



**Modellierung der Sedimentdynamik im Rofental,  
Ötztaler Alpen, unter Verwendung eines  
nichtparametrischen Modells**

**Bachelorarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

**Von: Peter Grosse**

**Studiengang: Geoökologie**

**Angefertigt im Lehrstuhl für Hydrologie und Klimatologie  
Institut für Umweltwissenschaften und Geografie der Universität Potsdam**

**1. Gutachter: Dr. Till Francke**

**2. Gutachter: Dr. Wolfgang Schwanghart**

**Potsdam, den 10.03.2021**

Soweit nicht anders gekennzeichnet, ist dieses Werk unter einem Creative-Commons-Lizenzvertrag Namensnennung 4.0 lizenziert.  
Dies gilt nicht für Zitate und Werke, die aufgrund einer anderen Erlaubnis genutzt werden.  
Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Online veröffentlicht auf dem  
Publikationsserver der Universität Potsdam:  
<https://doi.org/10.25932/publishup-50669>  
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-506695>

<b>SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>8</b>
<b>2. METHODEN.....</b>	<b>10</b>
2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIETE .....	10
2.1.1 Das Rofental .....	10
2.1.2 Das Teileinzugsgebiet Vernagtferner.....	10
2.2 DATENGRUNDLAGE (NIEDERSCHLAG, ABFLUSS, TRÜBUNG, TEMPERATUR, SSC).....	11
2.3 MESSUNG DER SSC.....	12
2.4 WASSERPROBENANALYSE IM LABOR .....	13
2.5 DATENAUFBEREITUNG .....	14
2.6 EXPLORATIVE DATENANALYSE UND MODELLERSTELLUNG .....	14
2.7 ERSTELLUNG ZUSÄTZLICHER PRÄDIKTOREN.....	15
2.8 DAS QUANTILE-REGRESSION-FOREST-MODELL .....	16
2.9 VORHERSAGE DES SEDIGRAPHEN UND BERECHNUNG DER SEDIMENTFRACHT .....	17
2.10 MODELLVALIDIERUNG .....	17
<b>3. ERGEBNISSE .....</b>	<b>19</b>
3.1 ERGEBNISSE DER EXPLORATIVEN DATENANALYSE.....	19
3.1.1 Sedimentkonzentration und Trübung .....	19
3.1.2 Abfluss.....	20
3.1.3 Temperatur.....	21
3.1.4 Niederschlag .....	22
3.2 ERGEBNISSE DES QRF-MODELLS.....	23
3.3 MODELLIERUNG DES SEDIGRAPHEN.....	24
<b>4. DISKUSSION.....</b>	<b>28</b>
4.1 AUFFÄLLIGKEITEN BEI DER EXPLORATIVEN DATENANALYSE .....	28
4.2 MODELLIERUNG DER SEDIMENTKONZENTRATION DURCH DAS QRF-MODELL.....	28

4.3 MODELLIERUNG DES SEDIGRAPHEN/ FEHLERQUELLE TRÜBUNGSMESSUNG .....	30
4.4 WEITERE FEHLERQUELLEN .....	31
<b>5. SCHLUSSFOLGERUNG.....</b>	<b>33</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>35</b>
<b>ANHANG 1 .....</b>	<b>38</b>
ANHANG 1.1 VERWENDETE SENSOREN.....	38
ANHANG 1.2 BILD DES ISCO RINGS .....	38
ANHANG 1.3 KALIBRIERUNGSFUNKTIONEN.....	38
ANHANG 1.4 KORRELATION ZWISCHEN DEN VERWENDETEN PRÄDIKTOREN .....	39
Anhang 1.4.1 Vent .....	39
Anhang 1.4.2 Vernagtferner.....	40
ANHANG 1.5 VALIDIERUNG DER MODELLVORHERSAGE EINZELNER MONATE .....	41
ANHANG 1.6 SEDIMENTFRACHTEN .....	42
ANHANG 1.7 WEITERE ABBILDUNGEN DES SEDIGRAPHEN FÜR AUSGEWÄHLTE ZEITRÄUME.....	43
Anhang 1.7.1 Vent .....	43
Anhang 1.7.2 Vernagtferner.....	45
<b>ANHANG 2 .....</b>	<b>47</b>
ANHANG 2.1 ERGEBNISSE OHNE EINFLUSS DER MURGÄNGE .....	47
ANHANG 2.2 VERFÄRBUNG DER ROFENACHE ALS FOLGE EINES MURGANGS .....	49

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift (Peter Grosse)

## Abstract

The continued melting of glaciers releases more sediment deposits, making them more susceptible to erosion. Increased sediment discharge rates endanger water quality and water supply due to reservoir siltation. In order to better understand these hazards and their evolution, erosion processes need to be studied, especially in high alpine catchment areas.

In this bachelor thesis, sediment concentrations as well as other environmental variables, such as discharge, precipitation and temperature, were measured in the Rofental catchment (Ötztal Alps) and in a highly glaciated sub-catchment of the Rofental. The quantile regression forest machine learning technique was applied to determine the correlation between sediment concentration and ancillary variables. The variables were aggregated to different levels, which allowed past hydroclimatic conditions to be taken into account. Considering the knowledge regarding the influence of these environment variables, the sediment concentration could be retrospectively simulated using a Monte Carlo approach. The resulting continuous time series was used to calculate the annual sediment export rates. The turbidity, as an indicator for the sediment concentration, was measured as well. By determining the correlation between the modelled data and the measured turbidity, the significance of the model could be assessed.

The results show that the quantile regression forest model is a suitable approach to reconstruct the sediment dynamics in the Rofental. It further emerged that the discharge has a great impact on the sediment concentration in both catchments, with the relevance of the other variables varying widely between both study areas. The correlation between the measured turbidity and the simulated sediment concentration is strongly positive, whereby debris flows, measurement errors and the rinse of new sediment reservoirs deteriorated the model's performance.

## Zusammenfassung

Durch das anhaltende Rückschmelzen von Gletschern werden mehr Sedimentdepots freigesetzt, wodurch diese anfälliger für Erosion werden. Erhöhte Sedimentaustragsraten gefährden die Wasserqualität sowie die Wasserversorgung durch Stauraumverlandung. Um diese Gefahren und deren Abläufe besser verstehen zu können, müssen Erosionsprozesse vor allem in hochalpinen Einzugsgebieten erforscht werden.

In dieser Bachelorarbeit wurden Sedimentkonzentrationen sowie weitere Umgebungsvariablen (Abfluss, Niederschlag und Temperatur) im Rofental, Ötztaler Alpen und in einem stark vergletscherten Teileinzugsgebiet des Rofentals gemessen. Um den Zusammenhang zwischen der Sedimentkonzentration und den gemessenen Umgebungsbedingungen zu ermitteln, wurde das Quantile Regression Forest Modell verwendet. Dabei wurden die Variablen zu unterschiedlichen Zeitstufen aggregiert, wodurch vergangene hydroklimatische Bedingungen berücksichtigt werden konnten. Mit der Kenntnis über den Einfluss der verschiedenen Einflussfaktoren konnte die Sedimentkonzentration rückwirkend mithilfe eines Monte Carlo Ansatzes kontinuierlich modelliert werden, wodurch Aussagen über die jährlichen Sedimentexportraten getätigt werden konnten. Weiterhin wurde auch die Trübung, welche als Indikator für die Sedimentkonzentration angesehen werden kann, gemessen. Durch die Bestimmung der Korrelation zwischen modellierten Daten und der gemessenen Trübung konnte der Aussagegehalt des Modells beurteilt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass das Quantile Regression Forest Modell geeignet ist, um die Sedimentdynamik im Rofental zu rekonstruieren. Es stellte sich weiterhin heraus, dass der Abfluss in beiden Untersuchungsgebieten den größten Einfluss auf die Sedimentdynamik hat, wobei sich die Relevanz verschiedener Variablen in beiden Untersuchungsgebieten stark unterschied. Gemessene Trübungsdaten und die modellierten Sedimentkonzentrationen korrelierten stark positiv, wobei Murgänge, Messfehler und die Anzapfung neuer Sedimentdepots zur Verschlechterung der Modellgüte führten.

## 1. Einleitung

Durch die verstärkte Änderung des Klimas ist die Wasserversorgung im Alpenraum gefährdet und es ist anzunehmen, dass es vor allem in den Sommermonaten zu Wasserknappheit, Versorgungsengpässen und Nutzungskonflikten kommen wird (Hipp et al., 2015). Um diese Engpässe zu vermeiden, wird das Verlangen nach künstlichen Wasserspeichern größer. Die Wasserversorgung wird jedoch gefährdet, wenn die Speicherkapazität von Wasserspeichern durch eingetragenes Sediment verringert wird. Außerdem wird die Funktionsfähigkeit von Wasserkraftanlagen durch mitgeführtes Material beeinträchtigt, wenn Turbinen versanden. Generell wird die geomorphologische Aktivität, durch den Anstieg der Temperatur und durch häufigere sommerliche Starkregenereignisse, zunehmen und somit zu erhöhten Sedimentflüssen führen (Otto et. al, 2010).

Um die Auswirkungen des von Flüssen mitgeführten Materials besser beschreiben zu können, wird eine Unterteilung, je nach Größe des Materials, vorgenommen. Daraus ergeben sich die drei nachfolgend beschriebenen Klassen:

Lösungsfracht ist das gelöste Material im Wasser, welches molekulare und ionische Bestandteile umfasst und größtenteils durch chemische Verwitterung freigesetzt wird. Geröllfracht umfasst das größere mitgeführte Material und wird nur bei starker Strömung am Boden des Flussbetts bewegt. Schwebfracht besteht aus kleineren Partikeln, welche durch ihre geringe Größe ( $<0,063$  mm im Durchmesser) vom turbulenten Wasser und vom eigenen Auftrieb in Schwebelage gehalten werden und somit über weite Strecken transportiert werden können. Der Transport von Schwebfracht ist der Haupttransportprozess in Flüssen (Wood, 1977), weshalb es von großer Bedeutung ist, diesen Transport- und Erosionsprozess näher zu untersuchen.

Da der Abfluss als Transportmedium der Sedimente fungiert, liegt es nahe, nur den Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen zu untersuchen. Jedoch wurde bereits festgestellt, dass der Abfluss nicht als einziger Faktor für die Dynamik der Sedimentkonzentration verantwortlich ist (Francke et. al, 2008; Asselmann, 2000; Naeser, 2002). Beispielsweise führt langanhaltender Niederschlag zu einer Sättigung des Bodens, wodurch nicht infiltrierender Niederschlag oberflächlich abfließt (Dikau et. al, 2019, S.229). Dieser oberflächliche Abfluss bewirkt das Ablösen von Bodenpartikeln und somit auch die Erhöhung der Sedimentkonzentration (folgend SSC) im Vorfluter. Oberflächenabfluss kann jedoch auch durch kurz anhaltende Niederschläge auftreten, wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate übersteigt. Weiterhin führt eine erhöhte Strahlungsintensität zum Ansteigen der Temperatur und diese wiederum zu erhöhten Schmelzraten von Gletschern, wodurch der Abfluss und somit auch die SSC erhöht werden kann. Da der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss im glazial geprägten

Rofental bei ungefähr 75 % liegt (Schmieder et. al, 2018), ist dies ebenfalls ein relevanter Faktor zur Bestimmung der Sedimentdynamik im Rofental. All diese Faktoren unterliegen stündlichen, täglichen und saisonalen Schwankungen, weshalb auch die zeitliche Variabilität dieser Einflussgrößen zur Bestimmung der Sedimentdynamik bedeutend ist. Durch das Ermitteln der Sedimentdynamik kann anschließend auf den jährlichen Sedimentaustrag geschlossen werden. Um verschiedene Einzugsgebiete miteinander vergleichen zu können, kann der spezifische Sedimentaustrag in Tonnen pro Jahr und Quadratkilometer berechnet werden. Das Rofental (98.1 km<sup>2</sup>) hat dabei einen spezifischen Sedimentaustrag zwischen 1529 und 2446 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> was einem jährlichen Sedimentaustrag von 150000 beziehungsweise 240000 t a<sup>-1</sup> (Gattermayr, 2013) entspricht.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Variabilität der Sedimentkonzentrationen in den Vorflutern alpiner und vergletschterter Einzugsgebiete mithilfe des Quantile Regression Forest Modells (folgend QRF) zu rekonstruieren. Dazu wurden Wasserproben in zwei Flüssen im Rofental (oberes Ötztal) genommen, sobald bestimmte Grenzwerte der Prädiktoren überschritten wurden. Durch die Gegenüberstellung von modellierten Daten auf Grundlage des QRF-Modells und kontinuierlich gemessenen Trübungsdaten, welche als indirekter Indikator der Sedimentkonzentrationen angesehen werden können, wird anschließend überprüft, ob das Modell für die Interpolation der Sedimentkonzentration geeignet ist.

## 2. Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiete

#### 2.1.1 *Das Rofental*

Die beiden untersuchten Flüsse (Rofenache und Vernagtbach) befinden sich im Rofental, welches im oberen Ötztal (Tirol, Österreich) liegt und eine Ausdehnung von 98,1 km<sup>2</sup> hat (Abbildung 1). Das Rofental reicht von der Pegelstation Vent (1891 m ü. NN) bis zur Wildspitze (3772 m ü. NN), dem höchsten Berg Tirols. Die mittlere Neigung beträgt 25° bei einer mittleren Höhe von 2930 m ü. NN. Die Rofenache mündet in die Venter Ache, Öztaler Ache, den Inn sowie in die Donau, welche später in das Schwarze Meer mündet. Das stark vergletscherte Vernagtferner Einzugsgebiet, in dem der Vernagtbach fließt, ist ein Teileinzugsgebiet des Rofentals. Der vorherrschende Vegetationstyp sind alpine Weiden. Vor allem Glimmerschiefer und Para-Gneise sind im Rofental zu finden (de Jong et. al, 2005, S.265). Es herrscht ein inneralpines Trockenklima mit einem mittleren Jahresniederschlag von 700 mm. Die Schneedecke ist von Oktober bis Ende Juni vorhanden und das Abflussregime der Rofenache wird von der Schnee- und Eisschmelze während des Frühjahrs und Sommers maßgeblich bestimmt. Der Anteil der vergletscherten Fläche nahm in den letzten Jahrzehnten deutlich ab, von 44 % im Jahr 1969 auf 38 % im Jahr 2009. Es wird erwartet, dass diese vergletscherten Flächen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr existent sind (Strasser et. al, 2018). Die Pegelstation Vent (46,85722°N, 10,91083°E) wird vom Hydrographischen Dienst Tirol (HD) betrieben und liegt am Gebietsauslass des Rofentals auf 1891 m ü. NN.

#### 2.1.2 *Das Teileinzugsgebiet Vernagtferner*

Die Pegelstation unterhalb des Vernagtferners (VF) liegt auf 2635 m ü. NN (46,85675°N, 10,82886°E) und wird vom Vernagtbach durchflossen, welcher später in die Rofenache mündet. Sie ist somit die höchstgelegene, abflussmessende Station Österreichs und wird von der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (BAdW) betrieben. Das Vernagtferner Einzugsgebiet hat eine Größe von 11,44 km<sup>2</sup>, wobei 7,3 km<sup>2</sup> (63,8 %) im Jahr 2015 vergletschert waren. Das Gebiet erstreckt sich von 2635 m ü. NN an der Messstation bis auf 3635 m ü. NN am Gipfel des Hinteren Brochkogels (Strasser et. al, 2018).

