

# Simulation von Gesteinsfeuchte und Verwitterungsbedingungen im Nationalpark Gesäuse

## Magisterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

**Patrick ZINNER**

am Institut für Geographie und Raumforschung

Begutachter: Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Oliver Sass

Graz, 2014

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Datum

Unterschrift

## Widmung und Danksagung

Eine Magisterarbeit schreibt sich nicht allein, weshalb ich mich hier gerne nachdrücklich bei allen Unterstützern und Helfern bedanken möchte. Diese Arbeit ist deshalb jenen gewidmet, die mich in der Zeit der Niederschrift sowie der Studienzeit konsequent unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die es mir mit ihrer nicht endend wollenden Unterstützung ermöglicht haben, mein Studium abzuschließen.

Meinem weiteren Familien und Freundeskreis, insbesondere meiner Freundin und meinem Bruder, möchte ich für den starken emotionalen Rückhalt während der ganzen Dauer meines Studiums und für die vielen, wichtigen, intensiven und bereichernden Diskussionen danken, sowie für die vielen schönen Studienjahre.

Ein großer Dank richtet sich auch an das ganze ALADYN Team, vor allem Mathias und Harald, deren fachkundiges Wissen eine große Bereicherung für mich war.

Weiters möchte ich mich beim Nationalpark Gesäuse für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Ein riesiges Dankeschön möchte ich auch meinen beiden unermüdlichen Sherpas, Reinhard und Rudolf aussprechen, ohne die eine Montage der Untersuchungsgeräte nicht möglich gewesen wäre.

Zuletzt möchte ich meinem Betreuer, Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Oliver Sass, für die geduldige und inspirierende Begleitung während des gesamten Entstehungsprozesses von ganzem Herzen danken.

## **Vorwort**

Diese Arbeit wurde im Zuge des vom Österreichischen Wissenschaftsfonds FWF geförderten Projekts „ROCKING ALPS: Rockfall and Weathering in the Eastern Alps“ verfasst. Dieses hat es sich zum Ziel gesetzt, die Verwitterung sowie den Steinschlag in den Ostalpen zu erforschen. Die Gesteinsfeuchte in ihrer gesamten Komplexität besitzt dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Verwitterungsbedingungen und folglich auf den Steinschlag. Für den Mensch sind die genannten Prozesse in erster Linie von Bedeutung, wenn diese direkt oder indirekt Infrastruktur und/oder Menschenleben gefährden. Im Detail sind die dafür entscheidenden Vorgänge jedoch noch unverstanden. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen diesem Umstand entgegenwirken und dabei helfen, die natürlichen Prozesse im Gestein besser zu verstehen. Denn erkennt man die Zusammenhänge und Auswirkungen jener Parameter, die für den Steinschlag und Felssturz verantwortlich sind, kann auch ihr Stellenwert in Bezug auf geomorphologische Fragestellungen sowie die von ihnen ausgehende Gefahr besser eingeschätzt werden.

## Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit vorgenommenen Erhebungen hatten das Ziel, die Simulation der Gesteinsfeuchte und der Verwitterungsbedingungen an Felswänden an die dort vorherrschenden natürlichen Bedingungen heranzuführen. Dazu wurde der Einfluss des gebietspezifischen Schlagregens sowie des Schneeniederschlags auf die hygrothermischen Gesteinsbedingungen im Nationalpark Gesäuse untersucht. Mittels schlagregenspezifischen klimatischen Erhebungen im Gsenggraben sowie mit einer im Programm ESCIMO.spread durchgeführten Schneemodellierung konnten die vorherrschenden natürlichen Bedingungen im Untersuchungsgebiet in das Simulationsprogramm WUFI integriert werden. WUFI, ursprünglich für Gebäude entwickelt, bietet eine Fülle an Operationsmöglichkeiten, welche gezielte Simulationen durchführbar machen. Die durchgeführten Anpassungen führten in erster Linie zu einem erhöhten Feuchtigkeitseintrag in das simulierte System, der zu ca. 70% aus der Berücksichtigung des Schneeeinflusses auf die im Gestein vorherrschenden Bedingungen resultiert. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in den vorgenommenen Simulationen wieder, die um expositions- sowie geländeneigungsspezifische Einflüsse zu erkennen, in den vier Ausrichtungen Norden, Osten, Süden und Westen bei einer Neigung von 70° und 90° vorgenommen wurden. Durchgehend kann ein erkennbarer Einfluss des im Untersuchungsgebiet vermehrt auftretenden Schlagregens auf die Porensättigung sowie die verwitterungsrelevanten Parameter festgestellt werden. Dieser wird von jenem des in die Simulation einfließenden Schneeniederschlags durchwegs übertroffen. Es kann aufgrund der Annäherung an die natürlichen Bedingungen im Gestein generell ein höheres Porensättigungsniveau sowie ein erhöhtes Verwitterungspotential erkannt werden. Für die Verwitterung an sich konnte als entscheidender Prozess die Eislinsentheorie festgemacht werden, die den realen Prozessen im Gestein näher kommt, als die klassische Frostwechseltheorie.

## Abstract

The aim of this paper is to improve the simulation of moisture in natural rock faces and surface weathering conditions in a natural setting. Therefore the contribution of the area specific wind-driven rain, as well as the precipitation in form of snow to the prevailing humidity levels in natural rock faces in the National Park Gesäuse was analysed. This was carried out through specific climate surveys and snow modelling with ESCIMO.spread, a program particularly designed for such a task. The obtained data was integrated into the simulation-program WUFI. WUFI, originally developed for buildings, provides a wide range of option settings, which allows conducting specific simulations. The specific parameters utilized in these simulations led to an increased input of moisture into the simulated system. Approximately 70% of the increase was based on the contribution from precipitation in form of snow. This ratio is observable throughout the modified simulation conditions, which differed in orientation, (north, east, south and west) as well as in 70° and 90° inclination. These alterations were made to examine the impact of area- and exposition specific influences. A consistent impact of the additional moisture derived from wind-driven rain on the pore saturation and on the weathering affecting parameters could be observed in the investigated area. Due to the adaption to natural rock face conditions a higher potential of pore saturation as well as a higher weathering potential could be detected. The most important part concerning weathering could be determined as a process known as ice segregation theory. This theory corresponds more closely to the real processes occurring in natural rock faces than the classical freeze/thaw cycle theory.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>12</b>
1.1 Stand der Forschung .....	12
1.2 Forschungsziel .....	13
1.3 Methodenübersicht .....	14
<b>2. Das Untersuchungsgebiet .....</b>	<b>16</b>
2.1 Geologischer Aufbau .....	17
2.2 Klimatische Grundzüge .....	19
2.3 Geomorphologische Bedingungen .....	20
<b>3. Methodik .....</b>	<b>23</b>
3.1 Erhebung der Klimadaten .....	24
3.1.1. Prinzip der Windmessung .....	26
3.1.2. Prinzip der Regenmessung .....	27
3.1.3. Messprinzipien des PTU-Moduls .....	28
3.2 Ermittlung des Schlagregens und dessen Proportionalitätsfaktors .....	29
3.2.1. Schlagregenfänger .....	31
3.2.2. Nexus Funkwetterstationen .....	33
3.3 Schneedeckenmonitoring .....	35
3.4 Schneemodellierung – ESCIMO.spread .....	39
3.5 Gesteinsfeuchtesimulation –WUFI .....	41
3.5.1 Bauteilspezifische Eingangsdaten .....	42
3.5.2 Klimaspezifische Eingangsdaten .....	44
3.5.3. Simulationssteuerung .....	45
3.5.4. Varianten der Gesteinsfeuchtesimulation .....	46
3.6 Kritische Betrachtung der Methoden .....	48
<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>52</b>
4.1 Ermittlung des Schlagregenfaktors .....	52
4.1.1. Klimatische Bedingungen im Gsenggraben .....	52
4.1.2. Schlagregenfaktor im Gsenggraben .....	60
4.2. Ergebnisse der Schneemodellierung im ESCIMO.spread .....	64
4.3. Ergebnisse der Gesteinsfeuchtesimulation im WUFI .....	66
4.3.1. Feuchtebedingungen im Gestein .....	67
4.3.2. Temperaturbedingungen im Gestein .....	70
<b>5. Diskussion .....</b>	<b>80</b>
5.1. Der Schlagregenfaktor und seine Ausprägungen im Gsenggraben .....	80

5.1.1. Datengrundlage zur Berechnung des SRF .....	80
5.1.2. Ausprägung des SRF .....	82
5.2. Die hydrothermischen Gesteinsbedingungen .....	87
5.2.1. Veränderung der hygrischen Gesteinsbedingungen .....	89
5.2.2. Veränderung der thermischen Gesteinsbedingungen .....	95
5.3. Die Steinschlagwahrscheinlichkeit aus dem Blickwinkel der Gesteinsfeuchte .....	102
<b>6. Schlussbetrachtung .....</b>	<b>109</b>
6.1. Fazit .....	109
6.2. Ausblick .....	111
<b>Literatur .....</b>	<b>112</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Gsenggraben.....	16
Abbildung 2: Das Gesäuse – Übersichtskarte mit der Lage des Untersuchungsgebiets. ....	17
Abbildung 3: Geologie des Gsenggrabens – Ausschnitt aus der geologischen Karte der Gesäuseberge (1:25 000).....	18
Abbildung 4: Niederschlagsverhältnisse im Gesäuse, Verteilung der mittleren Jahresniederschläge von 1971 bis 2000 .....	19
Abbildung 5: Landschaftliche Eindrücke aus dem Gsenggraben .....	21
Abbildung 6: Schematische Darstellung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Arbeitsablaufs. .....	23
Abbildung 7: Aufteilung der im Gsenggraben installierten Messinstrumente.....	24
Abbildung 8: Messgenauigkeit bei der Aufzeichnung der Lufttemperatur über den gesamten Messbereich.....	25
Abbildung 9: A: Montage des WXT520-Sensors; B: Der Aufbau des WXT520.....	26
Abbildung 10: Figur A: Schematischer Aufbau des RAINCAP Sensors B: Verhältnis zwischen Aufschlaggeschwindigkeit und Tropfendurchmesser. ....	28
Abbildung 11: Figur A: Umfang der im Untersuchungsgebiet installierten Schlagregenfänger; B: Montage der Schlagregenfänger.....	31
Abbildung 12: Skizze der entworfenen Schlagregenfänger.....	32
Abbildung 13: Darstellungen des Settings der Nexus Funkwetterstationen .....	33
Abbildung 14: Der zum Schneedeckenmonitoring gewählte Bildausschnitt der Nordexponierten Felswand (800m) im Gsenggraben. ....	36
Abbildung 15: Die ARDC-Anlage zum Schneedeckenmonitoring. ....	37
Abbildung 16: Klimatische Verhältnisse in Österreich im Winter .....	39
Abbildung 17: Aufbau und Darstellung der Eingangsparameter vom WUFI.....	42
Abbildung 18: Windrichtungsverteilung im Gsenggraben .....	53
Abbildung 19: Verteilung der Windgeschw. nach Windrichtung im Gsenggraben .....	54
Abbildung 20: Monatliche Niederschlagssummen der einzelnen Messstationen im Gsenggraben.....	55
Abbildung 21: Niederschlagsereignisse im Gsenggraben.....	56
Abbildung 22: Die Beziehung zwischen Frequenz und Magnitude der Stundenmittelwerte des Niederschlags .....	57

Abbildung 23: Vergleich des Temperaturverlaufs der Tagesmitteltemperaturen .....	58
Abbildung 24: Vergleich der Tagesgänge der Temperatur im Gsenggraben.....	59
Abbildung 25: Der Schlagregenfaktor im Gsenggraben. ....	61
Abbildung 26: SRF im Gsenggraben nach Exposition und Neigung.....	62
Abbildung 27: Verteilung der SRF-Relevanten Klimaparameter .....	64
Abbildung 28: Verlauf und Anteile der Feuchtigkeitsspende an das Gestein.....	65
Abbildung 29: Jahresgang der mittleren Porensättigung über aller Felstiefen .....	68
Abbildung 30: Profile der Porensättigung der Simulationsvariante <i>Schnee+SRF</i> .....	69
Abbildung 31: Jahresgang der Temperatur an der Felsoberfläche.....	71
Abbildung 32: Vergleich der Frostdauer.....	72
Abbildung 33: Vergleich der Frosttiefe in [°C] .....	74
Abbildung 34 Vergleich der Eis- und Frostwechsellage.....	75
Abbildung 35: Jahresverlauf der monatlichen Summen der Eis- und Frostwechsellage sowie der Frostwechselereignisse.....	77
Abbildung 36: Die Gefriertrate in Abhängigkeit mit der Felstiefe .....	78
Abbildung 37: Darstellung des Schlagregenfaktors im Gsenggraben an einem idealisierten Objekt mit 90°, 70°, 60° sowie 0° Neigung. ....	83
Abbildung 38: Darstellung der Abhängigkeit des Schlagregenfaktors von der Neigung .....	83
Abbildung 1: Darstellung der simulierten Schlagregenmenge.....	87
Abbildung 40: Jahresgang der mittleren Porensättigung im Dolomit.....	92
Abbildung 41: Profile der Porensättigung der Simulationsvariante in westlicher Poition im Vergleich (Dolomit) .....	94
Abbildung 42: Profile der Gefriertrate aller Simulationsvarianten .....	101
Abbildung 43: Abhängigkeit zwischen Temperatur und Feuchtigkeit im Gestein (Dolomit).....	104
Abbildung 44: Frostverwitterungsbedingungen nach Felstiefe der SV <i>Schnee+SRF</i> .....	108
Abbildung 45: Frostverwitterungsbedingungen nach Exposition der SV <i>Schnee+SRF</i> .....	107
Abbildung 46: Zeitliche Verteilung der Frostverwitterungsereignisse der Simulationsvariante <i>Schnee+SRF</i> .....	108

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der räumlichen Aufteilung der im Gsenggraben installierten Messinstrumente.....	24
Tabelle 2: Technische Kenndaten des digitalen Multiparametersensors Vaisala Wettertransmitter WXT520.....	25
Tabelle 3: Technische Kenndaten der Nexus Funkwetterstation .....	34
Tabelle 4: In der WUFI-Simulation verwendete Materialkenndaten für Dolomit.....	44
Tabelle 5: Windrichtungsverteilung im Gsenggraben.....	53
Tabelle 6: Verteilung der Windgeschwindigkeit nach Windrichtung im Gsenggraben .....	55
Tabelle 7: Übersichtstabelle der SRF im Gsenggraben nach Exposition und Neigung.....	62
Tabelle 8: Jährliche Mittelwerte der Porensättigung (in %) im Untersuchungsgebiet (Dolomit) in Bezug auf den Jahresgang .....	67
Tabelle 9: Jährliche Mittelwerte der Porensättigung im Untersuchungsgebiet (Dolomit) bezogen auf die Felstiefe.....	70
Tabelle 10: Frostdauer in Tagen der Simulationsvariante Schnee+SRF – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm).....	73
Tabelle 11: Mittlere Frosttiefe [°C] der Simulationsvariante Schnee+SRF – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm).....	73
Tabelle 12: Eis- und Frostwechseltage sowie deren Summe (Tage mit Frost) der Simulationsvariante Schnee+SRF – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm) .....	76
Tabelle 13: Maxima sowie Mittelwerte der Gefriertrate der Simulationsvariante Schnee+SRF .....	79
Tabelle 14: Der Schlagregenfaktor $r_s$ des Gsenggrabens gegliedert nach Neigung und Exposition.....	83
Tabelle 15: Übersicht zur Datengrundlage der SRF-Berechnung.....	85
Tabelle 16: Übersicht der berechneten Höhenabhängigkeit des SRF im Gsenggraben.....	86
Tabelle 17: Summen der Anzahl an Verwitterungsbedingungen.....	106

# 1. Einleitung

Viele Forschungsbereiche, unter anderem die Umweltforschung, die Meteorologie oder die Bauphysik zeigen großes Interesse an den Informationen, die aus der Erforschung von Auswirkung und Ausprägung der Gesteinsfeuchte gewonnen werden können. Im Zuge dieser Magisterarbeit werden die Gesteinsfeuchte sowie die Verwitterungsbedingungen an natürlichen Felswänden im Nationalpark Gesäuse simuliert. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Anpassung des Schlagregeneinflusses an das natürliche Setting, sowie auf eine Adaption des Schnees als Einflussgröße der Feuchtesimulation gelegt. Dadurch können realitätsnahe Feuchte- sowie Temperaturzustände generiert werden, die eine Analyse der räumlichen sowie zeitlichen Ausprägung der Gesteinsfeuchte erlauben und in weiterer Folge Aufschluss über den Anteil des Schlagregens an der Verwitterung geben. Dazu wurde das vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelte Simulationsprogramm WUFI (Wärme und Feuchte instationär) an die natürlichen Bedingungen angepasst, die im Untersuchungsgebiet vorherrschen.

## 1.1. Stand der Forschung

Die Datenerhebung durch manuelles Sammeln von Gesteinsproben ist bis heute die einzige Möglichkeit direkt Gesteinsfeuchte Informationen zu erlangen. Dabei werden die Resultate von der exakten geographischen Lage stark beeinflusst, wodurch keine adäquaten Daten für eine generelle, temperaturbeeinflusste Feuchteverteilung erhalten werden (Sass, 2005). Die Gesteinsfeuchtesimulationen, die mit dem Programm WUFI durchgeführt werden, lassen bis dato keine Aussagen über den Einfluss des als Schnee fallenden Niederschlags zu. Daher konnten die Simulationen stets nur eine zuverlässige Aussage zu den Schnee freien Sommermonaten liefern. Trotz dieser Beeinträchtigung stellte sich dieses Simulationsprogramm bisher als die beste Variante dar, um die Feuchtigkeit in tieferen Gesteinsschichten zu analysieren. Da sowohl Regen wie auch Schnee für die Menge an Feuchtigkeit im Fels verantwortlich sind, ist es wichtig beide Parameter zu untersuchen. Wie es scheint ist dabei die Dauer eines Niederschlagsereignisses wichtiger als die Niederschlagsmenge (Coutard und Francou, 1989). Wind, bzw. der dadurch generierte Schlagregen, ist ein weiterer wichtiger Faktor, der die Feuchte im Gestein direkt beeinflusst.

Die Gesteinsfeuchte gepaart mit Temperaturen unter dem Nullpunkt sind wichtige Voraussetzungen für eine Frostverwitterung. Die günstigsten Bedingungen für den daraus

resultierenden Steinschlag sind im Frühling, Sommer und Herbst zu finden, da durch den vermehrten Niederschlag ein generell höheres Niveau an Gesteinsfeuchte zu finden ist. Der durchschnittliche Materialverlust durch Steinschlag ist zur Periode der größten Gesteinsfeuchte im Sommer ungefähr fünfmal höher als im Winter (Sass, 1998). Dies zeigt, dass der Gesteinsfeuchte eine sehr große Rolle bei der Verwitterung zuteil wird, während dem Einfluss von Frostwechseltagen womöglich lange Zeit ein zu hoher Stellenwert eingeräumt wurde (unter anderem Hallet, 2006). Bei der Erforschung von Verwitterungen an natürlichen Felswänden muss in Zukunft nicht nur ein großes Augenmerk auf lang andauernden Frostperioden, sondern auch auf eine erhöhte Gesteinsfeuchte, durch Regen sowie Schnee verursacht, gelegt werden.

## **1.2. Forschungsziel**

Das primäre Ziel dieser Arbeit war es, das aus der Bauphysik stammende Simulationsprogramm WUFI soweit an natürliche, geomorphologische Rahmenbedingungen anzupassen, dass es zur Analyse der Gesteinsfeuchte und folglich der Frostverwitterung an Felsformationen Anwendung finden kann. Die Annäherung des Programms an ein natürliches Setting erfolgte grundsätzlich in zwei Schritten. Zunächst wurden die notwendigen Material- bzw. Gesteinsparameter von Schnepfleitner (2012) erhoben und in die WUFI-Simulation implementiert. Darauf aufbauend, wurden in dieser Arbeit die Klimaparameter und ihr Einfluss auf die Gesteinsfeuchte genauer untersucht. So ist es möglich, die beiden Kategorien der vom WUFI geforderten Eingangsparameter Material (in diesem Fall Gestein) sowie Klima an die Anforderungen einer Gesteinsfeuchtesimulation heranzuführen. Bei der Umsetzung dieses Ziels lag das Hauptaugenmerk auf dem Feuchtetransport aus Schlagregen und Schnee, dies aus zwei Gründen. Zum einen wird der Einfluss des Schlagregens in der WUFI-Simulation über eine Beziehung zwischen Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit errechnet. In dieser Berechnung ist ein gebietsabhängiger Proportionalitätsfaktor (in dieser Arbeit als Schlagregenfaktor bezeichnet) eingebettet, der aufgrund des Entwicklungshintergrunds vom WUFI an Gebäuden und im Labor errechnet wurde. Dessen Größenordnung wurde hier hinterfragt. Zum anderen wird der als Schnee fallende Niederschlag in den WUFI-Simulationen bisher nicht berücksichtigt. An den in der Natur vorkommenden Felswänden entspricht dieser Umstand nicht den tatsächlichen Gegebenheiten. Schnee, der durch das Zusammenwirken von Neigung und Exposition in der Felswand zum Liegen kommt, spendet dem Gestein mit einer strahlungsabhängigen Verzögerung Feuchtigkeit. Diese Tatsache wurde in dieser Simulation berücksichtigt.

Gemäß dieser Zielsetzung ergaben sich folgende Forschungsfragen:

- Welche Ausprägungen besitzt der zur Schlagregenerberechnung notwendige Schlagregenfaktor in Abhängigkeit von Exposition, Neigung und Seehöhe im Untersuchungsgebiet?
- Welchen Einfluss besitzen der gebietspezifische Schlagregenfaktor und der als Schnee fallende Niederschlag auf die hygrothermischen Gesteinsbedingungen?
- Welche Auswirkungen auf die im Fels vorherrschenden Verwitterungsbedingungen besitzt die Annäherung der Gesteinsfeuchtesimulation an das natürliche Setting?

### **1.3. Methodenübersicht**

Zur einführenden Übersicht wird an dieser Stelle eine kurze Auflistung der verwendeten Methoden vorgenommen. Eine detaillierte Beschreibung folgt in Kapitel 3. Im Untersuchungsgebiet wurden in zwei Höhenlagen repräsentative Punkte in den vier Hauptexpositionsrichtungen (N, O, S, W) definiert. An diesen Punkten wurden die für die jeweilige Lage typischen klimatischen Einflüsse auf die Gesteinsfeuchte erhoben. Die dort erhobenen charakteristischen Werte dienten als Eingangsparameter für die Feuchtesimulationen im WUFI. Zur Aufzeichnung wurden an den jeweiligen Punkten Schlagregenfänger sowie Funkwetterstationen montiert. Die Datenerhebung konnte durch eine mitten im Untersuchungsgebiet installierte Klimastation sowie einer Automatic Remote Digital Camera (ARDC) erweitert werden.

#### **- Schlagregenerhebung**

An den eingangs erwähnten 8 Messpunkten sind 24 Schlagregenfänger installiert worden. Diese an der Felswand montierten Schalen fangen den Schlagregenanteil des Normalniederschlags auf und leiten diesen in einen Sammelbehälter. So kann im Sinne eines Totalisators nach einem Niederschlagsereignis die Menge des Schlagregens ausgelesen werden. Zur genaueren Analyse wurden an 4 Messpunkten Funkwetterstationen angebracht (eine in jeder Hauptexposition). Diese zeichneten die für die Simulationen notwendigen Klimadaten direkt an der Felswand auf.

#### **- Schneedeckenmonitoring**

Als Monitoringmaßnahme wurde eine ARDC - Anlage im Untersuchungsgebiet installiert. Diese ermöglicht eine Analyse der Schneedeckenentwicklung. Eine solche Untersuchung gibt zum einen Aufschluss darüber, an welcher Stelle der Schnee, beeinflusst von verschiedensten

lokalen Einflussgrößen, zum Liegen kommt. Zum anderen, wie sich die Schneedecke über die Zeit bei verschiedenen Wetterlagen entwickelt.

- Schneewasseräquivalent – ESCIMO.spread

Zur Annäherung der Feuchtesimulation im WUFI an natürliche Verhältnisse wurde das Schneewasseräquivalent in die Berechnungen integriert. Dieser Parameter wurde im ESCIMO.spread-Modell von Ulrich Strasser und Thomas Marke errechnet. Resultat ist eine WUFI-Simulation, die den Einfluss des Schnees auf die Gesteinsfeuchte berücksichtigt.

- Gesteinsfeuchtesimulation – WUFI

Auf den Material- bzw. Gesteinsparametern von Schnepfleitner (2012) aufbauend wurde mit Hilfe der erhobenen Klimaeinflüsse von Schlagregen und Schneefeuchte eine Gesteinsfeuchtesimulation im WUFI durchgeführt. Diese war die Grundlage für die Beurteilung der im Fels vorherrschenden Verwitterungsbedingungen.

## 2. Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im obersteirischen Gesäuse, welches zusammen mit den Haller Mauern und den Eisenerzer Alpen die in den nördlichen Kalkalpen gelegenen Ennstaler Alpen bildet. Als Gesäuse an sich gilt das 18 km lange Durchbruchstal der Enns, das sich in ostwestlicher Richtung vom Gesäuse Eingang (6 km östlich von Admont) bis Hieflau erstreckt (Büchner, 1970). Dieses Tal trennt die Gesäuseberge in zwei Teile (Ampferer, 1935b), die das Tal nördlich und südlich mit ihren stark abfallenden Felswänden flankieren. Nördlich der Enns befindet sich die Buchsteingruppe mit dem Großen Buchstein (2224 müA) als höchste Erhebung. Südlich des Durchbruchstals erheben sich die Reichenstein- sowie die Hochtorggruppe, die durch das Johnsbachtal getrennt werden. Der Admonter Reichenstein ist der östlichste und mit 2251 müA der höchste Berg der Reichensteingruppe. Der höchste Punkt der Hochtorkette, der Gipfel des Hochtors (2369 müA), ist zugleich der Höchste des Gesäuses. Die Einzigartigkeit des Landschaftsbildes bezeugen Merkmale wie die maximale Reliefenergie von 1791m (Gstatterboden 578m – Hochtors 2369m) sowie der Höhenunterschied der Enns von ca. 150 m auf der kurzen Strecke durch das Gesäuse.



Abbildung 2: Der Gsenggraben, Blickrichtung Osten. Quelle: Eigene Aufnahme

Die Untersuchungen im Gelände wurden allesamt im in Abbildung 1 ersichtlichen Gsenggraben durchgeführt. Dieser Seitengraben im unteren Johnsbachtal bietet aufgrund starker Verwitterungsprozesse und leichter Zugänglichkeit ausgezeichnete Voraussetzungen für die untersuchte Thematik. Er steigt von 626 müA im Tal Richtung Osten bis zur Gsengscharte auf 1120 müA an. In Abbildung 1 ist die starke Verwitterung im Untersuchungsgebiet gut erkennbar. Der mächtige Sedimentkörper am Grabenboden wird von den stark zerschnittenen Felsflanken umringt, die ständig neues Material zur Verfügung stellen.

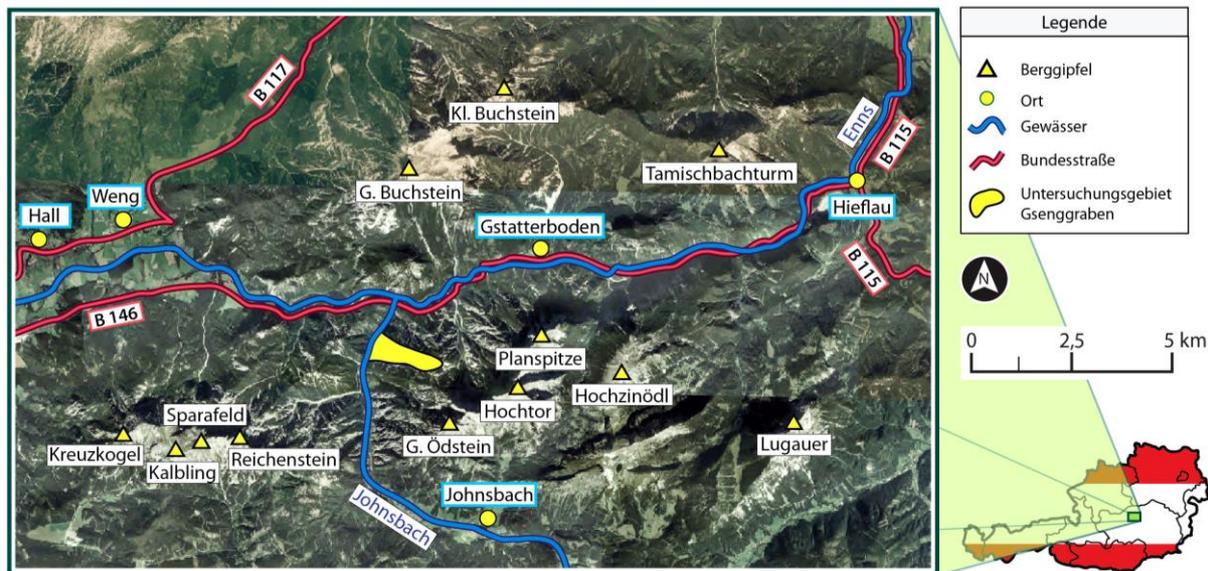


Abbildung 3: Das Gesäuse – Übersichtskarte mit der Lage des Untersuchungsgebiets. Quelle: icomedias Enterprise (2014), Eigener Entwurf

Zur Veranschaulichung der beschriebenen geographischen Lage zeigt Abbildung 2 die Position des Untersuchungsgebiets im Gesäuse. Gut zu erkennen ist das W-O verlaufende Durchbruchstal der Enns bis Hieflau, sowie der gelb hervorgehobene Gsenggraben.

## 2.1. Geologischer Aufbau

Als Standardwerk des geologischen Aufbaus der Gesäuseberge gilt bis in die Gegenwart die detailreiche Beschreibung des Geologischen Führers für die Gesäuseberge von Otto Ampferer (1935b). Er beschreibt das Gesäuse in seiner geologischen Lage als „...recht merkwürdig.“ Untypisch ist der Verlauf des Ennstals, das ab dem Admonter Becken die bis dahin folgende Grenze zwischen den kompakten Kalkmassen und der feinschichtigeren Grauwackenzone verlässt. Grund dafür ist eine geologische Störung, die von Ampferer (1935b) ca. 1 km nördlich parallel zum Gesäuse entdeckt wurde. Diese Störungszone wird als Bruch in der nach Südosten absinkenden Antiklinale aufgefasst, bei der der südliche Flügel gegenüber dem nördlichen Flügel um bis zu 1500 m abgesenkt wurde (Büchner, 1970).

Bei Hieflau kreuzt die Störung die Gesäuseschlucht und setzt seinen Verlauf Richtung Osten fort. Nicht so das Ennstal. Ab Hieflau ändert das Tal seine Ost-West Ausrichtung aufgrund von jüngeren Querbrüchen, die den Flusslauf Richtung Norden abdrängten (Ampferer, 1935b). Der Johnsbach sowie der Hartelsgraben sind laut Bauer (1998) weitere Zeugen solcher jugendlichen Querbrüche.

Den Bau der Gesäuseberge bestimmen zum Großteil die Karbonatgesteine des Mesozoikums. Allein ein schmales Band von Raibler Schichten trennt das bis zu 2000 m mächtige Karbonatmassiv aus Kalk und Dolomit (Bauer, 1998). Die Schichtfolge mit dem Ramsaudolomit definierte Ampferer (1935b) als Basis, auf der ein Blatt von Raibler Schichten und eine Zone aus Dachsteindolomit folgen. Die hohen Gipfelbereiche der Gesäuseberge werden abschließend vom kompakten und der Verwitterung trotzendem Felsbildner Dachsteinkalk gebildet. Tektonisch führen Büchner (1970) und Bauer (1998) einen Stockwerkbau an, der aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften des mächtigen, dickbankigen Karbonatgesteins sowie der verformbareren Haselgebirge und Werfener Schichten entstand.

Das Untersuchungsgebiet im Gsenggraben besteht vorwiegend aus Dolomitgestein. Einzig bei den Ausläufern des Grabens ins Johnsbachtal treten im nördlichen Bereich Wettersteinkalke sowie im südlichen Bereich jüngere Ennskonglomerate und Gehängebreccien auf (siehe Abbildung 3).



Abbildung 4: Geologie des Gsenggrabens – Ausschnitt aus der geologischen Karte der Gesäuseberge (1:25 000).  
Quelle: Ampferer (1935a), Eigener Entwurf

Das in diesem Gebiet auftretende Kalkgestein wurde von Ampferer als Dachsteinkalk kartiert. Büchner (1970) stellte jedoch fest, dass es sich dabei um den mit Wettersteindolomit verzahnten Wettersteinkalk handelt.

## 2.2. Klimatische Grundzüge

Wakonigg (1978) ordnet das Gesäuse dem Nordstaugebiet der nördlichen Kalkalpen zu. Die Stausituationen entstehen hier vor allem bei Strömungen aus westlicher bis nordöstlicher Richtung und bringen stets langandauernde Niederschlagsereignisse mit sich. Jahreszeitlich differenziert tritt der Nordstau vor allem im Frühjahr und im Winter auf (Veit, 2002). Dies führt in diesen Regionen zu einem Nebenmaximum des Niederschlags in den Wintermonaten (Harlfinger et al., 2010). Das Hauptmaximum liegt im Sommer, wobei der Einfluss der Gewitterniederschläge verhältnismäßig gering ausfällt (Wakonigg, 1978). Im Jahresmittel ist eine Zunahme des Niederschlags von West nach Ost zu erkennen. So steigt die mittlere Jahresniederschlagssumme von Admont (1180 mm) nach Hieflau (1685 mm) um 505 mm an (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2014). Um einen Eindruck über die lokalen Niederschlagsmengen zu bekommen, ist in Abbildung 4 die mittlere Jahresniederschlagssumme im Gebiet des Gesäuses dargestellt. Neben der bereits erwähnten West-Ost Zunahme ist die stark ausgeprägte Zunahme des Niederschlags mit der Höhe zu erkennen. Aufgrund der mächtigen Reliefenergie der Gesäuseberge spricht das Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2014) sogar von einem vorherrschenden Schluchtklima.

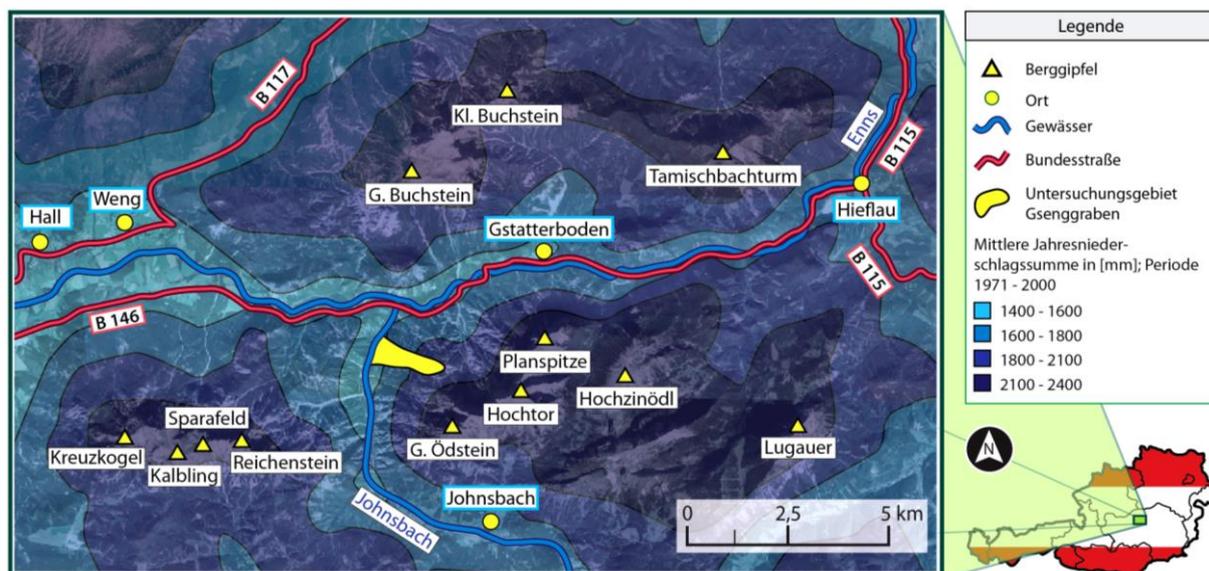


Abbildung 5: Niederschlagsverhältnisse im Gesäuse - Verteilung der mittleren Jahresniederschläge von 1971 bis 2000. Quelle: (icomediass Enterprise, 2014)), Eigener Entwurf

Der Gsenggraben selbst weist eine Jahresniederschlagssumme von ca. 1550 mm vom Auslauf zum Johnsbachtal bis 1977 mm zum Bereich der Gsengscharte auf. Das Niederschlagsmaximum liegt in den Sommermonaten bei ca. 555 mm in den höchsten, das

Minimum in den Herbstmonaten bei ca. 310 mm in den tiefsten Lagen des Grabens (icomedias Enterprise, 2014). Grund für die geringen herbstlichen Niederschlagsmengen im Gesäuse und so auch im Gsenggraben ist der Rückgang der Nordstaulagen zu dieser Jahreszeit (Wakonigg, 1978).

Das Temperaturgeschehen im Gesäuse ist aufgrund der Lage im Nordstaugebiet von Temperaturstürzen und –sprüngen geprägt. Der Grund dafür liegt nach Wakonigg (1978) zum einen in den ungebrochenen und auch deshalb stark ausgeprägten Kaltlufteinbrüchen. Zum anderen entfaltet sich der volle potentielle Temperaturgewinn des Südföhns erst im Norden der Steiermark. Darüber hinaus führt die Durchgängigkeit der Nordalpen zu einem guten Luftmassenaustausch, wodurch ein häufiger Wetterwechsel möglich wird (Wakonigg, 1970).

Bezüglich der lokalen Ausprägungen des Windes befindet sich der Gsenggraben nach icomedias Enterprise (2014) in einer gut durchlüfteten Kamm- und Hanglagenstufe.

Bedeutend für die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden klimatischen Verhältnisse ist laut Wakonigg (1970) auch die starke Niederschlagswirkung der extrem kalten Wetterlagen wie NW, N und Vb. Die damit verbundenen Kaltlufteinbrüche haben zur Folge, dass Teile der großen Niederschlagsmengen bis ins Frühjahr als Schnee bis in die Talregionen fallen. Die Konsequenz ist eine ausgedehnte Phase einer temporären Schneedecke, die im Gsenggraben erst ca. Mitte April endet (icomedias Enterprise, 2014). Die Zahl der Tage mit einer Schneedecke beläuft sich im Untersuchungsgebiet auf ca. 141, was etwas mehr als ein Drittel des Jahres ausmacht.

### **2.3 Geomorphologische Bedingungen**

Das Landschaftsbild des Gesäuses wird von den steilen Felswänden und hoch aufragenden Berggipfeln aus Kalk und Dolomit der Mittel und Obertrias dominiert (Büchner, 1970). Das Gegenstück zu deren schroffen Formationen bilden die sanften Formen der Grauwacken, die hauptsächlich aus den klastischen Gesteinen der Untertrias bestehen und im Süden an die Kalk- und Dolomitmassive anschließen (Büchner, 1970; Nationalpark Gesäuse GmbH, 2004). Durch die gesamten Gesäuseberge hindurch zieht sich ein Band der Raibler Schichten (Nationalpark Gesäuse GmbH, 2004). Wegen ihrer geringeren Widerstandsfähigkeit bilden sie aufgrund schneller voranschreitender Verwitterung sanfte Formen und tiefe Verwitterungsböden aus, die oftmals als Almhorizonte bezeichnet werden (Rathjens, 1982).

Nach Ahnert (2009) ist die Intensität der Verwitterung eines Gesteins von drei Faktoren abhängig:

- Festigkeit sowie Zusammensetzung des Gesteins
- Vorherrschendes Morphoklima
- Widerstandsfähigkeit des Gesteins gegenüber den atmosphärischen Einflüssen

Im Folgenden sollen diese drei Faktoren im Zusammenhang mit dem Untersuchungsgebiet besprochen werden:

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, ist das bei weitem dominierende Gestein im Gsenggraben der Wettersteindolomit. Dieser bildet, wie im Untersuchungsgebiet gut zu erkennen ist, steile bis mittelsteile Hänge, die von enormer Abtragung betroffen sind (Remich, 2001). Ampferer (1935b) spricht bei der Beschreibung des dort anzutreffenden Gesteins davon, dass kein Felsstück gewonnen werden kann, „ohne das dasselbe schon bei einem leichten Schlage zerbricht“. Dies spricht für die Verwitterungsanfälligkeit des Wettersteindolomits, der dadurch zum Hauptlieferant von Schutt in den Gesäusebergen zählt (Büchner, 1970). Das Landschaftsbild des Gsenggrabens mit seinen riesigen Massen an scharfkantigem Schutt und der schroffen und zerrissenen Felslandschaft mit einzelnen Felstürmen in verschiedenen Größen unterstreicht diese Aussagen der verschiedenen Autoren eindrucksvoll (siehe Abbildung 5).

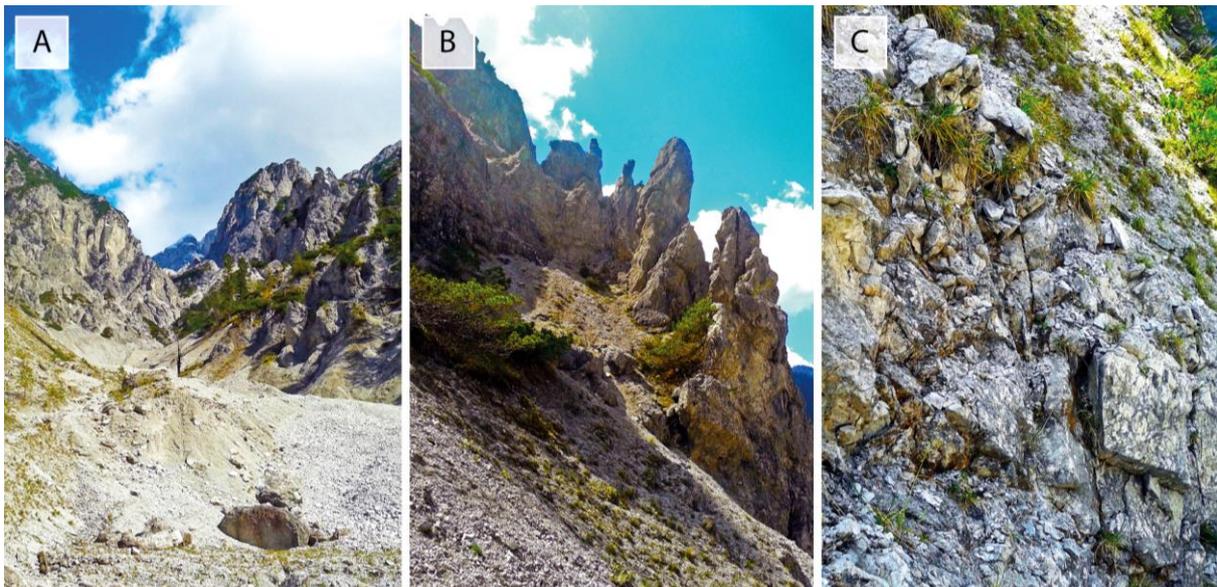


Abbildung 6: Landschaftliche Eindrücke aus dem Gsenggraben; A: Das Untersuchungsgebiet - Blickrichtung Osten in den Gsenggraben, B: Stark zerklüftete Felsflanke – Aufnahme Richtung SW, C: Nahaufnahme des stark verwitterten anstehenden Gesteins an der im Bild B gezeigten Felsformation. Quelle: Eigene Aufnahmen

Hinsichtlich des Verwitterungspotenzials zeichnen den Gsenggraben neben dem Gestein auch seine morphoklimatischen Ausprägungen aus. So verzeichnet man hier im 30-jährigen Mittel (1971 bis 2000) bis zu 128 Frostwechseltage pro Jahr (icomedias Enterprise, 2014). Die Temperaturschwankung an diesen Tagen um die 0°C besitzt nach Ahnert (2009) eine vorherrschende Wirkung auf die mechanische Verwitterung. Im Vergleich dazu kommt man in der bekannten Dachstein-Südwand auf ca. 105 Frostwechseltage (icomedias Enterprise, 2014).

