



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Wasserbilanzberechnung eines alpinen Einzugsgebietes am
Beispiel Sibratsgfäll, Vorarlberg“

verfasst von / submitted by

Ramon Holzschuster BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2023 / Vienna 2023

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Erdwissenschaften

Betreut von / Supervisor:

Doz. Mag. Dr. Martin Kralik

Ich danke Herrn Martin Kralik für die großartige Betreuung, sowie ihm und Herrn Daniel Elster für
ihre tatkräftige und geduldige Unterstützung
Mein Dank gilt auch dem restlichen Team des EXTRIG-Projektes für ihre Arbeit, die diese
Masterarbeit erst möglich gemacht hat.
Und natürlich meinem Schatz für ihren moralischen Beistand, wann immer er gebraucht wurde.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung/ Abstract.....	4
2. Einführung	5
2.1. Zielsetzung.....	5
3. Untersuchungsgebiet	5
3.1. Klimatische Übersicht.....	6
3.2. Geologie des Untersuchungsgebietes	6
3.2.1. Rhenodanubischer Flysch.....	7
3.2.2. Feuerstätter Decke	8
3.2.3. Quartär	9
4. Forschungsgeschichte und vergleichende Literatur.....	10
5. Methoden	11
5.1. Niederschlag	11
5.2. Oberflächenabflussmessungen	12
5.2.1. Oberflächenabflussmessungen mit Salztracer	12
5.2.2. Abflussmessung mit der Eimermethode	14
5.2.3. Abfluss-Monitoring mittels Radarmessstationen im orografischen Einzugsgebiet	15
5.3. Evapotranspiration	15
5.3.1. Potenzielle Evapotranspiration	16
5.3.2. Referenz-Evapotranspiration.....	16
5.4. Lufttemperatur	17
5.5. Berechnung der Wasserbilanz.....	18
5.6. Isotopen- und Spurengasprobenahme.....	20
5.7. Hydrochemie	20

5. 8. Bohrungen	20
5. 8. 1. Neue Bohrungen.....	20
5. 8. 2. Erstellung von Grundwassertemperaturprofilen an vorhandenen Bohrlöchern	21
6. Ergebnisse.....	21
6.1. Niederschlag	22
6.2. Oberflächenabfluss.....	25
6.2.2. Vergleich von Niederschlag und Oberflächenabfluss.....	27
6.3. Lufttemperatur	27
6.4. Evapotranspiration	30
6.4.1 Potenzielle Evapotranspiration	30
6.4.2. Referenz-Evapotranspiration (ET0)	31
6.5. Wasserbilanz	32
6.5.1 Variante 1- Wasserbilanzberechnung mit ET0 nach Methode 1 (ZAMG)	34
6.5.2. Variante 2- Wasserbilanzberechnung mit ET0 über Radarstationen-T.....	35
6.6. Hydrochemie	36
6.8. Bohrungen	38
6.8.1. Neue Bohrungen.....	38
6.8.2. Temperaturprofile	41
7. Diskussion	43
7.1. Niederschlag	43
7.2. Oberflächenabfluss.....	44
7.3. Lufttemperatur	45
7.4. Evapotranspiration	47
7.5. Wasserbilanz	49
7.6. Hydrochemie	50
7.7. Bohrungen	51
7.7.1. Neue Bohrungen.....	51
7.7.2. Temperaturprofile	52
7.9. Hydrogeologisches Konzept	53
8. Literatur	55
10. Anhang.....	60

1. Zusammenfassung/ Abstract

In einem Untersuchungsgebiet von rund 5 km² im Bregenzerwald, Österreich wurden die wichtigsten hydrologischen Parameter Niederschlag, Oberflächenabfluss und Evapotranspiration ermittelt und anschließend der Grundwasserzufluss über die Wasserbilanz berechnet. Niederschlag wurde sowohl an den bestehenden Wetterstationen im Untersuchungsgebiet und in dessen Umgebung als auch an im Rahmen des Projektes aufgestellten Kippombrometern gemessen. Der Oberflächenabfluss wurde mittels NaCl-Tracermessungen und Radarpegelmessungen an den 4 Hauptbächen im Gebiet bestimmt. Die Evapotranspiration wurde in 2 Ansätzen (Variante 1 durch die ZAMG, Variante 2 durch den Autor) mittels der Hargreaves-Methode (nach HARGREAVES & ALLEN, 2003, adaptiert nach HASLINGER & BARTSCH, 2016) berechnet. Der mittlere Niederschlag betrug im Jahr 2020 inklusive Schneehöhenkorrektur rund 2.600 mm. Etwa 51 % davon fließt durch die 4 Hauptgerinne aus dem Gebiet ab. 31 % bzw. 22 % (je nach Ansatz, s.o.) entfallen auf die Evapotranspiration. Damit verbleiben 17 % bis 28 % für die Grundwasserspeicheränderung im Untergrund. Ein Großteil davon scheint im oberen Bereich des Untersuchungsgebietes zu infiltrieren, wo Rhenodanubischer Flysch, Eisrandsedimente und Schwemmfächer vorherrschen. Grundsätzlich wurden die Einzugsgebiete auf orographischer Basis definiert, die nicht dem tatsächlichen hydrologischen Einzugsgebiet entsprechen müssen. Dafür spricht die Variation von rund 10 % in der Änderung des Grundwasserspeichers. Insbesondere deuten hohe Abflüsse im Bereich des Sägebachs und bei den Hoheggquellen auf ein erweitertes hydrologisches Einzugsgebiet. Dies könnte auf tektonisch beeinflusste Wasserwegigkeiten zurückzuführen sein, die mit der Deckengrenze Rhenodanubischer Flysch / Feuerstätter Decke in Beziehung stehen. An der Talsohle im Bereich der Subersach treten aufgrund oberflächennaher, undurchlässiger Eisseesedimente gespannte und teilweise artesische Grundwässer auf, was eine Differenzierung zwischen tieferem Grundwasser und oberflächennahem Grundwasser Abfluss erschwert. Zusätzlich wurden die bereits im Gebiet vorhandenen Bohrungen (vgl. JARITZ 2013) erneut untersucht und von ausgesuchten Bohrungen Tiefentemperaturprofile erstellt. Zwei neue Kernbohrungen (KB1-2020 und KB2-2020 bzw. SG535 und SG536) wurden im Verlauf des EXTRIG-Projektes durchgeführt und die Bohrkerns untersuchen sowie beprobt, hierbei wurde Porenwasser auf Sauerstoff-18 (¹⁸O) untersucht (ELSTER et al., 2023; KRALIK, 2022), um die vertikale Infiltration abzuschätzen. Über diese Arbeit hinaus wurden auch Wasserproben zur Isotopen-Untersuchungen zur Bestimmung der Verweilzeit, siehe KRALIK (2022) sowie hydrochemische und geophysikalische Untersuchungen durchgeführt (ELSTER et al., 2023).

In an area of around 5 km² in the Bregenzerwald, Austria, the most important hydrological parameters precipitation, surface runoff and evapotranspiration were determined. Afterwards the groundwater inflow was calculated using the water balance formula. Precipitation was measured at the existing weather stations in and around the study area as well as at tilt ombrometers set up as part of the project. Surface runoff of the 4 main streams in the area was determined using NaCl- tracer measurements and radar gauge measurements. Evapotranspiration was calculated in 2 approaches (variant 1 by the ZAMG, variant 2 by the author) using the Hargreaves method (according to HARGREAVES & ALLEN, 2003, adapted from HASLINGER & BARTSCH, 2016). The average precipitation in 2020 was around 2,600 mm, including snow depth correction. About 51% of this amount flows out of the area through the 4 main streams. Evapotranspiration accounts for 31% or 22 % (depending on the approach, see above). This leaves 17 % to 28 % for the groundwater storage in the subsoil. Much of this appears to be infiltrating into the upper part of the study area, where rhenodanubian flysch, ice margin sediments and alluvial fans are dominant. Basically, the catchment areas were defined on an orographic basis, which does not have to correspond to the actual hydrological catchment area. This is supported by the variation of around 10% in the change in groundwater storage. In particular, high discharges in the area of the Sägebach and at the Hohegg springs point to an extended hydrological catchment

area. This could be due to tectonically influenced waterways related to the Rhenodanubian Flysch / Feuerstätter Nappe boundary. At the bottom of the valley in the Subersach area, confined and partially artesian groundwater occurs due to near-surface, impermeable ice lake sediments, which makes it difficult to differentiate between deeper groundwater and near-surface groundwater outflow. In addition, already existing wells in the area (JARITZ 2013) were re-examined and depth temperature profiles were created from selected wells. Two new core drillings (KB1-2020 and KB2-2020 or SG535 and SG536) were carried out as well. The cores were examined and sampled. Additionally, pore water was examined for oxygen-18 (^{18}O) (ELSTER et al., 2023; KRALIK, 2022) to estimate vertical infiltration. In addition to this work, water samples were also carried out for isotope studies to determine the residence time, see KRALIK (2022) as well as hydrochemical and geophysical studies (ELSTER et al., 2023).

2. Einführung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projektes EXTRIG der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) im Auftrag von und in enger Zusammenarbeit mit der Geologischen Bundesanstalt (GBA, seit 01.01.2023 Geosphere Austria) verfasst. Teilziel des transdisziplinären Projektes war die Erstellung einer numerischen 4D-Modellierung eines alpinen Einzugsgebietes. Alpine Bereiche sind, wie das vorliegende Untersuchungsgebiet, stark durch Tektonik und glaziale Ablagerungen beeinflusst und weisen daher sehr komplexe geologische und hydrogeologische Eigenschaften auf. Das Untersuchungsgebiet in und um die Gemeinde Sibratsgfall sowie insbesondere der Ortsteil Rindberg sind Schauplatz von großräumigen Hangbewegungen, die 1999 in einer katastrophalen Großhangrutschung ihren traurigen Höhepunkt erreichte. Dabei wurden auf einer Fläche von 1,4 km² ca. 70 Millionen m³ Gestein und Erdreich mit Geschwindigkeiten von bis zu 40 cm pro Tag bewegt, was zu schwerwiegenden Schäden an Gebäuden, Wald und Weideland führte. Auch heute befinden sich Teile des Ortes Sibratsgfall in Bewegung, mehrere Schollen driften zum Teil mehrere Zentimeter pro Jahr hangabwärts (JARITZ, 2013: bis zu 7 cm /Jahr im mittleren besiedelten Hangabschnitt). Aus diesem Grund gehört das Gebiet Sibratsgfall zu einem geologisch sehr gut untersuchten alpinen Gebiet der österreichischen Alpen. Auf diesen früheren Untersuchungen bauen das Projekt EXTRIG und diese Arbeit auf.

2.1. Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist, die wichtigsten Parameter des Wasserhaushaltes, Niederschlag, Evapotranspiration und Oberflächenabfluss, im Untersuchungsgebiet bestmöglich zu ermitteln und abzubilden. Dazu gehörten Feldbegehungen, Entnahmen von Wasserproben und Messungen von Oberflächenabflüssen und Bohrlochtemperaturprofilen im Untersuchungsgebiet sowie deren Bearbeitung und Auswertung. In einem weiteren Schritt wurde (in Zusammenarbeit mit D. Elster, M. Kralik und W. Jaritz) ein hydrogeologisches Konzept des Untersuchungsgebiets erstellt. Diese Informationen sollen in weiterer Folge im numerischen hydrologischen 4D-Modell des Untersuchungsgebietes berücksichtigt werden.

3. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich geografisch gesehen im Bregenzerwald, Vorarlberg, im äußersten Westen Österreichs. Geologisch gesehen befindet es am nördlichen Ausläufer des Ostalpen. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von 5 km² und liegt in einem Seehöhenbereich zwischen 800 und 1400 m.ü.A. (Meter über Adria) .

Das Zentrum des Gebietes bildet die kleine Gemeinde Sibratsgfall mit 450 Einwohnern auf einer Höhe von 930 m.ü.A. Im Südosten wird es grob vom in die Subersach mündenden Rubach begrenzt, im Süden und Südwesten von der Subersach, dem Hauptstrom des Gebietes, welcher in 1700 m.ü.A. südwestlich vom Hählekopf entspringt und bei Egg in die Bregenzer Ach mündet. Die Nordgrenze des Gebietes bildet der Höhenkamm über dem Dorf Sibratsgfall bis zur Wasserscheide. Bei der Wahl der Gebietsgröße wurde auf die orographischen Einzugsgebiete der 4 Gerinne, die das Gebiet vom Kamm hinunter Richtung Subersach entwässern, eingegangen. Diese Gewässer sind laut Vorarlberger Atlas (vo-gis.cnv.at) bezeichnet als (von Nordwest nach Südost): Wiesalegraben (im Volksmund Mähmoosgraben nach dem Ortsteil Mähmoos), Nestgraben, Tobelbach und Sägenbach (auch Sägebach; mit Zufluss vom Buchbodenbach). Ein fünfter, namenloser Bach, der etwas westlich vom Sägenbach ebenfalls im Vorarlberger Atlas verzeichnet ist, führt nur bei Starkregen Wasser und wurde deshalb nicht weiter berücksichtigt. Oberhalb der Gemeinde Sibratsgfall, am Fuße des Kammes, liegen die beiden wichtigsten Quellen des Untersuchungsgebietes, die die Gemeinde mit Wasser versorgen: Die Krineggquelle (Obere: 1174 m.ü.A.; untere: 1111 m.ü.A.) im Nordwesten und die Hoheggquelle (1184 m.ü.A.) im Osten des Untersuchungsgebietes.

3.1. Klimatische Übersicht

Das Klima im Untersuchungsgebiet ist durch starke Niederschläge geprägt. Für das Jahr 2020 wurde ein Jahresniederschlag von 2.110 mm/Jahr (Messwert Wetterstation Sibratsgfall) bzw. 2.600 mm/Jahr (Werte der ZAMG mit Schneehöhenkorrektur) ermittelt. Damit liegt der Niederschlag 2020 leicht unter dem mittleren Niederschlag der letzten 30 Jahre. Die Auswertung der Niederschlagsdaten der ZAMG von 1996 bis 2020 zeigen, dass der Niederschlag im Mittel eine Zunahme von 63 mm/100 m aufweist. Die durchschnittliche Jahrestemperatur betrug 2020 etwa 7°C mit dem niedrigsten Monatsmittelwert von -0,8 °C im Dezember und dem höchsten Monatsmittelwert von 15 °C im August.

3.2. Geologie des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den nördlichen Ausläufern der Ostalpen, mitten in einer tektonisch sehr komplexen Zone. Vom Liegenden zum Hangenden besteht diese einerseits aus dem Helvetikum mit der Liebensteiner Decke und der Feuerstätter Zone und andererseits aus dem Rhenodanubischen Flysch (OBERHAUSER, 1980; JARITZ, 2013). Diese tektonischen Einheiten wurden während der alpidischen Genese übereinandergestapelt und dabei stark verschuppt und verfaltet. Das Streichen ist ca. Südwest-Nordost orientiert, das Fallen nach Südosten (JARITZ, 2013).

Im gewählten Untersuchungsgebiet selbst sind aber nur zwei davon aufgeschlossen, die Feuerstätter Zone und der Rhenodanubische Flysch, deren Deckenabfolgen den Nordkamm über der Gemeinde Sibratsgfall bilden. Talwärts wird das Festgestein von mächtigen quartären Sedimenten überlagert.



Abbildung 3.a: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets und Bohrungen. Neue Bohrungen KB 1/20 und KB2/20 in türkis. (Karte modifiziert nach JARITZ, 2013)

3.2.1. Rhenodanubischer Flysch

Der Rhenodanubische Flysch besteht zum Großteil aus pelagischen Suspensionsströmen (JARITZ 2013). Er ist gekennzeichnet durch starke Wechsellagerungen von Schiefertönen und Mergeln und wird von Sandsteinbänken mit Mächtigkeiten von einigen Zentimetern bis zu einigen Metern durchzogen (PREY, 1980). Erdgeschichtlich stammen sie aus Kreide-Paläogen (OBERHAUSER, 1980).

Im Untersuchungsgebiet ist der Rhenodanubische Flysch mit folgenden Decken aufgeschlossen.

Dabei ist die Abfolge vom Liegenden zum Hangenden: Reiselsberger Sandstein, Piesenkopf-Schichten, Zementmergelserie, Hällritzer Serie. Die bei JARITZ (2013) erwähnten Ofterschwanger Schichten sind im Untersuchungsgebiet nicht aufgeschlossen.

Hällritzer Serie

Der Schichtname stammt von einem Aufschluss am Hällritzer Eck östlich von Balderschwang, Oberallgäu (RICHTER, 1957). Zeitlich von Campanium bis unteres Maastrichtium sedimentiert,

besteht die Hällritzer Serie vordergründig aus grobkörnigen Kalksandsteinen (JARITZ, 2013). Sie ist aber eine sehr heterogene Wechselfolge von Sandsteinen, schwarzen Tonschiefern, Mergeln und Sandkal-ken (Friebe et al., 2007). Von der Piesenkopf-Formation unterscheidet sie sich durch mächtigere Bänke und Beteiligung unterschiedlicher Gesteinstypen. (FRIEBE et al., 2007) Die Hällritzer Serie ist in einem schmalen Streifen am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes oberhalb der Krineggalpe aufge-schlossen.

Zementmergelserie

Zeitlich lässt sich die Zementmergelserie in die Oberkreide einordnen. PREY (1980) ordnet sie dem Coniacum bis Campanium zu, JARITZ (2013) spricht von Santonium bis Campanium. Teilweise (siehe z.B.: FRIEBE et al., 2007) wird sie nicht als eigene Serie, sondern als Teil der Piesenkopf-Schichten be-trachtet.

Die Zementmergelserie besteht aus einem relativ einheitlichen Wechsel der namensgebenden grauen Mergel und dunkel-mittelgrauen, eher feinkörnigen Kalksandsteinbänken (JANOSCHEK, 1964). Sie ist nur im äußeren Nordwesten des Untersuchungsgebietes anzutreffen.

Piesenkopf-Schichten

Die Bezeichnung Piesenkopf-Schichten geht zurück auf CORNELIUS (1926) (laut JARITZ, 2013) und ist benannt nach dem Piesenkopfgipfel in den Allgäuer Alpen. Zeitlich ordnet JARITZ (2013) die Piesenkopf-Schichten nach RICHTER (1957) zwischen Turonium und Santonium ein.

Die Piesenkopf-Schichten bilden eine Wechsellagerung aus dünnbankigen, dichten grauen Kalken, und sehr dünnbankigen (wenige Zentimeter) dunklen bis olivgrünen Mergel- und Schluffkalken (FESSLER et al., 1992; FRIEBE et al., 2007; JARITZ, 2013).

Die Schichtabfolge bildet den nördlichen Kamm des Untersuchungsgebietes bis zur Krineggalpe.

Reiselsberger Sandstein

Der Reiselsberger Sandstein ist eine sehr homogene Gesteinsformation, deren Gesamthabitus von Vor-arlberg bis nach Wien sehr ähnlich bleibt (PREY, 1980). Zeitlich ist der Reiselsberger Sandstein nach PREY (1980) der Mittelkreide, laut JARITZ (2013, nach RICHTER 1957) genauer dem Cenomanium- Tu-ronium zuzuordnen.

Die Formation besteht hauptsächlich aus polymikten, mittel-grobkörnigem, grau-graublauen Quarz-Glimmersandstein mit hohem Feldspatanteil (FESSLER et al., 1992; JARITZ, 2013), die von dünnen, dun-keelgrau-schwarzen Tonschiefern durchzogen werden (FRIEBE et al., 2007). Die Sandsteinbänke weisen allgemein gut geschichtete Fein- und Kreuzschichtungen auf (FESSLER et al., 1992) und zeigen sehr einheitliche Korngrößen (FRIEBE et al., 2007). Aufgeschlossen ist der Reiselsberger Sandstein im nord-östlichen Teil des Untersuchungsgebietes, wo er im Liegenden auf den Feuerstätter Sandsteinen auf-liegt.

3.2.2. Feuerstätter Decke

Die Feuerstätter Decke verdankt ihren Namensgebung CORNELIUS (1921). Zeitlich ist sie laut OBER-HAUSER (1980) der oberen Kreide zuzuordnen.

Die dem Penninum zuzuordnende Feuerstätter Decke liegt zwischen dem Rhenodanubischen Flysch im Hangenden und der Liebensteiner Zone im Liegenden. Es handelt sich um eine sehr heterogene Gesteinsserie, bestehend aus tektonisch zerrissenen und verwalzten Schuppen (FESSLER et al., 1992,

FRIEBE et al., 2007). In der Literatur wird synonym zur Feuerstätter Decke die Bezeichnung Wildflysch verwendet (z.B. FRIEBE et al., 2007; OBERHAUSER, 1980). Diese Bezeichnung wird bei RICHTER (1960) und FESSLER et al. (1992) als unkorrekt bzw. zu wenig genau bezeichnet, da sie nur einen Faziesbegriff darstelle und auch in anderen Einheiten der Alpen verwendet werde (FESSLER et al., 1992).

Im Osten des Untersuchungsgebietes tritt die Gesteinsserie in Form mehrerer Schuppen des Feuerstätter Sandsteines und der Junghansen-Formation auf.

Feuerstätter Sandstein

Der Feuerstätter Sandstein wird als dichter, massiger und gleichmäßig feinkörniger Glaukonitsandstein von heller grünlicher Farbe mit kaum entwickelter Schichtung (FRIEBE et al., 2007; GMEINDL, 2007; JARITZ, 2013) beschrieben. Vereinzelt führt das Gestein Zirkone, Turmaline und Granate (GMEINDL, 2007). Teilweise können auch gröbere Sandsteinbänke eingeschaltet sein (FRIEBE et al., 2007). Charakteristisch für den Feuerstätter Sandstein sind tiefe Zerrspalten und Klüfte, bedingt durch sprödes Bruchverhalten (JARITZ, 2013).

Der Feuerstätter Sandstein ist im Untersuchungsgebiet nur stellenweise aufgeschlossen und bildet mit Schichten der Junghansen-Formation ein verschupptes Gefüge am Ostrand des Untersuchungsgebietes. Teile davon sind im Schichtverband bewegt.

Junghansen-Formation

Benannt nach dem Gehöft „Junghansen“ im Bolgenachtal im Allgäu (FESSLER et al., 1992). Zeitlich werden die Junghansen-Schichten in den Bereich höhere Oberkreide bis Paläozän (OBERHAUSER, 1980) eingeordnet. Typisch für die Junghansen-Schichten sind kalkarme und fossilarme, schwarze bis selten graue oder rotgrüne (Rotglimmerschichten- CORNELIUS, 1921) Pelite. Diese bilden typische Wechselfolgen mit grauen Sand-Siltkalken (FESSLER et al., 1992). Ebenfalls zur Junghansen-Formation werden bei FESSLER et al. (1992) in die schwarzen Pelite eingelagerte Quarzitbänke und Psephite gezählt, die unter anderem an der Bregenzer Ach und im Brühlbach beobachtet wurden.

Die Formation ist in sich stark tektonisch verschuppt und zerrüttet (OBERHAUSER, 1980; JARITZ, 2013). Sie ist leicht zu verwechseln mit der Schelpen-Serie, die aus ähnlichen Gesteinen wie die Junghansen-Formation aufgebaut ist und seit ZACHER (1990) und FESSLER (1992) ebenfalls der Feuerstätter Decke zuzuordnen ist (nach JARITZ 2013), vormals der Liebensteiner Decke (wie bei OBERHAUSER, 1980).

JARITZ (2013) zufolge sind die Gesteine der Junghansenformation besonders sensibel gegenüber Wassereintritten. Stark ausgeprägte Trennflächen ermöglichen eine starke Durchfeuchtung, die eine zunehmender Auflösung des Festgesteins zu Lockergestein ermöglicht.

3.2.3. Quartär

Das Quartär im Untersuchungsgebiet war wie im Rest des Bregenzerwaldes und den Alpen maßgeblich von Gletschern, insbesondere dem Würm-Glazial dominiert.

Am bedeutendsten war der Subersachgletscher, der das Tal des heutigen Untersuchungsgebietes formte. Andere wichtige Gletscher im Bereich Bregenzer Wald waren der Rheingletscher und der Bregenzerwaldgletscher. Von ihnen stammt direkt oder indirekt ein Großteil der quartären Sedimente. Am Ende des Würm begannen kleinere, weniger hoch gelegene Seitentäler zuerst abzuschmelzen, während die höher gelegenen Haupttäler erst später eisfrei wurden. Dadurch entstanden hinter Moränendämmen große Gletscherseen, die mit feinkörnigen lakustrinen Ablagerungen sowie Deltasedimenten gefüllt wurden (GMEINDL; 2007) und so zum Teil sehr mächtige Eissee-sedimente schufen. Ein solcher See befand sich auch im Bereich des Untersuchungsgebietes (JARITZ, 2013).

Aus Seitenmoränen wurden in den Tälern Eisrandsedimente, die häufig- wie auch im Untersuchungsgebiet- Terrassen bildeten. Zusätzlich zu den glazialen Ablagerungen formten postglaziale Hangschuttbewegungen das Gebiet maßgeblich mit. Vor allem das verwitterungsempfindliche Flyschgestein (JARITZ, 2013) formte mächtige Hangschuttdecken am unteren Teil des Nordkammes. Postglaziale fluviatile Sedimente spielen nur sehr lokal im Bereich der Subersach und Rubach eine wichtige Rolle (JARITZ, 2013).

Der mittlere Hangabschnitt (1100 bis ca. 900m.ü.A.) bildet die Terrasse über der Siedlung und wird von Eisrandsedimenten, Schwemmfächern und postglazialen Hangumlagerungsdecken dominiert (JARITZ, 2013). Vereinzelt sind auch noch Ablagerungen der ansonsten von Hangumlagerungsdecken überprägten Grundmoränen anzutreffen.

Der untere Hangabschnitt erstreckt sich vom Dorfkern Sibratsgfall bis hinunter zur Subersach. Dieser Bereich ist durch feinkörnige, tonig-schluffige Eisseesedimente geprägt, die in einigen Bereichen von späterem Material, vor allem Schuttströmen und Hangbewegungen verdeckt wurden, aber vor allem an der Talsohle im Bereich der Subersach zutage treten. Sie bilden einen Großteil der eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Talverfüllung. Ihr Matrixgehalt schwankt zwischen 60 und 100 %

4. Forschungsgeschichte und vergleichende Literatur

Großräumige Bodenbewegungen im Gebiet waren bereits seit längerer Zeit bekannt und vielleicht einer der Gründe, warum das Gebiet erst seit dem 18. Jahrhundert als Dauersiedlungsraum benutzt wurde (JARITZ, 2013, S.27).

Das Untersuchungsgebiet selbst wurde aufgrund der besonderen Situation der Hangrutschungen schon mehrmals unter verschiedenen Gesichtspunkten erforscht.

Andere frühe geologische Arbeiten im Gebiet (SIMET, 1985; THOM, 1986) erkannten die großräumigen Bodenbewegungen im Gebiet nicht oder unterschätzten sie. Im Zuge einer geplanten Staustufe in der Subersach seitens der VKW wurden aber aktive Bewegungen im Unterhang erkannt (LOACKER, 1992). Zusätzlich wurde 1995, veranlasst durch den damaligen Landesgeologen Dr. Stark ein Vermessungsnetz installiert (JARITZ, 2013).

Besonders nach dem Unglück 1999 wurden mehrere Arbeiten verfasst, die sich insbesondere mit dem Gebiet des Rindberges und teilweise auch mit dem Untersuchungsgebiet um Sibratsgfall beschäftigten. Hier wären insbesondere JARITZ (2013), GMEINDL (2007) und BIEBER et al. (2007) zu nennen, auf die in dieser Arbeit oft Bezug genommen wird. Besonderer Dank an der Erforschung des Gebietes gilt dem ZT-Büro Moser/Jaritz, durch das das Gebiet geologisch und geotechnisch in mehreren Publikationen bearbeitet wurde (MOSER & JARITZ, 1999, 2000; JARITZ 2013; JARITZ & SORANZO, 2014). Jaritz betrachtete das Gebiet insbesondere aus ingenieurgeologischer Sicht und erstellt sowohl eine sehr detaillierte geologische Karte als auch einen Gefahrenzonenplan für Rindberg und besonders die Gemeinde Sibratsgfall. GMEINDL (2007) befasste sich mit GIS-Anwendungen und hydraulischen Transportmodellen zur Voraussage erneuter Erdbeben. Im Zuge dessen berechnete er auch die Wasserbilanz im Bereich des Rindberger Erdbebens. BIEBER et al. (2007) befassten sich ebenfalls mit der Hydrogeologie des Rindberges mit einem aufwändigen Quellmonitoring der Rindberger Quellen.

Zur allgemeinen geologischen Situation sind OBERHAUSER (1980, 1998), FESSLER et al. (1992 und FRIEBE et al. (2007) zu empfehlen.

Abgesehen von den vergleichbaren Arbeiten im Untersuchungsgebiet von JARITZ (2013) und GMEINDL (2007) wurden auch Arbeiten in anderen Regionen zum Vergleich herangezogen: FELLEHNER (2003) beschäftigte sich mit Grundwasserspeicherzufluss in den niederen Tauern, WIESER (2008) mit Wasserbilanzmodellierungen in wiesendominierten Hängen der Alpen. MENZEL (1999) bearbeitete flächendeckende Verdunstungsmodellierungen für die Schweiz. Weingartner beschäftigte sich in mehreren

Publikationen (u.a. ASCHWANDEN & WEINGARTNER, 1985; WEINGARTNER 2018 und 2020; MUELCHI et al. 2020) mit dem Abflussregime der Schweizer Alpen sowie ihrer Abhängigkeiten vom Klimawandel. LEBIEDZINSKI & FÜRST (2018) beschrieben ebenfalls verschiedene alpine Abflussregimes, aber in Österreich. Zum alpinen Wasserhaushalt im Allgemeinen seien auch noch BAUMGARTNER et al. (1983) und STEINHÄUßER (1970) zu empfehlen. Zur Geologie des Untersuchungsgebietes werden neben JARITZ (2013) auch FESSLER et al (1992) sowie PREY (1980) und OBERHAUSER (1980) empfohlen. Zuletzt seien dem Leser auch die anderen Arbeiten innerhalb des EXTRIG-Projektes ans Herz gelegt, insbesondere ELSTER et al. (2023) und KRALIK (2022).

5. Methoden

5.1. Niederschlag

Es werden Niederschlagsmessungen aus einer Reihe von Quellen verwendet (siehe Abb. 5a). Die erste Quelle sind die Daten des Hydrographischen Dienstes (HYDROGRAFISCHER DIENST VORARLBERG, 2021) in Schönenbach (1040 m.ü.A.), Sibratsgfall (906 m.ü.A.) und Schoppernau (835 m.ü.A.). Diese Stationen liefern Niederschlag, Neuschnee und Schneehöhe als Tagesmittel über einen großen Zeitraum und ermöglichen so einen 30-Jahres-Überblick. Eine weitere Quelle war die Wetterstation der Wildbach- und Lawinenverbauung Vorarlberg auf dem Rindberg, 1,7 km östlich des Untersuchungsgebietes. Leider waren die meisten Daten dieser Station fehlerhaft, so dass nur die Tagesdaten von 2020 zum Vergleich herangezogen werden konnten. Die dritte Quelle für Niederschlagsdaten waren fünf neu installierte Kippombrometer vom Typ OMBROMAT Datenlogger der Firma Griesmayr Electronic GmbH, die über das Forschungsgebiet und dessen Einzugsgebiet verteilt waren. Aufgrund technischer Fehler konnte nur ein Bruchteil der gemessenen Daten verwendet werden, so dass die Niederschlagssummen über längere Zeiträume als einige Monate nicht ermittelt werden konnten. Das Forscherteam der GBA (Daniel Elster, Martin Almer, Stefan Hoyer und Alexander Schriebl) installierte außerdem drei Schneesammelröhren mit einem Durchmesser von 20cm neben je einem Regenkollektor, um die Schneemenge abzuschätzen. Der Schnee wurde in Plastiktüten gesammelt und im Labor des Wasserwerks Sibratsgfall gewogen. Ein detaillierteres Niederschlagsmonitoring wurde im Rahmen des EXTRIG-Projektes von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt. Dabei wurde im Zwei-Schritt-Verfahren (HIEBL & FREI 2018) tägliche Niederschlagsfelder als Produkt der mittleren monatlichen Niederschlagssummen über 30 Jahre (1990-2020) und der täglichen relativen Abweichung dazu berechnet. Für den mittleren monatlichen Niederschlag wurden 45 Stationen, für die tägliche Abweichung 8 Stationen in Sibratsgfall und Umgebung beobachtet. Um die regionalen topografischen Abhängigkeiten erfassen zu können, wurde dieser Schritt in einem weiter gefassten Gebiet von 50 km×50 km umgesetzt.

Die Schneehöhenkorrektur wurde mit SNOWGRID, einem Schneedeckenmodell der ZAMG (OLEFS et al., 2013), erstellt. SNOWGRID simuliert Schneedeckenauf- und Abbau in Österreich. Für die Übertragung auf das Einzugsgebiet von Sibratsgfall wurden Parameter in 50x50m-Rastern verwendet.

Als Parameter für die Modellierung verwendet SNOWGRID (1) Lufttemperatur, (2) tägliche mittlere Bewölkung, (3) Globalstrahlungswerte auf die reale Fläche und (4) Boden- bzw. Schneeralbedo, nicht jedoch reale Schneehöhenmessungen. Tägliche mittlere Bewölkung sowie Boden- bzw. Schneeralbedo wurden über das STRAHLGRID-Modell (OLEFS et al., 2013) der ZAMG ermittelt. Die restlichen Daten stammen aus den ZAMG-Modellen für Niederschlag und Evapotranspiration (siehe auch Kap. 5.3). 14 Bestehende Schneemessreihen (eine in Sibratsgfall, 13 in der Umgebung) wurden zur Kalibrierung und regionalen Anpassung des SNOWGRID-Modells benutzt. Dazu wurde aus den Schneehöhenmessungen in und um das Untersuchungsgebiet mit einer linearen Regression die Schneehöhen am

unterem und oberen vertikalen Gebietsrand abgeleitet (ELSTER et al., 2023). Anschließend wurden die Unterschiede dieser Pseudomessungen und den modellierten SNOWGRID -Schneehöhen in ein Anpassungsfeld übertragen, das wiederum verwendet wurde, um das modellierte Schneewasseräquivalent proportional zu den Abweichungen von Modell und Messung anzupassen.

5.2. Oberflächenabflussmessungen

5.2.1. Oberflächenabflussmessungen mit Salztracer

Diese Methode wird zur Bestimmung des Abflusses in Oberflächengewässer wie Bächen und Flüssen eingesetzt, um detaillierte Daten über einzelne Bachabschnitte zu erhalten. Konkret wurde sie für die Kalibrierung der in Sibratsgfall installierten Radar-Abflussmessstationen (siehe Kap. 5.1.3) und für die Evaluierung der Schüttungsverhältnisse von berücksichtigten Oberflächengerinnen verwendet. Dafür wurde gezielt versucht, das Abflussverhalten bei Extremereignissen und verschiedenen Niederschlagsbedingungen abzubilden, um Daten bei Nieder- und Hochwasser für die Kalibrierung der Schlüsselkurven zu erhalten. Grundsätzlich wird Natriumchlorid (kommerziell handelsübliches Kochsalz ohne Zusatzstoffe) in den Strom eingebracht, wodurch sich die elektrische Leitfähigkeit (electrical conductivity, kurz EC) des Wassers erhöht. Ein stromabwärts eingegebenes Messgerät misst den Basiswert und die Veränderung der EC im zeitlichen Verlauf sowie simultan die Temperatur des Wassers. Die Messung beginnt mit der Salzinjektion und endet, wenn die EC den anfangs gemessenen Basiswert des Stromes wieder erreicht. Anstatt Trockensalz direkt in den Bach einzugeben, wurde das Salz in einem Eimer mit 1-3 Litern Bachwasser vorgelöst und anschließend in einem Schub eingespeist. Dieses Verfahren funktioniert bis zu einer Obergrenze von 20-25 m³/s (HUDSON & FRASER, 2005), die für die Abflussverhältnisse in Sibratsgfall mehr als ausreichend ist. Die Methode hat den Vorteil, dass bei Durchflussmengen mit geringer Strömungsgeschwindigkeit oder geringer Turbulenz das gesamte Salz verdünnt wird und keine Salzcluster am Boden entstehen, die die Messung verfälschen. Bei verschiedenen Feldkampagnen kamen mehrere kalibrierte Messgeräte zum Einsatz: WTW Multiline Multi 3630 IDS (pH, Redox, gelöstem O₂, Leitfähigkeit und Temperatur), WTW Profiline Cond 3310 (Leitfähigkeit, Temperatur) und Hach HQ40d (pH, Leitfähigkeit, gelöstem O₂, Temperatur). Für jede Messung wurden jeweils 2 bzw. 3 dieser Geräte gleichzeitig eingesetzt, um eine möglichst hohe Genauigkeit bei gleichzeitiger Fehlerabschätzung zu erreichen. Als Leitfähigkeitsprüfsonden wurden Geräte der Modelle WTW TetraCon 325S und TetraCon 325/C eingesetzt. Die eingespeiste Salzmenge ist abhängig von der geschätzten Strömungsabfluss- und Vermischungslänge (=Länge zwischen Salzinjektion und EC-Messung, in Metern). Diese sollte zwischen dem 10- bis 20-fachen der Strömungsbreite liegen (HUDSON & FRASER, 2005) und je nach Strömungsgeschwindigkeit und Trübung variieren, um eine optimale Durchmischung des Salzes zu gewährleisten. Die Differenz zwischen dem Basis-EC-Signal des Gerinnes und dem Peak-Signal (höchster gemessener EC-Wert) sollte mindestens das 100-fache der Sondenauflösung (in diesem Fall 100 µS/cm) betragen. Geringere Unterschiede deuten auf zu geringe Salzmenngen, zu lange Mischungs-länge oder zu langsame Fließgeschwindigkeit hin. Zeit ist ein weiterer wichtiger Faktor. Die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Messwerten sollten für eine bessere Genauigkeit so gering wie möglich sein, wünschenswert sind Intervalle von einer Sekunde. Da aber nicht jedes Gerät so geringe Zeitintervalle unterstützt, wurden auch einige Messungen mit Intervallen von 5 oder 10 Sekunden durchgeführt. Die Aufzeichnung der genauen Zeit des Salzeintrags kann später zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit verwendet werden, indem die Zeitintervalle zwischen Start und erster Erhöhung oder zwischen Start und Spitzenleitfähigkeit (Peak) verwendet werden. Vor der Messung erfolgt die Kalibrierung: Es werden 500ml Strömungswasser entnommen und zuerst die elektrische Leitfähigkeit und

Temperatur bestimmt. Anschließend wird 1ml einer Kalibrierlösung injiziert (Kalibrierlösung mit 10 g/l NaCl-Konzentration) und die EC- und Temperaturänderung erneut gemessen. Diese Prozedur wurde 5-mal wiederholt. Aus den Messungen wird dann der Kalibrierfaktor (k) (HUDSON & FRASER, 2005) berechnet, der zur Berechnung des Durchflusses verwendet wird. Der Abfluss wird wie folgt berechnet (nach HUDSON & FRASER, 2005):

$$Q = \frac{M}{t_i * k * \Sigma(EC_t - EC_0)} \quad (1)$$

Q: Abfluss in (l/s)

M: Salzmasse in (mg)

t_i: Zeitintervall zwischen Einzelmessungen in (s)

k: Kalibrierungsfaktor

EC_t: elektrische Leitfähigkeit zum Zeitpunkt t in (μS/cm)

EC₀: elektrische Basisleitfähigkeit des Wassers in (μS/cm)

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit und Peak-Strömungsgeschwindigkeit werden wie folgt berechnet:

$$v = \frac{L}{t_1 - t_0} \quad (2)$$

v: Strömungsgeschwindigkeit (m/s)

L: Eingabelänge (m)

t_{1max}: Zeitpunkt des ersten EC-Anstiegs (s)

t_{1peak}: Zeit der Spitzenleitfähigkeit in (s)

t₀: Zeit des Salzeintrags (s)

Es gibt einige Fehlerquellen bei der Anwendung der Salztracer-Verdünnungsmethode in Oberflächenwässern. Die Salzmasse kann falsch abgewogen werden, oder es wird nicht das gesamte Salz aufgelöst und in den Strahl injiziert, z.B. weil etwas Salz im Gefäß zurückbleibt oder aus dem fließenden Wasser austritt. Da diese Fehlerquelle im Nachhinein kaum nachvollziehbar ist, sind genaue Abmessungen und Feldarbeit für exakte Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. Der Mischbecher muss unmittelbar nach der Injektion im Strom gespült und vor der nächsten Verwendung gereinigt werden. Aus der Literatur geht hervor, dass Salz von Vegetation in den Gerinnen zurückgehalten werden kann (Hudson & Fraser, 2005), sodass Gerinne mit hohem Vegetationsanteil dazu neigen, die Messung zu verfälschen. Kleine Becken in Wasserströmen können Salz zurückhalten, was zu einem langsamen Abstieg zurück zum Basis-EC und einem niedrigeren Peak (also einem langen Schwanz in der Messkurve) führt, der das Ergebnis verfälschen kann. Zu hohe Geschwindigkeiten in einer Strömungsabfolge, z. B. durch Rohre und Kanäle, die sich in der Vermischungslänge befinden, können zu einem zu raschen Durchgang des Salzes führen, wodurch die Maximalwerte der Durchgangskurve (peak-Werte) nicht ausreichend gut gemessen werden können. Auch die Prüfsonde selbst kann eine Fehlerquelle sein: Wird sie in einen sehr turbulenten Teil des Stromes eingebracht, kann der Messwert stark schwanken, was sich in der Messkurve ablesen lässt. Andererseits führt die Einbringung in Bereiche mit sehr geringer Fließgeschwindigkeit zum oben erwähnten langen Schwanz in der Messkurve und zu sehr langen Messzeiten. Es kann auch zu einem Messfehler durch die Sonde selbst aufgrund schlechter Kalibrierung oder Beschädigung kommen. Daher wurden in diesem Projekt die meisten Messungen mit zwei Messgeräten durchgeführt, um die vollständige Vermischung des eingefügten Salzes mit dem Bachwasser zu überprüfen. Auch eine Fehlerabschätzung kann durch die jeweils doppelte Messung mithilfe von 2 Geräten

erfolgen. Dabei wurde darauf geachtet, die beiden Geräte an jeweils anderen Uferseiten zu positionieren, um auch eine Abschätzung der Durchmischungsqualität liefern zu können.

