (insbesondere WLV) beschäftigte. Die Wechselwirkungen zwischen den Arbeitspaketen sind in Abbildung 13 skizziert.

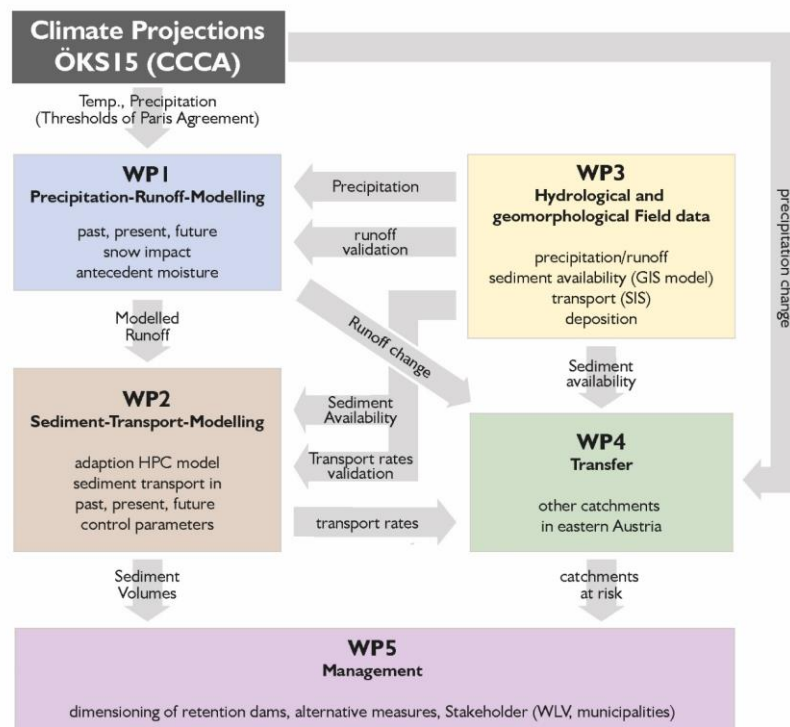


Abbildung 13: Übersicht über den methodischen Ansatz des Projektes Runsed-CC sowie damit im Zusammenhang stehenden Arbeitspakete (Anmerkung: anstelle des ursprünglich vorgesehenen HPC Modells wurde TELEMACH-SI.

Details der verwendeten Runsed-CC Methodik wurden bereits im Kapitel 4 ausgeführt. In diesem Abschnitt soll noch speziell auf die neuentwickelte Methode der Sedimentmessung in Fließgewässern (SIS) sowie Ergänzungen zur Sedimentmodellierung (WP2) eingegangen werden.

Für die Modellierung des Sedimenttransports wird die Open Source Modellierungsumgebung TELEMAC-MASCARET weiterentwickelt und angewandt. Die im Rahmen des Projekts adaptierten Modelle sind das 2D hydronumerische Modul TELEMAC-2D und das Sedimenttransportmodul SISYPHE. Die Module werden auf Zeitschrittbasis gekoppelt. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Modelle, die jeweils auf TELEMAC-2D und SISYPHE basieren, entwickelt. Das erste Modell erlaubt eine detaillierte Abbildung der Hydrodynamik sowie der Geschiebetransportprozesse in Wildbächen (Modell 1 - Geschiebe). Für das zweite Modell (Modell 2 – Gravitation inklusive Geschiebe) wurde ein bestehender Code, der im Rahmen einer Dissertation für die TELEMAC Version v7 entwickelt wurde (Taccone et al., 2018), für Version v8.p2.r0 adaptiert und im Einzugsgebiet des Schöttlbachs getestet. Modell 1 – Geschiebe verwendet morphologische Grundlagen aus WP3 (z.B. Kartierte Felsstrecken, Korngrößen, etc.) sowie extrahierte Ganglinien aus WP1. Das zweite Modell, Modell 2 – Gravitation inklusive Geschiebe, benutzt die zuvor erwähnten morphologischen Grundlagen in Kombination mit räumlich aufgelösten Niederschlagsfeldern. Für die initialen Zustände werden hierbei räumlich verteilte Parameter des hydrologischen Modells