Betrachtet man die hohe Anzahl an Frostwechseltagen im Zusammenhang mit den vorherrschenden geologischen Verhältnissen, so bietet der Gsenggraben beste Voraussetzungen für die mechanische Verwitterung am Fels. Ergänzt man in dieser Überlegung die im Kapitel 2.2 Klimatische Grundzüge besprochenen großen Regenmengen von bis zu 1977 mm, die zu einem gewichtigen Teil in den Winter- und Frühjahrsmonaten fallen, ergibt das ausgezeichnete Bedingungen für die speziellen mechanischen Verwitterungsarten Frostsprengung sowie Gefrierdruck-Sprengung (Ahnert, 2009).

### 3. Methodik

Im Folgenden sollen die bereits im einführenden Kapitel 1.3. angesprochenen Methoden dieser Arbeit genau erläutert werden. Die Reihenfolge der kommenden Kapitel entspricht im Großen und Ganzen dem in Abbildung 6 dargestellten Arbeitsablauf, der für die Erarbeitung der Forschungsziele (siehe Kapitel 1.2.) ausgearbeitet wurde. Die Erhebungen im Untersuchungsgebiet dauerten von September 2013 bis Mai 2014 an. Messtechnische Probleme in den Wintermonaten aufgrund zu hoher Fehlerte durch Schneefall und Vereisungen führten dazu, dass die Messungen von Dezember 2013 bis Februar 2014 unterbrochen wurden.

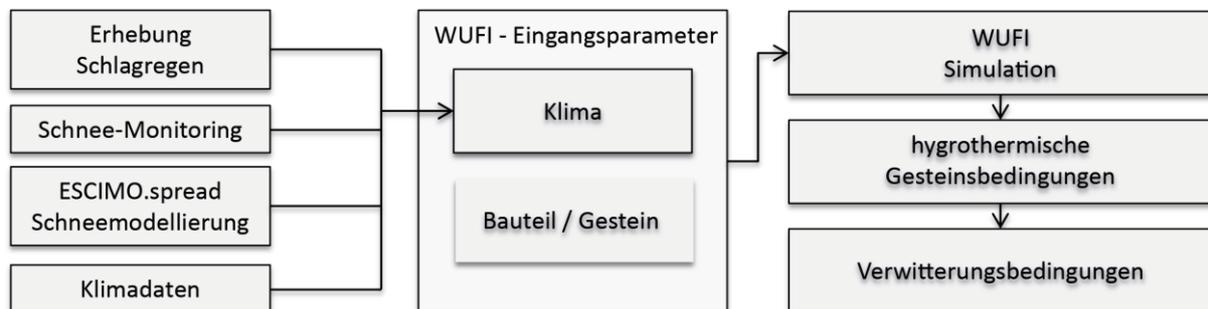


Abbildung 7: Schematische Darstellung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Arbeitsablaufs. Quelle: Eigener Entwurf

Die Untersuchungen im Gsenggraben wurden mit verschiedenen Methoden durchgeführt, die allesamt zum Ziel hatten, eine realitätsnahe Gesteinsfeuchtesimulation realisierbar zu machen. Um diese auch nach Geländeeigenschaften zu differenzieren, sind alle Erhebungen und Untersuchungen an 8 Gesteinsformationen durchgeführt worden, die sich durch ihre Höhenlage (800 m und 1100 m) und Exposition (N, O, S, W) unterschieden. Einen Überblick über die Verteilung der installierten Messinstrumente im Untersuchungsgebiet liefert Abbildung 7 und die dazugehörige Tabelle 1. Die farblich markierten Felder in der Tabelle entsprechen jeweils den dazugehörigen Positionen in Abbildung 7. Dadurch ist gut zu erkennen, wann und wo die entsprechenden Messinstrumente im Einsatz waren.



Abbildung 8: Räumliche Aufteilung der im Gsenggraben installierten Messinstrumente – Blickrichtung Osten.  
Quelle: Eigener Entwurf

Tabelle 1: Darstellung der räumlichen Aufteilung der im Gsenggraben installierten Messinstrumente - farbliche Markierung der Felder entsprechend den Positionen in Abbildung 7. Quelle: Eigener Entwurf

Messtechnik		Schlagregenfänger				Nexus Funkwetterstationen				Vaisala
		Nord	Ost	Süd	West	Nord	Ost	Süd	West	
Position	Herbst	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Frühjahr	■	■	■	■	■	■	■	■	■

### 3.1 Erhebung der Klimadaten

Um die klimatischen Gegebenheiten für die Gesteinsfeuchtesimulation im Gsenggraben so gut wie möglich wiedergeben zu können, wurde dort der digitale Multiparametersensor Vaisala Wettertransmitter WXT520 mit Solarversorgung aufgestellt (siehe Abbildung 9A). Dieser Sensor zeichnet die Hauptklimaparameter Temperatur, atmosphärischen flüssigen Niederschlag, atmosphärischen Druck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie relative Luftfeuchtigkeit auf. Somit wurde auf die von Schnepfleitner (2012) angesprochene Problematik des sehr variablen Lokalklimas reagiert.

Die Vorteile des WXT520 liegen neben seiner Kompaktheit in seinem geringen Energieverbrauch, wodurch ein Betrieb ausschließlich mit Solarenergie möglich ist. Hinzu kommt die Tatsache, dass der Sensor keine beweglichen Teile besitzt. Damit ist ein relativ

wartungsloser Einsatz möglich. Die relevanten technischen Daten der Vaisala Klimastation sind in Tabelle 2 ersichtlich. In Abbildung 8 ist weiters die Messgenauigkeit bei der Aufzeichnung der Lufttemperatur über den gesamten Messbereich erkennbar.

Tabelle 2: Technische Kenndaten des digitalen Multiparametersensors Vaisala Wettertransmitter WXT520, \* die Messgenauigkeit über den gesamten Messbereich siehe Abbildung 8. Quelle: Vaisala Oyj (2009), Vaisala Oyj (2013)

Klimaelement	Messbereich	Genauigkeit	Auflösung	Einheit
Windgeschwindigkeit	0 - 60 m/s	bei 10 m/s +-3%	0,1 m/s	m/s, km/h, mph , knots
Windrichtung	0 - 360°	+3°	1°	Grad
Temperatur	-52 - +60°C	bei +20°C +-0,3°C *	0,1°C	°C, °F
Luftdruck	600 - 1100 hPa	-52 bis +60°C: +- 1 hPa 0 bis +30°C: +- 0,05 hPa	0,1 hPa	hPa, Pa, bar, mmHg , inHg
Regenmenge	-	+5%	0,01 mm	mm, Zoll
Regenintensität	-	0 - 200 mm/h: -0,05 >200 mm/h: >5%	0,01 mm/h	mm/h, Zoll/h
Regendauer	-	+5%	10 sec	sec
Relative Feuchte	0 - 100% rF	0-90% rF: +-3% rF 90 - 100% rF: +-5% rF	0,1% rF	% rF

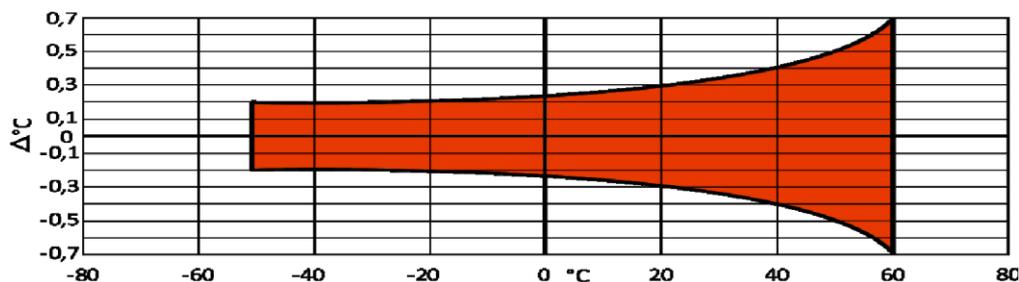


Abbildung 9: Messgenauigkeit bei der Aufzeichnung der Lufttemperatur über den gesamten Messbereich. Quelle: (Vaisala Oyj, 2009)

Der Sensor, zu sehen in Abbildung 9B, verfügt über eine Betriebstemperatur die zwischen -52 und +60°C liegt, der Bereich der Lagertemperatur ist etwas breiter und liegt bei -60 bis +70°C. Für den bereits angesprochenen, geringen Strombedarf gibt der Hersteller bei einem Messintervall von 1h 3 mA bei 12 VDC, sowie für die Betriebsspannung einen Bereich von 5 bis 32 VDC an (Vaisala Oyj, 2009).

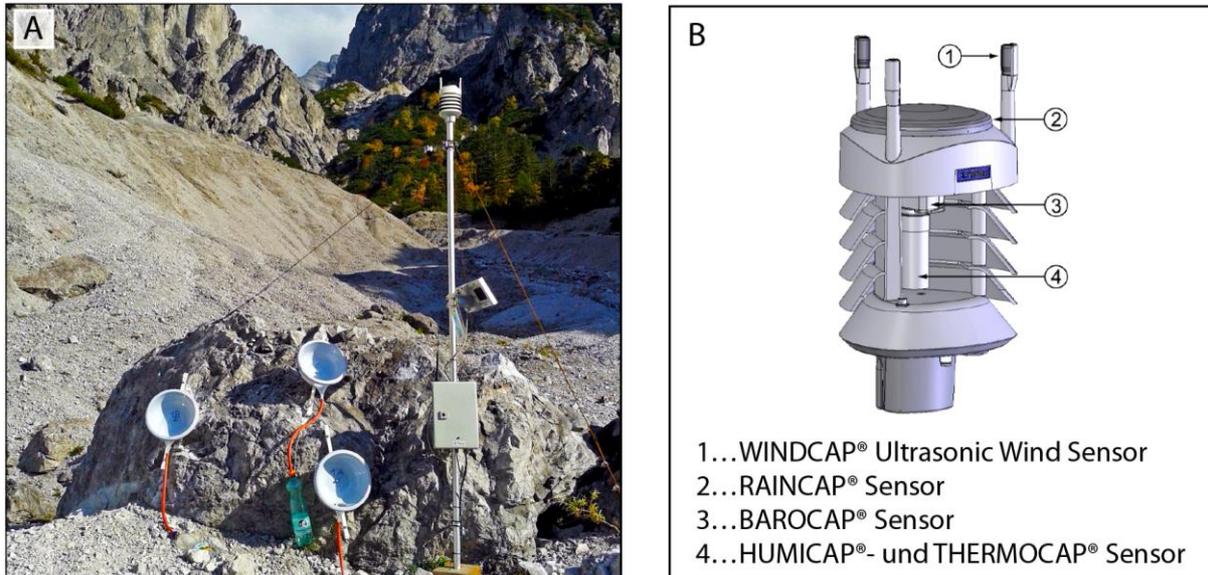


Abbildung 10: A: Montage des WXT520-Sensors mit Solarversorgung und Speichereinheit im Untersuchungsgebiet – direkt daneben drei nach Osten orientierte Schlagregenfänger (siehe Kapitel 3.2), Blickrichtung: Westen; B: Der Aufbau des digitalen Multiparametersensors Vaisala Wettertransmitter WXT520. Quelle: (Vaisala Oyj, 2008b), Eigener Entwurf

### 3.1.1. Prinzip der Windmessung

Die Erhebung der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung mittels dem integrierten Vaisala WINDCAP® Ultrasonic Wind Sensor WMT52 erfolgt mit Hilfe von Ultraschallmessungen. Drei Ultraschalldetektoren, die in einer horizontalen Ebene in gleichen Abständen angeordnet sind, senden Ultraschallwellen aus, die von den beiden jeweils anderen Detektoren registriert werden. Die Laufzeit ist bei einer Windgeschwindigkeit von 0 km/h aufgrund der bekannten Parameter, Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie zurückgelegter Strecke, bekannt und zu jedem Detektor sowohl hin als auch zurück dieselbe. Das Messprinzip macht sich darauf aufbauend den Einfluss des Windes auf diese bekannte Größe zu Nutze. Die Veränderung der Laufzeiten wird registriert und in die Parameter Windgeschwindigkeit und Windrichtung umgerechnet (Vaisala Oyj, 2012b).

Die Berechnung erfolgt über folgende Formel (Vaisala Oyj, 2012b):

$$V_w = 0,5 * L * (1/t_f - 1/t_r) \quad (1)$$

$V_w$ ...Windgeschwindigkeit |  $L$ ...Distanz zwischen zwei Detektoren |  $t_f$ ...Laufzeit in Vorwärtsrichtung  
 $t_r$ ...Laufzeit in Rückwärtsrichtung

Die verwendete Methode macht es möglich, dass die Windgeschwindigkeit unabhängig der Höhe, Temperatur sowie Luftfeuchte ermittelt werden kann. Die ansonsten für die Laufzeit des Ultraschalls einflussreichen Größen heben sich aufgrund dessen, dass die Laufzeit in beide Richtungen gemessen wird, auf (Vaisala Oyj, 2012b).

Die Windrichtung wird solange berechnet, bis die Windgeschwindigkeit unter 0,05 m/s abfällt. Ab diesem Zeitpunkt wird die zuletzt aufgezeichnete Richtung so lange übernommen, bis die Windgeschwindigkeit wieder den Grenzwert übersteigt und die Richtung erneut berechnet werden muss (Vaisala Oyj, 2012b).

### 3.1.2. Prinzip der Regenmessung

Das Prinzip der Regenmessung der im WXT520 integrierten Vaisala RAINCAP® Sensor Technology basiert auf einem piezoelektrischen Sensor, der die beim Aufschlag der Regentropfen auf die Sensorplatte erzeugte mechanische Belastung registriert (siehe Abbildung 10A). Diese Belastung der Sensorplatte erzeugt eine Spannung, die proportional zur Größe und zum Volumen des Regentropfens ist. Das für dieses Messverfahren entscheidende vertikale Moment auf die Sensorplatte ( $p_v$ ) ist von der Masse ( $m$ ) sowie der Einschlaggeschwindigkeit des Regentropfens ( $v_t$ ) abhängig (Salmi et al., 2008).

Aufgrund des bekannten Verhältnisses zwischen den beiden Größen kann die Tropfengröße, über die in weiterer Folge die Regenmenge ermittelt wird, über folgende Formel (Salmi et al., 2008) berechnet werden:

$$U(t) = c \frac{dp_v(t)}{d(t)} = cm \frac{dv_t(t)}{d(t)} \quad (2)$$

U...Spannung |  $dp_v(t)/d(t)$ ...Zeitabhängige Vertikalkraft | m...Masse des Tropfens c...materialspezifische Sensorkonstante |  $v_t$ ...Einschlaggeschwindigkeit

Abbildung 10 zeigt einen schematischen Aufbau des RAINCAP® Sensors, sowie das Verhältnis zwischen Aufschlaggeschwindigkeit und Tropfendurchmesser. Klar zu sehen ist, dass sich die Aufschlaggeschwindigkeit mit zunehmenden Durchmesser erhöht. Außen vor gelassen wird an dieser Stelle die Möglichkeit des Sensors zwischen Niederschlag und Hagel zu unterscheiden. Grund dafür ist, dass es zum einen im gesamten Messzeitraum nicht zu einem Hagelereignis gekommen ist, zum anderen diese Werte für die Fragestellungen in dieser Arbeit nicht von Interesse sind.

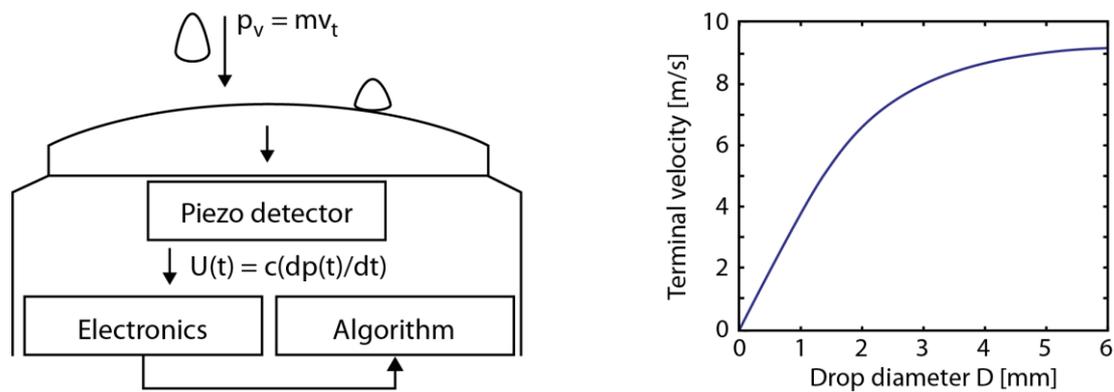


Abbildung 11: Figur A: Schematischer Aufbau des RAINCAP Sensors mit grundlegendem Berechnungsfluss (pv...vertikales Moment, m...Masse des Regentropfens, vt...Einschlaggeschwindigkeit des Regentropfens, restliche Variablen siehe Formel 2); Figur B: Verhältnis zwischen Aufschlaggeschwindigkeit und Tropfendurchmesser. Quellen: (Salmi et al., 2008); (Vaisala Oyj, 2006)

### 3.1.3. Messprinzipien des PTU-Moduls

Im PTU-Modul enthalten sind drei separate Sensoren, die durch kapazitive Messmethoden den Luftdruck, die Lufttemperatur und die relativen Luftfeuchtigkeit erheben. Die Sensoren basieren auf einem RC-Oszillator, der um zwei Referenz-Kondensatoren ergänzt wird. Die Abhängigkeit der Luftdruck- und Luftfeuchtesensoren von der Temperatur wird mit Hilfe des Transmitters ausgeglichen. Die Komponenten des PTU-Moduls sind folgende:

- Kapazitiver Silizium BAROCAP® Sensor für die Druckmessung
- Kapazitiver Keramik THERMOCAP® Sensor für die Lufttemperaturmessung
- Kapazitiver Polymer HUMICAP® 180 Sensor für die Luftfeuchtigkeitsmessung

Der BAROCAP® Sensor ist ein kapazitiver, mikrochemischer Sensor, der den Luftdruck über die Größenänderung einer Siliziummembran misst. Aufgrund von wechselnden Druckbedingungen wird auf die Membran unterschiedliche Belastung ausgeübt, wodurch sich diese entsprechend verformt. Die Verformung bewirkt, dass sich die Dicke des Vakuumspalts im Inneren des Sensors verändert. Beide Seiten dieses Spalts fungieren als Elektroden, deren Abstand, und somit auch die Kapazität des Sensors, sich entsprechend dem vorherrschenden Druck verändern. Der Luftdruck wird so über die bekannte Beziehung zwischen dem von außen wirkenden Druck und der vom Sensor gemessenen Kapazität ermittelt. Bei dieser Art von Sensoren ist das für die Membran verwendete Material ein entscheidender Faktor. Das beim BAROCAP® Sensor verwendete monokristalline Silizium besitzt eine geringe Temperaturabhängigkeit sowie gute Elastizität und Langzeitstabilität, was zu einer geringen Hysterese führt (Vaisala Oyj, 2012a).

Der im PTU-Modul enthaltenen Sensor HUMICAP® 180 misst die relative Luftfeuchtigkeit anhand des Feuchtegehalts des integrierten Dünnschicht-Polymer. Das Prinzip beruht auf der Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften des Polymer, das heißt, von der in ihm gespeicherten Menge an Wasser. Verändert sich die Luftfeuchtigkeit, verändert sich mit ihr der Wassergehalt und somit auch die Kapazität des Sensors, die dieser wiederum in die aktuelle, relative Luftfeuchtigkeit umrechnet. Der Sensor besitzt eine gute chemische Beständigkeit, Feuchtebeständigkeit sowie schnelles Ansprechverhalten (Vaisala Oyj, 2008a).

Bestehend aus zwei Platindrähten, die von einer Glas-Keramik-Dielektrik getrennt werden, misst der THERMOCAP® Sensor die Lufttemperatur. Dies erfolgt über die temperaturabhängige Permittivität der Glas-Keramik und folglich über die elektrische Kapazität des Sensors. Aufgrund seiner geringen Abmaße reagiert der Sensor sehr schnell und ohne signifikante Fehler auf sich ändernde Temperaturbedingungen (Luers, 1997).

Für die Messungen im Untersuchungsgebiet wurden folgende Messparameter am WXT520 eingestellt:

WINDCAP-Sensor:

- Samplingrate von 4Hz
- Standard-Berechnung der Wind-Extrema

RAINCAP-Sensor:

- Operationsmodus: Niederschlags-Start/End-Modus

Allgemeine Einstellungen:

- Messintervall 10min

Vor dem Messbeginn im Untersuchungsgebiet wurden die Messdaten des WXT520 mit Hilfe der TAWES Station des Bereichs Geophysik, Astrophysik und Meteorologie am Institut für Physik der Universität Graz validiert (Oberlechner, 2013). Zu diesem Zweck wurde der Sensor im Zeitraum von Mitte bis Ende Oktober 2012 am Hauptstandort der genannten Wetterstation installiert.

### **3.2. Ermittlung des Schlagregens und dessen Proportionalitätsfaktors**

Unter anderem definieren Blocken und Carmeliet (2004) den Schlagregen als jenen Anteil des Normalniederschlags, der aufgrund des Windes eine horizontale Komponente erhält. Die Größe

dieser Komponente ist von der Windgeschwindigkeit abhängig. Daraus folgt, dass Schlagregen nur unter Anwesenheit von Wind auftreten kann.

Der Schlagregen ist ein entscheidender Faktor bei der Interaktion zwischen Niederschlag und vertikal geneigten Flächen, in diesem Fall Felswänden. Vernachlässigt man das Auftreten von Schlagniederschlag und verwendet zur Berechnung der Gesteinsfeuchte ausschließlich den üblicherweise gemessenen Normalniederschlag, so entfernt sich die berechnete von der tatsächlich im Fels vorherrschenden Feuchte umso mehr, je steiler die Fläche geneigt ist. Als Beispiel sei an dieser Stelle eine senkrechte Felswand (Neigung = 90°) genannt. Diese besitzt keine Interaktion mit dem Normalniederschlag, der parallel zur Felswand zu Boden fällt. Einzig der Schlagniederschlag, der eine horizontale Komponente besitzt, vermag mit einer senkrecht verlaufenden Fläche zu interagieren. Somit zeigt sich, je steiler eine Fläche geneigt ist, desto größer ist der Einfluss des Schlagniederschlags.

Künzel (1994a) kam zu dem Ergebnis, dass es einen nahezu proportionalen Zusammenhang zwischen dem Normalniederschlag, der Windgeschwindigkeit und dem Schlagregen gibt, der auch bei verschiedenen Witterungsverhältnissen gültig ist. So kann die stündliche Schlagregenbelastung über folgende Formel (Künzel, 1994a) berechnet werden:

$$\boxed{R_S = r_s \cdot v \cdot R_N} \quad \longrightarrow \quad \boxed{r_s = \frac{R_S}{v \cdot R_N}} \quad (3)$$

$R_S$ ...Schlagregen [mm/h] | gebietsabhängiger Schlagregenfaktor [s/m] |  $v$ ...Windgeschwindigkeit [m/s]  
 $R_N$ ...Normalregen [mm/h]

Künzel (1994b) ermittelte in seinen Untersuchungen, dass Stundenmittelwerte des Niederschlags die zeitliche Variabilität von Niederschlagsereignissen wiedergeben können. Um eine aussagekräftige Berechnung des Schlagregens durchzuführen, sind deshalb Stundenmittelwerte in jedem Fall den Tagesmittelwerten vorzuziehen. Sind von einem Ort die Datensätze der Klimaparameter Niederschlag und Windgeschwindigkeit in entsprechender Form vorhanden, kann so der Schlagregenanteil ermittelt werden. Voraussetzung für die Berechnung ist die Kenntnis über den gebietsspezifischen Schlagregenfaktor  $r_s$ , der aufgrund seiner Positionsabhängigkeit im Untersuchungsgebiet eigens ermittelt werden muss. Ist  $r_s$  für einen bestimmten Zeitraum erhoben worden, so kann angenommen werden, dass dieser Faktor auch für zukünftige Regenereignisse Gültigkeit besitzt. Ist die Schlagregenmessung nicht möglich, kann als Näherungswert 0,2 [s/m] herangezogen werden (Künzel, 1994a).

### 3.2.1. Schlagregenfänger

Um eine möglichst realitätsnahe Feuchtesimulation durchführen zu können, wurde in dieser Arbeit der Schlagregenfaktor in den vier Hauptexpositionen Norden, Osten, Süden und Westen für jeweils drei unterschiedliche Neigungen (90°, 75°, 60°) ermittelt. Zusätzlich wurden die Schlagregenfänger in zwei Höhenlagen (800 m und 1100 m) angebracht, um eine mögliche Höhenabhängigkeit des Faktors zu untersuchen.

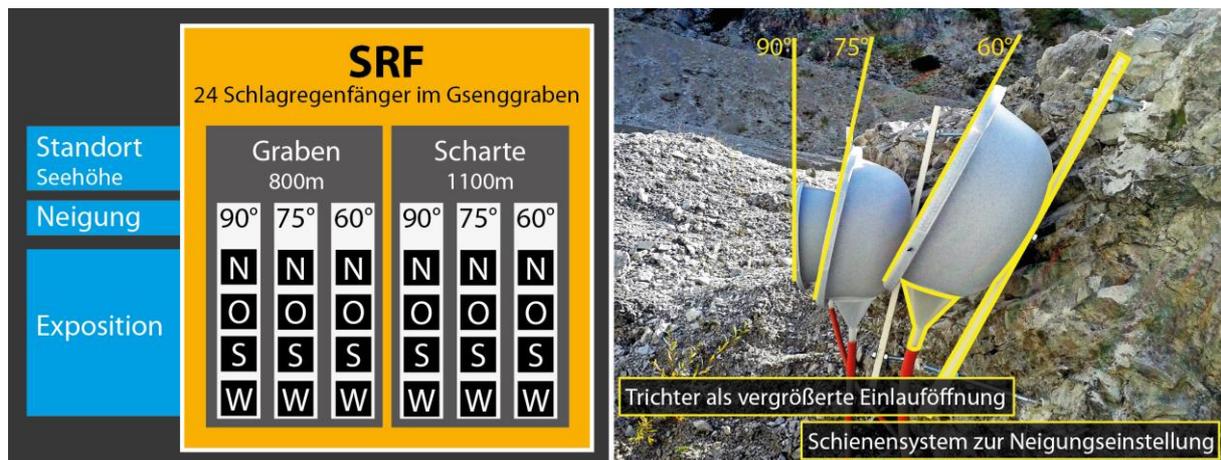


Abbildung 12: : Figur A: Umfang der im Untersuchungsgebiet installierten Schlagregenfänger; B: Montage der Schlagregenfänger am Standort Graben (800m), südliche Exposition. Quelle: Eigene Aufnahme, Eigener Entwurf

Es wurden 24 Schlagregenfänger im Untersuchungsgebiet angebracht, mit deren Hilfe ein ortsspezifischer expositions-, neigungs- und höhenabhängiger  $r_s$ -Wert bestimmt werden konnte. Auf Schlagregelmessungen mit flacheren Neigungen wurde aufgrund des immer größer werdenden Anteils des Normalniederschlags verzichtet. In Abbildung 11 ist die im Gsenggraben installierte Anzahl an Schlagregenfängern sowie deren Montage ersichtlich.

Das Messprinzip der Schlagregenfänger unterscheidet sich von jenem der bekannten Niederschlagsmessungen durch die vertikale Ausrichtung der Auffangöffnung. Dabei können zwei Messmethoden unterschieden werden (Blocken und Carmeliet, 2004):

- Messung mit freistehenden Schlagregenfänger, die vor allem bei meteorologischen oder geowissenschaftlichen Fragestellungen Anwendung findet.
- Messung mit an Wänden montierten Schlagregenfänger, die vor allem bei Fragestellung von Bauphysikern oder Bauingenieuren verwendet wird.

In dieser Arbeit wurden die Messungen mittels direkt an den Felswänden angebrachte Schlagregenfänger durchgeführt. Nur so spiegeln die gewonnen Schlagregelmengen jenen Teil

des Niederschlags wieder, der, aufgrund der im direkten Umfeld der Felswand herrschenden Bedingungen, die Felswand erreicht und so die Gesteinsfeuchte beeinflusst.

Die Schlagregenfänger wurden eigens für die Erhebungen im Gsenggraben gebaut und an die dortigen Gegebenheiten angepasst. Für den Entwurf wurden die Inhalte der Arbeit von Blocken und Carmeliet (2004) herangezogen. Als Auffangöffnung dienen Curver Haushaltsschüsseln mit einem Durchmesser von 280 mm. Um den bereits aufgefangenen Schlagregen so schnell wie möglich abzuleiten, wurde in jede Schüssel ein Trichter mit 75 mm Durchmesser eingearbeitet, von dem ein Gummi-Abfüllschlauch zu einem Auffangbehälter führt (siehe Abbildung 12). Die Behälter wurden, soweit es logistisch möglich war, nach jedem Regenereignis entleert um eine möglichst hohe zeitliche Auflösung der Schlagregenereignisse zu erhalten. Um die Schlagregensituation an verschieden steilen Felswänden zu analysieren, wurden die SRF in den drei Neigungen  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  und  $60^\circ$  montiert. Dies erfolgte, soweit es die Geländesituation zuließ, an dementsprechend geneigten Felswänden, um realitätsnahe Messbedingungen zu gewährleisten. Um flexibel auf das vorherrschende Gelände zu reagieren, sind die oben beschriebenen Schlagregenfänger an einem Schienensystem angebracht worden (siehe Abbildung 12).

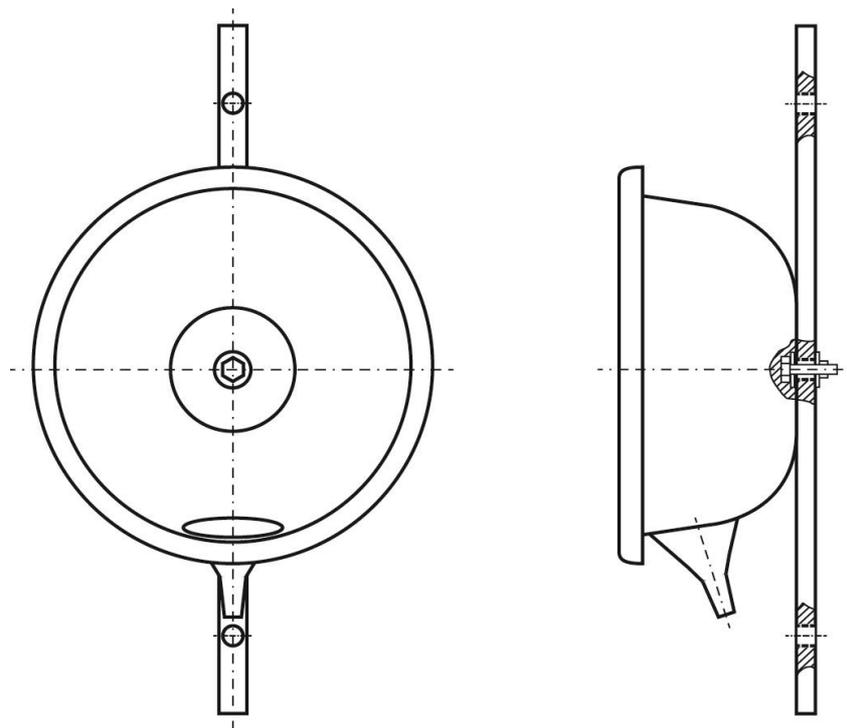


Abbildung 13: Skizze der entworfenen Schlagregenfänger mit Schienensystem zur variablen Neigungseinstellung.  
Quelle: Eigener Entwurf

Dieses System aus Schlagregenfänger und Schiene konnte neigungsvariabel an der Felswand angebracht werden, wodurch eine genaue Ausrichtung der Auffangöffnung entsprechend den drei Neigungskategorien möglich wurde. Bei jenen 8 Schlagregenfängern, die mit einem Winkel von 90° montiert wurden, wurde am Rand der Auffangöffnung ein Überlaufschutz angebracht.

### 3.2.2. Nexus Funkwetterstationen

Für die Berechnung des Proportionalitätsfaktors sind neben der Schlagregenmenge auch der Normalniederschlag sowie die Windgeschwindigkeit und -richtung entscheidend. Damit auch diese Parameter den Verhältnissen an der Felswand entsprechen, wurden vier Wetterstationen des Typs TFA 35.1075 Nexus Funkwetterstationen direkt neben den Schlagregenfängern an der Felswand montiert. Neben den erforderlichen Parametern erfassten die Nexus Stationen auch die Windböen, die Lufttemperatur sowie den Luftdruck.



Abbildung 14: Darstellungen des Settings der Nexus Funkwetterstationen: A: Windsensor, B: Thermo-/Hygrosensor, C: Niederschlagssensor, D: Speichereinheit mit Witterungsschutz. Li südexponierte Nexus-Station auf 800 m Höhe. Re. Auslesen der Speichereinheit. Quelle: Eigener Entwurf

Das zentrale Element der Funkwetterstation ist die Empfangseinheit. Sie empfängt per Funk (433.92 MHz) alle gemessenen Daten der externen Wettersensoren und speichert diese im 3000 Datensätze umfassenden internen Speicher ab. Betrieben wurde die Empfangseinheit mit vier AA 1,5V Alkaline-Batterien. Über den Empfang und der Speicherung der Wetterdaten hinaus, bietet diese Einheit noch eine Vielzahl anderer Funktionen, die bei TFA Dostmann GmbH &

Co. KG (2008) nachgeschlagen werden können. Als externe Sensoren fungieren der Thermo-Hygrometer Sensor, der Regensensor und das Schalenkreuz-Anemometer mit Windfahne. Alle genannten Sensoren, deren technischer Umfang aus Tabelle 3 entnommen werden können, werden mittels AA 1,5V Alkaline-Batterien betrieben. Das Anemometer besitzt zusätzlich eine integrierte, kleine Solarversorgung (siehe dazu Abbildung 13)

Die Wetterdaten wurden in 10 min Abständen gespeichert, um einen Vergleich mit der Vaisala-Station zu ermöglichen (TFA Dostmann GmbH & Co. KG, 2008). Aufgrund des eingestellten Speicherintervalls sowie des Speicherumfangs der Empfangseinheit mussten die Wetterdaten alle 20,8 Tage ausgelesen werden. Dies geschah mit Hilfe der WsWin32 Bedien- und Auswertesoftware für windowsbasierte Computer, die als Freeware zur Verfügung steht. Dieses Programm wurde deshalb bevorzugt, da es gegenüber der von TFA Dostmann entwickelten Software einen bei weitem größeren Leistungsumfang besitzt und zudem funktioneller ist. Näheres dazu findet man bei Krenn (2013).

Tabelle 3: Technische Kenndaten der Nexus Funkwetterstation; \*auf Meeresspiegelniveau; \*\*innerhalb 25%-80%. Quelle: TFA Dostmann GmbH & Co. KG (2008)

Klimaelement	Messbereich	Genauigkeit	Auflösung	Einheit
Windgeschwindigkeit	0 - 55,5 m/s	+0,9 m/s + 5%	0,1 m/s	m/s, km/h, mph, knots
Windrichtung	0 - 360°	+11,25°	22,5°	Grad
Temperatur	-40 - +80°C	+1°C *	0,1°C	°C, °F
Luftdruck	500 - 1100 hPa *	+3 hPa	0,1 hPa	hPa, inHg
Niederschlag	0 - 1999,9 mm	-	0,7 mm	mm, Zoll
Luftfeuchtigkeit	0% - 99%	+5% **	1%	%

Somit wurden insgesamt 24 Schlagregenfänger, 4 Funkwetterstationen und eine Klimastation im Gsenggraben installiert. Zusammen zeichnen sie Daten zur Erhebung des für die Schlagregenermittlung entscheidenden spezifischen Proportionalitätsfaktors auf. Dieses Setting an Messinstrumenten wurde, wie zuvor bereits kurz erwähnt, auf zwei Höhengniveaus an je 4 verschiedenen exponierten Felswänden installiert. Die genaue räumliche Aufteilung des messtechnischen Settings ist aus Abbildung 7 und der dazugehörigen Tabelle 1 zu entnehmen.

Die in Abbildung 7 angedeuteten Unterschiede in der Aufteilung zwischen den Herbst- und Frühjahrsmonaten, die ausschließlich die Position der Nexus Funkwetterstationen betrafen,

hatten logistische und messtechnische Gründe. Es musste entschieden werden, wie jene fünf Messinstrumente (1 Vaisala WXT520, 4 Nexus Funkwetterstationen) auf die acht Messpunkte optimal aufgeteilt werden können. Die Klimastationen sollten, neben den schlagregenspezifischen Parametern, auch die allgemeine klimatische Situation im Gsenggraben aufzeichnen. Folglich bestimmten allgemeine messtechnische Richtlinien die Wahl der Position. Die Klimastation wurde auf einer relativ statischen Schotterebene im niedrigeren Höhengniveau aufgestellt. Dieser Standort versprach geländeklimatologisch die beste Wahl zu sein, um das vorherrschende Grabenklima aufzuzeichnen. Unmittelbar neben der Klimastation konnten Schlagregenfänger mit östlicher sowie westlicher Exposition am Fels montiert werden. Dies hatte zum Vorteil, dass die Aufzeichnung jener Parameter, die zur Berechnung des Schlagregenfaktors (SRF) direkt neben den Schlagregenfänger erhoben werden sollen, an dieser Position bereits von der Vaisala Station durchgeführt wurde. Ergänzt wurden die klimatischen Aufzeichnungen auf diesem Höhengniveau von zwei Funkwetterstationen neben den Schlagregenfängern an den nördlich sowie südlich exponierten Felswänden. Die beiden anderen Nexus Funkwetterstationen wurden im höherliegenden Messbereich in östlicher und westlicher Exposition montiert. Nach der witterungsbedingten messtechnischen Winterpause wurde die Aufteilung der Funkwetterstationen verändert. Ab dem Frühjahr zeichneten alle vier Nexus-Stationen die Bedingungen in der höheren Lage auf. So konnte dort in die vier Expositionen N, O, S und W jeweils eine Funkwetterstation neben den Schlagregenfängern montiert und somit eine lokal höhere Messauflösung generiert werden. Im unteren Untersuchungsniveau verblieb die Klimastation, die die notwendigen Parameter für die Faktorberechnung mit nach Künzel (1994a) ausreichender Genauigkeit aufnahm. Zur Montage der Schlagregenfänger sowie der Funkwetterstationen muss abschließend erwähnt werden, dass es in einem West-Ost verlaufenden Graben Schwierigkeiten gibt, west- sowie ostexponierte Felswände zu finden. Der Aufbau der Messgeräte in diesen beiden Expositionen fand deshalb an mächtigen, statischen Felsblöcken inmitten des Grabens statt.

### **3.3. Schneedeckenmonitoring**

Die Schneedecke fungiert im hydrologischen Kontext als Wasserspeicher, der in Abhängigkeit der Strahlung das gebundene Wasser zeitlich verzögert wieder frei gibt. Zusätzlich zur zeitlichen Komponente kommt es durch verschiedene Prozesse zu einer Einflussnahme auf die räumliche Verteilung des Schnees, wodurch das darin enthaltene Wasser im Vergleich zum direkten flüssigen Niederschlag auch räumlich verändert freigegeben wird. Somit besitzen der Schnee und die daraus entstehende Schneedecke einen beachtlichen Einfluss auf den

Wasserhaushalt und folglich auf die Gesteinsfeuchte in alpinen Regionen (Rieckh et al., 2011).

Deshalb wurde im Untersuchungsgebiet ein Schneedeckenmonitoring durchgeführt, das den zeitlichen und räumlichen Aufbau der Schneedecke mit Hilfe einer Reihe von täglich drei Fotoaufnahmen festhalten sollte und somit die punktuelle Schneemodellierung (siehe Kapitel 3.4) erweitert. Die Intention dahinter war es herauszufinden, welche Unterschiede sich in der Mächtigkeit der Schneedecke in Abhängigkeit der Geländeneigung und des Schneetransports ergeben. Das Monitoring wurde mit Hilfe einer Automatic Remote Digital Camera (ARDC) durchgeführt, die so platziert wurde, dass die bereits mit Messinstrumenten versehene nordexponierte Felswand in 800m Höhe aufgenommen wurde (siehe Abbildung 14).



Abbildung 15: Der zum Schneedeckenmonitoring gewählte Bildausschnitt der Nordexponierten Felswand (800m) im Gsengraben. Quelle: Eigene Aufnahme

Das ARDC-System bestand aus einer handelsüblichen Nikon Coolpix 5400 Kamera und dem programmierbaren DigiSnap 2000 Fernauslösemodul. Die Kamera wurde mittels einer 12V/25Ah-Batterie und dem monokristallinen Solarmodul Sunset SM10 mit einer Nennspannung von 17,3V mit Energie versorgt. Der von der Batterie und dem Solarpanel kommende Strom wurde über den 12V/5A Solarladeregler Steca PR 0505 in den Harbotronics Battery Converter geleitet. Dieser wandelte die Spannung in die für den Betrieb der Kamera

benötigten 8,5V um. Der DigiSnap 2000 wurde durch eine 1,5V Mono-Batterie mit Strom versorgt. Zur besseren Orientierung zeigt Abbildung 15B die eben beschriebenen elektronischen Komponenten und deren Verkabelung. Genauere Informationen zu den einzelnen Bauteilen finden sie unter anderem bei Nikon GmbH (2003), Harbortronics Inc. (2007), Harbortronics Inc. (2006) oder Steca Elektronik GmbH (2004). Die beschriebenen elektronischen Komponenten sind zum Schutz in einem witterungsbeständigen Gehäuse untergebracht worden.

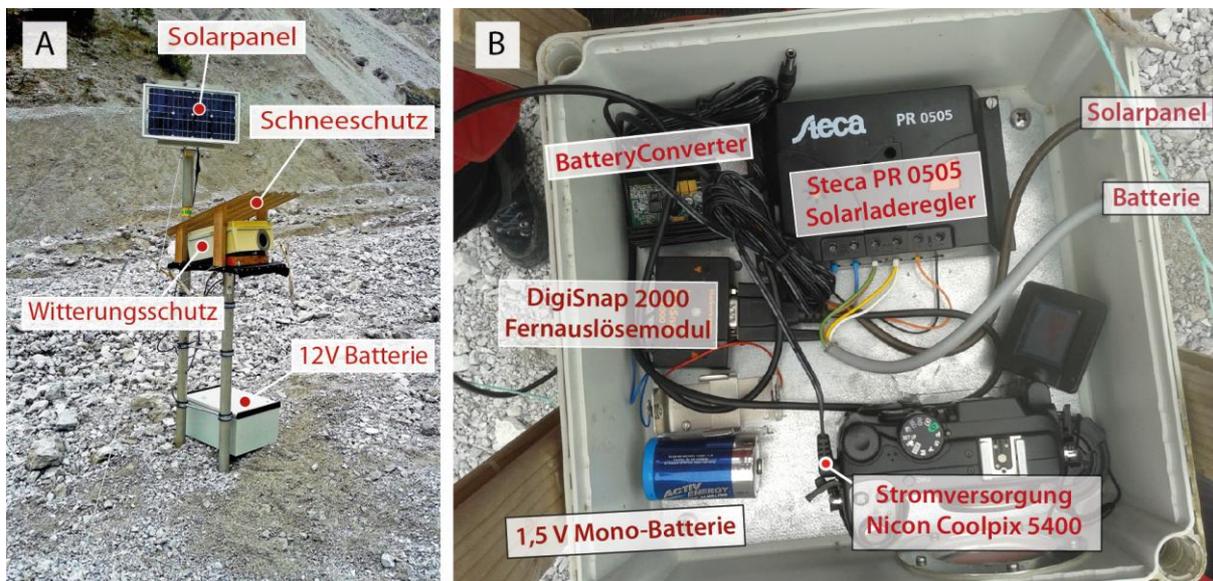


Abbildung 16: Die ARDC-Anlage zum Schneedeckenmonitoring. A: Montage der ARDC und dessen Stromversorgung; B: Elektronischer Aufbau der ARDC. Quelle: Eigener Entwurf

Für einen optimalen Bildausschnitt wurde die Kamera ca. 120 cm über dem Boden und ca. 30 m von der zu beobachtenden Felswand entfernt aufgestellt. Dabei lag unter anderem der Fokus auf einer stabilen und reproduzierbaren Position der Kamera, um so die Bilderreihe mit möglichst geringen Fehlerwerten übereinander legen zu können. Das Montagesystem fungierte zusätzlich als Schutz, um einem Einschneien der ARDC vorzubeugen. Abbildung 15 zeigt den gesamten Aufbau des im Gsenggraben montierten ARDC-Systems. Die Fernauslösung wurde so programmiert, dass täglich um 9h, 12h sowie 15h ein Bild aufgenommen werden sollte. Für die Wahl der Aufnahmezeitpunkte waren vor allem die Aufnahmeverhältnisse ausschlaggebend, die an diesen Tageszeiten auch im Winter gute Lichtverhältnisse versprechen. Es wurde damit gerechnet, dass in der von der ARDC eingefangenen Felswand in den Wintermonaten vor allem kleinsträumige Schneeablagerungen zu finden sein würden. Die Kamera wurde auf die zweithöchste Auflösung eingestellt, da ein Kompromiss zwischen hoher

Datenqualität und vorhandenem Speicherplatz getroffen werden musste. Als Energiesparmaßnahmen wurde der Kamerabildschirm ausgeschaltet und der Aufnahmemodus „Landschaft“ eingestellt. Bei diesem Modus wird zum Zeitpunkt der Auslösung durch den DigiSnap 2000 verhindert, dass die Kamera bei Störungen im Bildausschnitt wie Nebel, Schneegestöber oder Verunreinigungen des Linsenfensters im Witterungsschutz unangemessen lange fokussiert (Rieckh, 2011). Um über das angewandte Monitoring-Verfahren qualitativ gute Aussagen zur Schneedecke treffen zu können, wurde ein Aussortieren von unscharfen und generell unbrauchbaren Bildern aus der Bilderreihe und bei den restlichen eine Ortho-Entzerrung angestrebt (Rieckh, 2011).