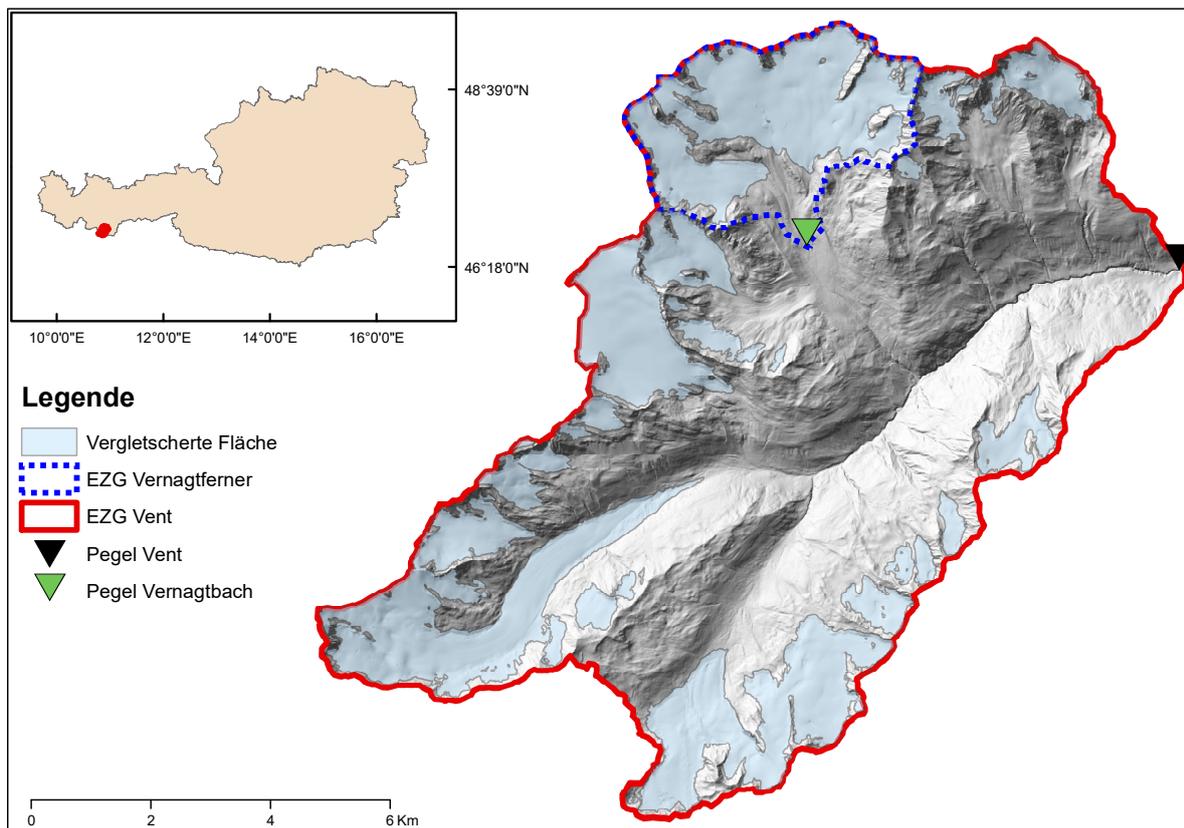


Abbildung 1: Position der beiden Pegel Vent und Vernagtbach und die vergletscherte Fläche im Rofental sowie die Lage der Untersuchungsgebiete in Österreich. (Projektion: WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N); Datenquelle: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, PANGEA)

## 2.2 Datengrundlage (Niederschlag, Abfluss, Trübung, Temperatur, SSC)

In beiden Einzugsgebieten wurden Niederschlags-, Abfluss-, Trübungs-, Temperatur- und SSC-Daten erhoben. Dabei liegen Abfluss- und Trübungsdaten in Vent in einer 15-minütigen zeitlichen Auflösung vor und wurden vom HD bereitgestellt, wobei die Trübungsdaten jeweils nur von Mai bis Oktober gemessen wurden. Temperatur- und Niederschlagsdaten in Vent haben eine zeitliche Auflösung von einer Minute und wurden vom Department of Atmospheric and Cryospheric Sciences (ACINN) der Universität Innsbruck bereitgestellt. Alle erhobenen Daten am Vernagtferner wurden von der BAfW zur Verfügung gestellt und haben eine zeitliche Auflösung von fünf Minuten. Eine Übersicht über die verwendeten Sensoren ist in Tabelle 11 in Anhang 1 zu finden.

## 2.3 Messung der SSC

Zur Bestimmung der SSC existieren indirekte Varianten, welche mit Laser, Röntgenstrahlen oder akustischen Signalen arbeiten. Diese Verfahren sind jedoch mit großem administrativem, finanziellem und logistischem Aufwand verbunden (Francke et al., 2008), weshalb die direkte Messung der SSC bei dieser Untersuchung angewendet wurde. Von September 2018 bis Oktober 2020 wurde die SSC mithilfe eines „ISCO 6712“ bestimmt. Es handelt sich dabei um ein automatisches Probenahmegerät. Am Boden des ISCO befindet sich ein Ring, in dem 24 Flaschen á 0,5 l angeordnet sind (siehe Abbildung 10, Anhang 1). Darüber befindet sich eine Pumpe und ein daran angeschlossener Verteilerarm. Die Pumpe befördert Wasser aus dem Vorfluter zum Verteilerarm, welcher sich über den Flaschen befindet. Das angesaugte Wasser wird durch den Verteilerarm in eine Flasche gefüllt. Danach bewegt sich der Arm zur nächsten Flasche und befüllt diese. Sind alle 24 Flaschen befüllt, müssen diese durch leere Flaschen ersetzt werden. Da die untersuchten Flüsse stark turbulent sind, ist eine homogene Verteilung der SSC im Fließquerschnitt anzunehmen. Aufgrund dieser Annahme, welche auch von Francke (2008) bei pyrenäischen Gebirgsflüssen getätigt wurde, entspricht die SSC an der Entnahmestelle der SSC aller anderen Punkte im Flussquerschnitt. 2018 wurden täglich Proben um 16:30 Uhr genommen, um so das Abflussmaximum beproben zu können. Für 2019 und 2020 wurden drei verschiedene auslösende Mechanismen bestimmt (siehe Tabelle 1). Werden bestimmte Kriterien erreicht, wird ein Impuls an die Pumpe gesendet, welche dadurch aktiviert wird. Für das Range-Kriterium wurden mehrere Klassen festgelegt, sodass der gesamte bisherige Messbereich, vom Minimum bis Maximum, abgedeckt ist. Dadurch werden alle Wertebereiche gleichermaßen beprobt. Jede Klasse wird von einem Minimal- und Maximalwert begrenzt. Jede Klasse darf dabei nur **n**-mal beprobt werden. Wird **n** erreicht, wird keine Probe mehr in der jeweiligen Klasse genommen. Eine jeweilige Klasse wird nur beprobt, wenn ausreichend Zeit zwischen einzelnen Probennahmen vergangen ist, ein kritischer Wasserstand überschritten wird und der Grenzwert **n** es zulässt. Für das Event-Kriterium wurde der Gradient **grad\_trueb** festgelegt, welcher sich aus der Differenz der aktuellen gemittelten Trübung und der gemittelten Trübung zwei Zeitschritte vorher (30 Minuten für Vent, 10 Minuten für den VF) ergibt. Außerdem wurde der gleitende Mittelwert der Trübung **MATrueb** der letzten zehn Tage kontinuierlich bestimmt. Die auslösenden Kriterien wurden wie folgt festgelegt:

Tabelle 1: Charakteristik der auslösenden Kriterien für die automatische Probenahme

Auslösendes Kriterium	Eigenschaften
crit_range1	Überschreitung des höchsten jemals gemessenen Wertes
crit_range2	Nicht genügend Proben pro Klasse
crit_event	<b>grad_trueb</b> überschreitet Schwellenwert und <b>grad_trueb</b> ist größer als <b>MATrueb</b>

## 2.4 Wasserprobenanalyse im Labor

Um das Gewicht des Sediments bestimmen zu können, muss der gesamte Flascheninhalt gefiltert werden. Zuerst wurde der Filter  $m_{\text{Filter}}$  (Porengröße = 0,45  $\mu\text{m}$ ) mit der dazugehörigen Petrischale zwei Stunden lang bei 60 °C getrocknet und anschließend gewogen (Mettler Toledo Typ „New Classic ML54“; Ablesbarkeit = 0,1 mg). Danach wurde das Gewicht der Probenflasche samt Probe  $m_{\text{Flasche+Probe}}$  gemessen. Die Wasserprobe läuft anschließend durch einen mit einer Handpumpe erzeugten Unterdruck (0,5 – 0,7 bar) durch die Filtrieranlage. Sobald die gesamte Probe durchgelaufen ist, wird der Filter mit dem darauf befindlichen Sediment  $m_{\text{Filter+Sediment}}$  aus der Anlage herausgenommen, in der dazugehörigen Petrischale über Nacht bei 60 °C im Trockenschrank entfeuchtet und anschließend gewogen, um später die Masse des Sediments  $m_{\text{sed}}$  ermitteln zu können. Das Gewicht der leeren Probenflasche  $m_{\text{Flasche leer}}$  wird ebenfalls bestimmt. Um das Volumen der Probe  $V_{\text{Probe}}$  bestimmen zu können, wurde für die Dichte des Wassers  $\rho_{\text{Wasser}}$  ein konstanter Wert von 998,2 g l<sup>-1</sup> angenommen.

$$m_{\text{sed}} = m_{\text{Filter+Sediment}} - m_{\text{Filter}} \quad (\text{I})$$

$$V_{\text{Probe}} = \frac{m_{\text{Flasche+Probe}} - m_{\text{Flasche leer}} - m_{\text{sed}}}{\rho_{\text{Wasser}}} \quad (\text{II})$$

$$\text{SSC} = \frac{m_{\text{sed}}}{V_{\text{Probe}}} \quad (\text{III})$$

## 2.5 Datenaufbereitung

Um alle Daten von der Pegelstation Vent in eine 15-minütige Auflösung zu transformieren, wurden die Daten zusammengefasst. Dabei wurde für die Temperaturdaten über 15 Minuten der arithmetische Mittelwert und für den Niederschlag die Summe gebildet. Für Vent wurden Daten von September 2015 bis November 2020 verwendet. An der Pegelstation VF wurden nur Daten in den Sommermonaten erhoben und reichen vom Mai 2019 bis Oktober 2020.

Um fehlerhafte Werte aus den Datensätzen zu entfernen, wurden nachfolgende Kriterien festgelegt. Messfehler in der Niederschlagsmessung führten zu negativen Werten und wurden deshalb aus den Niederschlagsdatensätzen entfernt. Das plötzliche Auftreten von Niederschlagsmaxima im Oktober 2017 in Vent von bis zu  $10 \text{ mm min}^{-1}$ , wobei umliegende Datenpunkte teilweise keinen Niederschlag feststellten, führte dazu, dass der komplette Monat Oktober 2017 aus dem Datensatz entfernt wurde. Auch die Messung der SSC und der Trübung führte in beiden Untersuchungsgebieten zu Fehlerwerten. Dabei wurden Werte ausgeschlossen, bei denen von einer Versandung der Messgeräte auszugehen ist. Dies war erkennbar, wenn Trübungswerte schlagartig auf  $0 \text{ g l}^{-1}$  fallen und anschließend wieder dem ursprünglichen Trend folgen. Wenn weiterhin SSC-Messwerte den bisherigen Maximalwert deutlich übersteigen bei einem gleichzeitig sinkenden Trend der Trübung und des Abflusses, wurden diese Werte ebenfalls ausgeschlossen. Die verwendeten Funktionen zur Umrechnung der Trübungsdaten in Schwebstoffkonzentration sowie Wasserstand in Abfluss sind in Tabelle 12 in Anhang 1 zu finden.

## 2.6 Explorative Datenanalyse und Modellerstellung

Um einen Überblick über die erhobenen Daten zu erhalten, wurden diese mit der Statistiksoftware *R, Version 4.0.1* analysiert. Für alle erhobenen Daten (Abfluss, Niederschlag, Temperatur, Trübung und SSC) der beiden Untersuchungsgebiete wurde der Stichprobenumfang **n**, das Minimum **min**, das Maximum **max**, der Median, der arithmetische Mittelwert **mean**, das untere Quartil **Q<sub>0,25</sub>**, das obere Quartil **Q<sub>0,75</sub>** sowie die Standardabweichung **sd** ermittelt. Um die beiden Untersuchungsgebiete vergleichen zu können, wurden die statistischen Kennwerte nur für das Jahr 2019 und 2020 verglichen. Um die Niederschlagsdaten besser beurteilen zu können, wurden diese bei der Datenanalyse zu stündlichen Niederschlägen aufsummiert. Mithilfe von Histogrammen konnte dargestellt werden, wie oft bestimmte Wertebereiche gemessen wurden.

Für die Erstellung der Modelle wurden bereits bestehende Programmstrukturen von Till Francke verwendet und angepasst. Zusätzlich wurden folgende Erweiterungen zur Statistiksoftware

hinzugefügt: randomForest (Version 4.6-14; Liaw und Wiener, 2002) und quantregForest (Version 1.3-7; Meinhausen, 2007).

## 2.7 Erstellung zusätzlicher Prädiktoren

Zuerst wurde der Datensatz  $\mathbf{M}$  erstellt, welcher die SSC zu einem bestimmten Zeitpunkt  $\mathbf{t}_i$  sowie die dazugehörigen Werte der Prädiktoren zum Zeitpunkt  $\mathbf{t}_i$  enthält. Um den Einfluss vorrangegangener hydrometeorologischer Bedingungen bestimmen zu können, wurden zusätzliche Prädiktoren  $\mathbf{P}_n$  aus den ursprünglichen Prädiktoren  $\mathbf{P}$  (Abfluss, Niederschlag und Temperatur) abgeleitet und  $\mathbf{M}$  hinzugefügt. Dazu wurden unterschiedlich lange, sich nicht überschneidende Zeitfenster  $\mathbf{S}_n$  erstellt. Alle in diesem Zeitfenster liegenden Werte werden für jeden Zeitpunkt  $\mathbf{t}_i$  aufsummiert. Die Zeitfenster  $\mathbf{S}_n$  sind von der zeitlichen Auflösung  $\mathbf{a}_0$ , dem Wachstumsfaktor  $\mathbf{b}^i$  sowie der jeweiligen Zeitperiode  $\mathbf{n}$  abhängig und können durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$S_n = a_0 \cdot \sum_{i=0}^n b^i \quad (\text{IV})$$

Die  $\mathbf{P}_n$  werden anschließend wie folgt berechnet (Zimmermann et al., 2012):

$$P_n = \sum_{i=S_{n-1}+a_0}^{S_n} P(t+i) \quad (\text{V})$$

Mit den Parametern in Tabelle 2 wurde, unter Verwendung von Gleichung IV, eine maximale Zeitspanne von ungefähr 11 Tagen für Vent und ungefähr 12 Tagen für den VF errechnet. Da alle Faktoren ab einem bestimmten Zeitpunkt gemessen werden, fehlen bei den anfänglichen SSC-Proben die im Vorfeld liegenden Daten. Dadurch hätten die SSC-Datenpunkte, für die nicht alle Prädiktoren vorliegen, nicht in das Modell einfließen können, da jedem SSC-Wert dieselben Prädiktoren zugewiesen werden müssen. Aus diesem Grund wurden längere Zeiträume nicht erstellt, weil dies zum Ausschluss von vielen SSC-Proben geführt hätte und somit auch zu einer geringeren Aussagekraft des Modells.

Tabelle 2: Kombination der Parameter für die Erstellung zusätzlicher Prädiktoren

<b>EZG</b>	<b><math>a_0</math></b>	<b><math>b^i</math></b>	<b>n</b>
Vent	15 Minuten	3	32
VF	5 Minuten	4	15

Da die Sedimentdynamik einer starken saisonalen Abhängigkeit unterliegt, wurde zusätzlich jedem Messwert der dazugehörige Jahrestag zugewiesen und als Prädiktor in  $\mathbf{M}$  integriert, um den Einfluss der Jahreszeit bestimmen zu können (Francke et al., 2008). Des Weiteren wurde die Änderung des Abflusses als Prädiktor in  $\mathbf{M}$  hinzugefügt um intra-event Dynamiken mit zu berücksichtigen (Zimmermann et al., 2012).

## 2.8 Das Quantile-Regression-Forest-Modell

Um aus der diskontinuierlich gemessenen SSC-Datenreihe auf die kontinuierliche Datenreihe schließen zu können, wurde der Quantile Regression Forests Algorithmus (Meinshausen, 2006) gewählt. Dieser Algorithmus ist eine baumbasierte, nichtparametrische und multivariate Methode, um die Beziehung zwischen der Responsevariablen (SSC) und den Prädiktoren zu ermitteln.