aus WP1 angesetzt – als Beispiel kann hier die initiale Feuchte des Bodens genannt werden. Die Validierung des Programmcodes für Modell 1 wurde anhand des Laborversuchs von Recking et al. 2008 durchgeführt. Modell 2 wurde auf Basis einer synthetisch generierten numerischen Versuchsanordnung, für die die Bandbreite der zu erwartenden Ergebnisse bekannt war, validiert. Die validierten Modelle wurden anschließend verwendet, um zwei historisch relevante Ereignisse (2011 & 2017) abzubilden. Die Ergebnisse der Ereignisse wurden anhand der Anlandungen im Rückhaltebecken ausgewertet. Die Unsicherheiten der Modellierungsergebnisse werden dabei über die Änderung von Modell- sowie physikalisch basierten Parametern, was eine Quantifizierung eines Unsicherheitsbereiches erlaubt, abgeschätzt. Des Weiteren werden die Limitationen der einzelnen Modelle und deren Auswirkungen auf die Unsicherheiten in der Quantifizierung des Sedimentstroms diskutiert. In einem weiteren Schritt wird das Modell 1 mit den Ganglinien, die aus den verschiedenen Klimaprojektionen resultieren, betrieben. Dies soll einen Einblick in die zukünftige Änderung des Sedimenttransports erlauben.

Methodik Geschiebemessung

Im Rahmen des RunSed-CC Projektes wurden die im Vorgängerprojekt entwickelten Sediment Impact Sensoren (SIS) weiterentwickelt, um eine kontinuierliche Messung des Geschiebetransports zu ermöglichen. Die Sensoren wurden im Labor kalibriert und im Feld verbaut. Kalibrierungsmessungen in der Natur wurden bis dato noch nicht durchgeführt. Die verbauten Sensoren zeichnen hochfrequente Beschleunigungssignale, die in Echtzeit gefiltert und ausgewertet werden, auf. Für die Eliminierung der Störsignale werden Wavelet Transformationen in Kombination mit Highpass Filtern angewandt. Abbildung 14 zeigt das aufgezeichnete Signal der Sensoren, wobei links das ungefilterte und rechts das gefilterte Signal dargestellt ist.

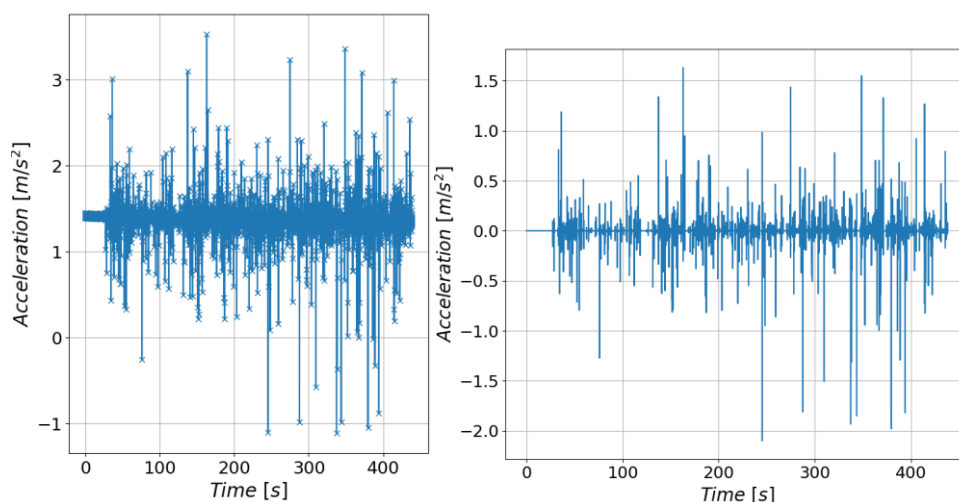


Abbildung 14: Beschleunigungssignale; links: ungefiltert rechts: gefiltert

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Anbei eine tabellarische Auflistung von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt Runsed-CC entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

Publikationen:

- Peßenteiner, S., Hohmann, C., Kirchengast, G., Schöner, W., accepted, 2021: High-resolution climate datasets in hydrological impact studies: Assessing their value in alpine and pre-alpine catchments in southeastern Austria. *Journal of Hydrology Regional Studies*.
- Scher, S. and Peßenteiner, S., 2021: Technical Note: Temporal disaggregation of spatial rainfall fields with generative adversarial networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 3207–3225, <https://doi.org/10.5194/hess-25-3207-2021>.
- Peßenteiner, S., Gegenleithner, S., Krenn, P., Kamp, N., 2020: Modellierung vergangener und zukünftiger Abflüsse und Sedimentfrachten mit freier Software – Einblicke am Beispiel des Schöttlbach (Niedere Tauern). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. 72, 07-08. <https://doi.org/10.1007/s00506-020-00675-8>
- Krenn P., Peßenteiner S., Kamp N., 2019: Das Wildbachereignis von 2017 im Einzugsgebiet des Schöttlaches (Oberwölz) – eine geomorphologische Bestandsaufnahme mittels UAV-borne Laserscanning (ULS). In: Wildbach- und Lawinenverbau. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz. Gefahrenzonenplanung, 184, 224-237.
- Kamp N., Krenn P., Avian M, Sass O., submitted: Comparability of Multi-Temporal DTMs derived from different LiDAR Platforms: Error Sources and Uncertainties in the Application of Geomorphic Impact Studies. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Krenn P., Kamp N., Peßenteiner S., Sass O., submitted: Analysing the impacts of extreme torrential events using multi-temporal LiDAR datasets – a geomorphic impact study from the Schöttlbach catchment, Upper Styria, Austria. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Gegenleithner, S., Schneider, J., Zenz, G., 2020: Adaptierung eines Open Source Codes zur Modellierung von Geschiebetransport in Wildbächen. *Wasserbau-Symposium 2020, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich. Konferenzpaper*
- Peßenteiner, S., Kamp, N., Krenn, P., 2019: Abfluss- und Sedimenttransportmodellierung in Wildbacheinzugsgebieten - Erste Erkenntnisse aus den Niederen Tauern am Beispiel Schöttlbach. In: GEOGRAZ. Grazer Mitteilungen der Geographie und Raumforschung, 65, 16-21.
- Sass O., Krenn P., Lutzmann, S., Rascher, E., 2019: Auswirkung des Klimawandels auf Hang- und Gerinneprozesse in alpinen Wildbächen der Steiermark. In: FSR (Hg.): Fachtagung Rutschungen - Folgen, Forschung, Praxis. Mainz. FSR. 52.
- Krenn, P., Peßenteiner, S., Gegenleithner, S., Götz, J., Schneider, J., Schöner, W., Sass, O., 2018: System Shift? Analysing the influence of two extreme weather events on the geomorphological system of an Alpine catchment - Schöttlbachtal-Oberwölz, Upper Styria, Austria. In: AAU Klagenfurt (Hg.): Von Anthropozän bis Digitalisierung. -. -. 2018. 25.
- Sass, O., Krenn, P., Lutzmann, S., Rascher, E., 2018: Will climate change increase sediment yields of alpine torrential catchments? In: AKG and DEUQUA (Hg.): Geomorphology and Quaternary Sciences: Connecting disciplines. -. -. 2018. 251.
- Lutzmann, S., Stangl, J., Sass, O., 2017: A mountain river sediment cascade and its controls: the Schöttlbach torrent, Styria. In: *Geophysical Research Letters*. 19. 2017. 17046.
- Sass, O., Rascher, E., Lutzmann, S., Stangl, J., 2017: Sediment budgets of unglaciated alpine catchments – the example of the Johnsbach and Schöttlbach valleys in Styria. In: *Geophysical Research Abstracts*. 19th EGU General Assembly, EGU2017. 2017. 16628.

Präsentationen an Tagungen:

- Schöner, Wolfgang, Peßenteiner, Stefanie, Kamp, Nicole, Krenn, Paul, Sass, Oliver, Gegenleithner, Sebastian, Schneider, Josef. Modellierung vergangener und zukünftiger Abflüsse und Sedimentfrachten in alpinen Einzugsgebieten am Beispiel des Schöttlbach (Steiermark). 21. Österreichischer Klimatag, 12.–13. April 2021, Online.

https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/03_Aktivitaeten/Klimatag/Klimatag2020_2021/Tagungsband_2021_v4.pdf