Der geplante Beobachtungszeitraum ist an die Schneedecke im Untersuchungsgebiet gekoppelt, sollte aber spätestens mit 01.12.2013 starten. Es ergaben sich jedoch zwei gravierende Probleme, die die Durchführung des geplanten Schneedeckenmonitorings zunächst entscheidend verzögerten und schlussendlich das Monitoring unmöglich machten.

Gleich zu Beginn der Arbeit mit der ARDC musste festgestellt werden, dass sich die Kamera trotz Sonnenschein und aufgeladener Batterie nicht einschalten ließ. Grund dafür war ein Defekt am Battery Converter, wodurch die notwendige Eingangsspannung der Kamera nicht mehr erreicht wurde. Als Ersatz wurde, aufgrund von entscheidend geringeren Kosten und schnellerer Lieferzeit, auf den noch unbekanntem Pololu Step-Down Spannungsregler D24V6AHV gesetzt. Nachdem die Verkabelung aufgrund des neuen Bauteils geringfügig geändert werden musste, wurde die variable Ausgangsspannung des Spannungsreglers auf die notwendige Eingangsspannung der Kamera eingestellt. Eine dreitägige Testphase, bei der der volle Betriebsumfang getestet wurde, stellte die Einsatzfähigkeit des Systems mit der neuen Komponente fest, wodurch die ARDC-Anlage erneut am definierten Aufnahmepunkt platziert werden konnte. Am darauffolgenden Auslesetermin (3 Wochen später) musste leider festgestellt werden, dass die Kamera lediglich 3 Bilder aufgenommen hatte. Die folgenden elektrotechnischen Tests zeigten ein erneutes Problem bei der Spannungsversorgung der Kamera aufgrund des Spannungswandlers. Daraufhin musste dieser wieder neu eingestellt werden und das gesamte System wurde zur Sicherheit einem zweiwöchigen Testlauf an der Universität in Graz unterzogen. In Zuge dessen konnten keine weiteren Probleme festgestellt werden. Die Folge war ein zeitlich stark verzögerter Beginn des Schneedeckenmonitorings im Februar 2014.

Zu den messtechnischen Schwierigkeiten kam hinzu, dass die klimatische Situation in den Wintermonaten im Untersuchungszeitraum keinen Aufbau einer Schneedecke zuließ. Nach

Angaben der ZAMG lagen die Wintertemperaturen 2013/2014 in Österreich um 2,7°C über dem langjährigen Mittel (1981-2010), womit dieser Winter als zweitwärmster Winter seit Beginn der Wetteraufzeichnungen vor 247 Jahren gilt. Die größten Abweichungen zum langjährigen winterlichen Temperaturmittel wurden im vom Gsenggraben nur ca. 26 km entfernten Windischgarsten (600m) verzeichnet, das 4,2°C über dem klimatologischen Mittel lag. Auffällig waren auch die extremen Unterschiede im Niederschlag nördlich und südlich des Alpenhauptkamms. So fielen nördlich der Alpen in den Wintermonaten (Dezember, Jänner, Februar) nur 50-60% der durchschnittlichen winterlichen Niederschläge, hingegen im Süden 250% (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2014).

Die besprochenen klimatologischen Bedingungen dieses Winters sind in Abbildung 16 graphisch dargestellt.

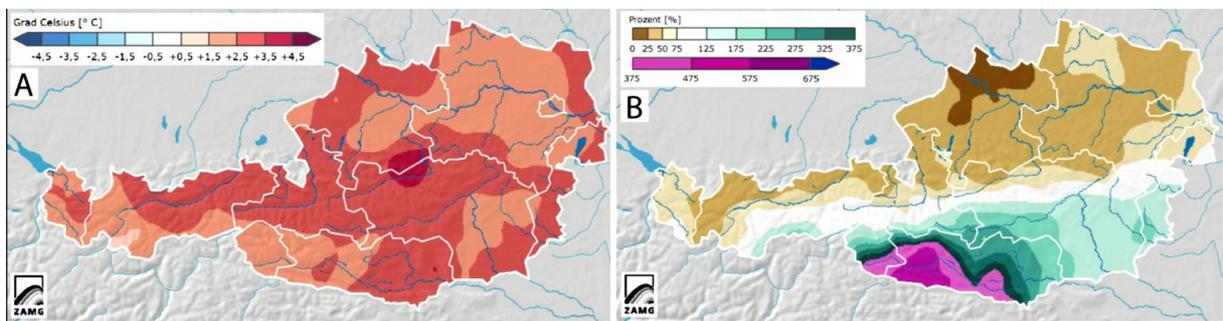


Abbildung 17: Klimatische Verhältnisse in Österreich im Winter (Dezember, Jänner, Februar) 2013/14. A: Abweichung der Temperatur vom vieljährigen Mittel (1981-2010); B: Niederschlagsvergleich mit dem vieljährigen Mittel (1981-2010) – 100% entsprechen dem Mittelwert. Quelle: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2014)

Bei genauer Betrachtung der in Abbildung 16 dargestellten Werte, liegt der Gsenggraben im Bereich eines Temperaturplus von +3,5°C bis + 4,5°C und einem Niederschlagspensum von nur 50-75% im Vergleich zum vieljährigen Mittel (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2014). Aufgrund dieses klimatologisch herausragenden Winters konnte sich im Untersuchungszeitraum keine Schneedecke im Gsenggraben bilden, wodurch ein Monitoring im Zuge dieser Arbeit nicht möglich war.

### 3.4. Schneemodellierung – ESCIMO.spread

Wie bereits eingangs in Kapitel 3.3. erwähnt, besitzt der Schnee einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserhaushalt und sowie auf die Gesteinsfeuchte. Dieser Umstand muss für eine

aussagekräftige Gesteinsfeuchtesimulation berücksichtigt werden. Deshalb wurden im auf Kalkulationstabellen basierenden Simulationsprogramm ESCIMO.spread (Strasser und Marke, 2010) verschiedene Parameter der Schneedecke berechnet. Das ESCIMO.spread (Energy Balance Snow Cover Integrated Model) modelliert mit Hilfe von physikalischen Beziehungen und Berechnungen die Daten zur Energiebilanz, das Schneewasseräquivalent sowie die Schmelzrate der Schneedecke in Form von Punktdaten. Als Eingangsdaten dienen Stundenwerte der Temperatur, des Niederschlags, der Windgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Globalstrahlung sowie der langwelligen Strahlung.

Der Datensatz der eintreffenden langwelligen Strahlung wurde aus den gemessenen Klimaparametern über das Stefan-Boltzmann-Gesetz (4) berechnet. Der darin enthaltene Emissionsgrad der Atmosphäre (5) konnte nach Prata (1996) ermittelt werden, der über den aktuellen Dampfdruck sowie der Temperatur der Atmosphäre (6) eine Beziehung zwischen dem benötigten Emissionsvermögen der Atmosphäre und dem in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampf über der Sättigung beschreibt. Diese Methode ist laut Sturzenegger (2013) besonders geeignet für die Anwendungen im Gebirge. Die Berechnung des für den Emissionsgrad entscheidenden aktuellen Dampfdrucks der Atmosphäre wurde nach den Ausführungen von Priestley-Taylor mit Hilfe der Taupunkttemperatur, die über die relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur (8) berechnet wurde, durchgeführt (7).

$$L_{\downarrow} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (4)$$

$L_{\downarrow}$ ...Eintreffende langwellige Strahlung [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] |  $\epsilon$ ...Emissionsgrad der Atmosphäre [-] |  $T_a$ ...Lufttemperatur in 2 m Höhe [K] |  $\sigma$ ...Stefan-Boltzmann Konstante [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ]

$$\epsilon = 1 - (1 + W_p) \cdot e^{-(1,2 + 3 \cdot W_p)^{0,5}} \quad (5)$$

$\epsilon$ ...Emissionsgrad der Atmosphäre [-] |  $W_p$ ...atmosphärischer Wasserdampfgehalt über der Sättigung [-]

$$W_p = 46,5 \cdot \frac{e_a}{T_a} \quad (6)$$

$W_p$ ...atmosphärischer Wasserdampfgehalt über der Sättigung [-] |  $e_a$ ...aktueller Dampfdruck [kPa]  
 $T_a$ ...Lufttemperatur in 2 m Höhe [K]

$$e_a = e_s(T_d) = 0,6108 * e^{\frac{17,27 * T_d}{T_d + 237,3}} \quad (7)$$

$e_a$ ...aktueller Dampfdruck [kPa] |  $T_d$ ...Taupunkttemperatur [°C]

$$T_d = (f/100)^{1/8} (112 + 0,9T_a) + 0,1T_a - 112 \quad (8)$$

$T_d$ ...Taupunkttemperatur [°C] |  $T_a$ ...Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C] |  $f$ ...relative Luftfeuchtigkeit [%]

Die Information über die Menge an gespeichertem Wasser in der Schneedecke (Schneewasseräquivalent [mm]), sowie die Freigabe dessen über die Zeit (Schmelzrate [mm/h]) machte es möglich, den Einfluss der aus der Schneedecke freiwerdenden Feuchtigkeit auf das Gestein in die WUFI-Simulation einzubinden.

### 3.5. Gesteinsfeuchtesimulation –WUFI

Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsprogramm WUFI (Wärme- und Feuchtetransport Instationär) berechnet, auf Basis von hydrothermischen Stoffkennwerten sowie klimatischen Randbedingungen, realitätsnahe den Wärme- und Feuchtetransport verschiedener Materialien. Entwickelt vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik, wurde WUFI prinzipiell zur Simulation des hydrothermischen Verhaltens von Gebäudewänden unter realen Klimabedingungen konzipiert (Künzel, 1994b). Aufbauend auf die Arbeiten von Sass (2005) und Schnepfleitner (2012) wurde in diesem Projekt WUFI einen Schritt weiter funktionell an die Gegebenheiten natürlicher Felswände angepasst. Wie bereits eingangs erwähnt, lag das Hauptaugenmerk dieser Adaption vom WUFI auf der Optimierung der klimatischen Einflussgrößen. In diesem Sinne wurden Simulationen zum einen mit dem gebietsspezifischen Schlagregenfaktor, der unter in Gebirgslandschaften typischen Bedingungen erhoben wurde, durchgeführt (siehe Kapitel 3.2.). Zum anderen sind Simulationen mit einem Feuchtigkeitsinput durch den Schnee und dessen Schmelzraten (siehe Kapitel 3.4.) vorgenommen worden. Um die Adaptionen an das natürliche Setting verifizieren zu können, wurden für sämtliche in dieser Arbeit durchgeführten WUFI-Simulationen die Eingangsparametern von Schnepfleitner (2012) als Standarddatensätze herangezogen. Somit konnten jegliche Simulationsvarianten und deren Auswirkungen stets mit den seinen verglichen werden. Nach stetigen Optimierungen jener Simulationen, die jeweils

nur an einem Parameter verändert wurden, fand abschließend eine Simulation mit der Summe aller entwickelten Parameter zur Adaption an ein natürliches Setting statt.

WUFI benötigt grundsätzlich klima- sowie bauteilspezifische Eingangsdaten (siehe Abbildung 17). Um eine Simulation der Gesteinsfeuchte am untersuchten Objekt mit möglichst realitätsnahen Ergebnissen zu erhalten, ist auf lokal repräsentative Aufzeichnungen der klimatischen Verhältnisse in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde oder geringer bzw. auf eine genaue Analyse der physikalischen Eigenschaften des Bauteils zu achten (Künzel, 1994b; Schnepfleitner, 2012).

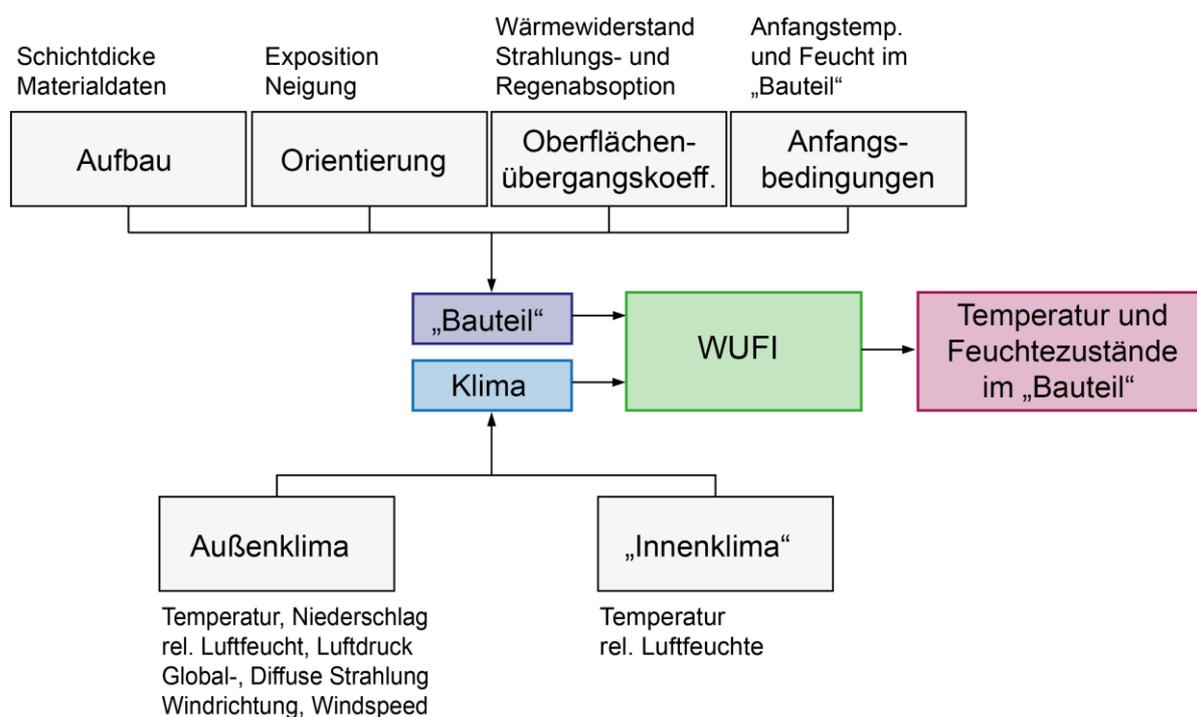


Abbildung 18: Aufbau und Darstellung der wichtigsten Eingangsparameter vom WUFI. Quelle: (Schnepfleitner, 2012)

Näheres zum Simulationsprogramm WUFI und dessen Rechenverfahren ist unter anderem in Holm (2001), Künzel (1994c, 1995) sowie Schmidt et.al. (2002) nachzuschlagen.

### 3.5.1. Bauteilspezifische Eingangsdaten

Definiert wird das simulierte Objekt über Informationen über dessen Aufbau, Orientierung, Oberflächenübergangskoeffizienten sowie dessen Temperatur- und Feuchtebedingungen am Beginn der Simulation. Dabei ist bei der Umsetzung der Simulation stets daran zu denken, dass

WUFI für den Bereich der Bauphysik entwickelt wurde und so auch die Steuerelemente und Parameter auf diese Anwendung ausgelegt wurden.

Der zu definierende Aufbau des Bauteils bezieht sich einerseits auf die Schichtdicke des zu simulierenden Objekts, die bei Gebäudewänden die Mächtigkeit der einzelnen Wandkomponenten festlegt. Als Schichtdicke wurden hier 0,5 m als ausreichend festgelegt, da die verschiedenen Simulationen einen stabilen Jahresverlauf der Feuchte ab spätestens 30 cm zeigen. Weiters müssen an dieser Stelle die in Tabelle 4 aufgelisteten grundlegenden physikalischen Eigenschaften, Approximationsparameter sowie hygrothermischen Funktionen für das Material/Gestein (Dolomit; siehe Kapitel 2.1.) definiert werden. Die spezifischen Materialkennwerte für das im Untersuchungsgebiet vorherrschende Dolomitgestein wurden von Schnepfleitner (2012) in Laborversuchen für die Verwendung im WUFI erarbeitet und konnten somit für die Simulationen dieser Arbeit übernommen werden.

Neben den Materialkennwerten und der Schichtdicke des untersuchten Objekts ist auch die Orientierung entscheidend für dessen Feuchtegehalt. Je nach Exposition und Neigung variieren gebietsabhängig der Schlagregenanteil sowie die eintreffende Strahlung. WUFI benötigt beide Faktoren des zu simulierenden Objekts. Ob und wie stark die klimatischen Bedingungen das Material bzw. das Gestein tatsächlich beeinflussen, kann mit Hilfe der Übergangskoeffizienten definiert werden. Sie beschreiben die Wärme- sowie Feuchteströme, die über die Gesteinsoberfläche, die als Grenzschicht zwischen Atmosphäre und Gesteinskörper dient, wirken. Durch die von Schnepfleitner (2012) erhobenen Daten konnte die klimabeeinflusste Seite der untersuchten Felswand mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von 0,0588 [m<sup>2</sup>K/W] versehen werden. Die weiteren Kennwerte dieser Gruppe, die kurzwellige Strahlungsabsorptionzahl [-], langwellige Strahlungsemissionszahl [-] und der SD-Wert (beschreibt die aufgetragene Beschichtung) [m], wurden der im WUFI enthaltenen Datenbank entnommen. Aufgrund der ursprünglichen Verwendung des Simulationsprogramms, muss auch ein „innerer Bereich“ definiert werden. Um den im Fels nicht vorhandenen Einfluss aus dem Inneren praktisch zu verhindern, wurden die dazugehörigen inneren Übergangskoeffizienten (Wärmeübergangskoeffizient, SD-Wert) überdurchschnittlich hoch auf jeweils 10.000 [m<sup>2</sup>K/W] bzw. [m] festgelegt (Sass, 2005). Die Folge war, dass die an der Innenseite angegebenen Randbedingungen keinen Einfluss auf die Berechnungen besaßen und so eine reine Außenklima gesteuerte Simulation durchführbar wurde. Die Definition des zu simulierenden Objekts wird mit dessen Feuchte- und Temperaturzustands zu Beginn der Berechnung abgeschlossen. Hierzu wurde mit den für diese Arbeit erarbeiteten bzw.

verwendeten Simulationseinstellungen zunächst eine einjährige WUFI-Simulation durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden anschließend als Anfangsbedingungen für die eigentliche Simulation verwendet.

Tabelle 4: In der WUFI-Simulation verwendete Materialkennwerte für Dolomit. Die Auflistung der verwendeten hygrothermischen Funktionen dient ausschließlich zur Übersicht – eine Ausformulierung wurde an dieser Stelle nicht vorgenommen. Quelle: (Schnepfleitner, 2012)

<b>Grundkennwerte</b>	
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2796
Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,0235
Wärmekapazität trocken [J/kgK]	850
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C [W/mK]	2,4
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]	114
<b>Approximationsparameter</b>	
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	1,33
Freie Wassersättigung [kg/m <sup>3</sup> ]	22,5
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ]	0,00186135
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte [%/M.-%]	8
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temperatur [W/mK <sup>2</sup> ]	0,0002
<b>Hygrothermische Funktionen</b>	
Feuchtespeicherfunktion	
Flüssigkeitstransportkoeffizienten (Saugen, Weiterverteilung)	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (feuchteabhängig)	
Wärmeleitfähigkeiten (feuchteabhängig, temperaturabhängig)	
Enthalpie (temperaturabhängig)	

### 3.5.2. Klimaspezifische Eingangsdaten

Für die zu simulierenden Feuchte- und Temperaturbedingungen sind neben den Vorgängen im Bauteil (siehe Kapitel 3.5.1.) auch die Wechselwirkungen mit der Umgebung entscheidend. An der Bauteiloberfläche und somit der Grenze zwischen Bauteil und dessen Umgebung findet ein Temperatur- und Feuchteausgleich statt, dessen Ausprägung vom Zustand im Bauteil sowie dem Zustand der Umgebung abhängig ist. Die Umgebung wird hier durch meteorologische Aufzeichnungen beschrieben, wobei folgende klimatische Parameter vom WUFI zu jedem

Zeitschritt benötigt werden: Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung sowie Diffusstrahlung (Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2006; Schmidt et.al., 2002).

Zum Zweck der direkten Vergleichbarkeit wurde die in den Gesäuse-Simulationen von Schnepfleitner (2012) verwendete Klimadatei als Basis für diese Arbeit herangezogen und entsprechend den in Kapitel 3.5.4. beschriebenen Simulationsvarianten optimiert. Die darin enthaltenen Datensätze repräsentieren das Jahr 2007, welches klimatisch betrachtet den langjährigen mittleren Bedingungen im Untersuchungsgebiet sehr stark ähnelt. Daraus ist abzuleiten, dass die vorgenommenen Simulationen nicht speziell das Jahr 2007, sondern die allgemeinen durchschnittlichen Klimabedingungen repräsentieren. Die aus einem vollständigen Jahr bestehende Klimadatei beinhaltet die oben genannten notwendigen Klimaparameter in einer zeitlichen Auflösung von 1 [h], die nach Künzel (1994b) eine realitätsnahe Simulation ermöglicht. Neben dem Außenklima muss aufgrund des Entwicklungshintergrundes der Simulationssoftware auch ein Innenklima definiert werden. Hier wurde aufgrund von mit der Tiefe abnehmenden Schwankungsamplituden von über das Jahr hinweg konstanten klimatischen Bedingungen im tiefen Gesteinsverbund ausgegangen. Die für die Berechnung des Innenklimas notwendige Temperatur sowie relative Luftfeuchtigkeit wurde deshalb über den jeweiligen Jahresmittelwert aus der oben beschriebenen Klimadatei definiert. Der dadurch entstehende Einfluss auf die hygrothermischen Bedingungen im Gestein ist jedoch aufgrund der in Kapitel 3.5.1. beschriebenen inneren Übergangskoeffizienten vernachlässigbar.

### **3.5.3. Simulationssteuerung**

Die Steuerung der Simulation stellt Parameter zur Wahl, mit denen die numerischen Beziehungen der durchzuführenden Berechnung kontrolliert werden. Die zu simulierende Zeitspanne wurde auf 100 Jahre festgelegt, wobei dieser Umfang einen Kompromiss zwischen der Rechendauer und stabilen Simulationsergebnissen darstellt. Um die Rechengenauigkeit zu erhöhen, wurde der Rechenzeitschritt wie von Künzel (1994b) und Schmidt et.al. (2002) gefordert auf eine Stunde festgelegt. Dabei liest WUFI zu jedem Zeitschritt die jeweiligen Stundenwerte aus der Klimadatei ein, die aufgrund der gerichteten Größen Strahlungsflussdichte sowie Regenlast entsprechend der Orientierung und Neigung der Felswand neu berechnet werden. Neben den zeitlichen Rahmenbedingungen können an dieser Stelle Berechnungsarten, hygrothermische Sondereinstellungen, spezifische numerische Parameter, eine adaptive Zeitschrittsteuerung sowie die Simulationsgeometrie festgelegt werden. Zur Berechnungsart wurde aufgrund der Fragestellungen dieser Arbeit sowohl die

Wärme- als auch die Feuchtetransportberechnung zur Simulation hinzugefügt, jedoch auf besondere hygrothermische Einstellungen verzichtet. Um möglichst genaue und stabile Ergebnisse zu erhalten, wurden trotz intensiverer Rechenleistung eine erhöhte Genauigkeit, eine Konvergenzverbesserung sowie eine adaptive Zeitschrittsteuerung als Simulationsparameter definiert. Letztere wiederholt einen Rechenschritt bei numerischen Problemen und stellt bei diesem auf eine kleinere, vordefinierte Schrittweite um. Bei auftretenden Rechenschwierigkeiten wird dieser Vorgang mit erneuter Unterteilung des Zeitschrittes wiederholt, bis die voreingestellte maximale Anzahl an Berechnungsstufen erreicht wird. Erst dann wird durch WUFI ein Konvergenzfehler gespeichert und zum nächsten Rechenschritt übergegangen (Radon et.al., 2011). Bei all den durchgeführten hygrothermischen Simulationen wurde im Zuge der adaptiven Zeitschrittsteuerung eine Unterteilung der originalen Schrittweite von 20 Schritten sowie eine Wiederholrate von 7 Stufen definiert.

#### **3.5.4. Varianten der Gesteinsfeuchtesimulation**

Im Zuge dieser Arbeit wurden drei verschiedene Simulationsvarianten zur Gesteinsfeuchtesimulation entwickelt, um eine nachvollziehbare Annäherung von WUFI an das Anwendungsgebiet natürlicher Felsformationen durchführen zu können. Zunächst wurde eine Simulation mit exakt jenen Parametern vollzogen, die Schnepfleitner (2012) in seiner Arbeit definierte. Diese galt als Ausgangspunkt für die darauffolgende Simulationsentwicklung. Jede weitere Simulation unterschied sich nur in einem Parameter von jenen der Referenzsimulation, wodurch die Auswirkungen des veränderten Settings durch einen Vergleich mit den Referenzsimulationsergebnissen unmittelbar ersichtlich wurden.

Aus den Zielen dieser Arbeit ergaben sich auf der Referenzsimulation aufbauend wie folgt die angesprochenen drei Simulationsvarianten (SV):

- SV *SRF*: Simulation mit optimiertem Schlagregenfaktor
- SV *Schnee*: Simulation mit Einfluss des Schneeniederschlags auf die Gesteinsfeuchte
- SV *Schnee+SRF*: Kombinierte Simulation mit optimiertem SRF und Schneeeinfluss

Um den Einfluss der Exposition sowie der Neigung auf die Gesteinsfeuchte zu ermitteln, wurden alle Simulationen nach den vier Hauptexpositionen (Norden, Osten, Süden, Westen) und diese wiederum nach den Neigungen 90° sowie 70° differenziert. So ergab sich ein Setting von 32 verschiedenen Simulationen (4 Varianten mit 4 unterschiedlichen Expositionen zu je zwei unterschiedlichen Neigungen).

In der SV *SRF* wurde die Referenzsimulation mit dem im Untersuchungsgebiet erhobenen SRF (siehe Kapitel 3.2.) durchgeführt. Dieser konnte im WUFI direkt in den bauteilspezifischen Parameter eingetragen werden. Probleme ergaben sich dadurch, dass WUFI den eingetragenen Wert nicht in allen erstellten Profilen dauerhaft übernahm. Hier mussten manche Simulationsläufe gesondert gerechnet werden, um sicher zu gehen, dass der gebietsspezifische SRF tatsächlich berücksichtigt wurde.

Um den Einfluss von Schnee auf die Gesteinsfeuchte in den WUFI-Simulationen zu berücksichtigen, wurde die SV *Schnee* zusammengestellt. Da die Simulationssoftware keine Einstellungsmöglichkeiten bezüglich eines Schneevorkommens besitzt, mussten die eingehenden Klimadaten dementsprechend abgeändert werden. So konnte mit Hilfe einer um den Schneefaktor erweiterten Klimadatei das Fehlen dieser Einstellungsmöglichkeit umgangen werden. Hierzu diente die Schmelzrate, die aus der ESCIMO.spread gestützten Schneemodellierung hervorging (siehe Kapitel 3.4.), als zusätzlicher Klimaparameter. Der Schnee-Datensatz beinhaltete jene Menge an Schmelzwasser zu jeder Stunde, die aus der vor Ort anwesenden Schneedecke frei wurde. Die Auswirkungen dieser Wassermenge auf die Gesteinsfeuchte kann mit jener Menge aus dem Normalniederschlag abgeglichen werden, wodurch diese beiden Datensätze addiert wurden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die klimatischen Messungen bei Schneefall einen Normalniederschlag aufzeichnen. Addiert man das Schneewasseräquivalent der Schneedecke mit dem Datensatz des Normalniederschlags, wird die verfügbare Wassermenge des als Schnee fallenden Niederschlags verdoppelt. Grund dafür ist, dass der als fester Niederschlag fallende Normalniederschlag von der Klimastation aufgezeichnet wird. Aus diesem, bereits registrierten festen Niederschlag baut sich jene Schneedecke auf, die zum Niederschlag bezogen zeitlich verzögert für die Schmelzwasserproduktion verantwortlich ist. Um den Fehler der Doppelberücksichtigung des Schneeniederschlags zu vermeiden, wurde zu jedem Zeitpunkt, an dem ESCIMO.spread ein Schneedeckenwachstum berechnete, der Normalniederschlag gleich Null gesetzt. Ein weiteres Problem ergibt sich aufgrund systeminterner Berechnungsregeln von WUFI. Da WUFI Schnee in seinen Simulationen nicht berücksichtigt, werden all jene Niederschlagsmengen von der Simulation ausgeschlossen, die bei Temperaturen am oder unter dem Gefrierpunkt verzeichnet werden. Zu manchen Zeitschritten wurden Schmelzraten bei geringen Temperaturen im Minusbereich berechnet. Damit diese nicht systematisch ausgeschlossen werden, wurde die Temperatur zu diesen Zeitpunkten auf  $+0,01^{\circ}\text{C}$  gesetzt. Die so um den Schneeeinfluss erweiterte Klimadatei diente der SV *Schnee* als Eingangsdatensatz im WUFI.

Abschließend wurden die Gesteinsfeuchteberechnungen der *SV Schnee+SRF* durchgeführt, die eine Kombination aus den beiden ersten Varianten darstellen. Hier wurden sowohl der optimierte SRF, als auch die mit dem Schneeeinfluss erweiterte Klimadatei als Eingangsparemeter verwendet. Diese Variante stellte somit die abschließenden Simulationen, die eine naturnahe Gesteinsfeuchteberechnung am Felsen simulierte und so Aufschluss über die Optimierung von WUFI an das veränderte Anwendungsgebiet gab.

### **3.6. Kritische Betrachtung der Methoden**

In diesem Kapitel sollen die in dieser Arbeit verwendeten Methoden kritisch hinterfragt werden. Dies beruht im Folgenden auf den Erfahrungen verschiedener Experten aus dem jeweiligen Methodengebiet, als auch auf den eigenen durch diese Arbeit erhaltenen Erkenntnissen.

Der Einsatz des WXT520-Sensors zur Aufnahme der klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet ist, zumindest im Kontext der Messgenauigkeit in alpinen Regionen, zu hinterfragen. Vor den Untersuchungen im Gsenggraben wurde eine Validierung des WXT520-Sensors mit der TAWES Station der Universität Graz an der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) durchgeführt (Oberlechner, 2013). Die Ergebnisse dieses Vergleichs waren im großen und ganzen zufriedenstellend. Einzig die Niederschlagsmessung wies Abweichungen auf, die bei Einzelereignissen bis zu 28% von jenen der TAWES abwichen. Trotz dieses Ergebnisses wurde aufgrund fehlender Alternativen auf die Vaisala Klimastation mit dem WXT520 Sensor zurückgegriffen und diese im Untersuchungsgebiet installiert. Im Vergleich mit umliegenden Stationen (v.a. Station Weidendom) ergab die erste Analyse der Niederschlagsdaten ein ähnliches Bild. Die Abweichungen zur Vergleichsstation waren teilweise zu hoch um diese mit lokal unterschiedlichen Wetterverhältnissen zu erklären, indes unter anderem die Station Weidendom nur ca. 1,5 km vom Standort des WXT520-Sensors entfernt lag. Weiters traten auch im Herbst und vor allem im Frühjahr große Abweichungen auf. Die Messungenauigkeiten beliefen sich dabei nicht nur auf die Folge von Schneefallereignissen, weshalb sie nicht ausschließlich als Grund angeführt werden können. Schwierigkeiten bereitete dabei vor allem, dass keine allgemeine Fehlertendenz eruiert werden konnte. Über- und Unterschätzen der Niederschlagsmenge trat nahezu gleichermaßen auf. Problematisch war dies vor allem aufgrund dessen, da für die Berechnung des SRF (siehe Kapitel 3.2.) jeder einzelne Zeitschritt der gespeicherten Daten benötigt wurde. Somit konnten keine großzeitlichen Mittelwerte gebildet werden, die ein solches Fehlerschwanken glätten

könnten. Die Folge war, dass eine Korrektur der Niederschlagswerte des WXT520 mit Hilfe eines Korrekturgradienten nur eine geringfügige Verbesserung einbrachte. Schlussendlich wurde der Niederschlagsdatensatz aus dem Untersuchungsgebiet mit Hilfe des Validierungsdatensatzes der Station Weidendom so korrigiert, dass bei Abweichungen der Stundensummen über 28% die Niederschlagswerte der Validierungsstation übernommen wurden. Die 28% resultierten aus den oben bereits erwähnten Validierungsabweichungen des WXT520 (siehe Oberlechner, 2013).

Kritisch zu betrachten ist auch die Verwendung der Nexus Funkwetterstationen. Die Genauigkeit der Sensoren sowie der Einsatz im Gebirge barg bei der Anschaffung eine gewisse Unsicherheit in sich. Große Probleme ergaben sich aus dem Umstand heraus, dass mehrere der Nexus-Stationen auf engem Raum gleichzeitig betrieben wurden, jedoch die Funkverbindung zwischen der Basisstation und den dazugehörigen einzelnen Sensoren nicht codiert ist. Somit konnte Station A nicht automatisch zwischen den eigenen Sensoren A und den Sensoren B der in der Nähe liegenden Station B unterscheiden. Entsprechend größer wurde das Problem im Frühjahr, als alle vier Nexus-Stationen in unmittelbarer Nähe betrieben wurden. Über das „try and error“ - Prinzip konnte schlussendlich bei Betriebsstart die richtige Zuordnung der Sensoren zur jeweiligen Basisstation bewerkstelligt werden. Nach längerem Messverlauf und spätestens nach der Auswertung der über die Nexus erhobenen Daten kann jedoch ein überaus positives Resümee gezogen werden. Hervorzuheben ist der sehr stabil gelaufene Messprozess, der, abgesehen von einem kurzen, noch ungeklärten Ausfall einer Basisstation, ohne Probleme verlaufen ist. Die Messgenauigkeit der Nexus-Sensoren kann nach dem Vergleich mit der Station Weidendom als zufriedenstellend beurteilt werden. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass die Genauigkeit der Normalniederschlagserhebung jene der Vaisala Klimastation übertraf.

Bei den Erhebungen zur Berechnung des gebietsspezifischen SRF wurde auf eine zeitlich möglichst hochauflösende Datengrundlage geachtet. Künzel (1994b) spricht in seinen Erhebungen darüber, dass Stundenwerte den Tagesmittelwerten in jedem Fall vorzuziehen sind. Überdies reicht eine kurzzeitige Schlagregennmessung für die Ermittlung des SRF bereits aus (Künzel, 1994a). Diesen Umständen konnte mit einem zehnmütigen Messintervall der Klimaaufzeichnungen sowie mit einer Auslese der Schlagregenfänger nach jedem bedeutenden Regenereignis über einen Zeitraum von ca. 4 Monaten mehr als Rechnung getragen werden.

Der Einfluss von Schnee auf die Gesteinsfeuchte wurde in den WUFI-Simulationen durch die Implementierung der Schneemodellierungsergebnisse berücksichtigt. Die Validierungen des Modells wurde von Strasser und Marke (2010) in den Bayrischen Alpen durchgeführt. Die

Ähnlichkeit der Untersuchungsgebiete rechtfertigt den Einsatz dieses Programms für die in dieser Arbeit unternommenen Untersuchungen im alpinen Raum. Zusätzlich spricht in den hier vorgenommenen Erhebungen für ESCIMO.spread, dass in dessen Berechnungen der Windeinfluss mit berücksichtigt wird. Entsprechend Michlmayr (2007) besitzen Faktoren wie die Schneeverfrachtung durch Wind einen entscheidenden Einfluss auf die Schneemodellierung. Besonders betroffen sind davon windexponierte sowie steile Hänge, wodurch dieser Faktor in den hier aufgegriffenen Fragestellungen eine große Rolle spielen dürfte. So kommt ESCIMO.spread den Anforderungen des in dieser Arbeit definierten alpinen Untersuchungsgebiets mit starker Reliefenergie nach.

Abschließend soll an dieser Stelle die Einsatz- und Funktionsfähigkeit von WUFI für Untersuchungen an natürlichen Felswänden diskutiert werden. Wie bereits in Kapitel 3.5. erwähnt, wurde WUFI für hygrothermische Berechnungen an Gebäudewänden entwickelt. Daraus ergibt sich, dass damit auch jegliche Validierungen sowie Zertifizierungen im Anwendungsgebiet der Bauphysik vorgenommen wurden. Die dabei erzielten Ergebnisse waren nach Holm (2001) und dem erfüllten Benchmarktest nach DIN EN 15026 mehr als zufriedenstellend. So beschreibt Holm (2001) in seinen Ausführungen, dass die geringen, aber doch vorhandenen Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Daten nicht rein programmspezifisch, sondern auch systemspezifischer Natur waren. Schuld sei die in einem Modell notwendige Generalisierung der hochkomplexen physikalischen Prozesse, wodurch einzelne hygrothermische Abläufe nicht korrekt bzw. zum Teil gar nicht abgebildet werden können. Als Beispiel dafür nennt Sass (2005) den Versuch, über die im Labor erhobenen Stoffkennwerte an einer aufbereiteten Gesteinsprobe über vereinfachte Berechnungswege auf die physikalischen Prozesse in der unter anderem inhomogenen, zerklüfteten und zum Teil bewachsenen Felswand zu schließen. Im gleichen Kontext können auch die klimatischen Einflussgrößen und ihre Aufzeichnungen aufgelistet werden. Hier wird mittels Aufzeichnungen ausgewählter Klimaparameter versucht, die zumindest einen Mittelwert über eine Dauer von zehn Minuten widerspiegeln, hochkomplexe und äußerst variable Prozesse der Atmosphäre zu beschreiben. Holm (2001) spricht auch von dem über die Zeit dynamischen Verhalten der untersuchten Baustoffe, dass von WUFI nur zum Teil berücksichtigt wird. So bewirken unter anderem verändernde Porenräume unterschiedliche Voraussetzungen für die hygrothermischen Berechnungen und folglich von der Realität abweichende Ergebnisse.

Programmintern birgt die Implementierung des Schneeeinflusses erhöhtes Fehlerpotential. Grund dafür ist die bei der Schneeschmelze auftretende Umkehrdiffusion, die vergleichbar mit

der sommerlichen Taubildung (siehe Holm, 2001) für Diskrepanzen innerhalb eines Rechenschrittes sorgt. Probleme bereitet dabei der Umstand, dass in einem Rechenschritt bei hoher Einstrahlung sowohl Austrocknung durch die Strahlung, als auch Feuchteinput aufgrund der dadurch einsetzenden Schneeschmelze stattfindet. Vorbeugend sollten als Klimaeingangsdaten Stundenwerte verwendet werden, da die Umkehrdiffusion einen nichtlinearen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten des untersuchten Objekts besitzt, der nicht gemittelt werden sollte (Holm, 2001).

Um die Potenziale von WUFI aufzugreifen, sollen die Ausführungen von Künzel (1994c) erwähnt sein, der von einem großen Vorteil durch die Verwendung von üblichen klimatischen Einflussgrößen sowie Standardstoffkennwerten schreibt. Temperatur und Luftfeuchte als Potenziale für den Dampf- und Flüssigtransport sowie Niederschlag, Sonnenstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Berechnung des Witterungseinflusses sind Klimaparameter, deren Aufzeichnungen nahezu zum Standardrepertoire von Klimastationen gehören. Die Ausnahme dabei bildet die Erhebung der Strahlung. Nach positiver Validierung der Simulationsergebnisse ermöglicht WUFI zudem die Berechnung langzeitlicher hygrothermischer Trends, wodurch die Abschätzung zukünftiger Beschaffenheiten erleichtert wird (Künzel, 1994c). Sass (2005), der in einem geomorphologischen Methodenvergleich auch WUFI in Bezug setzte, erkannte unter anderem dessen Vorteil in der Ergänzung des üblichen Untersuchungsumfangs. Vor allem Einschränkungen hinsichtlich einer messtechnischen Realisierbarkeit, wie zum Beispiel begrenzte Messtiefen, können mit WUFI kompensiert werden. In Summe ist eine variable und kostenarme Simulation der hygrothermischen Gesteinszustände möglich, deren Einsatz in der Geomorphologie großes Potential besitzt. Voraussetzung ist die fortwährende Annäherung der Simulationsbedingungen an die natürlichen Verhältnisse der vom Geomorphologen untersuchten Formationen.

## **4. Ergebnisse**

Im Folgenden werden die in den durchgeführten Untersuchungen erarbeiteten Ergebnisse präsentiert. Die Auswertung der erhobenen Daten wurde wenn möglich, stets in Bezug auf die von Schnepfleitner (2012) erworbenen Kenntnisse vollzogen. Damit soll ein direkter Vergleich möglich sein, der eine weitere Annäherung der Gesteinsfeuchtesimulation an natürliche Bedingungen erkennen lässt. Generell ist anzumerken, dass im Weiteren auf die Auflistung jener Analysen, die keinen besonderen Mehrwert erbrachten, verzichtet wurde.

### **4.1. Ermittlung des Schlagregenfaktors**

Wie in Kapitel 3.2. ausgeführt, wurden die zur Berechnung des SRF notwendigen Daten mit Hilfe von 24 Schlagregenfängern, 4 Funkwetterstationen sowie einer Klimastation erhoben. So konnte sowohl zeitlich als auch räumlich auf hoch aufgelöste Datensätze zurückgegriffen werden. Um den Schlagregen und seine Ausprägung berechnen und verstehen zu können, wurden die klimatischen Bedingungen des Grabens sowie die speziellen klimatischen Bedingungen an den Felsformationen vorgereicht analysiert. Die nachfolgende Schlagregenermittlung sowie die abschließende Diskussion stehen mit diesen Ergebnissen in direkter Verbindung.

#### **4.1.1. Klimatische Bedingungen im Gsenggraben**

Die im meteorologischen Kontext außergewöhnliche Positionierung der Nexus Funkwetterstationen direkt an der Felswand gewährte mittels allgemeiner klimatischer Analysen Einblicke in die Gegebenheiten der direkt am Gestein angrenzenden Atmosphärenschicht. Damit wird ein Einblick in die klimatischen Verhältnisse im Umfeld der Felsformationen gewährt, der die Analyse sowie die anschließende Diskussion über die Gesteinsbedingungen unterstützt bzw. erweitert. Zudem können diese speziellen Erkenntnisse mit den ebenfalls erhobenen und analysierten Daten zum allgemeinen Grabenklima in Verhältnis gesetzt werden. Es werden folgend die für den Schlagregen sowie die Gesteinsfeuchte entscheidenden Parameter Wind und Niederschlag besprochen. Zudem wurden auch die Datensätze der Temperatur genauer untersucht, deren Ausprägungen, vor allem im Gesteinsumfeld, einen Einfluss auf die Feuchte im Gestein besitzen.

- Windverhältnisse

Die Verteilung der Windrichtung im Gsenggraben (in Abbildung 18 und Tabelle 5 ersichtlich)

ist dem Grabenverlauf entsprechend. Die Hauptströmungsrichtung ist generell Ost-West gerichtet. Davon etwas abweichend wurden am Fels, mit Ausnahme der Südexposition, Süd-Abweichungen verzeichnet. Die in der Grabenmitte positionierte freistehende Vaisala-Klimastation, die durch ihre Position das Grabenklima widerspiegelt, registrierte einen Windanteil aus Osten von 44,83%, der häufig in den Nachtstunden auftritt.

