Universität für Bodenkultur Wien University of Natural Resources and Life Science, Vienna



Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU) Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (HyWa)

Vergleich eines physikalisch-basierten Modells und eines "Day-Degree" Ansatzes hinsichtlich der Schneeschmelze in einem hochalpinen Untersuchungsgebiet an der Kölnbreinsperre im Maltatal

> Masterarbeit Zur Erlangung des akademischen Grades

> > Diplomingenieur

Wien, am 07.04.2021

eingereicht von

Armin Alexander Ebner, BSc

Betreuer: Karsten Schulz, Univ.Prof. Dipl.Geoökol. Dr.rer.nat.

Mitbetreuerin: Franziska Koch, Dipl.-Geogr.Univ Dr.rer.nat.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinen Geschwistern und vor allem meinen Eltern bedanken. Ihr wart mir stets ein Rückhalt und habt mir das Studieren, wie ich es erleben durfte, ermöglicht. Das ist nicht selbstverständlich – vielen Dank!

Ein weiterer Dank gilt meinem Betreuer Karsten Schulz und meiner Mitbetreuerin Franziska Koch, welche mir stets zu diversen Fragstellungen bezüglich der Masterarbeit Antworten geben konnten. Ich möchte vor allem Dich, Franziska, herausheben. Deine Bemühungen mir stets binnen kürzester Zeit weiterzuhelfen, habe ich sehr wertgeschätzt.

Auch meinen KorrekturleserInnen und WegbegleiterInnen während meiner Studienzeit, hierbei vor allem Dir, Markus, möchte ich für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft danken.

Eidesstaatliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, 07.04.2021 Ort und Datum

hy a

Unterschrift

Kurzfassung

Schneeschmelzprozesse spielen unter anderem bei der Einschätzung von saisonalen Abflüssen, der Vorhersage von Hochwassern oder auch beim Speichermanagement alpiner Speicherseen eine große Rolle. Rund 19% der Brutto-Stromerzeugung Österreichs sind im Jahr 2019 von Speicherkraftwerken erzeugt worden. Aus Sicht von energieerzeugenden Unternehmen ist eine möglichst exakte Schmelzvorhersage zur Optimierung des Speichermanagements und in weiterer Folge auch aus ökonomischer Perspektive von wesentlicher Bedeutung.

Oftmals werden zur Beschreibung der Schneeschmelze operationell konzeptionelle hydrologische Modelle verwendet, die auf Skalen von ca. 1x1km angewendet werden und gut für kleinere bis mittlere hydrologische Einzugsgebiete funktionieren. Die Schneeschmelze wird dabei oftmals mit einfacheren Ansätzen beschrieben, um die Komplexität des Modells und somit auch die Rechenzeit und folglich auch die Anzahl an benötigten Parametern möglichst gering zu halten. Viele der zur Wasserkraft Speicherseen in genutzten liegen allerdings sehr kleinen hochalpinen Kopfeinzugsgebieten, die zum größten Teil aus der Schneeschmelze gespeist werden. In dieser Arbeit stellt sich nun die Frage, wie gut man auf kleineren Skalen mit solchen einfachen Methoden im Vergleich zu komplexen Modellansätzen die Schneeschmelze beschreiben kann. Zur Simulation von Schmelzprozessen gibt es unterschiedlich komplexe Modellansätze. In dieser Masterarbeit wird analysiert, inwieweit ein einfacher temperaturbasierter "Day-Degree" Ansatz die Schneeschmelze beschreiben kann. Die Ergebnisse dieses Ansatzes werden mit dem physikalischen Modell Alpine3D verglichen, analysiert und diskutiert. Während mit Alpine3D die Energiebilanz der Schneedecke zu jedem Zeitschritt berechnet wird, wird mit "Day-Degree" Ansätzen versucht, die Schneeschmelze indirekt über die Temperatur, welche ein Indikator der Strahlung ist, abzubilden. Für diese Arbeit wurde ein fixer "Day-Degree" Faktor aus Literaturangaben gewählt, der für diese Region in größeren Skalen als realistisch angegeben wird. Aufgrund von nicht vorhandenen beziehungsweise öffentlich nicht verfügbaren Messwerten aus dem Untersuchungsgebiet und einer somit nicht möglichen Validierung der Ergebnisse, basiert diese Masterarbeit auf der Annahme, dass Alpine3D die Schneeschmelze annähernd real abbilden kann.

Als Untersuchungsgebiet wird ein Gebiet rund um den Kölnbreinspeicher im Grenzgebiet zwischen Kärnten und Salzburg definiert, welches in etwa 17,35 km² groß

iii

ist. Das Gebiet befindet sich auf rund 1700m bis rund 3000m über Adria. Die meteorologische Datengrundlage liefern fünf naheliegende ZAMG Klimastationen. Die Messdaten dieser Stationen werden auf das Untersuchungsgebiet mit Hilfe der frei verfügbaren Bibliothek MeteolO zeitlich mit einer Auflösung von einer Stunde und räumlich mit einer Auflösung von 50x50m für fünf Wintersaisonen (2013/14 – 2017/18) als meteorologische Modellinputdaten interpoliert.