- Peßenteiner, Stefanie, Dorfmann, Clemens, Gegenleithner, Sebastian, Götz, Joachim, Krenn, Paul, Sass, Oliver, Schneider, Josef, Schöner, Wolfgang. RunSed-CC: Modelling future runoff and sediment transport in alpine torrents. EGU2018, Vienna. 2018. Poster.
- Peßenteiner, Stefanie, Hohmann, Clara, Kirchengast, Gottfried, Schöner, Wolfgang. Evaluating ÖKS15 Austrian Climate Scenarios for Hydrological Applications: A Climate Change Impact Study in two Styrian Catchments. EGU2019, Vienna. 2019. Poster.
- Peßenteiner, Stefanie, Hohmann, Clara, Kirchengast, Gottfried, Schöner, Wolfgang. Hydrologische Evaluierung der Österreichischen Klimaszenarien ÖKS15 in der Steiermark. Tag der Hydrologie, Karlsruhe. 2019. Poster.
- Peßenteiner, Stefanie, Dorfmann, Clemens, Gegenleithner, Sebastian, Krenn, Paul, Sass, Oliver, Schneider, Josef, Schöner, Wolfgang. Modellierung vergangener und zukünftiger Abflüsse und Sedimentfrachten in alpinen Einzugsgebieten am Beispiel des Schöttlbach. Workshop Alpine Hydrologie, Obergurgl. 2019. Poster
- Kamp, Nicole, Krenn, Paul, Peßenteiner, Stefanie, Funder, Michael, Sass, Oliver. Analysing the impacts of extreme precipitation events on geomorphic systems in torrential catchments – a comparative study from Upper Styria, Austria. 14th Congress INTERPRAEVENT 2021, Norway.
- Krenn, Paul, Peßenteiner, Stefanie, Götz, Joachim, Lutzmann, Silke, Kirchengast,
- Gottfried, Sass, Oliver. System Shift? Geomorphological system response following two extreme torrential events (Schöttlbachtal, Austria). Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-3875-2, 2019, EGU General Assembly 2019
- Schneider, Josef und Gegenleithner, Sebastian. Betrachtung der Sedimentkaskade in einem Wildbacheinzugsgebiet (Projekt RunSed-CC). Dialogforum Hochwasser, Webinar 2021. Vortrag
- Gegenleithner, Sebastian, Dorfmann, Clemens, Schneider Josef. Flow resistance in low submergence flows. TELEMAC Scientific Committee Meeting, Webinar 2021. Vortrag
- Gegenleithner, Sebastian, Schneider, Josef, Dorfmann, Clemens. Numerical modelling of hydrodynamic and hydromorphological processes for a torrential stream in the Austrian Alps. 5th IAHR Europe Congress – New challenges in hydraulic research and engineering. Trento, Italy. 2018. Vortrag

Bachelor und Masterarbeiten:

- Feichtinger, Maria (2019). Raum-zeitliche Interpolation meteorologischer Daten im Gebirge: Beispiel: Einzugsgebiet des Schöttlbachs (Steiermark, Österreich). Master thesis. Uni Graz.
- Holzknicht, Alena (2018). Bodenprobenahmen im Einzugsgebiet des Schöttlbachs als Eingangsgröße für hydrologische Modellierungen. Bachelor thesis. Uni Graz.
- Bernecker, Carina Tamara (2018). Entwicklung eines mikroelektromechanischen Systembeschleunigers für Messungen des Sedimenttransportes in Wildbächen. Master's Thesis. Graz University of Technology
- Qureshi, Ali Nawaz (2020). Measurement of sediment transport by means of Sediment Impact Sensors (SIS) in the laboratory. Master's Thesis. Graz University of Technology
- Hauser, Martina (2021). Bestimmung von Sohlrauheiten in natürlichen Gerinnen mittels terrestrischem Laserscanning. Master's Thesis. Graz University of Technology

Dissertationen:

- Peßenteiner Stefanie (in progress). Hydrological Modelling of Alpine Torrents under a Changing Climate (working title). Universität Graz.
- Krenn Paul (in progress), Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung
- Gegenleithner Sebastian (in progress), Technische Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Der im Rahmen des Projektes implementierte Ansatz zur Berücksichtigung von Fließwiderständen bei geringen relativen Wassertiefen wird in zukünftigen Versionen von TELEMAC-MASCARET verfügbar sein.