Die Qualität der NaCl-Abflussmessungen variiert etwas von Messung zu Messung, aber abgesehen von einigen Ausnahmen befindet sich der Fehler im Bereich von etwa 5 %. Ein größerer Fehler ist bei Messungen von Subersach und Rubach sowie Messungen des Sägebachs, vor allem im Bereich von SG234 zu erwarten. Insbesondere bei der Kalibrierung der Radarmessstationen wurden unplausible NaCl-Messungen ausgesondert.

5.2.2. Abflussmessung mit der Eimermethode

Bei der Eimermethode handelt es sich um eine einfache Methode zur schnellen Bestimmung des Abflusses kleiner Oberflächenabflüsse. Ein Eimer wird verwendet, um das Bachwasser zu sammeln (vorzugsweise an einer erhöhten schmalen Stelle) und die Füllzeit wird gemessen. Sowohl die Wassermenge als auch die Zeit werden zur Bestimmung einer Abflussmenge in l/s verwendet:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

V: Wasservolumen (l)

t: Zeit in (s)

Q: Ableitung in (l/s)

Die Messung sollte mehrmals wiederholt werden, um einen mittleren Abfluss des Gerinnes zu berechnen. Zu kurze Messzeiten führen zu erhöhten Ungenauigkeiten.

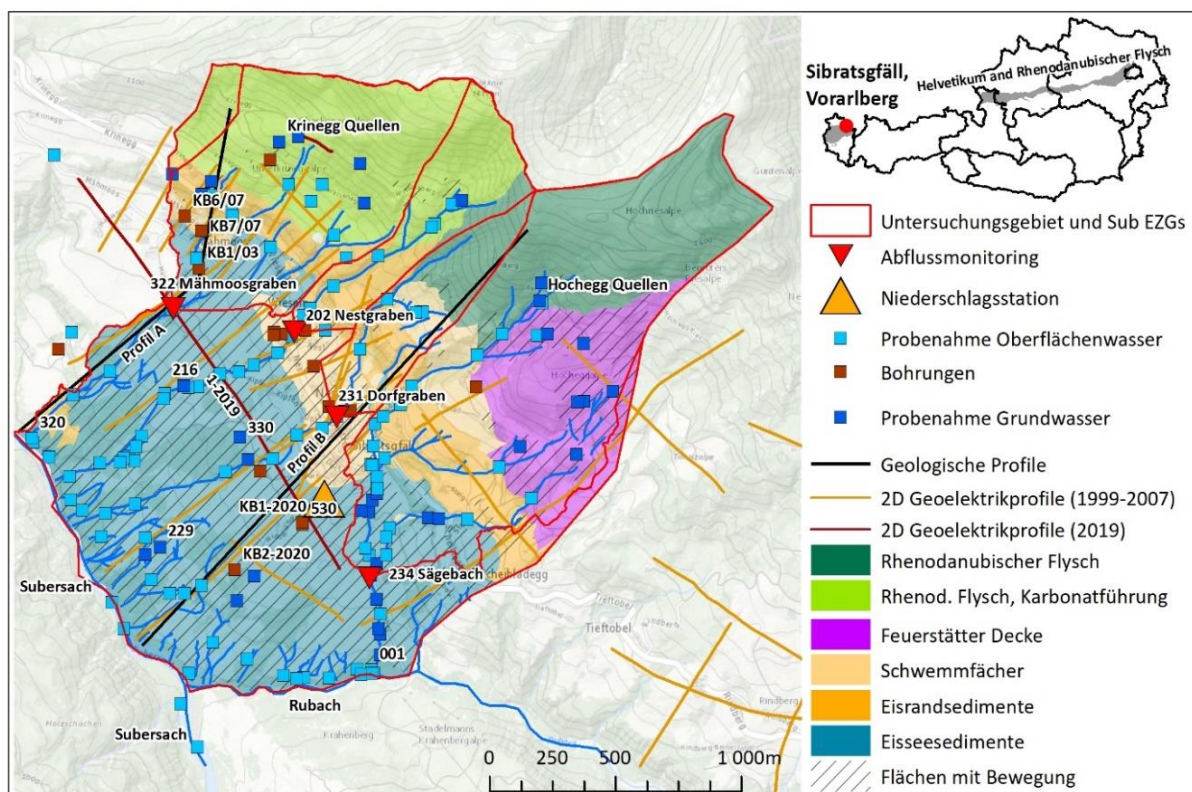


Abbildung 5.a: Untersuchungsgebiet mit Abflussmonitoring-Stationen, Probenahme-Stellen und Bohrungen. Übernommen von ELSTER et al. (2023).

5. 2. 3. Abfluss-Monitoring mittels Radarmessstationen im orografischen Einzugsgebiet

Zur Bestimmung des Abflusses der 4 Hauptbäche Sägenbach, Tobelbach, Nestgraben, Mähmoosgraben (im VORARLBERGER ATLAS, 2022 als Wiesalegraben bezeichnet) im Gebiet von Sibratsgfall wurden 4 Radarmessstationen eingerichtet. Die Installation und Wartung der Stationen übernahm das Team der Geologischen Bundesanstalt (GBA),

bestehend aus Daniel Elster, Martin Almer, Stefan Hoyer und Alexander Schriebl. Die Positionen der Stationen wurden so gewählt, dass sie leicht zugänglich sind und im unteren Teil des Untersuchungsgebietes liegen. In Folge werden die zugeordneten SG-Nummern der Messstationen verwendet (siehe Abb. 5a): SG202(Nestgraben), SG231 (Tobelbach), SG234 (Sägenbach), SG322 (Mähmoosgraben oder Wiesalegraben-lt. Vorarlberger Atlas). Die Stationen messen die Pegelstände der Bäche mit einem speziellen Radarsensor (Typ Vegapuls WL S61) mit einer Messgenauigkeit von $\pm 5\text{mm}$ (laut Datenblatt). Die Messwerte wurden auf einem CR200-Cel215 Campbell Scientific Datenlogger gespeichert. Die Stationen messen die Pegelstände in 10-Minuten-Intervallen. Für diese Arbeit wurden Messungen zwischen dem 1. Dezember 2019 und dem 30. November 2020 ausgewertet. Zusätzlich ist jede Station mit einem Thermometer ausgestattet, das die Lufttemperatur in 15-Minuten-Intervallen misst. Der gemessene Wasserstand muss mit den tatsächlich gemessenen Abflusswerten kalibriert werden, um den Abfluss bestimmen zu können. Dazu wurde die Salztracer-Methode, beschrieben in Kap. 5.2.1. verwendet. Es wurde eine Schlüsselkurve auf Basis einer Potenzfunktion erstellt, in der die gemessenen Abflüsse und die gleichzeitig gemessenen Wasserstände geplottet wurden. Dies führt zu einer Kurvenvergleichung, die es ermöglicht, jedem gemessenen Wasserstand einen berechneten Abfluss zuzuordnen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Extremwerte (Hochwasserereignisse und Basisabfluss) gelegt, um verschiedene Niederschlagsbedingungen abbilden zu können.

Unplausible NaCl-Messungen wurden weggelassen und unplausible Pegelwerte wurden korrigiert. Das Ergebnis sind berechnete Abflusswerte über die Zeit (in m^3/s), die über die Bestimmung der Flächen der orographischen Einzugsgebiete (in m^2) weiter in den spezifischen Abfluss (mm bzw. l/m^2) umgerechnet werden können. In dieser Form können Abflüsse direkt mit Niederschlag und Evapotranspiration verglichen werden. Das orographische Einzugsgebiet (siehe auch Abb. 5.b) der einzelnen Gerinne wurde von Daniel Elster aufbauend auf einem 10 m-Höhenmodell mit einer Kombination von Methoden des Hydrology Moduls des Spatial Analysts in ESRI ArcGIS ermittelt (Methoden Fill, Flow Direction, Flow Accumulation, Watershed). Eine weitere Validierung erfolgt durch Luftbilder, die Lage von bekannten Drainagen und Begehungen im Untersuchungsgebiet.

5.3. Evapotranspiration

Ein Teil des Wassers wird immer durch die Effekte von Evaporation (Verdunstung) und Transpiration (Verdunstung über Pflanzen) von der Oberfläche in die Atmosphäre übertragen. Dieser Prozess ist von vielen Parametern wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Luftdruck, Feuchtigkeit, Wind-, Boden- und Pflanzeigenschaften sowie verfügbare Wassermenge abhängig. Evapotranspiration (ET) wird mit 3 verschiedenen Ausdrücken dargestellt: Die potentielle Evapotranspiration (ETp) ist die Wassermenge, die unter optimalen Bedingungen und unbegrenzter Wasserversorgung verdunstet (SCHRÖDTER, 1985). Die tatsächliche Evapotranspiration (ETa) ist die tatsächliche Wassermenge, die durch Verdunstung und Transpiration dem System entzogen wird (SCHRÖDTER, 1985). Die Referenz-Evapotranspiration (ET0) beschreibt die Evapotranspiration von einer standardisierten Vegetationsfläche (Gras) mit uneingeschränkter Wasserversorgung (HASLINGER & BARTSCH, 2016).

Da ETa nur äußerst schwer und aufwendig zu ermitteln ist, wurde im vorliegenden Projekt versucht, näherungsweise über ETp und ET0 an ETa heranzukommen.

Ein Teil des Wassers wird immer durch die Effekte von Evaporation (Verdunstung) und Transpiration (Verdunstung über Pflanzen) von der Oberfläche in die Atmosphäre übertragen. Dieser Prozess ist von vielen Parametern wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Luftdruck, Feuchtigkeit, Wind-, Boden- und Pflanzeigenschaften sowie verfügbare Wassermenge abhängig. Evapotranspiration (ET) wird mit 3 verschiedenen Ausdrücken dargestellt: Die potentielle Evapotranspiration (ETp) ist die Wassermenge, die unter optimalen Bedingungen und unbegrenzter Wasserversorgung verdunstet (SCHRÖDTER, 1985). Die tatsächliche Evapotranspiration (ETa) ist die tatsächliche Wassermenge, die durch Verdunstung und Transpiration dem System entzogen wird (SCHRÖDTER, 1985). Die Referenz-Evapotranspiration (ET0) beschreibt die Evapotranspiration von einer standardisierten Vegetationsfläche (Gras) mit uneingeschränkter Wasserversorgung (HASLINGER & BARTSCH, 2016).

Da ETa nur äußerst schwer und aufwendig zu ermitteln ist, wurde im vorliegenden Projekt versucht, näherungsweise über ETp und ET0 an ETa heranzukommen.

5. 3. 1. Potenzielle Evapotranspiration

Ein Ansatz zur Abschätzung von ETp ist die im Hydrographischen Atlas Österreich (HAÖ, FÜRST et al., 2007) vorgestellte empirische Formel, die die Seehöhe (H) als einzige Variable verwendet:

$$ETp = 690,6 - 0,068 * H - 1,581 * 10^{-8} * H^3 \quad (4)$$

Mittels dieser Formel kann die potenzielle Evapotranspiration näherungsweise auf jährlicher Basis berechnet werden.

5. 3. 2. Referenz-Evapotranspiration

Auch für die Berechnung von ET0 gibt es mehrere unterschiedliche Formeln. In diesem Projekt wurden zwei Ansätze durchgeführt. Beide arbeiten mit der Hargreaves-Gleichung (HARGREAVES & SAMANI, 1985; HARGREAVES & ALLEN, 2003), aber mit unterschiedlichen Datensätzen. Die Hargreaves-Methode hat den Vorteil, dass nur zwei Parameter benötigt werden: Temperatur und extraterrestrische Strahlung (etr).

Die verwendete Form (aus HASLINGER & BARTSCH, 2016) der Hargreaves-Gleichung lautet:

$$ET0 = C * (T_{mean} + 17.78) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * R_a \quad (5)$$

C: Referenzparameter, festgelegt auf 0,0023 in HARGREAVES & ALLEN, 2003

ET0: Referenz-Evapotranspiration in mm/Tag

Tmean, Tmax und Tmin: Tagesmittelwert, Maximal- und Minimaltemperaturen in °C

Ra: Wasseräquivalent der extraterrestrischen Strahlung in (mm/Tag)

Diese Gleichung kann an verschiedene Höhenlagen und Jahreszeiten angepasst werden, wie bei HASLINGER & BARTSCH (2016) vorgeschlagen. Dies wurde in 2 Varianten getan, denen beiden die Hargreaves-Methode zugrunde liegt. Die erste Variante wurde von Johannes Hiebl von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt. Sie teilt das Untersuchungsgebiet in 60 50x50m-Felder ein. Jedem dieser Felder wurde ein Koeffizient C, abhängig von seiner Seehöhe und saisonalen Schwankungen, zugewiesen. Die Globalstrahlung wurde dem täglichen Temperaturmaximum und -Minimum genähert und nicht direkt gemessen (vgl. HASLINGER & BARTSCH, 2016).

Der zweite Ansatz nutzte die Temperaturmessungen der Radarsensoren (Typ Vegaplan WL 61). Sie haben die Lufttemperatur zwischen dem 6. November 2019 und dem 14. Dezember 2020 im 15-Minuten-Intervall gemessen. Daraus wurden für jeden Tag im Zeitbereich Tmean, Tmax und Tmin ermittelt. Da die extraterrestrische Strahlung (extraterrestrial radiation, kurz etr) in Sibratsgfall nicht direkt gemessen wurde, wurde sie aus den gemessenen Etr der nahegelegenen Stationen Alberschwende (16km von Sibratsgfall), Schopperrau (15km von Sibratsgfall) und Sulzberg (15km von Sibratsgfall) interpoliert. Die Daten stammten von der ZAMG (2020).

Die Etr-Daten der ZAMG in J/cm² wurden nach der folgenden, selbst entwickelten Formel in Wasseräquivalent R_a in l/m² umgerechnet:

$$R_a = \frac{R_{a0} * 10}{55,55 * H} \quad (6)$$

R_a: extraterrestrische Evapotranspiration in mm

R_{a0}: extraterrestrische Evapotranspiration in J/cm²

H: Standardverdampfungsenthalpie von Wasser in kJ/mol. Bei 7°C = 44,713 kJ/mol

55,55: Konzentration von Wasser in mol/L

Abgeleitet wurde die Formel aus der Verdampfungsenthalpie von Wasser. Verwendet wurde die Verdampfungsenthalpie des Temperatur-Jahresmittelwertes 7°C.

Der Koeffizient C wurde nach HASLINGER & BARTSCH (2016) auf Seehöhe und Jahreszeit angepasst (siehe Tab. 5a). Als Seehöhe wurde hierbei die mittlere Seehöhe des Einzugsgebietes der jeweiligen Bäche angenommen, saisonale Schwankungen wurden mit monatlich ändernden Koeffizienten modelliert.

5. 4. Lufttemperatur

Wie bereits erwähnt, war jede Radar-Abflussmessstation mit einem Thermometer zur Messung der Lufttemperatur ausgestattet. Diese Temperaturmessungen wurden zur Bestimmung von ETO im zweiten Ansatz verwendet. Die Thermometer waren jedoch nicht ausreichend gegen äußere Einflüsse wie Sonnenlicht, Kondenswasser und Bachwasser (in der Nähe des Thermometers) abgeschirmt. Zum Vergleich wurde ein weiteres Thermometer an der Krinegg-Quelle verwendet.

Dieses Thermometer war vom Sonnenlicht abgeschirmt, aber in der Nähe des Quellwasserreservoirs, was möglicherweise die Temperaturmessung beeinflusst.

	SG202	SG231	SG234	SG322
Januar	0,004	0,0038	0,0033	0,0033
Februar	0,004	0,0035	0,0033	0,0033
März	0,003	0,0028	0,0028	0,0028
April	0,0025	0,0023	0,0023	0,0023
Mai	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
Juni	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
Juli	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
August	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
September	0,0025	0,0023	0,0023	0,0023
Oktober	0,0028	0,0025	0,0028	0,0028
November	0,004	0,003	0,003	0,003
Dezember	0,0045	0,004	0,0033	0,0033

Tabelle 5.a: verwendete Werte für Koeffizient C, eingesetzt in die Hargreaves-Formel (Formel 5, HARGREAVES & ALLEN, 2003) in der ET₀-Berechnungsvariante 2, variierend nach Monat und Seehöhe, abgeleitet aus HASLINGER & BARTSCH (2016). Grundwert ist C=0,0023, wie von HARGREAVES & ALLEN (2003) angegeben.

Außerdem wurden als Vergleichsdaten tägliche Temperaturmessungen der Niederschlagsstationen Rindberg (bei Sibratsgöll), Schönenbach und Schopponau verwendet. Die Temperaturdaten der Stationen Schönenbach und Schopponau stammen vom HYDROGRAPHISCHEN DIENST VORARLBERG (2021), die vom Rindberg von der WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG SEKTION VORARLBERG (2021). Ausgehend von den Vergleichsdaten wurde anschließend ein systematischer Fehler der Temperaturmessungen an den Radarmessstationen ermittelt. Beruhend auf einem Jahresmittel dieses Fehlers wurden die Temperaturmessungen anschließend korrigiert.

5.5. Berechnung der Wasserbilanz

Mithilfe der gemessenen und berechneten Parameter wird eine Wasserbilanz erstellt, um in weiterer Folge zu ermitteln, ob bzw. wieviel Wasser in den Grundwasserspeicher zufließt.

Die allgemeine Formel für die Wasserbilanz lautet (nach HÖLTING, 2019):

$$N = A + ET + \Delta S \quad (7)$$

N: Verfügbarer Niederschlag (mit Schneehöhenkorrektur)

A: Abfluss

ET: Evapotranspiration

ΔS : Grundwasserspeicheränderung

Daraus folgt:

$$\Delta S = N - A - ET \quad (8)$$

Die Wasserbilanz wird auf monatlicher Basis von Dezember 2019 bis November 2020 (hydrologisches Jahr) in mm berechnet. Positive Werte bedeuten Zufluss in den Grundwasserspeicher (positive Speicheränderung), negative respektive Abfluss aus dem Grundwasser (negative Speicheränderung).

Ein Problem stellt diffuser Abfluss dar, der in diesem Zusammenhang als die Summe aus kleinen, kaum messbaren Oberflächengerinnen und oberflächennahem Abfluss (in den oberen Bodenschichten entlang dem Hang) definiert wird. Die Berechnung der Wasserbilanz erfolgt ausschließlich für den Bereich bis zu den installierten Radarmessstationen. In diesem Bereich ist der diffuse Abfluss sehr gering und wird zum Grundwasserspeicher dazugerechnet. In einem zweiten Schritt wird mittels NaCl-Messungen der Vorfluter von Subersach und Rubach versucht, den Gesamtabfluss aus dem Gebiet inklusive der Bereiche unterhalb der Radarmessstationen zu ermitteln und damit den diffusen Abfluss in den unteren Bereichen abzuschätzen.

Der Abfluss der Subersach wurde zweimal (am 17.06.2020 und am 12.12.2020) mit NaCl-Tracern oberhalb und unterhalb des Untersuchungsgebietes ermittelt. Die drei eingesetzten Messinstrumente wurden jeweils gegenüberliegend am Ost- und Westufer eingesetzt. Für die Berechnung wurden jeweils die orographischen Einzugsgebiete verwendet. Die untere Abflussmessung sollte, zumindest theoretisch, die Summe der oberen, des Ruhrbaches, der Abflüsse aus dem Untersuchungsgebiet, des diffusen Abflusses aus dem Untersuchungsgebiet sowie der Abflüsse der gegenüberliegenden Flusseite ergeben. Dieser Versuch liefert mehrere Probleme: Erstens ist vom Abflussverhalten des gegenüberliegenden Hanges fast nichts bekannt, dieser kann also nur flächenanteilig geschätzt bzw. über das Einzugsgebiet interpoliert werden. Zweitens beträgt die Summe der Schüttungen aus dem Untersuchungsgebiet nur einen Bruchteil (ca. 7 %) des Abflusses der Subersach, daher können schon kleine Messunsicherheiten zu großen Unschärfen führen.

Drittens wurden Messungen von Subersach und Rubach wie gesagt aufgrund des hohen Aufwandes nur zweimal vorgenommen, was zu hoher Unschärfe führen kann.

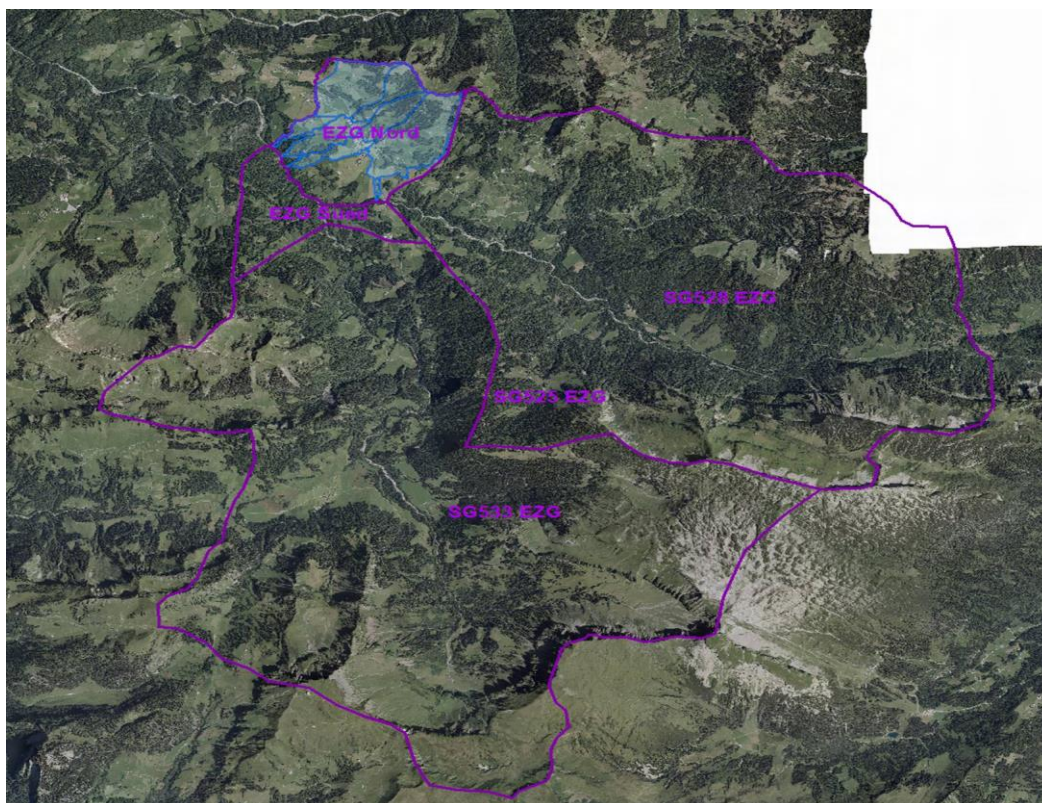


Abbildung 5.b: Karte orographischer Einzugsgebiete der einzelnen Messpunkte von Subersach, Rubach inklusive dem Untersuchungsgebiet (EZG Nord). Erstellt von D. Elster (siehe auch ELSTER et al., 2023).

5. 6. Isotopen- und Spurengasprobenahme

Zur Bestimmung von Herkunft und Alter des Wassers und insbesondere des Grundwassers wurden Isotopenuntersuchungen durchgeführt. Insgesamt wurden 134 Wasserproben entnommen. Beprobt wurden monatliche Niederschlagsproben, Oberflächenabflüsse, bereits vorhandene Inklinometerbohrungen, neue Bohrungen sowie Arteser und Quellen, darunter die Krinegg- und die Hocheggquelle.

Die Probennahmen erfolgten durch das Untersuchungsteam (D. Elster, M. Kralik, M. Almer, H. Nussbaumer, A. Schriebl, R. Holzschuster). Die Auswertung der Analysenergebnisse wurde von KRALIK (2022) durchgeführt und auf dessen Arbeit hier verwiesen wird.

5. 7. Hydrochemie

Insgesamt wurden zwischen Juli 2019 und Mai 2021 47 Wasserproben zur hydrochemischen Untersuchung entnommen.

Alle Wasserproben wurden im Feld filtriert ($<0,45\ \mu\text{m}$, Feinfiltermembran aus Cellulose). Feld-Temperatur, Feld-pH, Eh-Werte, Sauerstoffgehalt und elektrische Leitfähigkeit wurden mit verschiedenen WTW-Geräten vor-Ort gemessen: WTW pH 330 und pH 340i (pH), WTW Multi 3630 IDS und ProfiLine Oxi 3205 (Sauerstoff). Wichtige Anionen (Chlorid, Sulfat, Nitrat und Fluorid) wurden im Labor der GBA mittels Ionenchromatographie gemessen.

Das verwendete Gerät war ein DIONEX ICS-2000 mit einer Analysegenauigkeit von $\pm 3\%$. Die Bestimmungsgrenze lag zwischen 0,05 und 0,5 mg/l. Die HCO_3^- -Konzentrationen wurden nur über die Ionenbilanz berechnet und nicht direkt im Feld gemessen. Weitere Haupt- und Spurenelemente wurden mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) analysiert. Das verwendete Gerät war ein AGILENT Technologies Typ 7500 mit ASX-500 Autosampler, die Bestimmungsgrenze lag zwischen 0,01 und 0,0001 mg/l.

5. 8. Bohrungen

5. 8. 1. Neue Bohrungen

Neben der Besichtigung vorhandener Bohrungen wurden auch neue Bohrungen durchgeführt. Zunächst wurde im Rahmen des EXTRIG-Projektes ein auf Luftdruck basierendes Bohrverfahren getestet, durchgeführt von Wimmer Bergtechnik (Vorarlberg). Das Verfahren funktioniert, indem 3 m lange Stahlpfähle mit Luftdruck in den Boden gedreht werden. Die Stangen bleiben im Loch und haben einen Innendurchmesser von 16 mm, breit genug, um ein dünnes Rohr oder einen Schlauch zum Pumpen von Wasser einzuführen. Der Vorteil des Verfahrens ist der geringe Preis, der Nachteil ist der recht hohe Zeitaufwand für das Pumpen einer kleinen Wassermenge und die fehlende Möglichkeit, verschiedene Proben aus unterschiedlichen Tiefen zu gewinnen. Außerdem wird kein Bohrkern erhalten. Der Bohrversuch wurde in etwa 15 m Tiefe gestoppt und es wurden keine weiteren Versuche mit dieser Methode unternommen. In den Sommerkampagnen wurden Handbohrungen zur Beprobung der oberen Schichten durchgeführt. Dazu wurden hohle Stahlstangen von 1 m Länge mit einem Vorschlaghammer in den Boden geklopft und anschließend wieder herausgezogen. Das Ergebnis war ein Bohrkern von etwa 2 cm Durchmesser. Die Bohrungen gingen nur etwa 2 m tief in den Boden. Ziel war es, Bodenproben für Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der vertikalen Infiltration zu entnehmen. Im November 2020 wurden von der Firma Plankel Bohrtechnik (Wolfurt, Vorarlberg) zwei Rotationskernbohrungen durchgeführt.

Die Bohrungen erreichten Tiefen von 18,5m und 20m unter der Geländeoberkante (u. GOK). Die Bohrkerns wurden in Holzkisten verpackt und vor Ort dokumentiert. Die Kerne wurden außerdem zur $\delta^{18}\text{O}$ -Untersuchung beprobt: Eine Probe pro 10 cm für den ersten Meter in die Tiefe und eine Probe pro Meter für die folgenden Meter bis Bohrende. Die Proben wurden doppelt in luftdichte Plastikbeutel von der Marke Johnson Ziploc verpackt, um Verdunstung des Bodenwassers und den Kontakt mit atmosphärischem O_2 so weit wie möglich zu vermeiden.

Diese so gewonnen Proben wurden kühl und dunkel rasch an das analysierende Labor (Institute for Soil Physics and Rural Water Management (SoPhy), Universität für Bodenkultur) transportiert. Die Ergebnisse sind im Bericht (KRALIK 2022) dargestellt und interpretiert worden.

5. 8. 2. Erstellung von Grundwassertemperaturprofilen an vorhandenen Bohrlöchern

An noch auffindbaren Bohrlöchern im Untersuchungsgebiet wurden die Abstiche und deren noch bestehenden Bohrlochtiefen gemessen. Die meisten Bohrlöcher wurden als Inklinometer konstruiert, vgl. JARITZ (2013) und einige von ihnen wurden bereits durch unterirdische Hangbewegungen beschädigt oder unterbrochen. Grundwassertemperaturprofile wurden in 1 m-Intervallen im Zeitraum 2019 bis 2020 mehrmals erstellt: Im November 2019, im Februar 2020 und im Juni 2020. Dazu wurde ein elektrisches Kontaktmessgerät (Lotmeter Hydrotechnik Typ 110) mit Temperaturmessfunktion benutzt. Aus den Messreihen wurden anschließend Temperaturprofile erstellt, um Aufschluss über thermale Eigenschaften des Grundwassers zu geben.

6. Ergebnisse

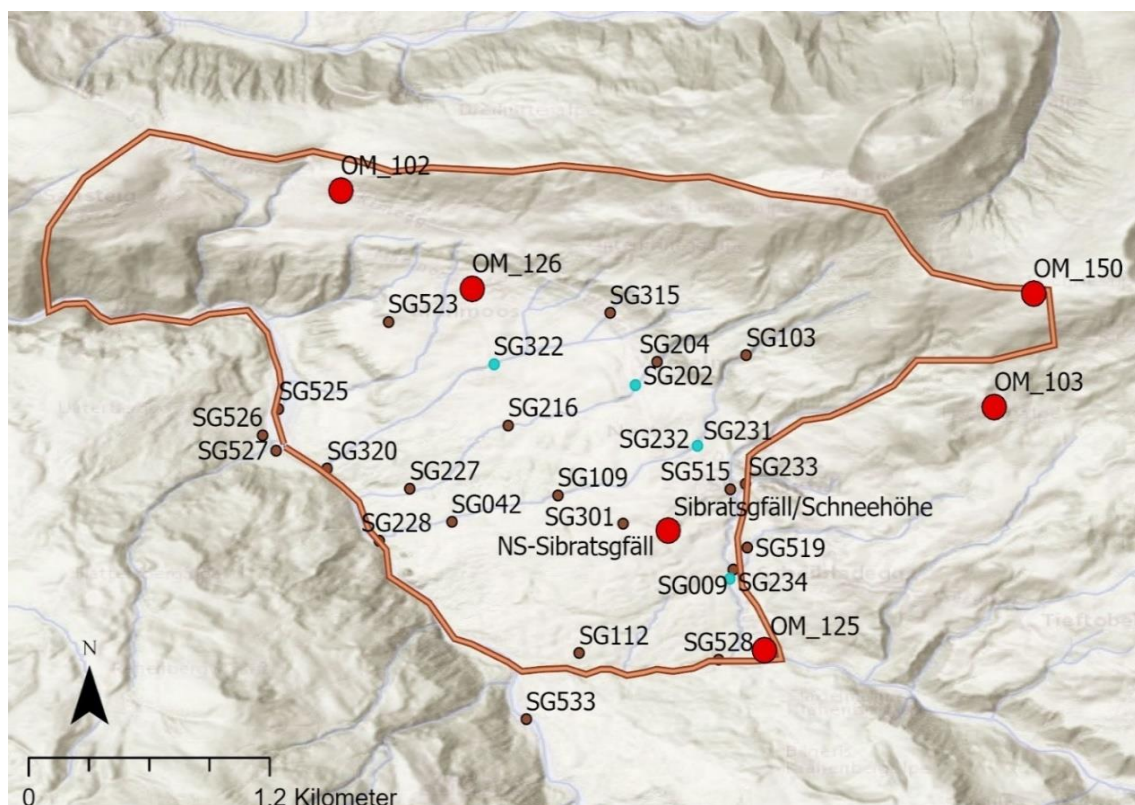


Abbildung 6.a: Untersuchungsgebiet mit allen NaCl-Messstellen (SG-Nummern, kleine Punkte. Radarmessstationen in türkis) und Niederschlagsmessstationen/Ombrometern (große rote Punkte).

6.1. Niederschlag

Die Niederschlagsstation Sibratsgfall ermöglicht durch ihre lange Aktivität einen direkten Vergleich unseres hydrologischen Jahres 2019-2020 (Dezember 2019-November 2020) mit den vergangenen 30 (1990-2019) Jahren, einschließlich Jahren mit Extremereignissen, wie das bekannte Katastrophenergebnis 1999 (siehe JARITZ, 2013; GMEINDL, 2007). Es ist anzumerken, dass die Messungen keine Schneehöhenkorrektur berücksichtigen, also immer einen Minderbefund zum wirklichen jährlichen Niederschlag darstellen. Der gemessene Jahresniederschlag der NS-Station Sibratsgfall beträgt von Dezember 2019 bis November 2020 2055 mm (ohne Schneehöhenkorrektur). Der Jahressummen-Median über 30 Jahre derselben Station beträgt 2127 mm. Das betrachtete Jahr 2019/20 liegt also leicht unter dem Median der letzten 30 Jahre. Wie in Abb. 6b.1. dargestellt, zeigt das Jahr 19/20 im Vergleich zum 30-jährigen Median einige Auffälligkeiten: Zum einen erhöhten Niederschlag in Februar und Juni, zum anderen besonders wenig Niederschlag im April und November. Abb. 6b.2. zeigt das Jahr 19/20 im Vergleich zu derselben Periode 98/99, dem Jahr der verhängnisvoll starken Niederschläge (JARITZ, 2013; GMEINDL, 2007) und 02/03, dem trockensten Jahr in Sibratsgfall seit 30 Jahren (Daten: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2020); www.ehyd.gv.at).

Der 30-Jahresvergleich der Wetterstation Sibratsgfall (906 m.ü.A.) mit den naheliegenden Station Schönenbach (6 km entfernt, 1040 m.ü.A.) und Schoppernau (12,5 km entfernt, 835 m.ü.A.) zeigt klare Übereinstimmungen zwischen den Niederschlagsmessungen (Abb. 6.c). Im Durchschnitt sind die Jahressummen in Schönenbach nur leicht höher als in Sibratsgfall, Schoppernau liegt allerdings um einiges darunter (Median Schönenbach: 2149mm, Median Sibratsgfall: 2127 mm, Median Schoppernau: 1893 mm). Leider stimmen die Messungen ausgerechnet in den Jahren 2019-2020 alles andere als gut überein. Während Sibratsgfall und Schoppernau 2019 hohe Niederschläge verzeichnete, die 2020 stark sanken, zeigen die Jahressummen der Schönenbacher Station einen Anstieg von einer auffallend niedrigen Jahressumme 2019 zu einer im 30-jährigen Vergleich plausiblen 2020. Zurückzuführen ist diese Entwicklung auf signifikant niedrigere Werte in Schönenbach ab Herbst 2019 bis Jänner 2020, wodurch die Jahressumme Schönenbach sehr ungewöhnlich niedrig ausfällt. Ein Vergleich mit den Totalisatormessungen (Tab. 6.a.) bestätigt die Wetterstationen Sibratsgfall und Schoppernau bezüglich der Jahressummen 2019 und 2020 weiter.

Aus dem Mittelwert der Jahresniederschläge der Niederschlagsstationen und der Totalisatoren der Jahre 1990 bis 2020 und der Höhenlage derselben wurde ein regionaler Höhengradient errechnet (siehe Abb. 6.c2). Dieser beträgt 63 mm/100Hm (Höhenmeter).

	Schönenbach	Sibratsgfall	Schoppernau	Rehenbergalpe	Hochrubalpe	Feuerstätter Sättle
Höhenmeter	1040	906	835	988	1517	1413
Messstelle	Niederschlag	Niederschlag	Niederschlag	Totalisator	Totalisator	Totalisator
Summe 2019	1893	2394	2108	1944	2547	2328
Summe 2020	1986	2055	1851	1652	1801	2178

Tabelle 6.a: Niederschlags-Jahressummen der Wetterstationen sowie der Jahrestotalisatoren für die Jahre 2019 und 2020. Es muss unterschieden werden zwischen diesen Jahressummen und den Summen aus dem hydrologischen Jahr Dezember 2019-November 2020, welche an anderer Stelle angegeben werden (Daraus resultieren z.B. die unterschiedlichen Werte von 2055mm und 2110mm für die Niederschlagsstation Sibratsgfall (Datenquelle: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2021)).

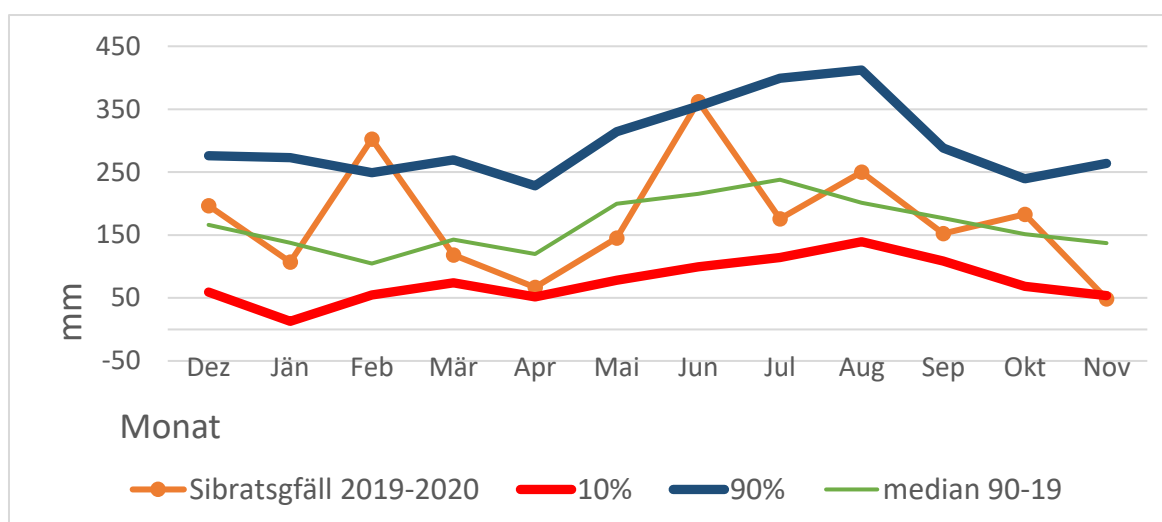


Abbildung 6.b.1.: Monatliche Niederschlagssummen der Wetterstation Sibratsgfall im Vergleich zum 30-Jahres-schnitt (1990-2019). Mit 10% und 90%-Perzentile. Daten: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2021).

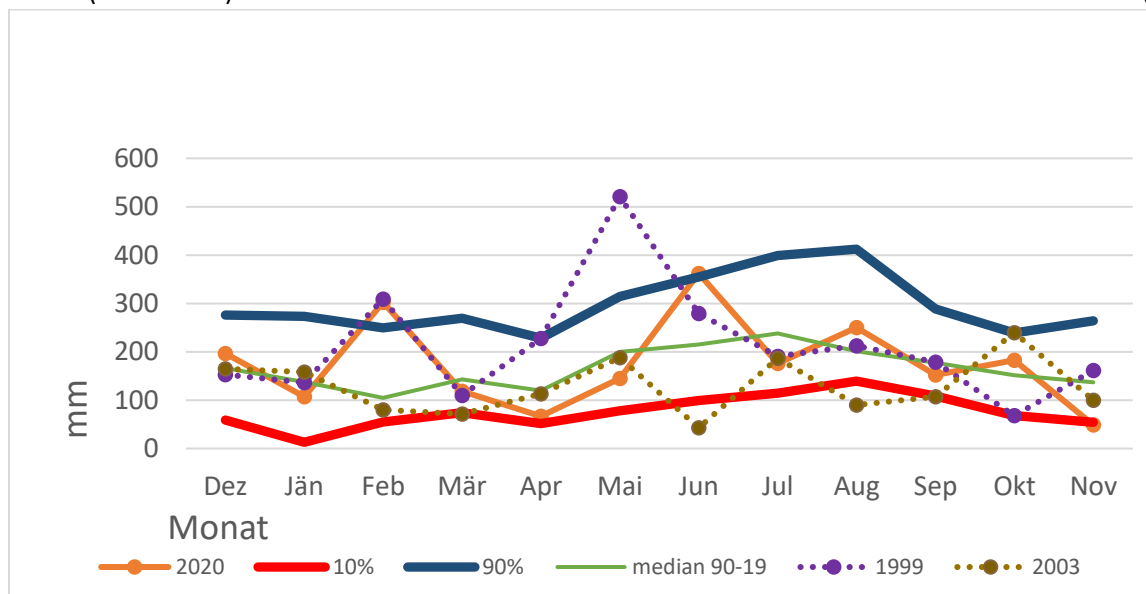


Abbildung 6.b.2: Monatliche Niederschlagssummen, Wetterstation Sibratsgfall, 2020 verglichen mit 1999 und 2003 (beide strichliert). 30-Jahresdurchschnitt im Hintergrund (Daten: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2021)).

Die neu aufgestellten Kipp-Ombrometer konnten leider nur wenig beitragen. Durch Ausfälle der Datenspeicherung sind nur Daten zu einem Bruchteil der Messperiode zur Auswertung geblieben. Daher können sie nur begrenzt als Vergleichsgröße für die Niederschlagsstation Sibratsgfall dienen, insbesondere im Hinblick auf den Niederschlagsunterschied in Abhängigkeit der Seehöhe. Es zeigt sich, dass die Ombrometer meist höhere Niederschläge messen als die tiefergelegene Wetterstation (Abb. 6.d). In Prozent ausgedrückt, misst OM 150, die höchstgelegene Station (1375 m.ü.A.) in der Zeit, in der Daten vorhanden sind, um 5% mehr Niederschlag als die Station Sibratsgfall. OM 103 (1180 m.ü.A.) misst um 17% höhere Niederschläge und OM102 (1011 m.ü.A.) 9% höhere Niederschläge im Vergleich zur Wetterstation. Bei dieser Berechnung wurden jeweils die Niederschlagssummen im selben Zeitraum verglichen. Aufgrund der mangelnden Datenlage ist das aber wie gesagt nur schwer abzuschätzen, da nur über kurze Zeiträume (maximal 3-4 zusammenhängende Monate) Daten von allen Ombrometern vorhanden sind. Wöchentliche und monatliche Niederschlagssummen (in mm) aller Stationen folgen im Anhang (Tab. II. und III).