Bei dem QRF-Algorithmus handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Random Forests Algorithmus, welchen Leo Breimann im Jahre 2001 entwickelte. Baumbasierte Verfahren, wie in diesem Fall der QRF Algorithmus, bestehen aus vielen einzelnen Entscheidungsbäumen (Classification and Regression Trees (CARTs)). CARTs werden durch das binäre rekursive Aufteilen von Teilmengen aus dem gesamten Datensatz  $\mathbf{M}$  gebildet. An den Aufteilungspunkten (Split) werden die Daten auf zwei Äste aufgeteilt, sodass die Varianz der separierten Datensätze in beiden entstandenen Äste minimal wird. Je mehr die Varianz an einem Split verringert wird, desto besser (Berk, 2020, S.170). Diese Vorgehensweise wird danach wieder auf jeden entstandenen Ast angewendet, bis eine vorher festgelegte Anzahl an Splits im jeweiligen Baum erreicht wird. Werden jedoch schon minimal veränderte Daten vom Algorithmus verwendet, verliert das Modell an Stabilität (Francke et al., 2008), weshalb eine alleinige Verwendung von CARTs nicht genügt. Um die Instabilität des Modells zu verringern, wird bei der Bildung eines Baumes sowie an jedem Aufteilungspunkt nicht der gesamte Datensatz  $\mathbf{M}$ , sondern nur eine Teilmenge  $\mathbf{M}'$  verwendet.  $\mathbf{M}'$  wird dabei zufällig, mit Zurücklegen, aus  $\mathbf{M}$  ausgewählt (Breimann, 2001). Des Weiteren wird nur eine bestimmte Anzahl an Prädiktoren  $m_{\text{try}}$  in  $\mathbf{M}'$  übernommen und auch nur eine festgelegte Anzahl an Entscheidungsbäumen  $n_{\text{tree}}$  erstellt. Die nicht in  $\mathbf{M}'$  übernommenen Daten werden als "out of bag"-Daten (OOB) bezeichnet. Es werden ungefähr 66 % aus  $\mathbf{M}$  zur Konstruktion der Bäume verwendet. Der andere Teil aus  $\mathbf{M}$  sind OOB-Daten. Diese Vorgehensweise wird als

bagging (bootstrap aggregating) bezeichnet und wurde ebenfalls von Leo Breimann entwickelt. Das Modell wird durch diese Methode robuster und die Korrelation zwischen den Bäumen wird verringert (Zimmermann et al., 2012). Durch diese Vorgehensweise unterscheidet sich jeder dieser Bäume in seiner Struktur und erzeugt eine eigene Vorhersage. Das QRF-Modell benutzt dabei die Verteilung der Einzelvorhersagen in jedem Baum wodurch sich die Vorhersageunsicherheit bestimmen lässt. Des Weiteren lässt sich bestimmen, wie groß der Einfluss eines Prädiktors auf die Responsevariable ist, indem ein Prädiktor nicht in das Modell implementiert und anschließend der Vorhersagefehler berechnet wird. Je größer der Anstieg des mittleren Quadratfehlers **IncMSE** dabei ist, desto größer ist der Einfluss des Prädiktors auf die Responsevariable.

## 2.9 Vorhersage des Sedigraphen und Berechnung der Sedimentfracht

Basierend auf dem QRF-Modell können nun über den kompletten Beobachtungszeitraum die SSC-Werte für jeden einzelnen Zeitschritt berechnet werden, wenn die nötigen Prädiktoren zum jeweiligen Zeitschritt vorhanden sind. Dazu wird mithilfe eines Monte Carlo Ansatzes zufällig ein SSC-Wert, gemäß seiner Wahrscheinlichkeit, aus dem 95%igen Konfidenzintervall gezogen. Da nun kontinuierliche SSC-Werte vorliegen, kann zusätzlich die Sedimentfracht berechnet werden, indem jeder geschätzte SSC-Wert mit dem jeweiligen Abfluss multipliziert wird (Francke et al., 2008).

## 2.10 Modellvalidierung

Zur Bestimmung der Modellgüte und zur Validierung des Modells können die OOB-Daten verwendet werden, indem die Wurzel der mittleren Quadratfehler **RMSE** zwischen der modellierten Datenreihe **SSC<sub>m</sub>** und der gemessenen Datenreihe **SSC<sub>g</sub>** aus den OOB-Daten berechnet wird. Dabei ist **n** der Stichprobenumfang und **i** der jeweilige Zeitpunkt. Je kleiner der **RMSE** ist, desto höher ist die Modellgüte.

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{SSC}_g(i) - \mathbf{SSC}_m(i))^2}{\mathbf{n}}} \quad (\text{VI})$$

Um eine weitere Beurteilung des Modells vorzunehmen, wurde der Nash-Sutcliffe-Koeffizient **NSE** verwendet, bei welchem ebenfalls die gemessenen Werte **SSC<sub>g</sub>** und die modellierten Werte

$\mathbf{SSC}_m$  verglichen werden. Dabei liegt der Wertebereich zwischen  $-\infty$  und 1 (perfekte Simulation). Ein negativer Wert sagt aus, dass der Mittelwert  $\overline{\mathbf{SSC}}_g$  eine bessere Vorhersagekraft als die modellierten Daten hat.

$$\mathbf{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{SSC}_g(i) - \mathbf{SSC}_m(i))^2}{\sum_{i=1}^n (\mathbf{SSC}_g(i) - \overline{\mathbf{SSC}}_g)^2} \quad (\text{VII})$$

Eine weitere Validierung wurde vorgenommen, indem die  $\mathbf{SSC}_m$  Daten mit den gemessenen Trübungsdaten verglichen wurden. Da die Trübungsdaten ein indirekter Indikator für die SSC sind, kann folgend abgeschätzt werden, wie gut das Modell die Sedimentdynamik modelliert, indem die Korrelation beider Datenreihen bestimmt wird. Das wird mithilfe des Spearman-Koeffizienten  $r_{sp}$  aufgezeigt, wobei  $d_i$  die Rangdifferenz ist. Dabei nimmt  $r_{sp}$  Werte von -1 (perfekte negative Korrelation), 0 (keine Korrelation) und 1 (perfekte positive Korrelation) an.

$$r_{sp} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (\text{VIII})$$

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Ergebnisse der explorativen Datenanalyse

#### 3.1.1 Sedimentkonzentration und Trübung

Beide Einzugsgebiete zeigen, dass geringe Sedimentkonzentrationen häufiger vorkommen als hohe Sedimentkonzentrationen (Abbildung 2). Des Weiteren ist erkennbar, dass in Vent der maximale Wert fast zehnmal größer ist als am VF und dass der Median in Vent ungefähr achtmal größer ist als am VF (Tabelle 3). Die Standardabweichung in Vent ist rund siebenmal größer als am VF, wobei 75 % der erhobenen Daten in Vent zwischen 0,083 und 11,588 g l<sup>-1</sup> befinden. Am VF liegen 75 % der gemessenen Daten zwischen 0,22 und 1,694 g l<sup>-1</sup>.

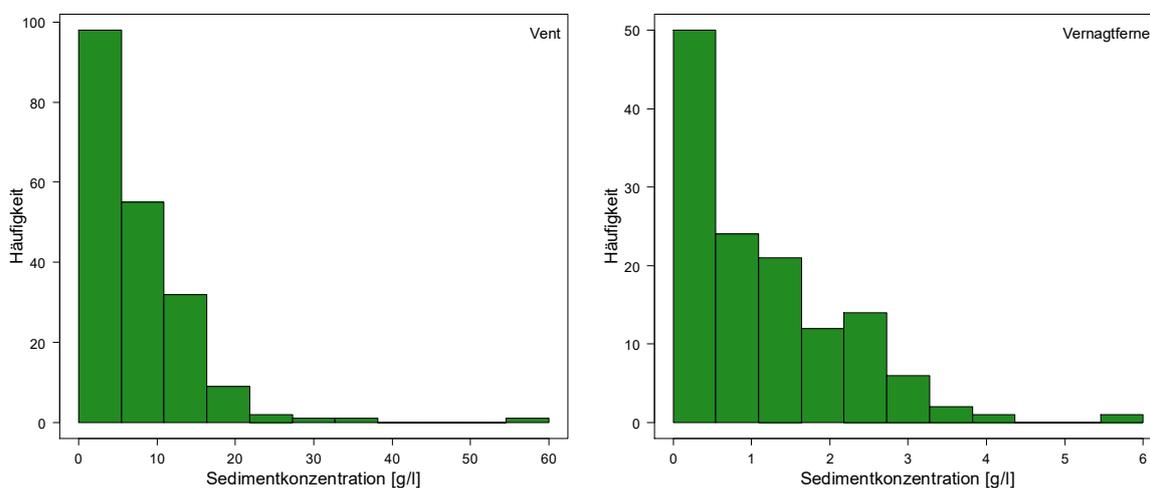


Abbildung 2: Histogramm für die im Modell verwendeten Messwerte der Sedimentkonzentration.

Tabelle 3: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen SSC-Daten für beide Untersuchungsgebiete im Sommer

EZG	n	min [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,25</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	Median [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,75</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	max [g l <sup>-1</sup> ]	mean [g l <sup>-1</sup> ]	sd [g l <sup>-1</sup> ]
Vent	153	0,083	4,04	7,248	11,588	57,268	8,655	7,201
VF	131	0,22	0,318	0,893	1,694	5,934	1,166	1,019

In Tabelle 4 ist zu erkennen, dass der Median der Trübung in Vent ebenfalls höher ist als am VF. Weiterhin sind der Mittelwert und das obere Quartil am VF mehr als doppelt so klein wie in Vent. Das Maximum in Vent ist analog zur SSC deutlich größer als am VF.

Tabelle 4: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen Trübungsdaten für beide Untersuchungsgebiete im Sommer

EZG	n	min [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,25</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	Median [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,75</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	max [g l <sup>-1</sup> ]	mean [g l <sup>-1</sup> ]	sd [g l <sup>-1</sup> ]
Vent	14664	0,2	0,383	0,808	1,585	18,994	1,179	1,18
VF	54198	0	0,087	0,329	0,644	4,564	0,467	0,507

### 3.1.2 Abfluss

In Abbildung 3 ist zu sehen, dass der Abfluss in beiden Gebieten im Laufe des Jahres ansteigt, im August sein Maximum erreicht und danach wieder stark abfällt. Dabei ist der mittlere Abfluss im August in Vent fast viermal höher als am VF. In Tabelle 5 ist dargestellt, dass der Median in Vent ungefähr viermal höher als am VF ist. Der maximale Abfluss in Vent ist fast dreimal höher als am VF. In Vent liegen 75 % der Werte zwischen 1,91 und 16,25 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> und am VF zwischen 0,32 und 3,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

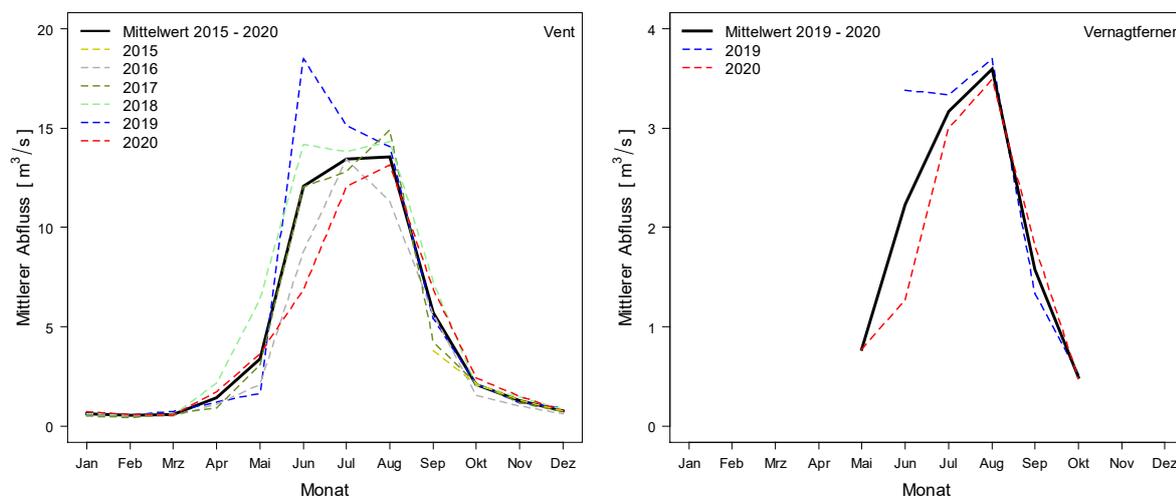


Abbildung 3: Übersicht über den monatlichen Verlauf für die im Modell verwendeten Messwerte des Abflusses.

Tabelle 5: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen Abflussdaten für beide Untersuchungsgebiete im Sommer

EZG	n	min [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,25</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Median [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,75</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	max [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	mean [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	sd [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Vent	23426	1,91	5,73	9,05	16,25	51,48	11,21	7,51
VF	70102	0,32	1,01	1,95	3,8	17,78	2,61	2,01

### 3.1.3 Temperatur

Die durchschnittliche Temperatur in Abbildung 4 zeigt geringe Schwankungen über das Jahr in beiden Gebieten. Dabei steigt die Temperatur, analog zum Abfluss, im Laufe des Jahres, erreicht im August das Maximum und fällt danach wieder ab. Durchschnittlich ist es in Vent im August 3°C wärmer als am VF. In Vent liegen 75 % der gemessenen Werte zwischen -9,52 und 12,05 °C und am VF zwischen -15,68 und 8,63 °C (Tabelle 6). Der höchste gemessene Wert ist in Vent rund 8 °C höher als am VF.

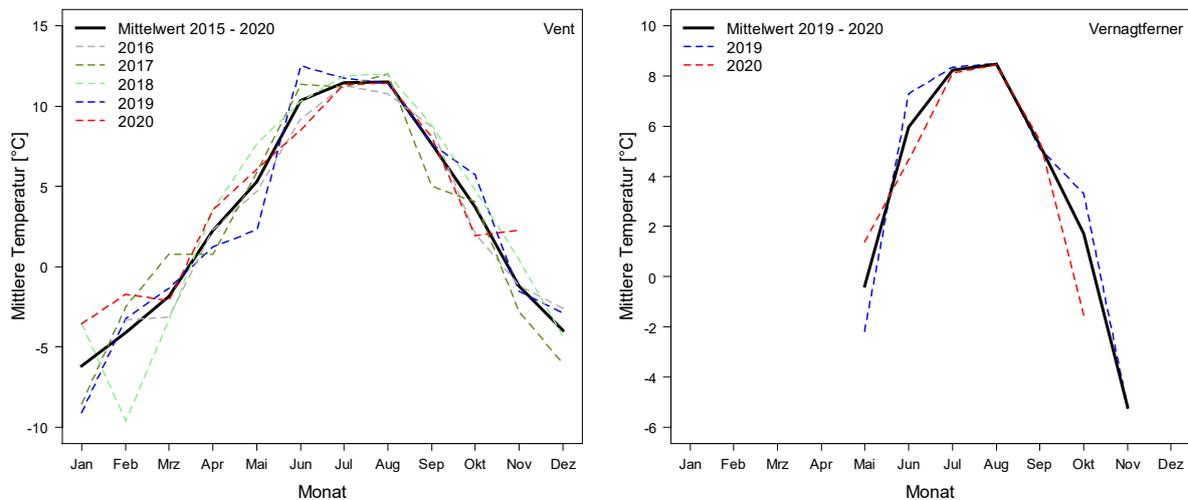


Abbildung 4: Übersicht über den monatlichen Verlauf für die im Modell verwendeten Messwerte der Temperatur.

Tabelle 6: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen Temperaturdaten für beide Untersuchungsgebiete im Sommer

<b>EZG</b>	<b>n</b>	<b>min</b>	<b>Q<sub>0,25</sub></b>	<b>Median</b>	<b>Q<sub>0,75</sub></b>	<b>max</b>	<b>mean</b>	<b>sd</b>
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Vent	480626	-9,52	5,04	8,30	12,05	27,2	8,59	5,76
VF	96744	-15,68	1,64	5,53	8,63	19,24	5,08	5,29

### 3.1.4 Niederschlag

Die Analyse der Niederschlagsdaten in Abbildung 5 zeigt, dass die mittleren monatlichen Niederschläge über das gesamte Jahr sehr variabel sind. Es ist weiterhin erkennbar, dass die mittleren monatlichen Niederschläge im August ihr Maximum erreichen, wobei am VF im Durchschnitt mehr Niederschlag als in Vent fällt. Außerdem nimmt der Niederschlag in Vent vom Frühjahr zum Sommer im Mittel zu. Tabelle 7 zeigt, dass der maximale Niederschlag am VF dreimal höher als in Vent ist. Des Weiteren ist bei 75 % aller Messungen in beiden Gebieten kein feststellbarer Niederschlag gefallen.

