

# VERÄNDERTE HYDROLOGISCHE UND SEDIMENTDYNAMIKEN IN HOCHALPINEN GEBIETEN - UNTERSUCHUNG DES POTENZIALS VON MASCHINELLEM LERNEN ZUR ABSCHÄTZUNG VERGANGENER UND KÜNFTIGER VERÄNDERUNGEN

Lena Katharina Schmidt

## Kurzfassung

Der Klimawandel verändert vergletscherte Hochgebirgsregionen grundlegend, mit wohlbekanntem Auswirkungen auf Kryosphäre und Hydrologie, wie beschleunigtem Gletscherrückgang, vorübergehend erhöhtem Abfluss, längeren schneefreien Perioden und häufigeren und intensiveren sommerlichen Starkniederschlägen. Diese Veränderungen wirken sich auf die Verfügbarkeit und den Transport von Sedimenten in hochalpinen Gebieten aus, indem sie die Interaktion und Intensität verschiedener Erosionsprozesse und Einzugsgebietseigenschaften verändern.

Eine Abschätzung der **zukünftigen Veränderungen des Schwebstofftransports in hochalpinen Bächen** ist von entscheidender Bedeutung, da sie weitreichende Auswirkungen haben, z. B. auf das Hochwasserschadenspotenzial, die Hochwassergefahr in den Unterläufen, sowie Wasserkraftproduktion, aquatische Ökosysteme und Wasserqualität. Das derzeitige Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels auf die Schwebstoffdynamik in diesen hochalpinen Regionen ist jedoch begrenzt. Dies liegt zum einen daran, dass es kaum ausreichend lange Messzeitreihen gibt, um z.B. Trends ableiten zu können. Zum anderen ist es aufgrund der Komplexität und der Vielzahl der Prozesse, die an der hochalpinen Sedimentdynamik beteiligt sind, schwierig - wenn nicht gar unmöglich - prozessbasierte Modelle zu entwickeln. Daher beschränkte sich das Wissen bisher auf konzeptionelle Modelle (die es nicht ermöglichen, konkrete Zeitpunkte oder Größenordnungen für einzelne Einzugsgebiete abzuleiten) oder qualitative Schätzungen ("höherer Sedimentaustrag in wärmeren Jahren"), die möglicherweise nicht in der Lage sind, Rückgänge im Sedimentaustrag abzubilden. In jüngster Zeit haben Ansätze des maschinellen Lernens für die Modellierung der Sedimentdynamik an Popularität gewonnen, da sie aufgrund ihres Black-Box-Charakters auf das vorliegende Problem zugeschnitten sind, d. h. auf relativ gut verstandene Eingangs- und Ausgangsdaten, die durch sehr komplexe Prozesse verknüpft sind.

Das **übergeordnete Ziel** dieser Arbeit ist daher die Abschätzung des Sedimentaustrags am Beispiel des hochalpinen Ötztals in Tirol, Österreich, auf dekadenlangen Zeitskalen in der Vergangenheit und Zukunft – also Zeitskalen, die für den anthropogenen Klimawandel relevant sind. Dazu wird ein **Quantile Regression Forest (QRF)**-Ansatz, d.h. ein nichtparametrisches, multivariates maschinelles Lernverfahren auf der Basis von Random Forest, erweitert, evaluiert und angewendet.

**Die erste Studie** im Rahmen dieser Arbeit zielte darauf ab, die "gegenwärtige" Sedimentdynamik zu verstehen, d. h. in dem Zeitraum, für den Messungen vorliegen (bis zu 15 Jahre). Um die Modellierung für die beiden folgenden Studien zu ermöglichen, wurden in dieser Studie die wichtigsten Prädiktoren, Teilgebiete des Untersuchungsgebiets und Zeiträume ermittelt. Zu diesem Zweck wurden die Wasser- und Sedimenterträge von drei verschachtelten Pegeln im oberen Ötztal, Vent, Sölden und Tumpen (98 bis fast 800 km<sup>2</sup> Einzugsgebiet, 930 bis 3772 m ü.d.M.), auf ihre räumliche Verteilung, ihre Saisonalität und deren räumlichen Unterschiede, sowie die relative Bedeutung von Niederschlagsereignissen hin untersucht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Gebiete oberhalb