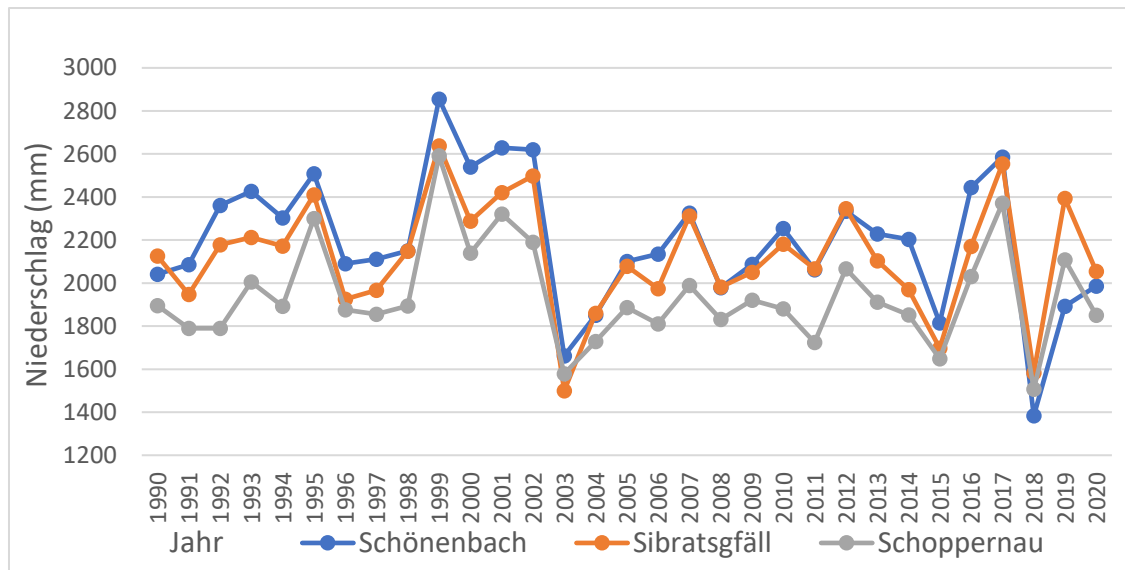


Abbildung 6c: Niederschlags-Jahressummen über 30 Jahre (1990-2020) der Messstationen Schönenbach (1040 m.ü.A), Sibratsgfall (906 m.ü.A.) und Schoppernau (835 m.ü.A.). Daten: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2021); ZAMG (2022).

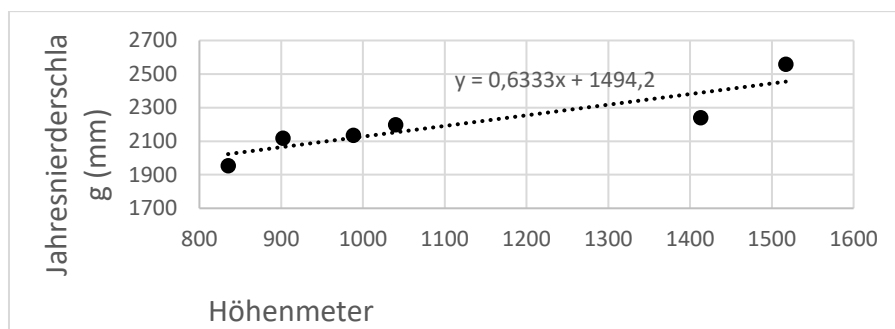


Abbildung 6.c.2: Regionaler Höhengradient, errechnet aus Jahresmittelwerten von 1990 bis 2020 der NS- Stationen Schönenbach, Sibratsgfall und Schoppernau sowie der Totalisatoren Rehenbergalpe, Hochrubalpe und Feuerstätter Sättel.

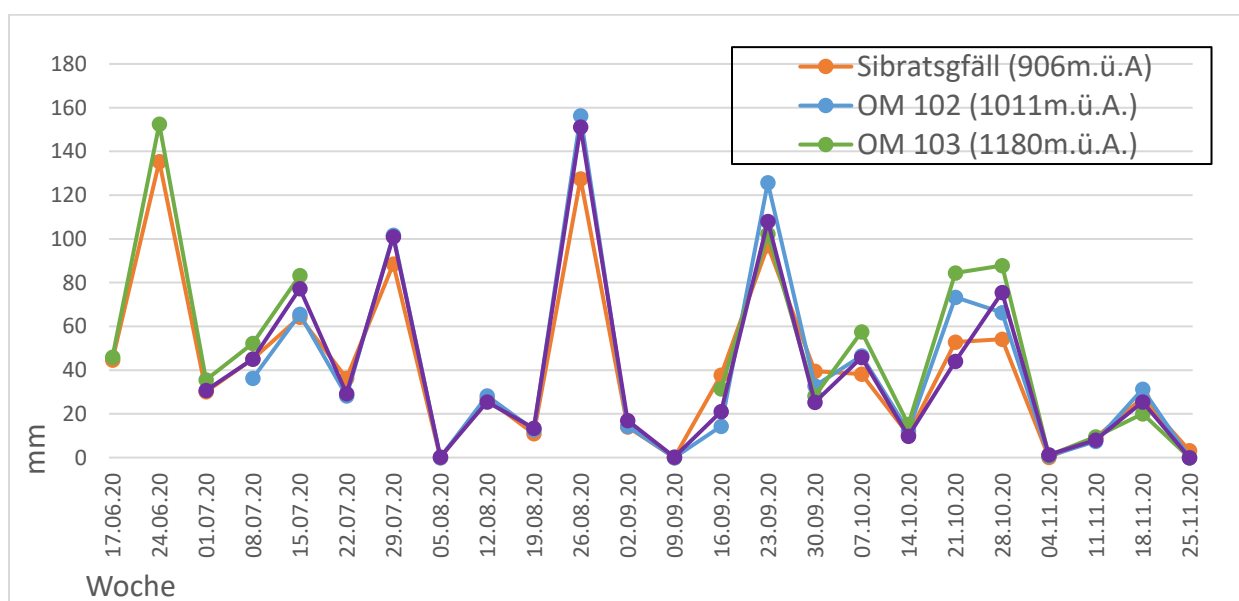


Abbildung 6.d: Vergleich der Wochensummen der Kipp-Ombrometer zu den Ombrometermessungen an der Station Sibratsgfall (Daten: Hydrografischer Dienst Vorarlberg)

6.2. Oberflächenabfluss

Insgesamt wurden 164 NaCl-Abflussmessungen an 28 Stellen im Untersuchungsgebiet durchgeführt (Tab. A1 im Anhang). Neben Zu- und Abflüssen der größeren Gerinne wurden dabei auch der Abfluss der Subersach oberhalb und unterhalb des Untersuchungsgebietes sowie des in die Subersach mündenden Rubachs und kleinerer Gerinne außerhalb des Gebietes (v.a. am gegenüberliegenden Hang) gemessen. Eine Auflistung der einzelnen Abflussmessungen folgt im Anhang.

Die 4 Messstationen an den Hauptgerinnen (Sägebach, Tobelbach, Nestgraben, Mähmoosgraben/Wiesalegraben) lieferten Daten im 10-Minutentakt vom 6./7.11. 2019 bis zum 14.12.2020. Nach Kalibrierung mittels der durchgeführten NaCl-Messungen wurden einzelne unplausible Messungen korrigiert. Dabei handelte es sich vor allem um Einzelereignisse mit plötzlichem starkem Pegelanstieg und-Abfall bei einzelnen Bächen (Messfehler oder kurze Bachbettveränderungen, z.B. kurzfristige Verklausungen), sowie regelmäßige Muster von Pegelveränderungen zu denselben Tageszeiten oder in bestimmten Perioden (vermutlich menschlich verursacht). Ein Großteil dieser Korrekturen betraf die Messstelle SG234.

Wöchentliche und monatliche Abflussmittel (in l/s) folgen im Anhang (Tab. A4 und A5).

Das Ergebnis ist ein durchgehendes Monitoring der Hauptgerinne, aus dem Abflusssummen auf täglicher, wöchentlicher, monatlicher und jährlicher Basis errechnet und verglichen werden können. Nach Berechnung des orographischen Einzugsgebietes der einzelnen Bäche wurde der errechnete Abfluss (in m³) in mm/Jahr und mm/Monat umgerechnet und mit dem Niederschlag verglichen.

Im direkten Vergleich zeigen die Abflussmessungen bezogen auf das Einzugsgebiet (in mm) einige Gemeinsamkeiten (Abb. 6f). Klar ersichtlich sind starke Zunahmen des Abflusses im Februar-März sowie im Juni, sowie ein starkes Tief während April und Mai. Auch im Oktober sind die Abflüsse auffallend erhöht. Trotzdem treten bei den Abflüssen bzw. Einzugsgebieten Unterschiede auf: SG234 und SG322 tendieren zu stärkeren Extremwerten und höherer Schwankungsbreite, während SG202 und SG231 relativ dazu geringere Schwankungen erfahren.

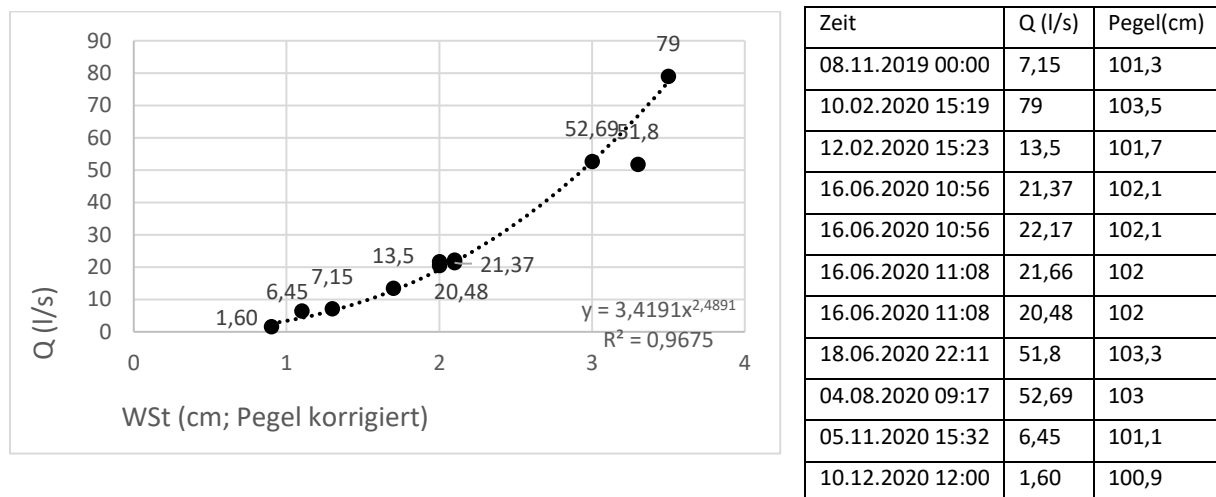
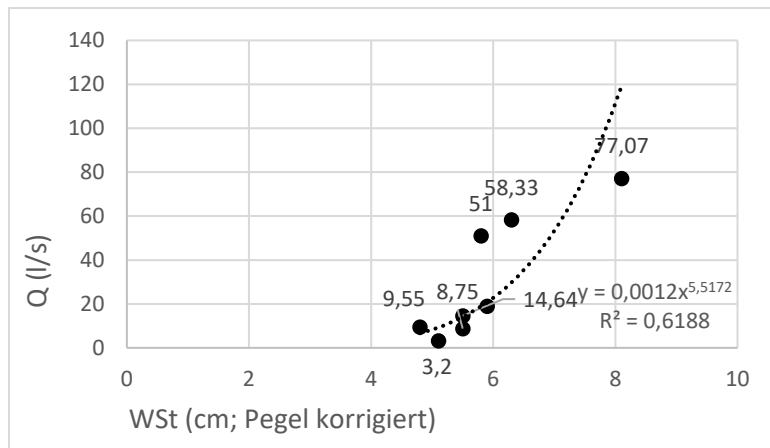
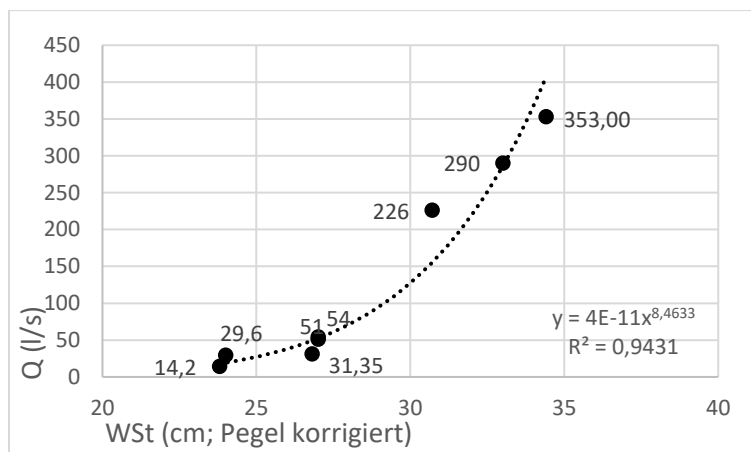


Abbildung 6.e.1: Schlüsselkurve mit Kurvenformel für SG202. X=Pegelstand in cm; Y=Abfluss in L/s zum selben Zeitpunkt. Tabelle 6b1. rechts gibt Datum, Uhrzeiten und Werte an. Erstellt in Zusammenarbeit mit D.Elster (Elster et al.,2023).



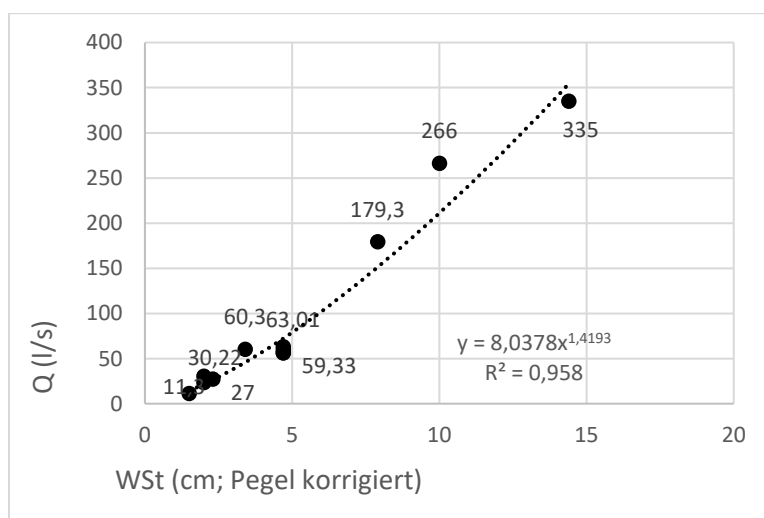
Zeit	Q (l/s)	Pegel(cm)
08.11.2019 09:33	9,55	104,8
10.02.2020 11:05	51	105,8
13.02.2020 09:52	14,64	105,5
16.06.2020 17:52	19	105,9
18.06.2020 21:30	77,07	108,1
05.11.2020 15:07	8,75	105,5
10.12.2020 11:10	3,2	105,1
04.08.2020 09:50	58,33	106,3

Abbildung 6.e.2: Schlüsselkurve mit Kurvenformel für SG231. X=Pegelstand in cm; Y=Abfluss in L/s zum selben Zeitpunkt. Tabelle 6b2. rechts gibt Datum, Uhrzeiten und Werte an. Erstellt in Zusammenarbeit mit D.Elster. (Elster et al.,2023).



Zeit	Q (l/s)	Pegel (cm)
08.11.2019 10:00	29,6	124
10.02.2020 10:28	226	130,7
10.02.2020 15:59	290	133
13.02.2020 12:40	54	127
13.02.2020 12:56	51	127
18.06.2020 21:50	353,00	134,4
05.11.2020 11:39	31,35	126,8
10.12.2020 10:35	14,2	123,8

Abbildung 6.e.3: Schlüsselkurve mit Kurvenformel für SG234. X=Pegelstand in cm; Y=Abfluss in L/s zum selben Zeitpunkt. Tabelle 6b3. rechts gibt Datum, Uhrzeiten und Werte an. Erstellt in Zusammenarbeit mit D.Elster. (Elster et al.,2023).



Zeit	Q (l/s)	Pegel(cm)
07.11.2019 12:00	27	102,3
08.11.2019 00:00	30,22	102
10.02.2020 14:35	335	114,4
12.02.2020 12:13	60,3	103,4
16.06.2020 12:50	56,25	104,7
16.06.2020 12:50	63,01	104,7
16.06.2020 13:04	56,09	104,7
16.06.2020 13:04	59,33	104,7
18.06.2020 22:29	266	110
05.11.2020 16:05	23,26	102
04.08.2019 08:50	179,3	107,9
10.12.2020 12:20	11,3	101,5

Abbildung 6.e.4: Schlüsselkurve mit Kurvenformel für SG322. X=Pegelstand in cm; Y=Abfluss in L/s zum selben Zeitpunkt. Tabelle 6b4. rechts gibt Datum, Uhrzeiten und Werte an. Erstellt in Zusammenarbeit mit D.Elster. (Elster et al.,2023).

6.2.2. Vergleich von Niederschlag und Oberflächenabfluss

Der direkte Vergleich der Sibratsgfäller Wetterstation mit den Abflussmessungen der einzelnen Bäche (Abb. 6h) zeigt leicht abweichendes Verhalten. Offenbar reagieren die Bäche verschieden auf die stärkeren Regenfälle in Februar und Juni: Während SG234 und SG322 stark anschlagen und teilweise fast dieselben Monatssummen wie der Niederschlag der Messstation erreichen, scheinen SG202 und SG 231 gedämpfter auf erhöhte Niederschläge zu reagieren. Im März sind die Abflüsse teilweise höher als der Niederschlag, ein ähnliches Muster erscheint auch Ende Oktober bis November.

Das detailliertere regionale Niederschlagsmonitoring der ZAMG ermöglicht es, jedem Bach einen Niederschlagssumme entsprechend seines Einzugsgebietes und dessen mittleren Seehöhe zuzuordnen (siehe Kap. 5.2 und Abb. 6g). Die Niederschläge fielen dadurch jeweils leicht höher aus als die Messungen der Station Sibratsgfäll. Aufgrund der fehlenden Schneehöhenkorrektur stellen die Niederschlagsmessungen der Wetterstationen und Kippombrometer im Vergleich zum realen Niederschlag Minderbefunde dar.

Die Schneehöhenkorrektur wurde ebenfalls von der ZAMG durchgeführt und jeweils an die verschiedenen mittleren Seehöhen der Einzugsgebiete der einzelnen Bäche angepasst.

Die ermittelte Schneehöhenkorrektur beträgt auf das Gesamtjahr gerechnet 15-21 %, in den Wintermonaten zwischen 26 und 79 %. Dabei wurde die Schneehöhenkorrektur an die Seehöhe des Einzugsgebietes angepasst. Das ist der Grund, warum die Schneehöhenkorrektur für das Einzugsgebiet von SG202 höher ausfällt (21 % verglichen mit 15 % bei den anderen Stationen). Tab. 6c zeigt das Einzugsgebiet und mittlere Seehöhe jedes Baches, sowie den Jahresniederschlag 2020. Bei der Schneehöhenkorrektur für den Niederschlag wurde bereits mit verfügbarem Schnee gerechnet.

	SG202	SG231	SG234	SG322	NS Sibratsgfäll
Einzugsgebiet (km ²)	0,311	0,296	1,027	0,752	-
Mittlere Höhe d. EZ-Gebiets (m.ü.A.)	1262	1108	1132	1080	906
Jahressumme (mm)	2202,3	2134,8	2135	2130,7	2109,3
Korrigierte Jahressumme (mm)	2760,4	2516,55	2530,59	2507,91	-
Schneehöhenkorrektur (%)	21	15	15	15	-

Tabelle 6.c: Einzugsgebiete der Hauptgerinne mit Niederschlagsjahressumme, schneehöhenkorrigierter Jahressumme, sowie Schneehöhenkorrektur in %. Zum Vergleich dazu die Niederschlagsstation Sibratsgfäll.

6.3. Lufttemperatur

Die Temperaturmessungen der 4 Radarmessstationen (in 15min-Intervallen) sind auffällig höher als die anderen Messungen (Tab. 6d). Sowohl im Winter als auch im Sommer beträgt der Unterschied 3-4 °C. Ende Juli 2022 wurden die Thermometer mit einem Handmessgerät verglichen und bestätigt, dass die Temperaturmessungen an den Radarmessstationen 2,7 bis 3 °C zu hoch ausfallen. Mit dieser Unschärfe schwanken auch die ETO-Berechnungen, die mit diesen Temperaturmessungen erfolgt sind, sprich Variante 2 der Hargreaves-Anwendung (siehe Kap. 6.4.2). Die Temperaturwerte wurden zur ETO-Berechnung gemäß dem gemessenen Offset im Juli 2022 angepasst. Diese Abweichung könnte einerseits von der anderen Positionierung der Thermometer (direkt an der Luft bzw. im Brückentunnel) abhängen, andererseits aber auch auf einen systemischen Fehler der Thermometer hinweisen.

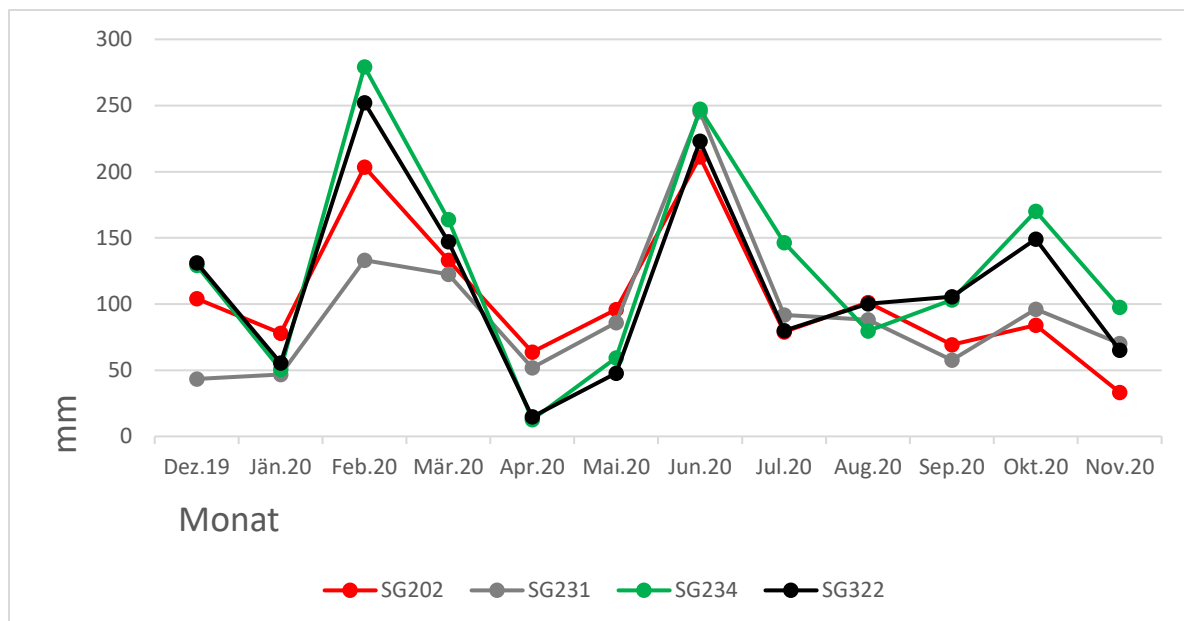


Abbildung 6.f: Monatliche Abflusssummen der Hauptgerinne in mm/Monat zwischen Dezember 2019 und November 2020.

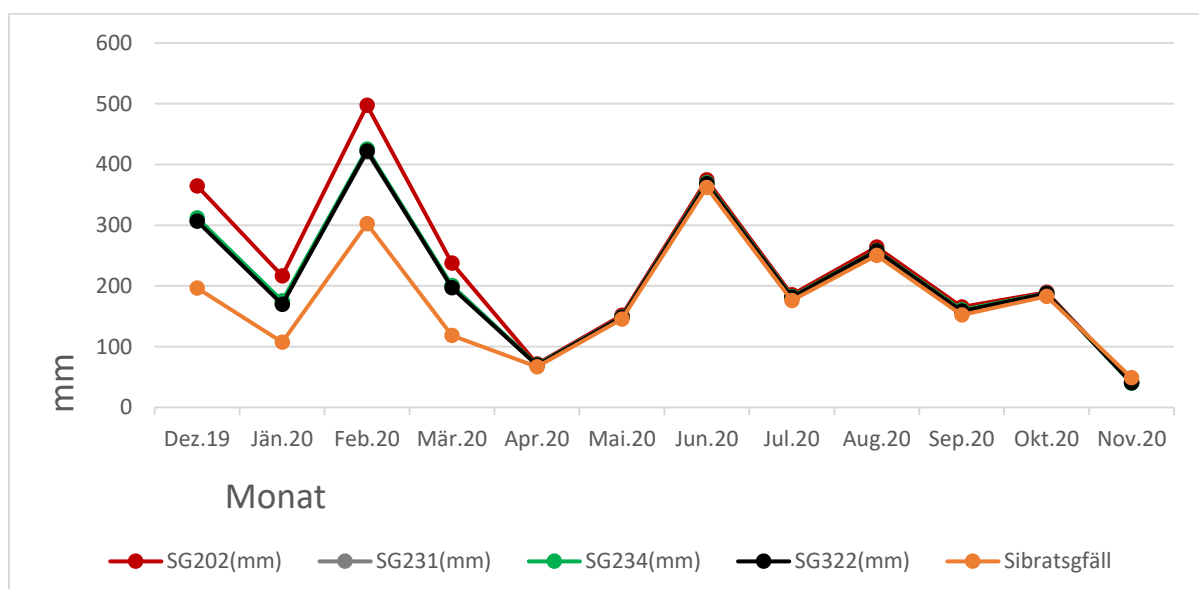


Abbildung 6.g: Mit SNOWGRID (siehe OLEFS et al., 2013) schneehöhenkorrigierte monatliche Niederschläge nach Einzugsgebiet der einzelnen Bäche (Daten: ZAMG, 2022). Zum Vergleich monatliche Niederschläge der Wetterstation Sibratsgfall, ohne Schneehöhenkorrektur (Daten: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG, 2021).

Messung	Rindberg	Schönenbach	Schopperrau	SG202	SG231	SG234	SG322	Krinegg-Reservoir
Datenquelle	ehyd	ehyd	ehyd	GBA	GBA	GBA	GBA	GBA ¹
Jahresmittel (°C)	6,82	6,26	6,86	10,42	10,79	10,68	10,56	7,09

Tabelle 6.d: Temperaturmessungen aus dem Jahr 2020 mit Jahresmittel und Datenquellen. SG202, SG 231, SG234 und SG322 noch ohne Offset-Korrektur.¹Bei der Messung an der Krineggquelle handelt es sich um einen Diver in der Nähe des Reservoirs. Ehyd: Hydrographischer Dienst Österreich GBA: Radarmesstationen der GBA (SG202, SG231, SG234, SG322), Tagesauswertung: D. Elster.

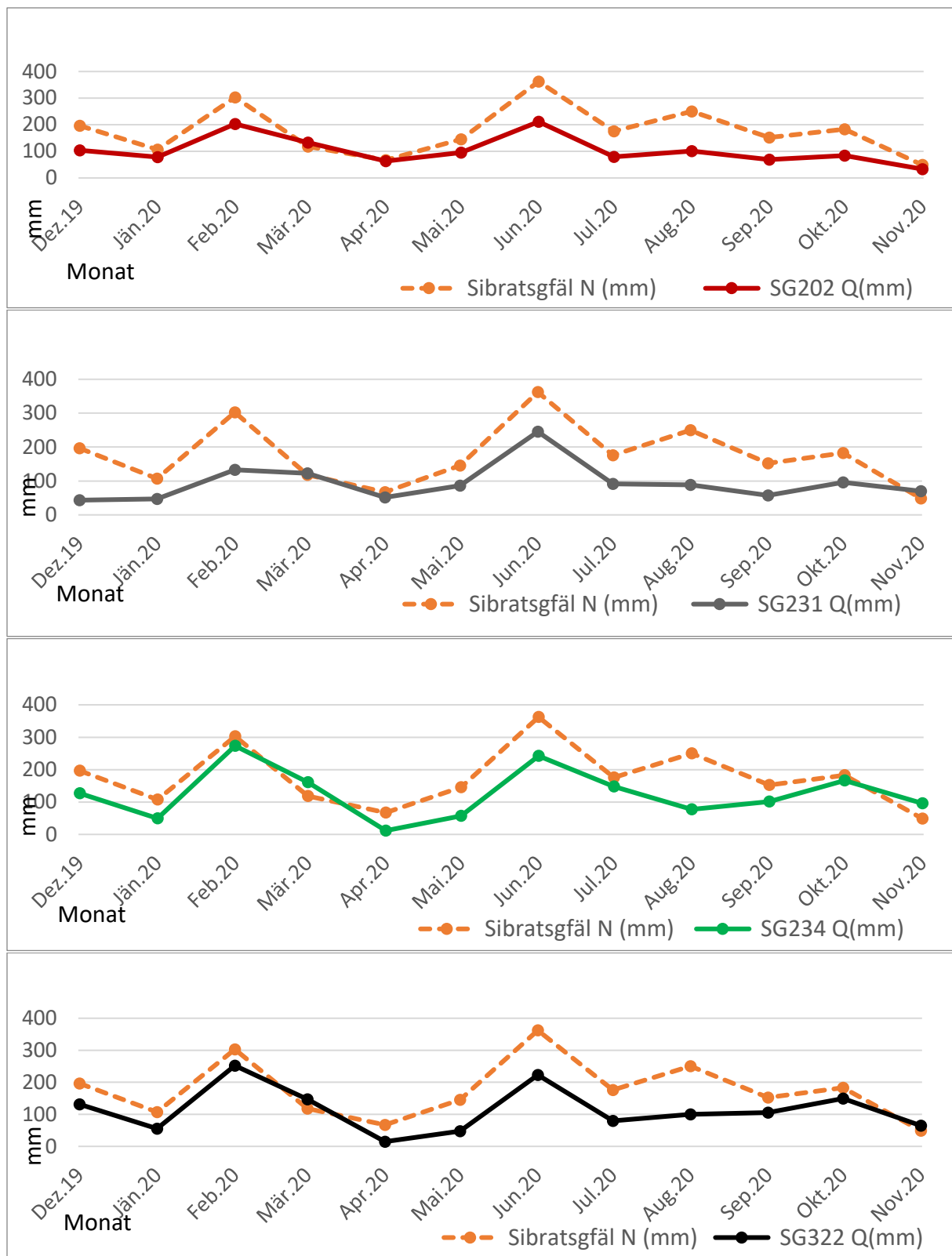


Abbildung 6.h 1-4: Monatliche Abfluss-Summen der Hauptgerinne in mm im Vergleich mit der Niederschlags-summen der Wetterstation Sibratsgfall (ohne Schneehöhenkorrektur, strichliert). Wöchentliche Abflusssummen folgen im Anhang (Abb. A3).

6.4. Evapotranspiration

6.4.1 Potenzielle Evapotranspiration

Die einfache Berechnung mit der Formel aus dem Hydrologischen Atlas Österreich (HAÖ, FÜRST et al., 2007) ergibt ETp-Werte zwischen 573 und 597 mm/Jahr (Tab. 6e) für das Untersuchungsgebiet. Diese Werte sind aber eher als ungefähre Richtwerte zu verstehen, um die Evapotranspiration im alpinen Bereich abzuschätzen. Die hieraus resultierenden ETp-Werte betragen zwischen 20 und 24 Prozent des Jahresniederschlags (mit Schneehöhenkorrektur).

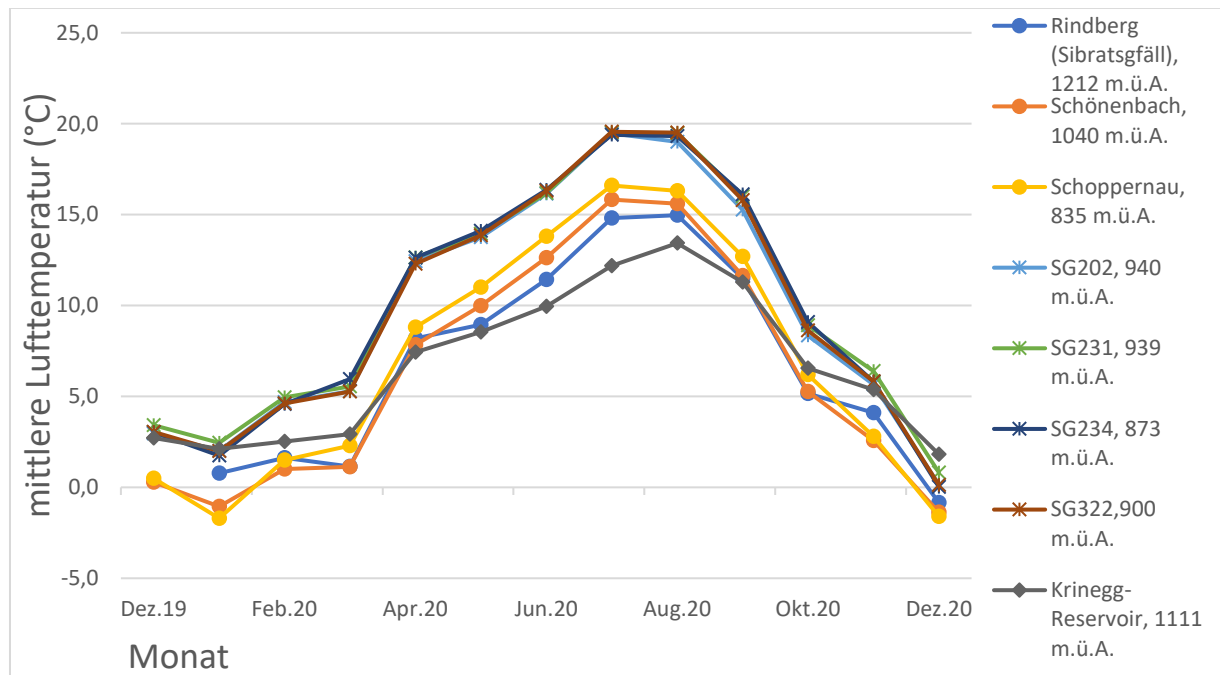


Abbildung 6.i: Lufttemperaturmessungen in und um Sibratsgfall im Vergleich. Mittelwerte pro Monat. Radarmessstationen (SG202,231,234,322) sind auffällig höher als der Rest. Datenquelle: siehe Tab. 6d.

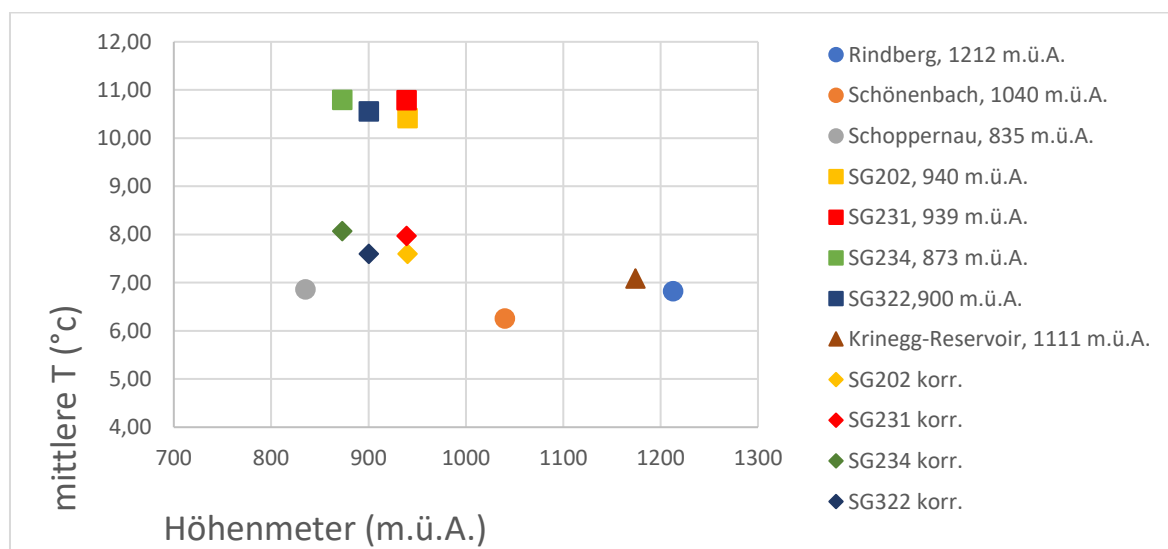


Abbildung 6.j: Lufttemperaturmessungen in und um Sibratsgfall, Jahresmittelwerte (hydrologisches Jahr Dez. 19-Nov. 20) nach Seehöhe. Datenquelle: siehe Tab. 6d. Bei den SG-Punkten wurden sowohl die ursprünglichen Messungen (z.B. SG202) als auch die um das offset korrigierten (z.B. SG202 korr.) berücksichtigt.

Einzugsgebiet	Mittlere Seehöhe (m.ü.A.)	ETp/Jahr nach HAÖ (mm)	Prozent des Jahresniederschlags
SG202	1262	573	20,76%
SG231	1108	594	23,6%
SG234	1132	591	23,35%
SG322	1080	597	23,8%

Tabelle 6.e: mittlere Höhen der Einzugsgebiete und die daraus berechneten ETp-Jahressummen nach HAÖ (FÜRST et al., 2007). Dazu dieselben Werte in Prozent des Niederschlages des jeweiligen Einzugsgebietes (mit Schneehöhenkorrektur, siehe Tab. 6c).

6.4.2. Referenz-Evapotranspiration (ET₀)

Die beiden Ansätze, das ET₀ mittels Hargreaves-Methode (HARGREAVES & SAMANI, 1985) zu berechnen, führten zu quantitativ unterschiedlichen Ergebnissen. Insgesamt fiel die Berechnung der ZAMG (Variante 1) höher aus, mit jährlichen ET₀-Summen zwischen 810 und 815mm (Tab.6f).

Der Versuch, die Hargreaves-Methode auf die (korrigierten) Temperaturmessungen der Radarstationen anzuwenden (Variante 2), ergab jährliche ET₀-Summen zwischen 509 und 547 mm. Abgesehen von der höheren Schwankungsbreite der Ergebnisse ist außerdem auffällig, dass das Einzugsgebiet von SG202 bei Variante 1 die höchste Summe lieferte, bei Variante 2 allerdings die niedrigste. Proportional passen die Ergebnisse aber relativ gut zueinander (Abb. 6k).

ET ₀ -Jahressumme	SG202	SG231	SG234	SG322	Median	Durchschnitt
ET ₀ -Variante 1 (mm)	815,40	810,60	811,60	810,50	811,10	812,03
ET ₀ -Variante 2 (mm)	543,33	578,95	564,24	562,03	563,14	562,14
ET ₀ -Variante 1 (%von N)	29,54	32,21	32,07	32,32	32,14	31,53
ET ₀ -Variante 2 (% von N)	19,68	23,01	22,3	22,4	22,35	21,85

Tabelle 6.f: Berechnete ET₀-Jahressummen nach Varianten 1 (ZAMG) und 2 (Radarstationen). Dazu dieselben Werte in Prozent des Jahresniederschlags des jeweiligen Einzugsgebietes mit Schneehöhenkorrektur (Datenquelle: ZAMG, HIEBL 2022).

Die ungefähren ET₀-Jahressummen mit HAÖ-Formel (FÜRST et al., 2007) liegen zwischen den beiden Berechnungen.

Werden Koeffizient und Globalstrahlung aus Variante 2 mit den Temperaturmessungen der ZAMG kombiniert, fällt das Ergebnis noch geringer aus als die beiden Varianten, da auch die ZAMG-Temperaturmessungen im Durchschnitt 3-4 °C geringer ausfallen als die Temperaturmessungen an der Radarstationen. Welche Parameter für den Unterschied verantwortlich sind wird in Kapitel 7 weiter diskutiert.

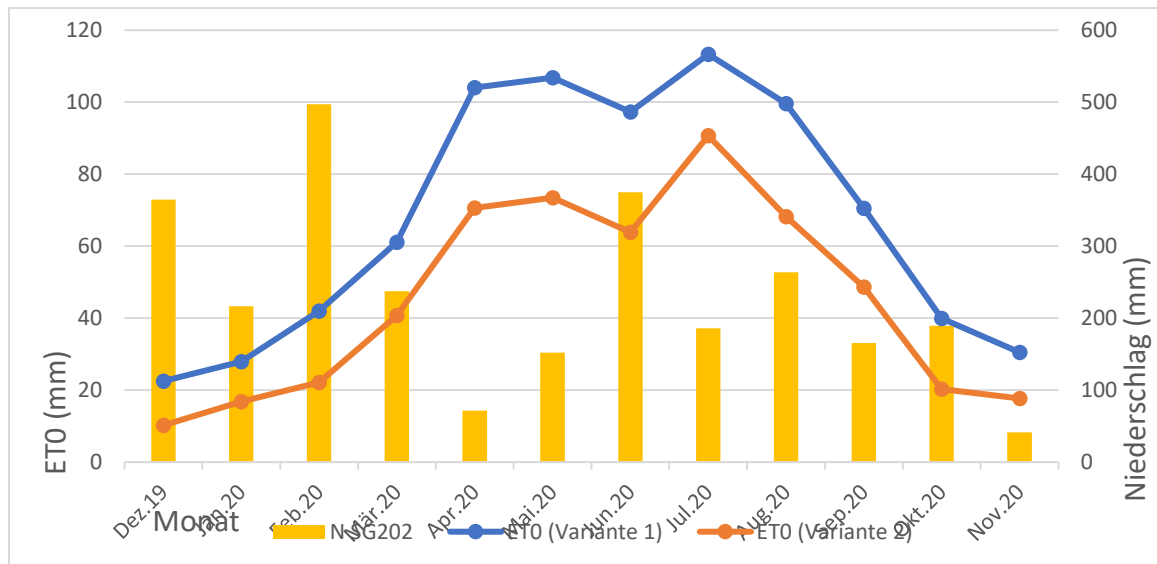


Abbildung 6.k: ET0-Monatssummen der Station SG202, ZAMG-Ansatz (Variante 1) und Ansatz mit Radarstationen-Temperatur (Variante 2) Im Hintergrund ist der Niederschlag des Einzugsgebietes (mit Schneehöhenkorrektur) in Säulen exemplarisch dargestellt. (Datenquelle: ZAMG 2022).