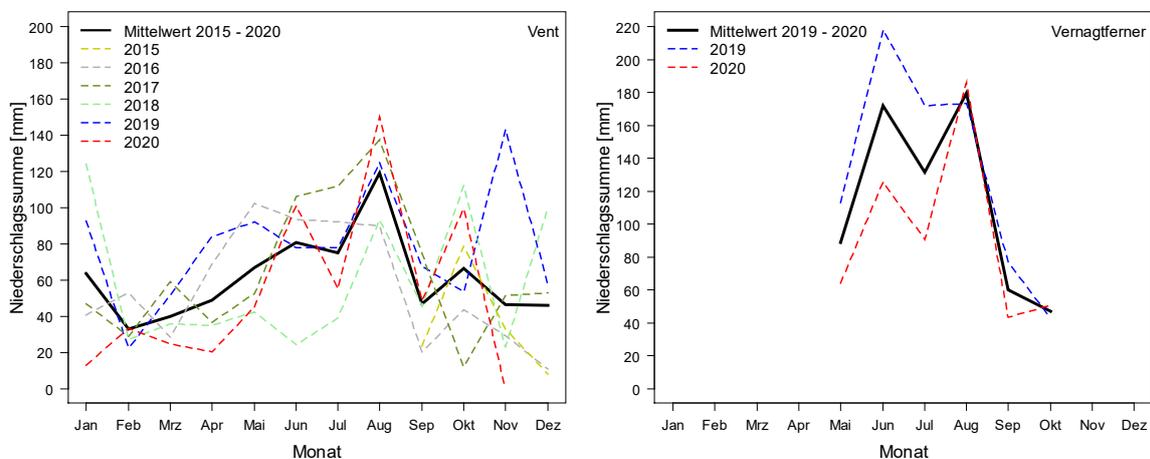


Abbildung 5: Übersicht über den monatlichen Verlauf für die Im Modell verwendeten Messwerte des Niederschlags.

Tabelle 7: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen Niederschlagsdaten für beide Untersuchungsgebiete

EZG	n	min	Q <sub>0,25</sub>	Median	Q <sub>0,75</sub>	max	mean	sd
		[mm h <sup>-1</sup> ]						
Vent	8043	0	0	0	0	8,61	0,12	0,51
VF	8062	0	0	0	0	25,9	0,17	0,81

### 3.2 Ergebnisse des QRF-Modells

Das QRF-Modell wurde für beide Untersuchungsgebiete mit  $n_{tree} = 1000$  Bäumen und mit  $m_{try} = 3$  verbleibenden Prädiktoren an jedem Knotenpunkt erstellt. In Abbildung 6 ist die Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten SSC-Daten dargestellt. Die jeweilige Modellgüte ist in Tabelle 8 zu sehen und zeigt, dass das Modell für den VF einen höheren NSE aufweist als für Vent. Bezüglich des RMSE sind jedoch beide Modelle ähnlich, da die Fehlerwerte ungefähr 1,5-mal kleiner sind als die jeweilige Standardabweichung der SSC.

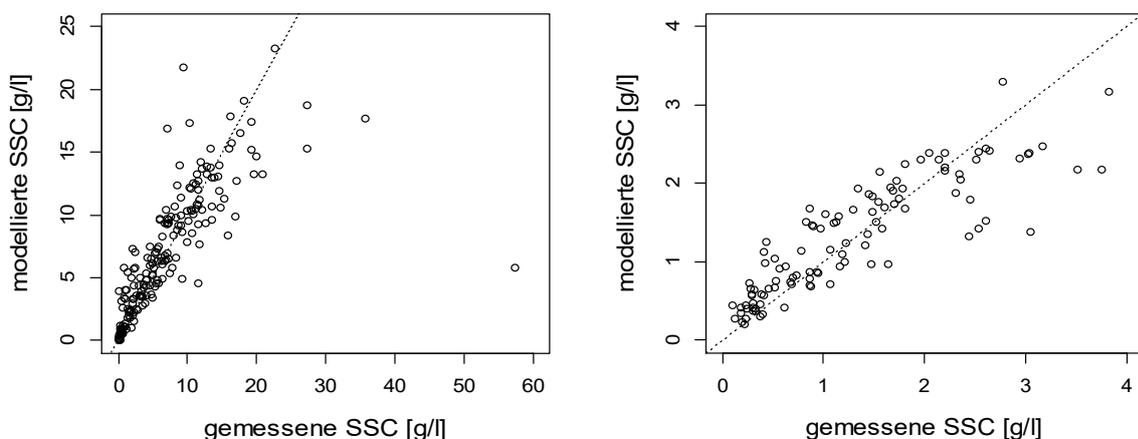


Abbildung 6: Zusammenhang der modellierten und gemessenen SSC-Daten für Vent (links) und für den Vernagtferner (rechts). Die gestrichelte Linie stellt das 1:1 Verhältnis der beiden abgebildeten Größen dar.

Tabelle 8: Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und die Wurzel aus dem mittleren Quadratfehler (RMSE) für die QRF-Modelle für Vent (links) und für den Vernagtferner (rechts)

EZG	NSE	RMSE [ $g\ l^{-1}$ ]
Vent	0,557	4,69
VF	0,702	0,556

Die Relevanz der verwendeten Prädiktoren ist in der Abbildung 7 zu sehen und zeigt welche zusätzlichen Prädiktoren zur besten Modellgüte führten. Der Abfluss *discharge* spielt in beiden Untersuchungsgebieten eine große Rolle. Dabei ist jedoch auch der mittelfristige Niederschlag *precip* für die Modellvorhersagen für Vent von übergeordneter Bedeutung. Die Temperatur *temp* hat im Vergleich zum Abfluss in beiden Gebieten eine geringere Relevanz. In Tabelle 9 ist die jeweilige Bedeutung der Abkürzung der Prädiktoren dargestellt.

Tabelle 9: Zusätzlich erstellte Prädiktoren und ihre Bedeutung

Abkürzung	Bedeutung
discharge_15	Akkumulierter Abfluss der letzten 15 Minuten
precip_480	Akkumulierter Niederschlag von 15 Minuten bis 8 h vor dem Ereignis
discharge_15360	Akkumulierter Abfluss von 8 h bis 11 Tage vor dem Ereignis
discharge_75	Akkumulierter Abfluss von 5 Minuten bis 80 Minuten vor dem Ereignis
temp_1125	Akkumulierte Temperatur von 80 Minuten bis 20 h vor dem Ereignis
temp_16875	Akkumulierte Temperatur von 20 h bis 12 Tagen vor dem Ereignis
julian_day	Jahrestag
limb_dec	Änderung des Abflusses

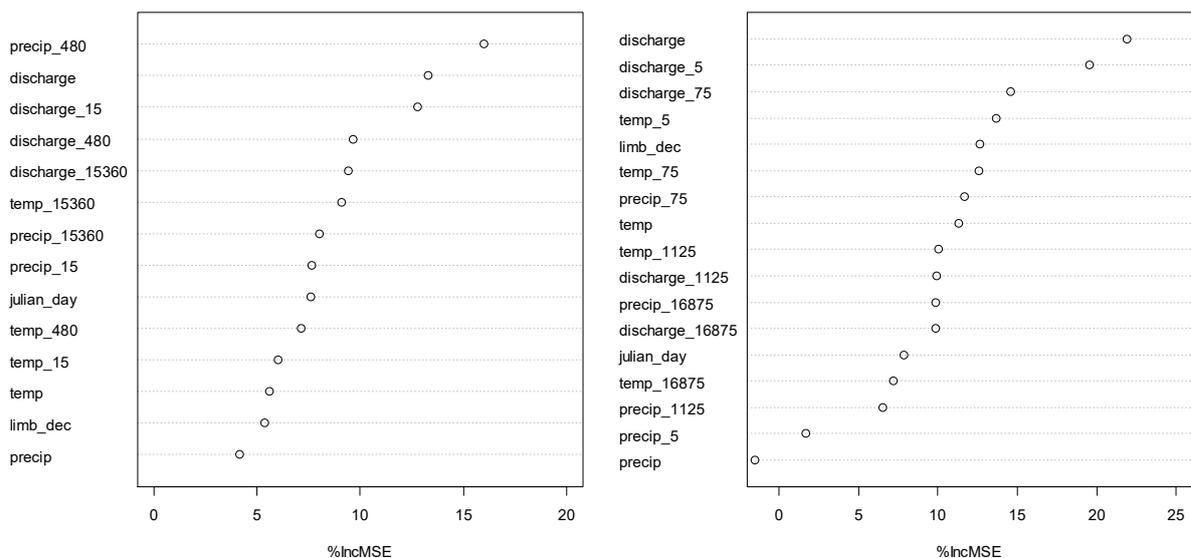


Abbildung 7: Relevanz der verwendeten Prädiktoren für Vent (links) und für den VF (rechts).

### 3.3 Modellierung des Sedigraphen

Die Ergebnisse der Sedigraphen für ausgewählte Zeiträume sind in Abbildung 8 und 9 sowie in Abbildung 15, 16, 17, 18 in Anhang 1 zu sehen. Trotz der Differenzen zwischen den gemessenen Trübungsdaten, modellierten Daten und gemessenen SSC-Proben, ist erkennbar, dass diese analog mit dem Abfluss ansteigen und abfallen. In Abbildung 9 ist weiterhin der Zusammenhang zwischen Temperatur, Abfluss und der Erhöhung der SSC gut erkennbar, da diese demselben Trend

folgen. Die jeweilige Validierung der SSC-Vorhersage mit den gemessenen Trübungsdaten wird in Tabelle 10 aufgezeigt. Dabei ist die Korrelation zwischen gemessenen und modellierten Daten in Vent höher als am VF. Weiterhin ist die Korrelation zwischen Trübung und dem unteren Quartilsabstand in beiden Gebieten am höchsten. Die Berechnung des Sedimentaustrags für alle Zeiträume ist der Tabelle 13 im Anhang 1 zu entnehmen. Dabei ist der Sedimentaustrag für Vent über das ganze Jahr berechnet worden. Am VF konnte dieser, aufgrund der fehlenden Messdaten, nur von Mitte Juni bis Anfang Oktober berechnet werden.

*Tabelle 10: Spearman Koeffizient aus den gemessenen Trübungsdaten und des durch die Monte-Carlo-Simulation modellierten unteren Quartilsabstands (links), des Medians (Mitte) und des oberen Quartilsabstands (rechts) der Sedimentkonzentrationen. Der p-Wert stehen in Klammern dahinter.*

<b>EZG</b>	<b>r<sub>Sp</sub></b>		
	<b>Trübung ~ Q<sub>0.25</sub></b>	<b>Trübung ~ Median</b>	<b>Trübung ~ Q<sub>0.75</sub></b>
Vent	0,865 (2,2 · 10 <sup>-16</sup> )	0,82 (2,2 · 10 <sup>-16</sup> )	0,71 (2,2 · 10 <sup>-16</sup> )
VF	0,732 (2,2 · 10 <sup>-16</sup> )	0,719 (2,2 · 10 <sup>-16</sup> )	0,704 (2,2 · 10 <sup>-16</sup> )

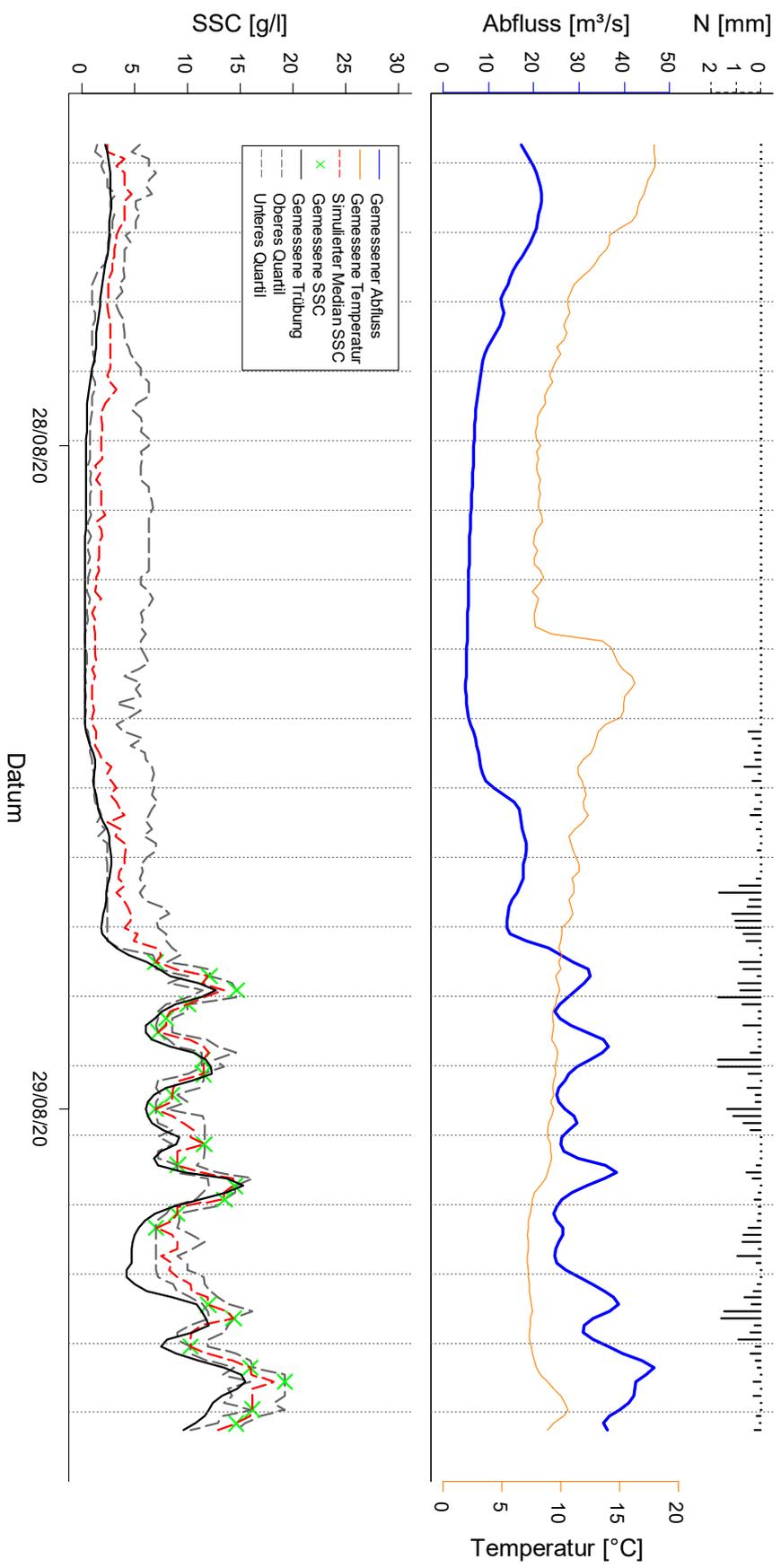


Abbildung 8: Modellierter Sedigraph für Vent vom 28.08.2020 bis 29.08.2020 mit den gemessenen Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten (oben) und den simulierten SSC-Daten, die aus der gemessenen Trübung berechnete SSC und direkt gemessene SSC-Daten (unten).