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem in Bereichen mit hohen kurzwelligen Strahlungswerten im Untersuchungsgebiet die Differenzen der beiden Modellansätze am höchsten sind und es eine Korrelation zwischen auftretenden kurzwelligen Strahlungswerten und den Modellabweichungen gibt. Es lässt sich weiters folgern, dass der klassische "Day-Degree" Ansatz an sonnenabgewendeten Expositionen durchaus gute Ergebnisse liefert. Eine Mitberücksichtigung von kalibrierten Strahlungsparametern an strahlungsexponierten Lagen wäre demzufolge zur Schneeschmelzsimulation mittels "Day-Degree" Ansätzen durchaus sinnvoll. Zudem ist auch ersichtlich, dass die Schmelze durch den bei dieser Arbeit angewendeten "Day-Degree" Ansatz vor allem an strahlungsexponierten Bereichen durchgehend unterschätzt wird. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass bei einem Mitteln der Modelldifferenzen auf einen 1x1km Raster diese durch ein ungenaueres Mitberücksichtigen der unterschiedlichen Expositionen deutlich abgeschwächt werden. Schmelzsimulationen in dieser räumlichen Skala sind dadurch in kleinräumig topgraphisch differenten alpinen Lagen nicht zu empfehlen.

Fortführend kann diese Aufgabenstellung auf unterschiedliche Art und Weise bearbeitet werden. Weiterführende Untersuchungen mit verschiedenen meteorologischen Inputdatensätzen, wie beispielsweise INCA-Daten, sowie in situ Stationsdaten im Gebiet und einer Validierung bezüglich der Schneeschmelze wären sehr sinnvoll. Zudem könnte man die Ergebnisse dieser Arbeit dazu nutzen, expositions- und jahreszeitabhängige "Day-Degree" Faktoren speziell für dieses Gebiet abzuleiten und ein schrittweises Integrieren verschiedener Parameter in den "Day-Degree" Ansatz zu untersuchen.

iv

Abstract

Snowmelt processes, among other things, play a crucial role in the estimation of seasonal runoff, prediction of floods and also in the storage management of alpine reservoirs. Around 19% of Austria's gross electricity generation was produced by storage power plants in 2019. From the perspective of power generating companies, and from an economic angle, a melt forecast of highest accuracy is essential for the optimization of storage management.

Operational conceptual hydrological models are usually applied at scales of about 1x1 km when used to describe snowmelt and these scales also work well for smaller to medium hydrological catchments. Snowmelt is regularly described using straightforward approaches to reduce the complexity of the model, and, thus the computational time and consequently the number of required parameters. Many reservoirs used for hydropower are located in very small high alpine basins, which are mainly fed by melting snow. In this thesis, the question is, how well snowmelt can be described on smaller scales using such simple methods compared to complex modeling approaches. Various complex modeling approaches exist to describe melting processes. This master's thesis examines the extent to which a simple temperaturebased day-degree approach can describe snowmelt. The results of this approach are compared with the physically-based model Alpine3D and further analyzed and discussed. While Alpine3D calculates the energy balance of the snow cover at each time step, day-degree approaches try to represent the snowmelt indirectly via temperature, which is an indicator of radiation. For this thesis, a fixed day-degree factor was chosen from literature data, which is reported to be realistic for this region at larger scales. Due to non-existent respectively publicly unavailable measured values from the study area and thus no possible validation of the results, this master thesis is based on the assumption that Alpine3D can represent the snowmelt approximately real.

The study area is defined as an area around the Kölnbreinspeicher in the border region between Carinthia and Salzburg, which is about 17.35 km² in size. The area extends between about 1700m and about 3000m above Adria. The meteorological data basis is provided by five nearby ZAMG climate stations. The measured data from these stations are interpolated to the study area using the freely available library MeteolO chronologically with a resolution of one hour and spatially with a resolution of 50x50m for five winter seasons (2013/14 - 2017/18) as meteorological model input data.

v

The results show that the differences between the two model approaches are highest in sun-exposed and, thus, radiation-exposed areas in the study area. Furthermore, the examination revealed that there is a correlation between occuring shortwave radiation values and the model deviations. Moreover, it can be concluded that the classical day-degree approach at sun averted exposures provides quite good results. Therefore, it would be logical to include radiation parameters calibrated at radiation exposure sites in the simulation of snowmelt using day-degree approaches. Furthermore, it is also evident that the melting is consistently underestimated by the day-degree approach used in this work, especially in radiation-exposed areas. Besides, it should be mentioned that when calculating the average of the model differences to a 1x1km grid, they are considerably attenuated by an inaccurate inclusion of the different exposures. Based on this analysis, melting simulations at this spatial scale are, therefore, not recommended for small-scale topographically different alpine sites.