6.5. Wasserbilanz

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen kann eine Wasserbilanz für das Untersuchungsgebiet erstellt werden. Aufgrund der unterschiedlich ausfallenden Ergebnisse bei der Berechnung der Evapotranspiration wurde jeweils eine Wasserbilanz mit beiden Varianten erstellt. Beruhend auf der Wasserbilanzformel (Formeln 7 und 8) wurde dazu jeweils die Wassermenge berechnet, die in den Grundwasserspeicher infiltriert.

Für die monatlichen und jährlichen Berechnung beider Varianten wurden die korrigierten Werte der Niederschläge mit Schneehöhenkorrektur von der ZAMG verwendet und daher bereits verfügbarer Schnee miteingerechnet. In den Wintermonaten gelangt ein Teil des Niederschlages in den Schneespeicher, wodurch die hohen Werte der monatlichen Änderung der Grundwasserspeicher entstehen (siehe Kap. 7.5). Da aber im Untersuchungsgebiet keine andauernde Schneedecke herrscht, ist dies für die Jahresbilanz unerheblich: Der Schneespeicher schmilzt laufend ab und steuert dann entweder zum Abfluss oder eben zum Grundwasserspeicher bei. Nur die monatlichen Grundwasserspeicherzuflüsse der Wintermonate sind folglich mit Vorsicht zu genießen: Diese Werte entsprechen nicht der Menge, die tatsächlich in den Grundwasserspeicher einfließt, sondern der Menge, die in Grundwasserspeicher und Schnee zusammen eingespeist wird.

Der diffuse Abfluss, bestehend aus kleinen Oberflächengerinnen sowie oberflächennahen Abflüssen, wird im folgenden Abschnitt nicht in die Wasserbilanzrechnung miteinbezogen. Grund dafür ist, dass der überwiegende Großteil des diffusen Abflusses im Gebiet unterhalb der Radarmessstationen entsteht. Damit sind diese diffusen Ströme für die durchgeführte Wasserbilanzrechnung nicht relevant. Dazu hilft eine geologische Unterscheidung. Die Einzugsgebiete der Radarstationen werden im oberen Bereich von den Piesenkopfschichten und Reiselsberger Sandstein dominiert, im unteren Bereich von Eisrandsedimenten und Schwemmfächern. Unterhalb der Radarstationen herrschen dagegen vorwiegend Eisseesedimente vor.

Während im Einzugsgebiet der Radarstationen eher wenig diffuser Abfluss herrscht, sorgen die wenig permeablen Eisseesedimente für gespanntes Grundwasser und für zahlreiche kleine Austritte nahe der Subersach oder bereits oberhalb davon.

Beleg dafür sind mehrere kleine Quellen und eine Vielzahl kleiner Wasserläufe, die in die Subersach münden, aber nicht oder nur schwer mit Eimermessungen bestimmbar sind. Diese Austritte werden

von den Radarmessstationen folglich nicht erfasst. Da dies zum Großteil unterhalb der Radarmessstationen geschieht, sind diese Austritte für die Errechnung der Wasserbilanz nicht relevant. Die kleinen Quellaustritte sind aber Beleg dafür, dass Grundwasser unten an der Talsohle austritt, wahrscheinlich auch unterirdisch in die Subersach. Vor allem in der Sommerkampagne traten bei den NaCl-Messungen der Subersach Probleme auf.

Die Messergebnisse der Subersach fielen sehr unterschiedlich aus (siehe Tab. 6.g.1 und 6.g.2). Am Westufer wurden rund 5800 m³/s gemessen, am Ostufer dagegen über 7000 m³/s (wobei die Messung am Westufer letztendlich als wahrscheinlich richtig angenommen wurde, da zweifach gemessen). Auch zeigten die Messkurven selbst Unregelmäßigkeiten. Grund dafür könnten eine zu geringe Eingabelänge (290 m) aufgrund unterschätzter Strömung sein. Der geringe peak (um 50 µS/cm) deutet außerdem auf eine zu geringe Eingabemenge hin. Aber auch nach der ersten Messung einsetzende Regenfälle haben bestimmt nicht zur besseren Vergleichbarkeit des Ab- und Zuflusses der Subersach im Gebiet beigetragen.

				Messung 1			Messung 2		
	Bezeichnung	SG-Nummer	Einzugsgebiet (km)	l/s	% von SG525	mm/d	l/s	% von SG525	mm/d
A	unterer Subersach	SG525	83,98	<u>5822,8</u>	100,0	<u>6,0</u>	<u>5877,1</u>	<u>100,0</u>	<u>6,0</u>
B	Rubach	SG528	34,71	2253,6	38,7	<u>5,6</u>	2324,5	39,6	<u>5,8</u>
C	obere Subersach	SG533	43,05	2627,6	45,13	<u>5,3</u>	2413,9	41,1	<u>4,8</u>
D	Nestgraben	SG202	0,31	42,0	0,72	<u>11,7</u>	42,0	0,7	<u>11,7</u>
E	Dorfgraben	SG231	0,30	44,0	0,76	<u>12,8</u>	44,0	0,7	<u>12,8</u>
F	Sägebach	SG234	1,03	110,0	1,89	<u>9,3</u>	110,0	1,9	<u>9,3</u>
G	Mähmoosgraben	SG322	0,75	65,0	1,12	<u>7,5</u>	65,0	1,1	<u>7,5</u>
H	Südseite	SG 526,527,531, 529	2,05	93,0	1,6	<u>3,9</u>	93,0	1,6	<u>3,9</u>
	Differenz	A-(B+C+D+E+F+G+H)	6,22	587,6	10,1	<u>8,2</u>	784,7	13,4	<u>10,9</u>
	Differenz mit 10 % Korrektur	A*0,9-(B+C+D+E+F+G+H)	6,22	5,3	0,1	0,1	197,0	3,4	2,7

Tabelle 6.g.1: Bilanz der Subersachabflussmessungen am 17.06.2020. Angaben in l/s, % vom unteren Abfluss der Subersach (=SG 525) und mm/Tag. SG533=eingehende Subersach, SG528=Rubach. Südseite=gegenüberliegender Hang. Einzugsgebiete: D. Elster, siehe auch Abb. 5.b.

				Messung 1			Messung 2		
	Bezeichnung	SG-Nummer	Einzugsgebiet (km ²)	l/s	% von SG525	mm/d	l/s	% von SG525	mm/d
A	unterer Subersach	SG525	83,98	716,3	100,00	0,74	691	100,00	0,71
B	Rubach	SG528	34,71	175,4	24,48	0,44	175,4	25,38	0,44
C	obere Subersach	SG533	43,05	357,2	49,87	0,72	345,9	50,06	0,69
D	Nestgraben	SG202	0,31	1,60	0,22	0,44	1,6	0,23	0,44
E	Dorfgraben	SG231	0,30	6,78	0,95	1,98	6,78	0,98	1,98
F	Sägebach	SG234	1,03	13,4	1,87	1,12	13,4	1,93	1,12
G	Mähmoosgraben	SG322	0,75	13,1	1,82	1,50	13,1	1,89	1,50
H	Südseite	SG 526, 527, 531, 529	2,05	17,4	2,43	0,73	17,4	2,52	0,73
I	Differenz	A-(B+C+D+E+F+G+H)	6,22	131,5	18,36	1,83	117,5	17,01	1,63
J	Differenz mit 10 % Korrektur	A*0,9-(B+C+D+E+F+G+H)	6,22	59,9	8,36	0,83	48,4	7,01	0,67

Tabelle 6.g.2: Bilanz der Subersachabflussmessungen am 12.12.2020. Angaben in l/s, % vom unteren Abfluss der Subersach (=SG 525) und mm/Tag. SG533=eingehende Subersach, SG528=Rubach. Südseite=gegenüberliegender Hang. Einzugsgebiete: D. Elster, siehe auch Abb. 5.b.

6.5.1 Variante 1- Wasserbilanzberechnung mit ET0 nach Methode 1 (ZAMG)

Aufgrund höherer ET0-Werte gelangt weniger Wasser in den Grundwasserspeicher als in Variante 2 (Tab.6.h, Tab. 6.i). Die Werte schwanken stark, die Jahressummen des in den Grundwasserspeicher einfließenden Wassers in den einzelnen Einzugsgebieten betragen zwischen 209 und 688 mm.

In Prozent ausgedrückt, schwankt der Anteil, der in Variante 1 für das Storage übrigbleibt, bei den einzelnen Einzugsgebieten (in Jahressumme) zwischen 8 und 25 % des Jahresniederschlages. Grund für die starke Verteilung der Werte sind die sehr unterschiedlichen Abflussmessungen der Hauptabflüsse. Wieder zeigt sich hier das schon beobachtete Muster: SG234 und SG322 reagieren stärker auf Niederschlagsschwankungen und scheinen das Gebiet stärker zu entwässern, wodurch rein rechnerisch weniger Wasser in den Grundwasserspeicher gelangt. Auch saisonal zeigen sich starke Unterschiede: In Trockenzeiten wie April/Mai oder November sorgt der Basisabfluss für negative Werte beim Grundwasserspeicher.

Monat	SG202 (mm)	SG231 (mm)	SG234 (mm)	SG322 (mm)	Mittelwert	Median
Dez.19	238,30	242,35	163,88	154,01	199,63	201,09
Jän.20	110,66	98,69	99,91	88,01	99,32	99,30
Feb.20	251,89	245,66	110,13	128,50	184,05	187,08
Mär.20	43,19	17,39	-20,98	-10,62	7,24	3,38
Apr.20	-96,18	-85,11	-44,84	-48,15	-68,57	-66,63
Mai.20	-50,66	-44,04	-16,02	-5,95	-29,17	-30,03
Jun.20	66,12	25,84	29,20	47,01	42,04	38,11
Jul.20	-6,58	-24,22	-79,54	-13,24	-30,89	-18,73
Aug.20	62,88	69,91	81,00	57,63	67,86	66,39
Sep.20	25,65	31,05	-10,84	-17,57	7,07	7,40
Okt.20	65,63	53,27	-18,14	-0,46	25,07	26,41
Nov.20	-22,26	-57,93	-84,34	-53,36	-54,47	-55,64
Summe	688,63	572,86	209,42	325,81	449,18	449,18
Mittelwert	57,39	47,74	17,45	27,15	37,43	38,18
Median	53,03	28,44	-13,43	-3,20	16,16	16,90

Tabelle 6.h: Monatliche Änderungen des Grundwasserspeichers in mm, berechnet mit ET0 der ZAMG (Datenquelle ZAMG). Umrechnung in m³; l/s/km² und % folgt im Anhang (Tabelle A6). In den Wintermonaten ist zu beachten, dass der Schneespeicher in den Grundwasserspeicher inkludiert ist. Mittelwert bezeichnet das arithmetische Mittel aus den Messergebnissen, nicht eine Mittelung bezogen auf das Einzugsgebiet.

	SG202	SG231	SG234	SG322	Median	Mittelwert
N (mm)	2760,40	2516,55	2530,59	2507,91	2523,57	2578,86
ET0 (mm)	815,40	810,60	811,60	810,50	811,10	812,03
A (mm)	1256,37	1133,09	1509,56	1371,60	1313,99	1317,66
S (mm)	688,63	572,86	209,42	325,81	449,34	449,18
ET0 (% von N)	29,54	32,21	32,07	32,32	32,14	31,49
A (% von N)	45,51	45,03	59,65	54,69	52,07	51,09
S (% von N)	24,95	22,76	8,28	12,99	17,81	17,42

Tabelle 6.i: Jahressummen (des hydrologischen Jahres Dez. 2019 bis Nov. 2020) der einzelne Parameter aller Einzugsgebiete in mm und in Prozent vom Niederschlag. ET0 nach ZAMG-Ansatz. N=Niederschlag, A=Abfluss, S=Grundwasserzufluss.

6.5.2. Variante 2- Wasserbilanzberechnung mit ET0 über Radarstationen-T.

Wie in Tab. 6.j und 6.k ersichtlich, würde Variante 2 aufgrund geringeren ET0 eine stärkere Infiltration in den Untergrund bzw. den Storage bedeuten. Der Unterschied beträgt bei allen Einzugsgebieten etwa 10 % des Niederschlags. Damit schwanken die jährlichen Storage-Summen zwischen 20 und 35 % (gerundet). Ansonsten gilt dasselbe wie bei Variante 1 beschrieben.

Ein direkter Vergleich der beiden Varianten zeigt, dass sie in den Wintermonaten (aufgrund geringem ET0) beinahe gleichwertig sind (Abb. 6m).

Monat	SG202 (mm)	SG231 (mm)	SG234 (mm)	SG322 (mm)	Mittelwert (mm)	Median (mm)
Dez.19	250,58	253,42	174,76	167,10	211,46	212,67
Jän.20	121,75	107,49	111,89	100,26	110,35	109,69
Feb.20	271,74	265,39	126,07	150,94	203,53	208,16
Mär.20	63,53	37,95	-5,10	10,91	26,82	24,43
Apr.20	-62,79	-57,10	-18,95	-18,49	-39,33	-38,02
Mai.20	-17,34	-15,07	11,98	22,93	0,63	-1,55
Jun.20	99,58	55,91	56,53	78,51	72,63	67,52
Jul.20	16,05	-7,14	-57,50	6,31	-10,57	-0,41
Aug.20	94,24	92,25	103,79	81,79	93,02	93,25
Sep.20	47,51	48,21	4,88	1,34	25,49	26,20
Okt.20	85,30	70,56	-6,34	14,97	41,12	42,77
Nov.20	-9,45	-47,36	-75,06	-42,30	-43,54	-44,83
Summe	960,70	804,51	426,95	574,28	691,61	689,40
Mittelwert	80,06	67,04	35,58	47,86	57,63	58,32
Median	74,41	52,06	8,43	18,95	33,97	34,48

Tabelle 6.j: Monatliche Änderung des Grundwasserspeichers in mm, berechnet mit ET0 über korrigierte Radarstationen-Temperatur (Variante 2). Umrechnung in m³; l/s/km² und Prozent folgt im Anhang (Tabelle A7). In den Wintermonaten ist zu beachten, dass der Schneespeicher in den Grundwasserspeicher inkludiert ist. Mittelwert bezeichnet das arithmetische Mittel aus den Messergebnissen, nicht eine Mittelung bezogen auf das Einzugsgebiet.

	SG202	SG231	SG234	SG322	Median	Mittelwert
N(mm)	2760,40	2516,55	2530,59	2507,91	2523,57	2578,86
ET0(mm)	543,33	578,95	564,24	562,03	563,14	562,14
A(mm)	1256,37	1133,09	1539,40	1371,60	1313,99	1325,11
S(mm)	956,56	856,17	475,17	627,17	728,94	741,94
ET0 (% von N)	19,68	23,01	22,3	22,35	22,35	21,85
A (% von N)	45,51	45,03	60,83	54,69	50,10	51,52
S (% von N)	34,8	32	18	23	27,43	226,93

Tabelle 6.k: Jahressummen der einzelne Parameter aller Einzugsgebiete in mm und in Prozent vom Niederschlag. ET0 nach Radarstationen-Ansatz. N=Niederschlag, A=Abfluss, S=Änderung des Grundwasserspeichers.

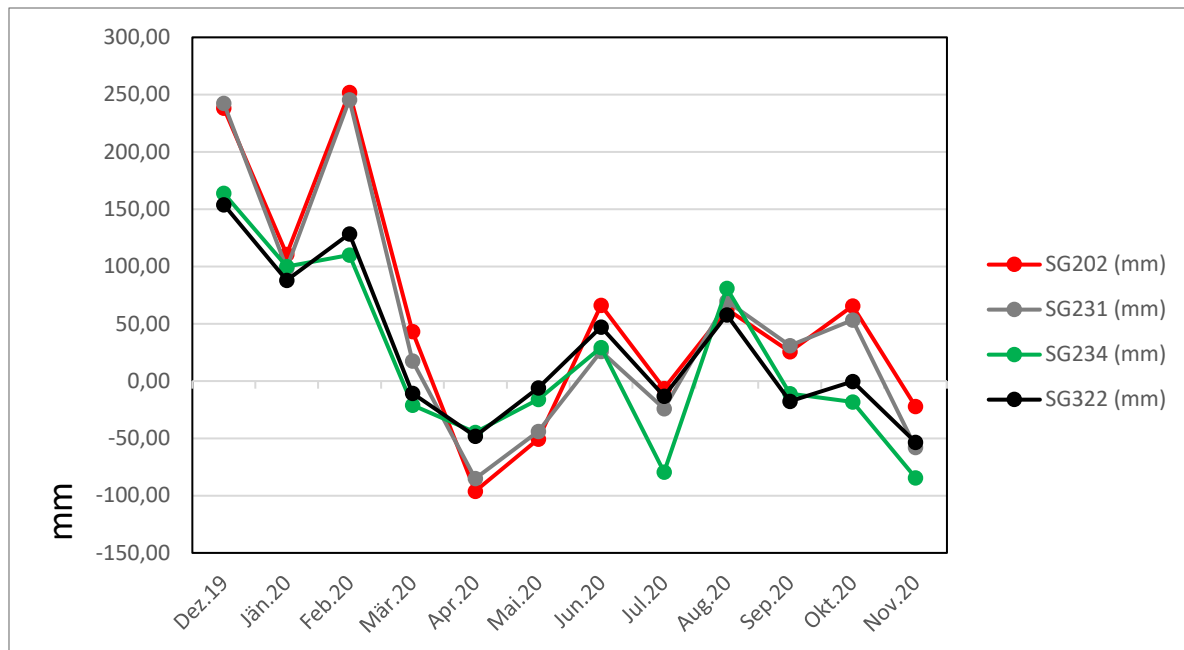


Abbildung 6.I: Speicheränderung-Monatssummen in mm der einzelnen Einzugsgebiete, berechnet nach ZAMG-ETO-Ansatz. In den Kältemonaten ist zu beachten, dass ein Teil der Speicheränderung auch dem Schneespeicher entspricht.

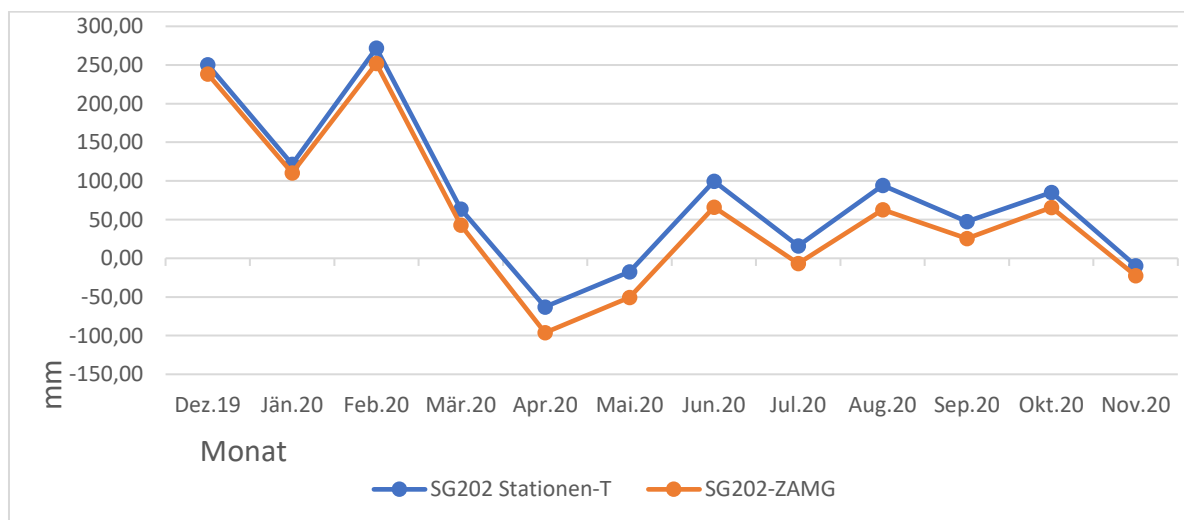


Abbildung 6m: Monatliche Grundwasserzufluss-Summen, Variante 1 (ZAMG) und Variante 2 (Messstationen-Temperatur) in mm.

6.6. Hydrochemie

Von den ursprünglichen 47 Hydrochemieproben scheinen 3 eindeutig anthropogen geprägt. Sie wurden im Piper-Plot (Abb. 6n) schwarz markiert. Die restlichen Proben zeichnen ein relativ einheitliches Bild. Der überwiegende Großteil der Proben lässt sich als Kalzium-Hydrogencarbonat-(Ca-HCO₃-)Wassertyp bestimmen (Typ 1a, erdalkalisch Ca-karbonatisch nach FURTAK & LANGGUTH, 1967). Der Rest weist allerdings einen höheren Magnesiumanteil (über 20%) auf und wird darum als Kalzium-Magnesium-Hydrogencarbonat- (Ca-Mg-HCO₃-)Wassertyp (Typ 1b, erdalkalisch Ca-Mg-karbonatisch nach FURTAK & LANGGUTH, 1967) bestimmt. Diesem Typ entsprechen der Großteil der Proben aus Bohrlöchern (9 von 11, siehe Anhang, Tab. X) sowie beide Proben der Hocheggquelle (SG334).

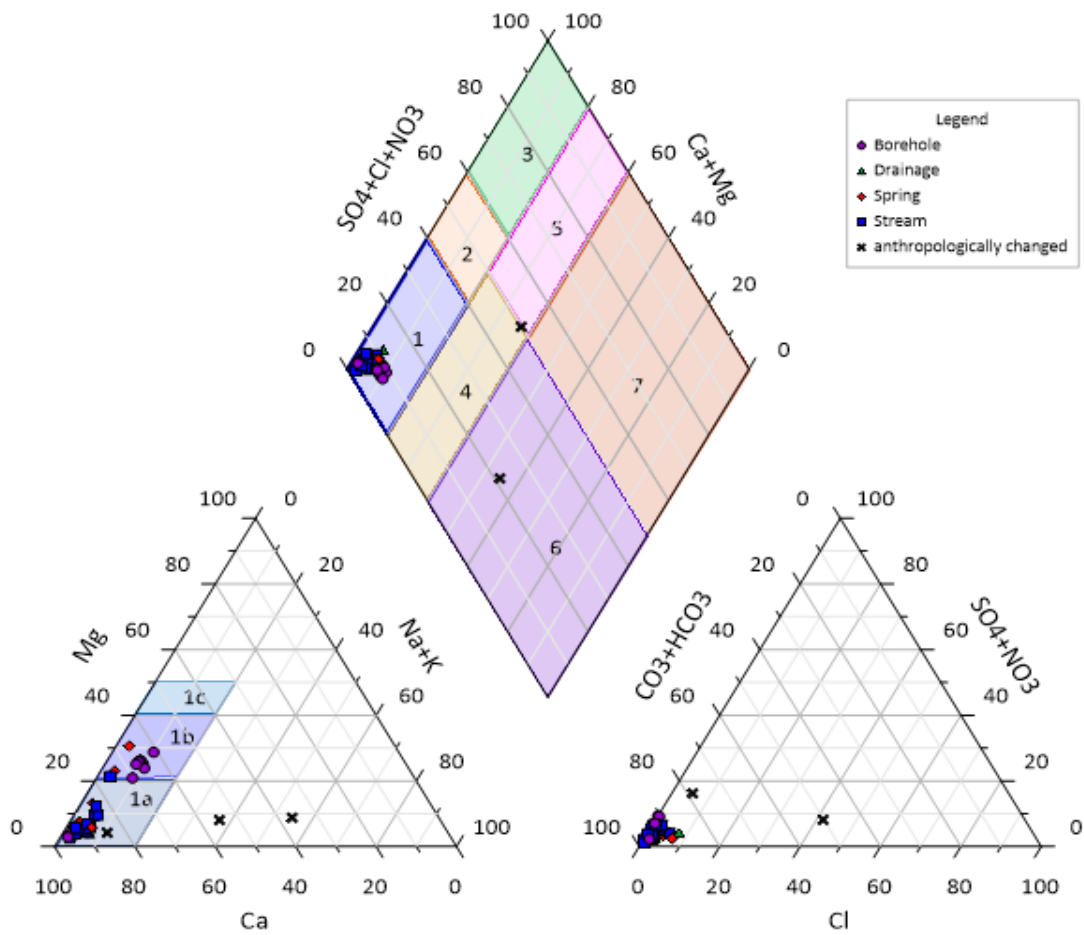


Abbildung 6.n: Plot der Hydrochemieproben nach Piper (1944), modifiziert mit Grundwassertypen nach FURTAK & LANGGUTH (1966).

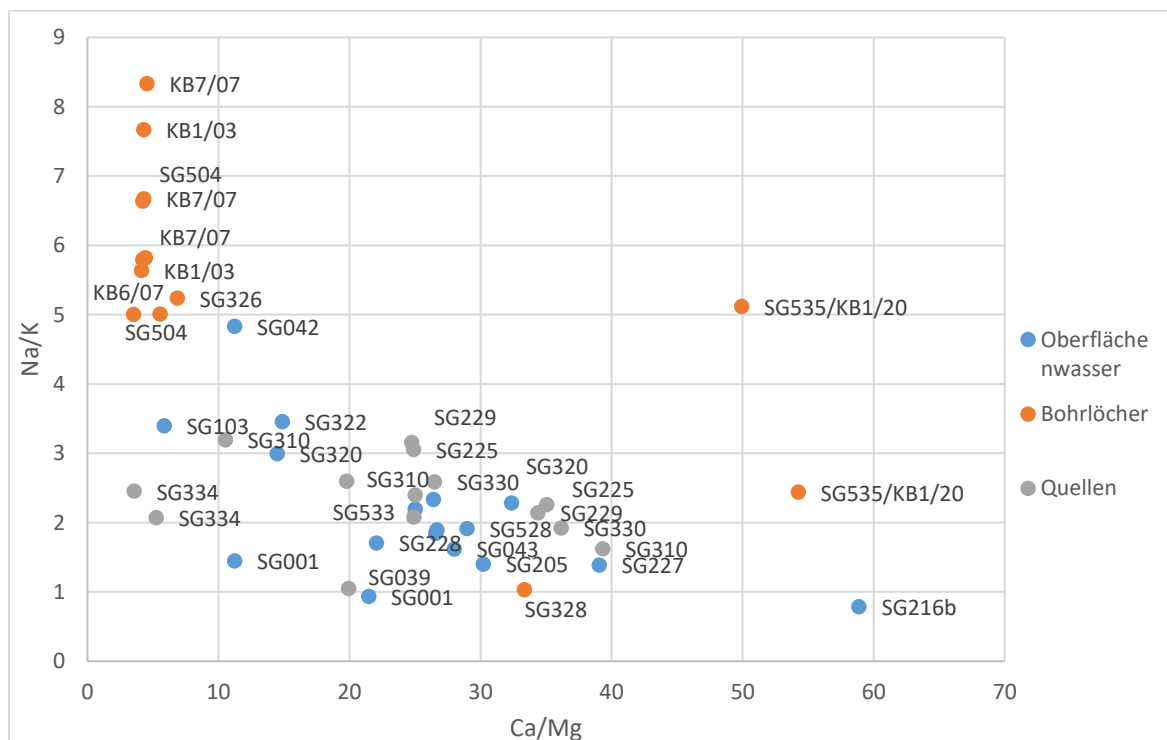


Abbildung 6.o: Na/K-Verhältnis (y-Achse) und Ca/Mg-Verhältnis der Chemieproben im Plot. Datenquelle: ELSTER et al., 2023.

Auch eine einzige Oberflächenwasserprobe (Sägebach, SG103, 23.07.19) entspricht diesem Subtyp, wenn auch mit 21 % (Grenzwert liegt bei 20%) Magnesiumanteil nur knapp.

Ein Plotdiagramm von Ca/Mag-Verhältnis und Na/K-Verhältnis (Abb. 6o) zeigt eine klare Feldbildung der Bohrlochproben (links oben, Na- und Mg-reich) und Oberflächen-sowie Quellwasserproben (mittig unten, Ca-reich und ausgeglichenes Na/K-Verhältnis).

Eine erstellte Korrelationsmatrix (Anhang Tab. IX) zeigt starke Korrelationen (0,8-1) von Magnesium mit Natrium, Silizium und Sulfaten, die allesamt in den Bohrlochproben höher angereichert sind als in Proben aus Oberflächenwasser oder oberflächennahen Quellen. Kalzium hingegen korreliert nur mit Hydrogenkarbonat und Chlor im vergleichbaren Bereich.

6.8. Bohrungen

Neue Bezeichnung	Alte Bezeichnung
SG322	KB01/07
SG326	KB02/07
SG327	KB03/07
SG328	KB02/03
SG503	KB05/07
SG504	KB06/07
SG535	KB1-2020
SG536	KB2-2020

Tabelle 6.I: Bohrlöcher, alte und neue Bezeichnungen. Nicht alle alten Bohrlöcher (siehe Abb. 3a) wurden ange-funden bzw. konnten beprobt werden, folglich haben nicht alle eine neue (SG-)Bezeichnung erhalten.

6.8.1. Neue Bohrungen

Die Bohrung am Standort KB1-2020 (SG535) erreichte eine Tiefe von 18,45m. Der Bohrkern zeigt bis 5 m Tiefe schlecht sortierte Lagen aus sandigem Siltkies, unterbrochen von kurzen Lagen (40-50 cm mächtig) mit höherem Siltanteil. Die grobkörnigen Bestandteile sind angerundet bis gut gerundet.

Ab 5m folgt eine Lage aus tonigem Silt, die, obwohl nur geringmächtig (30cm), die obere Grenze eines Grundwasserleiters darstellt. Dieser Grundwasserleiter aus sandigem Fein-Mittelkies reicht bis 7,6 m, wo er wiederum durch eine dünne siltige Tonschicht (40 cm) abgelöst wird.

Ab 8m folgen wieder Wechsellagen aus Ton- und Silt-Lagen sowie seltener werdenden kiesdominierten Lagen. Zwischen 9 m und 11 m befindet sich eine mittelkiesige Siltschicht mit erhöhter Wassersättigung. Ab 11 m folgt eine kiesdominierte Lage. Ab 14 m bis zum Ende des Bohrkerns zeigt sich eine schlecht sortierte, siltdominierte Lage mit Ton-Sand- und Kieskomponenten.

Ein anderes Bild zeigt die Bohrung KB2-2020 (SG536), die weiter unten am Hang stattfand. Sie erreichte eine Tiefe von 20 m. Hier ist schon ab 0,67 m eine stark wasserführende, sandige Siltkiesschicht zu beobachten, die bis ca. 1m hinunterreicht und oben und unten von etwas dichteren Tonlagen (mit immer noch erheblichem Siltanteil und geringer Kieskomponente) abgeschlossen wird. Zwischen 1,30 m und 2m liegt eine silt- und kiesdominierte Lage mit starkem Grobkiesanteil und einzelnen abgerundeten Steinen, die teilweise (1,50 m bis 1,70 m) verstärkt wassergesättigt ist. Insgesamt erscheinen die ersten 2m eher homogen, mit leicht wechselnden Prozentanteilen der Korngrößen. Auffällig sind die besagten wassergesättigten Lagen.

Es folgt eine lange Abfolge von Silt -und Tonlagen mit immer geringer werdenden größeren Komponenten (Sand, Kies). Ab 10 m verschwinden Sand- und Kieskomponenten beinahe zur Gänze, und eine mächtige Silt-Tonabfolge folgt.

Erst noch siltdominiert, wird diese zunehmend zu einem homogenen Silt-Tongemisch. Bis zum Abbruch der Bohrung bei 20 m gibt es keine nennenswerten Veränderungen mehr.

Beide Bohrprofile werden im Anhang beigefügt (Abb. A.3). Ebenfalls im Anhang finden sich eine Detailbeschreibungen der Bohrkern (Tab. X.a, X.b). Die Kornsummenkurven (Abb. 6.p und 6.q) und die daraus errechneten kf-Werte (Tab.6.m1 und 6.m2) wurden aus ELSTER et al. (2023) übernommen.

Von beiden Bohrkernen wurden ausgesuchte Proben entnommen. An diesen wurden Untersuchungen zur Korngrößenverteilung nach ÖNORM B4401 durchgeführt (Abb. 6p und 6q; durchgeführt von ELSTER et al., 2023). Auch kf-Werte wurden nach BEYER (1964) und BIALAS & KLECZKOWSKI (1970) bestimmt (siehe Tab.6l.1 und 6l.2; durchgeführt von ELSTER et al., 2023).

Tiefe	Bezeichnung	Kies	Sand	Silt	Ton	kf nach Beyer(m/s)	kf nach Bialas (m/s)
0-0,9m	<i>sandiger Siltkies</i>	49,5	19,6	21,4	9,5	3,10E-08	9,40E-08
0,9-3,5m	<i>sandiger Siltkies</i>	47,4	21,5	20,7	10,5	2,00E-08	7,10E-08
3,5-3,7m	<i>siltig-sandiger Kies</i>	67,5	14,1	12,2	6,2	1,90E-07	2,20E-05
4,0-4,6m	<i>siltiger Sandkies</i>	55,3	26,6	12,8	5,2	3,00E-07	2,50E-05
5,0-5,3m	toniger Silt	2,6	4,0	78,2	15,1	1,20E-09	7,70E-09
6,0-6,3m	<i>kiesiger Siltsand</i>	14,7	46,4	31,8	7,2	7,60E-08	1,60E-07
7,3-7,5m	<i>sandiger Kies</i>	64,8	23,4	8,5	3,3	1,80E-08	6,50E-04
9,5-9,7m	<i>sandiger Kiessilt</i>	38,1	11,1	39,6	11,2	1,80E-08	2,10E-08
12,3-12,5m	<i>sandiger Siltkies</i>	32,9	24,7	29,1	13,3	7,10E-09	1,70E-08

Tabelle 6.m.1: Kornsummentabelle der Bohrproben von KB1 (SG535). Alle Angaben in %. Datenquelle: ELSTER et al. (2023) Bezeichnungen nach ÖNORM B4401, kf-Berechnungen nach BEYER (1964) und BIALAS & KLECZKOWSKI (1970).

Tiefe	Bezeichnung	Kies	Sand	Silt	Ton	kf nach Beyer(m/s)	kf nach Bialas (m/s)
0,5-0,7m	<i>sandiger Siltkies</i>	47,4	16,8	23,4	12,5	1,10E-08	1,80E-08
1,5-1,7m	<i>sandiger Siltkies</i>	42,5	18,1	29,7	9,7	2,70E-08	4,20E-08
4,5-4,7m	toniger Sandsilt	15,5	14,9	49,6	20,0	1,10E-08	2,20E-09
10,5-10,7m	Silt und Ton	0,1	1,1	42,6	56,3	1,00E-11	7,10E-12
16,5-16,7m	Silt und Ton	3,9	1,9	46,9	47,2	2,10E-11	2,70E-11

Tabelle 6.m.2: Kornsummentabelle der Bohrproben von KB2-2020 (SG535). Alle Angaben in %. Datenquelle: ELSTER et al. (2023). Bezeichnungen nach ÖNORM B4401, kf-Berechnungen nach BEYER (1964) und BIALAS & KLECZKOWSKI (1970).

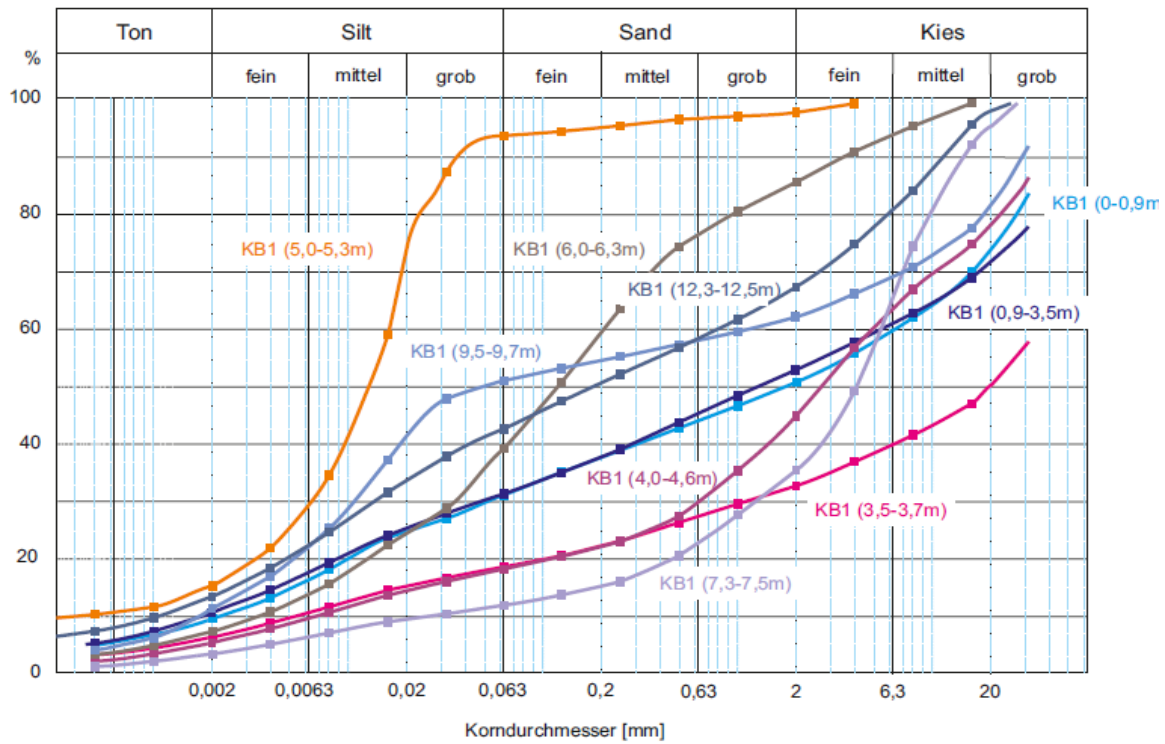


Abbildung 6.p: Kornsummenkurve ausgesuchter Bereiche für KB1-2020 (SG535). Quelle (Abbildung und Daten): ELSTER et al. (2023)

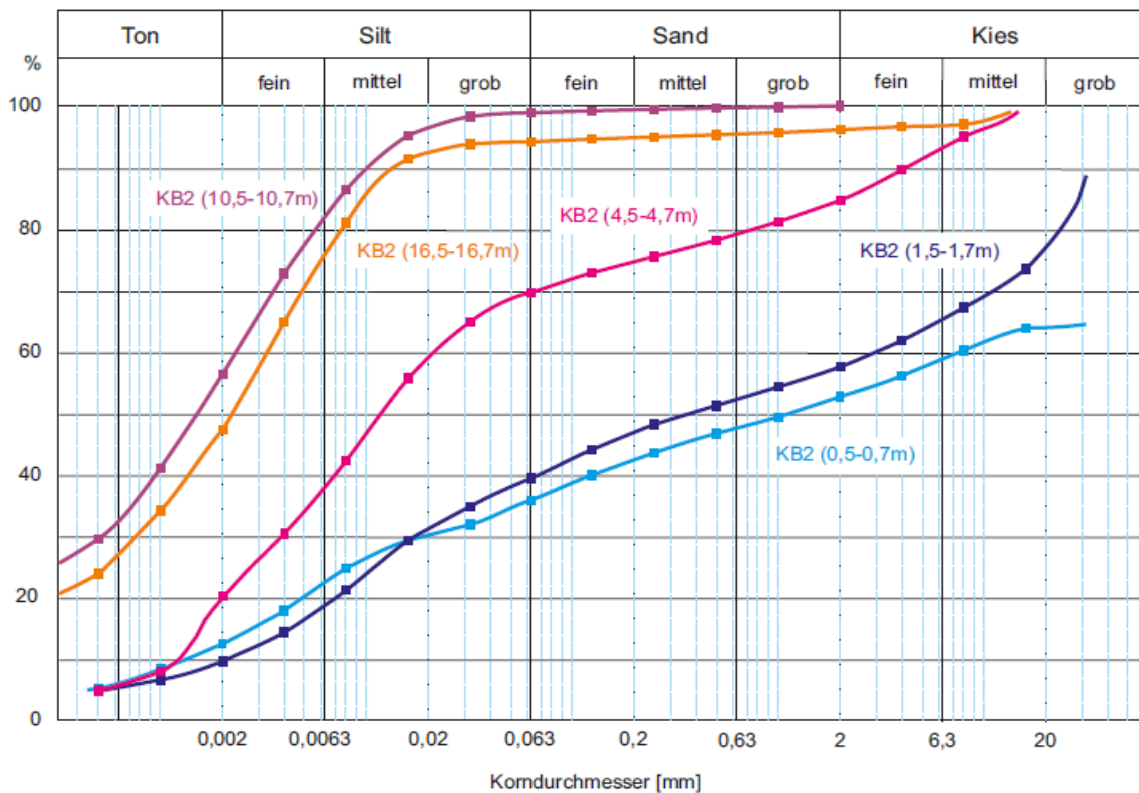


Abbildung 6.q: Kornsummenkurve ausgesuchter Bereiche für KB2-2020 (SG536). Quelle (Abbildung und Daten): ELSTER et al. (2023)

6.8.2. Temperaturprofile

Zu 3 Zeitpunkten, November 2019 sowie Februar und Juni 2020, wurden Temperaturprofile an den Inklinometer-Bohrlöchern erstellt (siehe Kap. 5.8.2). Leider waren aufgrund Schneebedeckung und starkem Wiesenwuchs nicht immer alle Bohrlöcher auffindbar. Zu einem direkten Vergleich sind am besten SG504 (KB06/07) und SG328 (KB02/03) geeignet, da diese zu allen 3 Zeiten bearbeitet wurden und aufgrund ihrer Tiefe längere Datenreihen lieferten. Alle Tiefenangaben in Metern beziehen sich jeweils auf Meter unter dem Grundwasserspiegel, dieser lag bei SG504 bei 2m unter der Geländeoberkante (GOK), bei SG328 zwischen 2 und 0 m (bei Regen, s.u.) unter der GOK. Die Diagramme (Abb. 6r.1-3) zeigen starke Temperaturänderungen in den ersten Metern, die sich nach 14m (SG328=KB06/07) bzw. 26m (SG504=Kb06/07) auf eine sehr stetige Temperatur von 9-9,5 (SG328) bzw. 10 (SG504) °C einregeln. Auffallend ist, dass SG504 im November 2019 in den oberen Metern erhöhte Messwerte (14,5 °C in 2 m Tiefe) zeigt, während SG328 einen entgegengesetzten Trend vorweist. Es muss dazu erwähnt werden, dass die Messung von SG504 am 8.11 stattfand, die anderen Messungen der Novemberkampagne am 5. und 6.11, daher könnte frisches Regenwasser die Messung bei SG328 verfälscht haben. Tatsächlich zeigt die Niederschlagsstation Sibratsgöll vom 3. bis 5. November starke Regenfälle an, und das Bohrloch war bei der Messung am 6.11. aufgrund seiner Lage in der Fahrrinne eines Feldweges mit Regenwasser aufgefüllt. Es scheint also sicherer, sich bezüglich der Temperaturverhältnisse im November auf die Messungen aus SG504 zu verlassen. Vollständige Datenangaben folgen im Anhang (Tab. XI. a-c).