von 2500 m ü. M., in denen sich Gletscherzungen und kürzlich entgletscherte Gebiete befinden, eine zentrale Rolle in der Sedimentdynamik in allen Teileinzugsgebieten spielen. Im Gegensatz dazu waren Niederschlagsereignisse relativ unbedeutend (im Durchschnitt wurden 21 % des jährlichen Austrags mit Niederschlagsereignissen in Verbindung gebracht). Daher konzentrierten sich die zweite und dritte Studie auf das Vent-Einzugsgebiet und sein Teileinzugsgebiet oberhalb des Pegels Vernagt (11,4 und 98 km<sup>2</sup>, 1891 bis 3772 m ü. M.), da sie einen höheren Anteil an Gebieten oberhalb von 2500 m aufweisen. Außerdem wurden Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur (sowie deren Vorbedingungen) als Prädiktoren einbezogen.

Die **zweite Studie** zielte darauf ab, den Sedimentexport seit den 1960er/70er Jahren an den Pegeln Vent und Vernagt abzuschätzen. Dies wurde durch die Verfügbarkeit langer Aufzeichnungen der Prädiktoren Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur sowie kürzerer Aufzeichnungen (vier und 15 Jahre) von aus Trübungsmessungen abgeleiteten Sedimentkonzentrationen an den beiden Pegeln ermöglicht. Die **dritte Studie** zielte darauf ab, den zukünftigen Sedimentexport bis zum Jahr 2100 abzuschätzen, indem die in der zweiten Studie entwickelten QRF-Modelle auf bereits existierende Niederschlags- und Temperaturprojektionen (EURO-CORDEX) und Abflussprojektionen (des physikalisch basierten hydroklimatologischen und Schneemodells AMUNDSEN) in den drei repräsentativen Konzentrationspfaden RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 angewendet wurden.

Die **kombinierten Ergebnisse der zweiten und dritten Studie** legen nahe, dass der Sedimentexport in der Vergangenheit insgesamt zugenommen hat und in der Zukunft abnehmen wird. Dies deutet darauf hin, dass der Höhepunkt des Sedimenteintrags erreicht ist oder bereits überschritten wurde - es sei denn, die Niederschlagsveränderungen entwickeln sich anders, als es in den Projektionen dargestellt ist, oder Veränderungen in der Erodierbarkeit des Einzugsgebiets setzen sich durch. Trotz des allgemeinen Rückgangs in der Zukunft sind sehr hohe Sedimentausträge als Reaktion auf Niederschlagsereignisse möglich. Diese zweifältige Entwicklung hat wichtige Auswirkungen auf das Sedimentmanagement, die Hochwassergefahr und die Flussökologie.

Diese Arbeit zeigt, dass **QRF ein sehr nützliches Instrument zur Modellierung des Sedimentexports in hochalpinen Gebieten sein kann**. Mehrere Validierungen in der zweiten Studie zeigten eine gute Modell-Performance und die Überlegenheit gegenüber traditionellen Sediment-Abfluss-Beziehungen – insbesondere in Zeiträumen, in denen es zu einem hohen Sedimentexport kam, was auf die Fähigkeit von QRF hinweist, mit Schwelleneffekten umzugehen. Eine technische Einschränkung von QRF ist die Unfähigkeit, über den Bereich der in den Trainingsdaten dargestellten Werte hinaus zu extrapolieren. Die Anzahl und den Schweregrad an solchen Tagen, in denen der Wertebereich der Trainingsdaten überschritten wurde, wurde in beiden Studien untersucht. Dabei zeigte sich, dass es in der zweiten Studie nur wenige solcher Tage gab und dass die mit den Überschreitungen verbundenen Unsicherheiten in der dritten Studie vor 2070 gering waren. Da die vorverarbeiteten Daten und der Modellcode öffentlich zugänglich gemacht wurden, können künftige Studien darauf aufbauend weitere Ansätze testen oder QRF auf weitere Einzugsgebiete anwenden.