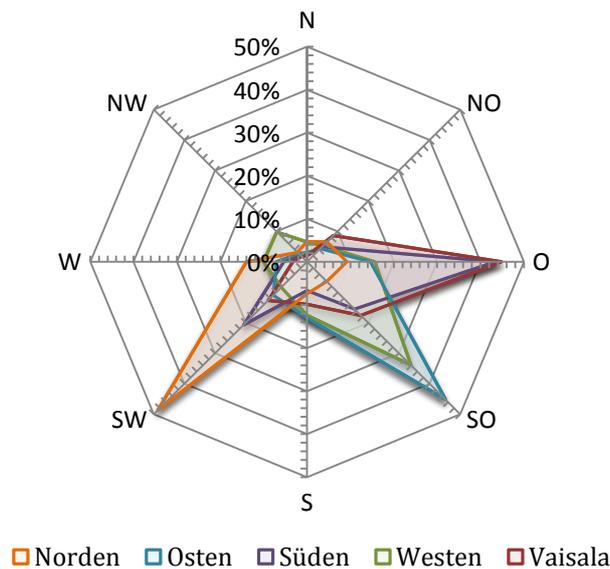


Abbildung 19: Windrichtungsverteilung im Gsenggraben – Werte sind Prozentanteile der Windrichtung am jeweiligen Gesamtdatensatz. Quelle: Eigene Erhebungen

Die Richtung sowie die tageszeitliche Verteilung der Strömung sprechen für ein stabiles graben-auswärts-gerichtetes Windsystem im Untersuchungsgebiet. Nachfolgend rangiert mit nur mehr 17,54% der registrierten Windrichtungen die Anströmungsrichtung aus SO, was wiederum die Dominanz der Hauptwindrichtung im Gsenggraben unterstreicht. Etwas anders stellt sich die Situation in der vom Fels beeinflussten Atmosphäre dar. Das Maximum der Windrichtungen liegt an den W- bzw. O-exponierten Positionen bei einem Anteil von 33,85% (W) bzw. 45,10% (O) aus südöstlicher Richtung. Die Messungen der nach Norden orientierten Funkwetterstation verzeichnen hauptsächlich aus SW auftretende Winde.

Tabelle 5: Anteile der Windrichtungen der Messtationen im Gsenggraben – Werte in der Datentabelle sind Prozentanteile der jeweiligen Windrichtung am Gesamtdatensatz. Quelle: Eigene Erhebungen

Exposition (Position)	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW
Norden (Nexus 4)	4,68	6,52	9,19	6,43	7,39	48,66	13,99	3,14
Osten (Nexus 3)	2,18	4,37	14,59	45,10	12,99	10,94	7,05	2,77
Süden (Nexus 2)	1,41	4,98	43,38	15,50	6,62	20,61	5,34	2,15
Westen (Nexus 1)	4,62	5,20	15,65	33,85	12,36	8,40	10,07	9,85
Grabenklima (Vaisala)	1,45	8,64	44,83	17,54	9,84	12,64	3,25	1,81

Für den Schlagregen ist neben der Windrichtung auch dessen Geschwindigkeit entscheidend (folgende Angaben zur Geschwindigkeit sind stets Mittelwerte der Windgeschwindigkeit nach Windrichtung). Die Analyse der Windgeschwindigkeiten zeigt bei einem Vergleich der Messstationen einen starken Unterschied zwischen dem allgemeinen Grabenklima (Vaisala-Klimastation) und den direkt am Fels aufgenommenen Bedingungen (vier Nexus Funkwetterstationen).

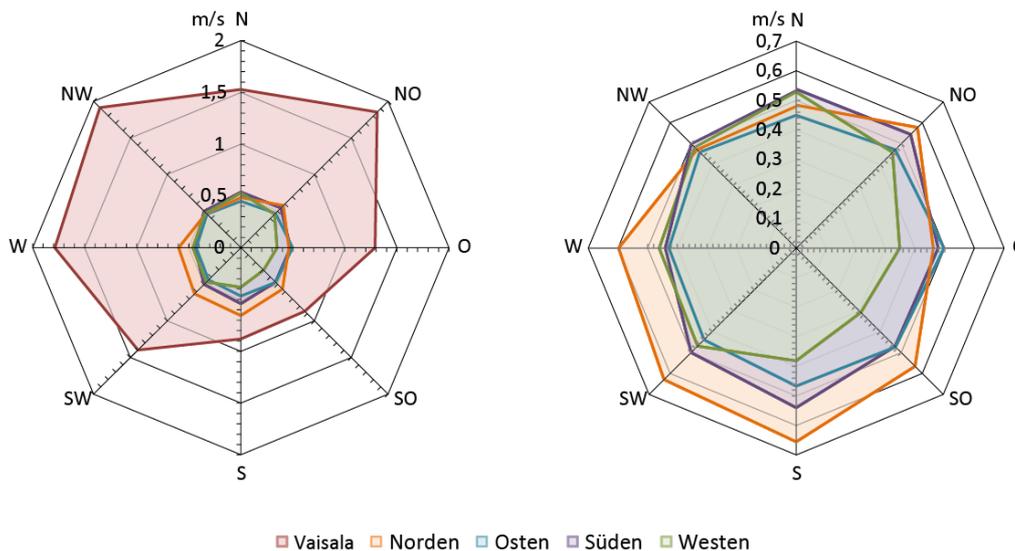


Abbildung 20: Verteilung der Windgeschwindigkeit nach Windrichtung im Gsenggraben – li: Vergleich der Vaisala- mit den Nexusstationen; re: Windgeschwindigkeitsverteilung der Nexus Funkwetterstationen. Werte sind die mittleren Windgeschwindigkeiten in [m/s] aus den jeweiligen Anströmungssektoren. Quelle: Eigene Erhebungen

Befindet sich im Mittel über alle Richtungen die durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Felsen bei 0,49 m/s, so verzeichnete die Vaisala-Station im Zentrum des Untersuchungsgebiets im Mittel 1,44 m/s. Die Maxima verdeutlichen diesen Unterschied noch. So steht ein Geschwindigkeitsmaximum des allgemeinen Grabenklimas von 1,91 m/s (NW) einem Maximum im Felsbereich von 0,66 m/s (S) der nordexponierten Nexus Station gegenüber. Im linken Diagramm in Abbildung 19 wurde dieser Unterschied visualisiert. Darin zeigt die Vaisala-Station nicht mehr die ausgeprägte O-W ausgerichtete Hauptströmungsrichtung im Graben. Wenn auch diese nicht mehr so klar definiert ist wie in Abbildung 18, so wurden im Mittel die höchsten Geschwindigkeiten aus den Sektoren NW mit 1,91 m/s, NO mit 1,85 m/s sowie W mit 1,79 m/s gemessen. Dem gegenüber stehen etwas schwächere Winde aus S bzw. SO, die in etwa dieselbe Geschwindigkeit von 0,88 m/s erreichen. Klammert man die Daten der Vaisala-Station aus und vergleicht die Bedingungen des Felsbereichs, so ergibt sich eine relativ gleichmäßige Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 20 , rechtes

Diagramm). Die Schwankungsbreite zwischen Minima und Maxima liegt dabei je nach Station nur zwischen 0,07 bis 0,16 m/s, wodurch eine explizite Aussage über die speziell auftretenden Winde je nach Station obsolet wird.

Tabelle 6: Windgeschwindigkeit nach Windrichtung im Gsenggraben – Werte in der Datentabelle sind die mittleren Windgeschwindigkeiten in [m/s] aus den jeweiligen Anströmungssektoren. Quelle: Eigene Erhebungen

Exposition (Position)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Norden (Nexus 4)	0,48	0,58	0,46	0,57	0,66	0,63	0,60	0,47
Osten (Nexus 3)	0,45	0,47	0,50	0,47	0,47	0,44	0,43	0,46
Süden (Nexus 2)	0,54	0,54	0,48	0,47	0,54	0,50	0,44	0,50
Westen (Nexus 1)	0,53	0,46	0,35	0,31	0,38	0,47	0,46	0,48
Grabenklima (Vaisala)	1,53	1,85	1,29	0,87	0,88	1,40	1,79	1,91

#### - Niederschlagsbedingungen

Die weiterführende Datenanalyse des Niederschlags zeigte, dass die verschiedenen Niederschlagsmessungen Großteils sehr unterschiedlich ausfielen. So verzeichnete die Vaisala im Stundenmittel im Gesamtschnitt um 0,76 mm mehr Niederschlag als die Nexus Funkwetterstationen am Fels. So wird durchschnittlich im Graben 56% mehr Niederschlag registriert. Diese Differenzen zeigen sich weiterfolgend in den in Abbildung 20 ersichtlichen Monatssummen, die in den Vergleichsmonaten November, März sowie April an der Station Vaisala stets die Summen der Funkwetterstationen übertreffen. Bei Begutachtung der monatlichen Niederschlagssummen der Station Vaisala ist (aufgrund des längeren und durchgehenden Messzeitraumes) ein einheitlicher Verlauf mit hohen Herbst- und Frühjahrsummen sowie geringeren winterlichen Niederschlägen ersichtlich. Diesen Verlauf bestätigen die Aufzeichnungen der Nexus Funkwetterstationen in den eingesetzten Monaten November sowie März bis Mai.

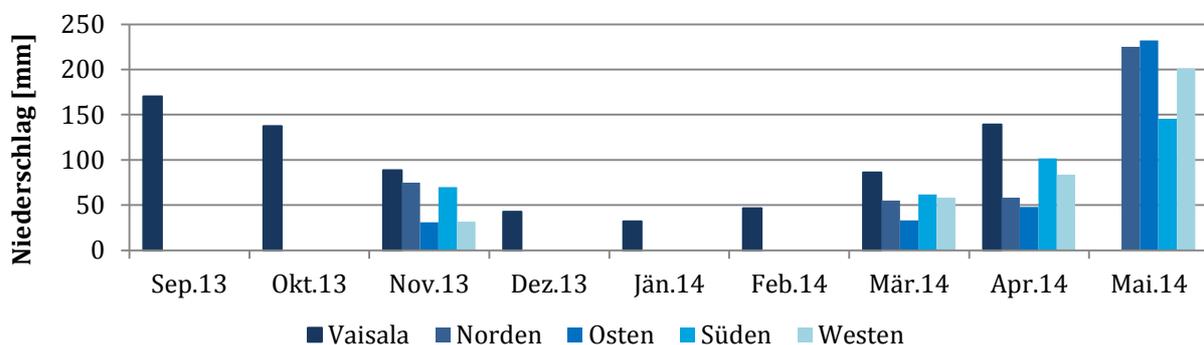


Abbildung 21: Monatliche Niederschlagssummen der einzelnen Messstationen im Gsenggraben. Quelle: Eigene Erhebungen

Im Vergleich der niederschlagreicheren Jahreszeiten Herbst und Frühling (siehe Abbildung 21)

ist zu erkennen, dass die Menge des gefallenen Niederschlags pro Niederschlagsereignis in den beiden Jahreszeiten ähnliche Magnituden aufweisen.

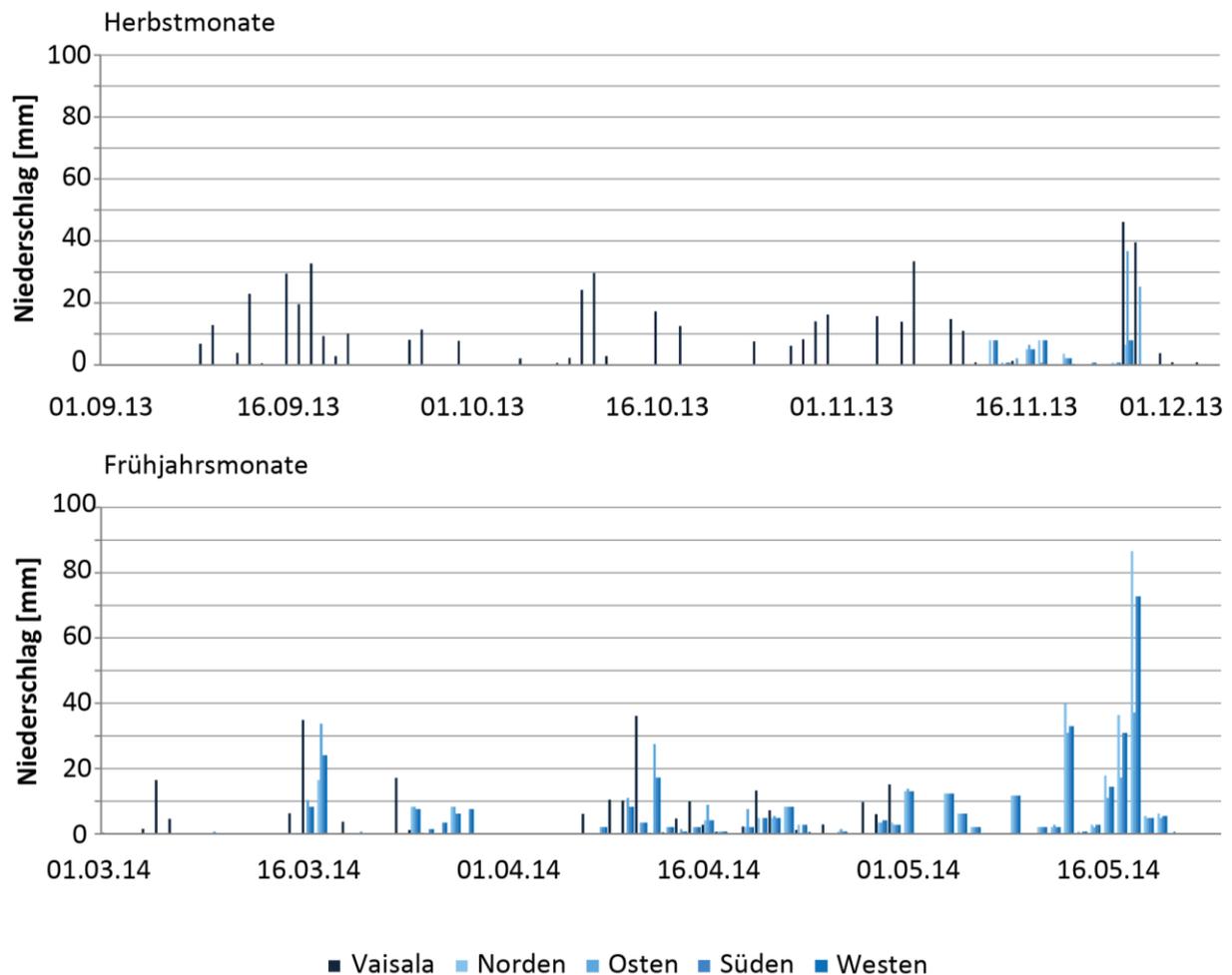


Abbildung 22: Niederschlagsereignisse im Gsengraben - Gegenüberstellung der Tagessummen der Herbst- und Frühjahrsperiode. Quelle: Eigene Erhebungen

Ausnahme bildet hier der Monat Mai, in dem sehr hohe Niederschlagsmengen gemessen wurden, die durch langanhaltende Regenschauer mit zum Teil sehr hohen Magnituden zustande kamen. Die höchsten Tagessummen der einzelnen Funkwetterstationen von bis zu 86,5 mm an der Südexposition wurden am 17.05.2014 registriert. Die Vaisala-Station, die im Mai nicht mehr im Untersuchungsgebiet installiert war, nahm ihr Maximum der Tagessummen von 44 mm am 23.11.2013 auf. Wie bereits schon zuvor kristallisiert sich auch in dieser Analyse heraus, dass die gemessenen Niederschlagswerte der Vaisala-Station in jenem Zeitraum, in dem alle Stationen in Betrieb waren, Großteils über den Werten der am Fels installierten Funkwetterstationen lag. Zudem registrierte die Klimastation in diesem Vergleichszeitraum mit 223 Niederschlagswerten die meisten Niederschläge. Dem gegenüber stehen 173 (S), 167 (W),

158 (N) sowie 106 (O) Niederschlagsdaten der Funkwetterstationen.

Einen weiteren Einblick in die Niederschlagsverteilung bringt dessen Frequenz-Magnituden-Beziehung (MF-Beziehung). Zur Berechnung wurden hier die Stundenmittelwerte des Niederschlags im Vergleichszeitraum (November, März, April) herangezogen. Die MF-Beziehung des Niederschlags im Gsenggraben zeigt in Abbildung 22 den erwarteten exponentiellen Verlauf. Je höher die Niederschlagsmenge (Magnitude) eines Niederschlagsereignisses ist, umso seltener tritt es auf (Frequenz). An dieser Stelle wurde ein Ereignis mit einer Dauer von 1h fixiert. So wurden im Schnitt über alle Messstationen 95 Ereignisse mit einer Magnitude von 1 mm oder weniger registriert, jedoch nur mehr 38,6 Ereignisse in der nächst höheren Magnitudenkategorie von 1,1 bis 2 mm. Diese Entwicklung setzt sich fort, bis bei den höchsten Magnituden von 6 bis 7 mm pro Niederschlag nur noch ein einziges Ereignis registriert wurde. Zu erkennen ist eine MF-Beziehung der Vaisala-Station, die stets über denen der am Fels erhobenen Niederschläge liegt. So liegt die Frequenz der Vaisala pro Magnitude ca. um den Faktor 2,5 höher als im Mittel der restlichen Stationen. Dieser Faktor beruht vor allem auf der hohen Frequenz der Vaisala Station im mittleren Magnitudenbereich. Die niedrigsten Frequenzen über alle Magnituden wurden an der Ostexposition verzeichnet. Die höchste Magnitude pro Stunde von 6,2 mm ist an der südexponierten Felsformation gemessen worden.

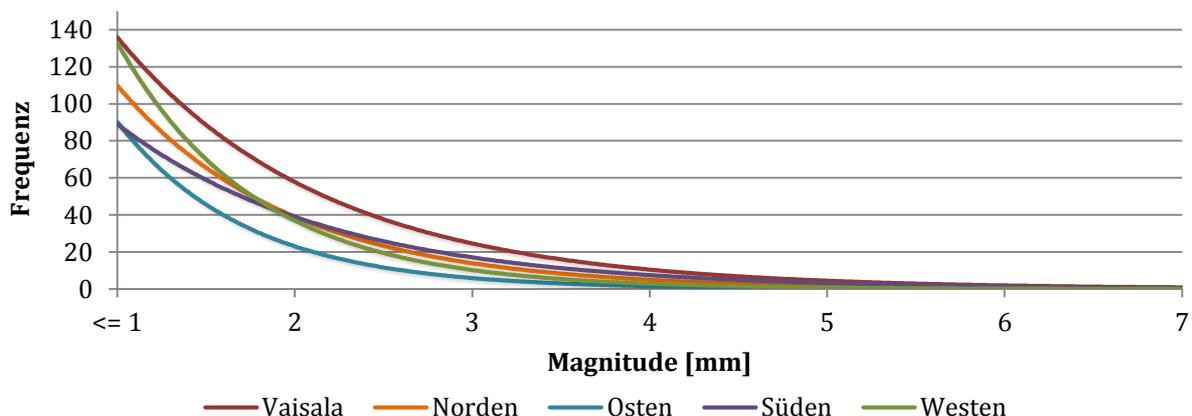


Abbildung 23: Die Beziehung zwischen Frequenz und Magnitude der Stundenmittelwerte des Niederschlags im Vergleichszeitraum November, März und April im Gsenggraben. Quelle: Eigene Erhebungen

#### - Temperaturbedingungen

Die Temperaturwerte aller Stationen fielen über den gesamten Messzeitraum deutlich einheitlicher aus als bei den zuvor besprochenen Klimaparameter Wind und Niederschlag. Wie bereits zuvor, beläuft sich auch an dieser Stelle der Zeitraum für einen Vergleich zwischen den

in der Mitte des Grabens und im Umfeld des Felsens gemessenen Temperaturen auf die Monate November, März und April. Auf Temperaturwerte im November an den Expositionen S sowie N muss aufgrund eines Ausfalls beider Sensoren verzichtet werden. Der in Abbildung 23 dargestellte Vergleich der Verläufe der Tagesmitteltemperaturen aller Stationen in den Herbst- sowie Frühjahrsmonaten zeigt ein homogenes Bild, bei dem die Vaisala-Station im Mittel über den Vergleichszeitraum  $0,84^{\circ}\text{C}$  über den Temperaturen am Fels liegt. Nahezu ident sind die Temperaturverläufe der Funkwetterstationen. Im herbstlichen Vergleich liegt die Mitteltemperatur bei  $5,38^{\circ}\text{C}$ , jene im Frühjahr bei  $7,63^{\circ}\text{C}$  und im gesamten Untersuchungszeitraum (einschließlich den in Abbildung 23 nicht dargestellten, von der Klimastation erhobenen Temperaturen in den Wintermonaten) bei  $5,42^{\circ}\text{C}$ . Die Maxima der Temperatur lagen zum einen am 07.09.2013 um 15 Uhr bei  $26,7^{\circ}\text{C}$ , zum anderen am 28.11.2013 um 08 Uhr bei  $-10,5^{\circ}\text{C}$ . Beide Extremwerte registrierte die Vaisala-Station.

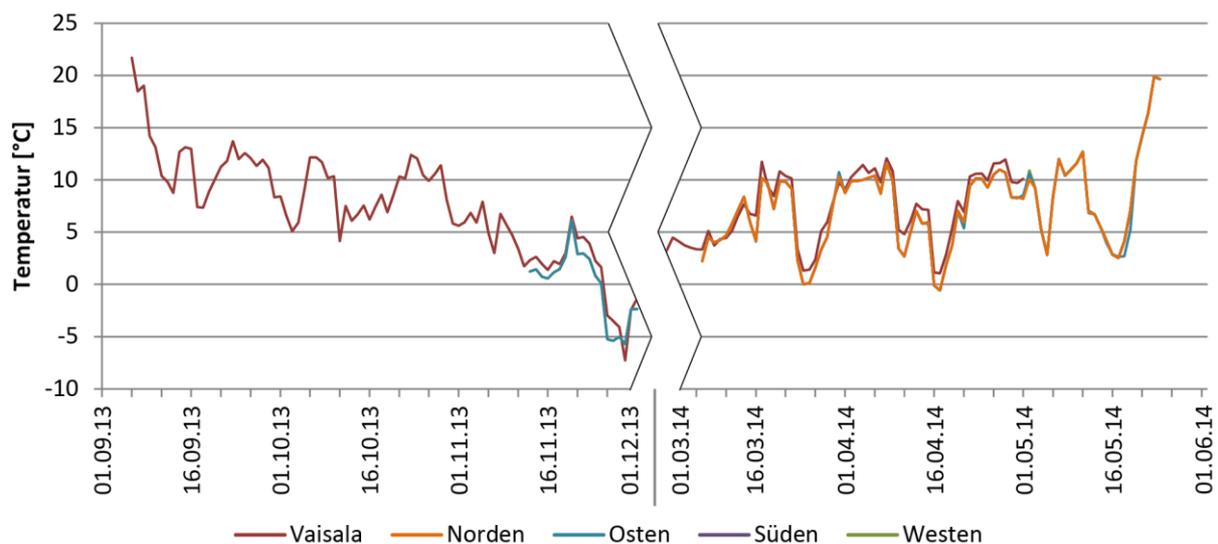


Abbildung 24: Vergleich des Temperaturverlaufs der Tagesmitteltemperaturen aller im Gsenggraben installierten Messstationen im Zeitraum Herbst und Frühjahr. Quelle: Eigene Erhebungen

Konnte im Jahresgang nur geringe Unterschiede zwischen dem Grabenklima und den Bedingungen am Fels ausgemacht werden, so zeigen die Tagesgänge der Temperatur (siehe Abbildung 24) deutliche Abweichungen. So liegt im Herbst der Tagesgang des Grabenklimas  $2,52^{\circ}\text{C}$  über jenen der west- und ostexponierten Felsformationen. Das Tagesmaximum in der Herbstperiode wird bei allen Stationen um 14 Uhr erreicht, das Tagesminimum im Graben, welches um 6h eintritt, eilt jenen am Fels jedoch um eine Stunde voraus. Generell ist in der Herbstperiode ein über beide Expositionen einheitlicher und ausgeglichener Tagesgang der

Temperatur am Felsen auszumachen. Die Tagesschwankung im Felsbereich beträgt lediglich 2,22°C, jene in der Grabenmitte 3,08°C. Etwas anders stellt sich die Situation im Frühjahr dar. Die Abweichung des Tagesgangs im Graben weicht zwar im Tagesmittel nur um -0,01°C vom mittleren Tagesgang im Felsbereich ab, jedoch beruht dieser Umstand auf den weniger einheitlichen Tagesgängen im Bereich der verschiedenen exponierten Felsformationen. Hier nimmt die Ostexposition eine Sonderstellung ein. Zum einen liegen die Temperaturen der Ostexposition durchwegs über den ansonsten ähnlichen Temperaturverläufen am Fels. Zum anderen ist die nächtliche Auskühlung bei weitem nicht so stark. Zwar erreichten alle Stationen ihr Tagesminimum um 6 Uhr (Herbst: 6 bis 7 Uhr), jedoch fiel dieses in der östlichen Exposition mit 6,29°C im Mittel um 3,1°C höher aus als an den anderen Positionen. Im Laufe des Vormittags nähern sich die anderen Tagesgänge jedoch an die Temperaturen der ostexponierte Station an, bis die Temperaturen über den Felsen zum Tagesmaximum um 15 Uhr nur noch einen Unterschied von 0,8°C aufweisen. Die höchste Temperatur von 13,71°C konnte allerdings weiter die Ostexposition aufweisen.

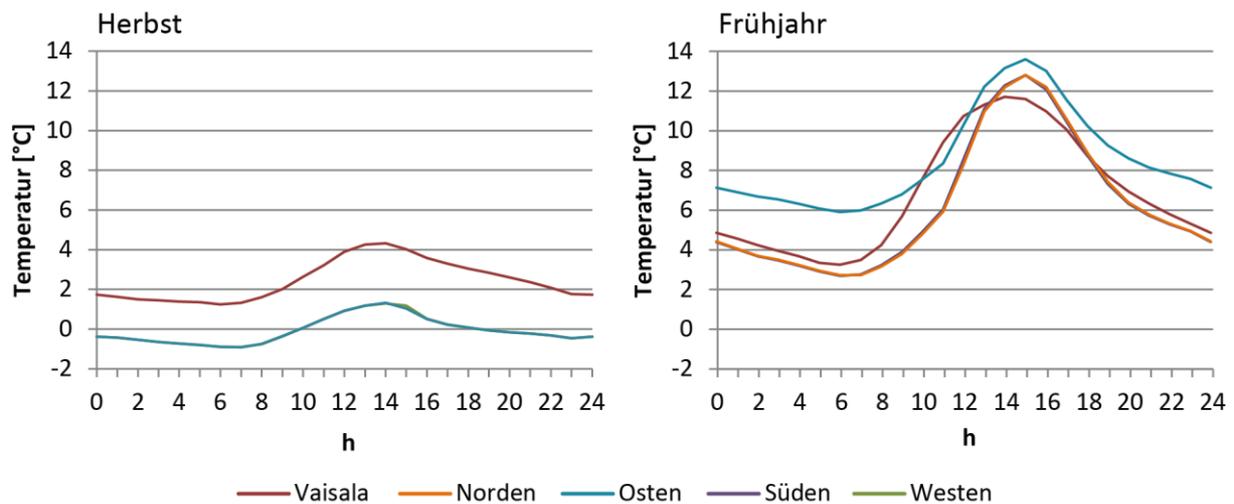


Abbildung 25: Vergleich der Tagesgänge der Temperatur im Gsengraben – Gegenüberstellung der Perioden Herbst und Frühjahr. Quelle: Eigene Erhebungen

Aufgrund des größten Temperaturgradienten in den Vormittagsstunden verzeichnet die Vaisala-Station in der Grabenmitte im Mittel die wärmsten Temperaturen von 10 -12 Uhr. Dieser Trend schwächt jedoch in den Mittagsstunden stark ab, wodurch an dieser Position im Frühjahr das kleinste Tagesmaximum von 11,89°C bereits eine Stunde vor den restlichen Tagesgängen erreicht wird. Danach kommt es zur bereits sehr flach verlaufenden Abkühlung an der Ostexposition, die vor allem in den Nachtstunden die Differenz zu den restlichen

Tagesgängen erhöht. Die restlichen Stationen weisen eine ähnliche Abkühlungsphase auf. Im Vergleich zum Herbst weisen die Tagesgänge im Frühjahr eine weitaus höhere Temperaturamplitude auf, die im Graben 8,17°C erreicht. Etwas darüber liegt die Tagesschwankung am Fels in N, S und W Exposition mit etwas über 9,7°C. Den geringsten Unterschied zwischen den Maxima verzeichnet die an der ostexponierten Felswand positionierte Funkwetterstation. Hier liegt die Tagesschwankung bei 7,4°C.

#### **4.1.2. Schlagregenfaktor im Gsenggraben**

In dieser Arbeit wurde der SRF für eine Geländeneigung von 60°, 75° sowie 90° in den vier Expositionen N, O, S und W berechnet. Dazu konnte auf Wind- sowie Niederschlagsdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten zurückgegriffen werden. Die Berechnung wurde für jede Exposition und Neigung sowohl mit den an der entsprechenden Position gemessenen 10 Minuten Werten, als auch deren Stundenmittelwerten durchgeführt. Dazu wurde zunächst der Datensatz nach den Parametern Niederschlag, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung gefiltert. Von Bedeutung waren nur jene Zeitschritte, in denen der Niederschlag und die Windgeschwindigkeit größer als Null sowie die Windrichtung dem Öffnungsbereich des jeweiligen Schlagregenfängers entsprach. Dieser Öffnungsbereich wurde auf 178° festgelegt, wonach zum Beispiel zur Berechnung der Ostexposition Windrichtungen von größer 1° bis kleiner 179° berücksichtigt wurden. Mit diesen, den Schlagregen steuernden Daten wurde zu jedem Zeitschritt über die in Kapitel 3.2. beschriebenen Formel ein Schlagregenwert berechnet, wobei an dieser Stelle der zu ermittelnde gebietsspezifische Proportionalitätsfaktor oder auch Schlagregenfaktor auf 1 gesetzt wurde. Das Mittel über alle Zeitschritte lieferte entsprechend den verschieden positionierten Stationen expositions- sowie höhen spezifische Schlagregenfaktoren für eine Geländeneigung von 90°. Um auch die Neigungsunterschiede zu eruieren, musste darauf geachtet werden, dass bei abnehmender Neigung ein zunehmender Anteil des Normalniederschlags berücksichtigt werden muss. Zu berechnen ist dieser Anteil über den Cosinus der Neigung, womit bei 75° 25,88% und bei 60° bereits 50% des Normalniederschlags mit einbezogen werden müssen. Über die Beziehung des berechneten zu dem im Untersuchungsgebiet tatsächlich gemessenen Schlagregen, konnten so expositions-, neigungs- sowie höhenabhängige Schlagregenfaktoren für den Gsenggraben ermittelt werden. In Abbildung 25 (links) ist die Beziehung zwischen dem SRF und der Geländeneigung dargestellt. Wie in der Literatur beschrieben nimmt auch der SRF des Gsenggrabens mit zunehmender Neigung des Geländes ab. Beträgt der Faktor bei 60° noch 0,56, so sinkt dieser bei einer Neigung von 75° auf 0,47 ab. Bei 90° nimmt der SRF schließlich sein Minimum von

0,26 ein. Im Vergleich des Proportionalitätsfaktors zwischen den beiden Höhengniveaus in 800 m sowie 1100 m zeigt sich eine gewisse Höhenabhängigkeit des SRF im Untersuchungsgebiet. So ist dieser bei 60° Neigung auf 1100 m Höhe um 0,1 größer als auf 800 m. Bis zu einer Neigung von 75° steigt die Differenz der Faktoren auf 0,18 an. Anschließend nähern sich die SRF der beiden Höhengniveaus wieder an, bis sie bei 90° den geringsten Unterschied von 0,04 erreichen (siehe Abbildung 25, rechtes Diagramm).

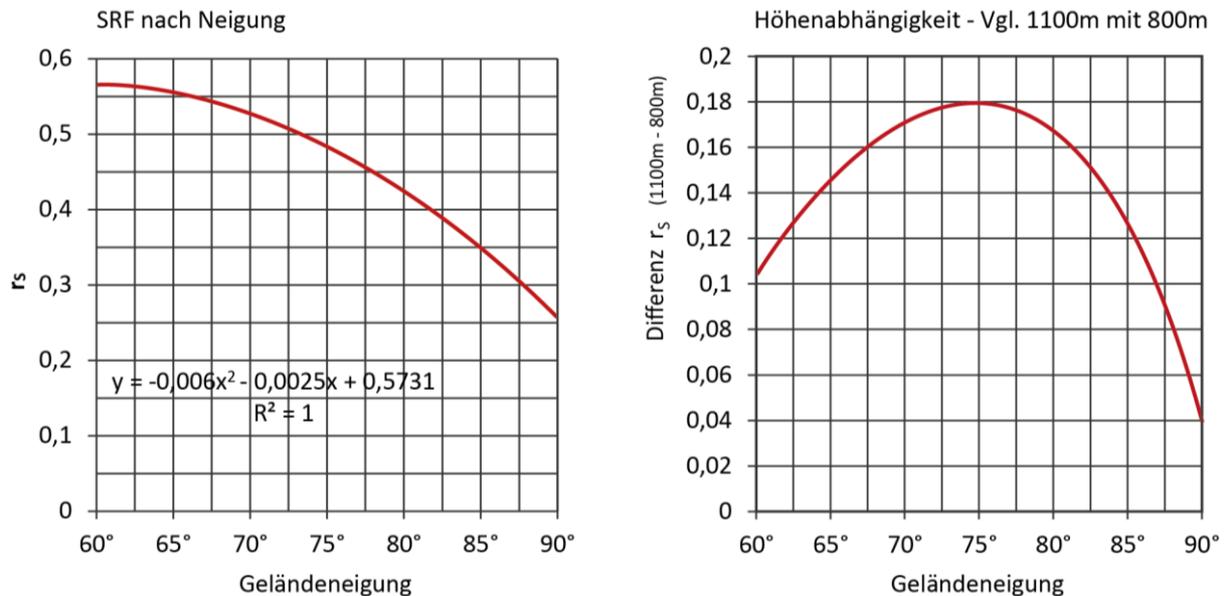


Abbildung 26: Der Schlagregenfaktor im Gsenggraben. Li: SRF-Verlauf in Abhängigkeit der Geländeneigung; Re: Höhenabhängigkeit des SRF entsprechend der Geländeneigung (entspricht der Differenz des auf 800 m sowie 1100 m erhobenen SRF). Quelle: Eigene Erhebungen

Neben der Abhängigkeit des SRF von der Geländeneigung sowie der Seehöhe wurde auch die Abhängigkeit von der Exposition untersucht. Die Erhebungen dazu, die in Abbildung 26 dargestellt sind, zeigen einen mit steigender Neigung leicht zunehmenden Expositionsunterschied. Beträgt die Differenz zwischen den Maxima bei einer Neigung von 60° nur 0,09, so steigt der Gradient auf 0,13 bei 75° an. Bei 90° wird erneut der gleiche Gradient von 0,13 erreicht. Das SRF-Minimum liegt bei geringeren Neigungen im Osten, das Maximum Großteils im Westen. Die Ausnahme davon bildet das Maximum bei 75° im Norden. Unterschiedlich ist auch die Abnahme des SRF mit zunehmender Neigung an einer Exposition (ersichtlich durch den Abstand der Werte auf den vier Hauptachsen in Abbildung 26). Fast linear ist die Abnahme im Westen. Hier nimmt der Faktor zwischen 90° und 75° bzw. 75° und 60° um 0,12 bzw. 0,13 ab. Am Extremsten stellt sich die Situation im Norden und im Süden dar. In diesen Expositionen sind die SRF der Neigungen 60° sowie 75° mit einem Unterschied von nur 0,04 im Norden und 0,08 im Süden sehr ähnlich. Bei 90° liegt der SRF jedoch 0,31 (N)

bzw. 0,25 (S) unter den Werten der 75° Neigungen. Zur Übersicht dient die zur Abbildung 26 dazugehörige Wertetabelle (Tabelle 7).

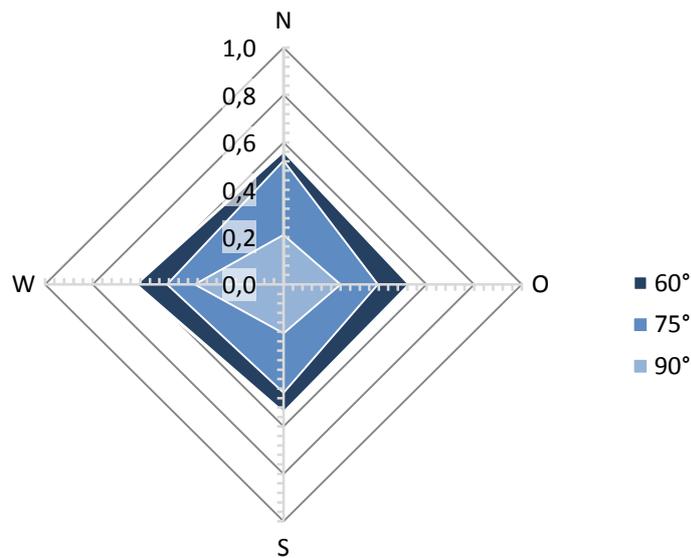


Abbildung 27: SRF im Gsenggraben nach Exposition und Neigung mit dazugehöriger Datentabelle. Quelle: Eigene Erhebungen

Tabelle 7: Übersichtstabelle der SRF im Gsenggraben nach Exposition und Neigung. Quelle: Eigene Erhebung

Grad					Mittel	Gradient
	N	O	S	W		Exposition
90°	0,21	0,24	0,21	0,37	0,26	0,13
75°	0,52	0,40	0,46	0,49	0,47	0,13
60°	0,56	0,53	0,54	0,62	0,56	0,09
Gradient 60°-75°	0,04	0,13	0,08	0,13	0,10	-
Gradient 75°-90°	0,31	0,16	0,25	0,12	0,21	-

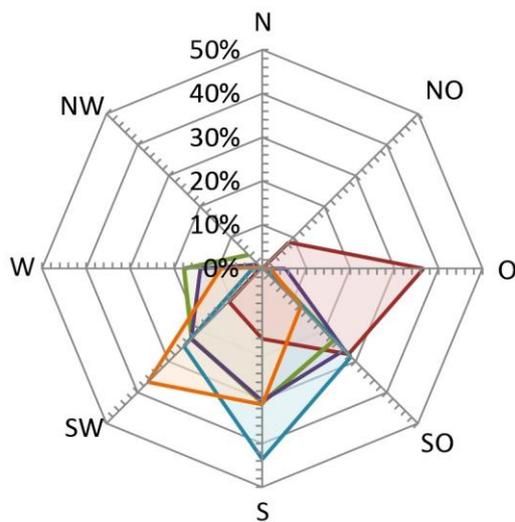
Um Rückschlüsse auf die SRF-Verteilung zu erhalten, wurden die zur Berechnung herangezogenen Klimadaten weiteren Analysen unterzogen und dabei in Beziehung gesetzt. Die Ergebnisse daraus sind in Abbildung 27 dargestellt.

Genauer betrachtet wurde unter anderem die Verteilung der Windrichtung zu jenen Zeitschritten, bei denen auch Niederschlag registriert wurde. Mit einem Anteil von 30,33% kam der Wind bei Niederschlagsereignissen am häufigsten aus Süden. Mit den Winden aus SW (23,61%) und SO (23,59%) besaßen auch die nächstfolgenden in der Reihung der Windanteile eine südliche Komponente, wodurch 77,53% aller registrierten Winde im südlichen Sektor zu

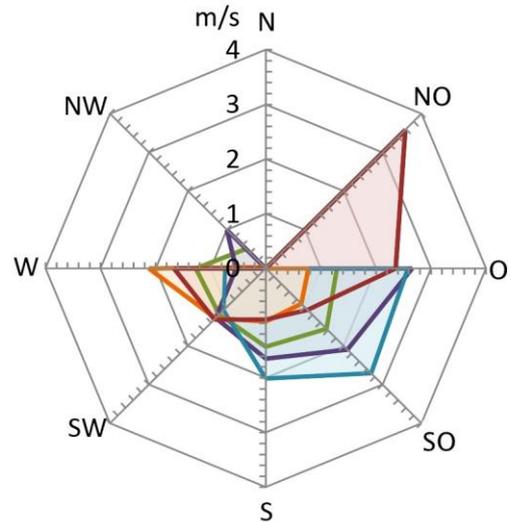
verzeichnen waren. Dem gegenüber stehen die geringen Anteile aus dem nördlichen Sektor (NW, N und NO) von nur 2,92%. Winde mit Ost- bzw. Westkomponenten nahmen jeweils einen Anteil von ca. 34% ein. Im Vergleich mit der ungefilterten bzw. allgemeinen Windrichtungsverteilung im Gsenggraben in Abbildung 18 zeigt sich in dieser Analyse eine allgemeine Zunahme der Windrichtungsanteile aus dem Süden (SO, S, SW). Dieser Trend ging durchwegs auf Kosten der allgemeinen Windrichtungsmaxima. Wie auch schon in Kapitel 4.1.1. wurde auch hier die Windgeschwindigkeit in Bezug zur Windrichtung gesetzt. Diese Analyse berücksichtigt jedoch wie zuvor nur jene Windgeschwindigkeiten, die während eines Niederschlagsereignisses registriert wurden. Im Mittel über alle Himmelsrichtungen (mit Ausnahme jener aus N, aus der kein Wind bei Niederschlag registriert wurde) betrug die Windgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Niederschläge 1,22 m/s. Dies bedeutet eine markante Geschwindigkeitszunahme im Vergleich zur allgemeinen, ungefilterten Windsituation (siehe Abbildung 20). So nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit von 0,47 m/s auf 1,22 m/s zu. Die stärksten Winde kamen im Mittel über alle Stationen mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1,93 m/s aus dem Osten. Etwas langsamer waren die Winde aus SO mit einem Schnitt von 1,67 m/s. Mit Abstand die geringsten Werte kamen erneut aus dem nördlichen Sektor mit 0,72 bzw. 0,31 m/s aus NO und NW. Aus N kamen bei Niederschlagsituationen generell keine Winde. Alle anderen Windrichtungen bewegen sich um den oben angeführten Mittelwert. Auffällig ist die Verteilung der Vaisala-Station. Diese Position weist den höchsten Wert der gesamten Verteilung von 3,58 m/s aus NO kommend auf. Besonders daran ist, dass sämtliche anderen Stationen aus dieser Richtung keinen Wind im Laufe eines Niederschlags registrierten.

Weiters ist bei der Ermittlung des SRF nicht nur von Interesse, ob ein Niederschlag registriert wird, sondern auch wieviel. Deshalb wurde die Niederschlagsmenge in Bezug zur Windrichtung gesetzt, welche bei dem jeweiligen Regenereignis vorherrschte. Einheitlich über alle Stationen liegt das Niederschlagsmaximum mit einer Ausnahme bei Windrichtungen aus S. Die Ausnahme stellt erneut die Vaisala-Station dar, dessen Maximum etwas verlagert bei Windrichtungen aus SW liegt. Die Folge daraus ist, dass 83,28% des gefallenen Niederschlags unter dem Einfluss von Winden aus dem südlichen Sektor fielen. Lediglich 2,54% des Gesamtniederschlags wurden bei Winden mit nördlicher Komponente registriert, ca. ein Drittel bei Winden aus dem Ostsektor und ebenso viel unter westlichem Einfluss. Diese Analyse zeigte erneut die stark vertretene Westkomponente an der nordexponierten Felswand sowie die präasente Ostkomponente an der Vaisala-Station.