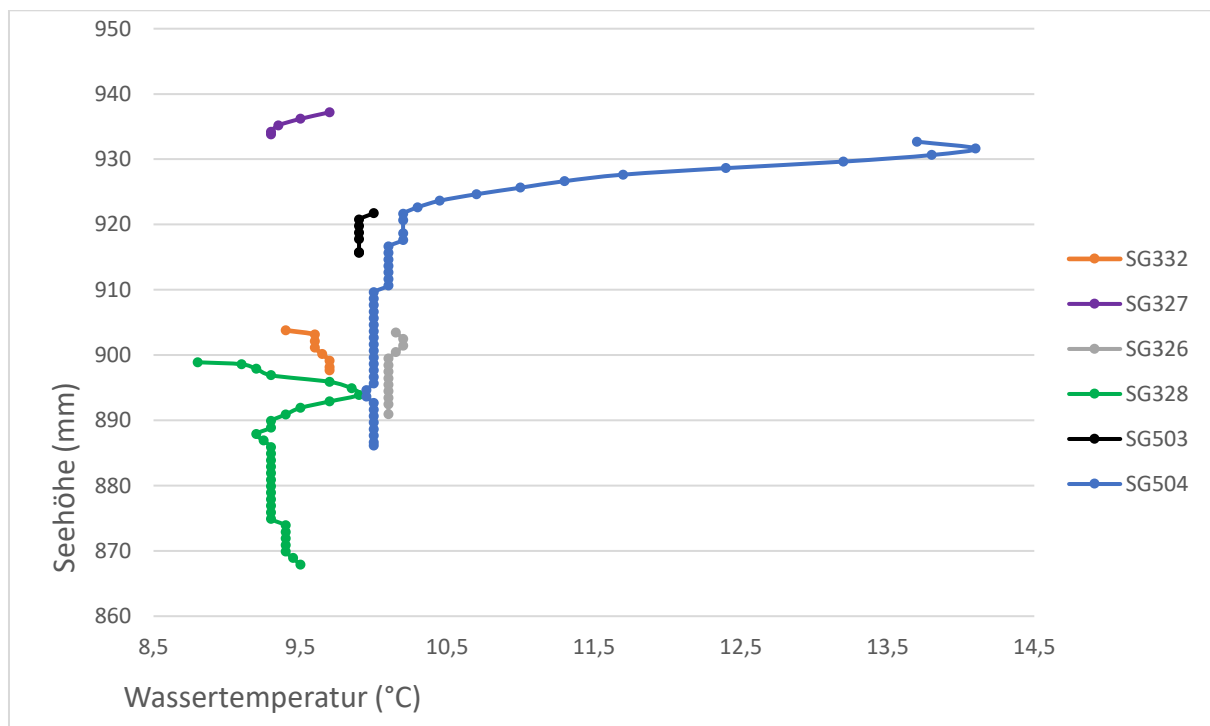


Abbildung 6r.1: Temperaturprofilmessungen von Bohrlöchern, durchgeführt vom 5. bis 8. November 2019.

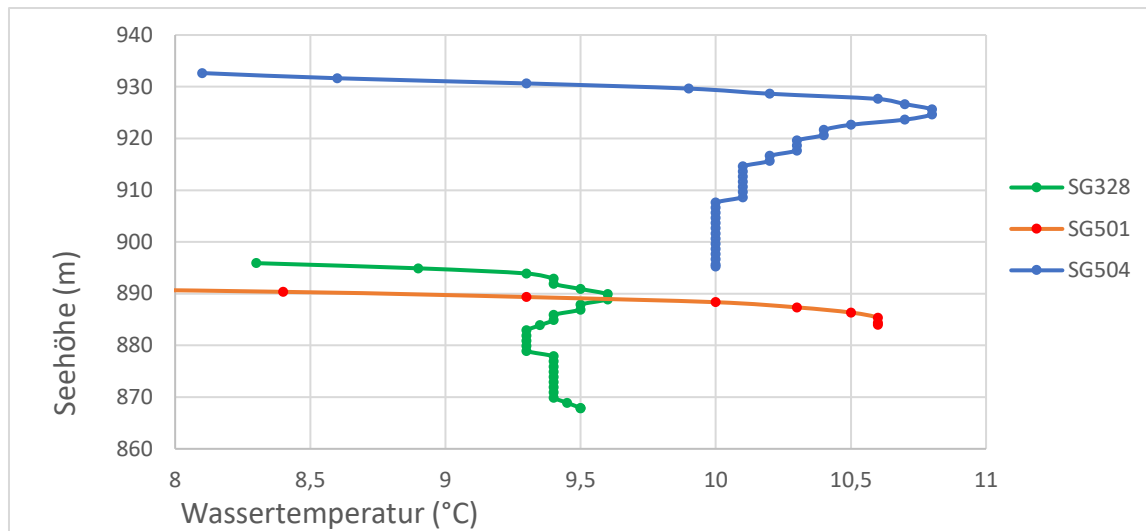


Abbildung 6r.2: Temperaturprofilmessungen von Bohrlöchern, durchgeführt am 11. Februar 2020.

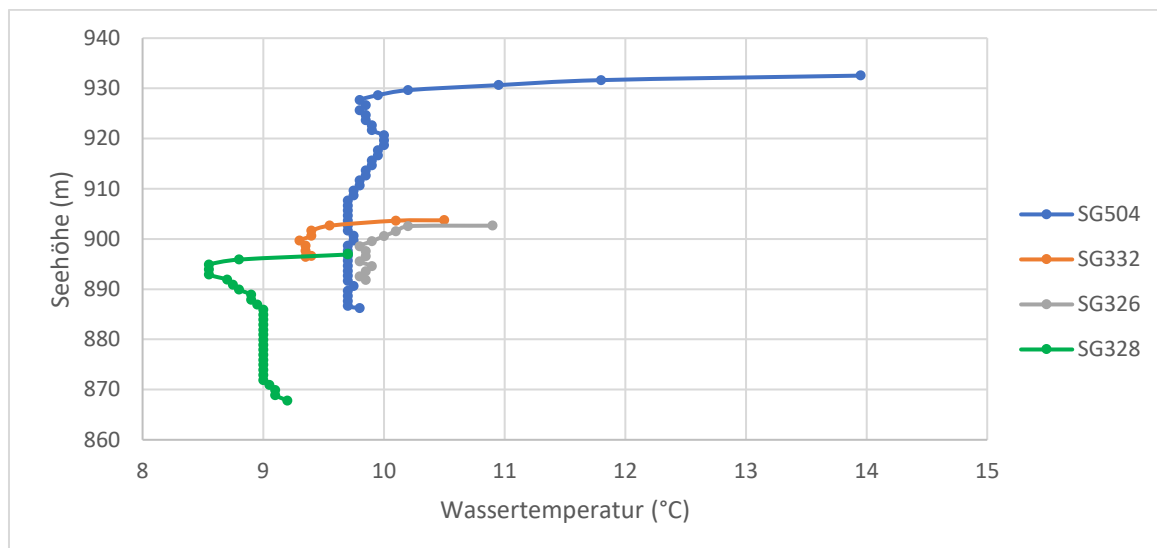


Abbildung 6r.3: Temperaturprofilmessungen von Bohrlöchern, durchgeführt am 18. Juni 2020.

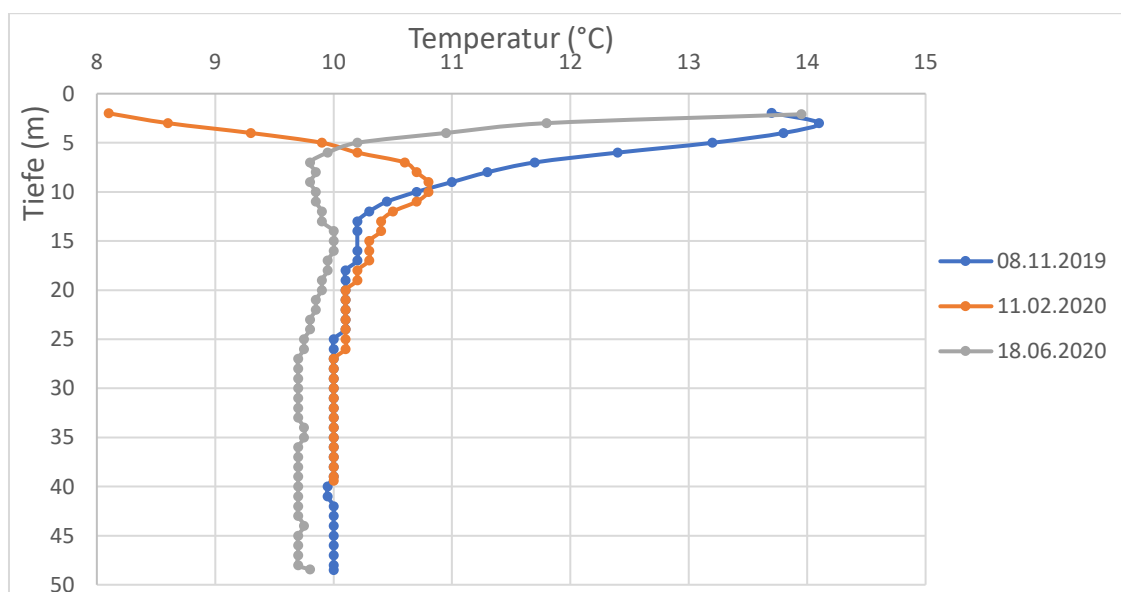


Abbildung 6s: Temperaturprofilmessungen SG504 (KB06/07) im saisonalen Vergleich. Der vertikale Wert 0 entspricht der Geländeoberkante (935m.ü.A.).

7. Diskussion

7.1. Niederschlag

Das Untersuchungsjahr 2020 liegt, an der Jahressumme gemessen, leicht unter dem 30-jährigen Durchschnitt (97% des Durchschnittsjahres). Es zeigt auch erhöhte Monatssummen im Februar und im Mai sowie eine ungewöhnlich lange Trockenperiode im April und November. Der Sommer 2020 war überdurchschnittlich trocken, der Winter überdurchschnittlich regnerisch. Diese Charakteristik wurde auch bei nichtgletscherabhängigen Abflüssen in der Schweiz beobachtet (WEINGARTNER 2020), dort wurden sie auf den Klimawandel zurückgeführt.

Die Niederschlagsstation Sibratsgfall hat im hydrologischen Jahr (Dezember 19-November 20) 2109mm Niederschlag gemessen (ohne Schneehöhenkorrektur). Im Vergleich: BAUMGARTNER et al (1983) nennen für die nördlich gelegenen Allgäuer Alpen 2000-2200 mm, für die östlich gelegenen Lechtaler Alpen 1800-2000mm Jahresniederschlag (jeweils Werte für mittlere Kämme, etwa dieselbe Seehöhe wie das Untersuchungsgebiet). FELLEHNER (2003) gibt 1600 bis 1800 mm Jahresniederschlag für die Staufenregion an (um 1000m.ü.A.).

Beim Vergleich der Monatssummen mit Extremjahren (Abb. 6b.2) fällt auf, dass die Jahre 1999 und 2020 beide starke Spitzen im Februar und im Frühsommer (Mai/ Juni) zeigen. An die Niederschlags-summe im Mai 1999 (520mm), die zu den verhängnisvollen Rutschungen im Ortsteil Rindberg geführt haben, reicht der Juni 2020 (362mm) allerdings glücklicherweise nicht heran. 1999 gab es allerdings auch keine Trockenphase wie April 2020, was die starken Rutschungen wohl weiter begünstigte. Interessant wäre in diesem Zusammenhang eine weitere Untersuchung, ob und in welchem Ausmaß im Juni 2020 verstärkte Rutschungen auftraten.

Normalerweise ist der Niederschlagsgradient abhängig vom Höhengradienten, d.h. je höher der Messpunkt liegt, desto mehr Niederschlag wird gemessen (WEINGARTNER et al., 2019; FELLEHNER, 2003; BAUMGARTNER et al., 1983). BAUMGARTNER et al. (1983) nennen für niederschlagsreiche Gebiete in den Ostalpen einen Anstieg von 60-70 mm pro 100 Höhenmeter. Bei WEINGARTNER et al. (2019) befindet sich das Untersuchungsgebiet lt. Grafik im Bereich von 40-80 mm/ 100 Hm. Der in Kap.6.1. ermittelte Höhengradient von 63 mm/100 Hm (siehe Kap. 6.1. und Abb. 6.c2) scheint dadurch bestätigt. Der Höhengradient ist jedoch regional und lokal stark differenziert (BAUMGARTNER, 1983), sodass nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, wie sich der Niederschlag auf lokaler Ebene im Untersuchungsgebiet zur Höhe verhält. Die Niederschlagsberechnungen der ZAMG gehen von einem Höhengradienten aus, weshalb z.B. der Niederschlag im Einzugsgebiet von SG202 (mittlere Seehöhe 1262m.ü.A.) um etwa 200 mm/Jahr höher ist als der der anderen Einzugsgebiete. Hier kämen die Kippombrometer ins Spiel, die allerdings keine qualitative Aussage über den Höhengradienten liefern, sondern nur bestätigen können, dass der Niederschlag im Untersuchungsgebiet von der Seehöhe abhängig ist. Gerade der höchstgelegene Kippombrometer (OM 150, 1375 m.ü.A) kam der Messung der Station Sibratsgfall am nächsten.

Grund für die fehlende Seehöhenkorrelation der Niederschlagsmessungen könnte eine Messungsverzerrung durch erhöhte Windverwehung in höheren Lagen sein. Windbedingte Messfehler können bis zu 20-40% betragen (FELLEHNER, 2003; BAUMGARTNER, 1983). Insbesondere OM 150 befand sich an einer wetterexponierten Hanglage, was eine stärkere Messverzerrung plausibel erscheinen lässt). Da die erfassten Messdaten aus dem Sommer 2020 stammen, kann zumindest ein Verlust durch stärkere Schneefälle in höheren Lagen ausgeschlossen werden. Es ist allerdings allgemein schwierig, aus einer so geringen Datenmenge über so kurze Zeiträume Aussagen über den lokalen Höhengradienten zu treffen.

7.2. Oberflächenabfluss

Die starken Zunahmen des Abflusses im Februar und März stammen vom bereits erwähnten hohen Februarniederschlag und werden durch die frühe Schneeschmelze noch weiter verstärkt, sodass die Abflüsse im März den Niederschlag leicht übersteigen. Im November übersteigen die Abflüsse ebenfalls den Niederschlag. Grund dafür ist eine starke Trockenperiode in dieser Zeit (4 Regentage während des ganzen Monats), die Bäche werden währenddessen aus dem Grundwasser gespeist. Der Abfluss im November 2020 kann also dem Basisabfluss gleichgesetzt werden.

Die Jahressummen der Abflüsse bewegen sich zwischen 1133 mm und 1509 mm (siehe Tab. 6.h).

Im literarischen Vergleich nennen BAUMGARTNER et al. (1983) 1300-1600 mm bzw. 900-1200 mm für innere Täler in den Allgäuer bzw. Lechtaler Alpen, was, wenn man die höheren Niederschläge (siehe Kap. 7.1) bedenkt, gut zu den hier ermittelten Werten passt.

In Prozent ausgedrückt, betragen die Jahresabflüsse 45-60 % des Niederschlags (Tab. 6h). Damit liegt das Ergebnis unter den Angaben von WEINGARTNER et al. (2019), die in den österreichischen Alpen bei 2000 mm Niederschlag und ca. 1000 Hm mittleres Einzugsgebiet zwischen 70 und 80 % nennen. Dies könnte ein Argument für verstärkten Grundwasserzufluss auf Kosten des Abflusses im Vergleich zu anderen alpinen Gebieten sein.

Das Abflussregime folgt bei allen 4 gemessenen Bächen demselben Trend (Einzelausreißer bei SG234 und SG231 abgesehen), mit Abflussspitzen im Februar und Juni und Tiefwerte in Jänner, April bis Mai sowie im November. Die Vielzahl der Spitzen deutet auf ein hauptsächlich von Niederschlägen und weniger von Schneeschmelze geprägtes Abflussregime hin (WEINGARTNER et al., 2020). Mit Abflussregimes aus der Literatur lässt sich dies nicht direkt vergleichen: ASCHWANDEN & WEINGARTNER (1985) bestimmten die alpinen Abflussregimetypen der Schweiz. Keinem ihrer 16 Regimetypen lässt sich das beobachtete Abflussregime eindeutig zuordnen, Probleme bereiten hier vor allem die Spitzen im Februar und Oktober. LEBIEDZINSKI & FÜRST (2018) beobachteten alpine Abflussregimes in Österreich von 1961-2010. Sie unterteilten die Abflussregimes in 5 Untertypen, die gleichzeitig auch alpine Regionen darstellen. Hier könnte das beobachtete Regime im Untersuchungsgebiet einer Mischung aus Region 2 (nördliches und östliches Hügelland, Abflussmaximum im März) und Region 4 (zentrale und östliche Kalkalpen, Abflussmaximum im Juni und teilweise, weniger ausgeprägt, im Oktober) sein. Natürlich ist ein einjähriger Beobachtungszeitraum zu kurz, um detaillierte Informationen über das herrschende Abflussregime zu liefern (siehe auch WEINGARTNER, 2020). Das gilt auch, weil 2020 gerade beim Niederschlag (siehe Kap.7.1) einige Besonderheiten aufweist, die das Abflussregime wohl stark beeinflusst bzw. verändert haben. Parallelen lassen sich aber bei WEINGARTNER (2018 und 2020) erkennen, der die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Abflussregimes beobachtete. Er beschreibt eine Zunahme des flüssigen Niederschlages im Winter und eine Abnahme des Niederschlages im Sommer, was zu einer Verschiebung des Abflussregimes führt (WEINGARTNER, 2020). Im November wird bei WEINGARTNER (2018 und 2020) in mittleren alpinen Gebieten oft ein Abflussminimum beobachtet. Abgesehen von der Trockenperiode im April (die wie gesagt eine echte Besonderheit im Gebiet darstellt) wäre auch im Untersuchungsgebiet 2020 der November der Monat mit den geringsten Abflüssen.

Ob Weingartners Beobachtungen auch im Untersuchungsgebiet zutreffen oder das Jahr 2020 tatsächlich nur eine Ausnahme vom durchschnittlichen Abflussregime bildet, kann aber letztlich nur mit weiteren Abflussbeobachtungen geklärt werden.

Wie bereits erwähnt scheinen SG234 und SG322 schneller bzw. mit höheren Schwankungen auf Veränderungen des Niederschlages zu reagieren. Zugleich führen SG202 und SG231 auch anteilmäßig weniger Wasser als die anderen beiden Bäche: Während SG202 und SG231 45% des Niederschlags ihres Einzugsgebietes abführen, sind es bei SG234 60% und bei SG322 55% (Tab. 6j).

Das könnte mit der von JARITZ (2013) angenommenen Deckengrenze zwischen rhodanubischem Flysch und Feuerstätter Decke zusammenhängen, die auf seiner geologischen Karte im Bereich vom Tobelbach (SG231) (siehe Kap. 7.5: Wasserbilanz). Dass diese Deckengrenze auch einen Einfluss auf den naheliegenden Mähmoosgraben (SG202) hat, ist aber zweifelhaft. Eine andere Erklärung wäre, dass die Einzugsgebiete der beiden kleiner sind als angenommen. Bei der geringen Größe der Einzugsgebiete (SG202: 0,311 km², SG231: 0,296 km²) können leichte Ungenauigkeiten des Einzugsgebietes bereits starke Auswirkungen auf die Bilanzgröße des Abflusses haben. Fehler bei der Berechnung der Einzugsgebiete von SG202 und SG231 könnten indirekt auch die stärkeren Schwankungsbreiten der täglichen Abflüsse erklären.

Ein Problem bei der Korrektur unplausibler Pegelmessungen stellen Veränderungen des Bachbettes dar, insbesondere, wenn sie längerfristig sind, etwa nach einem Starkregenereignis. Diese können zwar im Vergleich zu anderen Bächen erkannt werden, eine Korrektur über längere Zeit bereitet aber Schwierigkeiten, da sie mit der Zeit immer unplausibler wird. Insbesondere im Sommer 2020 zwischen Juni und August kam es an der Messstelle SG234 regelmäßig zu bestimmten Uhrzeiten zu plötzlichen Pegelveränderungen in ca. derselben Höhe von 2 bis 3 cm, ohne dass an den entsprechenden Zeitpunkten Regen gefallen wäre. Die Regelmäßigkeit ist ein klares Indiz dafür, dass es sich um anthropogene Einflüsse handelt, etwa durch regelmäßige Wasser- oder Materialeingabe durch einen hiesigen Bauern.

7.3. Lufttemperatur

Die fehlerhaften Temperaturmessungen an den Radarstationen werfen die Frage auf, warum die Messungen der 4 Thermometer tendenziell zu hoch waren. Dies könnte an den Thermometern selbst ebenso wie am Versuchsaufbau liegen, da die Thermometer wie bereits in der Methodenbeschreibung erwähnt nicht gegen äußere Einwirkungen abgeschirmt waren. Auch wurden die Temperatursensoren nicht im Vorfeld kalibriert, sondern im Nachhinein mittels Vergleichsmessungen der Offset zur Wetterstation Rindberg bestimmt. Alles in allem war die Temperatur nur ein Parameter, der bei den Radarsensoren mitgemessen wurde, daher konnte der Standort nicht ideal zur Temperaturmessung sein. Gerade Sonnenlicht könnte ein Faktor sein, der das Innengehäuse der Radarsensoren, in denen sich das Thermometer befand, erwärmt und somit das Messergebnis verfälscht hat. Ohne konkrete Kenntnis, was den Temperatur-Offset verursacht hat, stellt sich auch die Frage, ob der Offset zur tatsächlichen Temperatur im Lauf des Jahres variiert. Tatsächlich variiert der Offset zwischen den Radarstationen und der Messstation Rindberg zwischen rund 1°C (Dezember 2020) und rund 5°C (Mai 2020). Im Vergleich zur Station Schönenbach variiert der Offset in denselben Monaten 1,5°C und 4°C (Tab. 7.a, Abb. 7.a). Grund für diese Varianz könnte einerseits die Sonneneinstrahlung sein, andererseits auch der Höhengradient: In Österreich sinkt die Jahresmitteltemperatur üblicherweise um 0,5°C je 100 Höhenmeter (Hm) (FELLEHNER, 2003). Diese negative Abhängigkeit von Temperatur zu Seehöhe ändert sich auch mit den Jahreszeiten. Tatsächlich ist der Offset zwischen SG234 und der Station Schoppernau, die in etwa auf gleicher Seehöhe liegen, insgesamt geringer als zu den anderen Stationen (s. Tab. 7.a; Abb. 7.a). Auch die Varianz ist zwischen den beiden am geringsten. Für die Berechnung der Evapotranspiration wurden die Temperaturmesswerte der Radarstationen nach reiflicher Überlegung schließlich mit einem jahresmittleren Offset korrigiert. Grund dafür ist, dass bei so geringen Vergleichsmöglichkeiten nicht anzunehmen ist, dass eine monatliche Aufschlüsselung der Offset-Werte die Berechnung des ET₀ verbessern bzw. mehr dem tatsächlichen Wert nähern würde. Stattdessen wäre eine zu stark von Interpretation beeinflusste ET₀-Berechnung zu erwarten.

Ganz verworfen wurde der ETP- Berechnungsansatz jedoch nicht, da er trotz der zweifelhaften Temperaturwerte noch seine Berechtigung hat (siehe Kap. 7.4).

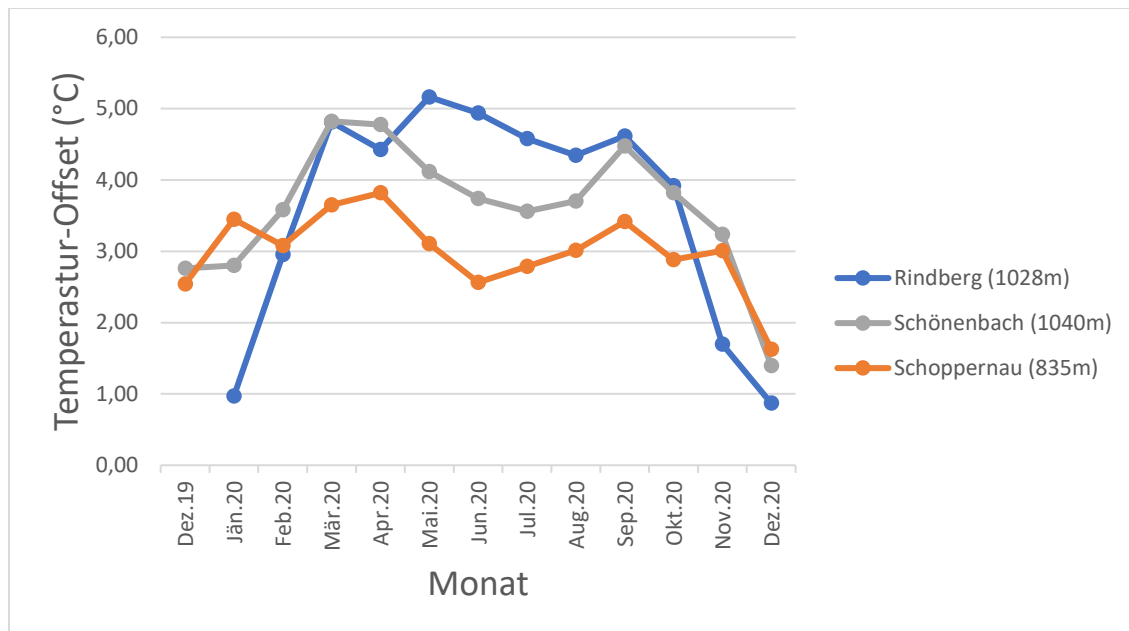


Abbildung 7.a: Diagrammdarstellung der Werte aus Tabelle 7.a: Temperaturunterschied (Offset) monatlicher Temperaturmittel der Radarstation SG234 zu den Temperaturmessungen der Stationen Rindberg, Schönenbach und Schoppertau.

	Rindberg	Schönenbach	Schoppertau
Dez.19	-	2,76	2,54
Jän.20	0,97	2,80	3,45
Feb.20	2,95	3,58	3,08
Mär.20	4,81	4,82	3,65
Apr.20	4,43	4,78	3,82
Mai.20	5,16	4,11	3,11
Jun.20	4,94	3,74	2,56
Jul.20	4,58	3,56	2,79
Aug.20	4,35	3,70	3,01
Sep.20	4,62	4,48	3,42
Okt.20	3,92	3,82	2,88
Nov.20	1,70	3,23	3,01
Dez.20	0,87	1,40	1,63
Median	3,61	3,60	3,00
Mittelwert	4,39	3,70	3,01
Standardabweichung	1,51	0,89	0,54

Tabelle 7.a. Offset der monatlichen Temperaturmittel der Radarstation SG234 zu den Stationen Rindberg, Schönenbach und Schoppertau.

7.4. Evapotranspiration

Aus der Definition von ETO und ETp sollte ein berechneter ETO immer unterhalb des ETp liegen, da dieser ja die maximal mögliche Evapotranspiration beschreibt (HASLINGER & BARTSCH, 2016). Es ist auffallend, dass die Werte von Variante 1 (ZAMG) um knapp 220 mm höher sind als die grob errechneten ETp-Werte der HAÖ-Methode (FÜRST et al., 2007).

Die in Variante 1 errechneten ETO-Jahressummen von 810-815 mm/Jahr sind auch signifikant höher als in anderen Publikationen zur Evapotranspiration im Alpengebiet: MENZEL (1999) errechnete mittlere jährliche Verdunstungen in den Schweizer Alpen für verschiedene Geländeenutzungen, hier ergäbe sich für eine Seehöhe von 1000 m eine mittlere Verdunstung von rund 500 mm/a. STEINHÄÜßER (1970) spricht bei österreichischen Flussgebieten in ähnlicher Seehöhe (aber geringerem Niederschlag) von Jahresgebietsverdunstungen zwischen 497 mm (Lammern bei Obergäu) und 580 mm (Salza bei Wildalpen).

FELLEHNER (2003) spricht im Niederen Tauerngebiet von (plausiblen) ETp-Jahressummen zwischen 1080 mm und 1140 mm/a (in 1000m Seehöhe), je nach angewendeter Berechnungsmethode.

GMEINDL (2007) berechnete für den Erdrutsch am Rindberg mit der Penman-Methode (PENMAN, 1948) für ETp einen Durchschnittswert (1961-1990) von 600 mm/a, für die aktuelle (nach TURC, 1961) Evapotranspiration (Eta) 440mm/a. Grundlage für Gmeindls Berechnung waren Klimadaten der Station Schopponau von 1961-1990.

In der Literatur wird allgemein beobachtet (MENZEL, 1999; STEINHÄÜßER, 1970; WIESER et al., 2007), dass die Evapotranspiration temperaturbedingt mit zunehmender Seehöhe abnimmt, was in den Ergebnissen nur prozentual gesehen zu beobachten ist: Prozentual am Niederschlag im Einzugsgebiet gerechnet, hat SG202 in beiden Varianten die geringste ETP (Tab. 6f). SG202 hat laut ZAMG-Modellierung den höchsten Niederschlag aller Einzugsgebiete, was den hohen ETO-Wert kompensiert. Bei den anderen drei Stationen ist der Unterschied jedoch nur minimal, wohl auch weil die Höhenunterschiede zwischen den anderen drei Stationen zu gering sind. Bezüglich der Jahressumme scheinen die Ergebnisse von Variante 2 besser zur vergleichenden Literatur zu passen. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass Menzel und Wieser (MENZEL, 1999; WIESER et al., 2007) Gebiete mit signifikant geringeren Niederschlägen beobachteten. Gleiches gilt für die erwähnte Formel zur ETp-Berechnung nach HAÖ (HAÖ, FÜRST et al., 2007), die ja nur mit der Seehöhe als Berechnungsparameter arbeitet. Steinhäüßer nennt keine Niederschlagsjahressummen, aber die genannten Gebiete liegen laut modernen Angaben (ehyd) irgendwo zwischen 900mm und 1500mm Niederschlag im Jahr. In einem Gebiet mit relativ hohen Niederschlägen wie Sibratsgfall könnte die Evapotranspiration um einiges höher ausfallen. Die Arbeit von FELLEHNER (2003) in den Niederen Tauern arbeitete mit vergleichbaren Niederschlägen (1883 mm in 1000 m Seehöhe) und errechnete wie erwähnt je nach Methode bis zu 1140 mm ETp. ETp und ETO sind zwar nicht gleichzusetzen (zweiteres ist laut Definition niedriger), aber es bestätigt, dass Gebiete mit sehr hohem Niederschlag zu höheren ET-Werten neigen. Da sowohl die HAÖ-Formel als auch vergleichende Studien von Wieser und Menzel (MENZEL, 1999; WIESER et al., 2007), nicht den herrschenden Bedingungen im Untersuchungsgebiet entsprechen, kann angenommen werden, dass deren Angaben mitunter weit unter der tatsächlich herrschenden Evapotranspiration im Untersuchungsgebiet liegen. GMEINDL (2007) wiederum verwendete Klimadaten aus dem 15km entfernten Schopponau und kam zu vergleichbaren Ergebnissen wie Variante 2, was für deren Berechnung spricht. Inwiefern die Klimadaten aus Schopponau denen in Sibratsgfall entsprechen, wird später noch besprochen.

Gegen die ETO-Werte von Variante 2 sprechen die bereits besprochenen, zweifelhaften Temperaturdaten, auf denen sie beruhen. Allerdings fallen die Berechnungen mit korrigierten Temperaturwerten (beruhend auf im Mai 2022 durchgeführten Vergleichsmessungen) rechnerisch logisch

sogar noch niedriger aus. In einem Gegenversuch gelang es auch nicht, die Ergebnisse des ZAMG-Ansatzes zu reproduzieren, indem in der Berechnung die ZAMG-Temperaturen eingesetzt werden. Das Ergebnis hiervon fiel sogar noch niedriger aus als die ursprünglichen Berechnungen mit den Temperaturen der Radarmessstationen. Daher kann der Unterschied zwischen den beiden Varianten der ETO-Berechnung nicht von den unterschiedlichen Temperaturmessungen stammen.

Die Ursache für diese Unterschiede scheint vielmehr in den methodischen Unterschieden der Berechnungen zu liegen: Variante 1 (ZAMG) arbeitet mit Gitterdaten aus 50mx50m-Feldern, wobei jedem Feld begründet auf Seehöhe und saisonalem Wechsel ein anderer Koeffizient C zugewiesen wird (nach HASLINGER & BARTSCH, 2016). Die Globalstrahlung wird aus täglichen Temperaturmaxima und -minima abgeschätzt. Variante 2 (Radarstationen) arbeitet mit Temperaturmessungen an 4 Punkten im Untersuchungsgebiet. Der Koeffizient C wurde saisonal und abhängig von der mittleren Seehöhe des Einzugsgebietes variiert (nach HASLINGER & BARTSCH, 2016), wenngleich mit deutlich höherer Unschärfe als in Variante 1. Die Werte für die Globalstrahlung wurden als Median der Globalstrahlungsmessungen aus Alberschwende, Schoppernau und Sulzberg ermittelt. Es bleibt fraglich, ob der Median dieser Werte den tatsächlichen Werten des zwischen den drei Stationen liegenden Sibratsgfäll entspricht bzw. wie hoch hier die Abweichung ist. Alle drei Orte sind ca. 15km Luftlinie von Sibratsgfäll entfernt. Sulzberg (1018 m.ü.A.) befindet sich in etwa auf gleicher Höhe wie Sibratsgfäll, Alberschwende (715m.ü.A.) und Schoppernau (839 m.ü.A.) liegen um einiges niedriger. Aufgrund dessen können die Globalstrahlungsdaten dem Untersuchungsgebiet nicht zur Gänze entsprechen. Die Standardabweichung zwischen den Messungen der drei Stationen beträgt rund 0,37, bei einem Medianwert von 3,1 l/m².

Variante 1 weist eine höhere lokale Auflösung (50x50-Felder vs. ganzes Einzugsgebiet) sowie eine höhere saisonale Auflösung auf. Auch die Temperaturmessungen sind aufgrund der zweifelhaften Messergebnisse der Radarstationen-Thermometer verlässlicher.

Aufgrund dessen wird trotz den widersprechenden Ergebnissen der ETP-Abschätzung mittels HAÖ-Methode (FÜRST et al., 2007) und Werten in vergleichender Literatur (WIESER et al., 2007; MENZEL, 1999; GMEINDL, 2007) im EXTRIG-4D-Modell Variante 1 Verwendung finden, während Variante 2 als Vergleichswert verbleibt. Variante 2 ist um einiges simpler in ihrer Anwendung und kommt mit relativ wenigen Daten sowie ohne Klimamodellierungen aus. Daher wurden die Temperaturwerte von der ZAMG aus Variante 1 in einer Proberechnung in die Berechnung von Variante 2 eingesetzt, um den Fehler der Methode zu ermitteln. Wie in Tab. 8b zu sehen, beträgt die Differenz zwischen den beiden Ergebnissen ca. 50%. Damit kann gesagt werden, dass die Berechnung des ETO von Variante 2 im Vergleich zur umfangreichen Modellierung von Variante 1 hohe quantitative Abweichungen aufweist.

ETO	SG202	SG231	SG234	SG322
Variante 1 Jahressummen (mm)	815,40	810,60	811,60	810,50
Proberechnung Jahressumme (mm)	435,81	432,23	429,52	431,78
Differenz (mm)	379,59	378,37	382,08	378,72
Fehler Jahressumme (%)	53,45	53,32	52,92	53,27
Fehler Monatsmedian (%)	51,57	50,09	49,86	50,23
Fehler Monatsmittel (%)	50,56	49,37	48,48	48,84

Tabelle 7b: Vergleich der ETO- Berechnung von Variante 1 und der Proberechnung, bei der die Temperaturwerte von Variante 1 in die Berechnungen von Variante 2 eingespeist wurden. Alle anderen Parameter (Globalstrahlung, Koeffizient C) wurden belassen. Datenquelle (Temperatur, ETO): ZAMG.

Bei einer vereinfachten Anwendung der Hargreaves-Formel muss demnach im Vergleich zu einer weitaus aufwändigeren Modellierung eine relativ große Abweichung in Kauf genommen werden.

Das gilt vor allem für Gebiete, die von besonderen klimatischen Bedingungen geprägt sind; in diesem Fall ungewöhnlich hohem Niederschlag. Für grobe Anwendungen erfüllt die einfache Herangehensweise an die Hargreaves-Formel von Variante 2 aber sehr wohl ihren Zweck. Als einfacher Vergleichswert kann die im Hydrologischen Atlas Österreich (HAÖ, FÜRST et al., 2007) vorgestellte Formel herangenommen werden, die aber hohe Niederschläge ebenfalls zu unterschätzen scheint.

7.5. Wasserbilanz

Da, wie vorher beschrieben, Variante 1 der ET₀-Berechnung von der ZAMG als plausibler betrachtet wird, wird auch dieser Variante der Wasserbilanz mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Bei Variante 1 verbleiben 10 % weniger vom Jahresniederschlag für den Grundwasserzufluss als bei Variante 2. Der Grundwasserzufluss im Untersuchungsgebiet liegt also zwischen 18 und 27 % vom Jahresniederschlag (Tab.6.h,6.i,6.j,6.k). Die beiden vorgestellten Varianten der Wasserbilanzberechnung mit unterschiedlichen ETP- Werten liefern damit ein Fenster, in dem sich der Grundwasserzufluss aller Wahrscheinlichkeit nach bewegt. Wie bereits gesagt (siehe Kap. 7.4) wird die ET₀-Berechnung aus Variante 1 (ZAMG) als plausibler angesehen, folglich ist der untere Bereich (Grundwasserzufluss um 18 % des Jahresniederschlags) vorzuziehen.

Ein Ansatz, die Grundwasserabflüsse in die Subersach abzuschätzen, liefern die Abflussmessungen der Subersach (siehe Kap. 5.5 und 6.5). Diese ergaben wie erwähnt rechnerisch große Mengen an Wasser, die nicht aus den gemessenen Oberflächenabflüssen stammen. Wie gesagt waren die Messungen an der unteren Subersach (SG525) mit einigen Schwierigkeiten verbunden, sodass von einem größeren Fehler ausgegangen werden kann (geschätzt um 10 % Fehler, siehe unten). Deshalb kann dieser Versuch nur als qualitativer, aber keinesfalls als quantitativer Nachweis für die ermittelten Grundwasserströmungen angesehen werden. Es scheint aber als gesichert, dass größere Mengen Grundwasser im Bereich der Talsohle ober- oder unterirdisch in die Subersach fließen. Grund dafür sind die Eisseesedimente, die als Grundwasserstauer fungieren. Da auch im Winter die Abflussmenge der Subersach unterhalb des Untersuchungsgebietes weit höher ist als die Summe der Zuflüsse ergeben würde, kann davon ausgegangen werden, dass diese Grundwasseraustritte auch bei Basisabfluss noch im relevanten Bereich liegen.

Eine genaue Mengenbestimmung des diffusen Abflusses ist äußerst schwierig, da viele kleinere Gerinne nur temporär bei erhöhten Niederschlägen aktiv sind und eine große Menge an Drainagen die oberen Bodenschichten in Sibratsgfall zusätzlich entwässern. Hierzu wird eine weitere Masterarbeit (von C. Bisping, siehe BISPING, 2022) zum Thema der Funktionalität der Sibratsgfaller Drainagen verfasst. Außerdem ist eine hohe saisonale Veränderung beim diffusen Abfluss zu erwarten. Während der Schneeschmelze und in Zeiten hohen Niederschlags tritt diffuser Abfluss verstärkt auf.

Um den diffusen Abfluss bzw. den Grundwasseraustritt aus dem Untersuchungsgebiet abzuschätzen, wurden die Abflussmessungen der Subersach herangezogen. Bei beiden Versuchen, den Abfluss der Subersach mit NaCl- Tracern zu ermitteln, wurde eine weit größere Abflussmenge am unteren Messpunkt gemessen, als die Summe der Zuflüsse ergeben würde. Selbst mit der Annahme, dass ein Teil davon dem gegenüberliegenden Südhang entspricht, fehlt noch eine ganze Menge, knapp 10-13 % des Gesamtabflusses der Subersach (SG525, siehe Abb. 6a) im Sommer, und 17-18 % im Winter. In mm gerechnet wären das 8-11 mm/d im Sommer und 1,6-1,8 mm/d im Winter (siehe Tab. 7c1 und 7c2), was grob überschlagen einem Jahresabfluss von ca. 1800 mm entsprechen würde. Dass eine so hohe Wassermenge diffus aus dem Untersuchungsgebiet ausfließt bzw. aus dem Grundwasserspeicher austritt wird als unplausibel angesehen. Wahrscheinlich wurden die Abflussmessungen an SG525 überschätzt,

weil die Eingabelänge nicht richtig auf Strömungsgeschwindigkeit und Wassermenge der Subersach abgestimmt war. Eine Überschätzung von ca. 10 % wird angenommen. Das würde etwa 0,1-2,7 mm/d im Sommer und 0,9-1,2 mm/d im Winter entsprechen, was eine Jahressumme von ca. 300-400 mm ergeben würde. Diese Zahl ist sehr mit Vorsicht zu genießen, da sie auf mehreren Annahmen und fehlerbehafteten Messungen beruht, für die nur wenige Belege vorliegen. Darüber hinaus kann sie nur als Orientierung für diffusen Abfluss dienen, da der Großteil dieses Wassers nicht aus diffusen oberflächennahen Abflüssen stammt, sondern aus gespanntem, oberhalb der Talsohle austretendem Grundwasser. Das suggeriert ein Vergleich zu den errechneten Grundwasserzuflüssen im Untersuchungsgebiet (siehe Tab. 6.h).