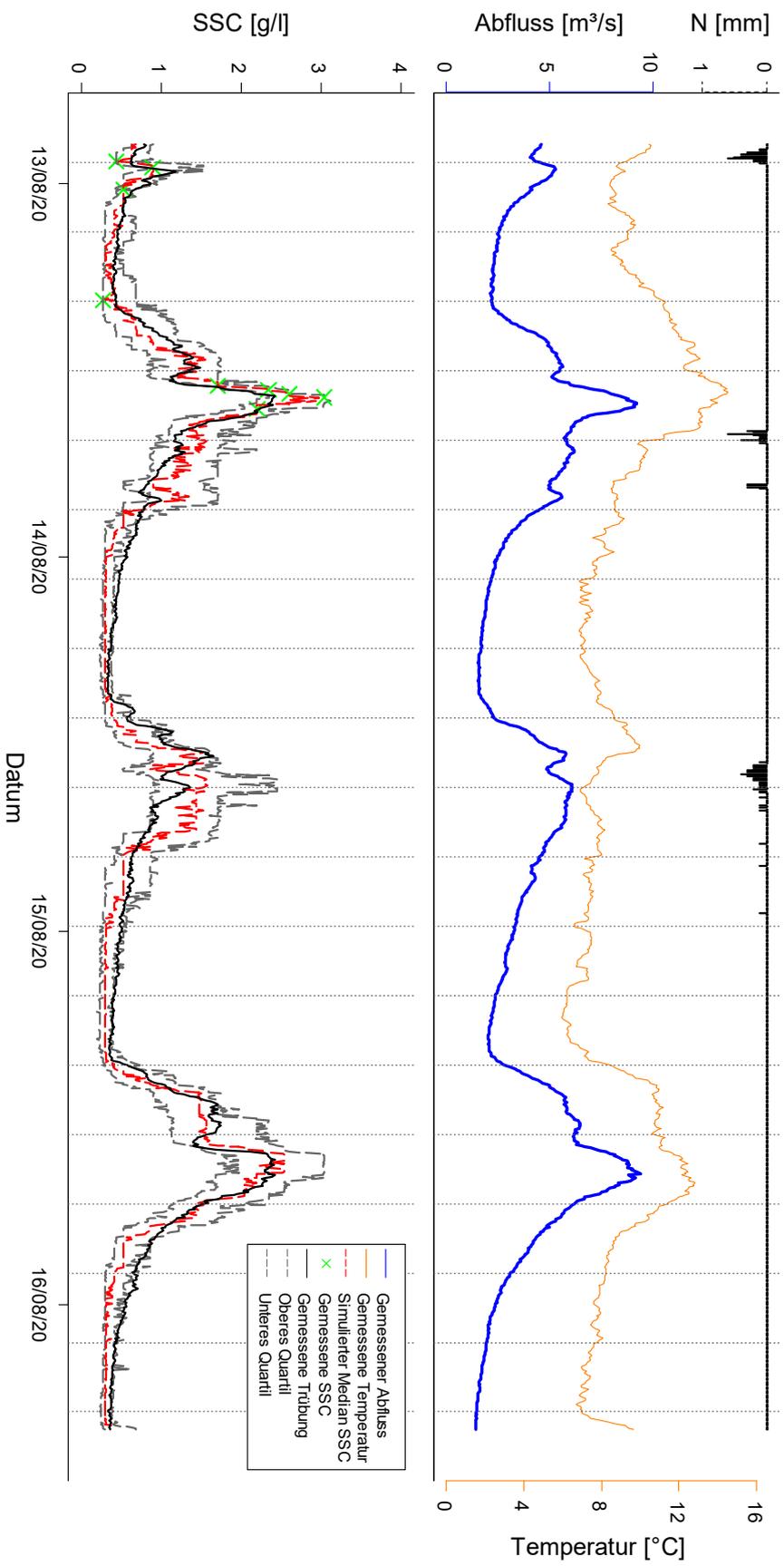


Abbildung 9: Modellierter Sedigraph für den Vernagffener vom 13.08.2020 bis 16.08.2020 mit den gemessenen Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten (oben) und den simulierten SSC-Daten, die aus der gemessenen Trübung berechnete SSC und direkt gemessene SSC-Daten (unten).

## 4. Diskussion

### 4.1 Auffälligkeiten bei der explorativen Datenanalyse

Bei der explorativen Datenanalyse der SSC fällt auf, dass diese im Durchschnitt in Vent höhere Werte annehmen als am VF. Die Ursache dafür ist vermutlich primär die Größe des Einzugsgebietes (Vent = 98,1 km<sup>2</sup>; VF= 11,44 km<sup>2</sup>) sowie die vergletscherte Fläche (Vent = 32,3 km<sup>2</sup>; VF = 7,2 km<sup>2</sup>). Je mehr Fläche vergletschert ist, desto mehr Eis taut in der Schmelzsaison ab, wodurch wiederum auch der Abfluss größer ist und mehr Sediment ausgetragen werden kann. Des Weiteren sammeln sich in größeren Einzugsgebieten größere Niederschlagsmengen an, welche den Oberflächenabfluss erhöhen, wodurch mehr Feststoffe in den Vorfluter transportiert werden können.

Wie in Tabelle 3 erkennbar, fällt das Maximum der SSC mit 57,26 g l<sup>-1</sup> in Vent deutlich aus dem Wertebereich der anderen Proben. Dieser hohe Wert ist durch einen Murgang am Platteibach am 12.07.2019 zu erklären. Dieses Ereignis führte analog auch zum Maximum der Trübungsdaten (siehe Tabelle 4) mit einem Wert von 40,72 g l<sup>-1</sup>. Die Differenz der beiden Werte lässt sich durch die Messunsicherheiten beider Methoden erklären. Auf die Fehleranfälligkeit und Verlässlichkeit der Trübungsmessung wird in Kapitel 4.3 genauer eingegangen. Ein weiterer nachgewiesener Murgang ereignete sich ungefähr am 28.08.2020 am Hintereisferner und führte ebenfalls zu hohen Sedimentkonzentrationen in der Rofenache (siehe Abbildung 22 in Anhang 2).

Bei der Betrachtung der Niederschlagsanalyse fällt auf, dass es am VF durchschnittlich mehr Niederschlag als in Vent gibt. Das ist durch die Exposition und Höhe des Einzugsgebiets des VF zu erklären, da Niederschlag vermehrt an der Luvseite von Barrieren abregnet (Steigungsregen) (Bahlburg et. al, 2017, S.267).

### 4.2 Modellierung der Sedimentkonzentration durch das QRF-Modell

Anhand der NSE-Werte in Tabelle 8 ist zu sehen, dass der QRF-Algorithmus die SSC für den VF besser vorhersagen kann als für Vent. Die schlechtere Modellgüte für Vent kann durch das Auftreten von Murgängen im Venter Einzugsgebiet erklärt werden, da sich Murgänge generell nur schwer vorhersagen lassen (Rickenmann, 1996, S.15). Dadurch wirkt sich die Vorhersageunsicherheit von Murgängen auch auf die Qualität der Vorhersage des Modells aus.

Für eine eventuelle Verbesserung der Modellgüte wurde ein weiteres Modell für Vent erstellt. Dafür wurden alle SSC- und Trübungsdaten, welche innerhalb der folgenden 30 Tage nach dem jeweiligen Ereignis erhoben wurden, entfernt. Die Ergebnisse und Abbildungen des veränderten

Modells, inklusive der Übersicht aller verwendeten Datensätze, sind im Anhang 2 zu finden. Die Modellgüte des veränderten Modells (Tabelle 17 in Anhang 2) ist durch das Entfernen der Datenpunkte mit einem NSE-Wert von 0,82 besser als das ursprüngliche Modell (NSE = 0,557). Ein weiterer Grund für die Unsicherheit in beiden Modellen könnte auch das Ausspülen/Anzapfen von neuen Sedimentdepots sein. Verlegt sich das Gerinne infolge eines Extremevents lateral, können neue Sedimentspeicher, welche ein hohes Erosionspotential besitzen, angezapft werden. Des Weiteren können auch subglaziale Sedimentspeicher durch den über das Jahr variierenden Abfluss ausgespült werden (Naeser, 2002). Da eine Anzapfung zu überproportional hohen SSC führen kann und nur schwer vorhersagbar ist, beeinträchtigen beide Aspekte die Modellgüte negativ.

Die Relevanz der verwendeten Prädiktoren zeigt, dass der kurzfristige Abfluss am VF der treibende Faktor für die Sedimentdynamik ist. Das locker gelagerte Sediment vor und unter Gletschern und ihren Moränen kann durch einen Anstieg des Abflusses leicht mobilisiert werden. Ist der kurzfristige Abfluss hoch, ist auch die SSC hoch, weshalb die kurzfristigen Abflusskomponenten einen so starken Erklärungsgehalt erlangen. Der Auslöser für einen erhöhten Abfluss am VF ist die Schmelzrate des Eises, wobei diese wiederum abhängig von der vorherrschenden Temperatur ist, weshalb auch die kumulierte Temperatur der letzten 80 Minuten einen großen Einfluss auf die Modellgüte hat. Außerdem spielt auch die Änderung des Abflusses eine große Rolle, da die maximale SSC auch schon vor dem Auftreten des Abflussmaximums erreicht werden kann (Hysterese). Der ansteigende Abfluss weist dabei ein höheres Energieliniengefälle auf, wodurch Sedimentdepots leichter ausgespült werden können (Bechteler, 2006, S.120). Bei abfallendem Abfluss sinkt das Potential wieder und Depots können bereits aufgezehrt sein, wodurch der Sedimentaustrag bei gleichem Abfluss geringer sein kann. Für Vent zeigt sich ein ähnliches Muster, da auch dort der Abfluss eine große Rolle spielt. Jedoch ist in Vent auch der mittelfristige Niederschlag von großer Bedeutung, weil vermutlich die limitierte Speicherkapazität des Bodens dazu führt, dass eine hohe Niederschlagsmenge über einen kürzeren Zeitraum nicht vollständig vom Boden aufgenommen werden kann (Dikau et. al, 2019, S.229). Folglich fließt der nicht infiltrierte Niederschlag oberflächlich ab und löst auf seinem Weg in den Vorfluter Bodenpartikel ab und erhöht die SSC.

Entsprechend Abbildung 11 und 12 im Anhang 1 ist davon auszugehen, dass vor allem die kurzfristigen Abfluss- und Temperaturprädiktoren, aufgrund ihrer starken Korrelation untereinander, einen weitaus größeren Einfluss auf die Sedimentdynamik beider Modelle haben als in Abbildung 7 dargestellt.

### 4.3 Modellierung des Sedigraphen/ Fehlerquelle Trübungsmessung

Tabelle 10 zeigt, dass die simulierten SSC-Werte mit den gemessenen Trübungswerten stark positiv korrelieren. Dass jedoch vor allem hohe Konzentrationen zu großen Differenzen zwischen Trübung und SSC führen, kann an folgenden Punkten liegen:

- 1) Die Korngröße, die Partikelform und die Farbe der Suspension sind zeitlich variabel und beeinflussen die Trübung (Naeser, 2002). Wenn nicht eine ständige Kalibrierung erfolgt, führt dies zu Ungenauigkeiten/Verzerrungen.
- 2) Generell gilt, dass das Messverfahren ungenauer wird, je höher die Schwebstoffkonzentration ist (Naeser, 2002).

Weiterhin ist auffällig, dass die Trübungsdaten mit den SSC-Daten für Vent stärker korrelieren als für den VF (Tabelle 10) trotz der schlechteren Güte des QRF-Modells (Tabelle 8). Vermutlich kann das auf die veränderte Messmethode am VF zurückgeführt werden, da dort die Trübung gemessen wird, indem ein Rohr das Wasser aus dem Vernagtbach in einen separaten Raum leitet, in dem dann die Messung vorgenommen wird. Ob diese Methode die tatsächliche Trübung feststellen kann, ist unsicher. Außerdem ist auffällig, dass der untere Quartilsabstand am besten mit den modellierten Daten korreliert. Vermutlich neigt das Modell eher dazu, die Konzentration geringfügig zu unterschätzen. Ein anderer Grund könnte erneut die Fehleranfälligkeit der Trübungsmessung sein.

Abbildung 13 und 14 in Anhang 1 zeigen, dass der Sedimentaustrag vor allem im Juli und August, analog zu den Abflüssen, sehr hoch ist. Ähnliche Ergebnisse erhielt auch Naeser (2002), weshalb es besonders wichtig ist in diesen Monaten eine hohe Modellgüte zu haben, um präzise Aussagen über den Sedimentaustrag tätigen zu können. Für Vent ist der  $r_{sp}$  in Abbildung 13 in Anhang 1 für Juli (0,602) und September (0,508) gering, was mit den Abgängen der erwähnten Murgänge zusammenhängen könnte. Für den VF ist der  $r_{sp}$  besonders für den Juli (0,572) und den Oktober (0,447) gering, wobei die Aussagekraft des Modells für den Oktober gering ist, da dort im gesamten Untersuchungszeitraum nur eine Sedimentprobe genommen wurde (Abbildung 14, Anhang 1). Die schlechte Modellgüte im Juli ist vermutlich einerseits mit dem Abschmelzen der Schneedecke und dem damit verbundenen verstärktem Abtrag von Partikeln zu erklären (Oberflächenabfluss). Andererseits kann auch die Gletscherdynamik eine Rolle spielen, da der vermehrte Schneefall im Winter zum Gletschervorstoß aufgrund der Massezunahme beiträgt (Hagg, 2020, S.51). Infolgedessen wird vorliegendes Moränenmaterial gestaucht sowie neues Material unter dem Eis herausgedrückt (Dikau et. al, 2019, S.301), wodurch bei Beginn der Schmelzsaison überproportional viel Sediment erodiert werden kann.

Das veränderte Modell für Vent hat zwar eine bessere Gesamtmodellgüte, schneidet aber für den August schlechter ab als das ursprüngliche Modell (Abbildung 21, Anhang 2), was durch die fehlenden Datenpunkte und der damit verbundenen fehlenden Kenntnis über den Zusammenhang von SSC und den Prädiktoren in diesem Zeitraum zu erklären ist. Es könnte sein, dass der Einfluss der Murgänge länger anhält als angenommen, weshalb die verwendete Methode weiterentwickelt oder überarbeitet werden sollte. In den restlichen Monaten korreliert die SSC-Vorhersage des veränderten Modells besser mit den gemessenen Trübungsdaten aufgrund der entfernten Datenpunkte.

Die modellierten Sedigraphen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den beobachteten SSC-Daten (Abbildung 8 und 9 sowie 15, 16, 17, 18 in Anhang 1). Die Unsicherheiten in der Trübungsmessung müssen auch bei diesen Abbildungen, aufgrund des Unterschieds zu den gemessenen Daten, erwähnt werden.

Die jährlichen Austragsraten in Tabelle 13 in Anhang 1 unterscheiden sich deutlich von den bisher berechneten jährlichen Sedimentexportraten. Dabei liegt der jährliche Austrag des suspendierten Sediments für Vent bis zu dreimal über dem berechneten Wert von Gattermayr (2013) ( $150000 - 240000 \text{ t a}^{-1}$ ). Dasselbe trifft auch für den Vernagtferner zu, wobei dort der Wert nur etwa doppelt so groß ist, als bisher berechnet ( $10691 - 17320 \text{ t a}^{-1}$ ; Naeser, 2002).

Dafür könnten einerseits methodische Fehler verantwortlich sein, weshalb weitere Untersuchungen veranlasst werden sollten. Andererseits könnte dafür auch das anhaltende Rückschmelzen der Gletscher im Rofental verantwortlich sein. Dadurch erhöht sich die Erosionsanfälligkeit von freigesetzten Sedimentdepots, nicht zuletzt auch durch das Auftauen des Permafrosts und dem damit verbundenen Stabilitätsverlust von Lockersedimenten (Kneisel et. al, 2007). Die vermehrte Freisetzung von Sedimentspeichern könnte berücksichtigt werden, wenn die räumliche Ausdehnung des jeweiligen Gletschers als Prädiktor mit in die Modellstruktur einfließt. Dadurch könnte man vor allem bei Untersuchungen über große Zeiträume den Einfluss der rückschmelzenden Gletscher berücksichtigen.

#### 4.4 Weitere Fehlerquellen

Bei Ereignissen mit hohem Abfluss wird sehr viel feinkörniges Sediment transportiert, wodurch Sensoren versanden können, was wiederum zu fehlerhaften Werten führt. Weiterhin kann der Schlauch, der das Wasser in den ISCO pumpt, verstopfen. Jedoch wurde der ISCO in regelmäßigem Abstand gewartet. Organische Partikel wurden beim Filtern im Labor aus den Proben entfernt, wobei kleinere Partikel eventuell übersehen wurden. Weiterhin kann es sein, dass

Sedimentrückstände in der Flasche verbleiben. Da außerdem die Waage empfindlich auf sich ändernde Luftfeuchtigkeit reagiert, kann dies auch zu Fehlern führen. Aufgrund der großen Sorgfalt während der Feld- und Laborarbeit sollten die aufgezählten Fehler sehr gering ausfallen. Um die beiden Untersuchungsgebiete besser miteinander vergleichen zu können, sollten dieselben Geräte und Sensoren benutzt werden. Bei zukünftigen Untersuchungen sollte die Zeitauflösung der Abfluss- und Trübungsdaten in Vent auf eine fünfminütige erhöht werden, um Ereignisse besser modellieren zu können und auch um den Einfluss der Änderung des Abflusses besser bestimmen zu können. Mehr Probenahmen sowie eine gleichmäßige und regelmäßige Kalibrierung der Sensoren würde die Qualität der Modelle verbessern und ebenfalls zu einer besseren Vergleichbarkeit der beiden Gebiete führen.