### Windrichtungsverteilung bei Niederschlag



### Windgeschwindigkeit nach Windrichtung bei Niederschlag



### Niederschlagsmengen nach Windrichtung

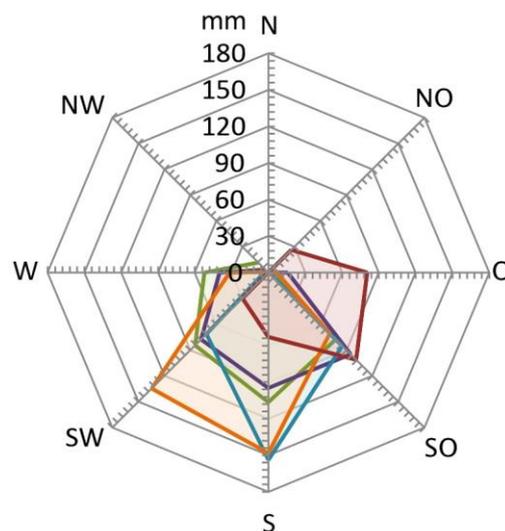


Abbildung 28: Verteilung der SRF-Relevanten Klimaparameter Niederschlag, Windgeschwindigkeit sowie -richtung in Abhängigkeit der Exposition. Quelle: Eigene Erhebungen

## 4.2. Ergebnisse der Schneemodellierung im ESCIMO.spread

Die Aufgabe der Schneemodellierung war es, die Quelle jener Feuchtigkeit zu eruieren, die den Pegel der Gesteinsfeuchte beeinflusst. Unterschieden wurden hier der als Normalregen sowie der als Schnee fallende Niederschlag. Die Modellierung im ESCIMO.spread lieferte noch einige weitere Parameter, die jedoch im Zusammenhang mit dieser Arbeit nicht von Interesse sind. Während sich der flüssige Niederschlag umgehend auf die Gesteinsfeuchte auswirkt, baut der Schnee zunächst eine Schneedecke auf, die bei geeigneten Verhältnissen schmilzt und so das in ihr gespeicherte Wasser (Schneewasseräquivalent) zeitversetzt freigibt. Die

Modellierung lieferte Daten zur Schneedecke, die sich stets auf einen Punkt im Untersuchungsgebiet beziehen und keine räumliche Verteilung widerspiegeln. Das Wissen, woher der die Gesteinsfeuchte steuernde Feuchtigkeitsinput stammt, beeinflusst in dieser Arbeit daher vor allem den zeitlichen Verlauf der Gesteinsfeuchte. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse aus der Schneemodellierung graphisch dargestellt. Zu beachten ist, dass diese Modellierung auf dem langjährigen mittleren Klima des Gesäuses beruht (siehe Kapitel 3.5.2). Daher entsprechen die Ergebnisse der allgemeinen Situation des Untersuchungsgebietes im klimatischen Sinne, jedoch ist ein direkter Vergleich mit den klimatischen Analysen aus dem vorigen Kapitel nicht möglich.

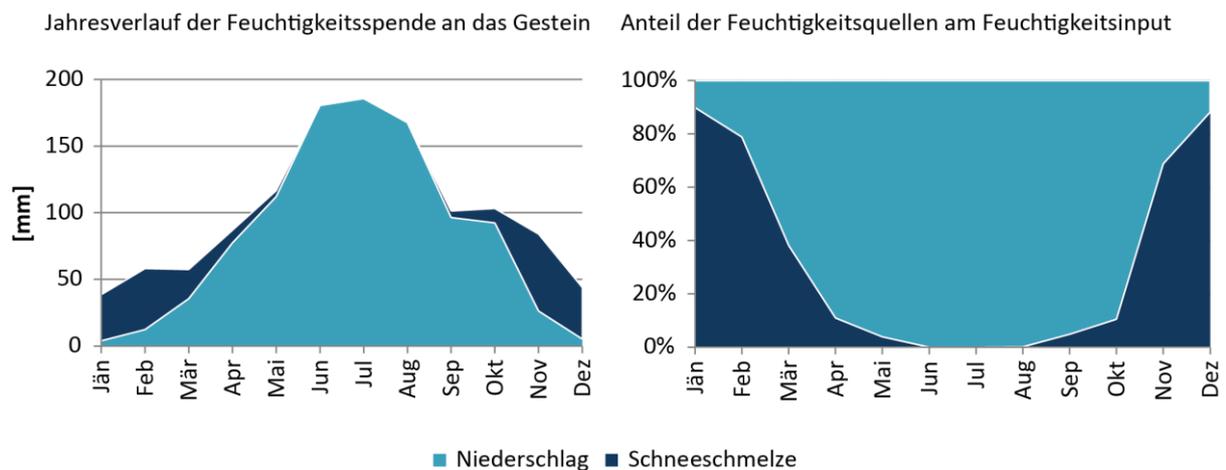


Abbildung 29: Verlauf und Anteile der Feuchtigkeitsspende an das Gestein – Die blau gefärbte Fläche entspricht dem gesamten Feuchtigkeitsinput. Quelle: Eigene Erhebungen

Der Verlauf der Feuchtigkeitsströme (Abbildung 28, links) zeigt, dass die Sommermonate mit den Monatssummen von 180,6 mm (Jun), 185,8 mm (Jul) sowie 167,9 mm (Aug) die größte Feuchtigkeit im Jahr aufweisen. Diese wird bis auf 0,2 mm Schneeschmelze im August ausschließlich durch den sommerlichen Niederschlag verursacht. Mit Fortdauern des Kalenderjahres sinkt die zur Verfügung stehende Feuchtigkeit stetig ab, wobei der Anteil der aus der Schneedecke gespendeten Wassermenge im Vergleich zum Niederschlag tendenziell größer wird. Das Minimum der Gesamtwassermenge von 38,5 mm wird im Jänner erreicht. Danach kommt es zum erneuten nahezu durchgehenden Anstieg bis zum Sommermaximum. Betrachtet man die Schmelze und den Niederschlag getrennt voneinander, erkennt man einen gänzlich unterschiedlichen Verlauf. Der Feuchtigkeitsverlauf des Niederschlags besitzt ein ausgeprägtes Sommermaximum mit dem Höchstwert von 185,8 mm im Juli sowie ein eindeutiges Winterminimum von nur 3,9 mm im Jänner. Umgekehrt verhält sich der Verlauf

der Schneeschmelze. So zeigt dieser aufgrund einer fehlenden Schneedecke ein deutliches Minimum im Sommer sowie die höchsten Werte von November bis Februar. Bei genauer Betrachtung der modellierten Schneeschmelze fällt auf, dass dessen Verlauf ein primäres Maximum im November von 57 mm und ein sekundäres Maximum von 45 mm im Februar besitzt. Dazwischen fällt die gespendete Wassermenge aus der Schneedecke auf 34 mm im Jänner etwas ab.

Bei einem Blick auf Abbildung 29 (rechts) ist zu erkennen, dass der Anteil der Schneeschmelze an der gesamten Wassermenge im Untersuchungsgebiet im Winter am größten und zum Sommer hin stetig abnimmt. So kommt zum Beispiel im Jänner 89,87% der zur Verfügung stehenden Wassermenge aus der Schneeschmelze. Über das gesamte Jahr betrachtet besitzt der flüssige Niederschlag mit 81% den weitaus höheren Anteil an der Gesamtwassermenge. Dem gegenüber steht die Schneeschmelze mit einem Anteil von 19%.

### **4.3. Ergebnisse der Gesteinsfeuchtesimulation im WUFI**

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Gesteinsfeuchtesimulationen besprochen. Bei der Simulation selbst als auch bei der anschließenden Analyse der Daten wurde darauf geachtet, dass ein direkter Vergleich mit den Simulationen von Schnepfleitner (2012) möglich ist. Dieser spiegelt sich in den folgenden Kapiteln in textlicher als auch grafischer Form wieder. Unterschiede zur Referenzsimulation, die nicht ausformuliert wurden, wurden in eckigen Klammern [-] vermerkt. Weiters soll erwähnt werden, dass stets jene Ergebnisse der WUFI-Simulationen präsentiert werden, die nach Durchsicht der gesamten Daten in allen Dimensionen (Simulationsvariante, Neigung, Exposition und Felstiefe) die größten Herausstellungsmerkmale aufweisen.

Da die klimatischen Parameter für die WUFI-Simulation von Schnepfleitner (2012) übernommen wurden, sind diese nicht direkt mit den in Kapitel 4.1.1. dargestellten Verhältnissen im Gsenggraben vergleichbar. Eine Beschreibung der üblichen Klimaparameter der für die Gesteinsfeuchtesimulation verwendeten Klimadaten wird in Schnepfleitner (2012) ausführlich und im Detail vorgenommen, wodurch in dieser Arbeit auf eine wiederholte Ausformulierung dieser Ausprägungen verzichtet wird. Einzig die veränderten Werte des Niederschlags durch das Miteinbeziehen der Schneeschmelze werden kurz besprochen. Jene Simulationsvarianten, die den Einfluss des als Schnee fallenden Niederschlags berücksichtigen,

wurden mit einer im Niederschlag veränderten Klimadatei gerechnet. Die Änderungen sind in Kapitel 4.2. nachzulesen. Die Simulationsvarianten mit verändertem Schlagregenfaktor *SRF* sowie *Schnee+SRF* wurden mit dem in Kapitel 4.1.2. beschriebenen SRF durchgeführt.

#### 4.3.1. Feuchtebedingungen im Gestein

Betrachtet man den Jahresverlauf der Porensättigung in Abbildung 29 so erkennt man, dass der Sättigungsgrad der Simulationsvariante *Schnee+SRF* stets über dem der Referenzsimulation liegt. Im Gesamtschnitt beträgt der Unterschied 4,88%. Besonders auffällig sind die Abweichungen in den Wintermonaten, die im Mittel des Winterhalbjahres einen Unterschied von 6,99% aufweisen, im Vergleich dazu liegt das Sommerhalbjahr nur 2,78% über der Referenzsimulation. In den Sommermonaten verläuft der Jahresgang der beiden verglichenen Simulationsvarianten sehr homogen. Betrachtet man die Porensättigung der verschiedenen Expositionen (N, O, S und W) sowie der verschiedenen Neigungen (90° und 70°) getrennt voneinander, so zeigen sich Unterschiede in der Schwankungsbreite über den Untersuchungszeitraum sowie differenzierte Abweichungen im Vergleich der beiden Simulationsvarianten. So schwanken die Tagesmittelwerte der Porensättigung bei 70° (27,64%) weniger stark als bei 90° (33,62%). Dies bedeutet eine Abnahme bezogen auf die von Schnepfleitner (2012) durchgeführte WUFI-Simulation von 6,19% bei 70° Geländeneigung, wobei bei 90° kaum ein Unterschied in der Schwankungsbreite zu erkennen ist (-0,51%). Der Vergleich zwischen den Expositionen bringt hervor, dass in den Westexpositionen im Jahresdurchschnitt die höchste Porensättigung von 80,42% auftritt (siehe Tabelle 8). Die trockensten Expositionen sind mit 75% im Mittel jene im Norden.

Tabelle 8: Jährliche Mittelwerte der Porensättigung (in %) im Untersuchungsgebiet (Dolomit) in Bezug auf den Jahresgang. Farbliche Abstufung der Parametergrößen pro Exposition und Neigung. Quelle: Eigene Erhebungen

	N	O	S	W	70°	90°
Porensättigung (PS)	75.07	78.90	76.74	80.42	85.00	70.57
Variabilität PS	31.57	26.60	29.63	34.72	27.64	33.62
Referenz PS	3.60	5.00	6.36	4.57	5.36	4.41
Referenz Variabilität	-2.92	-5.38	-4.29	1.22	6.19	-0.51

In Abbildung 29 sind neben dem gesamten mittleren Jahresgang der Porensättigung die Jahresgänge der beiden auffälligsten Kombinationen aus Exposition und Neigung dargestellt. So beschreibt die Porensättigung bei S90° die größte Differenz zwischen den beiden Simulationsvarianten und N70° die geringste.

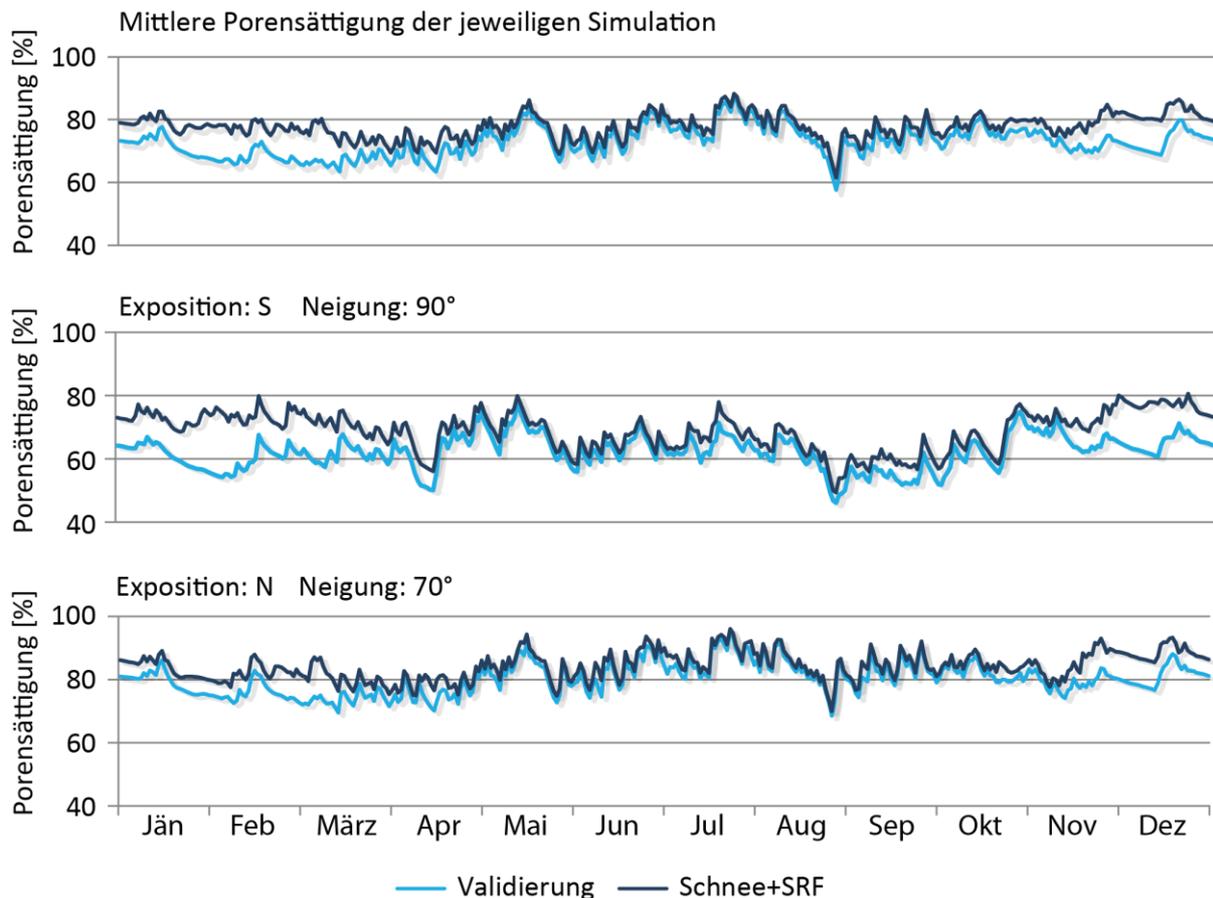


Abbildung 30: Jahresgang der mittleren Porensättigung über alle Felstiefen im Dolomit des UG - Vergleich der Referenzsimulation und der Simulationsvariante *Schnee+SRF* (oberster Jahrgang: Mittelwert der Porensättigung aller Neigungen, Expositionen und Tiefen). Quelle: Eigene Erhebungen

Bei Betrachtung der Gesteinsfeuchte in Abhängigkeit mit der Felstiefe ergeben sich die in Abbildung 30 ersichtlichen Profile. Unabhängig von der Exposition, Neigung sowie der Simulationsvariante steigt die mittlere Porensättigung mit zunehmender Felstiefe in den ersten Zentimetern stark an. Der Verlauf flacht jedoch ebenso schnell ab, um ab ca. 5 cm nur noch mit leichter Zunahme bis hin zum nahezu konstanten Wert in 20 cm Tiefe anzusteigen. Unterschiede dieser Tiefenprofile der Porensättigung ergeben sich bei einem Vergleich der Geländeneigungen. Hier zeigt sich, dass die Sättigung bei 70° stets über jener bei 90° liegt. Im Mittel über alle Felstiefen unterscheiden sich die beiden Neigungen um 13,76% [+0,89%]. Die Differenz der ausgeglichenen Tiefenfeuchte im Gestein zwischen 70° und 90° beträgt im Mittel über die vier Expositionen 14,34 % [+0,27%]. Besitzen die Nord- sowie Südexposition den größten Unterschied der Porensättigung in der Tiefe knapp über der mittleren Abweichung (N=17,1%; S=16,99%), so fällt die Differenz im Westen deutlich geringer aus. Hier beträgt der Unterschied zwischen den beiden Neigungen nur 8,90%, was auf den vergleichbar hohen Wert bei W90° mit 80,19% Porensättigung zurückzuführen ist. Dies führt auch dazu, dass im Westen

im Mittel über die beiden Neigungen die höchste Porensättigung über die gesamte Felstiefe mit 77,88% erreicht wird. Danach folgen O und S, bis hin zum Norden, der den geringsten Wert von 72,75% einnimmt.

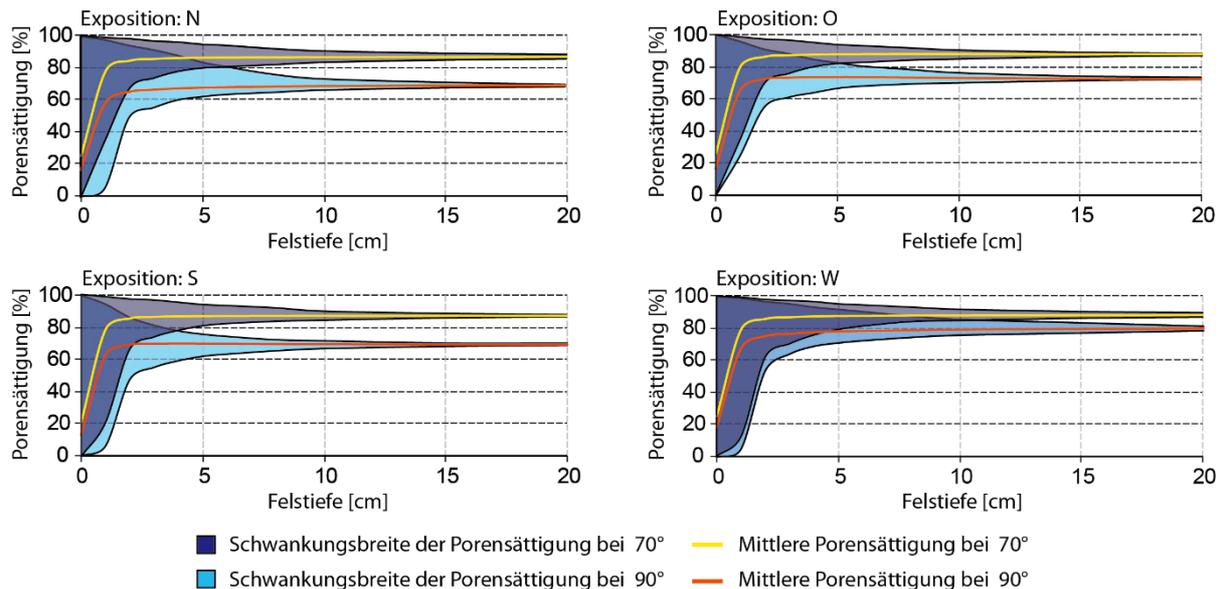


Abbildung 31: Profile der Porensättigung der Simulationsvariante *Schnee+SRF* nach Exposition und Neigung. (Dolomit) Quelle: Eigene Erhebungen

In Abbildung 30 ist auch ersichtlich, dass die Schwankungsbreite der Porensättigung um den zuvor beschriebenen Mittelwert mit der Tiefe hin stark abnimmt. Schwankt die Feuchtigkeit im Fels an der Oberfläche noch zwischen 100% und ca. 1,5%, so nimmt diese im oberflächennahen Bereich rasch ab. In 5 cm Tiefe beträgt der Schwankungsbereich nur mehr 15,71% [-1,79%], in 10 cm schon nur noch 6,49% [-0,62%]. Die größten Unterschiede des Schwankungsbereichs der Porensättigung kann aufgrund der größeren Variabilität in den ersten Felsschichten erkannt werden. So fällt auf, dass bei einer Geländeneigung von 70°, eine nahezu lineare Zunahme der minimalen Porensättigung mit der Tiefe verzeichnet wird. Ausnahme davon ist W70°. Hier bleibt das Minimum bis zum ersten Zentimeter im Felsen noch bei 13,38%. Im Vergleich dazu liegt das Mittel über alle Expositionen in derselben Tiefe bei 26,75% [+8,46%].

In Tabelle 9 ist eine Übersicht über die eben besprochenen Werte der Simulationsvariante *Schnee+SRF* angeführt.

Tabelle 9: Jährliche Mittelwerte der Porensättigung im Untersuchungsgebiet (Dolomit) bezogen auf die Felstiefe. Farbliche Abstufung der Parametergrößen pro Exposition und Neigung entsprechend deren Ausprägungen. Quelle: Eigene Erhebungen

Exposition		N	O	S	W
Tiefenfeuchte	70°	81.16	87.76	81.12	82.33
	90°	69.98	73.38	69.98	80.19
Porensättigung	OF	22.54	22.12	18.07	22.69
	1cm	68.52	72.70	70.89	73.61
	2cm	75.37	79.52	77.47	80.73
	4cm	77.25	80.83	78.52	82.69
	10cm	78.23	80.74	78.48	83.82
Schwankungsbreite	OF	98.23	98.50	98.75	98.55
	1cm	76.51	66.68	82.03	89.09
	2cm	37.16	31.38	34.44	38.86
	4cm	22.54	17.77	17.73	22.20
	10cm	6.82	5.79	5.11	8.22

#### 4.3.2. Temperaturbedingungen im Gestein

Die Bedingungen der Temperatur im Gestein präsentieren sich im Vergleich zur Porensättigung in jeglichen Dimensionen ausgeglichener. Der Jahresgang der Temperatur an der Felsoberfläche in Abbildung 31 verdeutlicht, wie gleichmäßig die Temperaturen der verschiedenen Expositionen sowie der beiden Simulationsvarianten *Schnee+SRF* und der Referenzsimulation über den gesamten Simulationszeitraum verlaufen. Allgemein kann festgestellt werden, dass die gemittelten Temperaturen im Gestein im Sommer höher sind als im Winter und die Nordexposition mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,1°C die geringsten und die Südexposition mit dem Jahresmittel von 9,7°C die höchsten Temperaturen aufweisen. Dazwischen befinden sich O und W, wobei der Osten gering wärmere Temperaturen verzeichnet. Betrachtet man den Jahresverlauf in Abbildung 31 differenziert nach Sommerhalbjahr (SHJ) sowie Winterhalbjahr (WHJ), so können größere Unterschiede im WHJ festgestellt werden. Die größten Temperaturunterschiede zwischen N und S treten im Oktober sowie im März mit einer Differenz von 2,07°C bzw. 2,02°C auf, die geringsten im Juni sowie im Juli mit nur 0,68°C bzw. 0,78°C. Im Vergleich der beiden Neigungen 70° und 90° zeigt sich ein ähnliches Bild. Generell liegen die Temperaturen bei 70° geringfügig über jenen bei 90°. Bei einem Vergleich in den Expositionen N und S, die den größten Temperaturunterschied aufweisen, zeigt sich, dass die Werte bei einer Geländeneigung von 70° im Mittel nur 0,09°C über jenen bei 90° liegen. Im Jahresverlauf schwankt der Neigungsunterschied zwischen N und S um 0,21°C, wobei der größte Unterschied im April und der geringste im November ausgemacht werden können. Über alle simulierten Tiefen hinweg ist generell eine Abnahme

der Temperatur mit zunehmender Felstiefe zu beobachten. Im Jahresverlauf ist kein eindeutiger Trend zu erkennen, zu welchem Zeitpunkt die Abnahme mit der Felstiefe am stärksten ist.

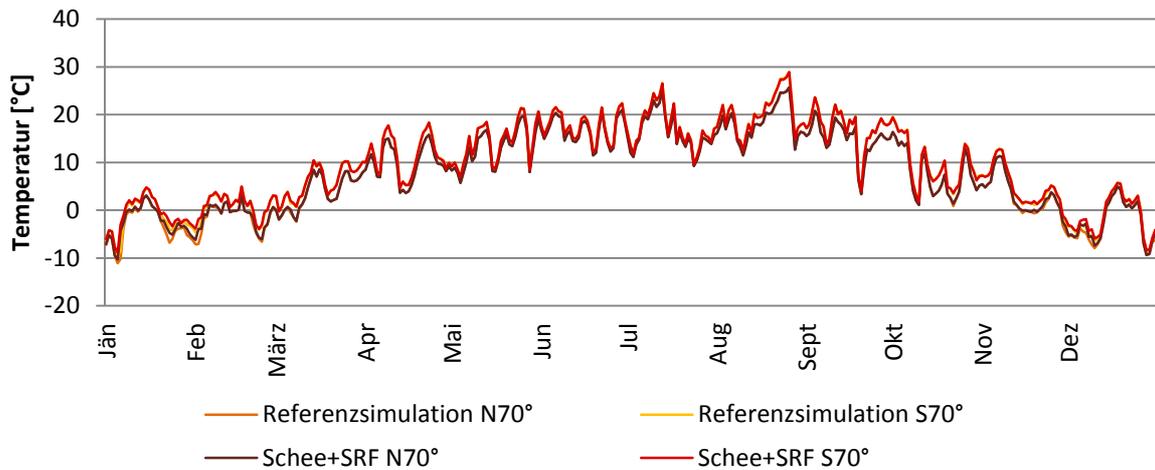


Abbildung 32: Jahresgang der Temperatur an der Felsoberfläche bei einer Neigung von 70° (Dolomit). Im Vergleich jeweils die beiden Expositionen N und S der Simulationsvarianten *Schnee+SRF* und der Referenzsimulation. Quelle: Eigene Erhebungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse jener Temperaturparameter geschildert, die entscheidend für eine Frostverwitterung sind. Da neben der grundsätzlichen Anwesenheit von Frost entscheidend ist, in welchem Temperaturbereich und über welchen Zeitraum dieser auftritt, wurden zunächst Analysen bezüglich der Frostdauer sowie der Frosttiefe durchgeführt. Darüber hinaus besitzt der Wechsel zwischen Frost- und Tauphasen einen großen Einfluss auf die mechanische Belastung des Gesteins, warum die Temperaturdatensätze auch auf Frostwechsel hin untersucht wurden. Zuletzt ist die Gefrierate erhoben worden, die eine Aussage über die Geschwindigkeit der Temperaturänderung zulässt. Da die Temperatur mit der Felstiefe gleichmäßig abnimmt sowie die Temperaturextreme bei N und S liegen, werden die erhobenen Verwitterungsparameter ausschließlich anhand der Felstiefen von 0 cm (Oberfläche), 10 cm sowie 50 cm in den Expositionen N und S dargestellt.

Der Vergleich der Frostdauer in Abbildung 32 zeigt, dass vor allem die Exposition einen Einfluss auf die Dauer des Frostereignisses besitzt. So wird in der Nordexposition der *Schnee+SRF* Variante eine im Schnitt um 553 Stunden [-50h] höhere Frostdauer verzeichnet als bei der Südexposition. Auffällig dabei ist, dass die Anzahl der Tage bei den Simulationen mit Schneeeinfluss tendenziell geringer ausfallen.

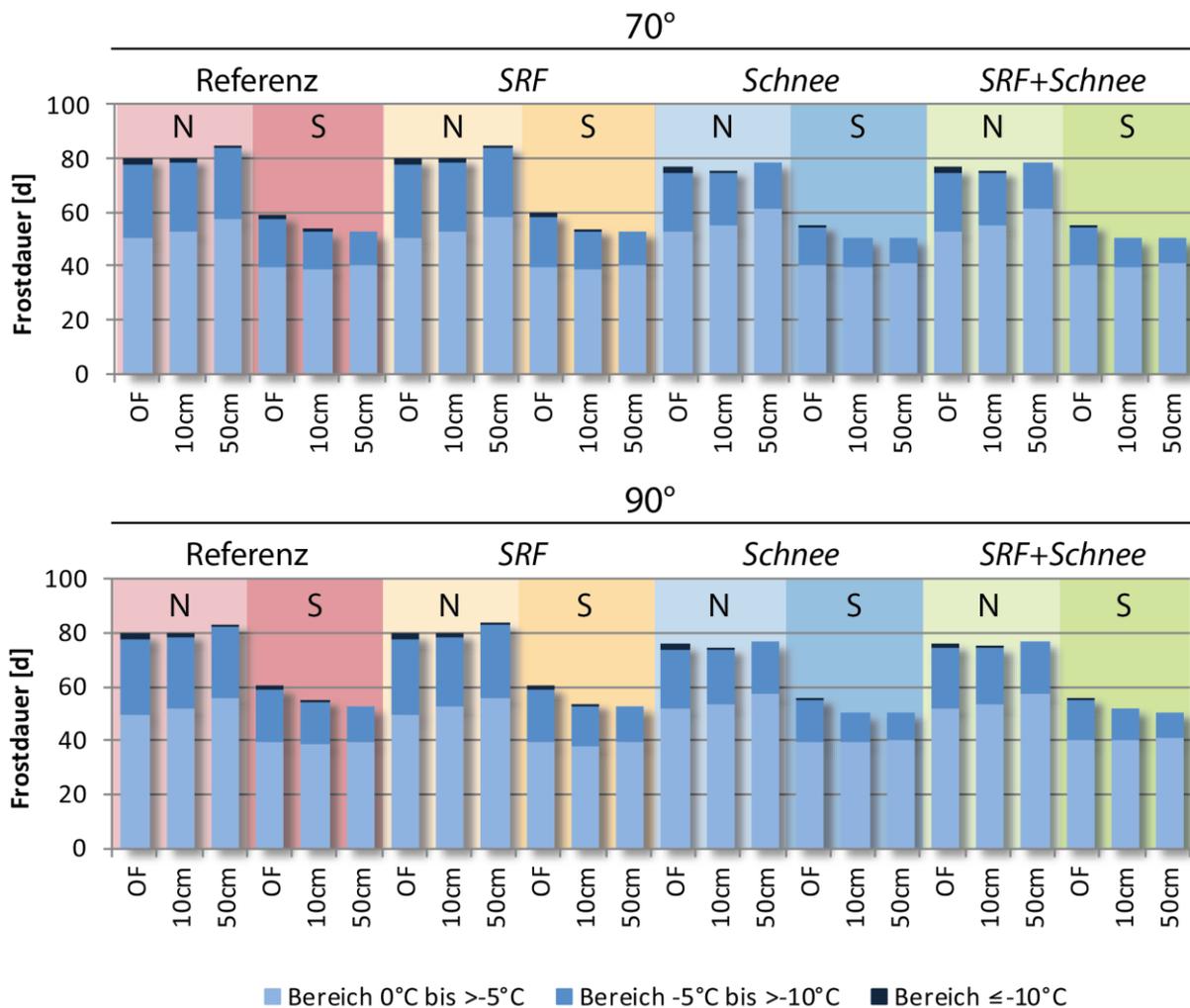


Abbildung 33: Vergleich der Frostdauer in den Felstiefen 0 cm (Oberfläche), 10 cm und 50 cm nach Exposition, Neigung sowie der Simulationsvarianten (Dolomit). Quelle: Eigene Erhebungen

So verzeichnet die Simulationsvariante *Schnee+SRF* im Mittel 3,59 Tage (86,17 Stunden) weniger an Frost als die Referenzsimulation. Dabei fällt der Unterschied in der Südexposition über alle Felstiefen gleichermaßen aus, jener im Norden nimmt mit der Tiefe ab. Letztgenanntes führt dazu, dass die übliche Zunahme der Frostdauer mit der Felstiefe in den Nordexpositionen kaum noch vorhanden ist. Dem gegenüber steht eine Abnahme der Frostdauer mit der Felstiefe in den Südexpositionen, die sich allerdings über alle Simulationsvarianten hinweg durchsetzt. Die Neigung scheint nur einen marginalen Einfluss auf die Frosttiefe zu besitzen. Der Vergleich zwischen den Neigungen 70° und 90° zeigt bei jeder Exposition, Felstiefe sowie Simulationsvariante in sich nahezu dasselbe Bild. In Tabelle 10 sind die Werte der Simulationsvariante *Schnee+SRF* bezüglich der Frostdauer aufgelistet.

Tabelle 10: Frostdauer in Tagen der Simulationsvariante *Schnee+SRF* – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm). Farbliche Abstufung pro Parameter entsprechend deren Ausprägungen. Quelle: Eigene Erhebungen

Simulationsvariante		Schnee+SRF					
Exposition		Nord			Süd		
Felstiefe		OF	10cm	50cm	OF	10cm	50cm
70°	Bereich 0°C bis -5°C	53.21	55.29	61.42	40.13	39.54	40.92
	Bereich -5°C bis -10°C	21.79	19.63	17.29	14.25	10.75	9.50
	Bereich > -10°C	1.79	0.63	0.00	0.96	0.00	0.00
	Summe	76.79	75.54	78.71	55.33	50.29	50.42
90°	Bereich 0°C bis -5°C	52.21	53.42	57.71	40.08	40.83	40.92
	Bereich -5°C bis -10°C	22.21	20.96	19.29	15.00	11.29	10.04
	Bereich > -10°C	1.88	0.63	0.00	1.00	0.00	0.00
	Summe	76.29	75.00	77.00	56.08	52.13	50.96

Das Verhalten der Frosttiefe ändert sich in erster Linie mit der Felstiefe. Hier nimmt die Frosttiefe in allen Varianten von der Oberfläche weg in die Tiefe von ca. 8-10 cm zunächst ab (Temperaturzunahme). Jedoch steigt sie danach mit zunehmender Tiefe wieder an (Temperaturabnahme) um dort ihr Maximum zu erreichen. Dieser Verlauf mit der Tiefe ist in allen Expositionen zu erkennen (siehe dazu Abbildung 33).

Tabelle 11: Mittlere Frosttiefe [°C] der Simulationsvariante *Schnee+SRF* – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm). Farbliche Abstufung pro Parameter entsprechend deren Ausprägungen. Quelle: Eigene Erhebungen

Simulationsvariante		Schnee+SRF					
Exposition		Nord			Süd		
Felstiefe		OF	10cm	50cm	OF	10cm	50cm
Mittlere Frosttiefe 70°		-2.10	-1.73	-3.57	-2.74	-2.11	-5.30
Mittlere Frosttiefe 90°		-2.23	-1.87	-3.44	-2.89	-1.76	-5.54

Unterschiede ergeben sich hier jedoch in den tieferen Temperaturen an der südexponierten Felswand. Die *Schnee+SRF* Variante verzeichnet hier in Südexposition eine im Mittel um 0,88°C [-0,21°C] geringere Frosttiefe als an der Nordexposition. Der größte Unterschied von 2,18°C [-0,74°C] zeigt sich bei den jeweiligen Maxima in 50 cm Felstiefe. Auffällig ist erneut die Ähnlichkeit der Simulationsvarianten ohne Schneeeinfluss und jener mit. Die Ergebnisse der Simulationsvariante *Schnee+SRF* sind wie auch schon zuvor in tabellarischer Form aufgelistet (siehe Tabelle 11).

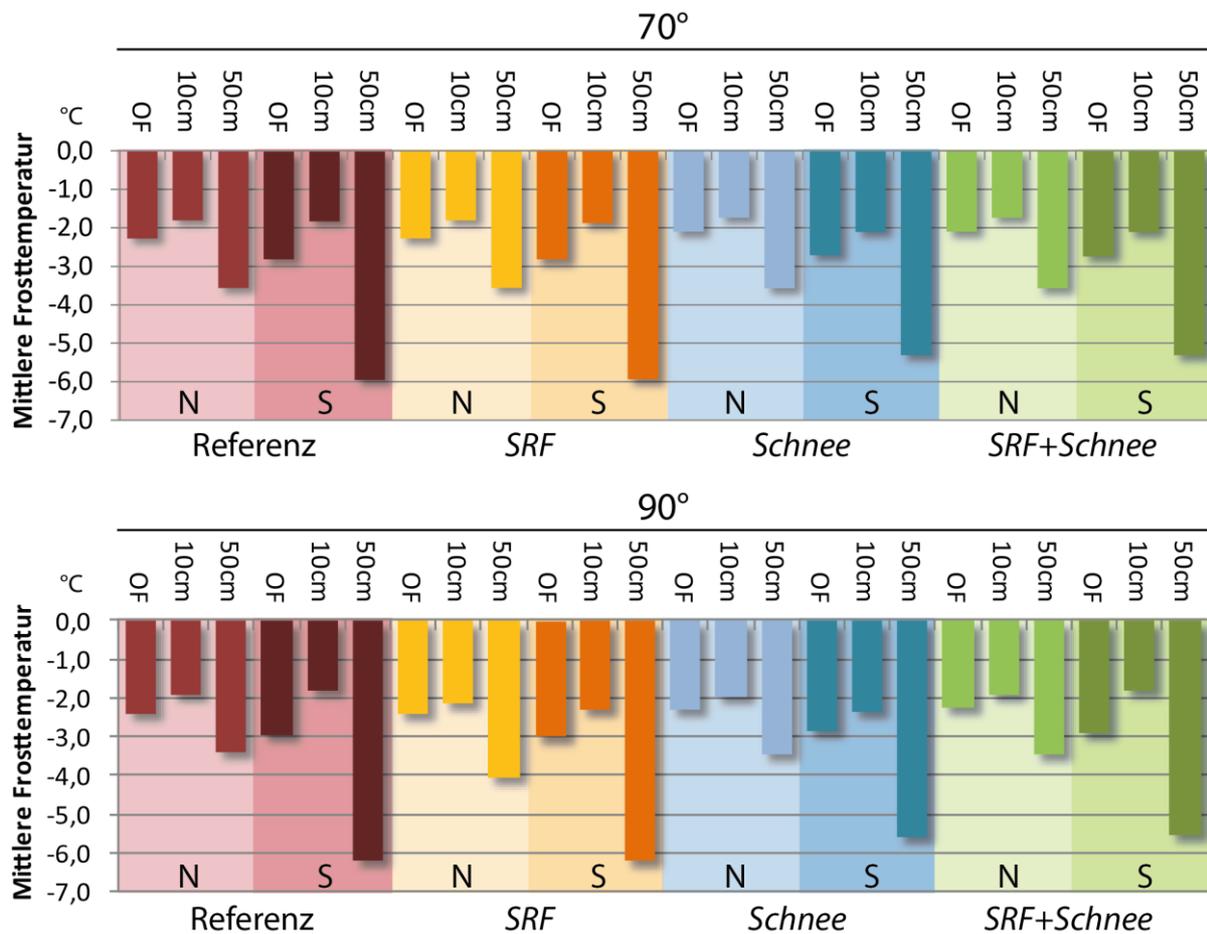


Abbildung 34: Vergleich der Frosttiefe in [°C] in den Felstiefen 0 cm (Oberfläche), 10 cm und 50 cm nach Exposition, Neigung sowie der Simulationsvarianten (Dolomit). Quelle: Eigene Erhebungen

Eindeutig ist das Verhalten der Frostwechseltage sowie der Eistage mit der Felstiefe. Zur einen Seite nimmt mit der Felstiefe die Anzahl der Frostwechseltage ab, auf der anderen Seite die Anzahl der Eistage zu. Die deutlichsten Unterschiede treten erneut im Vergleich zwischen den Expositionen auf. Generell kann behauptet werden, dass die Anzahl der Eistage im Norden höher ist als im Süden. Bei den Frostwechseltagen verhält es sich so, dass die Anzahl im S an der Oberfläche am höchsten ist, mit zunehmender Felstiefe der Norden jedoch die Oberhand gewinnt. So wurden bei der Simulationsvariante *Schnee+SRF* an der Fels Oberfläche in Südexposition 9 [+0] Frostwechseltage mehr berechnet als in N. Mit der Felstiefe dreht sich dieses Verhältnis. Die Exposition Nord verbucht in 10 cm Tiefe bereits 6 [-4 Tage] mehr Frostwechseltage im Vergleich zum Süden. Dieser Trend setzt sich bis zu 50 cm Felstiefe fort, in der sich der Unterschied bereits auf 10 Frostwechseltage [+2] mehr in N beläuft. Noch deutlicher ist der Unterschied bei einem Expositionsvergleich der Eistage. Hier liegt der Norden bei derselben Simulationsvariante (*Schnee+SRF*) im Schnitt über alle Felstiefen 20,33 Tage [-

1,33 Tage] über dem Süden. Am stärksten ist dieser Unterschied stets Nahe der Oberfläche bzw. in den tieferen Regionen des Felsens. Dazwischen gleichen sich die Anzahl der Eistage der beiden Expositionen etwas an. Die verschiedenen Simulationsvarianten erbringen über Exposition, Neigung sowie Felstiefen sehr ähnliche Ergebnisse.

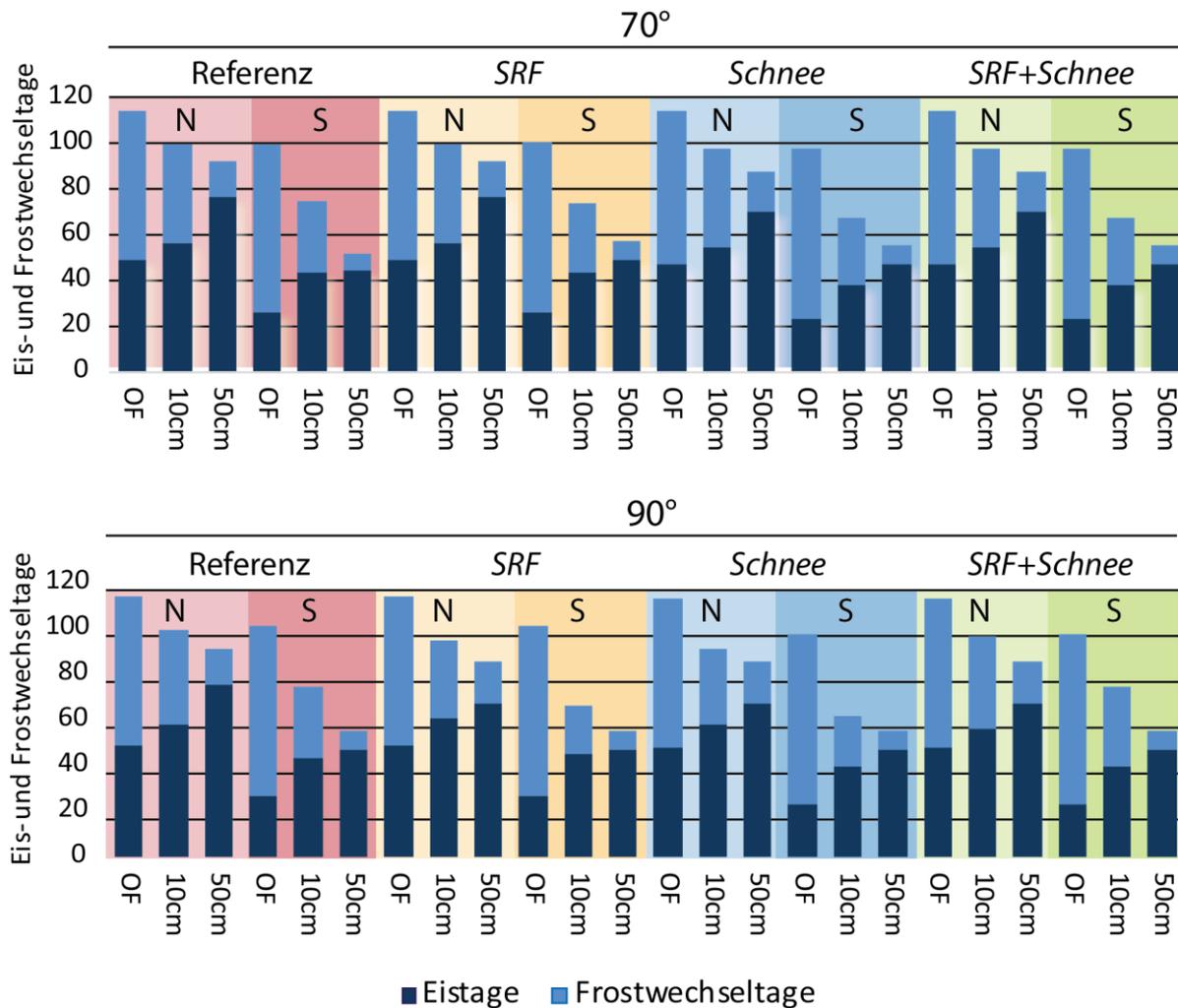


Abbildung 35 Vergleich der Eis- und Frostwechseltage in den Felstiefen 0 cm (Oberfläche), 10 cm und 50 cm nach Exposition, Neigung sowie der Simulationsvarianten (Dolomit). Quelle: Eigene Erhebungen

Unterschiede zeigen sich, wenn überhaupt, erst mit zunehmender Felstiefe. Zum Beispiel steigt in 50 cm Felstiefe bei einer Neigung von 70° die Anzahl der Eistage leicht über alle Simulationsvarianten im Vergleich zur Referenzsimulation an. Bei 90° Neigung fällt auf, dass sich die Referenzsimulation sowie die Variante *SRF+Schnee* im allgemeinen Tiefenprofil sehr ähnlich sind. Bei genauer Betrachtung ist zu erkennen, dass durch die in dieser Arbeit vorgenommenen Veränderungen im Vergleich zur Referenzsimulation eine Abnahme der

Eistage zu verzeichnen ist. Diese Abnahme nimmt im Süden mit der Tiefe zu und im Norden mit zunehmender Felstiefe ab. Umgekehrt nimmt die Anzahl der Frostwechseltage beim Vergleich der Variante *SRF+Schnee* mit der Referenzsimulation leicht zu. Diese Zunahme beläuft sich jedoch in einem Bereich von maximal 5%. Bei den beiden anderen Simulationsvarianten (*SRF* sowie *Schnee*) fällt die Anzahl der Frostwechseltage sowie der Eistage etwas geringer aus. Eine Betrachtung der beiden Neigungen zeigt, dass sich die Zunahme der Eistage und Frostwechseltage von 70° auf 90° bei der Variante *SRF+Schnee* noch verstärkt hat. In Tabelle 12 sind die Werte der Frostwechsel- sowie Eistage der Simulationsvariante *Schnee+SRF* ersichtlich.