Eine genaue Bestimmung des diffusen Abflusses ist also nicht möglich, er scheint aber jedenfalls-zumindest bei Basisabflussbedingungen- unter den eingangs geschätzten 10 % zu liegen.

Ein weiterer Faktor für die hydrologische Situation ist der Wasserverbrauch der Gemeinde Sibratsgöll. Um diesen einzuschätzen, wurden die Daten des Abflusses der hiesigen Kläranlage betrachtet, der nach Aufbereitung in die Subersach geleitet wird. Dieser beträgt im Mittel 3300m³ pro Monat, was ca. 40.000 m³ im Jahr entspricht. Diese Menge beträgt knapp 2 % des Jahresabflusses des Sägebachs (SG234). Zusätzlich entnehmen private Brunnen, Viehwirtschaft und andere menschliche Aktivitäten noch weiteres Wasser, das anschließend über Drainagerohre oder über die Hauptbäche in die Subersach geleitet wird, wobei die Menge dieses Verbrauches kaum ermittelt werden kann. Es kann aber angenommen werden, dass menschliche Aktivitäten keinen großen Einfluss auf die Wasserbilanz haben, von temporären stärkeren Schüttungen einzelner Bäche (siehe Kommentar zu den Pegelkorrekturen von SG234: Kap. 5.1.3 und Kap.6.2.) einmal abgesehen.

Wie Tab. 6.i zeigt, zeigen die 4 Bäche sehr unterschiedliche Zuflüsse ins Grundwasser:

Während bei SG202 25 % des Jahresniederschlags dem Grundwasser zufällt, sind es bei SG234 nur 8,3 %. Rechnerisch entsteht dieser Unterschied hauptsächlich durch die unterschiedlich ausfallenden Abflussmengen der Bäche. Auffallend ist, dass der Grundwasserzufluss eine Korrelation zur Größe des Einzugsgebietes zu haben scheint. Jedenfalls zeigen SG234 und SG322 (siehe Abb. 6a) mit größeren Einzugsgebieten geringeren Grundwasserzufluss. Wie bereits bei den Oberflächenabflüssen erwähnt, könnte dies an einer Unterschätzung der Einzugsgebiete von SG234 und SG322 liegen. Auf Basis dieser Annahme wurden die hydrologischen Einzugsgebiete von SG234 und SG322 für die Niederschlag-Abfluss Modellierung und die numerische Modellierung Im EXTRIG-4D-Modell adaptiert bzw. auf Grundlage der mittleren Jahresabflussspende vergrößert. Eine andere Begründung könnte sein, dass SG202 und SG231 von einer tektonischen Störungszone beeinflusst werden. Tatsächlich beschreibt JARITZ (2013) eine tektonische Deckengrenze zwischen rhenodanubischem Flysch und Feuerstätter Decke im Bereich vom Tobelbach (SG231). Der Nestgraben (SG202) verläuft nur wenige hundert Meter vom Tobelbach entfernt, könnte also eventuell ebenfalls betroffen sein. Es kann also sein, dass im Einzugsgebiet von SG231 und SG202 Wasser durch tektonische Spalten relativ schnell in den Untergrund abfließt. Überprüft wurde diese Theorie jedoch nicht, auch gibt es abgesehen von Jaritz geologischen Karte keine Anhaltspunkte dafür. Eine Plausibilitätsprüfung für die ermittelten Grundwasserspeicherzuflüsse ist schwierig.

7.6. Hydrochemie

Die Bohrlochproben, vor allem auch die Arteser in Mähmoos, zeigen erhöhte Magnesiumgehalte, vom Wassertyp handelt es sich um Kalzium-Magnesium-Hydrogenkarbonate (siehe Piperplot, Abb. 6n).

Auffallend am Verhältnis von Ca/Mg zu Na/K (Abb. 6o) ist, dass sich die oberflächennahen Quellaustritte nur wenig von den Oberflächenabflüssen unterscheiden, während die

Bohrlochproben (mit Ausnahme von SG535) aufgrund der hohen Anteile an Natrium und Magnesium links oben im Diagramm plotten. Das spricht für eine eher geringe Verweilzeit des Quellwassers. Auch ein Blick auf die Korrelationsmatrix (Anhang, Tab. IX) zeigt, dass ein erhöhter Magnesiumgehalt mit erhöhten Na- und SO₄- Gehalten einhergeht. Es lassen sich also am Magnesium- und Natriumgehalt grob zwei Arten von Wässern im Gebiet unterscheiden: Magnesium- und Natriumreiche, höher mineralisierte, tiefere Grundwasser mit hohen Verweilzeiten (siehe auch KRALIK, 2022) und Magnesium- und Natriumarme Oberflächenwässer oder wenig mineralisierte, flache Grundwässer mit geringeren Verweilzeiten. Einige Proben bilden jedoch Ausnahmen aus dieser Regel und werden genauer besprochen.

Die Hoheggquellen (SG334) zeigen ebenfalls erhöhte Magnesiumgehalte, aber weit niedrigeres Na/K-Verhältnis als die Bohrproben. Da die Quelle nahe der angenommenen Deckengrenze zwischen rhenodanubischem Flysch und Feuerstätter Decke liegt und besonders der glaukonithaltige Feuerstätter Sandstein magnesiumangereichert ist (JARITZ, 2013), stammt der erhöhte Magnesiumanteil wahrscheinlich aus ebendiesen Gesteinen.

Auch die erhöhte Magnesiumkonzentration einzelner Proben des Sägebachs (Entnahmepunkt: SG 103) ist vermutlich auf Festgestein in den Feuerstätter Decken zurückzuführen. Der Sägebach entwässert als einziger die Schuppen von Feuerstätter Sandstein und Junghansen-Schichten am westlichen Hang des Untersuchungsgebietes. Im Gegensatz dazu weisen die Proben von SG535 im Vergleich zu den anderen Bohrlöchern sehr wenig Magnesium und Natrium auf, was als Indiz für eine Vermischung des aufsteigenden, tieferen Grundwassers mit Grundwässern aus höheren Schichten gedeutet wird.

Die drei abweichenden Proben (SG326, SG328, SG042) weisen anthropogene Einflüsse auf. Bei SG326 handelte es sich um Zementarbeiten (Neuhausbau direkt neben der Bohrung). Bei SG042 scheinen Aktivitäten der Kläranlage die Bachprobe beeinflusst zu haben (ELSTER et al. 2022). SG328 plottet im Ca/Mg zu Na/K- Diagramm (Abb. 6o) als einzige Bohrung im Bereich der Oberflächenwasser, was auf die Überflutung des Bohrloches durch Regenwasser zurückzuführen ist. Weitere Argumente dafür liefern die Untersuchung der Temperaturprofile (siehe Kap. 7.8) sowie die Regenwasserauffüllung bei mehreren Sichtungen.

7.7. Bohrungen

7.7.1. Neue Bohrungen

In den ersten Metern zeigen beide Bohrungen ein ähnliches Bild. Bei den angerundeten bis gerundeten sandigen Siltkiesen handelt es sich wahrscheinlich um Schwemmfächerablagerungen oder fluvioglaziale (Delta-) Sedimente (JARITZ, 2013). Bei SG535 (KB1-2020) bleiben diese bis zum Ende der Bohrung dominant, unterbrochen von gering mächtigen feinkörnigen Schichten. Bei diesen handelt es sich um glaciolakustrine Sedimente (JARITZ, 2013) mit hohem Siltanteil, vermutlich aus Überschwemmungshorizonten oder Eisseeandbereichen. Bei SG536 (KB2-2020) werden die sandigen Siltkiese ab ca. 4,5m Tiefe von mächtigen glaciolakustrinen Sedimenten abgelöst.

Auf der geologischen Karte von Jaritz (JARITZ, 2013) sind im Gebiet der beiden Bohrungen nicht differenzierte Eissee Sedimente und einige Schuttströme verzeichnet. Aufgrund dessen und Jaritz Lithofaziesbeschreibung (JARITZ, 2013) wird die Interpretation der Sand- und Siltkiese als Schwemmfächersedimente bevorzugt. Unterstützt wird diese Vermutung weiter von den Bohrkernbeschreibungen, die Jaritz für die Bohrungen KB13/01, KB12/01 und KB11/01 liefert (JARITZ, 2013. Siehe auch Abb.6o). KB13/01, hangabwärts von SG536 gelegen, zeigt laut Jaritz (JARITZ 2013) bis 7m Unterwassermoränen, danach bis Bohrungsende (17m) Stillwassersedimente. KB12/01 liegt hangwärts

gesehen zwischen SG535 und SG536 und weist eine Abfolge von Schuttfächermaterial (bis 3m), Unterwassermoräne (3-6m; 9,5-15m) und Seesedimenten (6-9,5;15-20m) auf. Die Bohrkernprobe von KB11/01, etwas oberhalb von SG535 gelegen, bezeichnet Jaritz sogar durchgehend bis 16m als Unterwassermoräne. Eine Unterscheidung zwischen Schwemmfächer und Unterwassermoräne ist mit den vorliegenden Daten von SG535 und SG536 schwierig und auch nicht der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die hier vorgestellten Ergebnisse der neuen Bohrungen passen aber sehr gut zu den Untersuchungen von JARITZ (2013). Detailbeschreibungen der beiden Bohrungen (Erstsichtung bei Bohrkernentnahme) sowie Abbildungen der Bohrkernprofile folgen im Anhang (Tab. X, Abb. A3 und A4).

Bei den errechneten k_f -Werten (siehe Tab. 6m.1 und 6m.2) besteht das Problem, dass diese aufgrund der schlechten Sortierung hohe Feinkornanteile besitzen und aus diesem Grund nicht den zulässigen Grenzen der Beyer-Methode (BEYER, 1970; FUCHS, 2010) entsprechen. Die Beyer-Formel arbeitet mit dem d_{10} (Korngröße bei 10% Durchgang laut Kornsummenkurve) und gilt innerhalb der Grenze $0,06 < d_{10} < 0,6 \text{ mm}$ (BEYER, 1970; FUCHS, 2010). Bei den vorliegenden Proben liegt d_{10} aber im Bereich 0,002 bis 0,0063mm. Es sind also die Berechnungen mit der Formel nach Bialas (BIALAS & KLECZKOWSKI, 1970) zu bevorzugen, die auch häufig für geringdurchlässige Proben genutzt wird (FUCHS, 2010).

7.7.2. Temperaturprofile

Die starken Temperaturänderungen in den oberen Metern werden als saisonale Schwankungen interpretiert (PRINZ & STRAUß, 2018). Im Juni und Februar lässt sich das besonders gut erkennen: Bis ca. 8 m Tiefe steigt die Wassertemperatur im Februar bzw. sinkt im Juni. Dies spiegelt die Lufttemperaturverhältnisse des letzten Halbjahres wider, die im Grundwasser gespeichert wurde. Dann schwingt die Temperatur um und repräsentiert wiederum die Lufttemperatur des vorvorherigen Halbjahres. Diese saisonalen Schwankungen werden immer kleiner, bis sie am Ende ganz verschwinden. Der Bereich, ab dem saisonale Schwankungen nur noch unter $0,1^\circ\text{C}$ liegen, wird neutrale Zone genannt (PRINZ & STRAUß, 2018). Eine genaue Bestimmung wird durch den Umstand erschwert, dass $0,1^\circ\text{C}$ innerhalb der Messungenauigkeit des verwendeten Gerätes liegt. Bei SG504 und SG328 lässt sich ein Ende von saisonalen Schwankungen ab ca. 12-15 m Tiefe positionieren, was den gemessenen Werten in anderen Arbeiten entspricht, so z.B. bei TAYLOR & STEFAN (2009) 10-15 m in der gemäßigten Nordhemisphäre. Die Temperatur beträgt bei SG504 in diesem Tiefenbereich annähernd durchgehend 10°C , was ebenfalls ein Kennzeichen der neutralen Zone ist (PRINZ & STRAUß, 2018). Bei SG328 bleibt die Temperatur auch noch bis 30m Tiefe wechselhaft und bei ca. $9,5^\circ\text{C}$, ein weiteres Anzeichen dafür, dass die Messung durch eindringendes Regenwasser verfälscht wurde.

Die Temperaturen der Grundwässer liegen etwa 2 bis 3°C über der durchschnittlichen Jahreslufttemperatur in Sibratsgfall. Dass die Grundwassertemperatur über der Lufttemperatur liegt, ist ein häufig beobachtetes Phänomen (THALHEIM & WALLNER, 2021; KAPPELMEYER & HAENEL, 1974). Es könnte darauf hinweisen, dass eine Beteiligung von tiefer zirkulierenden Grundwässern stattfindet (siehe auch ELSTER et al., 2023). Ein anderer Grund könnte eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Bodens und damit eine eher geringe Beeinflussung von oben. Gegen diese Deutung sprechen allerdings die ausgeprägten saisonalen Schwankungen.

7.9. Hydrogeologisches Konzept

Zur Veranschaulichung des resultierenden hydrogeologischen Konzeptes wurden aufbauend auf Ergebnissen der hydrogeologischen Kartierung, geophysikalischen Methoden (ELSTER et al. 2022), der erstellten Temperaturprofile und isotopisch-hydrochemischen Untersuchungen (KRALIK 2022, ELSTER et al, 2022) zwei konzeptionelle hydrogeologische Profile (siehe Abb. 5a sowie Abb.7b.1 und 7b; angefertigt von D. Elster, V. Turewicz, W. Jaritz, M. Kralik, R. Holzschuster) erstellt.

Niederschlags- und Oberflächenwasser infiltriert relativ schnell in die Schwemmfächer (gelb) und Eisrandsedimente (orange) im unteren Bereich des Kammes oberhalb der Siedlung (Abb.7b: Nr.1). Zusätzlich gelangen vermutlich erhebliche Mengen an Niederschlag über Klüfte in den Gesteinen des Rhenodanubischen Flysches am oberen Hang in den Untergrund (Abb.7b: Nr. 2).

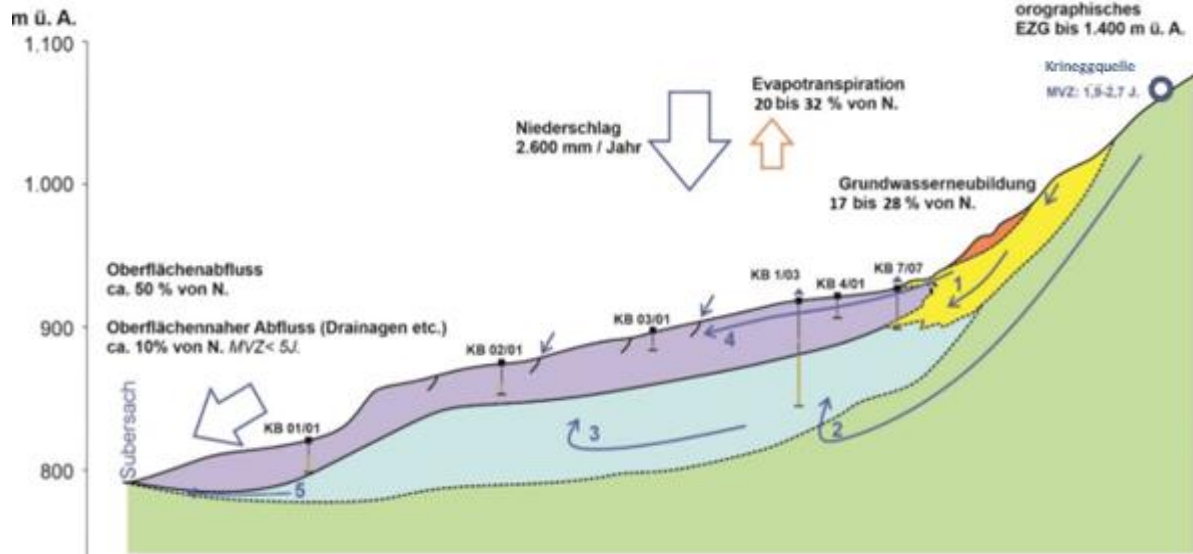
Hangabwärts werden gut durchlässige Schichten immer weniger und werden zusehends von schlecht durchlässigen ($k_f < 10^{-7}$ m/s) Eisseedimenten (violett) abgelöst, die als Wasserstauer fungieren. Die Grundwässer fließen daraufhin einerseits in grobklastische Schichten unterhalb der Eisseedimente (blau), wo sie eingeschlossen und gespannt werden (Abb.7b: Nr. 3). Andererseits gibt es aufgrund einer Vielzahl von Hangumlagerungen und hangparallelen Schüttungen immer wieder geringmächtige, grundwasserdurchlässige Bereiche innerhalb der Eisseedimente, die sehr lokal durch erhöhte Durchlässigkeit verstärkten Grundwasserdurchfluss ermöglichen (Abb.7b: Nr. 4). Es entstehen Grundwasserfallen, die zu starkem Druck auf das eingeschlossene Grundwasser führen. Der Grundwasserdruck führt auch zu stellenweisen Artesern, die vor allem im Bereich Mähmoos nachweisbar sind. An der Talsohle im Bereich der Subersach kommt es zu vielen kleinen Quellaustritten (Abb.7b: Nr. 5), die in die Subersach münden. Es wird vermutet, dass auch in geringen Mengen unterirdische Grundwasserzutritte gespannter Grundwässer aus den grobklastischen Ablagerungen in die Subersach stattfinden.

Isotopen ($^3\text{H}/^3\text{He}$, ^{14}C) - und Spurengasuntersuchungen (FCKW, SF_6) zur mittleren Verweilzeit der artesischen Grundwässer in Mähmoos (Abb. 7b: Nr. 2) zeigen ein Minimalalter von 30-40 Jahren und eine Beteiligung älterer Komponenten mit Verweilzeiten von zumindest hundert Jahren.

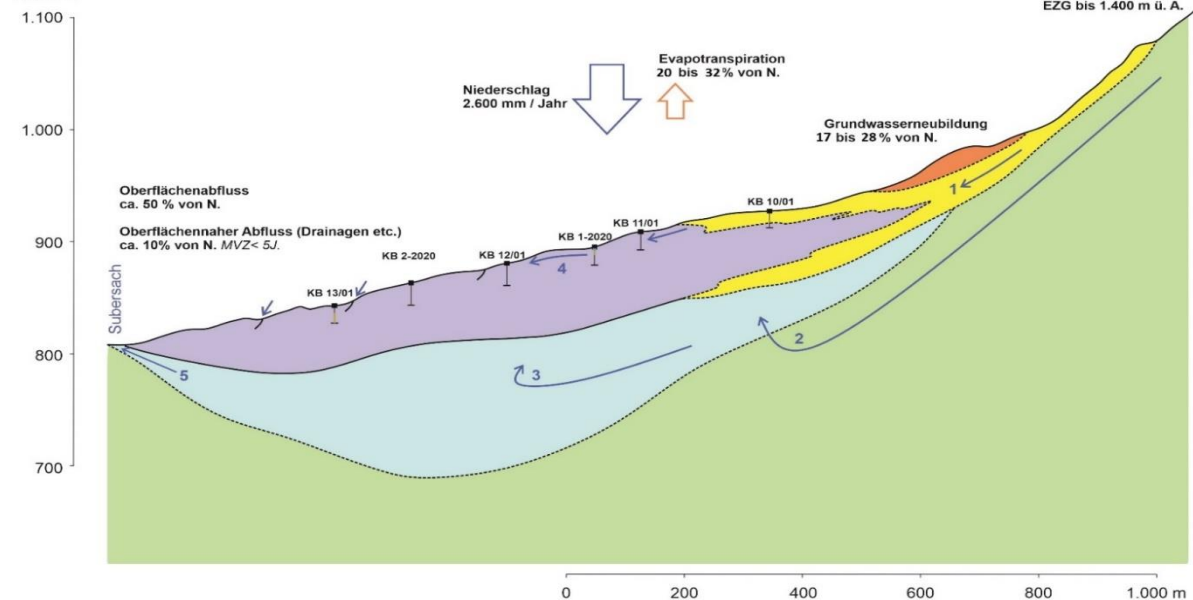
Dagegen weisen die oberflächennahen Drainagen und Quellen (Abb.7b Nr. 4) eine mittlere Verweilzeit zwischen 0,5 und 3 Jahren auf (KRALIK 2022).

Für weitere Informationen zum hydrogeologischen Konzept wird auf ELSTER et al. (2023) verwiesen.

Profil A



Profil B



- Schwemmfächer
Kies, Sand
 $k_f = 1E-04$ bis $1E-06$
- Eisrandsedimente
Kies, Sand, Schluff, schlecht sortiert
 $k_f = 1E-05$ bis $1E-06$
- Eisseesedimente mit geringmächtigen grobklastischen Ablagerungen
Schluff, Ton, Sand, schlecht sortiert
 $k_f = 1E-08$ bis $1E-10$; grobklastische Lagen $5E-04$ bis $5E-06$
- Grobklastische Ablagerungen,
Kies, Sand, geringe Anteile von Schluff
 $k_f = 5E-04$ bis $5E-06$
- Rhenodanubischer Flysch
Sandstein
 $k_f = 1E-07$ bis $1E-08$; sekundäre Porosität nicht berücksichtigt

- Bohrung
- Artesische Verhältnisse
- Bereich mit grobklastische Ablagerungen > 1 m.
- Grundwasserstand
- Quelfassung

Grundwasserverhältnisse

- 1... Infiltration vorwiegend über grobklastische Ablagerungen von Schwemmfächern und Eisrandsedimenten.
- 2... Grundwasser tritt über tieferreichende Klüfte (10er m) im Flysch zu.
- 3... Grundwasser in grobklastischen Ablagerungen; gespannte bzw. grundsätzlich artesische Verhältnisse; $MVZ > 5$ J. (15% 0-15J.; 85% > 55J.)
- 4... Grundwasser in geringmächtigen Sandlagen. Gespannte bis artesische Verhältnisse. MVZ 1-1,4 J. (65% 0-2J.; 35% > 50J.) Lateraler Zufluss von höheren Lagen im EZG. Konnektivitäten kleinräumig und komplex.
- 5... Diffuser Abfluss zu dem Vorfluter

Abbildung 7b: Schematisches hydrogeologisches Konzept entlang der Profilschnitte im Untersuchungsgebiet mit Bohrungen. Der Verlauf der Profilschnitte A und B ist in Abb. 5a eingezeichnet. Blaue Pfeile stellen die Grundwasserwege dar. Dazu die Ergebnisse der Wasserbilanzberechnung. Profile erstellt von V. Turewicz und adaptiert von D. Elster, W. Jaritz und M. Kralik. Werte der Wasserbilanz von R. Holzschuster.

8. Literatur

ASCHWANDEN, H. & WEINGARTNER, R. (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. – Geographisches Institut der Universität Bern, Abteilung Physikalische Geographie-Gewaesserkunde, Bern.

BAUMGARTNER, A., REICHEL, E., WEBER, G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen. Niederschlag, Verdunstung, Abfluß und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931 - 1960. - Oldenbourg Verlag, München.

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. - Wasserwirtschaft und Wassertechnik (WWT) 14, Heft 6, 165 – 168, Deutscher Fachverlag, Frankfurt.

BIALAS, Z. & KLECZKOWSKI, A (1970): Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k . (Original in Polnisch) -Archivum Hydrotechniki 17(3), S. 405-417, Warschau.

BIEBER, G., AHL, A., JARITZ, W., KLEIN, P., PAPESCH, W., RÖMER, A., SLAPLANSKY P., SUPPER R., WIMMER-FREY, I., WÖHRER-ALGE, M. (2007): Hydrogeologie Rindberg: Aeroeopghysikalische Vermessung im Bereich Sibratsgfäll / Rindberg Vorarlberg: Vollzug des Lagerstättengesetzes: Projekte ÜLG-28/05c. Unveröffentlichter Bericht, GBA/FAULG28/35, 140 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

BISPING, C. (2022): Evaluierung von Drainagesystemen in landwirtschaftlich genutzten alpinen Flächen einer kriechenden Massenbewegung in Sibratsgfäll im Bregenzer Wald. – Unveröffentlichter Bericht, 29 Seiten, Geologische Bundesanstalt, Wien.

CORNELIUS, H. P. (1921): Die krystallinen Schollen im Retterschwangtale (Allgäu) und ihre Umgebung.- Mitteilungen der geologischen Gesellschaft Wien 14, S. 1-84, Geologische Gesellschaft Wien, Wien.

CORNELIUS, H. P. (1926): Das Klippengebiet von Balderschwang im Allgäu. – Geologisches Archiv 4, München.

ELSTER, D., HOCHLEITNER, S., KRALIK, M., TUREWICZ, V., OTTOWITZ, D., HIEBL, J., JARITZ, W., OTTOWITZ, I., HOLZSCHUSTER, R., BISPING, C., WÖHRER-ALGE, M., ALMER, M., HOBIGER, G. HOYER, S. (2023): Verständnis extremer klimatologischer Auswirkungen in besiedelten alpinen Gebieten durch 4D-Modellierung hydrogeologischer Prozesse (EXTRIG). – Abhandlung der Geosphere Austria, Band 77, 68 S., Geosphere Austria, Wien.

FELLEHNER, M. (2003): Der Hauptdolomit als Grundwasserspeicher in den Nördlichen Kalkalpen. Dissertation, 85 Seiten, Phillips-Universität Marburg, Marburg/Lahn.

FESSLER, U., KIESSLING, T., RISCH, H. & ZACHER, W. (1992): Die vorquartäre Geologie im Andelsbucher Becken (Vorarlberg) – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Band 135, Heft 4, S.825-843, Wien.

FRIEBE, J., BERTLE, H., BERTLE, R., DE TARSIMNE, E., DRAXLER, I., FURRER, H., DE GRAAFF, L., HEINRICH, M., HERZOG, U., DE JONG, M., LENHART, W., ORTNER, H., SCHEDL, A., SEIJMONSBERGEN, H., STARCK, P. (2007): Vorarlberg (Geologie der österreichischen Bundesländer). -Geologische Bundesanstalt, Wien.

FUCHS, S. (2010): Deterministische k_f -Wert Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache. – Grundwasser 15(3), S. 177-189, Springer-Verlag, Berlin.

FÜRST, J., GODINA, R., NACHTNEBEL, H.P. & NOBILIS, F. (2007): Hydrographischer Atlas Österreich (Hydrological Atlas of Austria). – Department VII/3 -Water Balance at the Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Vienna; Department of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering, BOKU Vienna, Wien.

FURTAK, H. & LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen.- Memories of IAH-Congress, 1965, VII, S.86–96; Hannover.

GMEINDL, M., (2007): The Combination of GIS, Remote Sensing and Hydraulic Transport Modelling for the Investigation of the Landslide Rindberg / Sibratsgfall / Vorarlberg. -Unveröffentlichte Dissertation, 210 S., University of Natural Resources and Applied Life Sciences/BOKU, Wien.

GOLDSCHIEDER, N. (2005): Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochfien-Gottesacker. - in: Eclogae Geologicae Helveticae 98 (2005) S. 1–17, Birkhäuser Verlag, Basel.

HARGREAVES, G.H. & ALLEN, R. (2003): History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation - Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129, S. 53-63, Miami.

HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. - Applied Engineering in Agriculture 1, S. 96–99, North Carolina State University, Raleigh, NC.

HASLINGER, K. & BARTSCH, A. (2016): Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves method. – Hydrology and Earth System Sciences, 20, S. 1211-1223, Central Institute for Meteorology and Geodynamics (ZAMG), Climate Research Department, Wien.

HIEBL, J., FREI, C. (2018): Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. - Theoretical and Applied Climatology, 132, S. 327-345, Springer, Berlin.

HÖLTING, B & COLDEWEY, W.G. (2019): Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. -Spektrum Akademischer Verlag, 8. Auflage, Heidelberg.

HUDSON, R. & FRASER, J. (2005): The Mass Balance (or Dry Injection) Method. -Streamline Watershed Management Bulletin, 9/1, S. 6-12, FORREX Forum for Research and Extension in Natural Resources, Kamloops.

JANOSCHEK, W. (1963) Geologie der Flyschzone und der helvetischen Zone zwischen Attersee und Traunsee. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Band 107/Heft 1, S. 161-214, Wien.

JARITZ, W. (2013): Ingenieurgeologie der Großhangbewegungen Sibratsgfall und Rindberg. Geotechnische Grundlagen F.D. Gefahrenzonenplan Sibratsgfall.- Unpublizierte Dissertation, 293 S., Technische Universität Wien.

JARITZ, W. & SORANZO, E. (2014): Engineering geology of the large slope movement Sibratsgfall and Rindberg.- in: Geomechanics and Tunnelling Volume 7, Issue 4, S. 306-316, Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin.

KAPPELMEYER, O. & MORELLI, C. (1974): Geothermics with special reference to application. - Geoexploration Monographs, Number 4, Tucson, USA.

KRALIK, M. (2022): Bestimmung der Einzugsgebietshöhe und der Wasseralter (Mittlere Verweilzeiten) des Untersuchungsgebiets Sibratsgfall mittels Isotopenmessungen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^3\text{H}/^3\text{He}$, ^{14}C , ^{222}Rn) und Gastracern (FCKW11,-12,-113, SF_6). - unveröffentlichter Projektbericht, 39 S., Wien.

LOACKER, H. (1992): Kraftwerksbauten im Bregenzerwald und ihre Anpassung an die geologischen Verhältnisse. - Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Band 135, Nr. 4, S. 857-866, Wien.

LEBIEDZINSKI, K., FÜRST, J. (2018): Entwicklung der alpinen Abflussregimes in Österreich im Zeitraum 1961-2010. - Österreichische Wasser – und Abfallwirtschaft 2018, 70, S. 474-484. Österr. Wasser- u. Abfallwirtschaftsverb., Springer-Verlag, Wien.

MENZEL, L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN.- Potsdam-Institut für Klimaforschung e.V., Potsdam.

MOSER, G., JARITZ, W. (1999), a: Hangbewegung Rindberg, Gde. Sibratsgfall - Geologische Erstbeurteilung. - Unveröff. Bericht GZ 9907066, mjp Ziviltechnik-GmbH, Gmunden.

MOSER, G., JARITZ, W. (1999), b: Hangbewegung Rindberg, Gde. Sibratsgfall - Weiterführende Untersuchungen. - Unveröff. Bericht GZ 9908075, mjp Ziviltechnik-GmbH, Gmunden.

MOSER, G., JARITZ, W. (2000): Hangbewegung Rindberg, Gde. Sibratsgfall - Geologische Interpretation der geo-physikalischen Untersuchungen. - Unveröff. Bericht GZ 0001005, mjp Ziviltechnik-GmbH, Gmunden.

MUELCHI, R., RÖSSLER, O., SCHWANBECK, J., WEINGARTNER, R., MATRTIUS, O. (2020): Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland. - Institute of Geography and Oeschger Centre for Climate Change Research, Universität Bern, Bern.

OBERHAUSER, R. (1980): Molasse-Untergrund, Helvetikum, Flysch und Klippenzonen in Vorarlberg. - in: Der Geologische Aufbau Österreichs, S. 177-188. Springer Verlag, Wien-New York.

OBERHAUSER, R. (1998): Erläuterungen zur Geologisch-Tektonischen Übersichtskarte von Vorarlberg 1:200000. – 42 S.- Geologische Bundesanstalt, Wien.

OLEFS, M., SCHÖNER, W., SUKLITSCH, M., WITTMANN, C., NIEDERMOSER, B., NEURURER, A. & WURZER, A. (2013): SNOWGRID- A new operational snow cover model in Austria. - International Snow Science Workshop Grenoble–Chamonix Mont-Blanc, Grenoble.

ÖNORM B 4401 (2020-12-01): Geotechnik - Zusammenhang zwischen Bohrverfahren, Güteklassen von Bodenproben und Probenmengen für geotechnische Laboruntersuchungen.

PENMAN, H. (1956): Estimating evaporation. - Transactions of the American Geophysical Union, 37, S. 43-46, AGU, Washington DC.

PIPER, A.M. (1944): A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union Volume 25, Issue 6 S. 914-928, John Wiley & Sons Washington, DC.

PREY, S. (1980): Helvetikum, Flysche und Klippenzonen von Salzburg bis Wien.- in: Der Geologische Aufbau Österreichs, S. 177-188, Springer Verlag, Wien-New York.

PRINZ, H., & STRAUß, R. (2018): Geotechnische Aspekte der Geothermie. – Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

RICHTER, M. (1957): Die Allgäu-Vorarlberger Flyschzone und ihre Fortsetzung nach Westen und Osten. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 108/2, S. 156-174, DGGV, Stuttgart.

RICHTER, M. (1960): Ergebnisse neuer Untersuchungen im Helvetikum des Vorarlberg und Allgäu. – Abh. dt. Akad. Wiss. Berlin, Kl.III, 1, S. 77-94; Berlin.

SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung. Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

SIMET, C. (1985): Zur Geologie in der Umgebung von Sibratsgfall (Vorarlberg, Österreich). – Unveröffentlichte Diplomarbeit, 87 S., Universität München.

SINREICH, M., GOLDSCHIEDER, N., HÖTZL, H. (2002): Hydrogeologie einer alpinen Bergsturzmasse (Schwarzwassertal, Vorarlberg). – in: Beiträge zur Hydrogeologie, 53, S. 5-20, Österreichische Vereinigung für Hydrogeologie (Hrsg.), Graz.

STEINHÄÜßER, H. (1970): Gebietsverdunstung und Wasservorrat in verschiedenen Seehöhen Österreichs. Österreichische Wasserwirtschaft 22, S. 163–170, Springer-Verlag, Wien.

SÜLTENFUß, J. & MASSMANN, G. (2004): Datierung mit der ³He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. – Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 4/2004, S. 221-234, Springer, Karlsruhe.

TAILOR, C. & HEINZ, S. (2009): Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization - Journal of Hydrology, Volume 375, Issues 3-4, S. 601-612. North-Holland Publ. Co., Amsterdam.

THALHEIM, F. & WALLNER, M. (2021): Grundwassertemperaturen Tirols.- Projektbericht, 192 S., Wasser Tirol-Ressourcenmanagement-GmbH, Innsbruck

THOM, P. (1986): Zur Geologie der Berge zwischen Balderschwang (Allgäu) und Sibratsgfall (Vorarlberg). – Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU München.

VORARLBERGER ATLAS (2021): <http://vogis.cnv.at/atlas/init.aspx?karte>. – Landesamt für Vermessung und Geoinformation, Feldkirch.

TURC, L., (1961): Evaluation des besoins en eau irrigation, l'évapotranspiration potentielle.- Ann. Agron, 12, S. 13-49, Paris.

WEINGARTNER, R. (2018): Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. – Universität Bern, Bern.

WEINGARTNER, R., FÜRST, J., SCHULZ, K. (2019): Die Alpen als Wasserturm Europas.- In: Flüsse der Alpen- Vielfalt und Kultur, S. 56-73. Haupt- Verlag, Bern.

WEINGARTNER, R. (2020): Saisonalität des Abflusses- ein charakteristisches Merkmal der Fließgewässer.-In: Klimawandel und Jahreszeiten, Geographica Bernensia, G97, S. 20-21, ETH Zürich, Zürich.

WIESER, G, HAMMERLE, A., WOHLFAHRT, G. (2008): The Water Balance of Grassland Ecosystems in Austrian Alps. - Arctic, Antarctic and Alpine Research, 40:2, S. 439-445, Institute of Arctic and Alpine Research, Colorado.

WILDBACH-UND LAWINENVERBAUUNG, SEKTION VORARLBERG (2021): nachgeordnete Dienststelle des Bundesministeriums Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, Sektion Vorarlberg, Bregenz.

ZACHER, W. (1990): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, Blatt 113 Mittelberg. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

ZAMG (2022): -Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, seit 01.01.2023 GeoSphere Austria (GSA), Wien.

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

10. Anhang

Tabelle I: Salz (NaCl)-Abflussmessungen in Sibratsgfall, geordnet nach SG-Nummer.