## 5. Schlussfolgerung

In dieser Bachelorarbeit wurde untersucht, ob der Quantile Regression Forest-Algorithmus die Sedimentdynamik im Rofental, Öztaler Alpen hinreichend modellieren kann. Dafür wurde die SSC, als Zielvariable, in den jeweiligen Vorflutern bestimmt. Anschließend wurde mithilfe von ausgewählten Prädiktoren und der gemessenen SSC ein Modell erstellt, welches den Einfluss der verwendeten Prädiktoren auf die Zielvariable bestimmen soll. Durch die Monte-Carlo-Simulation konnte anschließend, auf Grundlage des erstellten QRF-Modells, eine kontinuierliche Datenreihe der Sedimentkonzentration berechnet werden. Diese erstellte Datenreihe wurde nachfolgend mit den gemessenen Trübungsdaten verglichen, um die Anwendbarkeit des Modells zu überprüfen. Dabei ging hervor, dass die Modelle für beide Untersuchungsgebiete eine hohe Güte haben. Durch mehrere Murgänge und den damit verbundenen hohen Sedimentkonzentrationen, hat Vent im Vergleich zum VF eine schlechtere Modellgüte. Jedoch korreliert die SSC-Vorhersage für Vent mit der gemessenen Trübung geringfügig besser als für den VF, da die veränderte Messmethode der Trübung am VF vermutlich zu Verzerrungen führt. Das veränderte Modell für Vent erzielt eine höhere Modellgüte als das ursprüngliche, wobei die Validierung mit den gemessenen Trübungsdaten geringfügig besser ist. Es wurde deutlich, dass der Abfluss in beiden Gebieten einen sehr großen Einfluss auf die Sedimentdynamik hat. Aufgrund der Korrelation der Abflussprädiktoren untereinander dürften diese Faktoren relevanter sein als durch das Modell errechnet. Für die Modellierung der SSC ist für das Gebiet Vent weiterhin der mittelfristige Niederschlag und für den VF die kurz- und mittelfristige Temperatur von hoher Relevanz. Die erstellten Sedigraphen zeigen, dass die modellierten Datenreihen der Trübungsdynamik deutlich folgen. Die Validierung der simulierten Sedimentkonzentrationen mit den gemessenen Trübungsdaten ergab, dass beide Datenreihen in beiden Einzugsgebieten stark positiv korrelieren. Um genauere Vorhersagen tätigen zu können, sollte eine standardisierte Methode zum Umgang mit erhöhten Schwebstoffkonzentrationen aufgrund von Murgängen erarbeitet werden. Die Vorhersagesicherheit der SSC wird weiterhin durch die Ausspülung/Anzapfung von neuen Sedimentdepots beeinträchtigt, da diese zu überproportional hohen Konzentrationen führen können. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, sollte vor allem dieser Bereich genauer betrachtet werden. Des Weiteren sollten dieselben Messmethoden verwendet werden und eine regelmäßige Kalibrierung aller Sensoren vorgenommen werden, um beide Untersuchungsgebiete miteinander vergleichen zu können.

Diese Untersuchung hat gezeigt, dass die modellierten Daten mit den Trübungsdaten stark positiv korrelieren. Somit kann die Sedimentdynamik im Rofental mithilfe des Quantile-Regression-Modells modelliert werden. Das Auftreten von Murgängen, die Anzapfung neuer

Sedimentspeicher sowie die Fehleranfälligkeiten bei der Trübungsmessung beeinträchtigen die Modellgüte. Nachfolgende Untersuchungen sollten ebenfalls eine Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren berücksichtigen und gegebenenfalls den Beobachtungszeitraum begrenzen, um genauere Ergebnisse zu erhalten.

## Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. 2009. *Einführung in die Geomorphologie*. 4. Aufl. Stuttgart: UTB Verlag.
- Amelung, W., Blume, H-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B-M. 2018. „Bodenentwicklung und Bodensystematik“. In *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*, 341–468. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Asselman, N. E. M. 2000. „Fitting and Interpretation of Sediment Rating Curves“. *Journal of Hydrology* 234 (3): 228–48.
- Bahlburg, H., Breikreuz, C. 2017. *Grundlagen der Geologie*. 5. Aufl. Springer International Publishing.
- Bechteler, W. 2006. „Sustainable Sediment Management in Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects“. Universität der Bundeswehr München.
- Berk, R. A. 2020. *Statistical Learning from a Regression Perspective*. Springer Texts in Statistics. Cham: Springer International Publishing.
- Breimann, L. 2001. „Random Forests“, *Machine Learning* 45 (1), 5–32.
- Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort. 2021. Katalog Gelände Tirol (Airborne Laserscan), URL: [https://www.data.gv.at/katalog/dataset/land-tirol\\_tirolgelnde](https://www.data.gv.at/katalog/dataset/land-tirol_tirolgelnde) [letzter Zugriff 04.März.2021]
- Dikau, R., Eibisch, K., Eichel, J., Meßenzehl, K., Schlummer-Held, M. 2019. *Geomorphologie*. Springer Spektrum.
- Ellison, C. A., Savage, Brett E., Johnson G. D. „Suspended-Sediment Concentrations, Loads, Total Suspended Solids, Turbidity, and Particle-Size Fractions for Selected Rivers in Minnesota, 2007 through 2011“, 68.
- Francke, T., López-Tarazón, J.A., Schröder, B. 2008. „Estimation of Suspended Sediment Concentration and Yield Using Linear Models, Random Forests and Quantile Regression Forests“. *Hydrological Processes* 22 (25): 4892–4904.
- Gattermayr, W. 2013. „Das hydrographische Regime der Öztaler Ache“, 35.
- Hadley, RF., Walling, DE. 1984. „EROSION AND SEDIMENT YIELD: SOME METHODS OF MEASUREMENT AND MODELLING“. University Press, Cambridge.
- Hagg, W. 2020a. „Einleitung und Forschungsgeschichte“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 1–13. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020b. „Eisbewegung“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 29–47. Berlin, Heidelberg: Springer.

- . 2020c. „Entstehung von Gletschern“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 15–27. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020d. „Glaziale Akkumulation“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 165–82. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020e. „Glaziale Gefahren“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 131–45. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020f. „Glazialerosion“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 147–64. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020g. „Gletscher und Klima“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 81–90. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020h. „Gletscher und Wasser“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 91–104. Berlin, Heidelberg: Springer.
- . 2020i. „Massen- und Energiebilanz von Gletschern“. In *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*, herausgegeben von Wilfried Hagg, 49–67. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hipp, T., Reich, S., Ruckriegel, J., Wankler, X. 2015. „Wasserspeicher im Wandel“ DAV Panorama (4): 1–2.
- Jong, C., Collins, D., Ranzi, R. 2005. *Climate and Hydrology in Mountain Areas*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Kneisel, C., Rothenbühler, C., Keller, F., Haeberli, W. 2007. „Hazard Assessment of Potential Periglacial Debris Flows Based on GIS-Based Spatial Modelling and Geophysical Field Surveys: A Case Study in the Swiss Alps“. *Permafrost and Periglacial Processes* 18 (3): 259–68.
- Lebiedzinski, K., Fürst, J. 2018. „Entwicklung der alpinen Abflussregime in Österreich im Zeitraum 1961–2010“. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (9): 474–84.
- Liaw, A., und Wiener, M. 2002. *Classification and Regression by Random Forests*. *R package version 4.6 - 14*; *R News* 2(3): 18–22.
- Meinshausen, N. o. J. *quantregForest: Quantile Regression Forests*; *R package version: 1.3 - 7*. <http://www.r-project.org>.
- Naeser, T. 2002. „Schwebstoffuntersuchungen am Gletscherbach des Vernagtferners in den Zentralen Ötztaler Alpen“.
- Otto, J.-C., Schrott, L. 2010. „Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentspeichern und Sedimentflüssen – Konzeptionelle Ansätze und aktuelle Studien aus den Ostalpen“. *Salzburger Geographische Arbeiten* 46 (Januar): 1–13.

- PANGAEA (Data Publisher for Earth & Environmental Science). 2015. Austrian Glacier Inventory GI 3, URL: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.844985>  
[letzter Zugriff 04.März.2021]
- Rickenmann, D. 1996. „Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung“. In *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse*, herausgegeben von Björn Oddsson, 397–407. Monte Verità. Basel: Birkhäuser.
- R-Team Development Core. 2020. Vienna, Austria.: R Foundation for Statistical Computing.
- Schmieder, J., Marke, T., Strasser, U. 2018. „Wo kommt das Wasser her? Tracerbasierte Analysen im Rofental (Öztaler Alpen, Österreich)“. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (9): 507–14.
- Sichingabula, H. M. 1998. „Factors Controlling Variations in Suspended Sediment Concentration for Single-Valued Sediment Rating Curves, Fraser River, British Columbia, Canada “. *Hydrological Processes* 12 (12): 1869–94.
- Stähli, M., Bartelt, P. 2007. „Von der Auslösung zur Massenbewegung“, Januar.
- Strasser, U., Marke, T., Braun, L., Escher-Vetter, H., Juen, I., Kuhn, M., Maussion, F., 2018. „The Rofental: A High Alpine Research Basin (1890–3770 m a.s.l.) in the Öztal Alps (Austria) with over 150 Years of Hydrometeorological and Glaciological Observations “. *Earth System Science Data* 10 (1): 151–71.
- Wood, P. A. 1977. „Controls of Variation in Suspended Sediment Concentration in the River Rother, West Sussex, England “. *Sedimentology* 24 (3): 437–45.
- Zimmermann, A., Francke, T., Elsenbeer, H. 2012. „Forests and erosion: Insights from a study of suspended-sediment dynamics in an overland flow-prone rainforest catchment “. *Journal of Hydrology* 428 (März): 170–81.

# Anhang 1

## Anhang 1.1 Verwendete Sensoren

Tabelle 11: Verwendete Sensoren in beiden EZGs

EZG	Abfluss	Niederschlag	Temperatur	Trübung
V	Pneumatikpegel R25 (Ott)	Pluvio <sup>2</sup> (OTT)	PT100 (Thies)	Solitax HS-Line (Hach)
VF	Ultrasonic System (Endress&Hauser)	GERTSCH- Wippe	PT100 (Thies)	OBS501 (Campbell Scientific)

## Anhang 1.2 Bild des ISCO Rings



Abbildung 10: Ring des ISCO 6712 mit den dazugehörigen beschrifteten Flaschen.

## Anhang 1.3 Kalibrierungsfunktionen

Tabelle 12: Verwendete Umrechnungsfunktionen von Trübung in Schwebstoffkonzentration sowie von Wasserstand in Abfluss sowie die jeweilige Pearson-Korrelation.

Umrechnungsgrößen	EZG	Gleichung	Pearson-Korrelation
Trübung ~ SSC	Vent	$2,5983 \cdot x + 0,1637$	0,8694
Trübung ~ SSC	VF	$0,0021 \cdot x - 0,0082$	0,9141
Wasserstand ~ Abfluss	VF	$0,0047 \cdot x^{1,6179}$	0,9925

## Anhang 1.4 Korrelation zwischen den verwendeten Prädiktoren

### Anhang 1.4.1 Vent

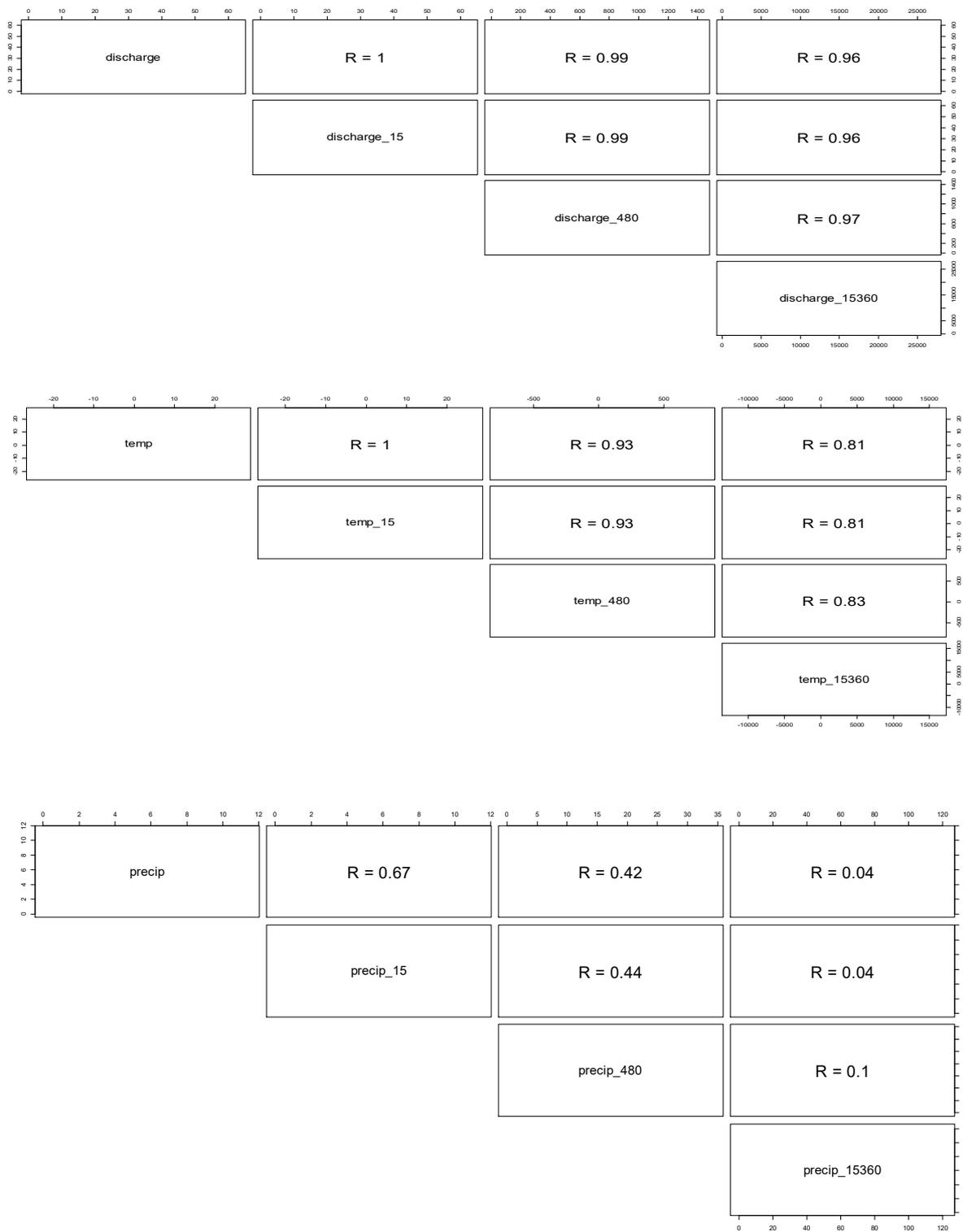


Abbildung 11: Spearman-Korrelation für die Prädiktoren von Abfluss (oben), Temperatur (Mitte) und Niederschlag (unten).