Tabelle 12: Eis- und Frostwechseltage sowie Tage mit Frost der Simulationsvariante *Schnee+SRF* – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm). Farbliche Abstufung pro Parameter entsprechend der Ausprägungen. Quelle: Eigene Erhebungen

Simulationsvariante		Schnee+SRF					
Exposition		Nord			Süd		
Felstiefe		OF	10cm	50cm	OF	10cm	50cm
70°	Eistage	47	54	70	23	38	47
	Frostwechseltage	67	43	17	74	29	8
	Tage mit Frost	114	97	87	97	67	55
90°	Eistage	48	56	67	23	40	47
	Frostwechseltage	65	40	18	74	34	8
	Tage mit Frost	113	96	85	97	74	55

Bei der Betrachtung der Frostwechsel- sowie Eistage im Jahresverlauf ist ein deutlicher Trend über das Jahr über alle Expositionen, Neigungen und Felstiefen zu erkennen. So sind diese Parameter ausschließlich im WHJ vertreten. Innerhalb dieser Wintermonate nimmt die Anzahl der Eistage von November weg bis zum Maximum im Jänner hin stetig zu, um danach wieder bis zum Ende des WHJ auf Null abzufallen. Die Frostwechseltage, und äquivalent dazu die Frostwechsel an sich, können bereits ab Oktober festgestellt werden. Innerhalb des WHJ besitzen die beiden Parameter zwei Spitzen, im November und im Februar. Dazwischen fällt die Anzahl beider deutlich ab. Aufgrund der in Abbildung 34 ersichtlichen geringen Unterschiede zwischen den Neigungen und dem über alle Expositionen ähnlichen Verlauf der Eis- sowie Frostwechseltage mit der Tiefe, wird im Folgenden der Jahresgang dieser Parameter (einschließlich der Frostwechsel an sich) ausschließlich anhand der Exposition N bei 90° Geländeneigung veranschaulicht (siehe Abbildung 35).

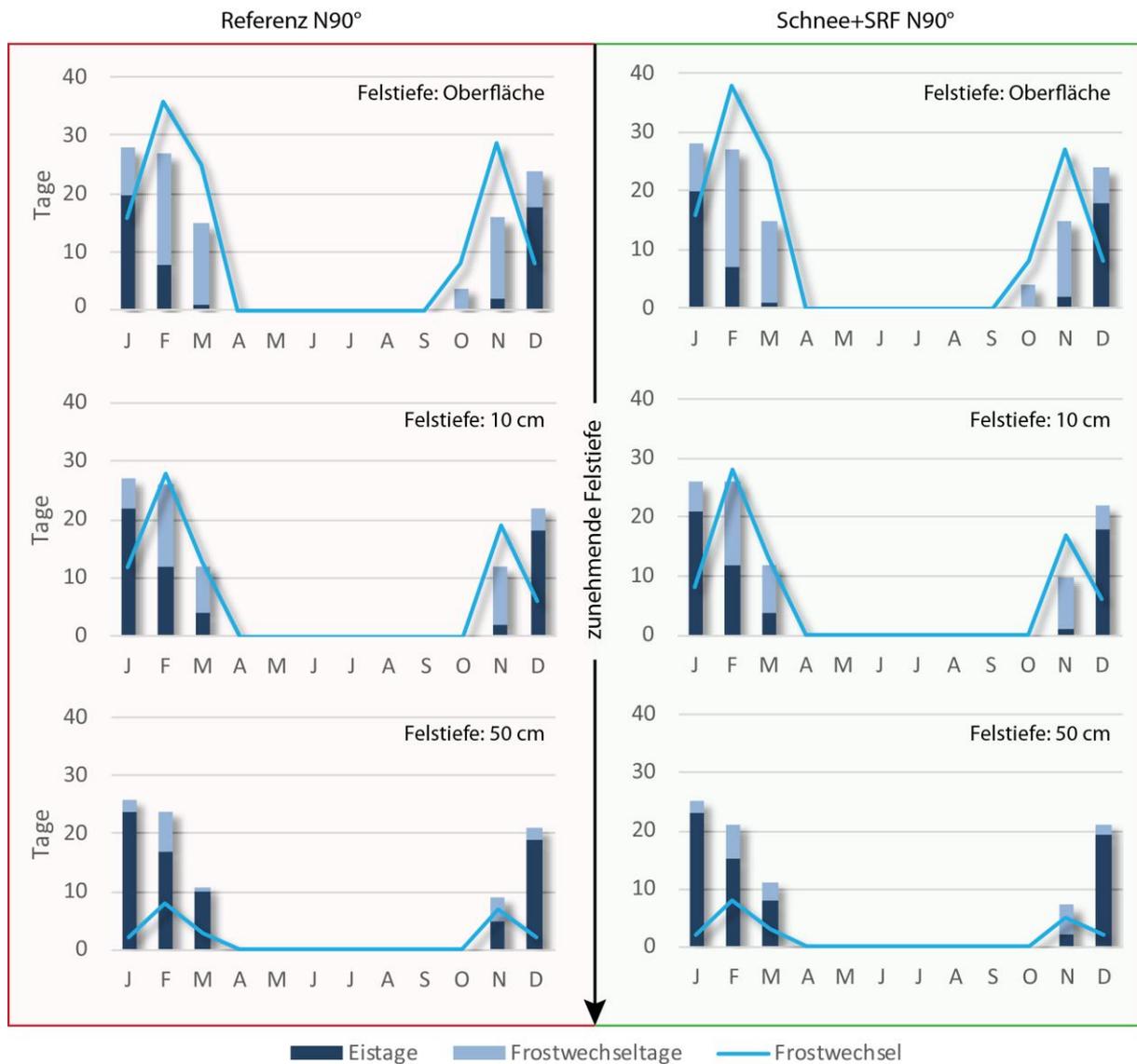


Abbildung 36: Jahresverlauf der monatlichen Summen der Eis- und Frostwechseltage sowie der Frostwechselereignisse in den Felstiefen 0 cm (Oberfläche), 10 cm und 50 cm. Vergleich der Referenzsimulation (li./rot) und der Simulation *Schnee+SRF* (re./grün) bei 90° Nord (Dolomit). Quelle: Eigene Erhebungen

Der Vergleich der Simulationsvariante *Schnee+SRF* mit der Referenzsimulation zeigt hier über das Jahr hinweg kaum Unterschiede. Im Mittel über alle Felstiefen ist die generelle Abnahme der Anzahl der Eistage durch die in dieser Arbeit vorgenommenen Anpassungen an die natürlichen Bedingungen am Fels im Jänner und Februar am größten. Bei N90° werden in diesen Monaten im Mittel 15, 33 Eistage [-6,67 Tage] im Jänner bzw. 6 Eistage [-6,37 Tage] im Februar verzeichnet. Die geringste Abweichung der Eistage wird im Dezember registriert. Hier sinkt die Anzahl der Eistage von durchschnittlich 18,37 auf 17,37 Tage. Die Anzahl der Frostwechsel und parallel die Frostwechseltage nehmen im Jänner sowie im Dezember zu und im März, Oktober sowie November ab. Die Zunahme von 2,67 Tagen im Jänner auf 7,76

Frostwechseltage steht dabei einer geringen Zunahme im Dezember von 0,33 Tage auf 4,33 Frostwechseltage gegenüber. Im Vergleich der Jahrgänge dieser Parameter in den verschiedenen Felstiefen zeigt sich erneut die Abnahme der Frostwechsel(-tage) sowie die Zunahme der Eistage mit der Tiefe. Der größte Unterschied der Eistage zwischen der Oberfläche am Fels und in 50 cm Tiefe befindet sich im Februar. Hier nimmt die Anzahl von 7 auf 15 Eistage im Monat zu. Ähnlich stark ist die Zunahme der Eistage mit der Felstiefe im März. Hier werden in 50 cm Tiefe um 7 Eistage mehr verzeichnet als an der Oberfläche. Die Abnahme der Frostwechsel(-tage) mit zunehmender Felstiefe ist, wie auch schon bei den Eistagen, im Februar am stärksten. Sind es an der Oberfläche noch 20 Frostwechseltage [+1] bzw. 38 Frostwechsel [+2], so sinken diese bis zu einer Tiefe von 50 cm auf 6 [-1] bzw. 8 [-] ab. Eine ähnlich starke Abnahme verzeichnet der darauffolgende März. Hier werden in 50 cm um 11 [-2] weniger Frostwechseltage bzw. um 22 [-] weniger Frostwechsel verzeichnet.

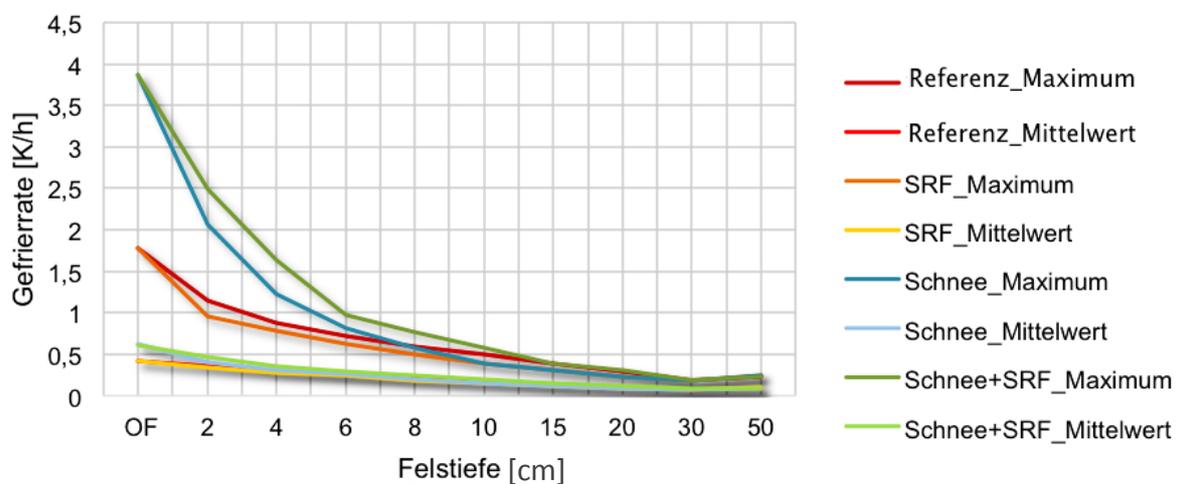


Abbildung 37: Die Gefrierate (Mittelwert/Maximum) in Abhängigkeit mit der Felstiefe bei N90° (Dolomit) - im Vergleich die verschiedenen Simulationsvarianten. X-Achse besitzt keinen linearen Verlauf. Quelle: Eigene Erhebungen

Die Gefrierate, die exemplarisch für alle Expositionen und Neigungen in Abbildung 36 bei N90° in Abhängigkeit mit der Felstiefe dargestellt ist, nimmt mit zunehmender Felstiefe ab. Dieser Verlauf ist über alle Expositionen, Neigungen sowie Simulationsvarianten stets der gleiche. Generell kann festgestellt werden, dass die höchsten Raten im Süden mit einem Mittel an der Fels Oberfläche von 0,83 [K/h] und die geringsten mit einem Mittelwert an der Oberfläche von 0,50 [K/h] im Norden auftreten. Dieser Unterschied zwischen den Expositionen ist an der Oberfläche am größten und nimmt mit zunehmender Felstiefe stetig ab. Die gemittelte, maximale Gefrierate von 2,84 [K/h] an der Oberfläche der Expositionen nach Süden liegt 1,3

[K/h] über jener im Norden. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Rate rasch ab und liegt in 2 cm Felstiefe nur noch bei 2,06 [K/h] (S) bzw. 1,74 [K/h] (N). Die Abnahme mit der Tiefe ist im äußersten Felsbereich in der Südexposition ca. doppelt so hoch als im Norden. Diese Differenz nähert sich, begründet auf die generell abnehmende Gefrierate mit der Tiefe, jedoch mit zunehmender Felstiefe an. Bei einem Vergleich zwischen den Simulationsvarianten kann festgestellt werden, dass sich erneut jene Varianten mit bzw. ohne Schneeeinfluss voneinander unterscheiden. Besonders stark ist dieser Unterschied bei N90° in den ersten 6 cm im Felsen. Die maximale Gefrierate liegt in diesem Bereich bei der Variante *Schnee+SRF* 1,11 [K/h] über jener der Referenzsimulation. Der Maximale Unterschied wird systembegründet erneut an der Oberfläche ausgemacht. Hier liegt die Gefrierate der Simulation *Schnee+SRF* N90° 2,08 [K/h] über jener vergleichbaren Variante der Referenzsimulation. Unterschiede aufgrund der Geländeneigung sind nahezu nicht vorhanden. Einzig die Differenz zwischen den Gefrieraten bezogen auf die Felstiefe fällt bis bei 70° etwas geringer aus als bei 90°. In den tiefsten Bereichen kehrt sich dieses Verhältnis mit leicht größeren Werten bei 70° um (Tabelle 13).

Tabelle 13: Maxima sowie Mittelwerte der Gefrierate [K/h] der Simulationsvariante *Schnee+SRF* – Vergleich der Expositionen (N und S), Neigungen (70° und 90°) und Felstiefen (Oberfläche, 10 cm, 50 cm). Farbliche Abstufung pro Parameter entsprechend der Ausprägungen. Quelle: Eigene Erhebungen

Simulationsvariante		Schnee+SRF					
		Nord			Süd		
Exposition							
Felstiefe		OF	10cm	50cm	OF	10cm	50cm
70°	Maximum	3.85	0.54	0.25	3.99	0.55	0.24
	Mittelwert	0.58	0.18	0.09	0.87	0.26	0.15
90°	Maximum	3.87	0.57	0.23	4.00	0.57	0.20
	Mittelwert	0.61	0.20	0.09	0.89	0.22	0.14

## **5. Diskussion**

In diesem Kapitel sollen die im Kapitel 4. gezeigten Ergebnisse diskutiert und in Relation gesetzt werden.

### **5.1. Der Schlagregenfaktor und seine Ausprägungen im Gsenggraben**

Die Berechnung des SRF galt als Grundlage, um eine den natürlichen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet nahe kommende Gesteinsfeuchtesimulation im WUFI durchführen zu können. Der in der Referenzsimulation im WUFI verwendete SRF von 0,2 gilt als Standardwert, der im Blickwinkel der Bauphysiker bezogen auf die Fasadefeuchtigkeit ermittelt wurde. Da der Schlagregenfaktor mit zunehmender Geländeneigung einen großen Einfluss darauf hat, welche Menge an Feuchtigkeit dem Gestein zugetragen wird, ist es besonders in Gebieten mit höherer Reliefenergie entscheidend, genaue Erkenntnisse über den gebietsspezifischen SRF zu sammeln. Aufgrund der steil abfallenden Felswände sowie der inhomogenen Geländesituation im Untersuchungsgebiet besitzt der SRF eine zentrale Rolle wenn es darum geht, die Simulation der Gesteinsfeuchte sowie der Verwitterungsbedingungen so nahe wie möglich an die realen Bedingungen anzupassen. Ist es von entscheidender Bedeutung, wie sich die Feuchtigkeit im Gestein verhält, so ist es vergleichbar entscheidend, wieviel Feuchtigkeit den Felsen überhaupt erreicht.

#### **5.1.1. Datengrundlage zur Berechnung des SRF**

Die Grundlage zur Erhebung der spezifisch für die Berechnung des SRF notwendigen Daten wurde durch die spezielle Instrumentalisierung des Gsenggrabens mit Messtechniken ermöglicht. Neuartig waren dabei die klimatischen Erhebungen direkt am Felsen, die sich in den Messergebnissen zum Teil deutlich von den Erhebungen der Vaisala Klimastation unterscheiden. Die Daten der Vaisala Station wurden unter den üblichen Bedingungen in der Grabenmitte 2 m über Grund erhoben. Unterschiede waren in erster Linie bei den Messdaten der Parameter Niederschlag sowie Windgeschwindigkeit und –richtung erkennbar. Diese werden in den nächsten Absätzen besprochen.

Die Windgeschwindigkeitsanalyse in Abbildung 19 zeigt eindrucksvoll den Unterschied im Windfeld zwischen der standardisierten klimatischen Messmethode und jener am Felsen. Diese Daten lassen den Schluss zu, dass die Geschwindigkeit des Windes im direkten Umfeld des

Felsen weit aus unter den Windgeschwindigkeiten im Hauptwindfeld des Grabens liegen. Einflüsse wie eine erhöhte Reibung direkt über der Felsoberfläche und so entstehende Verwirbelungen, sowie das im Vergleich zum Hangwindssystem üblicherweise stärker ausgeprägte Tal- bzw. Grabenwindssystem könnten Gründe dafür sein. Von Interesse ist dieser Unterschied im Kontext der Schlagregenberechnung aufgrund der ausgeprägten Abhängigkeit der Schlagregenmenge von der Windgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.2.; Formel der Schlagregenberechnung). Die Abhängigkeit bewirkt, dass eine erhöhte Windgeschwindigkeit eine größere Schlagregenmenge ergibt. Daraus kann aufgrund der Unterschiede zwischen den gemessenen Windgeschwindigkeiten am Fels und in der Grabenmitte der Schluss gezogen werden, dass bei der Verwendung eines Winddatensatzes von standardisierten Messeinrichtungen bei der Berechnung des Schlagregenfaktors der im Gebiet tatsächlich anfallende Schlagregen überschätzt wird. Anzunehmen ist, dass die horizontale Komponente des Regens bei der Annäherung an den Felsen aufgrund des schwächer werdenden Windfeldes abnimmt und so ein geringerer Anteil des Normalniederschlags an die geneigte Oberfläche gelangt.

Der Vergleich der Erhebungen im Graben mit jenen am Fels bezüglich des gemessenen Normalniederschlags ergibt unter Vorbehalt eine geringere Menge an Niederschlag im direkten Umfeld des Felsens (siehe Abbildung 20). Der Vorbehalt beruht auf den aufgetretenen Messunsicherheiten dieses Parameter. Abweichungen zwischen den beiden Messtechniken im Mittel über den gesamten Messzeitraum von 56% können nicht ausschließlich auf die Positionierung der Messinstrumente zurück geführt werden. Insbesondere durch das Heranziehen der Niederschlagsdaten der Station Weidendom zur Validierung der im Zuge dieser Arbeit aufgebauten Sensoren lässt den Schluss zu, dass die Vaisala Klimastation Ungenauigkeiten bei der Messung des Niederschlags besitzt. Daraus folgte, dass der Niederschlagsdatensatz der Vaisala-Station mit Hilfe der Niederschlagswerte der Station Weidendom sowie der Funkwetterstationen, die gut korrelierten, überdurchschnittlich viel bereinigt werden musste. Diese Notwendigkeit hat zur Folge, dass jene Schlagregenberechnungen, die von der Vaisala Klimastation getragen wurden, nicht mehr vollständig genau diesen Standort repräsentieren. Dies betrifft die Berechnungen des SRF in Ost- sowie in Westexposition auf 800m.

Bei der Windrichtungsverteilung, die in Abbildung 18 ersichtlich ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Aufzeichnungen der Vaisalastation die Hauptwindrichtung des Gesenggrabens widerspiegeln. Der Ost-West verlaufende Graben weist wie zu erwarten ein

dieser Orientierung folgendes Hauptwindfeld auf. Entgegen den Erwartungen strömen die Winde jedoch nur ca. zu 3% aus W, jedoch zu 42,1% aus O. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass es sich um ein ausgeprägtes grabenauswärts gerichtetes Windsystem handelt, dass jedoch zeitlich nicht ausschließlich auf die für dieses System üblichen Nachtstunden festgemacht werden kann. Die Situation am Fels stellt sich etwas komplizierter dar. Hier wird das Hauptströmungsfeld des Grabens von den Felsformationen entsprechend ihrer Exposition abgelenkt bzw. überlagert. So erhalten die W- sowie O-exponierten Formationen eine südliche Komponente, die mit einer Umströmung des Hindernisses begründet werden kann, an dem diese montiert wurden. Die Hauptströmungsrichtung der nach Norden orientierten Funkwetterstation aus SW-Richtung kann ebenfalls auf die spezielle Windsituation am Felsen zurückgeführt werden. Dafür spricht die dem Hauptwindfeld des Grabens gegenläufige Strömungskomponente aus Westen.

Die Messungen der Schlagregenfänger ergaben in sich durchwegs plausible Ergebnisse, die den Einsatz dieser Messvariante in dieser Form bestätigen. Es konnte durchwegs eine Zunahme des gesammelten Schlagregens mit abnehmender Neigung verzeichnet werden, deren Unterschiede zwischen  $90^\circ$  und  $75^\circ$  der Theorie entsprechend stärker ausfielen, als jene zwischen  $75^\circ$  und  $60^\circ$ . Der von Künzel (1994a) veranschlagte ausreichend kurze Zeitraum einer adäquaten Schlagregenerhebung wurde weitaus übertroffen. In diesem Zeitraum konnte im Schnitt alle 8,18 Tage der gesammelte Schlagregen ausgelesen werden, wonach eine sichere Datenlage für die Berechnung des SRF garantiert werden kann.

### **5.1.2. Ausprägung des SRF**

Die Erhebungen des gebietsspezifischen Schlagregenfaktors im Gsenggraben, die in Abbildung 37 sowie in Tabelle 14 dargestellt sind, lieferten die Grundlage für die fortschreitende Annäherung der WUFI-Simulationen von Schnepfleitner (2012) an die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Bedingungen. Folgend sollen die Ausprägungen des SRF in den verschiedenen Expositionen und Neigungen sowie die festgestellte Höhenabhängigkeit desselben diskutiert werden.

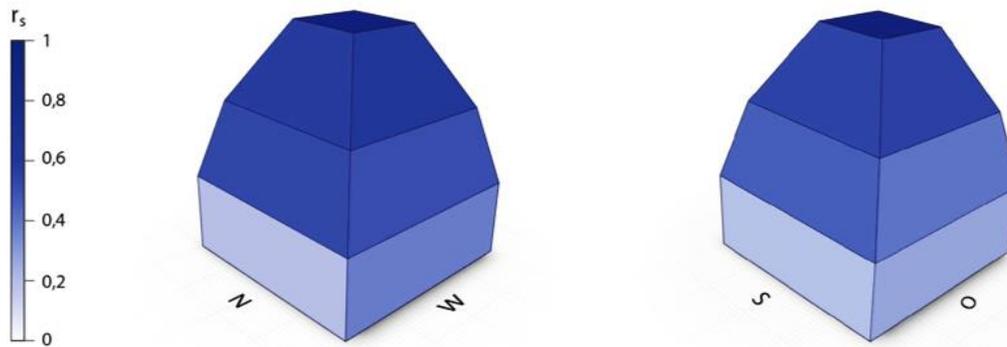


Abbildung 38: Darstellung des Schlagregenfaktors im Gsenggraben an einem idealisierten Objekt mit 90°, 75°, 60° sowie 0° Neigung. Quelle: Eigene Erhebungen

Tabelle 14: Der Schlagregenfaktor  $r_s$  des Gsenggrabens gegliedert nach Neigung und Exposition (Farbliche Abstufungen entsprechen den Ausprägungen des SRF je nach Neigung – Mittel wurde eigens abgestuft). Quelle: Eigene Erhebungen

Grad	N	O	S	W	Mittel
90°	0,21	0,24	0,21	0,37	0,26
75°	0,52	0,40	0,46	0,49	0,47
60°	0,56	0,53	0,54	0,62	0,56

Plausibel ist der Verlauf der Werte mit zunehmender Geländeneigung. Je geringer die Neigung ist, umso größer ist die auf den Felsen eintreffende Niederschlagsmenge. Dies beruht darauf, dass mit flacher werdendem Gelände stetig mehr Niederschlag ohne Horizontalkomponente (Normalniederschlag) auf die Bezugsfläche gelangt. Die Zunahme dieses Anteils kann über den Cosinus der Geländeneigung berechnet werden (siehe Abb. 38).

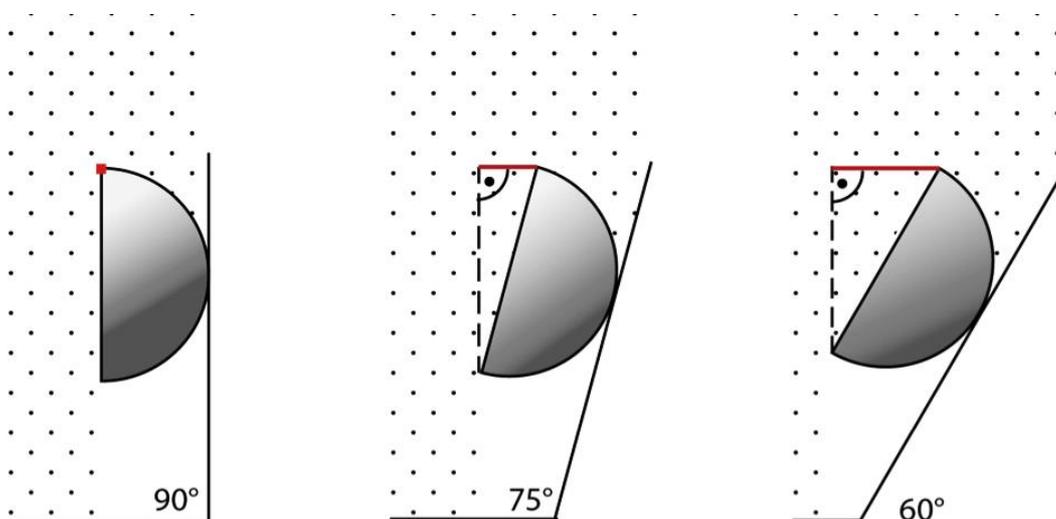


Abbildung 39: Darstellung der Abhängigkeit des Schlagregenfaktors von der Neigung – dargestellt mit den verwendeten Neigungen 90°, 75°, 60°. Quelle: Eigene Erhebungen

Demnach trifft eine Felsoberfläche mit 75° Neigung eine Niederschlagsmenge, die sich aus dem Schlagregen (errechnet bei 90° Geländeneigung) und aus 26% des Normalniederschlags zusammensetzt. Bei 60° gelangen bereits 50% vom Normalniederschlag an die Felswand. Dem entsprechend verhält sich auch der SRF. Den geringsten Wert nimmt dieser bei 90° ein. Bei abnehmender Neigung beginnt dieser zunächst stark zu steigen, da ein Eintreffen des Normalniederschlags auf die Bezugsfläche beginnt. Mit zunehmender Neigung nimmt der Anstieg pro Neigungsabnahme stetig ab. Grund dafür ist die eben genannte Abhängigkeit zum Cosinus, der zur Folge hat, dass die Zunahme des Normalniederschlagsanteils mit flacher werdendem Gelände geringer wird. Diesem exponentiellen Verlauf folgen die Erhebungen des SRF im Gsenggraben im Mittel sehr gut (siehe Tabelle 14). Ein Blick auf Abbildung 25 zeigt genau diese Abhängigkeit des SRF mit der Geländeneigung.

Bei einem Vergleich der SRF der verschiedenen Expositionen kann festgestellt werden, dass die Schwankungsbreite bei 90° sowie 75° gleich groß und jene bei 60° darunter liegt (siehe Tabelle 14). Beträgt diese bei 90° und 75° noch 0,13, verkleinert sich diese bei 60° auf nur mehr 0,09 zwischen W und O. Dieser Verlauf ist auf den größer werdenden Anteil des Normalniederschlags mit abnehmender Geländeneigung zurückzuführen, der bei der Berechnung des SRF berücksichtigt wird. Da die Messung des Normalniederschlags bei einem Vergleich mit jener des Schlagregens geringeren Unsicherheiten unterliegt, ergibt sich eine geringere Schwankung der Werte in den flacheren Geländeneigungen. Die Schwankungsbreite an sich beruht neben den eben besprochenen Messunsicherheiten zu einem großen Teil auf den klimatischen Unterschieden an den verschiedenen Messpunkten. Wie bereits bei der Diskussion über die Ausprägung des SRF in Abhängigkeit der Neigung angesprochen, ergibt sich der SRF durch die Kombination aus Niederschlag sowie Windrichtung und –geschwindigkeit. Da nicht an jedem der 8 Messpunkte im Untersuchungsgebiet zeitgleich klimatische Erhebungen durchgeführt werden konnten, wurde die Verteilung der Messinstrumente wie in Abbildung 8 ersichtlich vom Herbst in das Frühjahr verändert. Diese Veränderung brachte bei der Berechnung des SRF den Umstand mit sich, dass die Daten der notwendigen Parameter von verschiedenen Messstationen zusammengeführt bzw. in Kombination gesetzt werden mussten. Als Beispiel für die Vorgehensweise, soll die Situation an der Nordexposition auf 800 m kurz beschrieben werden. An diesem Messpunkt wurde über den Messzeitraum im Herbst eine Nexus Funkwetterstation direkt am Felsen installiert. Im Frühjahr wurde diese in die obere Höhenlage von 1100 m Seehöhe umgelagert, um die Messungen an der dortigen Nordexposition zu starten. Zur Berechnung des SRF an der nördlichen Exposition auf 800 m mussten deshalb für die Zeitdauer des Frühjahrs jene Werte hinzugezogen werden, die unweit

von dieser Position entfernt von der Vaisala Klimastation aufgezeichnet wurden. So wurden die Faktoren für die Nordexposition auf 800 m im Herbst zu jedem Messintervall mittels der Daten der Funkwetterstation und für den Zeitraum im Frühjahr mittels der Daten der Vaisala Klimastation berechnet und schlussendlich kombiniert. Diese Datenzusammenführung ergibt, dass der so berechnete SRF nicht mehr exakt die Situation am Fels wiedergibt. Da die Erhebungen des Schlagregens und auch zumindest ein Teil der zur Ermittlung des SRF verwendeten klimatischen Erhebungen direkt an der Felsoberfläche erfasst wurden, besitzt dieser Umstand jedoch keine weitreichenden Auswirkungen. Allerdings wird, durch die Kombination der Werte aus den erhobenen Daten der einzelnen Messstationen (4 Nexus Funkwetterstationen sowie die Vaisala Klimastation), ein Rückschluss auf die berechneten SRF schwierig. Grundsätzlich werden im Folgenden deshalb die Ausprägungen der SRF nur mit Hilfe von Daten interpretiert, die von einer Mehrzahl der Messstationen getragen werden und somit allgemeine Tendenzen des Untersuchungsgebiets widerspiegeln. Notwendig dazu ist allerdings stets die Kenntnis darüber, welche Datensätze miteinander kombiniert wurden. Die Tabelle 15 soll eine Übersicht dazu liefern (siehe auch Abbildung 7).

Tabelle 15: Übersicht zur Datengrundlage der SRF-Berechnung – Daten der markierten Station wurden zur Berechnung des jeweiligen SRF herangezogen (N=Nexus Funkwetterstation, V=Vaisala Klimastation). Quelle: Eigener Entwurf

	Messperiode		Herbst					Frühjahr					
	Höhenlage	Exposition	N1	N2	N3	N4	V	N1	N2	N3	N4	V	
Alle Neigungen	800m	N				X						X	
		O					X					X	
		W					X					X	
		S		X									X
	1100m	N	X		X							X	
		O			X						X		
		W	X							X			
		S	X		X				X				

Die unterschiedliche Zunahme des SRF mit der Neigung in den verschiedenen Expositionen ist auf das Wechselspiel zwischen Normalniederschlagsmenge und Windgeschwindigkeit bzw. -richtung zurück zu führen. Bei einem Vergleich der Expositionen N und S besitzen beide einen SRF bei 90° von 0,21. Der Unterschied zwischen diesem SRF und jenem bei 75° ist jedoch bei N deutlich größer als im S. Diese Differenz ist durch einen Vergleich mit den klimatischen Auswertungen in Abbildung 20 sowie Abbildung 27 zu erklären (unter Vorbehalt der im letzten Absatz erwähnten Schwierigkeiten). Hier ist zu sehen, dass die vorherrschende Windrichtung bei Niederschlagsereignissen generell, aber auch explizit an den Süd- und Nordexpositionen

aus Süden stammt. Betrachtet man ergänzend dazu den Niederschlag, erkennt man, dass an der Nordexposition im Schnitt 0,5 mm Normalniederschlag mehr pro Tag registriert wurde als an der gegenüberliegenden Exposition. Dabei standen wie in Kapitel 4.1.2. bereits besprochen 83,28% dieses Niederschlags unter dem Einfluss von Winden mit südlicher Komponente (SO, S sowie SW). Dem gegenüber steht ein Anteil des Niederschlags von lediglich 2,54%, der bei Winden aus dem nördlichen Sektor (NW, N, NO) aufgezeichnet wurde. Setzt man diese Daten in Kombination, so kann behauptet werden, dass der ähnliche SRF an den beiden Expositionen N und S bei 90° durch unterschiedliche Voraussetzungen zustande kam. An der Nordexposition war es die Kombination aus einem hohen Anteil an Normalniederschlag, der nur geringe horizontale Komponenten in die nördliche Richtung erhielt. An der südlichen Exposition war dies genau umgekehrt. Hier wurde zwar weniger Normalniederschlag registriert, dieser stand jedoch unter starkem Einfluss von Winden aus dem entscheidenden südlichen Sektor. Aufgrund der zuvor besprochenen größeren Abhängigkeit des SRF bei 75° vom Normalniederschlag, steigt dieser bei N stärker an als bei S. Aus dieser Erkenntnis kann die größere Differenz des SRF zwischen 90° und 75° in nördlicher Exposition von 0,31 gegenüber jener von 0,25 an der Südexposition, aber auch der generell variable Anstieg des SRF mit abnehmender Neigung abgeleitet werden.

Die ebenfalls untersuchte Höhenabhängigkeit des SRF (siehe auch Abbildung 25) konnte mit Hilfe des zweistöckigen Aufbaus der Untersuchungen im Gsenggraben auf 800 m sowie 1100 m (siehe Abbildung 7) erhoben werden. Über alle Neigungen sowie Expositionen hinweg lag der berechnete SRF auf 1100 m durchwegs über jenen auf 800 m, wodurch sich im Mittel ein Unterschied von 0,11 ergab (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Übersicht der berechneten Höhenabhängigkeit des SRF im Gsenggraben (1100m - 800m). Quelle: Eigene Erhebungen

Neigung	SRF- Höhenabhängigkeit				Mittel (Neigung)
	N	O	S	W	
90°	0,03	-	0,07	0,01	0,04
75°	0,24	0,24	0,00	0,24	0,18
60°	0,17	0,25	0,01	-0,01	0,10
Mittel (Exposition)	0,14	0,25	0,03	0,08	0,11

Der Grund für fehlende Daten der Höhenabhängigkeit bei O90° ist eine Ausklammerung des SRF O90° auf 800 m aus jeglichen weiterführenden Berechnungen. Dieser Umstand resultierte aus den bereits angesprochenen Messungenauigkeiten der Vaisala Klimastation. Trotz

allgemein guter Ergebnisse sind all jene Positionen kritisch zu hinterfragen, deren SRF ausschließlich mit Hilfe dieser Daten berechnet wurden (siehe Tabelle 15). Bei der allgemeinen Überprüfung der Ergebnisse, bei der diese in Bezug zu den erforderlichen Gesetzmäßigkeiten gesetzt wurden, konnte die Ostexposition (800 m) dem Vergleich nicht standhalten. Scheinen die Werte an dieser Position bei 75° sowie 60° dem Werteumfeld und der Sinnhaftigkeit entsprechend, so fällt der berechnete SRF bei 090° auf 800 m mit 0,07 aus der Reihe. Sowohl dessen Pendant auf 1100 m, als auch die restlichen SRF bei 90° liegen weit über diesem Wert. Folglich wurde dieser SRF aus den weiterführenden Berechnungen ausgeschlossen, um ein Verfälschen der aufbauenden Ergebnisse zu verhindern. Folglich wird der allgemeine SRF bei 090° durch die Ergebnisse von den plausiblen am Fels erhobenen Daten auf 1100 m gestützt. Eine Höhenabhängigkeit an dieser einen Position kann deshalb nicht eruiert werden.

Insgesamt interagiert durch den im Untersuchungsgebiet erhobenen SRF von 0,26 eine im Vergleich zur Referenzsimulation 30% höhere Schlagregenmenge mit der geneigten Felsfläche. Die Abbildung 39 verdeutlicht die simulierte Schlagregenmenge an einem idealisierten Objekt. Wie bereits auch der SRF besitzt die Menge an Schlagregen eine ausgeprägte Expositionsabhängigkeit, wobei die Westexposition die höchsten Werte besitzt. Von hoher zu niedriger Schlagregenmenge reihen sich die Expositionen wie folgt: W-O-S-N.

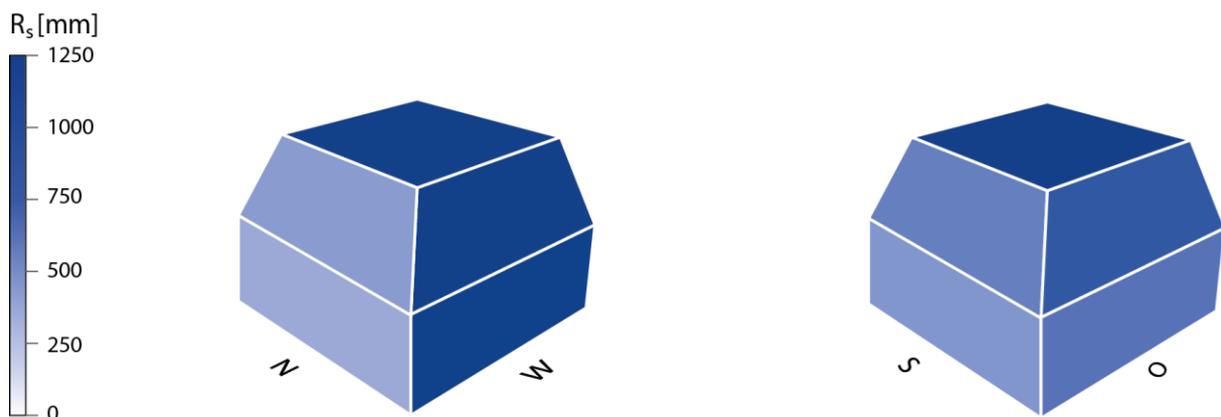


Abbildung 40: Darstellung der simulierten Schlagregenmenge an einem idealisierten Objekt mit 90°, 70° sowie 0° Neigung. Quelle: Eigene Erhebungen

## 5.2. Die hygrothermischen Gesteinsbedingungen

Die Simulationen der hygrothermischen Bedingungen im Gestein wurden stets auf Basis der von Schnepfleitner (2012) erhobenen Datengrundlage, die als Referenzsimulation fungierte, durchgeführt. Um eine Anpassung dieser an die natürlichen Bedingungen im

Untersuchungsgebiet vorzunehmen, wurde diese mit dem erhobenen gebietsspezifischen SRF sowie mit dem im ESCIMO.spread modellierten Schneeeinfluss ergänzt. Um die Auswirkungen dieser beiden Veränderungen auf die Referenzsimulation zu eruieren, wurden zunächst Einzelsimulationen mit jeweils nur einem veränderten Parameter durchgeführt. Darauf aufbauend konnte die Gesteinsfeuchte mit Hilfe der oben genannten Anpassungen entsprechend der im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Bedingungen im WUFI simuliert werden.

Während die Veränderung des SRF im WUFI programmintern unterstützt wird, musste die Adaptierung des Schneeeinflusses programmextern erfolgen (beschrieben in Kapitel 3.5.4.). Die dadurch entstandene, um den Schneeeinfluss erweiterte Klimadatei der WUFI-Simulation ermöglichte es, die fehlende Berücksichtigung des als Schnee fallenden Niederschlags im WUFI in dessen Simulationen zu integrieren. Dieser Schritt stellte die programminternen Berechnungen jedoch vor die ungewöhnliche Aufgabe, dass in den Wintermonaten bei hoher Sonneneinstrahlung aufgrund der eintretenden Schneeschmelze ein Feuchtigkeitszuwachs an der Gesteinsoberfläche eintrat. Dies steht in Widerspruch zu den internen Berechnungen im WUFI, bei denen davon ausgegangen wird, dass eine Strahlungszunahme mit einer von der Oberfläche ausgehenden Austrocknung des Gesteins einhergeht. Die erhöhte Berechnungsdauer eines Simulationsdurchgangs zeugte gemeinsam mit dem erhöhten Fehlerwert von dieser Diskrepanz. Um Fehlberechnungen vorzubeugen, wurde bei den Simulationen die adaptive Zeitschrittsteuerung aktiviert, die bei Berechnungsschwierigkeiten den jeweiligen Rechenschritt in verkürzten Zeitschritten wiederholt. Allgemein können die Ergebnisse aus den schneebeeinflussten Simulationen jedoch als plausibel bewertet werden. Beim Vergleich der Referenzsimulation mit der *SV SRF* zeigte sich ein stimmiges Bild, welches in keiner der unzähligen Datenanalysen Unstimmigkeiten erkennen lies. Die veränderten Temperatur- sowie Strahlungsbedingungen unterhalb der Schneedecke wurden in der Klimadatei für die vom Schnee beeinflussten WUFI-Simulationen nicht berücksichtigt. Grund dafür war der Ausfall des Schneemonitorings, wodurch eine adäquate Beurteilung über die Ausprägung der Schneedecke bei den simulierten Geländeneigungen 70° und 90° nicht möglich war. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei 90° keine sowie bei 70° keine durchgehende Schneedecke an den zu untersuchenden Felsformationen gebildet wird, wodurch die Simulationen mit Schneeeinfluss als realitätsnah eingestuft werden können.

Um die Simulation der hygrothermischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet an die dortigen Bedingungen anzupassen, wurde bei den Simulationsvarianten *SRF* sowie

*Schnee+SRF* der im Zuge dieser Arbeit erhobene SRF von 0,26 verwendet. Dies führte zu einer Anhebung des SRF von 0,06 im Vergleich zur Referenzsimulation, bei der der programminterne Standardwert von 0,2 herangezogen wurde.

Für die Feuchtigkeit im simulierten System bedeuten die Veränderungen durch die Annäherung an die natürlichen Bedingungen im Untersuchungsgebiet einen Anstieg der Feuchtigkeitsmenge, die der Gesteinsfeuchtesimulation zur Verfügung gestellt wird. Explizit handelt es sich bei den Simulationen der Simulationsvariante *Schnee* um  $168 \text{ l/m}^2$ , und bei der Simulationsvariante *SRF* um  $73 \text{ l/m}^2$  mehr Feuchtigkeit im System im Vergleich zur Referenzsimulation. In den folgenden Kapiteln werden die Veränderungen auf das hygrothermische Verhalten im Gestein, die sich durch die Anpassungen der WUFI-Simulation ergeben, diskutiert. Dabei liegt der Fokus auf den relevanten Unterschieden in den Simulationsvarianten. Auf die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten wird, falls für den Vergleich nicht notwendig, nicht mehr eingegangen. Diese sind in der Arbeit von Schnepfleitner (2012) bereits ausführlich beschrieben und können deshalb dort nachgelesen werden.

### **5.2.1. Veränderung der hygrischen Gesteinsbedingungen**

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen auf die simulierte Gesteinsfeuchte diskutiert, die sich durch die Anpassung an die natürlichen Verhältnisse im Gsenggraben ergeben. Einführend dazu soll erwähnt sein, dass jegliche Expositionsunterschiede der Gesteinsfeuchte im Untersuchungsgebiet zu einem überwiegenden Teil auf den Schlagregen zurück zu führen sind. Strahlungsbedingte Expositionsunterschiede belaufen sich in den für diesen Parameter entscheidenden äußeren Felsbereich nur auf 1,8% (Schnepfleitner, 2012). Generell kann im Jahresverlauf eine Zunahme der Porensättigung bei allen Simulationsvarianten im Vergleich zur Referenzsimulation festgestellt werden. Der in Abbildung 40 dargestellte Vergleich zeigt, dass diese Zunahme jedoch im Jahresgang als auch in der Menge unterschiedlich ausfällt.