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG001	07.11.19	16:32	7,5	366	100	1	13	436	33,51	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,03923	4.741.889	846
SG001	07.11.19	16:45	7,7	363	100	5	13	433	31,8	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03923	4.741.889	846
SG001	11.02.20	15:31	3,3	287	1000	1	28	587	119,4	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03923	4.741.889	846
SG001	11.02.20	15:31	4,9	311	1000	10	28	656	117,9	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03923	4.741.889	846
SG001	16.06.20	11:14	-	324	200	1	-	393	110,3	Almer/Elster	kA	10,03923	4741889	846
SG001	16.06.20	11:27		325	350	1	-	403	109,3	Almer/Elster	kA	10,03923	4741889	846
SG001	05.11.20	10:31	8,4	335	200	10	11	568	32,45	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03923	4.741.889	846
SG001	10.12.20	10:00		411	100	1	-	483	13,37	Almer/Elster	kA	10,03923	4741889	846
SG009	08.11.19	09:28	6,8	385	100	1	10	835	5,6	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,0393	47,42244	874
SG042	10.12.20	15:40		792	50	1		953	6,77	Almer/Elster	kA	10,0267	47,42449	842
SG042	10.12.20	15:40		787	50	1		953	7,23	Almer/Elster	kA	10,0267	47,42449	842
SG103	17.10.19			312	50	1		490	6,62	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,03988	47,43161	1069
SG109	06.11.19	16:42	9,3	393	100	5	12	530	17,7	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03145	47,42563	883
SG109	13.02.20	10:32	3,8	366	100	1	12	459	25,2	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03145	47,42563	883
SG109	16.06.20	16:25		368	500	1		760	32,68	Almer/Elster	kA	10,03145	47,42563	883
SG112	16.06.20	12:23		326	100	1		642	5,15	Almer/Elster	kA	10,0324	47,41887	843
SG202	18.10.19			329	50	5			2,88	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,03491	47,43035	940
SG202	05.11.19	16:20	7,9	350	100	5		606	12,98	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	05.11.19	16:20	7,9	350	100	1		908	16,1	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,03491	47,43035	940
SG202	08.11.19	10:05		374	100	5		915	7,15	Almer/Hoyer	kA	10,03491	47,43035	940
SG202	10.02.20	15:19	3,8	298	500	1	72	757	81,77	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03491	47,43035	940

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG202	10.02.20	15:19	4	299	500	10	72	737	76,14	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	12.02.20	15:23	3	354	200	1	72	673	14,36	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03491	47,43035	940
SG202	12.02.20	15:23	6,1	296	200	10	72	698	13	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	16.06.20	10:56	10,7	333	50	10	72	378	21,17	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	16.06.20	10:56	10,7	347	50	1	72	406	22,3	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03491	47,43035	940
SG202	16.06.20	11:08	10,7	337	100	10	72	421	21,66	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	16.06.20	11:08	10,7	348	100	1	72	470	20,48	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03491	47,43035	940
SG202	18.06.20	22:11	10,6	255	500	10	70	659	51,12	Almer/Elster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	18.06.20	22:12		258	500	1		621	52,39	Almer/Elster/Kralik	kA	10,03491	47,43035	940
SG202	04.08.20	09:17	11,8	327	500	1	70	675	52,69	Nussbaumer	WTW3310	10,03491	47,43035	940
SG202	05.11.20	15:32	8,7	340	100	10	65	728	6,51	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03491	47,43035	940
SG202	05.11.20	15:34	8,7	368	100	1	65	807	6,4	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03491	47,43035	940
SG202	10.12.20	12:00		336	50	1		979	1,6	Almer/Elster	kA	10,03491	47,43035	940
SG202	10.12.20	12:00		336	50	1		979	1,61	Almer/Elster	kA	10,03491	47,43035	940
SG204	17.10.19			332	50	5		683	3,07	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,03589	47,43133	959
SG216	16.06.20	16:08	11,7	385	50	10	15	463	28,38	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02923	47,42862	886
SG216	16.06.20	16:08	11,6	395	50	1	15	494	28,83	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02923	47,42862	886
SG227	07.11.19	14:11	7,1	413	100	1	9	716	14,87	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,02236	47,42524	801
SG227	07.11.19	14:11	7,3	410	100	5	9	708	14,79	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02236	47,42524	801
SG227	12.02.20	13:43	2,5	399	500	1	35	707	61,34	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02236	47,42524	801
SG227	12.02.20	13:43	6,5	324	500	10	35	598	39,37	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02236	47,42524	801
SG227	16.06.20	15:02	12,4	363	200	10	15	601	41,3	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02483	47,42591	830
SG227	16.06.20	15:02	12,4	370	200	1	15	595	41,61	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02483	47,42591	830
SG228	07.11.19	14:45	7,9	407	100	1	13	619	28,87	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,02345	47,42369	798
SG228	07.11.19	14:45	8,1	404	100	5	13	609	29,6	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02345	47,42369	798

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG228	13.02.20	11:14	2,7	367	100	1	20	633	28,6	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02345	47,42369	798
SG228	16.06.20	15:35		367	500	1		1048	43,71	Almer/Elster	kA	10,02345	47,42369	798
SG228	10.12.20	15:10		701	50	1		922	6,01	Almer/Elster	kA	10,02345	47,42369	798
SG228	10.12.20	15:10		715	50	1		922	7,57	Almer/Elster	kA	10,02345	47,42369	798
SG228	10.12.20	15:10		698	50	1		902	6,78	Almer/Elster	kA	10,02345	47,42369	798
SG228	10.12.20	15:10		711	50	1		902	7,6	Almer/Elster	kA	10,02345	47,42369	798
SG231	17.10.19			325	100	5		653	7,15	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	17.10.19			325	100	5		488	7,17	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	06.11.19	15:00	8,1	322	50	5	41	412	11,08	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,0377	47,42774	939
SG231	06.11.19	15:00	8,1	325	50	1	41	414	10,82	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,0377	47,42774	939
SG231	06.11.19	15:40	8	323	50	5	41	413	10,45	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,0377	47,42774	939
SG231	06.11.19	16:00	8	323	100	5	41	495	10,76	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,0377	47,42774	939
SG231	06.11.19	16:00	8	327	100	1	41	498	11,04	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,0377	47,42774	939
SG231	08.11.19	09:33		328	100	5		620	9,55	Almer/Hoyer	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	10.02.20	11:04	4,4	210	500	10	40	738	50,65	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,0377	47,42774	939
SG231	10.02.20	11:04	4,4	218	500	1	40	776	52,35	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,0377	47,42774	939
SG231	13.02.20	09:52	2,9	287	100	1	40	468	14,64	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,0377	47,42774	939
SG231	16.06.20	17:07		305	500	1		1267	19,41	Almer/Elster	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	16.06.20	17:52		306	100	1		523	18,63	Almer/Elster	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	18.06.20	21:30	11,4	214,3	500	10	40	640	73,1	Almer/Elster/Kralik	Hach40d	10,0377	47,42774	939
SG231	18.06.20	21:31		215	500	1		675	81,04	Almer/Elster/Kralik	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	04.08.20	08:50	13,4	344	500	1	20	455	58,24	Nussbaumer	WTW3310	10,0377	47,42774	939
SG231	05.11.20	15:07	8,2	302	100	10	20	657	8,78	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,0377	47,42774	939
SG231	05.11.20	15:08	8,2	328	100	1	20	712	8,69	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,0377	47,42774	939
SG231	10.12.20	10:35		330	50	1		518	3,2	Almer/Elster	kA	10,0377	47,42774	939
SG231	10.12.20	11:10		328	50	1		516	3,17	Almer/Elster	kA	10,0377	47,42774	939

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG232	08.11.19	11:00	7,3	364	100	1	8	1035	6,33	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,0377	47,42774	939
SG233	08.11.19	10:00	6,9	326	150	1	12	665	19,77	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,03984	47,42612	922
SG233	11.02.20	16:24	2,3	275	500	1	40	565	66,48	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03945	47,42505	910
SG233	11.02.20	16:24	4,2	291	500	10	40	442	57,89	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03945	47,42505	910
SG233	16.06.20	14:06		290	250	1		539	48,59	Almer/Elster	kA	10,03945	47,42505	910
SG234	18.10.19			355	100	5		413	22,51	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,03914	47,42206	873
SG234	08.11.19	09:00	7	361	100	1	12	450	30,05	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,03914	47,42206	873
SG234	08.11.19	09:10	7,1	361	100	1	12	427	29,61	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,03914	47,42206	873
SG234	08.11.19	10:40	7	368	200	1	12	481	29,15	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,03914	47,42206	873
SG234	10.02.20	10:16	4,4	223	100	10	30	234	252,8	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03914	47,42206	873
SG234	10.02.20	10:16	4,4	234	100	1	30	247	260,2	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03914	47,42206	873
SG234	10.02.20	10:28	4,4	219	400	10	30	273	222,9	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03914	47,42206	873
SG234	10.02.20	10:28	4,4	230	400	1	30	288	229,2	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03914	47,42206	873
SG234	10.02.20	15:59	3,5	205	1000	1	30	309	288,5	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03914	47,42206	873
SG234	10.02.20	15:59	4,3	180	1000	10	30	295	292,8	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03914	47,42206	873
SG234	13.02.20	12:40	3,8	309	200	1	30	352	54,15	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03914	47,42206	873
SG234	13.02.20	12:56	3,9	311	500	1	30	455	50,8	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03914	47,42206	873
SG234	16.06.20	13:01		314	500	1		478	83,37	Almer/Elster	kA	10,03914	47,42206	873
SG234	05.11.20	11:39	8,5	324	300	10	25	375	31,35	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03914	47,42206	873
SG234	18.06.20	21:50	12,3	242	500	1		281	355,98	Almer/Elster/Kralik	kA	10,03914	47,42206	873
SG234	18.06.20	21:50	12,3	236	500	10	30	277	349,95	Almer/Elster/Kralik	Hach40d	10,03914	47,42206	873
SG234	10.12.20	10:35		390	100	1		422	13,7	Almer/Elster	kA	10,03914	47,42206	873
SG234	10.12.20	10:35		389	100	1		421	14,7	Almer/Elster	kA	10,03914	47,42206	873
SG301	12.02.20	09:57	1,6	322	100	1	26	746	6,93	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03436	47,42442	943

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG301	12.02.20	09:57	3,9	278	100	10	26	682	6,03	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03436	47,42442	943
SG301	16.06.20	11:51	11,8	353	100	10	19	608	10,02	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03436	47,42442	943
SG301	16.06.20	11:51	11,7	360	100	1	19	606	10,57	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03436	47,42442	943
SG315	07.11.19	09:15	6,5	336	100	1	9	2120	13,04	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,03378	47,43343	956
SG315	07.11.19	09:15	7,1	334	100	5	9	1520	18,33	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03378	47,43343	956
SG315	12.02.20	10:24	3,9	312	100	1	25	90	10,12	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03378	47,43343	956
SG315	12.02.20	10:24	25?	354	100	10	25	798	7,36	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02114	47,42677	806
SG315	16.06.20	12:10	11,3	317	100	10	40	711	8,7	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03364	47,4333	947
SG315	16.06.20	12:10	11,2	324	100	1	40	714	8,74	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03364	47,4333	947
SG320	07.11.19	13:30	7,5	369	100	5	14	510	28,42	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02114	47,42677	806
SG320	07.11.19	13:30	7,3	372	100	1	14	514	29,5	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,02114	47,42677	806
SG320	12.02.20	13:04	3,7	371	500	1	18	723	53,56	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02114	47,42677	806
SG320	12.02.20	13:04	21,8?	321	500	10	18	509	68,07	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02114	47,42677	806
SG320	16.06.20	13:59	13,3	363	200	10	16	514	61,89	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02114	47,42677	806
SG320	16.06.20	13:59	13,3	371	200	1	16	497	68,32	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02114	47,42677	806
SG320	10.12.20	13:10		399	50	1		438	13,22	Almer/Elster	kA	10,02114	47,42677	806
SG320	10.12.20	13:10		398	50	1		436	13,07	Almer/Elster	kA	10,02114	47,42677	806
SG322	17.10.19			350	50	5		529	18,21	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,02859	47,43124	900
SG322	17.10.19			361	50	5	100	434	21,77	Almer/Heidovitsch/Ottowitz	kA	10,02859	47,43124	900
SG322	07.11.19	12:00	8,2	374	100	1		513	28,25	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,02859	47,43124	900
SG322	07.11.19	12:00	8,3	369	100	5		504	26,58	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	08.11.19	10:45		377	100	1	100	456	30,22	Almer/Hoyer	kA	10,02859	47,43124	900
SG322	10.02.20	14:35	3,6	249	1000	1	40	498	335,4	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02859	47,43124	900
SG322	10.02.20	14:35	3,8	234	1000	10	40	607	261,1	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	12.02.20	12:13	3,7	360	500	1	40	534	60,32	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02859	47,43124	900

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG322	12.02.20	12:13	21,8?	279	500	10	40	504	63,31	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	16.06.20	12:50	12,4	367	100	10	30	422	56,25	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	16.06.20	12:50	12,3	372	100	1	30	402	63,01	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02859	47,43124	900
SG322	16.06.20	13:04	12,3	366	150	10	30	446	56,09	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	16.06.20	13:04	12,3	371	150	1	30	433	59,33	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02859	47,43124	900
SG322	18.06.20	22:29	10,6	289	500	10	30	358	267,7	Almer/Elster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	18.06.20	22:30		290	500	1		367	264,35	Almer/Elster/Kralik	kA	10,02859	47,43124	900
SG322	04.08.20	09:50	13,1	261	500	1	40	845	179,3	Nussbaumer	WTW3310	10,02859	47,43124	900
SG322	05.11.20	16:04	9	346	300	10	40	527	23,26	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02859	47,43124	900
SG322	05.11.20	16:04	9	375	300	5	40	556	23,05	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02859	47,43124	900
SG322	10.12.20	12:20		397	50	1		454	11,37	Almer	kA	10,02859	47,43124	900
SG322	10.12.20	12:20		395	50	1		453	11,17	Almer	kA	10,02859	47,43124	900
SG502	07.11.19	11:35	8,5	354	100	1	18	647	17,76	Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,03009		909
SG502	07.11.19	11:35	8,6	351	100	5	18	636	13,77	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03009		909
SG515	08.11.19	10:15	6,7	314	100	1	10	498	13,38	Holzschuster/Schriebl	WTW3630	10,039176	47,425888	920
SG519	11.02.20	16:01	2,3	267	100	1	20	405	23,3	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03992	47,42338	893
SG519	11.02.20	16:01	3,7	242	100	10	20	366	22,46	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03992	47,42338	893
SG519	16.06.20	13:34		306	250	1		528	21,27	Almer/Elster	kA	10,03992	47,42338	893
SG523	12.02.20	11:49	4,7	312	100	1	33	546	13,25	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02387	47,43305	910
SG523	12.02.20	11:49	8,4	279	100	10	33	445	33,3	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02387	47,43305	910
SG523	16.06.20	12:28	11,2	343	100	1	30	506	27,37	Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,02987	47,43305	917
SG523	16.06.20	12:28	11,2	336	100	10	30	501	28,95	Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,02987	47,43305	917
SG525	17.06.20	10:35	10,9	252	40000	1	290	341	5822,82	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,01896	47,42932	789
SG525	17.06.20	10:35	10,3	244	40000	10	290	290	7045	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,01896	47,42932	789

SG-Punkt	Datum	Uhrzeit	Temp.	Start-LF (µS/cm)	Menge(g)	Intervall (s)	Dis-tanz(m)	Peak-LF (µS/cm)	Q(L/s)	Ausführende	Gerät	Länge	Breite	Höhe
SG525	17.06.20	10:35	10,3	244	40000	1	290	316	5877,08	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,01896	47,42932	789
SG525	12.12.20	09:55		316	16000	1	290	421	716,29	Almer/Elster	kA	10,01896	47,42932	789
SG525	12.12.20	09:55		315	16000	1	290	416	690,97	Almer/Elster	kA	10,01896	47,42932	789
SG526	17.06.20	11:21	13	358	100	1	20	853	7,37	Almer/Holzschuster	WTW3310	10,01824	47,4282	795
SG526	17.06.20	11:21	13	366	100	1	20	905	7,46	Almer/Holzschuster	WTW3630	10,01824	47,4282	795
SG527	17.06.20	11:40	12	316	500	1	45	708	19,93	Almer/Holzschuster	WTW3310	10,01884	47,42754	795
SG527	17.06.20	11:40	12	323	500	1	45	742	19,93	Almer/Holzschuster	WTW3630	10,01884	47,42754	795
SG528	17.06.20	13:05	11,2	246	25000	1	220	367	2253,6	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03864	47,41859	819
SG528	17.06.20	13:05	11,2	254	25000	10	220	389	2229	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03864	47,41859	819
SG528	17.06.20	13:05	11,2	252	25000	1	220	369	2324,47	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,03864	47,41859	819
SG528	11.12.20	09:28		331	7500	1		428	175,35	Almer/Elster	WTW3630	10,03864	47,41859	819
SG533	17.06.20	14:31	9	250	250	1	150	384	2627,6	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	WTW3310	10,03003	47,41605	826
SG533	17.06.20	14:31	9	243	30000	10	200	324	2395	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	Hach40d	10,03003	47,41605	826
SG533	17.06.20	14:32	9	254	30000	1	150	326	2413,93	Almer/Elster/Holzschuster/Kralik	WTW3630	10,03003	47,41605	826
SG533	11.12.20	14:50		298	7500	1		400	356,93	Almer/Elster	WTW3630	10,03003	47,41605	826
SG533	11.12.20	14:50		297	7500	1		478	357,46	Almer/Elster	WTW3630	10,03003	47,41605	826
SG533	12.12.20	13:36		300	7500	1	130	435	339,49	Almer/Elster	kA	10,03003	47,41605	826
SG5330	12.12.20	13:36		299	7500	1	130	432	345,87	Almer/Elster	kA	10,03003	47,41605	826

Tabelle II: Monatliche Niederschläge und Abflussmessungen (in mm), N=Niederschlagsmessung; Q=Abflussmessung. Datenquellen: Hydrographischer Dienst Vorarlberg, GBA.

Monat	Schönenbach N(mm)	Sibratsg- fäll N (mm)	Schop- perau N (mm)	Rind- berg N(mm)	OM 102 N(mm)	OM 103 N(mm)	OM 150 N(mm)	SG202 Q(mm)	SG231 Q(mm)	SG234 Q(mm)	SG322 Q(mm)	Schönenbach Q (mm)	Leckenbach Q (mm)
-------	----------------------	--------------------------	------------------------------	------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------------	----------------------

Dez.19	78,60	196,60	167,50					104,01	43,40	126,61	131,20	75,62	157,87
Jän.20	78,60	107,20	62,60	63,40				78,04	46,81	49,49	55,59	33,48	84,63
Feb.20	255,40	302,60	258,00	207,90				203,41	133,04	273,47	252,20	268,52	390,63
Mär.20	108,60	118,40	112,70	65,40				133,21	122,51	160,58	147,22	148,96	236,28
Apr.20	62,80	67,00	55,50	41,40				63,78	51,81	11,64	14,75	254,50	172,99
Mai.20	93,20	145,20	114,90	113,30				95,76	86,04	57,52	47,65	215,44	112,58
Jun.20	365,20	362,20	312,80	255,00				211,28	245,46	242,30	223,09	323,58	239,44
Jul.20	204,80	175,90	207,30	156,50			183,50	78,98	91,72	147,54	79,94	146,19	117,12
Aug.20	240,30	250,20	257,00	237,60	263,75		257,50	101,32	88,19	77,10	100,17	152,54	143,84
Sep.20	217,40	152,40	169,00	129,80	187,50		179,00	69,35	57,75	100,94	105,47	163,23	173,56
Okt.20	184,20	182,80	162,00	152,90	219,75	258,50	186,00	83,97	96,23	166,74	149,16	217,12	242,85
Nov.20	42,70	48,80	30,10	32,90	50,75	45,00	49,00	33,26	70,13	95,64	65,16	59,65	64,35
Summe	1931,80	2109,30	1909,40	1456,10	721,75	303,50	855,00	1256,37	1133,09	1509,56	1371,60	2058,82	2136,14
Median	146,40	164,15	164,75	129,80	203,63	151,75	183,50	89,87	87,12	113,78	102,82	157,89	165,43
Mittelwert	160,98	175,78	159,12	132,37	180,44	151,75	171,00	104,70	94,42	125,80	114,30	171,57	178,01
Einzugsgebiet (km²)								0,311	0,296	1,027	0,752	31,1	13,7

Tabelle III: Wöchentliche Niederschläge und Abflussmessungen (in mm), N=Niederschlagsmessung; Q=Abflussmessung. Datenquellen: Hydrographischer Dienst Vorarlberg, ZAMG.

Wochenanfang	Schönenbach N(mm)	Sibratsgfäll N (mm)	Schopperrau N (mm)	Rindberg N(mm)	OM 102 N(mm)	OM 103 N(mm)	OM 150 N(mm)	SG202 Q(mm)	SG231 Q(mm)	SG234 Q(mm)	SG322 Q(mm)	Schönenbach Q (mm)	Leckenbach Q (mm)
Einzugsgebiet (km²)								0,311	0,296	1,027	0,752	31,1	13,7
27.11.19	48,9	43,8	43,1					16,60	7,89	19,59	24,40	12,22	24,42
04.12.19	14,9	34,7	32,3					12,07	6,08	7,73	11,02	7,34	22,57
11.12.19	12,2	18,6	20,9					22,89	9,51	28,64	26,27	14,23	32,42
18.12.19	5	105,6	82,7					40,17	11,05	39,70	41,32	28,34	50,40
25.12.19	31,5	34,8	26,5					24,02	13,20	45,97	46,80	21,32	43,22
01.01.20	26,1	40,9	14,7	23,7				22,65	14,22	21,15	24,30	10,37	29,51
08.01.20	4	4,7	2,6	3,1				12,68	8,72	5,63	7,89	5,96	13,68

Wochenanfang	Schönenbach N(mm)	Sibratsgfall N (mm)	Schoppernau N (mm)	Rindberg N(mm)	OM 102 N(mm)	OM 103 N(mm)	OM 150 N(mm)	SG202 Q(mm)	SG231 Q(mm)	SG234 Q(mm)	SG322 Q(mm)	Schönenbach Q (mm)	Leckenbach Q (mm)
15.01.20	17	20,7	16,3	15,8				11,56	9,06	4,07	4,42	4,67	12,08
22.01.20	17,3	24,5	19,8	11,6				13,16	10,19	4,37	5,05	4,43	12,04
29.01.20	157,7	164,4	142,7	124,3				113,62	59,17	124,14	107,80	156,23	220,02
05.02.20	29,3	39,7	36,9	27				35,37	22,47	49,45	52,18	37,64	64,26
12.02.20	25,6	33,6	21,2	16,2				29,56	20,00	50,99	48,45	19,82	40,03
19.02.20	36,8	54,6	33,4	36,8				27,32	23,51	41,84	36,02	47,88	63,37
26.02.20	46,2	63,6	63,9	29,1				28,52	21,09	48,81	47,05	23,10	35,66
04.03.20	59,7	58,4	68,3	32,9				48,01	25,33	41,00	39,90	13,59	22,00
11.03.20	16	16	9,4	12,7				40,64	34,00	74,38	58,52	63,70	107,09
18.03.20	5	4,7	2,1	2,2				17,23	28,85	13,39	15,80	45,84	69,16
25.03.20	1,9	2,4	2	1,3				14,33	25,75	4,34	7,65	17,72	22,63
01.04.20	0	0	0	0				13,38	20,22	3,32	5,21	25,08	30,78
08.04.20	9	7,1	5,5	4,9				14,04	9,66	2,59	3,00	63,37	54,17
15.04.20	10,3	6,7	2,5	6				14,30	8,28	2,30	2,14	79,65	44,74
22.04.20	23,1	34,1	29,3	18,3				15,57	7,71	1,69	1,84	65,79	29,70
29.04.20	74,6	84,5	84,6	64				26,76	22,94	24,23	18,55	82,29	60,67
06.05.20	5,6	20,3	14,1	11,2				20,21	20,73	7,72	7,44	69,56	23,57
13.05.20	11,5	29,6	10,9	24,5				27,57	22,53	19,21	15,54	39,23	24,60
20.05.20	16,5	26,3	15,7	21,6				17,85	16,92	5,22	6,27	34,17	12,32
27.05.20	5,4	3,6	7,8	4,2				14,45	12,08	4,01	3,31	14,72	6,64
03.06.20	91,7	80,8	90	78,1				34,55	27,64	37,53	31,18	48,92	31,44
10.06.20	103,4	101,4	105,6	102,8				59,18	51,17	98,56	84,75	131,27	114,57
17.06.20	43,9	44,6	39,2	23,7		46		33,73	34,28	48,98	43,83	55,17	51,21
24.06.20	126,2	135,4	78	50,4		152,5		79,23	129,16	56,09	62,42	84,30	40,58
01.07.20	43,2	30,2	35,2	17,2		35,5	30,75	17,68	26,35	60,20	17,04	39,05	19,71
08.07.20	40,6	45,1	38,3	42,3	36,25	52,25	45	13,67	18,81	37,99	16,07	23,20	26,08
15.07.20	71,5	64,3	70,9	67,5	65,5	83,25	77,25	32,08	29,43	32,47	35,42	63,78	57,18
22.07.20	49,5	36,3	62,9	29,5	28,25		29,25	10,15	12,47	12,85	8,79	13,44	9,76

Wochenanfang	Schönenbach N(mm)	Sibratsgfall N (mm)	Schoppernau N (mm)	Rindberg N(mm)	OM 102 N(mm)	OM 103 N(mm)	OM 150 N(mm)	SG202 Q(mm)	SG231 Q(mm)	SG234 Q(mm)	SG322 Q(mm)	Schönenbach Q (mm)	Leckenbach Q (mm)
29.07.20	102,5	88,6	103,4	81,2	101,75		101	35,67	25,40	18,98	34,90	68,86	52,50
05.08.20	0	0	0,1	0	0		0,25	11,21	19,19	17,48	13,95	24,39	19,38
12.08.20	24,4	26,8	33,4	21	28,25		25,5	10,90	20,94	10,02	6,72	8,47	10,13
19.08.20	9,2	11	9,8	12,1	12,75		13,5	8,74	8,20	7,71	5,23	6,40	6,38
26.08.20	107,7	127,5	112,2	127	156,25		151,25	43,06	26,56	34,55	61,89	67,66	82,80
02.09.20	16	14	17,1	15,1	14,25		17	12,04	13,09	28,10	17,87	24,58	21,64
09.09.20	0	0	0	0	0		0,25	10,76	5,74	11,28	5,68	9,25	8,81
16.09.20	69,8	37,8	46,4	31	14,25	31,5	21	9,96	4,76	10,67	4,82	11,88	7,57
23.09.20	128,1	96,9	103,6	79,9	125,75	102,25	108	32,21	24,23	39,49	54,59	84,79	94,29
30.09.20	38,9	39,5	32,6	27,6	32,75	28,25	25,25	13,05	17,25	28,17	17,87	61,20	63,07
07.10.20	38,1	38,2	28,2	27,7	46,5	57,5	45,75	14,59	21,37	52,59	34,62	53,06	54,63
14.10.20	8,2	10,5	10,6	6,5	12,25	15,25	9,75	8,21	14,75	25,29	18,82	21,18	24,65
21.10.20	54,7	52,8	62,5	51,8	73,25	84,5	44	17,20	17,64	29,93	34,75	28,98	26,03
28.10.20	54,5	54,2	35,8	46,6	66,25	87,75	75,5	37,94	39,91	53,87	56,97	85,34	105,84
04.11.20	0	0,1	0,2	0	0,75	1	1,25	7,75	15,70	28,93	16,25	19,37	18,94
11.11.20	8,5	9	4,6	5,6	7,5	9,5	8	6,84	15,75	13,84	11,02	7,86	9,52
18.11.20	24	27,3	17,3	20,1	31,25	20	25,5	7,59	20,47	24,89	18,58	11,21	15,23
25.11.20	3,2	3,2	3,4	1,7	0	0	0	6,54	6,89	9,83	9,20	5,35	8,60
Median	24,40	34,10	28,20	21,30	28,25	40,75	25,50	17,20	19,19	24,89	17,87	25,08	29,51
Mittelwert	37,15	40,63	36,80	30,37	40,65	50,44	38,86	23,94	21,48	28,79	26,25	39,00	40,61
Summe	1968,90	2153,40	1950,50	1457,80	853,75	807,00	855,00	1269,07	1138,29	1525,73	1391,35	2067,22	2152,32

Abbildung A1: Wöchentliche Abflusssummen (in mm) der 4 Hauptgerinne in Sibratsgfall. Im Vergleich dazu Messungen der Niederschlagsstation Sibratsgfall (strichliert, ohne Schneehöhenkorrektur). Quelle: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2020).

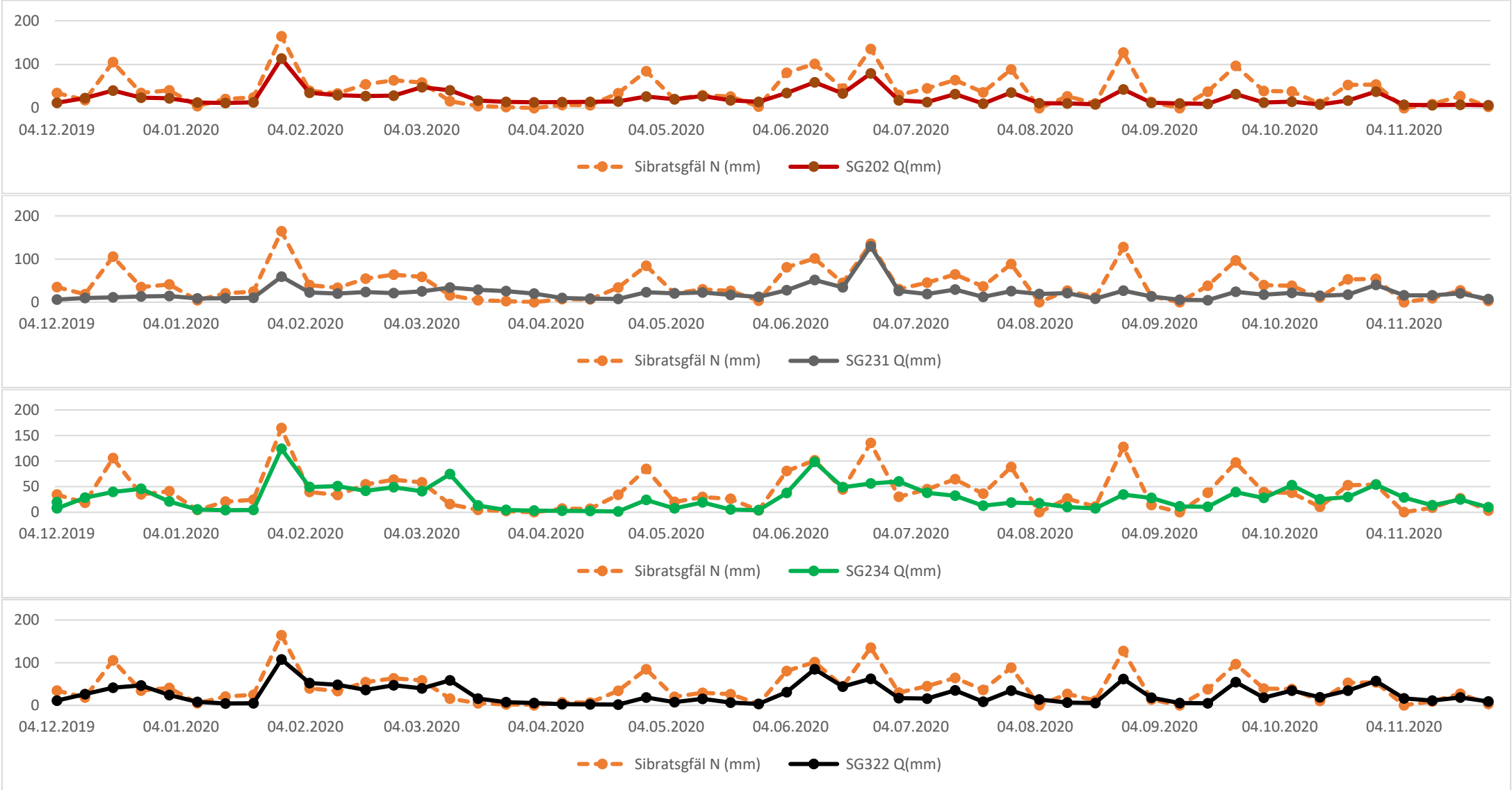


Abbildung A2: Wöchentliche Abflusssummen (in mm) der Messwehren in Schönenbach und Leckenbach. Im Vergleich dazu Messungen der Niederschlagsstation Sibratsgfall (strichliert, ohne Schneehöhenkorrektur). Quelle: HYDROGRAPHISCHER DIENST VORARLBERG (2020).

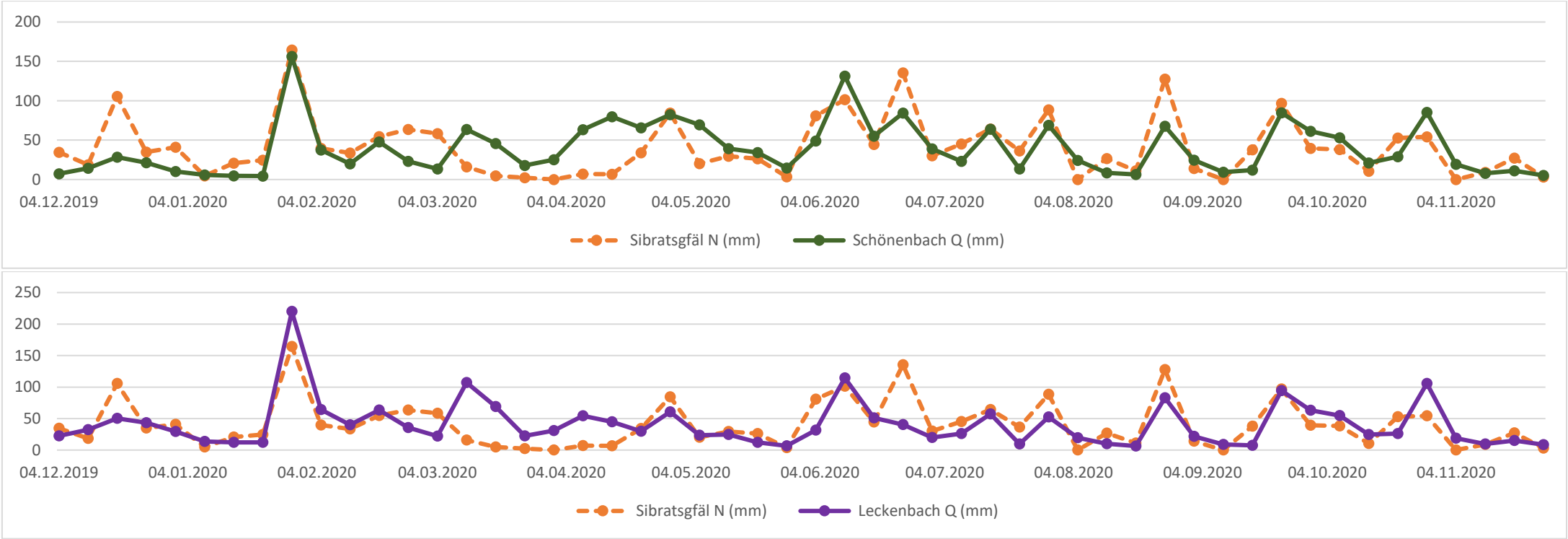


Tabelle IV: Wöchentliche mittlere Abflüsse in l/s

Datum	SG202	SG231	SG234	SG322
01.12.2019 - 07.12.2019	6,12	3,16	12,52	13,08
08.12.2019 - 14.12.2019	7,07	3,29	22,04	20,15
15.12.2019 - 21.12.2019	12,53	6,02	55,84	37,51
22.12.2019 - 28.12.2019	23,10	5,84	113,50	83,41
29.12.2019 - 04.01.2020	10,54	7,00	32,16	28,86
05.01.2020 - 11.01.2020	8,28	5,61	21,01	16,68
12.01.2020 - 18.01.2020	6,24	4,23	7,55	7,01
19.01.2020 - 25.01.2020	5,86	4,48	6,51	4,81
26.01.2020 - 01.02.2020	13,03	6,03	46,79	33,56
02.02.2020 - 08.02.2020	49,15	30,10	205,10	127,56
09.02.2020 - 15.02.2020	18,09	11,85	91,42	71,99
16.02.2020 - 22.02.2020	13,85	10,57	74,52	53,04
23.02.2020 - 29.02.2020	13,49	11,08	74,73	47,85
01.03.2020 - 07.03.2020	16,30	10,95	87,13	57,38
08.03.2020 - 14.03.2020	30,37	15,93	128,99	83,33
15.03.2020 - 21.03.2020	11,53	15,08	44,20	25,21
22.03.2020 - 28.03.2020	7,64	13,06	9,63	13,39
29.03.2020 - 04.04.2020	6,55	11,11	6,19	7,82
05.04.2020 - 11.04.2020	7,18	6,62	4,80	4,64
12.04.2020 - 18.04.2020	7,25	4,04	4,73	2,88
19.04.2020 - 25.04.2020	7,19	4,14	3,62	2,34
26.04.2020 - 02.05.2020	11,61	7,97	30,62	16,32
03.05.2020 - 09.05.2020	11,34	11,19	22,88	14,46
10.05.2020 - 16.05.2020	13,29	11,09	32,58	19,15
17.05.2020 - 23.05.2020	10,35	7,09	9,58	8,20
24.05.2020 - 30.05.2020	7,99	8,46	6,75	4,76
31.05.2020 - 06.06.2020	8,91	6,57	19,48	7,60
07.06.2020 - 13.06.2020	25,25	25,39	130,69	89,72
14.06.2020 - 20.06.2020	26,63	18,88	156,81	88,66
21.06.2020 - 27.06.2020	22,81	101,44	44,11	56,66
28.06.2020 - 04.07.2020	25,49	26,40	378,61	56,33
05.07.2020 - 11.07.2020	7,50	9,11	132,13	19,51
12.07.2020 - 18.07.2020	15,19	14,32	59,80	42,39
19.07.2020 - 25.07.2020	5,66	8,16	29,73	14,18
26.07.2020 - 01.08.2020	6,04	4,97	17,15	8,77
02.08.2020 - 08.08.2020	17,21	16,42	47,11	51,06
09.08.2020 - 15.08.2020	5,58	8,23	16,35	10,36
16.08.2020 - 22.08.2020	5,43	7,43	16,76	7,53
23.08.2020 - 29.08.2020	7,92	5,34	23,96	26,07
30.08.2020 - 05.09.2020	18,23	13,09	70,99	67,55
06.09.2020 - 12.09.2020	5,72	3,76	28,48	12,26
13.09.2020 - 19.09.2020	5,22	2,03	15,43	5,04
20.09.2020 - 26.09.2020	14,02	8,82	42,59	54,84

Datum	SG202	SG231	SG234	SG322
27.09.2020 - 03.10.2020	7,65	8,86	57,22	28,04
04.10.2020 - 10.10.2020	7,30	9,91	72,22	33,78
11.10.2020 - 17.10.2020	6,31	9,04	68,61	34,29
18.10.2020 - 24.10.2020	4,72	6,71	39,60	24,20
25.10.2020 - 31.10.2020	20,96	18,32	86,38	84,75
01.11.2020 - 07.11.2020	5,77	11,09	67,09	26,94
08.11.2020 - 14.11.2020	3,52	6,82	28,72	14,50
15.11.2020 - 21.11.2020	4,33	9,96	36,88	22,47
22.11.2020 - 28.11.2020	3,30	6,00	25,76	14,31
29.11.2020 - 01.12.2020	3,41	1,58	14,15	9,63

Tabelle V: Monatliche mittlere Abflüsse in l/s

Datum	SG202	SG231	SG234	SG322
01.12.2019	11,76	4,80	48,56	36,82
01.01.2020	8,40	5,17	18,99	15,60
01.02.2020	23,67	15,72	112,13	75,65
01.03.2020	15,49	13,54	61,59	41,31
01.04.2020	7,41	5,92	4,92	4,28
01.05.2020	11,11	9,51	22,31	13,37
01.06.2020	23,62	39,45	118,06	65,98
01.07.2020	9,10	10,14	103,87	22,43
01.08.2020	9,99	9,75	29,92	28,11
01.09.2020	9,59	6,60	40,02	30,58
01.10.2020	9,46	10,64	63,96	41,85
01.11.2020	4,18	8,01	37,92	18,89

Tabelle VI: Monatliche Änderung des Grundwasserspeichers bei Verwendung der ET0-Variante 1(ZAMG) in m3, Prozent (bezogen auf Niederschlag) und l/s/km2.

Monat	SG202(m ³)	SG202(%)	SG202(l/s/km ²)	SG231(m ³)	SG231(%)	SG231(l/s/km ²)	SG234(m3)	SG234(%)	SG234(l/s/km ²)	SG322(m ³)	SG322(%)	SG322(l/s/km ²)
Dez.19	74068,29	65,32	88,97	71739,10	78,90	90,48	168361,13	52,51	61,19	115747,72	50,23	57,50
Jän.20	34395,16	51,09	41,32	29214,77	57,58	36,85	102644,31	56,87	37,30	66143,14	51,95	32,86
Feb.20	78292,60	50,65	104,12	72721,37	58,45	101,55	113142,12	25,90	45,52	96574,24	30,42	53,12
Mär.20	13423,09	18,18	16,12	5147,58	8,66	6,49	-21548,95	-10,47	-7,83	-7984,01	-5,38	-3,97
Apr.20	-29895,48	-134,33	-37,11	-25193,65	-121,93	-32,83	-46069,83	-64,06	-17,30	-36184,65	-69,08	-18,57
Mai.20	-15745,24	-33,35	-18,91	-13037,02	-29,58	-16,44	-16454,67	-10,77	-5,98	-4469,27	-4,00	-2,22
Jun.20	20552,53	17,65	25,51	7647,94	6,99	9,97	30002,20	7,90	11,27	35331,56	12,76	18,14
Jul.20	-2045,92	-3,54	-2,46	-7169,03	-13,31	-9,04	-81715,96	-43,66	-29,70	-9949,47	-7,31	-4,94
Aug.20	19544,72	23,84	23,48	20694,48	27,09	26,10	83217,68	31,38	30,24	43311,53	22,35	21,52
Sep.20	7972,93	15,50	9,90	9191,94	19,44	11,98	-11140,90	-6,74	-4,18	-13202,45	-11,07	-6,78
Okt.20	20398,01	34,63	24,50	15768,75	28,30	19,89	-18636,49	-9,68	-6,77	-344,14	-0,24	-0,17
Nov.20	-6919,34	-53,64	-8,59	-17148,37	-141,64	-22,35	-86649,85	-210,33	-32,54	-40102,64	-132,08	-20,59
Mittelwert	17836,78	4,33	22,24	14131,49	-1,75	18,55	17929,23	-15,10	6,77	20405,96	-5,12	10,49
Median	17836,78	17,65	22,24	9191,94	8,66	11,98	-11140,90	-9,68	-4,18	-344,14	-4,00	-0,17
Summe	214041,35	-	266,85	169577,86	-	222,64	215150,80	-	81,22	244871,57	-	125,89

Tabelle VII: Monatliche Änderung des Grundwasserspeichers bei Verwendung der ETO-Variante 2(Radarmessstationen) in m3, Prozent und l/s/km2.

Monat	SG202(m³)	SG202(%)	SG202(l/s/km²)	SG231(m³)	SG231(%)	SG231(l/s/km²)	SG234(m³)	SG234(%)	SG234(l/s/km²)	SG322(m³)	SG322(%)	SG322(l/s/km²)
Dez.19	77886,76	68,69	93,56	75016,23	82,51	94,61	179536,22	56,00	65,25	125587,42	54,50	62,39
Jän.20	37841,67	56,21	45,46	31818,40	62,71	40,13	114950,59	63,68	41,78	75351,83	59,19	37,43
Feb.20	84463,56	54,64	112,33	78559,51	63,14	109,70	129516,99	29,65	52,11	113441,31	35,73	62,39
Mär.20	19745,16	26,75	23,72	11233,53	18,91	14,17	-5234,67	-2,54	-1,90	8199,35	5,53	4,07
Apr.20	-19517,85	-87,70	-24,23	-16901,43	-81,80	-22,03	-19469,44	-27,07	-7,31	-13898,18	-26,53	-7,13
Mai.20	-5390,20	-11,42	-6,47	-4461,69	-10,12	-5,63	12308,31	8,06	4,47	17236,93	15,43	8,56
Jun.20	30951,16	26,58	38,42	16550,67	15,13	21,57	58073,39	15,28	21,81	59008,71	21,31	30,29
Jul.20	4988,23	8,64	5,99	-2112,66	-3,92	-2,66	-59069,67	-31,56	-21,47	4744,82	3,49	2,36
Aug.20	29292,06	35,72	35,19	27308,64	35,74	34,44	106629,80	40,21	38,75	61470,44	31,71	30,54
Sep.20	14768,29	28,71	18,33	14272,05	30,19	18,60	5013,30	3,03	1,88	1009,11	0,85	0,52
Okt.20	26513,38	45,01	31,85	20887,18	37,49	26,34	-6517,32	-3,39	-2,37	11254,63	8,00	5,59
Nov.20	-2935,82	-22,76	-3,64	-14019,52	-115,79	-18,27	-77113,84	-187,19	-28,96	-31793,56	-104,71	-16,32
Mittelwert	24883,87	19,09	30,87	19845,91	11,18	25,92	36551,97	-2,99	13,67	35967,73	8,71	18,39
Median	24883,87	26,75	30,87	16550,67	18,91	21,57	12308,31	3,03	4,47	17236,93	8,71	8,56
Summe	298606,38	-	370,49	238150,90	-	310,98	438623,66	-	164,04	431612,81	-	220,69

Tabelle VIII.a: Chemieproben und wichtigste Ionen. Datenquelle: ELSTER et al. (2023), BIEBER et al. (2007).