Stakeholderworkshop Oberwölz 29.10.2021 10.00 bis 12.00 Gasthof zum Mohr'n Familie Tanner, Stadt 17, 8832 Oberwölz. (15 TeilnehmerInnen, Bürgermeister, Gemeindeglieder, WLV-Vertreter, Runsed-CC Team)

CCCA-Factsheet: „Veränderungen von Extremniederschlägen, Hochwässer und Sedimenttransport im Schöttlacheinzugsgebiet durch den Klimawandel“

Bereitstellung von Projekt-Ergebnis Daten via CCCA-Datenzentrum:

Abflusssimulationen mittels WaSiM: (*.txt Format)

1. Wölzerbach Abflüsse mittels STATION, GPARD-SPARTACUS, ÖKS15 (1965-2100)
2. Wölzerbach Temperatur (Einzugsgebietsmittel) STATION, GPARD-SPARTACUS, ÖKS15 (1965-2100)
3. Wölzerbach Niederschlag (Einzugsgebietsmittel) STATION, GPARD-SPARTACUS, ÖKS15 (1965-2100)

Stationsdaten: (*.txt Format)

1. Gemessener Abfluss Oberwölz (TU-Graz in Metadaten, da Sensor von TU-Graz betreut)
2. Stationsdaten: Schöttlkapelle, Luxenhütte, Feistritzalm (Temperatur, Niederschlag)

Runsed-CC Projektwebsite:

<https://geographie.uni-graz.at/de/forschung/forschungsgruppen/cc-more/inhalte/runsed-cc-2/>

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.

Referenzen:

Bathurst, J.C., Graf, W.H., Cao, H.H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In: Sediment Transport in Gravelbed Rivers, Thorne, et al. (Eds.), John Wiley & Sons, New York, 453-491.

BMLFUW (ed.) (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienna, Austria.

Büttner, G. and Kosztra, B. (2007): CLC2006 Technical Guidelines, European Environment Agency Copenhagen, Denmark.

Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988): Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. Water Resour Res 24:755–769. doi: 10.1029/WR024i005p00755

Chiari, M. (2008): Numerical Modelling of Bedload Transport in Torrents and Mountain Streams–SETRAC. Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU Wien (Doctoral dissertation, Dissertation, 212 Seiten).

Colebrook, C. and White, F. (1937): Experiments with Fluid Friction in Roughness Pipes, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences 161 (906): 367-381

Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V. (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resour Res 28:1015–1031.
<https://doi.org/10.1029/91WR02985>

EBOD (2006): Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW). EBOD - die digitale Bodenkarte (in German). URL:
<http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=7055>

Einstein, H.A. (1942): Formulas for the transportation of bed load, Trans., ASCE, 107, 561-573

Ekström, M., Gutmann, E.D., Wilby, R.L., Tye, M.R., Kirono, D.G.C. (2018): Robustness of hydroclimate metrics for climate change impact research. WIREs Water 5:e1288.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1288>

Ferguson, R. (2007): Flow resistance equations for gravel-and boulder-bed streams. Water resources research, 43(5).

Förster, K., Hanzer, F., Winter, B., Marke, T., Strasser, U. (2016): An open-source MEteoroLOgical observation time series DISaggregation Tool (MELODIST v0.1.1). *Geoscientific Model Development* 9:2315–2333. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2315-2016>

Gegenleithner, S., Schneider, J., Zenz, G. (2020): Adaptierung eines Open Source Codes zur Modellierung von Geschiebetransport in Wildbächen, Wasserbausymposium 2020, ETH Zürich

Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911): Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24.

Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M., Heinrich G., Rajczak J., Stoffel M. (2014): 21st century climate change in the European Alps—A review, *Science of The Total Environment*, Vol. 493, 1138-1151, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>.

Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B., Gruber, C. (2010): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Wea Forecasting* 26:166–183. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222451.1>

Haschenburger, J.K. (2013): Tracing river gravels: Insights into dispersion from a long-term field experiment, *Geomorphology*, Vol. 200, 121-131, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.033>.

Hegg, C. and Rickenmann, D. (1999): Comparison of bedload transport in a steep mountain torrent with a bedload transport formula. In: *Proceedings 28th IAHR Congress: Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millenium*, 22.-27. August 1999, Graz (Austria); CD-ROM; 7p; Technical University, Graz

Hervouet, J.M. (2007): *Free surface flows: Modelling with the finite element methods*. John Wiley & Sons Ltd.