Die Porensättigung der Variante *SRF* befindet sich im Jahresmittel 2,70% über der Referenz. Diese Zunahme begründet auf einer über das Jahr hinweg geringen, sehr konstant höheren Porensättigung, die sich im sehr homogenen Jahresverlauf der beiden Simulationen zeigt. Grund dafür ist der höhere SRF der Simulation *SRF*, der für einen höheren Zutrag an Feuchtigkeit an die geneigte Felsformation sorgt. Bei genauer Betrachtung sind zunehmende Unterschiede Ende Jänner bis Anfang Februar bzw. beim Minimum der Porensättigung Ende August zu erkennen, die stets auf eine langsamere Austrocknung des Gesteins zurückzuführen

sind. Aufgrund des höheren Anteils des Normalniederschlags der die geneigte Fläche erreicht, steigt in Folge dessen auch die Porensättigung des gesamten Gesteinskörpers über einen längeren Zeitraum stärker an. Da die tieferen Felsbereiche träge bis gar nicht auf klimatische Trockenphasen reagieren, gleichen die generell höheren Werte im Gesteinsinneren der Simulationsvariante *SRF* die Austrocknung der Oberflächen nahen Gesteinsschichten besser aus. Die Folge ist die angesprochene im Mittel über alle Felstiefen trägere Austrocknung der Simulation *SRF* im Vergleich zur Referenzsimulation.

Größere Unterschiede im Jahresverlauf zur Referenzsimulation weist die Simulation *Schnee* auf. Neben der generell höheren Porensättigung von 77,91% im Jahresmittel weicht der Jahresgang der Porensättigung besonders im WHJ von jenem der Referenzsimulation ab. Ist der Verlauf im SHJ vor allem im Vergleich mit der Simulation *SRF* noch sehr ähnlich, fällt der Winter deutlich unausgeglichener in Erscheinung. Dieser Umstand beruht auf einer Temperaturgrenze von WUFI, die Niederschlagswerte unterhalb von 0°C nicht in die Berechnung mit einbezieht. Die Folge ist ein Unterschätzen der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit. Dieser Umstand wurde bei der Simulationsvariante *Schnee* durch die Implementierung der Ergebnisse aus der Schneemodellierung umgangen. Die Schneemodellierung im ESCIMO.spread berechnete den Anteil des Normalniederschlags bei Temperaturen unter 0°C als Schnee und ließ folglich die Mächtigkeit der Schneedecke anwachsen. Die darin enthaltene Wassermenge wird darin solange gespeichert, bis aufgrund von hoher Einstrahlung die Schneedecke wieder schmilzt. Durch die Modellierung entstehen zwei Datensätze. Zum einen eine Niederschlagszeitreihe, die nur den flüssigen Niederschlag enthält. Zum anderen die Zeitreihe der Schneeschmelze. Beide enthalten aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeit nur Ereignisse bei positiven Temperaturen, die gemeinsam eine Flüssigkeitsmenge ergeben, die dem Gebietsniederschlag entspricht. Diese beiden Datensätze wurden addiert und der WUFI-Simulation als Niederschlag zur Verfügung gestellt. Dadurch steht die gesamte Feuchtigkeitsmenge des Untersuchungsgebiets der Feuchtesimulation zur Verfügung. Zusätzlich werden durch die adaptierte Niederschlagsreihe, in der die Schneeeinflüsse integriert wurden, die natürlichen Feuchtigkeitsbedingungen an der Grenze zum Gestein realitätsnäher dargestellt. Die Folge ist eine zur Referenzsimulation höhere Feuchtigkeitsmenge in den Wintermonaten, die von WUFI für die Gesteinsfeuchtesimulation berücksichtigt wird. Bei gezielter Betrachtung des WHJ kann deshalb über alle simulierten Positionen ein erhöhter Porensättigungsgrad festgestellt werden. Im Mittel liegt dieser bei 75,18% und somit 3,68% über der Referenzsimulation. Der große Vorteil dieser Methodik liegt darin, die vorherrschenden Bedingungen im Untersuchungsgebiet beizubehalten. Man könnte

unter anderem zwar durch die Anhebung der Temperatur in jenen Zeitschritten, in denen Niederschlag unter 0°C fällt, die gesamte Feuchtigkeitsmenge im WUFI einfließen lassen, jedoch nur auf Kosten der Realitätstreue eines anderen Parameters und ohne die Speicherfunktion der Schneedecke und ihre Auswirkungen zu berücksichtigen.

Beim Zusammenführen der beiden veränderten Faktoren in einer Simulation zeigt sich ein interessantes Bild. So spiegelt das WHJ generell den Schneeeinfluss wieder, sowie der Sommer den gewohnt ähnlichen Verlauf. Jedoch kann nicht eine einfache Kombination der Ergebnisse der beiden Einzelsimulationen festgestellt werden. Dies soll am anschaulichen Beispiel des in Abbildung 39 dargestellten Vergleichs dargelegt werden. Das sehr ähnlich simulierte SHJ unterscheidet sich im Parameter Porensättigung zwischen der Referenzsimulation und der Variante *SRF* um 3,73%. Etwas darüber liegt der Unterschied mit 3,96% bei einem Vergleich mit der Simulation *Schnee*. Nach Kombination des Schneeeinflusses und des ermittelten *SRF* konnte sich die Porensättigung im SHJ jedoch an die Werte der Referenzsimulation annähern und verzeichnete nur noch einen Unterschied von 2,65%. Anhand dieses Beispiels kann gezeigt werden, dass die Wechselwirkungen im simulierten System nicht einfach durch Kombination der Einzelergebnisse dargestellt werden kann. Schlussendlich kann eine Porensättigung über das Jahr hinweg ausgemacht werden, die im WHJ zwischen den Ergebnissen der Varianten *SRF* sowie *Schnee* liegt und im SHJ darunter. Die Ergebnisse zeigen weiters, welchen großen Einfluss der Schnee auf den Jahresgang der Porensättigung bzw. der Gesteinsfeuchte besitzt.

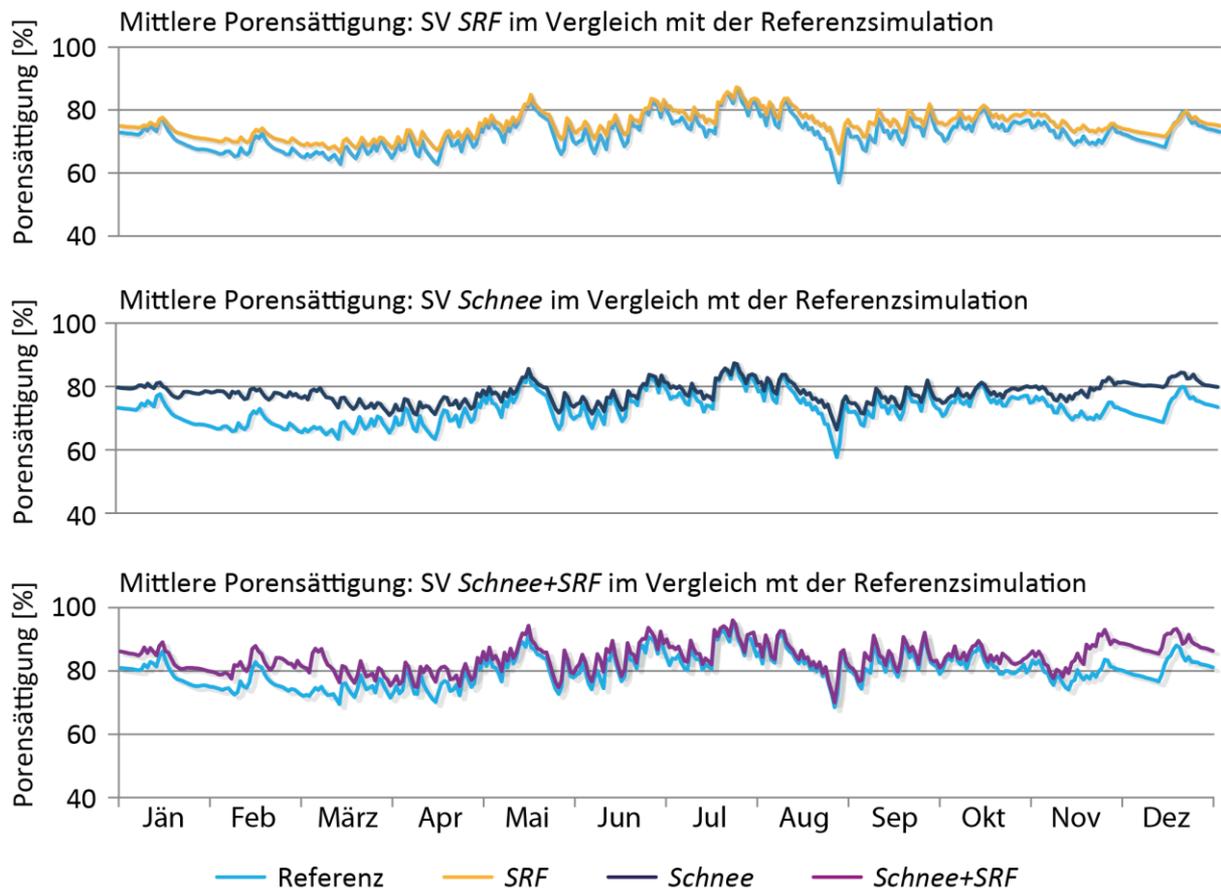


Abbildung 41: Jahresgang der mittleren Porensättigung im Dolomit des Untersuchungsgebiets (Mittelwert der Porensättigung über die Neigungen, Expositionen und Tiefen) - Vergleich der Simulationsvarianten (SV). Quelle: Eigene Erhebungen

Der angestellte Vergleich der Porensättigung in Abhängigkeit der Felstiefe in Abbildung 41 wird aufgrund der ständigen und starken Winde aus Westen, die bei dem für die WUFI-Simulation verwendetem Klima auftreten, beispielhaft anhand der Exposition W gezeigt. Bei einer Gegenüberstellung der Simulationsvariante *SRF* mit der Referenzsimulation ist ein deutlicher Unterschied in dem äußeren Felsbereich zu erkennen. Hier kann eine schnellere Abnahme der Schwankungsbreite der Porensättigung mit zunehmender Felstiefe erkannt werden. Der Grund liegt in den geringeren Minima der ersten Gesteinsschichten, die durch den höheren Feuchteintrag aufgrund des höheren *SRF* entstehen. Der Felsen trocknet demnach mit zunehmender Tiefe weniger stark aus. Der Verlauf der Maxima ist dem gegenüber sehr ähnlich. Die generell höhere Feuchtigkeit der Simulation *SRF*, die ein Resultat der größeren Schlagregenmenge ist, wirken sich demnach entscheidend auf die Porensättigung in der äußersten Gesteinsschicht aus. Am stärksten bei den der Hauptwindrichtungen entgegen gerichteten Expositionen W sowie O. So beträgt der Sättigungsgrad bei dem gezeigten Beispiel in Abbildung 41 ( $W90^\circ$ ) in den Felstiefen von 1 bis 5 cm der Simulation *SRF* bereits bei 75,14

% . Dieser Wert liegt nur mehr 4,18% unter dem Sättigungsgrad im Bereich von 20 bis 50 cm Felstiefe. Im Vergleich dazu beträgt der Unterschied zwischen der oberflächennahen und der tiefen Gesteinsschichten der Referenzsimulation 6,71%. Die allgemeine Anhebung der Porensättigung (2,70%) durch den veränderten SRF ist in den geringen Felstiefen demnach stärker als jene im inneren Felsbereich. Es kann allgemein festgestellt werden, dass die Felsschicht nahe der Oberfläche in westexponierter Lage bei 90° am stärksten auf den erhöhten SRF reagiert. Weitere Unterschiede zeigen sich zudem bei einem Vergleich zwischen den Simulationen bei der Differenz der mittleren Porensättigung zwischen 70° und 90° in den größeren Felstiefen. Dieser beträgt bei der Simulationsvariante *SRF* im Mittel 15,66%, womit diese um 1,84% größer ist. Der Grund dafür liegt jedoch bereits nahe der Oberfläche. Durch die in Abbildung 41 ersichtliche Unregelmäßigkeit im Verlauf der mittleren Porensättigung bei 90° entsteht bereits in diesem Bereich die angesprochene größere Differenz, die sich bis in die tieferen Felsbereiche fortsetzt.

Die Simulation *Schnee* bringt ähnliche Verläufe der Porensättigung mit der Felstiefe wie jene der Variante *SRF*. Ebenfalls ist eine geringe Tiefe der von der Oberfläche eindringenden Austrocknung zu erkennen. Auch die bereits angesprochene Unregelmäßigkeit des Verlaufs bei 90° mit der daraus resultierenden großen Differenz zwischen 90° und 70° tritt bei dieser Simulation auf. Generell liegen jedoch die Mittelwerte der Porensättigung noch höher. Die Feuchtigkeitswerte der rein vom Schnee beeinflussten Simulation erzielen die höchsten Porensättigungen über den gesamten Simulationsbereich in allen Variationen. Im Vergleich mit der Referenzsimulation liegen diese bei einer Gesteinstiefe von 1-5 cm im Mittel um 5,02%, im Mittel der Tiefen von 20-50cm um 2,55% höher. Dies zeigt erneut die höhere Resonanz der äußeren Gesteinsschicht auf die Veränderung im Vergleich zu Referenzsimulation. Wobei die Porensättigungen bei 70° mehr Reaktion auf den höheren Feuchteintrag durch die Berücksichtigung des Schnees zeigen als jene bei 90°. Der Grund liegt hier darin, dass der SRF unverändert geblieben ist und somit die erhöhte Feuchte im Gestein nicht auf vermehrten Schlagregen, sondern auf die generell größere Menge an Feuchtigkeit, die WUFI bei dieser Simulationsvariante berücksichtigt, zurückzuführen ist. Da der Anteil des Normalniederschlags, der auf die Felsoberfläche trifft mit abnehmender Neigung steigt (siehe dazu Abbildung 38), reagiert demnach die Geländeneigung von 70° deutlicher auf den Schneeeinfluss als jene bei 90°. Weiterführend betrifft dies auch die Unterschiede in der Exposition, die dadurch weniger von den vorherrschenden Winden bei Niederschlagsereignissen abhängig sind als bei der Simulation *SRF*.

Betrachtet man nun abschließend dazu die Profile der Porensättigung der Simulation *SRF+Schnee*, so kann eine Annäherung an die Referenzsimulation im Vergleich zu den beiden anderen Simulationsvarianten in den ersten beiden Zentimeter im Felsbereich festgestellt werden. Die Abbildung 41 zeigt hier vor allem einen ähnlichen Verlauf bei 90° Neigung.

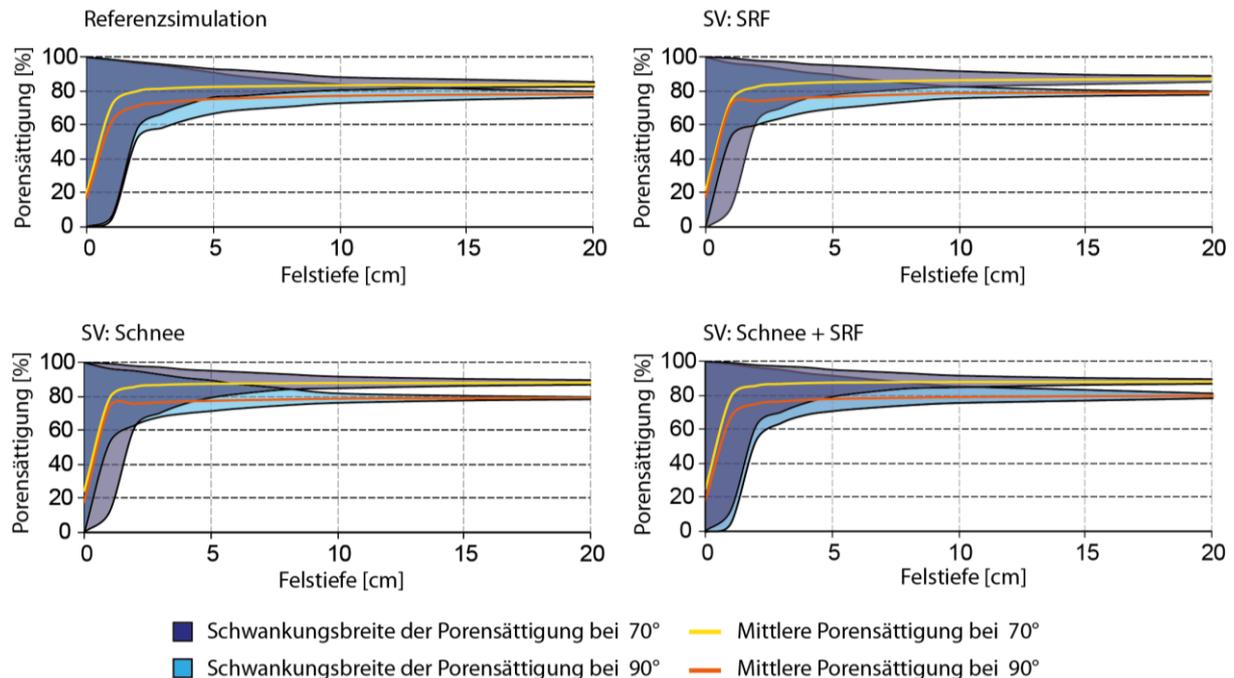


Abbildung 42: Profile der Porensättigung der Simulationsvarianten in westlicher Position im Vergleich (Dolomit).  
Quelle: Eigene Erhebungen

Im Mittel liegt der Bereich von 1 bis 5 cm jedoch noch um 4,8% über der Sättigung der Referenzsimulation. Somit liegen die Ergebnisse in diesem Bereich des Gesteins in einem Bereich zwischen jenen der *SV SRF* sowie *SV Schnee*. Die Porensättigung im hinteren Felsenbereich liegt mit einem Mittel von 87,51% im Bereich von 20 bis 50 cm im höchsten Sättigungsbereich aller Simulationen. Betrachtet man die Neigungen getrennt voneinander, so reagiert die Porensättigung von 70° stärker als jene bei 90° auf die Veränderung des SRF sowie die Implementierung des Schneesinflusses. Dies kann mit einer dominierenden Rolle des Schnees auf die Gesteinsfeuchte begründet werden, da auch die Simulation *Schnee* vor allem Reaktionen bei dieser Neigung zeigte. Die Verhältnisse der unterschiedlichen Expositionen besitzen einen ähnlichen Trend. Zwar sind die Maxima der Porensättigungen noch in den windexponierten Felsformationen W sowie O zu erkennen, jedoch ist der Unterschied nicht mehr so ausgeprägt wie noch bei der Simulation *SRF*. Begründet liegt diese Tatsache in der Menge an durch die einzelnen Veränderungen der WUFI-Simulation zusätzlich in das

Felssystem eingebrachten Feuchtigkeit. Vergleicht man diese, wird durch die Berücksichtigung des Schneeeinflusses und des daraus folgenden Umgehens der 0°C Grenze bei Niederschlagsereignissen um 94,55 l/m<sup>2</sup> mehr an Feuchtigkeit in das System eingebracht als durch die Anhebung des SRF auf 0,26. Diese Gewichtung ist folglich auch in den Ergebnissen der Simulationen festzustellen.

### **5.2.2. Veränderung der thermischen Gesteinsbedingungen**

Nachfolgend werden die veränderten Temperaturbedingungen im Gestein durch die Anpassung der WUFI-Simulation an die natürlichen klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet besprochen. In Summe kann generell ein sehr homogenes Bild über den Jahresverlauf der Temperatur in allen Simulationsvarianten gezeichnet werden (siehe dazu Abbildung 31). Unterschiede, die sich durch die Felstiefe, die Geländeneigung sowie der Exposition ergeben, besitzen durchwegs den gleichen Verlauf. So wird bei der Betrachtung der Temperatur mit der Gesteinstiefe eine Abnahme der Temperatur mit zunehmender Felstiefe erkannt. Der Unterschied zwischen den Expositionen zeigt, dass die Temperaturen bei 70° höher sind als bei 90°, wobei die Unterschiede in der Geländeneigung bei 90° höher als bei 70° sind. Die südlichen Expositionen stellen zudem die höchsten und jene mit nördlicher Exposition die geringsten Werte. Wie bereits in Kapitel 4.3.2. beschrieben nehmen die Positionen der Ost- sowie Westexposition die mittleren Temperaturwerte ein. Dabei kann festgestellt werden, dass die Unterschiede im WHJ zwischen den Expositionen größer sind als jene im SHJ. Somit kann resümiert werden, dass die wärmste Position an der Südexposition bei einer Neigung von 70° an der Gesteinsoberfläche zu finden sind. Dem gegenüber stehen die tiefen Felsbereiche der nördlich exponierten Position bei 90°. Dies ist klimatisch vor allem auf die Sonneneinstrahlung zurückzuführen. Diese ist in den Südexpositionen im Jahresmittel am höchsten und im Norden am geringsten. Zudem erreicht die 70° geneigten Flächen eine höhere Strahlungsleistung sowie erhöht sich die Differenz des Strahlungseintrags zwischen Nord und Süd im Winter. Im Untersuchungsgebiet werden im Jahresmittel an der Position S90° 945 kW/h und nur 410 kW/h bei N90° registriert. Dementsprechend höher sind die Werte bei S70° von ca. 1117 kW/h und 463 kW/h bei N70°. Die Temperaturverhältnisse des Gesteins verlaufen demnach dem Strahlungseintrag entsprechend.

Im Folgenden soll nun auf die verwitterungsrelevanten Temperaturbedingungen eingegangen werden. Die in Kapitel 4.3.2. enthaltenen Abbildungen beinhalten dahingehend die nötigen Informationen, um auch einen Vergleich zwischen den Simulationsvarianten anstellen zu können. Deshalb wird auf eine erneute Darstellung der Ergebnisse an dieser Stelle verzichtet

und stets auf die im Ergebnisteil befindlichen Grafiken verwiesen. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Gegenüberstellung der Exposition N und S als ausreichend empfunden wurde, um die temperaturabhängigen Verwitterungsparameter adäquat zu diskutieren, da die beiden anderen Expositionen stets Werte dazwischen einnehmen. Zudem wird aufgrund des einheitlichen Bildes der Temperaturprofile die Situation im Felseninneren durchgehend anhand der Tiefen 0 cm (Oberfläche), 10 cm sowie 50 cm besprochen.

Das für die folgende Diskussion entscheidende Verhalten der Temperatur mit der Gesteinstiefe wird neben dem Energieeintrag der Strahlung an der Oberfläche durch das vorherrschende Profil der Gesteinsfeuchte beeinflusst. So nehmen die Wärmeleitfähigkeit sowie die konvektive Wärmeübertragung mit zunehmender Porensättigung zu. Aufgrund dessen, dass über den erhöhten SRF sowie der Berücksichtigung des Schneeinflusses nur Änderungen des Feuchteintrags in das simulierte System vorgenommen wurden, sind die Unterschiede zwischen den Simulationsvarianten im Temperaturprofil stets von der unterschiedlichen Gesteinsfeuchte gesteuert. Der Umstand, dass die Jahregänge der Temperaturen durchwegs in jenen Monaten den größten Unterschied zur Referenzsimulation aufweisen, in denen sich auch die Porensättigung am auffälligsten unterscheidet, bestätigt diese Annahme.

Die Dauer des im Gestein auftretenden Frosts, der vorwiegend von der Exposition und demnach zu einem großen Teil vom Strahlungseintrag abhängig ist, wird durch die Anhebung des SRF nur marginal beeinflusst (siehe Abbildung 32). Die bereits angesprochenen geringen Unterschiede der Gesteinsfeuchte reichen nicht aus, um die Frostdauer in den verschiedenen Expositionen und Neigungen zu beeinflussen. Auch die Abhängigkeit mit der Felstiefe bleibt im Vergleich zur Referenzsimulation bei der Simulationsvariante *SRF* erhalten. Hier kann eine Zunahme der Frostdauer mit der Tiefe in Nordexpositionen und eine Abnahme dieser in Südexpositionen festgestellt werden. Um eine genauere Aussage über die Ausprägung dieses Parameters treffen zu können, wurden die Froststunden in drei Bereiche unterteilt. So wurde zwischen den Frostbereichen von 0°C bis >-5°C, von -5° bis >-10°C sowie jenen Bereichen ab -10° und darunter unterschieden. Jedoch konnte dadurch kaum ein Unterschied ausgemacht werden. Die Schlussfolgerung ist, dass die Zunahme der Feuchtigkeit im System von 73 l/m<sup>2</sup> nicht ausreicht, um einen entscheidenden Einfluss auf die Frostdauer zu erwirken.

Größeren Einfluss auf die Frostdauer besitzt die Berücksichtigung des Schnees, wie ein Vergleich der Referenzsimulation mit der Simulationsvariante *Schnee* an den Expositionen N und S zeigt. Hier kann eine generelle Abnahme der Frostdauer von 1221,2 Stunden (50,88 Tage) registriert werden. Dies bedeutet eine Abnahme von 4,44%. Dabei steigt die Abnahme

mit zunehmender Felstiefe an der Nordexposition. Die Südexposition verhält sich genau umgekehrt. Daraus resultiert eine Glättung des Verlaufs mit der Tiefe in beiden Expositionen (siehe Abbildung 32). Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Frostdauer in den höheren Temperaturen im Bereich von  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $>-5^{\circ}\text{C}$  sogar leicht steigt. Die größte Abnahme ist im Temperaturbereich von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $>-10^{\circ}\text{C}$  zu verzeichnen. Alleine in diesem Bereich nimmt die Frostdauer um 1533 Stunden (63,88 Tage) oder 31,66% ab. Die Fröste mit Temperaturen unter  $-10^{\circ}\text{C}$  gehen an der Südseite in 10 cm Tiefe generell verloren. Demnach ist ein genereller Ruck der Temperaturen in höhere Temperaturbereiche zu vermerken, der auf den höheren Porensättigungsgrad durch den Schneeeinfluss zurück zu führen ist. Es entsteht dabei ein erhöhter Flüssigkeitsstrom in das Gesteinsinnere wodurch die konvektive Wärmeübertragung vermehrt Energie in den Felsen transportiert. Da 67% der Frostdauer der Referenzsimulation im oberen Segment nahe der  $0^{\circ}\text{C}$  lagen, wirkt sich eine geringe Temperaturzunahme bereits auf die Summe der Frostdauer aus.

Die Kombination des erhöhten SRF sowie des Schneeeinflusses in der Simulationsvariante *Schnee+SRF* zeigt folglich ein vom Feuchteeintrag des Schnees geprägtes Bild. Generell ist ein erneuter Trend zu verzeichnen, dass der erhöhte SRF die Simulation *SRF+Schnee* im Vergleich zur Variante *Schnee* in Richtung der Referenzsimulation bringt. Trotzdem ist der Schneeeinfluss der dominante Faktor, wodurch die Frostdauer in allen Bereichen jener der Simulationsvariante *Schnee* sehr ähnlich ist (siehe Abbildung 32). Im Vergleich zur Referenzsimulation kann eine Abnahme der Frostdauer von 4,16% (1147,2 Stunden) festgestellt werden. Diese ist mit 1490 Stunden im Bereich von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $>-10^{\circ}\text{C}$  am stärksten. Die geringere Dauer von 152,2 Stunden Frost im Temperaturbereich unter  $-10^{\circ}\text{C}$  bedeutet eine Abnahme von 30,99% in diesem Frostbereich. Wie auch schon zuvor steigt die Dauer der Frostereignisse zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $>-5^{\circ}\text{C}$  leicht um 2,70% an.

Das Verhalten der Simulationsvarianten bezüglich der auftretenden Frosttiefe erbringt ein ausgeglichenes Bild, das in Abbildung 33 erkennbar ist. Der Vergleich zur Referenzsimulation zeigt über alle Simulationen, dass die Schwankungsbreite der mittleren Frosttiefen lediglich  $0,24^{\circ}\text{C}$  beträgt. So bleibt durch den erhöhten hygri-schen Einfluss der durchwegs anzutreffende Verlauf der Frosttiefe mit der Gesteinstiefe stets erhalten. Die Minima verbleiben in den größeren Felstiefen genauso wie die Maxima in den Mittleren. Ebenso ergeben sich bei den nördlichen Expositionen weiterhin geringere Temperaturen sowie eine geringere Schwankungsbreite der Frosttiefe als bei den südlichen. Betrachtet man die einzelnen Simulationen im Vergleich zur Referenzsimulation, so ist jedoch ein gegenläufiger

Temperaturtrend durch die beiden vorgenommenen Adaptierungen auszumachen, der an dieser Stelle aufgegriffen und diskutiert werden soll.

So wird der im Vergleich zur Referenzsimulation erhöhte Einfluss der Schlagregenmenge in der Simulationsvariante *SRF* auch in den Ausprägungen der Frosttiefe erkannt. Weichen die Ergebnisse bei einer Geländeneigung von 70° kaum voneinander ab, kann bei der vom Schlagregen abhängigen Neigung von 90° eine im Mittel um 0,23°C tieferen Temperatur der Fröste festgestellt werden. Die betroffenen Bereiche befinden sich dabei bei nördlicher Exposition vor allem in den tieferen Felsbereichen wohingegen bei einer südlichen Exposition die mittleren Felstiefen betroffen sind. So sinkt die Frosttemperatur bei N90° in einer Felstiefe von 50 cm im Mittel um 0,65°C auf -4,02°C wohingegen in dieser Tiefe bei S90° kein Unterschied zur Referenzsimulation festgestellt werden kann. Die Abnahme der Frosttemperatur in einer Felstiefe von 10 cm verhält sich dazu expositionsabhängig gegenläufig. So kann in dieser Tiefe eine höhere Differenz bei S90° ausgemacht werden als bei N90°, die durch einen Abfall von zuvor -1,8°C auf -2,26°C in der Südexposition um 0,21°C stärker ausfällt. Es kann demnach festgestellt werden, dass der erhöhte SRF die Forsttiefe bei 90° im Mittel über die Felstiefen in niedrigere Temperaturbereiche absenkt. Die Abhängigkeit der Frosttiefe mit der Felstiefe wird jedoch an den nördlichen Expositionen verstärkt und in den Südexpositionen gedämpft.

Der Schneeeinfluss, der mit Hilfe der Simulationsvariante *Schnee* ermittelt wurde, erzeugt im Vergleich zur Variante *SRF* nahezu keine neigungsbedingten Unterschiede im Vergleich zur Referenzsimulation (siehe Abbildung 33). Der Grund liegt im identen SRF der beiden Varianten. Generell zeigt die Frosttiefe eine einheitliche Reaktion auf den Schneeeinfluss in den oberflächennahen Felsbereichen. Hier steigen die Temperaturen über alle Positionen hinweg an. Die größte Abweichung zur Referenzsimulation zeigt dabei die Oberfläche bei N70°. Hier kann ein Anstieg von 0,17°C auf eine Frosttiefe von -2,1°C erkannt werden. Abgesehen davon zeigen sich in erster Linie expositionsabhängige Einflüsse durch die Berücksichtigung des Schnees. Zeigt sich bei den beiden verglichenen Simulationsvarianten in den nördlichen Expositionen in den Felstiefen 10 cm sowie 50 cm nahezu dieselbe Frosttiefe, so können an der Südexposition auch in diesen Felstiefen Einflüsse des Schnees erkannt werden. Diese zeigt sich in einer um 0,4°C tiefer bzw. einer um 0,65°C höher liegenden Frosttemperatur bei 10 cm bzw. 50 cm Felstiefe. Wobei die Unterschiede bei einer Geländeneigung von 90° etwas stärker ausfällt als bei 70°. Das Resultat sind geringere Unterschiede der Frosttiefe mit der Felstiefe in allen Neigungen und Expositionen, wobei dieser Ausgleich im Süden stärker

ausgeprägt ist als jener im Norden. Generell hebt sich dadurch die mittlere Frosttiefe um  $0,07^{\circ}\text{C}$ . Der Grund wird darin gesehen, dass die winterlichen Fröste aufgrund der vor allem im WHJ höher liegenden Porensättigung durch den Schneeeinfluss (siehe Abbildung) nicht diesen Einfluss im Gestein besitzen wie bei der Referenzsimulation.

Werden sowohl der berechnete SRF als auch die Ergebnisse der Schneemodellierung in die WUFI-Simulation eingebaut (Simulationsvariante *Schnee+SRF*), ergeben sich hinsichtlich der Frosttiefe erneut der Variante *Schnee* sehr ähnliche Ergebnisse (siehe Abbildung 33). Es entstehen lediglich Abweichungen, die im Mittel einen Unterschied der Frosttiefe von  $0,05^{\circ}\text{C}$  ausmachen. Demnach kann zum wiederholten Male der Schneeeinfluss als der dominante Faktor in der Anpassung an die natürlichen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet ausgemacht werden. Im Mittel kann bei der höchsten an den Felsen getragenen Feuchtigkeit auch das höchste Mittel der Frosttiefe erreicht werden, dass mit  $-2,94^{\circ}\text{C}$  um  $0,13^{\circ}\text{C}$  über jener der Referenzsimulation liegt. Dass die Kombination der Veränderungen in einer WUFI-Simulation nicht gleich die Summe der Einzelergebnisse aus den Simulationen *SRF* sowie *Schnee* ist, kann anhand der Frosttiefe bei  $S90^{\circ}$  in 10 cm Tiefe gezeigt werden. An dieser Position wird die Frosttiefe durch den alleinigen Einfluss sowohl des veränderten SRF, als auch durch den integrierten Schnee im Mittel um  $0,49^{\circ}\text{C}$  in tiefere Temperaturen gedrückt. Die Kombination der Einflüsse zeigt dem gegenüber sogar einen leichten Anstieg der Temperatur von  $0,04^{\circ}\text{C}$ . In Summe kann jedoch der gleiche Schluss wie auch zuvor bei der Diskussion über den Schneeeinfluss auf die Frosttiefe gezogen werden. Da die Gesteinsfeuchte besonders bei der Geländeneigung von  $70^{\circ}$  Reaktionen auf die erhöhte Feuchtigkeitsmenge der Simulationsvariante *Schnee* zeigt (siehe Abbildung 40), ist auch bei der Frosttiefe in dieser Neigung der Einfluss durch die Berücksichtigung des Schnees etwas stärker.

Im Folgenden sollen nun die Erkenntnisse zu den Frostwechseltagen sowie den Eistagen besprochen werden, die sich den Erkenntnissen aus der vorhergehenden Diskussion über die Frosttiefe anschließt. So kann zunächst bei der Einsicht der Daten der Erhalt des allgemeinen Verlaufs sowohl der Eistage, als auch der Frostwechseltage über alle Simulationen festgestellt werden (siehe Abbildung 34). So nehmen mit zunehmender Felstiefe die Eistage zu sowie die Frostwechseltage ab. Unterschiede ergeben sich weiterführend in der Anzahl derselben.

So kann bei der zunehmenden Schlagregenmenge, die mit der Simulationsvariante *SRF* simuliert wurde, erneut der Unterschied zwischen den beiden Geländeneigungen festgestellt werden. Die einzig erwähnenswerte Veränderung bei einer Neigung von  $70^{\circ}$  ist eine Zunahme der Eistage in großen Felstiefen. In 50 cm Tiefe können so 5 Eis- sowie 5 Frosttage mehr

verzeichnet werden. Begründet wird dies durch eine größere Frostdauer bei gleichbleibender Frosttiefe. Den größeren Einfluss besitzt der höhere SRF wie auch schon zuvor festgestellt bei einer Neigung von  $90^\circ$ . Hier wiederum in der Nordexposition in den mittleren und größten Felstiefen sowie bei Südexposition ausschließlich im mittleren Felsbereich. Unterschiedlich ist hier allerdings die Richtung der Veränderung. Nehmen die Eistage bei 10 cm Felstiefe in beiden Expositionen um etwa 2-3 Tage zu, so nehmen diese in 50 cm Tiefe in nördlicher Exposition um 8 Tage ab. Der Unterschied liegt hier in der unterschiedlichen Dauer der Fröste pro Frostereignis. Als Beispiel sei hier die Position  $N90^\circ$  bei 10 cm Tiefe angeführt. So ist zwar die Summe der Froststunden (Frostdauer) der Simulationsvariante *SRF* an dieser Position nahezu unverändert zur Referenzsimulation, jedoch sinkt durch den Einfluss des erhöhten Schlagregens die Anzahl der Frostereignisse von 31 auf 24 ab. Dieser Umstand resultiert aus der im Mittel tiefer liegenden Temperatur der Variante *SRF*, wodurch diese weniger leicht über die  $0^\circ\text{C}$  hervortreten kann. Die Folge ist, dass die Frostdauer pro Frostperiode steigt und somit auch tendenziell öfter länger als 24 Stunden andauert. Daraus resultiert wiederum die höhere Anzahl der registrierten Eistage bei  $N90^\circ$  in 10 cm Tiefe. Dies ist auch die Begründung für die Zunahme der Eistage bei  $S90^\circ$  in 10 cm Felstiefe, obwohl die gesamte Dauer des Frostes geringer ist. Führt man diese Kette der Abhängigkeiten weiter fort, führt dies zur Veränderung der Frostwechseltage. Denn die verlängerte Frostdauer pro Frostperiode führt zu der auch in den Daten ersichtlichen Abnahme der Frostwechseltage an diesen beiden simulierten Positionen. Der erhöhte SRF führt dazu, dass insgesamt 16 Frostwechseltage weniger auftreten. Es kann zusammenfassend eine Zunahme der Eistage bei  $70^\circ$  sowie eine Abnahme bei  $90^\circ$  durch den erhöhten SRF erkannt werden. Zudem zeigt sich generell eine stärkere Reaktion auf die Veränderung bei  $90^\circ$ , wobei in dieser Neigung die gesamte Abnahme von 16 Frostwechseltage registriert wird. Die Oberflächen bleiben durchwegs unbeeinflusst.

Der Schneeeinfluss in der Simulationsvariante *Schnee* bewirkt in Summe aufgrund der Wechselwirkung zwischen der gering höheren Frosttiefe sowie der kürzeren Frostdauer im Vergleich zur Referenzsimulation, dass 31 Eistage weniger registriert werden können. Die Abnahme ist dabei über alle Tiefen, Neigungen sowie Expositionen verstreut. Eine weniger starke Reaktion kann im Bezug auf die Frostwechseltage verzeichnet werden, die dennoch um 13 Tage geringer ausfielen. Hier zeigt sich in erster Linie eine Reaktion auf die Geländeneigung von  $90^\circ$ , bei der um 15 Frostwechseltage weniger auftraten. Bei  $70^\circ$  konnte eine leichte Zunahme von 2 Frostwechseltage verzeichnet werden. Das Ausmaß der Veränderungen liegt zum Wiederholten Mal über jener des veränderten SRF.

Die kombinierte Simulation *SRF+Schnee* zeigt in Summe eine Zunahme von 6 Frostwechseltagen. Ebenso kann eine Abnahme von 33 Eistagen verzeichnet werden, wobei einzig an der Position  $S70^\circ$  in 50 cm Tiefe eine Zunahme dieser registriert werden konnte. Alle anderen zeigen die gleichen abnehmenden Reaktionen. Neben der ausgeglichenen Veränderung im Vergleich der beiden Geländeneigungen, zeigt sich bei den Eistagen ein expositionsabhängiger Einfluss in großer Felstiefe. So nimmt entsprechend der vorgegangenen Diskussion die Anzahl der Eistage an der Nordexposition in der genannten Tiefe ab. Demgegenüber steigt die Anzahl in den südlichen Expositionen leicht an. Die Veränderung der Eistage ist merklich durch den Schneeeinfluss geprägt. Bei den Frostwechseltagen zeigt die Kombination der veränderten Einflüsse ein gänzlich anderes Bild als die Einzelergebnisse. Hier kann entgegen der Simulationsergebnisse der Varianten *SRF* sowie *Schnee*, bei denen eine Abnahme der Frostwechseltage berechnet wurde, eine Zunahme dieser verzeichnet werden.

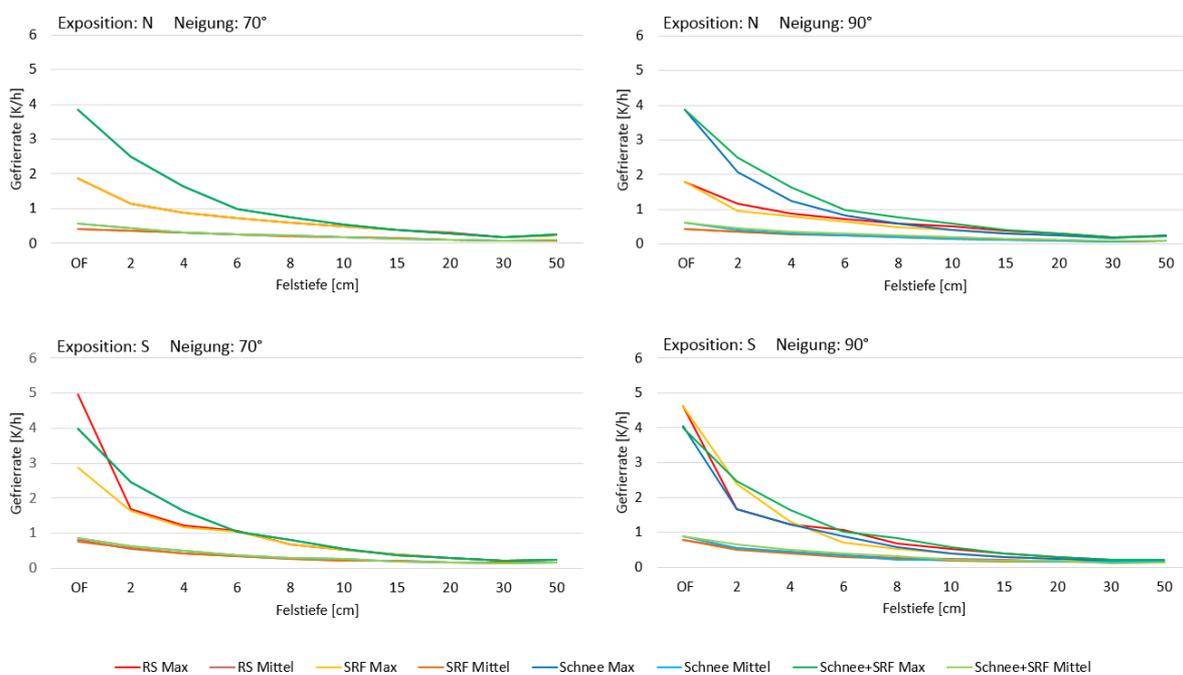


Abbildung 43: Profile der Gefrierate aller Simulationsvarianten (RS: Referenzsimulation) – Exposition S und N sowie Neigung  $70^\circ$  und  $90^\circ$  im Vergleich (Dolomit). Quelle: Eigene Erhebungen

Kurz soll auch noch auf die erhobene Gefrierate eingegangen werden. Diese besitzt einen mit der Felstiefe abnehmenden Verlauf, die in den nördlichen Expositionen stets geringere Werte einnehmen als im Süden. In Abhängigkeit der Simulationsvariante unterscheiden sich die nördlichen Expositionen am stärksten, wobei die Schwankungsbreite mit zunehmender Felstiefe geringer wird. Generell ist festzustellen, dass die Gefrieraten der vom Schnee

beeinflussten Simulationen sehr ähnlich verlaufen und sich von den beiden anderen Varianten etwas abheben. Begründet wird dies erneut durch die Summe des veränderten Feuchtigkeitseintrags. Die größte Abweichung der maximalen Gefriertrate entsteht durch die Veränderung im Zuge der Simulation Schnee an der Position N70° an der Gesteinsoberfläche. Hier steigert der Schneeeinfluss das Maximum der Gefriertrate auf 3,85 [K/h] wobei jenes der Referenzsimulation bei 1,88 [K/h] liegt. Zur besseren Übersicht wird auf Abbildung 42 verwiesen, in der der Verlauf der Gefrierraten in Abhängigkeit der Felstiefe dargestellt ist. Es ist abschließend anzumerken, dass die Gefriertrate der Simulationsvariante *Schnee+SRF* einen auffällig durchgezogenen kontinuierlichen Verlauf mit der Tiefe besitzt, der, so scheint es, ein gut abgestimmtes Tiefenprofil der Gefriertrate wiedergeben kann.