Eingangsdatum	Bezeichnung	Kategorie	Wassertyp (>20eq%)	Schüt- tung (l/s)	T (°C)	LF (µS/cm)	pH	O2 (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	Fe (mg/l)	Sr (mg/l)	Ba (mg/l)	Si (mg/l)
24.06.2020	SG228	Abfluss (Dorfgraben)	Ca-HCO3		13,0	367			60,655	2,750	3,389	1,988	194,760	3,390	6,133	0,033	0,291	0,068	
23.07.2019	SG231	Abfluss (Dorfgraben)	Ca-HCO3	0,200	10,9	497	7,31	6,87	95,077	3,803	5,244	2,390	295,155	10,722	6,853	0,002	0,365	0,106	2,034
24.06.2020	SG525	Abfluss(ISubersach)	Ca-HCO3		10,8	257			41,550	1,559	0,933	0,492	128,241	0,329	6,441	0,021	0,281	0,028	
23.07.2019	SG322	Abfluss (Mähmoosgraben)	Ca-HCO3	9,000	19,9	313	8,44	8,98	55,336	3,723	3,279	0,950	182,166	2,708	8,271	0,028	0,586	0,050	2,331
23.07.2019	SG320	Abfluss (Mähmoosgraben)	Ca-HCO3	17,00 0	18,0	290	8,42	8,76	51,431	3,551	3,535	1,182	169,575	2,810	8,731	0,028	0,536	0,071	2,271
24.06.2020	SG320	Abfluss (Mähmoosgraben)	Ca-HCO3		13,3	371			63,411	1,960	3,696	1,619	203,019	2,693	5,823	0,034	0,449	0,057	
23.07.2019	SG043	Abfluss (Nestgraben)	Ca-HCO3		14,9	419	8,31		80,470	2,877	3,425	2,117	256,796	3,881	5,585	0,012	0,476	0,072	2,068
23.07.2019	SG205	Abfluss (Nestgraben)	Ca-HCO3	0,340	14,2	333	8,35	9,11	65,383	2,164	1,540	1,099	210,055	0,304	3,699	0,005	0,455	0,033	1,885
23.07.2019	SG216b	Abfluss (Nestgraben)	Ca-HCO3	1,100	14,2	412	8,09	8,98	77,041	2,899	3,657	1,986	246,479	3,774	5,848	0,004	0,448	0,062	2,217
24.06.2020	SG216b	Abfluss (Nestgraben)	Ca-HCO3		11,6	492	7,18		88,616	1,505	1,506	1,924	278,793	1,226	2,634	0,082	0,493	0,053	
24.06.2020	SG227	Abfluss (Nestgraben)	Ca-HCO3		12,4	370			65,480	1,677	1,833	1,322	204,875	1,388	5,546	0,031	0,385	0,055	
24.06.2020	SG528	Abfluss (Rubach)	Ca-HCO3		11,1	251			42,426	1,465	1,369	0,716	132,450	0,326	6,144	0,067	0,261	0,051	
23.07.2019	SG001	Abfluss (Sägebach)	Ca-HCO3	12,0	12,0	375	8,41		69,368	6,175	2,813	1,944	235,683	2,695	7,945	0,007	0,209	0,085	1,717
24.06.2020	SG001	Abfluss (Sägebach)	Ca-HCO3		12,5	324	8,02		52,006	2,424	1,911	2,053	168,419	1,591	4,800	0,028	0,186	0,064	
23.07.2019	SG103	Abfluss (Sägebach)	Ca-Mg-HCO3	2,000	11,0	308	8,44		49,594	8,481	2,077	0,612	190,109	0,378	6,100	0,005	0,194	0,071	2,633
24.06.2020	SG533	Abfluss (obere Subersach)	Ca-HCO3						41,276	1,564	1,027	0,440	126,450	0,592	6,939	0,021	0,295	0,012	
23.07.2019	KB1/03	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3	0,009	10,0	414	7,58	2,80	59,887	14,521	7,841	1,392	258,759	0,573	15,967	0,012	1,224	0,137	3,946
26.09.2007	KB1/03	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3			402	7,55		60,000	14,000	9,200	1,200	258,890	0,580	15,000	0,020			
19.01.2021	KB1-2020	Bohrloch	Ca-HCO3	0,130	10,5	574	7,20	0,33	117,90 2	2,362	3,119	0,609	370,444	2,851	7,006	1,645	0,439	0,455	
26.09.2007	KB6/07	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3			349	7,97		49,000	14,000	8,500	1,700	222,095	0,590	17,000	0,020			
23.07.2019	KB7/07	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3	0,100	10,1	409	7,56	0,08	59,970	14,264	8,359	1,444	259,790	0,598	15,602	0,003	1,284	0,132	3,951
26.09.2007	KB7/07	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3			402	7,54		60,000	14,000	8,000	1,200	255,884	0,550	15,000	0,040			
26.09.2007	KB7/07	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3			562	7,53		59,000	13,000	10,000	1,200	253,050	0,640	15,000	0,003			
19.01.2021	SG504	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3	0,090	8,5	408	7,74	0,04	60,285	14,284	7,660	1,154	253,506		20,627	0,015	1,430	0,113	
24.06.2020	SG504	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3			406	7,70		50,241	9,077	6,595	1,317	199,092	0,465	15,688	0,007	1,400	0,103	

Eingangsdatum	Bezeichnung	Kategorie	Wassertyp (>20eq%)	Schüt- tung (l/s)	T (°C)	LF (µS/cm)	pH	O2 (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	Fe (mg/l)	Sr (mg/l)	Ba (mg/l)	Si (mg/l)
26.03.2021	KB1-2020	Bohrloch	Ca-HCO3						102,72	1,894	1,881	0,771	320,618	2,565	6,040	0,447	3,614	0,296	
26.03.2021	KB1/03	Bohrloch	Ca-Mg-HCO3						56,967	12,903	6,880	1,183	256,512	0,515	15,430	0,056	13,220	0,120	
23.07.2019	SG216a	Drainage (Nestgraben)	Ca-HCO3	0,950	12,0	547	7,79	9,41	107,218	2,381	2,535	1,564	333,542	4,449	3,719	0,019	0,568	0,075	2,092
23.07.2019	SG012	Drainage (Sägebach)	Ca-HCO3		10,7	559	7,32		102,18	3,908	5,129	5,173	310,606	15,856	5,633	0,001	0,313	0,118	2,090
24.06.2020	SG012	Drainage (Sägebach)	Ca-HCO3		10,0	520	7,48		79,305	2,143	4,374	4,151	243,862	9,031	4,434	0,005	0,289	0,094	
23.07.2019	SG330	Quelle (Dorfgraben)	Ca-HCO3	0,150	11,5	498	7,34	8,89	93,156	3,519	4,988	1,930	293,636	7,948	6,052	0,000	0,435	0,094	2,397
24.06.2020	SG330	Quelle (Dorfgraben)	Ca-HCO3		10,3	464	7,23		75,889	2,100	3,583	1,864	236,287	4,849	5,015	0,006	0,346	0,075	
23.07.2019	SG334	Quelle (Hocheegg)	Ca-Mg-HCO3	5,100	7,4	283	7,79	10,90	40,700	11,449	1,897	0,774	177,685	0,545	5,912	0,000	0,147	0,071	2,899
24.06.2020	SG334	Quelle (Hocheegg)	Ca-Mg-HCO3		7,9	269	8,15		32,974	6,300	1,406	0,680	127,893	0,512	5,065	0,004	0,119	0,060	
23.07.2019	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	Ca-HCO3	0,110	12,8	316	7,96	9,51	58,434	2,347	0,967	0,466	184,860	0,254	5,473	0,001	0,503	0,021	2,147
23.07.2019	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	Ca-HCO3	1,500	7,2	295	8,05	9,70	51,278	4,881	1,706	0,535	173,302	0,325	8,515	0,002	0,619	0,021	2,286
24.06.2020	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	Ca-HCO3		8,3	287	7,67		46,338	1,178	0,693	0,427	143,525	0,298	3,162	0,004	0,390	0,019	
24.06.2020	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	Ca-HCO3		8,3	287	7,67		44,605	2,255	1,107	0,427	142,335	0,308	5,321	0,004	0,488	0,018	
24.06.2020	SG225	Quelle (Nestgraben)	Ca-HCO3		11,7	471	7,42		75,688	2,160	4,534	2,007	234,019	6,573	6,192	0,005	0,336	0,086	
26.03.2021	SG225	Quelle (Nestgraben)	Ca-HCO3						87,867	3,531	6,159	2,017	275,865	12,290	6,150	0,002	3,726	0,092	
23.07.2019	SG229	Quelle	Ca-HCO3		15,0	508	7,23		92,427	3,696	5,253	2,193	286,793	10,522	6,689	0,002	0,406	0,105	2,300
24.06.2020	SG229	Quelle	Ca-HCO3		13,0	472	7,38		75,930	2,209	4,640	2,169	234,702	7,068	6,164	0,004	0,339	0,087	
26.03.2021	SG229	Quelle	Ca-HCO3						87,947	3,557	6,155	1,952	276,294	12,240	6,115	0,006	3,692	0,092	
24.06.2020	SG039	Quelle (Sägebach)	Ca-HCO3		11,1	334	8,22		54,188	2,721	1,184	1,129	179,267	0,374	2,514	0,030	0,143	0,046	

Tabelle VIII.b: Chemieproben, Spurenelemente. Datenquelle: ELSTER et al. (2023), BIEBER et al. (2007).

Eingangsdatum	Bezeichnung	Kategorie	Li (mg/l)	Rb (mg/L)	Cs (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)	V (mg/l)	Cu (mg/l)	Ni (mg/l)	Co (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Mo (mg/l)	As (mg/l)	Cr (mg/l)	U (mg/l)
24.06.2020	SG228	Abfluss (Dorfgraben)	0,002280	0,000417	< 0,0001	0,000165	0,001782	< 0,0001	0,000178	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,000276	0,013087	< 0,0001	0,000100	0,000155	< 0,0001
23.07.2019	SG231	Abfluss (Dorfgraben)	0,003891	0,000394	< 0,0001	0,000347	0,002707	< 0,0001	0,000324	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,000146	0,013975	0,000110	0,000100	0,000203	0,000119
24.06.2020	SG525	Abfluss (Subersach)	0,001953	0,000271	< 0,0001	0,000210	0,001990	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,003705	< 0,0001	< 0,0001	0,000227	< 0,0001
23.07.2019	SG322	Abfluss (Mähmoosgraben)	0,002887	0,000646	< 0,0001	0,001800	0,017625	0,000143	0,002944	0,000872	< 0,0001	< 0,0001	0,000178	0,028690	0,000150	0,000139	0,000444	0,000137
23.07.2019	SG320	Abfluss (Mähmoosgraben)	0,001266	0,000581	< 0,0001	0,006981	0,024619	0,000142	0,003738	0,001227	0,000175	< 0,0001	0,000516	0,018223	0,000145	0,000199	0,000336	0,000137
24.06.2020	SG320	Abfluss (Mähmoosgraben)	0,006421	0,005971	< 0,0001	0,039206	0,015640	< 0,0001	0,002277	0,004049	0,000243	0,000162	0,128593	0,061948	0,005403	0,000226	0,000315	0,000122
23.07.2019	SG043	Abfluss (Nestgraben)	0,001386	0,000755	< 0,0001	0,000518	0,000859	< 0,0001	0,000410	0,000202	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,009576	< 0,0001	0,000100	0,000129	< 0,0001
23.07.2019	SG205	Abfluss (Nestgraben)	0,000821	0,000614	< 0,0001	0,004867	0,002422	< 0,0001	0,000664	0,000539	< 0,0001	< 0,0001	0,000452	0,006501	< 0,0001	< 0,0001	0,000218	< 0,0001
23.07.2019	SG216b	Abfluss (Nestgraben)	0,003070	0,000532	< 0,0001	0,000400	0,001703	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,009141	< 0,0001	< 0,0001	0,000203	0,000141
24.06.2020	SG216b	Abfluss (Nestgraben)	0,014383	0,000491	< 0,0001	0,021589	0,012107	0,000245	0,000418	0,000568	0,000127	< 0,0001	< 0,0001	0,016022	0,000472	0,000070	0,000162	0,000256
24.06.2020	SG227	Abfluss (Nestgraben)	0,012790	0,000403	< 0,0001	0,020778	0,023716	0,000334	< 0,0001	0,000301	0,000148	< 0,0001	< 0,0001	0,007809	0,000557	< 0,0001	0,000144	0,000214
24.06.2020	SG528	Abfluss (Rubach)	0,000924	0,000239	< 0,0001	0,001480	0,017402	< 0,0001	0,001269	0,000566	0,000115	< 0,0001	0,000485	0,011678	0,000113	< 0,0001	0,000259	0,000104
23.07.2019	SG001	Abfluss (Sägebach)	0,001065	0,000262	< 0,0001	0,001693	0,020220	< 0,0001	0,001502	0,000613	0,000118	< 0,0001	0,000500	0,010954	0,000112	0,000109	0,000263	< 0,0001
24.06.2020	SG001	Abfluss (Sägebach)	0,001282	0,000485	< 0,0001	0,005385	0,052064	0,000135	0,002334	0,000837	0,000167	< 0,0001	0,000762	0,016848	0,000116	0,000130	0,000326	< 0,0001
24.06.2020	SG533	Abfluss (Subersach)	0,000274	0,001912	< 0,0001	0,008619	0,011152	0,000208	0,006339	0,001741	< 0,0001	< 0,0001	0,001189	0,017147	0,000240	0,000256	0,000182	< 0,0001
23.07.2019	SG324; KB1/03	Bohrloch	0,003050	0,000584	< 0,0001	0,012862	0,003539	< 0,0001	0,000836	0,000182	< 0,0001	< 0,0001	0,000067	0,011424	0,000130	0,000179	0,000142	0,000133
26.09.2007	SG324;KB1/03	Bohrloch	0,005064	0,000822	< 0,0001	0,000212	0,000169	< 0,0001	0,000152	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,007848	0,000108	0,000100	0,000215	< 0,0001
19.01.2021	SG535; KB1-2020	Bohrloch	0,015703	0,000424	< 0,0001	0,111272	0,002349	< 0,0001	0,000718	0,000683	0,000116	< 0,0001	0,000202	0,022383	0,000519	0,000100	0,000352	0,000259
26.09.2007	SG504; KB6/07	Bohrloch				0,020000												
23.07.2019	SG323; KB7/07	Bohrloch	0,001148	0,000525	< 0,0001	0,474191	0,003658	< 0,0001	0,000390	0,001142	0,000580	< 0,0001	< 0,0001	0,012841	0,000145	0,000957	0,000108	0,000149
26.09.2007	SG323; KB7/08	Bohrloch				0,030000												
26.09.2007	SG323; KB7/09	Bohrloch	0,016778	0,000564	< 0,0001	0,197863	0,004988	< 0,0001	0,001922	0,000925	0,000128	< 0,0001	0,000657	0,028148	0,000446	0,000100	< 0,0001	0,000303
19.01.2021	SG504	Bohrloch				0,210000												

Eingangsdatum	Bezeichnung	Kategorie	Li (mg/l)	Rb (mg/L)	Cs (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)	V (mg/l)	Cu (mg/l)	Ni (mg/l)	Co (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Mo (mg/l)	As (mg/l)	Cr (mg/l)	U (mg/l)
24.06.2020	SG504	Bohrloch	0,00210 8	0,000781	< 0,0001	0,00397 5	0,00687 1	0,00012 6	0,00136 9	0,00041 2	< 0,0001	< 0,0001	0,00016 0	0,01602 5	0,00011 6	0,00022 8	0,00011 8	0,00018 4
26.03.2021	SG535; KB1-2020	Bohrloch	0,00066 9	0,000457	< 0,0001	0,16781 7	0,00156 2	< 0,0001	0,00290 9	0,00087 8	0,00024 4	< 0,0001	0,00081 4	0,00981 3	0,00007 8	0,00038 7	0,00014 0	0,00020 1
26.03.2021	SG324; KB1/03	Bohrloch	0,01392 3	0,000380	< 0,0001	0,10528 4	0,00243 2	< 0,0001	0,00628 3	0,00111 0	0,00017 7	< 0,0001	0,00041 0	0,01366 3	0,00047 4	0,00015 7	0,00024 8	0,00026 1
23.07.2019	SG216a	Drainage (Nestgraben)	0,00177 5	0,001153	< 0,0001	0,00129 0	0,00205 3	< 0,0001	0,00162 0	0,00032 3	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,01219 0	< 0,0001	0,00010 0	0,00012 2	0,00012 2
23.07.2019	SG012	Drainage (Sägebach)	0,00114 7	0,000696	< 0,0001	0,00018 7	0,00049 0	< 0,0001	< 0,0001	0,00037 2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,00363 7	< 0,0001	< 0,0001	0,00027 7	< 0,0001
24.06.2020	SG012	Drainage (Sägebach)	0,00103 0	0,000535	< 0,0001	0,01304 3	0,01337 9	< 0,0001	0,00048 3	0,00038 9	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,01515 9	< 0,0001	0,00015 3	0,00016 8	0,00011 0
23.07.2019	SG330	Quelle (Dorfgraben)	0,00154 5	0,000971	< 0,0001	0,00470 5	0,00923 5	0,00012 5	0,00189 2	0,00069 8	< 0,0001	< 0,0001	0,00013 6	0,02283 0	0,00013 4	0,00024 2	0,00023 4	0,00013 5
24.06.2020	SG330	Quelle (Dorfgraben)	0,00183 0	0,000488	< 0,0001	0,00073 1	0,00439 3	< 0,0001	0,00051 9	0,00020 9	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,01235 9	< 0,0001	0,00010 0	< 0,0001	< 0,0001
23.07.2019	SG334	Quelle (Hohegg)	0,00107 9	0,000596	< 0,0001	0,02295 3	0,00156 1	< 0,0001	0,00082 2	0,00032 5	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,01807 1	< 0,0001	0,00013 6	< 0,0001	0,00013 5
24.06.2020	SG334	Quelle (Hohegg)	0,00166 0	0,001180	< 0,0001	0,00145 2	0,00449 7	0,00013 5	0,00173 1	0,00029 8	< 0,0001	< 0,0001	0,00010 7	0,01680 0	0,00018 3	0,00013 4	0,00017 1	0,00012 0
23.07.2019	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	0,00038 8	0,000458	< 0,0001	0,04582 6	0,01012 4	0,00020 6	0,00228 1	0,00143 6	0,00017 8	< 0,0001	< 0,0001	0,00697 1	< 0,0001	0,00035 0	0,00033 0	0,00014 5
23.07.2019	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	0,00107 5	0,000516	< 0,0001	0,00117 6	0,00201 1	< 0,0001	0,00037 2	0,00044 6	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,00991 0	< 0,0001	< 0,0001	0,00020 8	< 0,0001
24.06.2020	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	0,00111 2	0,000552	< 0,0001	0,00467 3	0,02073 6	0,00012 4	0,00333 8	0,00125 2	0,00017 3	< 0,0001	0,00056 2	0,02377 1	< 0,0001	0,00020 1	0,00038 1	< 0,0001
24.06.2020	SG310/SG311	Quelle (Krinegg)	0,00131 4	0,000984	< 0,0001	0,00440 0	0,02819 4	0,00014 4	0,00298 2	0,00101 8	0,00015 9	< 0,0001	0,00053 3	0,01984 5	0,00013 0	0,00021 0	0,00034 6	0,00010 2
24.06.2020	SG225	Quelle (Nestgraben)	0,00155 8	0,000690	< 0,0001	0,00041 0	0,00193 8	< 0,0001	0,00111 2	0,00063 6	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,00937 1	< 0,0001	0,00010 0	0,00010 3	0,00010 8
26.03.2021	SG225	Quelle (Nestgraben)	0,00110 1	0,000631	< 0,0001	0,00025 9	0,00161 6	< 0,0001	0,00081 8	0,00028 0	< 0,0001	< 0,0001	0,00021 7	0,00852 6	< 0,0001	0,00003 8	0,00015 8	0,00012 7
23.07.2019	SG229	Quelle	0,00110 8	0,000528	< 0,0001	0,00043 0	0,00154 7	< 0,0001	0,00024 2	0,00038 0	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,00799 9	< 0,0001	< 0,0001	0,00018 5	< 0,0001
24.06.2020	SG229	Quelle	0,00155 5	0,000686	< 0,0001	0,00136 6	0,00189 0	< 0,0001	0,00064 8	0,00023 3	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,02462 2	< 0,0001	0,00010 0	< 0,0001	0,00011 7
26.03.2021	SG229	Quelle	0,00111 1	0,000619	< 0,0001	0,00036 5	0,00292 7	< 0,0001	0,00634 9	0,00044 4	< 0,0001	< 0,0001	0,00041 3	0,01722 2	< 0,0001	0,00004 6	0,00020 0	0,00012 7
24.06.2020	SG039	Quelle (Sägebach)	0,00390 2	0,000574	< 0,0001	0,00288 9	0,00598 3	< 0,0001	0,00031 5	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,01413 2	< 0,0001	0,00010 0	0,00013 9	0,00016 8

Tabelle IX: Korrelationsmatrix, in mg/l. Datenquelle: ELSTER et al. 2022. Erstellt mit Microsoft Excel.

	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	Fe (mg/l)	Sr (mg/l)	Ba (mg/l)	Si (mg/l)	F (mg/l)	NO3 (mg/l)	Li (mg/l)	Rb (mg/L)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)	Cu (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Mo (mg/l)	As (mg/l)	Cr (mg/l)	U (mg/l)
Ca (mg/l)	1,0																								
Mg (mg/l)	-0,3	1,0																							
Na (mg/l)	0,1	0,8	1,0																						
K (mg/l)	0,5	-0,1	0,3	1,0																					
HCO3 (mg/l)	0,9	0,1	0,5	0,5	1,0																				
Cl (mg/l)	0,7	-0,3	0,2	0,8	0,5	1,0																			
SO4 (mg/l)	-0,2	0,9	0,8	-0,1	0,1	-0,3	1,0																		
Fe (mg/l)	0,4	-0,1	-0,1	-0,2	0,4	0,0	0,0	1,0																	
Sr (mg/l)	0,1	0,4	0,4	-0,1	0,2	0,0	0,4	0,0	1,0																
Ba (mg/l)	0,6	0,1	0,3	0,1	0,7	0,2	0,2	0,9	0,2	1,0															
Si (mg/l)	-0,4	0,9	0,7	-0,2	0,0	-0,3	0,8	0,0	0,8	0,5	1,0														
F (mg/l)	-0,3	0,6	0,6	-0,1	0,0	-0,3	0,8	0,3	0,6	0,4	0,8	1,0													
NO3 (mg/l)	0,6	-0,4	0,0	0,7	0,4	0,9	-0,4	-0,1	-0,1	0,1	-0,5	-0,5	1,0												
Li (mg/l)	0,2	0,2	0,2	-0,1	0,3	-0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,1	0,3	-0,4	1,0											
Rb (mg/L)	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	1,0										
Mn (mg/l)	0,0	0,5	0,4	-0,1	0,3	-0,2	0,5	0,2	0,2	0,4	0,6	0,5	-0,3	0,3	0,0	1,0									
Al (mg/l)	-0,3	-0,3	-0,4	-0,1	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	0,0	0,1	-0,1	1,0								
Cu (mg/l)	-0,2	0,0	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,1	-0,1	0,5	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	0,0	0,2	0,0	0,3	1,0							
Ni (mg/l)	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1	-0,3	0,1	0,8	0,2	0,3	0,4	1,0						
Pb (mg/l)	0,0	-0,2	0,0	0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,6	-0,1	-0,1	0,1	1,0	0,0	0,1	0,0	0,9	1,0					
Zn (mg/l)	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,2	0,0	-0,2	0,2	0,8	0,1	0,3	0,2	0,7	0,9	1,0				
Mo (mg/l)	0,0	-0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,4	-0,1	-0,1	0,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0	0,9	1,0			
As (mg/l)	-0,2	0,3	0,1	-0,2	0,0	-0,3	0,3	0,0	0,0	0,1	0,6	0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,8	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	1,0		
Cr (mg/l)	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,2	-0,1	0,0	-0,4	-0,3	-0,1	0,1	0,1	-0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	-0,1	1,0	
U (mg/l)	0,2	0,3	0,2	-0,2	0,4	-0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	-0,5	0,9	-0,2	0,4	-0,1	0,1	0,0	-0,2	0,0	-0,1	0,0	0,0	1,0

Tabelle X.a: Bohrkernbeschreibung SG535

Bohrpunkt	SG535	Beschreibung laut ÖNORM B4401, 2020		
Datum Bohrung	02-03.11.2020	Bohrkernanalyse	03.11.2020	
Tiefe (cm)	Beschreibung	Farbe	Rundung Grobanteil	Bemerkungen
0-10	Mutterboden, schluffig,tonig (Mu, u,s)	mittelbraun	-	
10-20	Schluff, tonig, feinkiesig (U,t,fg)	hellbraun	gerundet	gerundeter Stein, ca. 7cm (X) von 13-20cm, Pflanzenreste
20-30	Schluff, tonig, grobkiesig (U,t,gg)	hellbraun	angerundet	
30-40	Schluff, tonig, grobkiesig (U,t,gg)	hellbraun	angerundet	
40-50	Schluff, tonig, grobkiesig (U,t,gg)	hellbraun	angerundet	
50-60	Schluff, tonig, grobkiesig (U,t,gg)	hellbraun	angerundet	
60-70	Schluff, tonig, grobkiesig (U,t,gg)	hellbraun	angerundet	angerundeter Stein (X)
70-80	Schluff, tonig, grobkiesig (U,t,gg)	hellbraun	angerundet	
80-90	Ton,schluffig, kiesig (T, u,g)	mittelgrau	angerundet	
90-100	Grobkies, schluffig (gG, u)	mittelgrau	angerundet	
100-110	Ton, kiesig (T, g)	braungrau	gerundet	gerundeter Stein (X),schlecht sortiert
110-120	Ton, kiesig (T, g)	mittelgrau mit braunen Stellen	gerundet	
120-130	Ton, kiesig (T, g)	mittelgrau mit braunen Stellen	gerundet	
130-140	Ton, kiesig (T, g)	mittelgrau mit braunen Stellen	gerundet	Stein, 15cm (X)
140-150	Grobkies, schluffig,sandig (gG,u,s)	braungrau	gerundet	Stein (Y)
150-160	Grobkies, tonig, schluffig (gG, t, u)	bräunlich-mittelgrau	kA	
160-170	Grobkies, tonig, schluffig (gG, t, u)	bräunlich-mittelgrau	kA	schlecht sortiert
170-180	Grobkies, tonig, schluffig (gG, t, u)	bräunlich-mittelgrau	kA	Stein (X)
180-190	Grobkies, tonig, schluffig (gG, t, u)	mittelgrau	kA	
190-200	Grobkies, tonig, schluffig (gG, t, u)	mittelgrau	kA	
200-250	Grobkies, tonig, schluffig (gG, t, u)	mittelgrau	angerundet	
250-300	Ton, schluffig,sandig,grobkiesig,gering steinig (T,u,s,gg,x')	mittelgrau	angerundet	
300-400	Grobkies, tonig, schluffig, sandig (gG,t,u,s)	bräunlich.grau	kA	stark sandige Zwischenlage (S) von 355-365cm
400-500	Grobkies, schluffig,sandig (gG,u,s)	gräulich-hellbraun	ka	
500-520	Mittelkies, tonig, sandig (mG,t,s)	braun	kA	
520-530	Ton (T)	braun	-	
530-580	Feinkies, sandig (fG,s)	braun	kA	
580-600	Feinkies, sandig (fG,s)	braun	kA	wassergesättigt, zerflossen
600-660	Feinsand, kiesig (fS,g)	mittelbraun	kA	wasserführende Schicht
660-760	Grobkies ,gering sandig (gG, s')	graubraun	kA	keine Probenahme möglich
760-800	Ton, schluffig (T,u)	gräulich-ockerbraun	-	
800-900	Ton, schluffig, kiesig (T,u,g)	mittelgrau	gerundet	
900-1000	Ton, schluffig, kiesig (T,u,g)	mittelgrau	gerundet	Hohe Wassersättigung
1000-1100	Ton, schluffig, grobkiesig (T,u,gg)	mittelgrau	gerundet	Hohe Wassersättigung
1100-1140	Ton, schluffig, mittelkiesig (T,u,gg)	mittelgrau	ka	
1140-1160	Feinkies, grobkiesig, steinig (fG,gg,x)	mittelgrau	ka	
1160-1200	Sand, tonig, gering grobkiesig (S, t,gg')	mittelgrau	ka	
1200-1300	Schluff, tonig, kiesig (U,t,g)	mittelgrau	angerundet	
1300-1370	Schluff, tonig, kiesig (U,t,g)	mittelgrau	angerundet	

1370-1380	Kies, sandig (G,s)	mittelgrau	angerundet	
1380-1400	Schluff, tonig, kiesig (U,t,g)	mittelgrau	angerundet	
Tiefe (cm)	Beschreibung	Farbe	Rundung Grobanteil	Bemerkungen
1400-1500	Schluff, tonig, feinkiesig, grobkiesig (U,t,gg,fg)	mittelgrau	angerundet-gerundet	Stein (X), bis 16cm
1500-1600	Schluff, tonig, feinkiesig, grobkiesig (U,t,gg,fg)	mittelgrau	angerundet-gerundet	
1600-1700	Schluff, tonig, feinkiesig, grobkiesig (U,t,gg,fg)	mittelgrau	gerundet	
1700-1800	Schluff, tonig, sandig, grobkiesig (U,t,s,gg)	braungrau	angerundet	
1800-1845	Schluff, tonig, mittelkiesig, grobkiesig (U,t,mg,gg)	braungrau	angerundet	Stein (X), 15cm; Ende der Bohrung

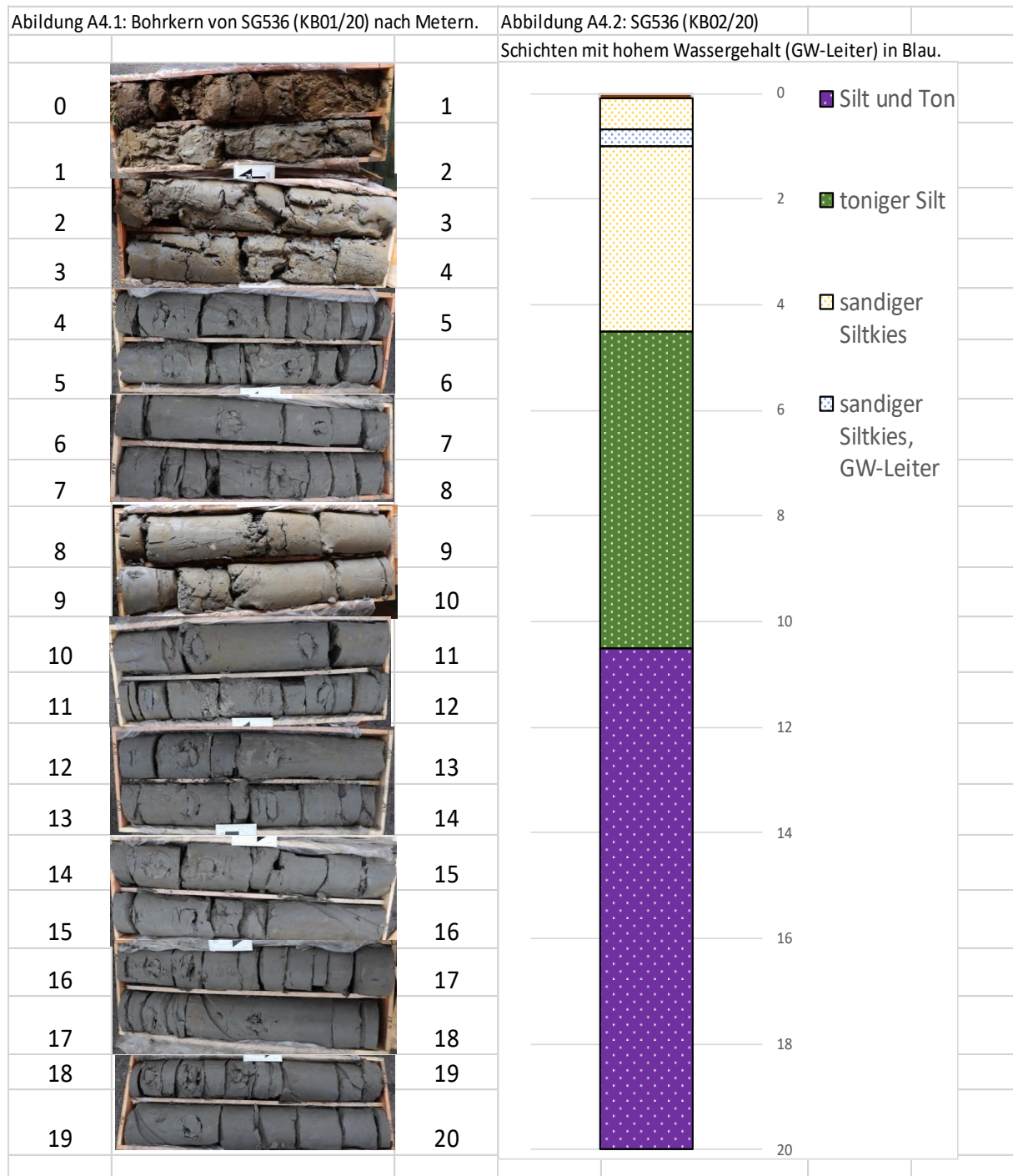


Fotos: M. Kralik. Datenquelle (Kornsummen): ELSTER et al. (2023)

Tabelle X.b: Bohrkernbeschreibung SG536

Bohrpunkt	SG536	Beschreibung laut ÖNORM B4401, 2020		
Datum Bohrung	04.11.2020			
Datum Kernanalyse	04.11.2020			
Tiefe (cm)	Beschreibung	Farbe	Rundung Grobanteil	Bemerkungen
0-10	Mutterboden, tonig,schluffig (Mu,t,u)	braun	-	stark verwurzelt
10-20	Ton, schluffig (T,u)	mittelbraun	-	Wurzeln
20-30	Ton, schluffig, gering feinkiesig (T,u,fg')	mittelbraun	kA	vereinzelt Wurzeln
30-45	Ton, schluffig,feinkiesig (T,u,fg)	mittelbraun mit grün-grauen Flecken	kA	Stein (X), 7cm, vereinzelte Wurzeln
45-50	Ton, schluffig (T,u)	dunkelbraun	-	sehr schmieriger Ton, Wurzeln enden
50-60	Ton, sehr schluffig (T,ſ)	mittelbraun mit dunkelbraunen Lagen	-	
60-67	Ton, sehr schluffig, gering kiesig (T,ſ, g')	mittelbraun mit dunkelbraunen Lagen	kA	bei 67cm Wechsel zu stark wasserführender Schicht
67-80	Schluff, tonig, sandig, gering grobkiesig (U,t,s,gg')	mittelbraun	angerundet	wassergesättigt, zerflossen
80-90	Schluff, tonig, sandig, gering grobkiesig (U,t,s,gg')	mittelbraun	angerundet	wassergesättigt, zerflossen
90-100	Ton, schluffig, gering grobkiesig (T,u, gg')	mittelgrau	angerundet	sehr feucht
100-110	Ton, schluffig,grobkiesig (T,u,gg)	mittelgrau	angerundet	
110-120	Ton, schluffig,mittelkiesig (T,u,mg)	mittelgrau	angerundet	
120-130	Ton, schluffig, sandig, gering kiesig (T,u,s,g')	mittelgrau	angerundet	
130-140	Ton, schluffig, sandig, grobkiesig (T,u,s,gg)	mittelgrau	angerundet	Stein(X), 5cm, feucht
140-150	Ton, schluffig, sandig, grobkiesig (T,u,s,gg)	mittelgrau	angerundet	feucht
150-160	Ton, schluffig, sandig, grobkiesig, steinig (T,u,s,gg,x)	mittelgrau	angerundet	feucht
160-170	Ton, schluffig, sandig, grobkiesig, steinig (T,u,s,gg,x)	mittelgrau	angerundet	feucht
170-180	Ton, schluffig, sandig, sehr grobkiesig, steinig (T,u,s,gg,x)	mittelgrau	kantig	schlecht sortiert
180-190	Ton, schluffig, sandig, sehr grobkiesig, steinig (T,u,s,gg,x)	mittelgrau	kantig	schlecht sortiert
190-200	Ton, schluffig, sandig, sehr grobkiesig, steinig (T,u,s,gg,x)	mittelgrau	kantig	Bohrverlust ab 196, Stein (X), 15cm. Keine Probenahme möglich
200-300	Ton, schluffig, gering kiesig (T,u,	dunkelgrau	kA	
300-400	Ton, schluffig, gering kiesig (T,u,	dunkelgrau	kA	
400-500	Schluff, tonig, kiesig (U,t,g)	dunkelgrau	kA	
500-600	Ton, gering schluffig, gering feinkiesig (t,u',fg')	dunkelgrau	kA	
600-700	Ton, gering schluffig, gering feinkiesig (t,u',fg')	dunkelgrau	kA	trockene Lage zwischen 731-741
700-800	Ton, gering schluffig, gering feinkiesig (t,u',fg')	dunkelgrau	kA	
800-900	Ton, gering schluffig, gering feinkiesig (t,u',fg')	dunkelgrau	kA	
900-1000	Ton, gering schluffig, gering feinkiesig (t,u',fg')	dunkelgrau	kA	
1000-1100	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1100-1200	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1200-1300	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1300-1400	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1400-1500	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1500-1600	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	

1600-1700	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1700-1800	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
Tiefe (cm)	Beschreibung	Farbe	Rundung Grobanteil	Bemerkungen
1800-1900	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	
1900-2000	Ton, gering schluffig (t,u')	dunkelgrau	-	



Fotos: M. Kralik. Datenquelle (Kornsummen): ELSTER et al. (2023)

Tabelle XI.a: Bohrloch-Temperaturmessungen: 5. und 6. November 2019

KB01/7	SG332		KB02/03	SG328		KB 06/07	SG504
Temperatur	Tiefe		Temperatur	Tiefe		Temperatur	Tiefe
9,4	903,8		8,8	898,9		13,7	932,69
9,6	903,14		9,1	898,6		14,1	931,64
9,6	902,14		9,2	897,9		13,8	930,64
9,6	901,14		9,3	896,9		13,2	929,64
9,65	900,14		9,7	895,9		12,4	928,64
9,7	899,14		9,85	894,9		11,7	927,64
9,7	898,14		9,9	893,9		11,3	926,64
9,7	897,64		9,7	892,9		11	925,64
			9,5	891,9		10,7	924,64
KB03/7	SG327		9,4	890,9		10,45	923,64
Temperatur	Tiefe		9,3	889,9		10,3	922,64
9,7	937,19		9,3	888,9		10,2	921,64
9,5	936,18		9,2	887,9		10,2	920,64
9,35	935,18		9,25	886,9		10,2	918,64
9,3	934,18		9,3	885,9		10,2	917,64
9,3	933,78		9,3	884,9		10,1	916,64
			9,3	883,9		10,1	915,64
KB02/07	SG326		9,3	882,9		10,1	914,64
Temperatur	Tiefe		9,3	881,9		10,1	913,64
10,15	903,46		9,3	880,9		10,1	912,64
10,2	902,45		9,3	879,9		10,1	911,64
10,2	901,45		9,3	878,9		10,1	910,64
10,15	900,45		9,3	877,9		10	909,64
10,1	899,45		9,3	876,9		10	908,64
10,1	898,45		9,3	875,9		10	907,64
10,1	897,45		9,3	874,9		10	906,64
10,1	896,45		9,4	873,9		10	905,64
10,1	895,45		9,4	872,9		10	904,64
10,1	894,45		9,4	871,9		10	903,64
10,1	893,45		9,4	870,9		10	902,64
10,1	892,45		9,4	869,9		10	901,64
10,1	890,95		9,45	868,9		10	900,64
			9,5	867,9		10	899,64
KB05/07	SG503					10	898,64
Temperatur	Tiefe					10	897,64
10	921,73					10	896,64
9,9	920,76					10	895,64
9,9	919,76					9,95	894,64
9,9	918,76					9,95	893,64
9,9	917,76					10	892,64
9,9	915,76					10	891,64
9,9	915,66					10	890,64

Tabelle XI.b: Bohrloch-Temperaturmessungen: 11. Februar 2020

KB02/03	SG328		KB06/07	SG504
Temperatur	Tiefe		Temperatur	Tiefe
8,3	895,9		8,1	932,64
8,9	894,9		8,6	931,64
9,3	893,9		9,3	930,64
9,4	892,9		9,9	929,64
9,4	891,9		10,2	928,64
9,5	890,9		10,6	927,64
9,6	889,9		10,7	926,64
9,6	888,9		10,8	925,64
9,5	887,9		10,8	924,64
9,5	886,9		10,7	923,64
9,4	885,9		10,5	922,64
9,4	884,9		10,4	921,64
9,35	883,9		10,4	920,64
9,3	882,9		10,3	919,64
9,3	881,9		10,3	918,64
9,3	880,9		10,3	917,64
9,3	879,9		10,2	916,64
9,3	878,9		10,2	915,64
9,4	877,9		10,1	914,64
9,4	876,9		10,1	913,64
9,4	875,9		10,1	912,64
9,4	874,9		10,1	911,64
9,4	873,9		10,1	910,64
9,4	872,9		10,1	909,64
9,4	871,9		10,1	908,64
9,4	870,9		10	907,64
9,4	869,9		10	906,64
9,45	868,9		10	905,64
9,5	867,9		10	904,64
9,5	867,8		10	903,64
			10	902,64
SG501			10	901,64
Temperatur	Tiefe		10	900,64
3,3	892,21		10	899,64
6,7	891,35		10	898,64
8,4	890,35		10	897,64
9,3	889,35		10	896,64
10	888,35		10	895,64
10,3	887,35		10	895,24
10,5	886,35			
10,6	885,35			
10,6	884,35			
10,6	884			

Tabelle XI.c: Bohrloch-Temperaturmessungen: 17. Juni 2020

KB02/07	SG326		KB06/07	SG504
Temperatur	Tiefe		Temperatur	Tiefe
10,9	902,65		13,95	932,54
10,2	902,55		11,8	931,64
10,1	901,55		10,95	930,64
10	900,55		10,2	929,64
9,9	899,55		9,95	928,64
9,8	898,55		9,8	927,64
9,85	897,55		9,85	926,64
9,85	896,55		9,8	925,64
9,8	895,55		9,85	924,64
9,9	894,55		9,85	923,64
9,85	893,55		9,9	922,64
9,8	892,55		9,9	921,64
9,85	891,81		10	920,64
			10	919,64
KB02/03	SG328		10	918,64
Temperatur	Tiefe		9,95	917,64
9,7	897,04		9,95	916,64
9,7	896,9		9,9	915,64
8,8	895,9		9,9	914,64
8,55	894,9		9,85	913,64
8,55	893,9		9,85	912,64
8,55	892,9		9,8	911,64
8,7	891,9		9,8	910,64
8,75	890,9		9,75	909,64
8,8	889,9		9,75	908,64
8,9	888,9		9,7	907,64
8,9	887,9		9,7	906,64
8,95	886,9		9,7	905,64
9	885,9		9,7	904,64
9	884,9		9,7	903,64
9	883,9		9,7	902,64
9	882,9		9,7	901,64
9	881,9		9,75	900,64
9	880,9		9,75	899,64
9	879,9		9,7	898,64
9	878,9		9,7	897,64
9	877,9		9,7	896,64
9	876,9		9,7	895,64
9	875,9		9,7	894,64
9	874,9		9,7	893,64
9	873,9		9,7	892,64