Hey, R.D. (1979): Flow Resistance in Gravel Bed Rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105, 365-379

Hübl, J., Eisl, J., Hohl, D., Kogelnig, B. (2011): Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach. Band 1: Ereignisdokumentation, Report number 143, Band 1, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien

Hübl J., Eisl J., Kundela G., Hohl D., Karagiorgo K., Hofer B., Tschärner S., Wagner M. (2012): Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach Band 2: Ereignisanalyse. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

Hübl J., Beck M., Kyriazis G., Sauermoser C., Frankl D. (2016): Ereignisdokumentation 2016. Technical Report 185, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien. <https://www.bmnt.gv.at/forst/wildbach-lawinenverbauung/aktuelles-dienststellen-fachabteilung/erdok16.html>.

Keulegan, G.H. (1938): Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 21, Research Paper 1151, 707-741

Lawrence, D. S. L. (2000): Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal inundation: experimental observations and modelling, *Water Resour. Res.*, 36(8), 2381 – 2393

Maraun, D., Mendlik T., Truhetz, H., Chimani, B., Matulla, C., Hiebl, J., Schellander-Gorgas, T., Thaler, S., Kubu, G. (2019): Supporting the Austrian Research Community in using recent Climate Change Projections for Climate Impact Studies. Final Report. ACRP Project No. KR15AC8K12604.

Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948): Formulas for bed-load transport, Report on Second Meeting of IAHR, Stockholm, Sweden, 39-64

Montgomery, D.R. and Buffington, J.M. (1997): Channel reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 596-611

- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R. L., Harmel, R.D., Veith T.L. (2007): Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50:885–900. doi: 10.13031/2013.23153
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J Hydrol* 10:282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Nikora, V., Koll, K., MacEwan, I., McLean, S., Ditttrich, A. (2004): Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows, *J. Hydraul. Eng.*, 130(1), 1036 – 1042
- Pennino, M.J., McDonald, R.I., Jaffe, P.R. (2016): Watershed-scale impacts of stormwater green infrastructure on hydrology, nutrient fluxes, and combined sewer overflows in the mid-Atlantic region. *Science of The Total Environment* 565:1044–1053.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.101>
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., Champagne, J. Y. (2008): Bed-load transport flume experiments on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1302-1310.
- Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of hydraulic engineering*, 117(11), 1419-1439.
- Rickenmann, D. and Recking, A. (2011): Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research*, 47(7).
- Rickenmann, D. (2016): *Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams)*. IAHR Monograph, Taylor & Francis
- Sass, O., Harb, G., Truhetz, H., Stangl, J., Schneider, J. (2015): Abschlussbericht Projekt ClimCatch. Technical Report Klima- und Energiefonds Projekt B175084.
- Schneider, J. and Gegenleithner, S. (2021): Betrachtung der Sedimentkaskade in einem Wildbacheinzugsgebiet, Dialogforum Hochwasser, Webinar
- Schulla, J. (2017): Model Description WaSiM. Technical Report, www.wasim.ch (05.05.2021)
- Smart, G.M. and Jäggi, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, 64, 188p
- Taccone, F., Antoine, G., Delestre, O., Goutal, N. (2018): A gravity-driven runoff and erosion model for sediment transfers at the catchmentscale. *E3S Web Conf* 40:04019.
- Wetzel, K.F. (1994): The significance of fluvial erosion, channel storage and gravitational processes in sediment production in a small mountainous catchment area. In: Ergenzinger, P. and Schmidt, K.-H. (eds), *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers – Lecture Notes in Earth Sciences*, 52, Springer, Berlin. 141–160.
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A. (2010): Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surf Proc Land* 35:136–156.
<https://doi.org/10.1002/esp.1886>
- Winter, B., Schneeberger, K., Dung, N.V., Huttenlau, N., Achleitner, S., Stötter, J., Merz, B., Vorogushyn, S. (2019) A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale. *Water Resour. Res.* 64:539–554. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1593419>
- Yager, E.M., Dietrich W.E., Kirchner J.W., McArnell B.W. (2012b): Prediction of sediment transport in step-pool channels, *Water Resour. Res.*, 48, W01541, <https://doi.org/10.1029/2011WR010829>.