### **5.3. Die Steinschlagwahrscheinlichkeit aus dem Blickwinkel der Gesteinsfeuchte**

Es werden nun die in den beiden vorangegangenen Kapiteln diskutierten Ergebnisse der hydrothermischen Bedingungen im Gestein dazu genutzt, um Aussagen über die Steinschlagwahrscheinlichkeit und Ihre Abhängigkeit vom Schlagregen sowie dem Schneeniederschlag treffen zu können. Dazu wird einleitend erwähnt, dass die Verwitterung des Gesteins an sich stets ein Anpassungsprozess dessen an die Bedingungen an der Erdoberfläche ist. Das unter anderen durch Temperatur-, Feuchte- sowie Druckbedingungen entstandene Gestein reagiert dabei auf die morphoklimatischen Einflüsse aus seiner Umgebung (Ahnert, 2009). Die in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen betreffen stets die hydrothermischen Auswirkungen auf das Gestein durch den Einfluss des sich verändernden Feuchtigkeitseintrags. Diese Veränderungen besitzen zum überwiegenden Teil Auswirkungen auf die mechanische bzw. physikalische Verwitterung. Der Grund liegt dabei in der hohen Abhängigkeit dieser von den erhobenen Parametern Feuchtigkeit sowie Temperatur. Die Abhängigkeit der Verwitterung und in weiterer Folge des Steinschlags von einem erhöhten Schlagregenanteil sowie vom Schnee wird im Folgenden wie auch schon in den vorangegangenen Kapiteln durch den Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit jenen aus der Arbeit von Schnepfleitner (2012) vorgenommen. Analog zu der bisher angewandten Methodik wurde deshalb, um einen möglichst sinnvollen Vergleich anstellen zu können, die Analyse der Steinschlagwahrscheinlichkeit an dessen Vorgehensweise angelehnt. Somit wurde auch in dieser Arbeit der Fokus auf die zur physikalischen Verwitterung zählende Frostverwitterung gelegt, die nach Matsuoka und Murton (2008) einen entscheidenden geomorphologischen Prozess in Gebirgsregionen darstellt. Unterschieden werden dabei die für die Frostverwitterung

relevanten Prozesse der Frostwechseltheorie sowie jene der Eislinsenbildung. Die klassische Theorie des Frostwechsels beruht auf der Zunahme des Volumens von gefrierendem Wasser um 9% (unter anderem Hallet, 2006). Dadurch übt das sich ausdehnende gefrierende Porenwasser einen Druck auf das umgebende Gestein aus. Dieser erreicht sein Maximum von 207 MPa bei vollständig gefüllten Poren und schlagartigem Gefrieren bei einer Temperatur von  $-22^{\circ}\text{C}$ . Dieser Wert übertrifft die Widerstandsfähigkeit von Gestein bei weitem, wodurch dieser Prozess unabhängig der Gesteinsart Verwitterung hervorrufen kann (Matsuoka und Murton, 2008). Diese Theorie der Frostverwitterung basiert jedoch auf Gesteinsbedingungen, die nur selten erreicht werden. So ist laut Hales und Roering (2007) eine Porensättigung höher als 91% in einem geschlossenen System notwendig, um einen ausreichenden Druck ausüben zu können. Das abgeschlossene System kann allerdings nur dann erreicht werden, wenn das Gefrieren spontan und von allen Seiten gleichzeitig vollzogen wird (Matsuoka und Murton, 2008). Die Voraussetzungen für eine Frostverwitterung aufgrund der Theorie der Eislinsenbildung entsprechen dem gegenüber eher den natürlichen Bedingungen im Felsen. Diese beruht auf dem Prinzip, dass flüssiges Wasser durch ein poröses Medium Richtung bereits gefrorenem Wasser strömt. So ziehen gefrorene Bereiche das flüssige Wasser aus der Umgebung an, wodurch sich Eislinsen bilden, die wiederum einen Druck auf das umgebende Gestein ausüben. Die Bedingungen für diesen Prozess sind geringe Gefrieraten sowie lang andauernde tiefe Temperaturen (Matsuoka und Murton, 2008). Dazu konnte Murton et. al (2006) feststellen, dass der Eislinsentheorie zu Folge bereits ab etwa 65% Porensättigung verwitterungsrelevante Ereignisse entstehen. Kontroverse Diskussionen gibt es bei beiden Theorien der Frostverwitterung über die jeweils notwendigen Temperaturen. Die Analyse hinsichtlich der Steinschlagwahrscheinlichkeit wurde sowohl in Bezug auf die Frostwechseltheorie, als auch auf die Eislinsentheorie vorgenommen. Dazu wurden die zuvor angesprochenen, den beiden Verwitterungstheorien entsprechenden Gesteinsbedingungen herangezogen. Um den unterschiedlichen Meinungen zum notwendigen Temperaturbereich Rechnung zu tragen, wurde die Analyse in Kategorien von verwitterungsrelevanten Ereignissen ab  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-1^{\circ}\text{C}$  bzw.  $-5^{\circ}\text{C}$  eingeteilt.

Betrachtet man die für die Frostverwitterung notwendige Wechselwirkung zwischen der Temperatur und der Feuchtigkeit in den simulierten Daten, so kann durchwegs über alle Simulationen festgestellt werden, dass die Voraussetzungen für die Frostwechseltheorie entscheidend seltener im Gestein anzutreffen sind, als jene der Eislinsentheorie. Limitierender Faktor ist in erster Linie die notwendige Porensättigung bei auftretendem Frost. Die zumindest notwendigen 90% für eine mögliche Frostverwitterung durch Frostwechsel werden nur selten

erreicht. Und wenn, dann ausschließlich in den obersten Felsbereichen. Dem gegenüber steht die in allen Felsbereichen bei negativen Temperaturen sehr oft eintretende Porensättigung, die für die Bildung von Eislinsen notwendig ist. Hier wurde in der Berechnung ein Wert von 60% Sättigung gewählt. Stellvertretend für alle Simulationen ist in Abbildung 43 der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Feuchtigkeit der Simulationsvariante *Schnee+SRF* dargestellt.

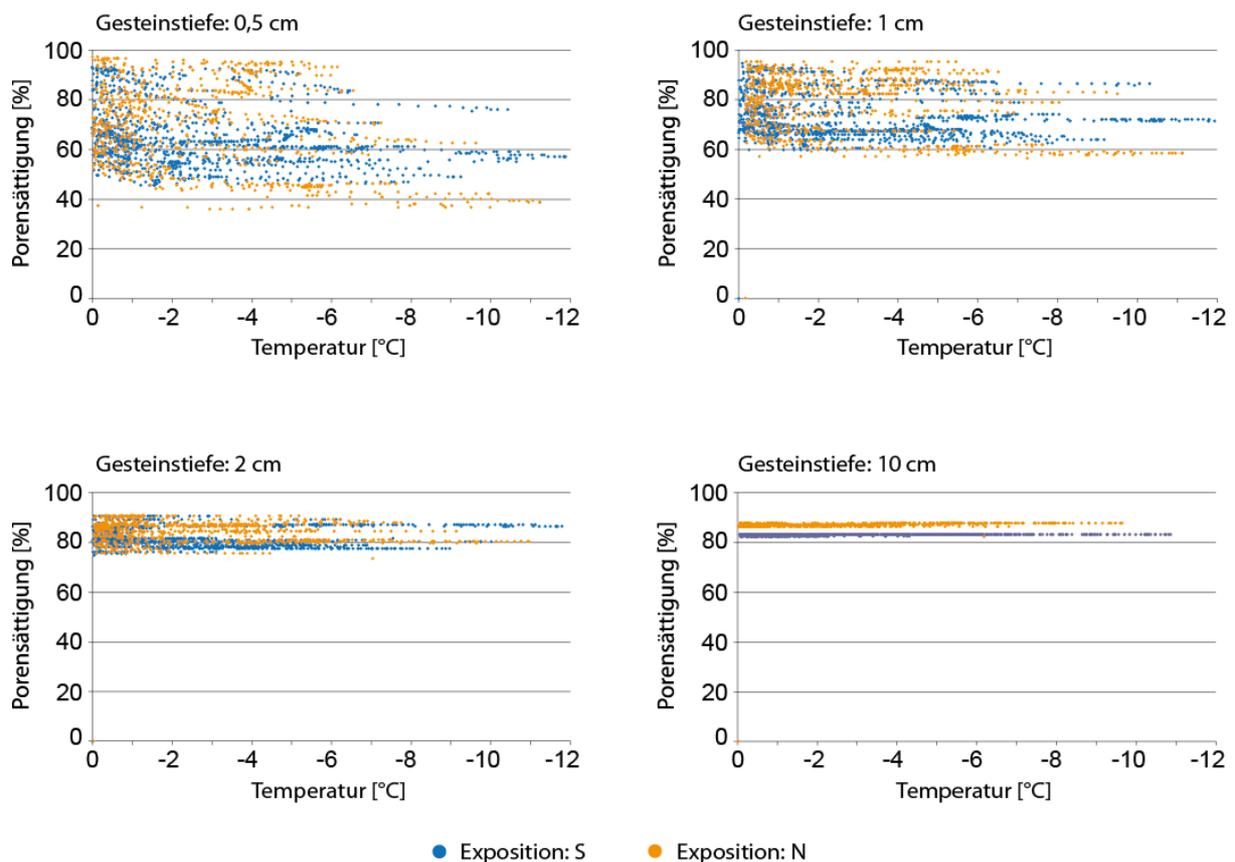


Abbildung 44: Abhängigkeit zwischen Temperatur und Feuchtigkeit im Gestein (Dolomit) – Vergleich der Felstiefen 0,5 cm, 1 cm, 2 cm sowie 10 cm der Simulationsvariante *Schnee+SRF*. Quelle: Eigene Erhebungen

Die stetige Abnahme der Schwankungsbereite mit zunehmender Felstiefe ist dabei auf das Tiefenprofil der Porensättigung zurückzuführen (siehe Abbildung 30). In Summe treten die Bedingungen für eine Verwitterung nach der Frostverwitterungstheorie jedoch über alle Simulationsvarianten noch öfter auf, als in der Referenzsimulation. Dies bewirkt die höhere Porensättigung aufgrund des höheren Feuchtigkeitseintrags. Generell ist in der äußersten Gesteinsschicht aufgrund der hohen Gefrierrate sowie der nur kurzen Frostdauer kaum eine Eislinsenbildung anzutreffen. Umgekehrt verhält es sich mit der Frostwechseltheorie, die genau die schnell vor sich gehenden Bedingungen an der oberflächennahen Schicht benötigt.

Die Ergebnisse der Verwitterungsanalyse zeigen anhand der Simulation *SRF*, dass durch den erhöhten Schlagregen im Untersuchungsgebiet die Verwitterungsereignisse beider Theorien in der äußersten Gesteinsschicht leicht zunehmen. So wird ein Plus von 3,55% im Bereich der Eislinnenbildung verzeichnet, das vor allem durch die Reaktion bis 1 cm Felstiefe in südlicher sowie in östlicher Exposition zustande kommt. Lässt man die unterschiedlichen Temperaturgrenzen für das Eintreten von Verwitterungsbedingungen miteinfließen, ist die Reaktion der Verwitterungsbedingungen auf den veränderten *SRF* prozentuell bei einer Temperaturgrenze von 0°C am stärksten. Der geringste Unterschied ergibt sich bei der Grenze von -1°C, wodurch die Werte bei -5°C als Obergrenze der Verwitterung Mittelwerte davon einnehmen. In der Referenzsimulation wurden Verwitterungsbedingungen nach der oftmals als klassische Theorie bezeichneten Frostwechseltheorie ausschließlich in der Nordexposition festgestellt. Der erhöhte *SRF* bewirkt, dass eine Verwitterung, hervorgerufen durch die 9%-ige Volumsänderung von Wasser beim Gefrieren, auch in den, dem Hauptwindfeld entgegen gerichteten Ost- sowie Westexpositionen anzutreffen ist. Diese bleiben allerdings ebenfalls auf die äußersten Felsbereiche bis 1 cm Tiefe beschränkt.

Aus den bereits diskutierten deutlich unterschiedlichen Bedingungen, die sich durch den Einfluss des Schnees ergeben, schließen auch die deutlichen Reaktionen der Verwitterungsbedingungen. Die Voraussetzungen zur Eislinnenbildung nehmen in der obersten Gesteinsschicht bis 1 cm stark zu sowie von 2 cm bis 10 cm ab. In Summe können jedoch im Vergleich zur Referenzsimulation um 46,7% mehr Situationen mit Verwitterungspotential bezogen auf die Eislinnentheorie ausgemacht werden (siehe Tabelle 17). Dabei fällt die Reaktion über alle Expositionen relativ gleich aus. In Abhängigkeit der Gesteinstiefe ist erneut der Bereich von 1-2 cm etwas stärker betroffen. In Summe bleibt der allgemeine Verlauf, in dem die Nordexposition am Stärksten und die Südexposition am Schwächsten, sowie der Bereich von 1-2 cm Felstiefe am Stärksten von der Frostverwitterung betroffen ist, erhalten. Obwohl die Ereignisse zu Bedingungen der Frostwechseltheorie nur 7,72% an der gesamten Frostverwitterung ausmachen, so steigt die Anzahl dieser durch den berücksichtigten Schneeeinfluss von vormals 16 auf 2272 an. Dabei treten die Verwitterungsbedingungen wie auch schon zuvor vor allem im Bereich von 1 bis 2 cm Felstiefe auf. Expositionsabhängig verändert sich jedoch die Verteilung. Es treten nach der Frostwechseltheorie tendenziell die meisten Verwitterungsbedingungen in Ostexposition, gefolgt von S, N und schlussendlich W auf. Das Verhältnis zwischen den Verwitterungsbedingungen ab unterschiedlich tiefen Temperaturgrenzen (0°C, -1°C sowie -5°C) bleibt im Großen und Ganzen erhalten.

Tabelle 17: Summen der Anzahl an Verwitterungsbedingungen der einzelnen Simulationsvarianten (RS: Referenzsimulation; S+SRF: *Schnee+SRF*) - die getrennt nach der Verwitterungstheorie vorgenommenen farblichen Abstufungen entsprechen der Reihung von wenig (hellblau) zu viel (dunkelblau) Verwitterungsereignissen. Quelle: Eigene Erhebungen

Verwitterungstheorie Simulationsvariante	Eislinsentheorie				Frostwechseltheorie			
	RS	SRF	Schnee	S+SRF	RS	SRF	Schnee	S+SRF
AFW 0°C	25262	25653	29521	29521	16	23	2277	2392
AFW -1°C	18166	18320	21511	21511	6	16	1517	1583
AFW -5°C	7849	7922	7568	7568	0	0	479	493

Die Vereinigung der beiden Einflüsse (erhöhter SRF und Schnee) in der Simulationsvariante *Schnee+SRF*, zeichnet in Bezug auf die Eislinsentheorie dasselbe Bild wie die Simulation Schnee. Die deutliche Erhöhung der Verwitterungsbedingungen bleibt im selben Ausmaß erhalten. Der Einfluss auf die Bedingungen die zu einer Verwitterung aufgrund der Frostverwitterungstheorie führen, nimmt in dieser Simulation das größte Ausmaß an. So entstehen im Vergleich zur Variante *Schnee* nochmals um 115 verwitterungsfähige Situationen mehr im Gestein.

Generell ist festzustellen, dass jegliche Verwitterungsbedingungen, sowohl bezüglich der Eislinsentheorie, als auch der Frostwechseltheorie, zum überwiegenden Anteil im äußersten Gesteinspaket bis ca. 10cm Felstiefe anzutreffen sind (siehe Abbildung 44). Dies trifft vor allem auf die Frostwechseltheorie zu, die zum überwiegenden Anteil aufgrund der notwendigen, hohen Gefriertrate nur bis zu einer Felstiefe von 4 cm stattfindet.

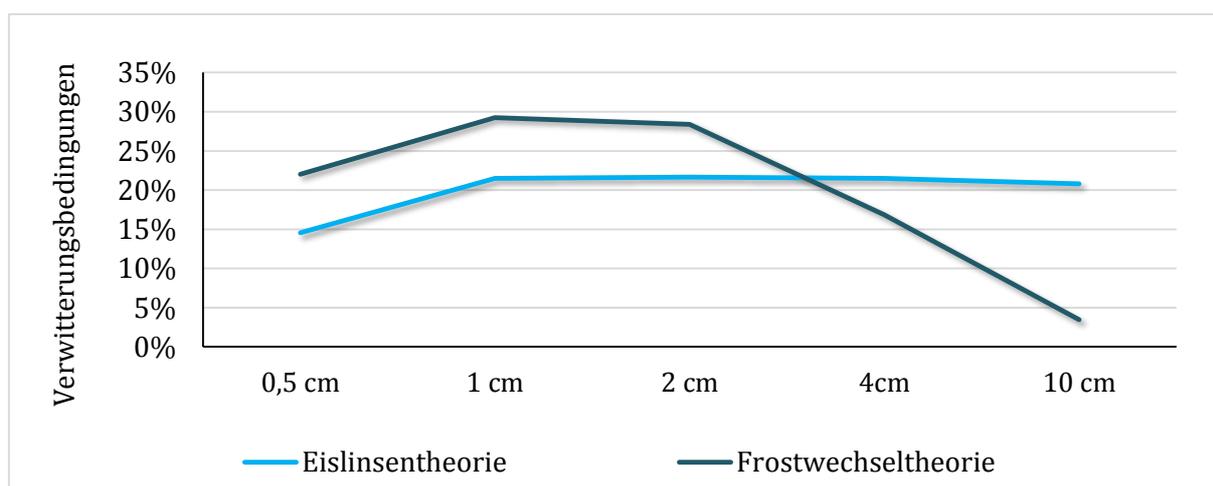


Abbildung 45: Verwitterungsbedingungen nach Felstiefe der SV *Schnee+SRF* (Skalierung der Felstiefe ist nicht linear). Quelle: Eigene Erhebungen

Neben der Abhängigkeit mit der Felstiefe, konnte auch eine ausgeprägte Abhängigkeit der Verwitterungsbedingungen bezüglich der Exposition festgestellt werden. So stellt in Bezug auf die Eislinientheorie die Nordexposition die höchsten Werte, wobei der Süden die geringsten Verwitterungsbedingungen vorzuweisen hat. Die Frostwechseltheorie verhält sich dabei etwas anders, hier konnte das Maximum im Osten und das Minimum im Westen ausgemacht werden. Abbildung 45 zeigt die Expositionsabhängigkeit an einem idealisierten Objekt.

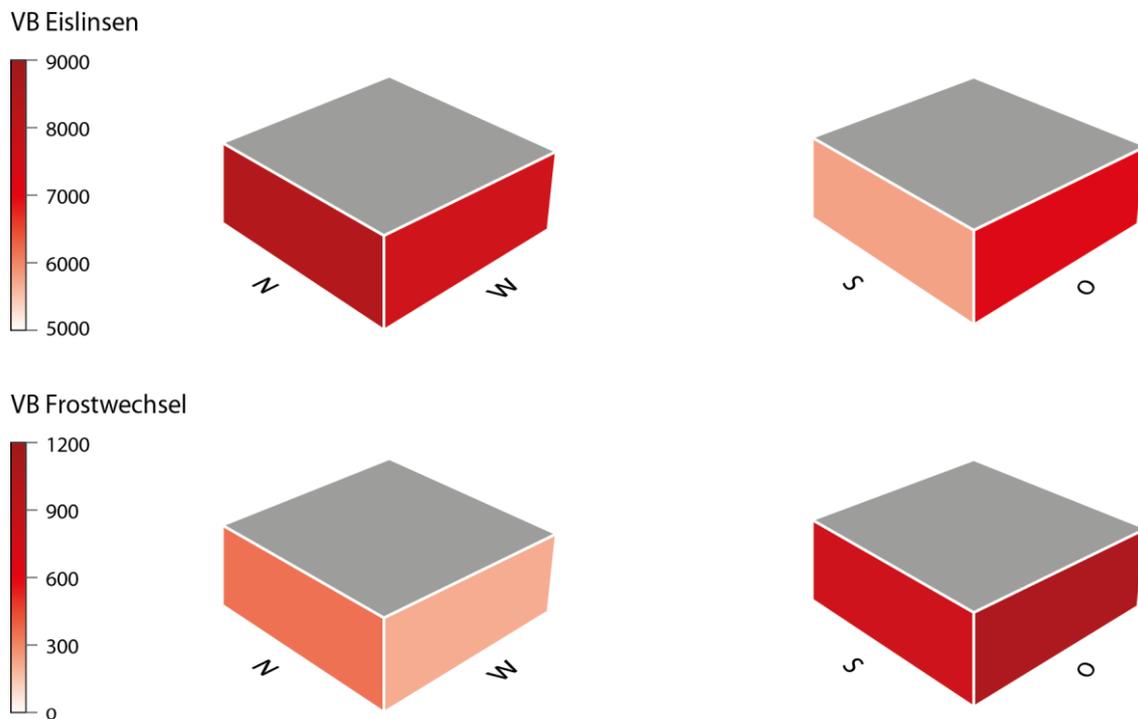


Abbildung 46: Frostverwitterungsbedingungen nach Exposition der SV *Schnee+SRF*. Quelle: Eigene Erhebungen

In Abbildung 46 werden die Ergebnisse der Verwitterungsanalyse aus den Daten der Simulation *Schnee+SRF* in verschiedenen Felstiefen der Exposition N sowie S über die Zeit dargestellt und miteinander verglichen. Das Bild der zeitlichen Verteilung der Verwitterungsbedingungen zeigt im Grunde über alle simulierten Positionen denselben Verlauf. Prinzipiell treten die Frostverwitterungsbedingungen nur im WHJ auf, wobei die Monate Jänner und Dezember das größte Verwitterungspotential aufweisen. Die absoluten Zahlen der relevanten Verwitterungsbedingungen im Jahrgang sind ebenfalls in Abbildung 43 zu finden.

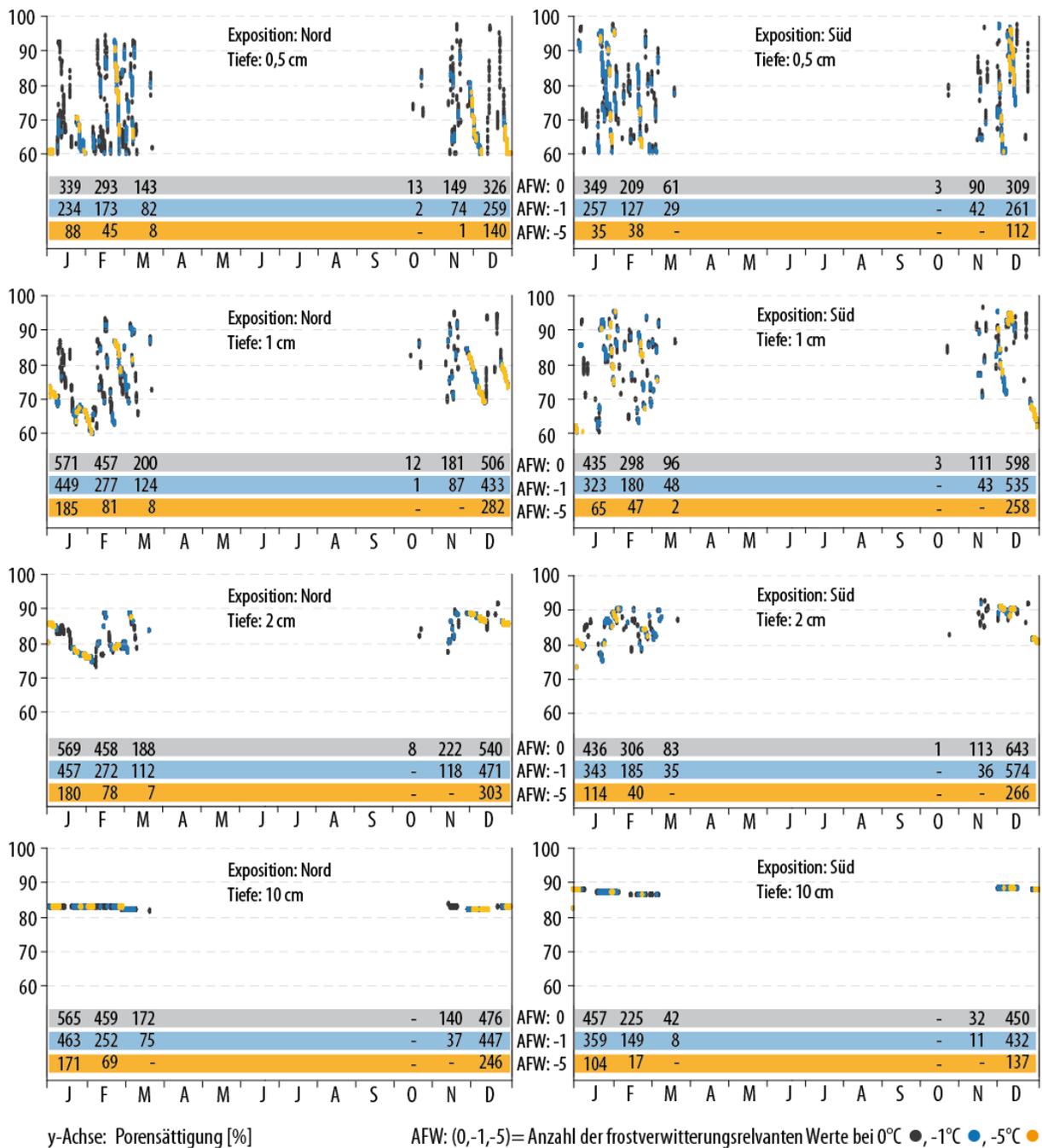


Abbildung 47: Zeitliche Verteilung der Verwitterungsereignisse der Simulationsvariante *Schnee+SRF* - Vergleich der Felstiefen 0,5 cm, 1 cm, 2 cm und 10 cm in den beiden Expositionen N und S (Dolomit | Gsenggraben). Quelle: Eigene Erhebungen

## 6. Schlussbetrachtung

Abschließend werden die aus dieser Arbeit erhaltenen Erkenntnisse noch einmal zusammengefasst dargestellt. Im Ausblick sollen aus dieser Arbeit entstehende Folgeprojekte sowie nützliche weiterführende Untersuchungen zur Thematik angesprochen werden.

### 6.1. Fazit

Der zur Annäherung der Gesteinsfeuchtesimulation an die natürlichen Bedingungen im Untersuchungsgebiet erhobene SRF liegt im Mittel über alle Expositionen bei 0,26 und fällt demnach um 0,06 höher aus als der im Simulationsprogramm WUFI verwendete Standardwert von 0,2. Am größten fällt er in den der Hauptwindrichtung entgegen gerichteten Expositionen W und O aus. N und S nehmen den geringsten Wert ein. Um einen für das Untersuchungsgebiet spezifischen SRF ausfindig zu machen, der den tatsächlichen Verhältnissen im Grenzbereich zwischen der Atmosphäre und dem Gestein entspricht, wurde ein hoher Aufwand betrieben. So wurden verschiedene Neigungen, Expositionen sowie Höhenlagen mit speziellen, für diese Thematik eigens durchdachten Erhebungen untersucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Daten stets die Bedingungen direkt am Fels widerspiegeln. Unsicherheiten bei der Berechnung des Faktors ergaben sich durch die messtechnischen Probleme mit der Vaisala-Klimastation sowie aus der zeitlich differenzierten Instrumentalisierung der Messpositionen. Der überwiegende Teil der dem SRF zugrundeliegenden Daten ist jedoch durchwegs plausibel. Ob der eruierte Höhenunterschied tatsächlich aus dem zweistöckigen Untersuchungsaufbau im Gsenggraben mit nur 300 m Höhendifferenz herzuleiten ist, soll jedoch kritisch betrachtet werden. Der Zeitraum, in dem die Messungen durchgeführt wurden, kann aufgrund der Ausführungen von Künzel (1994b) als überaus ausreichend eingestuft werden. Zudem wurde der Niederschlag in einem Zeitintervall von 10 Minuten aufgenommen, was der empfohlenen zeitlichen Auflösung von einer Stunde (Künzel, 1994a) mehr als nachkommt. Es kann in Summe deshalb davon ausgegangen werden, dass der berechnete SRF den Bedingungen am Fels im Untersuchungsgebiet entspricht und die darauf aufbauenden Simulationsvarianten im WUFI dadurch näher an die natürlichen Bedingungen herangeführt werden.

Die durchgeführte Schneemodellierung im ESCIMO.spread berechnete direkt im Programm die gesuchte Schmelzrate, die in Abhängigkeit der Zeit eine der Schnee- sowie klimatischen Situation entsprechende Feuchtigkeitsmenge dem Gestein zur Verfügung stellt. Dabei konnte

eine Feuchtigkeitsmenge von 168 [l/m<sup>2</sup>] modelliert werden, die im Untersuchungsgebiet dem Felsen erst über die Schneeschmelze zukommt. WUFI schließt diese Feuchtigkeitsmenge jedoch kategorisch aus, da Niederschläge unter 0°C in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Durch den Weg über die Schneemodellierung wurde dieses Problem gelöst, ohne dafür andere Klimaparameter zu verändern. So liefern die um den Schneeeinfluss erweiterten Simulationen Ergebnisse der hygrothermischen Bedingungen im Gestein, die wiederum näher an den tatsächlich vorherrschenden Bedingungen im Untersuchungsgebiet sind.

Die durchgeführten Simulationen ergaben stets jene Abhängigkeiten von Exposition, Neigung sowie Gesteinstiefe, die bereits von Schnepfleitner (2012) eruiert wurden. Diese wurden lediglich durch den veränderten SRF und/oder des Schneeeinflusses verstärkt oder gedämpft. Dabei konnte durchwegs festgestellt werden, dass die Reaktionen auf den Schneeeinfluss sehr stark ausfielen und jene des erhöhten SRF stets übertrafen. Dies beruht allerdings weniger auf einer generell größeren Abhängigkeit der Bedingungen im Gestein vom Schnee als vom Schlagregen. Hier beruht dieser Umstand auf der Menge an Feuchtigkeit, die durch die Anpassung der WUFI-Simulationen an die natürlichen Bedingungen zusätzlich dem Gestein zur Verfügung gestellt wird. Werden durch die Anhebung des SRF von 0,2 auf 0,26 zusätzlich 73 [l/m<sup>2</sup>] in das System eingespeist, so beläuft sich jene Menge aus dem berücksichtigten Schneeniederschlag auf 168 [l/m<sup>2</sup>]. Aus diesem absoluten Unterschied resultiert auch die vergleichsweise starke Reaktion der Simulationen auf den Schneeeinfluss. Die generell höheren Porensättigungen besitzen nicht zuletzt deshalb im Jahresverlauf besonders große Unterschiede zur Referenzsimulation im WHJ. Mit der Erhöhung des SRF verstärkt sich zudem die Expositionsabhängigkeit der Gesteinsfeuchte.

Da durch die vorgenommene Annäherung an die natürlichen Bedingungen ausschließlich mehr Feuchtigkeit an den Felsen getragen wird, beruhen die Veränderungen der thermischen Bedingungen im Gestein im Vergleich zur Referenzsimulation ausschließlich auf der hygrischen Veränderung des Systems. Die höhere Porensättigung bringt dabei eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit sowie eine erhöhte konvektive Wärmeübertragung mit sich, die die Temperaturbedingungen im Gestein beeinflussen. Die Veränderung der Temperatur im Gestein fällt eher schwach aus. Jedoch reichen bereits geringe Veränderungen im Temperaturprofil aus, um die verwitterungsrelevanten Parameter wie Frostdauer, Frosttiefe sowie Frostwechsel- und Eistage zu beeinflussen. Dabei ist festzustellen, dass die tendenziell höheren Temperaturen die Dauer des Frostes verkürzen sowie die Frosttiefe verringern. Ebenfalls nimmt die Anzahl der Eistage in Summe ab und die Frostwechseltage zumeist zu.

In Kombination bewirken die veränderten hygrothermischen Bedingungen im Gestein durchwegs eine Zunahme der auftretenden Verwitterungsbedingungen, die bei Schneeeinfluss sehr deutlich ausfällt. Dabei ist auffällig, dass die in der Referenzsimulation kaum auftretenden Verwitterungsbedingungen nach der Frostwechseltheorie bei Schneeeinfluss stärker vertreten sind. Der überwiegende Anteil der Verwitterung beruht jedoch weiter auf der Eislintheorie.

## **6.2. Ausblick**

Die erhobenen Erkenntnisse liefern zum einen aufgrund von auftretenden Unsicherheiten, zum anderen aufgrund von aufgeworfenen neuen Aspekten einen Grund für weiterführenden Untersuchungen.

Im Projekt Rocking Alps, im Zuge dessen diese Arbeit verfasst wurde, wird im Untersuchungsgebiet ein Monitoring der Gesteinsfeuchte durchgeführt. Dabei werden Felstemperatur, Gesteinsfeuchte, elektrische Leitfähigkeit sowie Porenwasserdruck aufgezeichnet. So liegt es nahe, die simulierte Gesteinsfeuchte mit Hilfe dieser direkt am Fels erhobenen Daten zu verifizieren und so weitere Erkenntnisse über die Simulation der Gesteinsfeuchte im WUFI, aber auch generell über die Prozesse im Gestein zu erhalten.

Von großem Interesse wäre weiterführend die hier eruierten Daten zur Gesteinsfeuchte in Abhängigkeit der Exposition und Neigung auf die Fläche zu bringen. Eine GIS-basierte Modellierung könnte dazu die wünschenswerten Ergebnisse bringen. Da neben der Gesteinsfeuchte die Temperatur sowie die Geologie grundscheidende Parameter für die Gesteinsverwitterung sind, könnten so die räumlichen Informationen dieser in Kombination gesetzt werden, um so eine Verteilung der potenziellen Verwitterungswahrscheinlichkeit zu generieren.

Die Annäherung an die natürlichen Bedingungen am Fels beinhaltet neben dem an das Untersuchungsgebiet angepassten SRF die Berücksichtigung des Schneeeinflusses. Dabei wurde jedoch ausschließlich dem hygrischen Einfluss durch den Schnee Rechnung getragen. Die thermischen Auswirkungen wurden dabei gänzlich vernachlässigt. Die Implementierung der Temperaturbedingungen unterhalb der Schneedecke sowie der veränderten Strahlungsbedingungen in die Gesteinsfeuchtesimulation würden den eingeschlagenen Weg der Annäherung der WUFI-Simulationen an die natürlichen Bedingungen am Fels fortführen.

## Literatur

Ahnert, F. (2009): Einführung in die Geomorphologie. 25 Tabellen. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), 393 S.

Ampferer, O. (1935a): Geologische Karte der Gesäuseberge. 1:25 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Ampferer, O. (1935b): Geologischer Führer für die Gesäuseberge. Mit einer geolog. Karte i. M. 1:25000, Kartenerläuterungen und Beschreibung von 16 Wanderungen. Geolog. Bundesanst, Wien, 177, XVI S.

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2014): Klimaregion Gesäuse. G.6 Gesäuse mit Teilbecken Johnsbach. Abrufbar unter <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/beitrag/10023703/25206/>.

Bauer, F. K. (1998): Zur Frage der Mürzalpendecke im Gebiet der Gesäuseberge und eine Diskussion über die Stellung der Nördlichen Kalkalpen. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 141, 1/1998, S. 5–19.

Blocken, B., Carmeliet, J. (2004): A review of wind-driven rain research in building science. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92, 13/2004, S. 1079–1130.

Büchner, K.-H. (1970): Geologie der nördlichen und südwestlichen Gesäuse-Berge Obersteiermark, Österreich. Mauersberger, Marburg, 118 S. + Beilage.

Coutard, J.P., Francou, B. (1989): Rock temperature measurements in two alpine environments: implication for frost shattering. Arctic and Alpine Research 21 (4), 399-416.

Hales, T.C., Roering, J. J. (2007): Climatic Controls on frost cracking and implications for the evolution of bedrock landscapes. Journal of Geophysical Research, 112, F2/2007.

Hallet, B. (2006): Geology: Why Do Freezing Rocks Break? Science 314, 5802/2006, S. 1092-1093.

Harbortronics Inc. (2007): DigiSnap 2000. User's Guide. Abrufbar unter [https://www.harbortronics.com/Products/Digisnap2000Series/digisnap2000\\_manual.pdf](https://www.harbortronics.com/Products/Digisnap2000Series/digisnap2000_manual.pdf).

Harbortronics Inc. (2006): Battery Converter. Abrufbar unter <https://www.harbortronics.com/Products/BatteryConverter/>.

Harlfinger, O., Pilger, H., Pretenthaler, F.(Hrsg.) (2010): Klimaatlas Steiermark. Periode 1971-2000 ; eine anwenderorientierte Klimatographie. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Holm, A. (2001): Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Dissertation, Stuttgart, 79.

icomedia Enterprise (2014): GIS Steiermark. Digitaler Atlas. Landesregierung Steiermark, Graz.

Krenn, W. (2013): PC-Wetterstation. Bedien- und Auswertesoftware. Abrufbar unter <http://www.pc-wetterstation.com/wswin.pdf>.

Künzel, H. M. (1995): Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB Verlag, Stuttgart, 102.

Künzel, H. M. (1994a): Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen. IBP-Mitteilung 21, 263/1994.

Künzel, H. M. (1994b): Regendaten für die Berechnung des Feuchtetransports. IBP-Mitteilung 21, 265/1994.

Künzel, H. M. (1994c): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Stuttgart, 68.

Luers, J. K. (1997): Temperature Error of the Vaisala RS90 Radiosonde. In: Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology. Boston, S. 1520–1532.

Matsuoka, N., Murton, J. (2008): Frost weathering: recent advances and future directions. Permafrost and Periglacial Processes 19, 2/2008, S. 195-210.

Michlmayr, G. (2007): Simulation von Schnee- und Eisschmelzprozessen im hochalpinen Raum. Diplomarbeit, Wien, 130.

- Murton, J. B., et. al. (2006): Bedrock Fracture by Ice Segregation in Cold Regions. Science 314, 5802/2006, S. 1127-1129.
- Nationalpark Gesäuse GmbH (2004): Zur Geologie und Geomorphologie des Gesäuses. Abrufbar unter <http://www.nationalpark.co.at/de/naturraum/52-naturraum/1745-zur-geologie-und-geomorphologie-des-gesaues>.
- Nikon GmbH (2003): Das Nikon Handbuch zur Digitalfotografie mit der Coolpix 5400 Digitalkamera. Abrufbar unter [http://pdfretriever.com/ref\\_sien.php?ID=418282&lg=D&src=14](http://pdfretriever.com/ref_sien.php?ID=418282&lg=D&src=14).
- Oberlechner, M. (2013): Validierung Vaisala WXT520 und TAWES Uni Graz. Seminararbeit, Graz, 29.
- Plienegger, M. (2011): Geomorphologische Karte der Steiermark. Herstellung, Interpretation und Übertragung auf ein weiteres Gebiet. Dissertation, Graz, 159.
- Prata, A. J. (1996): A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 122, 533/1996, S. 1127–1151.
- Radon, J., et.al. (2011): WUFI. HTML Help. Fraunhofer Institut.
- Rathjens, C. (1982): Geographie des Hochgebirges - 1 Der Naturraum. Teubner, Stuttgart, 210.
- Remich, B. (2001): Geomorphologische Grundlagenerhebung und Bewertung im Projektgebiet Nationalpark Gesäuse. Masterarbeit, Graz, 58.
- Rieckh, M. (2011): Monitoring of the alpine snow cover using automatic digital photography. Results from the Hohe Tauern range (Central Austrian Alps). Masterarbeit, Graz, 94.
- Rieckh, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Avian, M. (2011): Evaluation of spatial variability of snow cover duration in a small alpine catchment using automatic photography and terrain-based modeling. Geophysical Research Abstracts 13: EGU2011-12048.
- Salmi, A., Elomaa, L., Kopsala, P., Laukkanen, E. (2008): Piezoelectric Vaisala RAINCAP Rain Sensor applied to drop size distribution monitoring. Abrufbar unter [https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-96\\_TECO-](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-96_TECO-)

[2008/2%2811%29\\_Salmi\\_Findland.pdf](#).

Sass, O. (2005): Rock moisture measurements: techniques, results, and implications for weathering. *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 3/2005, S. 359–374.

Sass, O. (1998): Die Steuerung von Steinschlagmengen und –verteilung durch Mikroklima, Gesteinsfeuchte und Gesteinseigenschaften im westlichen Karwendelgebirge (Bayrische Alpen). Institut für Geographie der Universität München, Geobuch-Verlag, Rosental, München, 175 S.

Schmidt, T., et.al. (2002): WUFI Pro 5 Hilfetext. Abrufbar unter [http://www.hoki.ibp.fhg.de/download/wufi\\_pro33\\_d\\_help.pdf](http://www.hoki.ibp.fhg.de/download/wufi_pro33_d_help.pdf).

Schnepfleitner, H. (2012): Analyse der Gesteinsfeuchte an natürlichen Felswänden mit dem Simulationsprogramm WUFI. Masterarbeit, Graz, 175.

Steca Elektronik GmbH (2004): Steca PR. PR 0303, PR 0505. Datenblatt. Abrufbar unter <http://www.steca.com/index.php?PR-03-05--PR-0303--PR-0505#productdownload>.

Strasser, U., Marke, T. (2010): *ESCIMO.spread* – a spreadsheet-based point snow surface energy balance model to calculate hourly snow water equivalent and melt rates for historical and changing climate conditions. *Geoscientific Model Development Discussions* 3, 2/2010, S. 627–649.

Sturzenegger, L. (2013): Net longwave radiation. Abrufbar unter [http://www.luiw.ethz.ch/labor2/experimente/exp4/Presentation/Net\\_Longwave\\_Radiation](http://www.luiw.ethz.ch/labor2/experimente/exp4/Presentation/Net_Longwave_Radiation).

TFA Dostmann GmbH & Co. KG (2008): TFA Dostmann 35.1075 Nexus Funkwetterstation. Betriebsanleitung. Abrufbar unter [http://tfa-dostmann.de/fileadmin/-----Anleitungen-----/35.1075\\_g.pdf](http://tfa-dostmann.de/fileadmin/-----Anleitungen-----/35.1075_g.pdf).

Vaisala Oyj (2013): Update to product performance specification. Abrufbar unter [http://www.vaisala.de/Vaisala%20Documents/Technical%20Notes/Customer-notice\\_final.pdf](http://www.vaisala.de/Vaisala%20Documents/Technical%20Notes/Customer-notice_final.pdf).

Vaisala Oyj (2012a): Vaisala BAROCAP® Sensor for Measuring Pressure. Abrufbar unter <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/CEN-TIA-BAROCAP-Technology-description-B210845EN-B.pdf>.

Vaisala Oyj (2012b): Vaisala WINDCAP® Ultrasonic Wind Sensor WMT52. User's Guide. Abrufbar unter

<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/M210925EN-B.pdf>.

Vaisala Oyj (2009): WXT520 Multisensor-Wettertransmitter – Wetterdaten in Echtzeit. Datenblatt. Abrufbar unter [http://www.iag.co.at/uploads/tx\\_iagproducts/WXT520.de.pdf](http://www.iag.co.at/uploads/tx_iagproducts/WXT520.de.pdf).

Vaisala Oyj (2008a): Vaisala HUMICAP® Sensor Technology. Humidity Accuracy that Lasts. Abrufbar unter [http://www.technische-revue.eu/uploads/tx\\_etim/16779\\_-\\_Vaisala\\_Oyi.pdf](http://www.technische-revue.eu/uploads/tx_etim/16779_-_Vaisala_Oyi.pdf).

Vaisala Oyj (2008b): Vaisala Weather Transmitter WXT520. User's Guide. Abrufbar unter [http://www.iag.co.at/uploads/tx\\_iagproducts/pdf\\_handbuch/WXT520.de.pdf](http://www.iag.co.at/uploads/tx_iagproducts/pdf_handbuch/WXT520.de.pdf).

Vaisala Oyj (2006): Vaisala RAINCAP® Sensor Technology. Abrufbar unter [http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/RAINCAP\\_Technology.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/RAINCAP_Technology.pdf).

Veit, H. (2002): Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung ; 51 Tabellen. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), 352 S.

Wakonigg, H. (1978): Witterung und Klima in der Steiermark. Verl. für d. Techn. Univ. Graz, Graz, 473 S., [15] Doppelbl.

Wakonigg, H. (1970): Witterungsklimatologie der Steiermark. Zugl.: Graz, Univ., Diss., 1967. Verl. Notring, Wien, 255, LXXX S.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2014): Zweitwärmster Winter der Messgeschichte. Abrufbar unter <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/zweitwaermster-winter-der-messgeschichte>.

Zirkelbach, D., et.al. (): WUFI® 2D Installation & Kurzeinführung. (WUFI2D, WUFIMotion, WUFIgraph). Abrufbar unter <http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/download/WUFI2D%203.2%20Kurzeinfuehrung.pdf>.