## Anhang 1.4.2 Vernagtferner

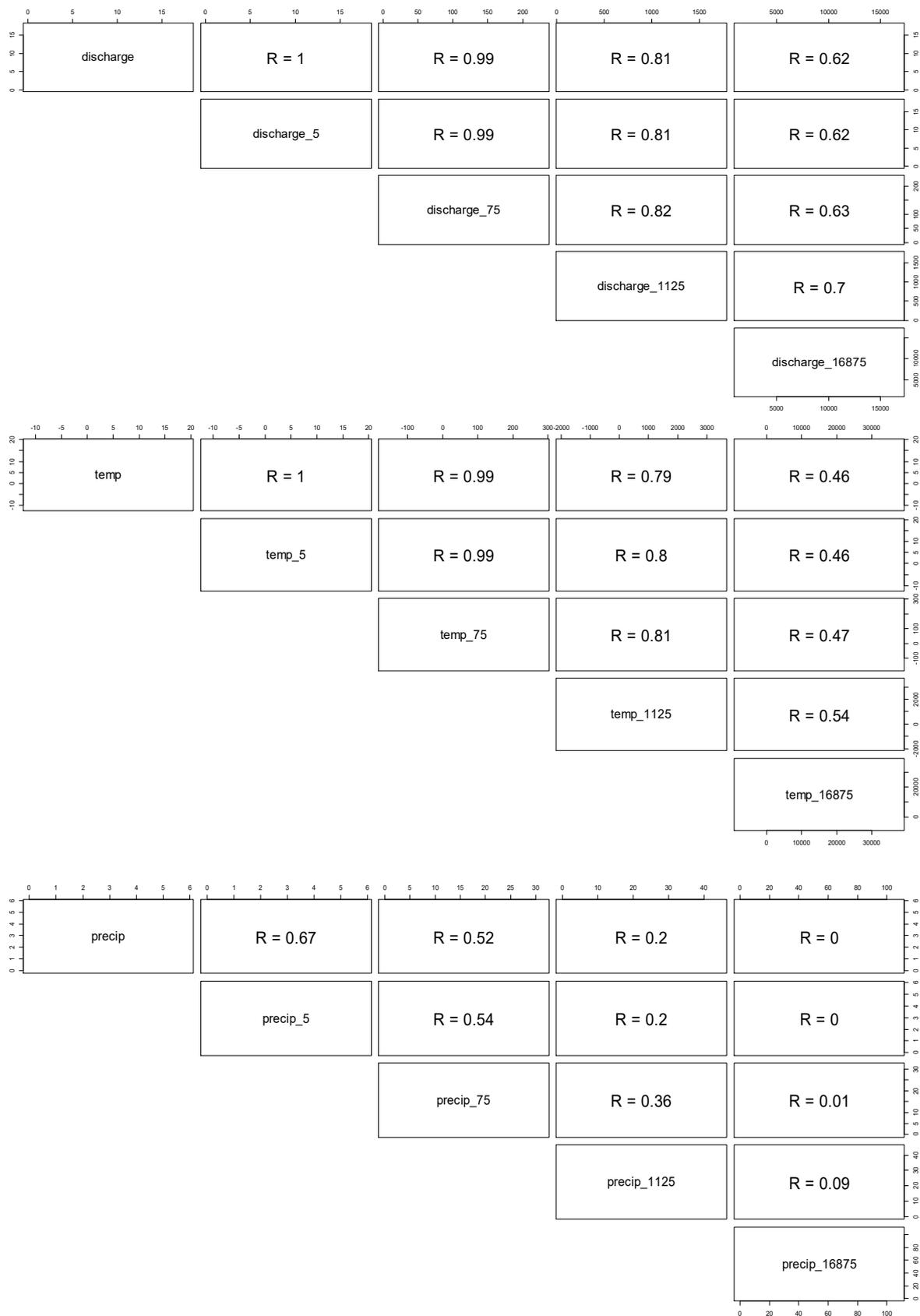


Abbildung 12: Spearman-Korrelation für die Prädiktoren von Abfluss (oben), Temperatur (Mitte) und Niederschlag (unten).

## Anhang 1.5 Validierung der Modellvorhersage einzelner Monate

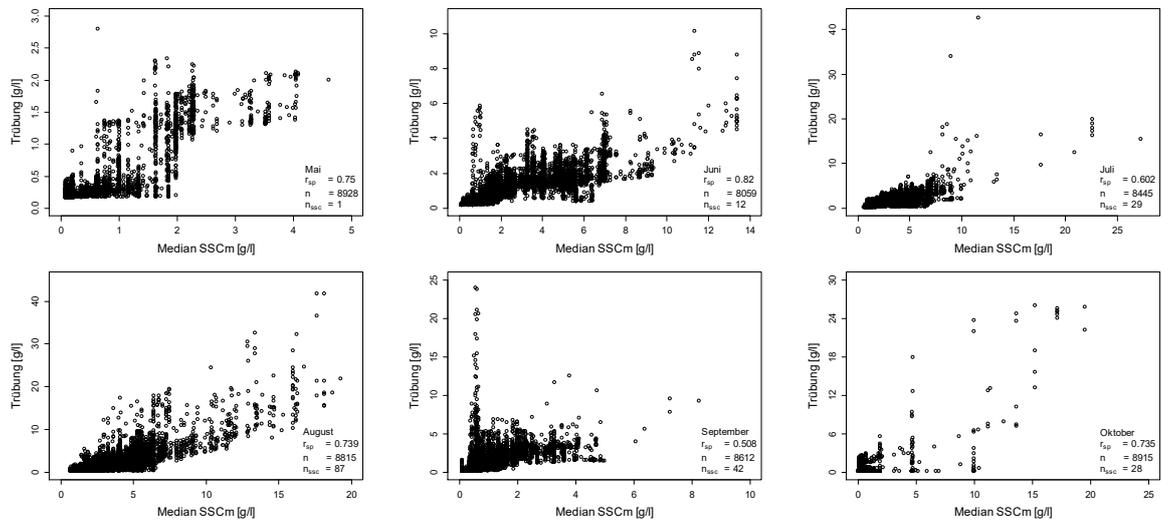


Abbildung 13: Monatliche Validierung der modellierten SSC-Daten mit den gemessenen Trübungsdaten für Vent

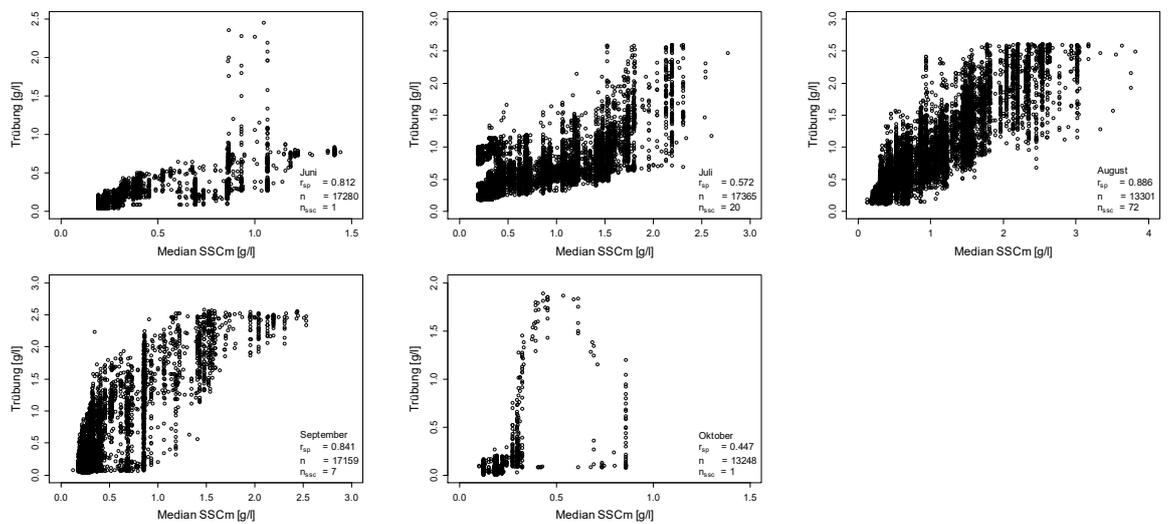


Abbildung 14: Monatliche Validierung der modellierten SSC-Daten mit den gemessenen Trübungsdaten für den Vernagtferner

## Anhang 1.6 Sedimentfrachten

Tabelle 13: Sedimentfrachten für beide Einzugsgebiete. Dabei sind die Sedimentfrachten für Vent jährlich und für den Vernagtferner nur von Mitte Juni bis Anfang Oktober.

<b>Jahr</b>	<b>EZG</b>	<b>Q<sub>0,25</sub> [1000 t]</b>	<b>Median [1000 t]</b>	<b>Q<sub>0,75</sub> [1000 t]</b>
2016	Vent	494,01	508,49	522,26
2017	Vent	632,43	648,52	664,14
2018	Vent	637,59	654,68	672,21
2019	Vent	826,42	849,54	872,17
2019	VF	31,92	32,21	32,52
2020	Vent	482,04	492,78	503,07
2020	VF	25,87	26,12	26,35

## Anhang 1.7 Weitere Abbildungen des Sedigraphen für ausgewählte Zeiträume

### Anhang 1.7.1 Vent

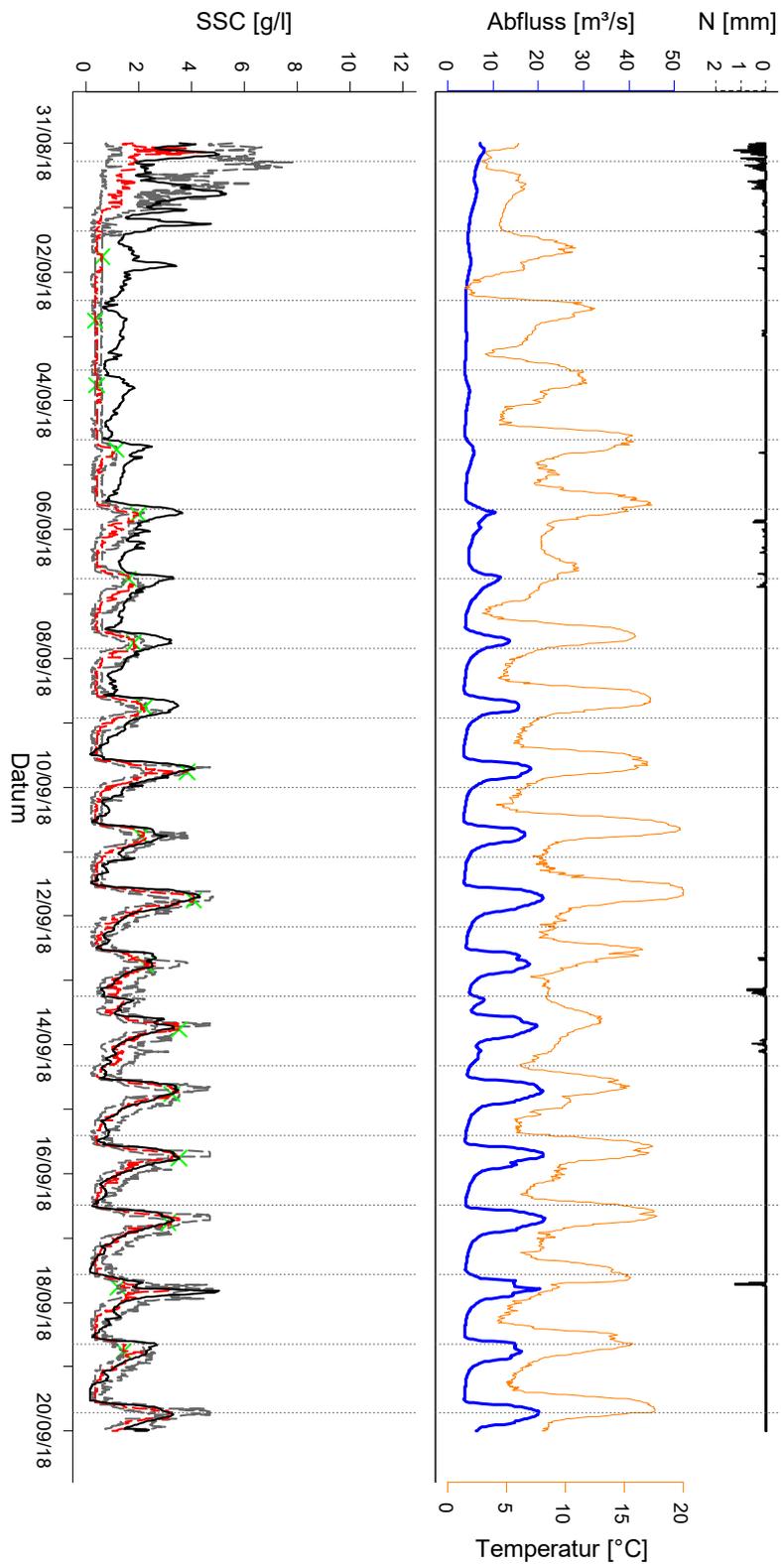


Abbildung 15: Modellierter Sedigraph für Vent vom 31.08.2018 bis 20.09.2018 mit den gemessenen Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten (oben) und den simulierten SSC-Daten und den gemessenen Trübungs- und SSC-Daten (unten).

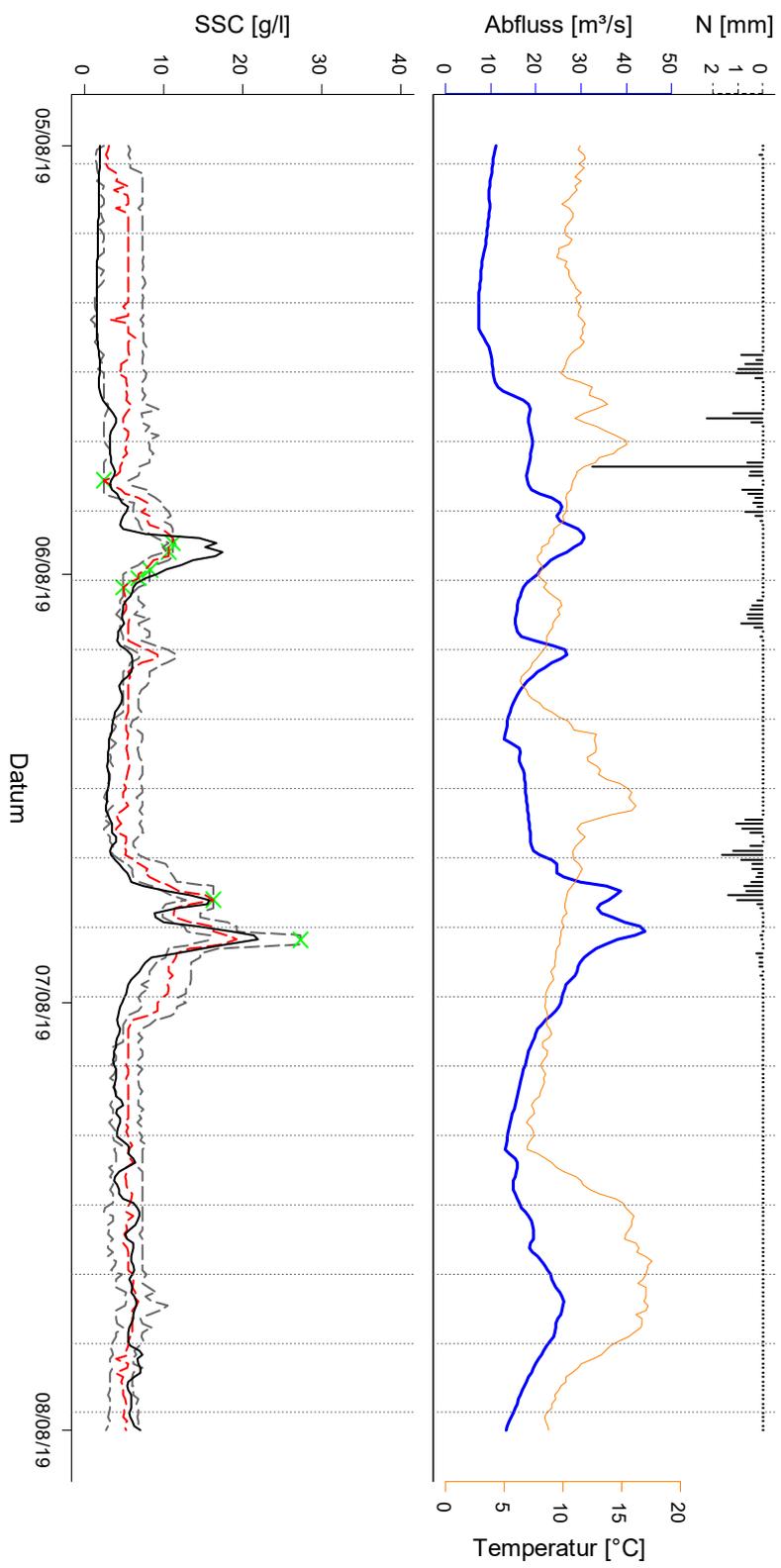


Abbildung 16: Modellierter Sedigravh für Vent vom 05.08.2019 bis 08.08.2019 mit den gemessenen Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten (oben) und den simulierten SSC-Daten und den gemessenen Trübungs- und SSC-Daten (unten).

Anhang 1.7.2 Vernagtferner

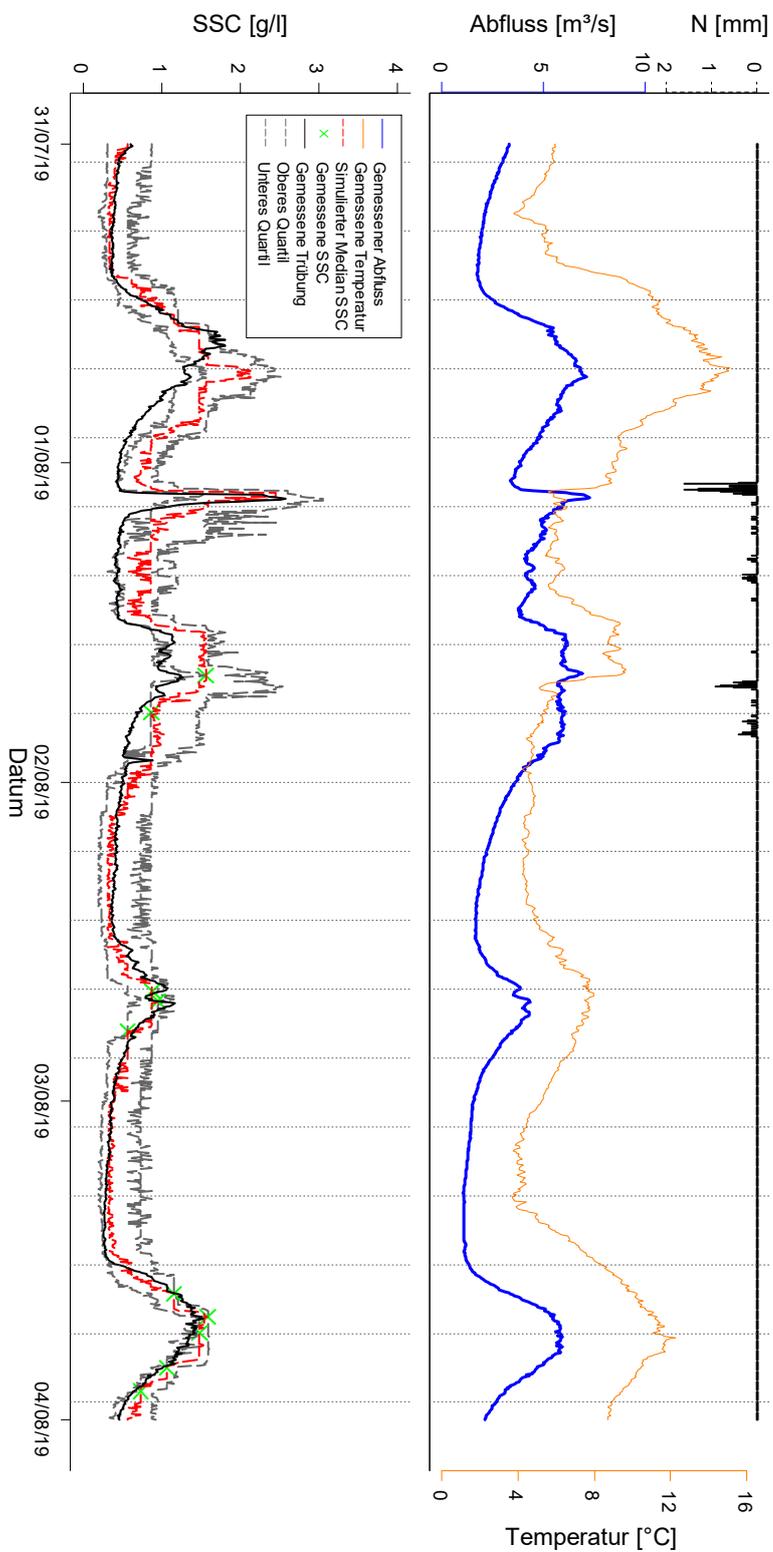


Abbildung 17: Modellierter Sedigraph für den Vernagtferner vom 31.07.2019 bis 04.08.2019 mit den gemessenen Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten (oben) und den simulierten SSC-Daten und den gemessenen Trübungs- und SSC-Daten (unten).

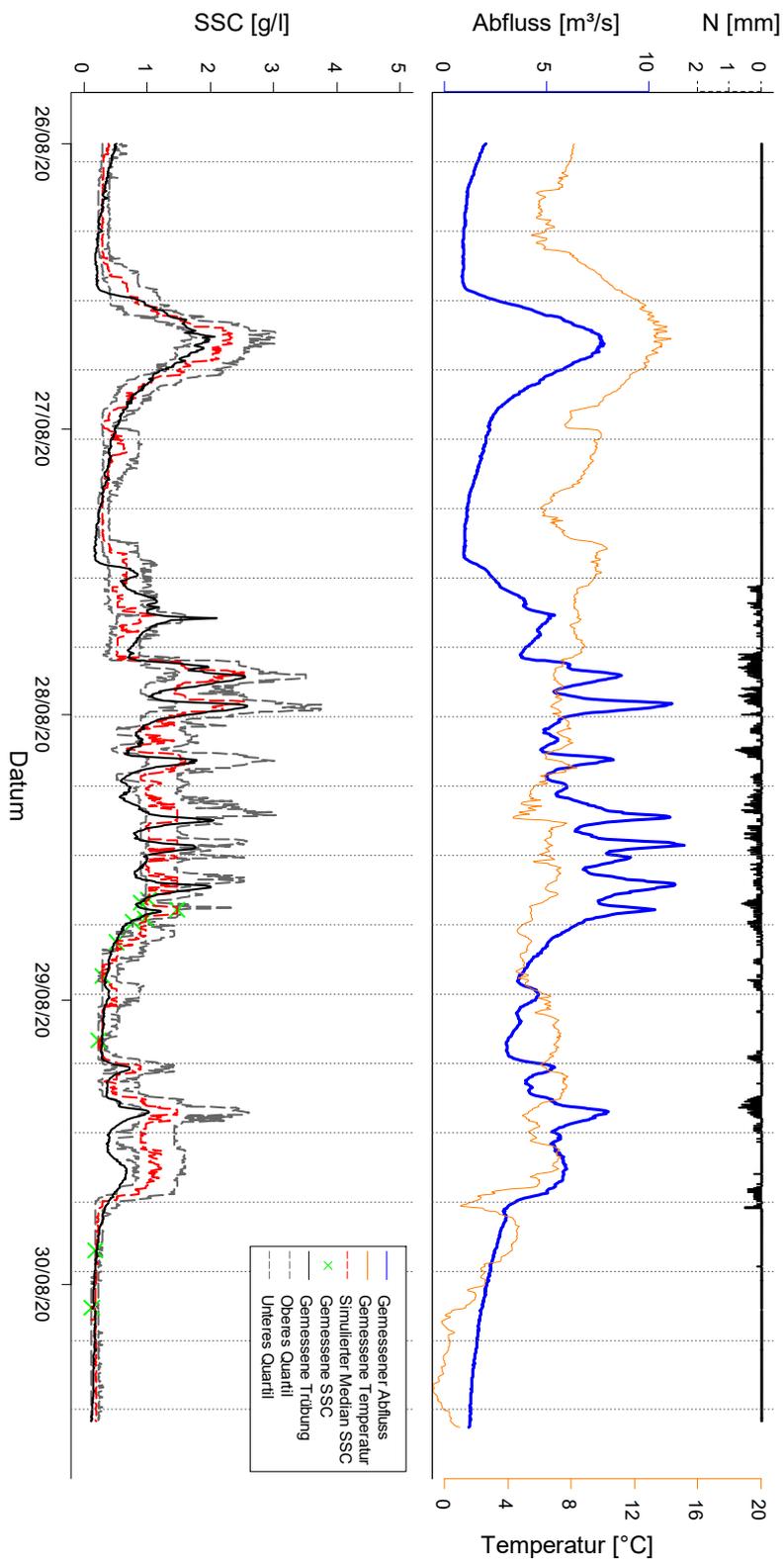


Abbildung 18: Modellierter Sedigravh für den Terragfemer vom 26.08.2018 bis 31.08.2020 mit den gemessenen Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten (oben) und den simulierten SSC-Daten und den gemessenen Trübungs- und SSC-Daten (unten).

## Anhang 2

### Anhang 2.1 Ergebnisse ohne Einfluss der Murgänge

Mit den Parametern in Tabelle 14 wurde eine maximale Zeitspanne von ungefähr 9 Tagen für Vent errechnet.

Tabelle 14: Kombination der Parameter für die Erstellung zusätzlicher Prädiktoren für das veränderte Modell

EZG	$a_0$	$b^i$	n
Vent	15 Minuten	3	30

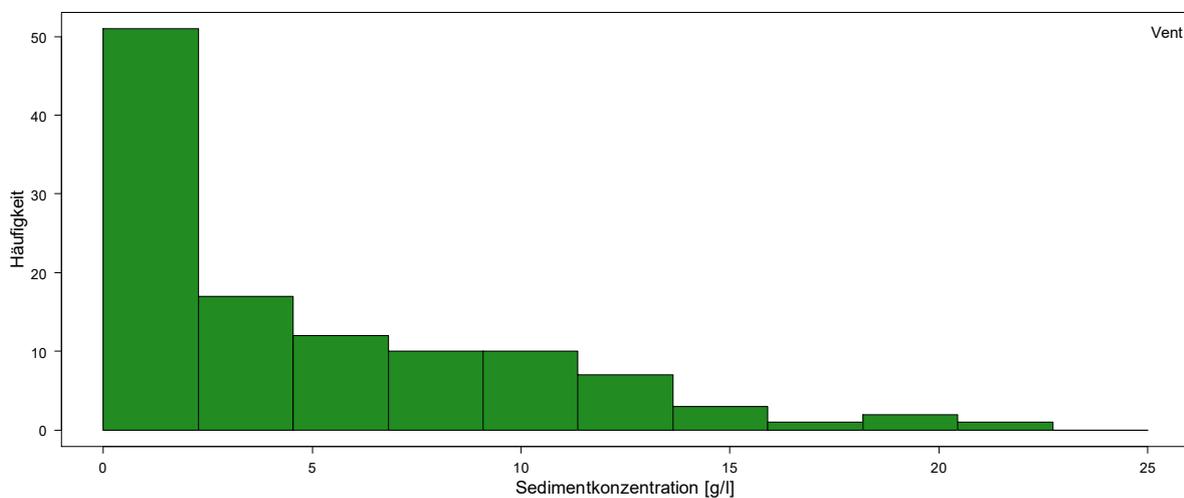


Abbildung 19: Histogramm für die im Modell verwendeten Messwerte der Sedimentkonzentration (Murgangsdaten ausgeschlossen).

Tabelle 15: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen SSC-Daten für Vent (Murgangsdaten ausgeschlossen)

EZG	n	min [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,25</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	Median [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,75</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	max [g l <sup>-1</sup> ]	mean [g l <sup>-1</sup> ]	sd [g l <sup>-1</sup> ]
Vent	114	0,025	0,753	3,256	7,985	20,874	4,915	5,063

Tabelle 16: Übersicht über die 2019 und 2020 erhobenen Trübungsdaten für Vent (Murgangsdaten ausgeschlossen)

EZG	n	min [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,25</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	Median [g l <sup>-1</sup> ]	Q <sub>0,75</sub> [g l <sup>-1</sup> ]	max [g l <sup>-1</sup> ]	mean [g l <sup>-1</sup> ]	sd [g l <sup>-1</sup> ]
Vent	14664	0,2	0,383	0,808	1,585	18,994	1,179	1,18

Tabelle 17: Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und die Wurzel aus dem mittleren Quadratfehler (RMSE) für das veränderte QRF-Modelle für Vent

EZG	NSE	RMSE [ $g\ l^{-1}$ ]
Vent	0,82	2,137

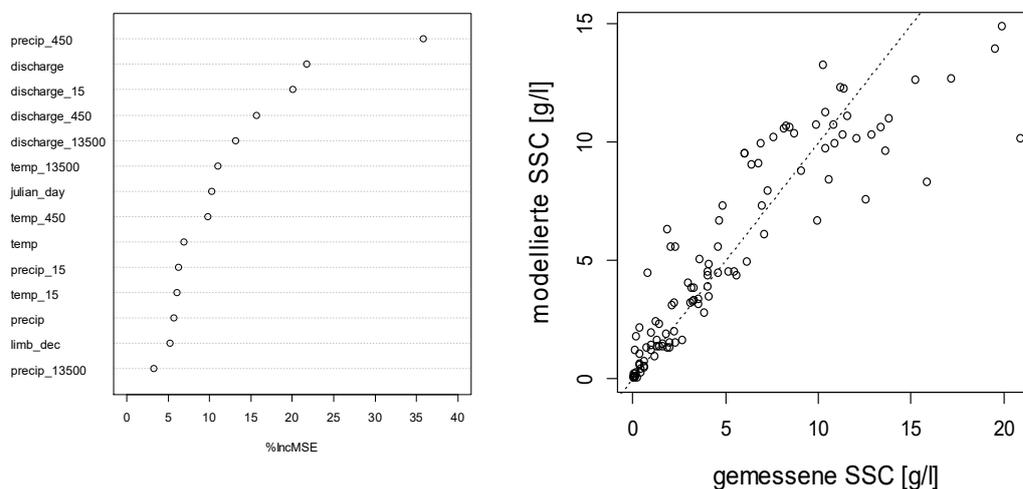


Abbildung 20: Relevanz der verwendeten Prädiktoren (links) sowie der Zusammenhang der modellierten und gemessenen SSC-Daten (rechts) für Vent. Die gestrichelte Linie stellt das 1:1 Verhältnis der beiden abgebildeten Größen dar.

Tabelle 18: Zusätzlich erstellte Prädiktoren und ihre Bedeutung

Abkürzung	Bedeutung
precip_450	Akkumulierter Niederschlag der letzten 450 Minuten (7.5 Stunden)
discharge_13500	Akkumulierter Abfluss der letzten 13500 Minuten ( $\approx 9$ Tage)
temp_450	Akkumulierte Temperatur der letzten 450 Minuten ( $\approx 8$ Stunden)
julian_day	Jahrestag
limb_dec	Änderung des Abflusses

Tabelle 19: Spearman Koeffizient, aus dem veränderten Modell ohne Murgangsdaten, aus den gemessenen Trübungsdaten und des durch die Monte-Carlo-Simulation modellierten unteren Quartilsabstands (links), des Medians (Mitte) und des oberen Quartilsabstands (rechts) der Sedimentkonzentrationen. Die p-Wert stehen in Klammern dahinter.

EZG	$r_{Sp}$		
	Trübung $\sim Q_{0,25}$	Trübung $\sim$ Median	Trübung $\sim Q_{0,75}$
Vent	0,866 ( $2,2 \cdot 10^{-16}$ )	0,849 ( $2,2 \cdot 10^{-16}$ )	0,81 ( $2,2 \cdot 10^{-16}$ )

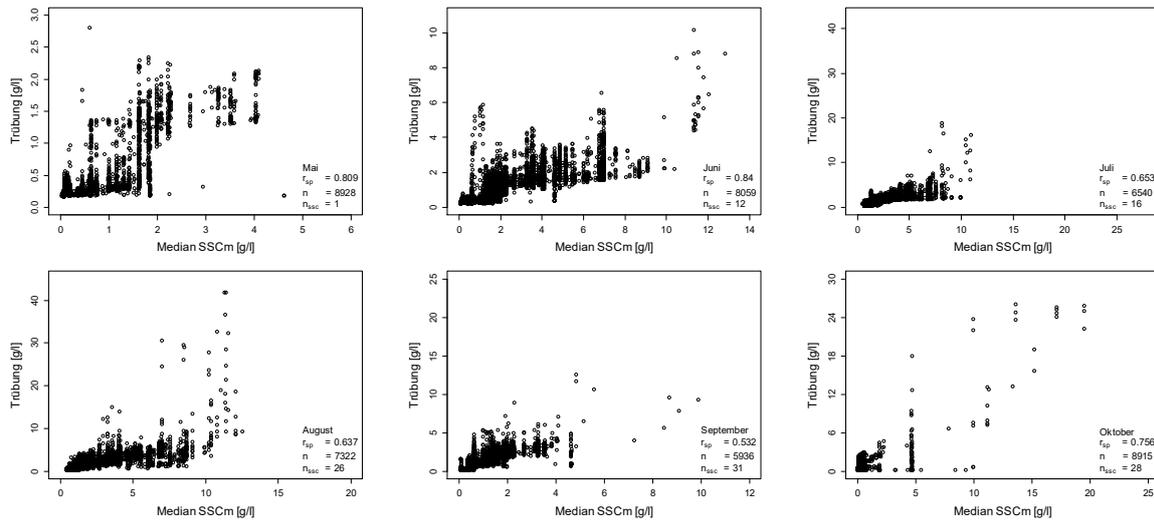


Abbildung 21: Validierung der Modellvorhersagen mit den gemessenen Trübungsdaten für einzelne Monate für das veränderte Modell für Vent

## Anhang 2.2 Verfärbung der Rofenache als Folge eines Murgangs



Abbildung 22: Verursachte Trübung in der Rofenache (links) durch einen Murgang am Hintereisferner am 28.08.2020 im Vergleich mit dem in die Rofenache mündenden Niedertalbach (unten) (aufgenommen am 31.08.2020).