Regarding further steps, this task can be treated in different ways. Further investigations with different meteorological input data sets, such as INCA data, as well as in situ station data in the area and a validation regarding snowmelt would be very useful. In addition, the results of this work could be used to derive exposure- and season-dependent day-degree factors specifically for this area and to investigate a stepwise integration of different parameters into the day-degree approach.

Inhaltsverzeichnis

Dai	nksagı	ung	i
Eid	esstaa	atliche Erklärung	ii
Kui	rzfassu	Ing	iii
Abs	stract.		v
Inh	altsve	rzeichnis	vii
1.	Einle	eitung	
1	l .1.	Hintergrund	1
1	L .2 .	Fragestellungen	5
2	Met	hoden	6
2.) 1	Gebietsbeschreihung	
-			
2	2.2.	Datengrundlage	11
2	2.3.	Interpolation der meteorologischen Daten	14
2	2.4.	Verwendete Modelle zur Berechnung der Schneeschmelze und Simulationsüb	ersicht 15
	2.4.1.	. Physikalisch-basiertes Modell – Alpine3D	15
	2.4.2.	. "Day-Degree" Ansatz	17
	2.4.3.	. Simulationsübersicht	18
3.	Anal	lyse der Ergebnisse	20
Э	8.1.	Meteorologischer Überblick des Analysezeitraums	20
	3.1.1.	. Temperatur	21
	3.1.2.	. Strahlung	21
	3.1.3.	Niederschlag	22
	3.1.4.	. Schneewasseräquivalent	22
	3.1.5.	. Interpretation der Meteorologie im Analysezeitraum	23
3	8.2.	Zeitreihenanalyse der "Points of Interest" im Frühjahr 2017	24
3	8.3.	Räumliche Darstellung der Ergebnisse im Frühjahr 2017	28
	3.3.1.	. Simulationsergebnisse und Modelldifferenzen im Frühjahr 2017	28
	3.3.2.	. Skalenuntersuchung am 29. Mai 2017	32
3	8.4.	Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten k	urzwelligen
S	Strahlu	ng im Frühjahr 2017	34
	3.4.1.	. Analyse der Ergebnisse am 15. Mai 2017	35
	3.4.2.	. Analyse der Ergebnisse am 29. Mai 2017	38

	3.4.3.	Analyse der Ergebnisse am 12. Juni 2017 41		
	3.5.	Analyseübersicht aller simulierten Saisonen 43		
4.	Disk	ussion		
5.	Schl	ussfolgerung und Ausblick		
6.	Liter	atur- und Quellenverzeichnis		
7.	Abbi	ildungsverzeichnis		
8.	Tabe	Tabellenverzeichnis		
9.	Anh	ana		
ç).1.	Saison 2014		
	9.1.1.	Räumliche Darstellung der Ergebnisse		
	9.1.2.	Meteorologischer Überblick		
	9.1.3.	Zeitreihenanalyse		
	9.1.4.	Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung 64		
g	ə.2.	Saison 2015		
	9.2.1.	Räumliche Darstellung der Ergebnisse		
	9.2.2.	Meteorologischer Überblick		
	9.2.3.	Zeitreihenanalyse		
	9.2.4.	Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung 78		
g	ə.3.	Saison 2016		
	9.3.1.	Räumliche Darstellung der Ergebnisse		
	9.3.2.	Meteorologischer Überblick		
	9.3.3.	Zeitreihenanalyse		
	9.3.4.	Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung 89		
9	9.4.	Saison 2018		
	9.4.1.	Räumliche Darstellung der Ergebnisse		
	9.4.2.	97 Meteorologischer Überblick		
	9.4.3.	Zeitreihenanalyse		
	9.4.4.	Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung 99		

1.1. Hintergrund

Schneeschmelzraten in ihrem zeitlichen und quantitativen Verlauf möglichst genau vorherzusagen ist hinsichtlich des Speichermanagements alpiner Speicherseen, bei der Einschätzung von saisonalen Abflüssen, der Vorhersage von Hochwassern und weiteren von der Hydrologie abhängigen Prozessen von großer Bedeutung (Singh & Singh, 2001).

Rund 19 Prozent der Brutto-Stromerzeugung Österreichs sind im Jahr 2019 von Speicherkraftwerken erzeugt worden (E-Control, 2020). Dies stellt einen beträchtlichen Anteil der Energieerzeugung dar und unterstreicht somit die Wichtigkeit einer möglichst exakten Zuflussprognose aus Schneespeichern zu alpinen Speicherseen.

Die Schneeschmelze kann mit unterschiedlich komplexen und folglich auch unterschiedlich rechenaufwendigen Modellen simuliert werden.

Temperaturbasierte "Day-Degree" Ansätze werden zur Schmelzmodellierung am häufigsten verwendet. Die Gründe hierfür sind unter anderem die gute Verfügbarkeit und die relativ einfachen Interpolations- und Vorhersagemöglichkeiten von Temperaturdaten (Hock, 2003). Aufgrund dessen und der daraus resultierenden vergleichsmäßig geringen Rechenleistung eignen sich "Day-Degree" Modelle überaus gut für operationelle Anwendungen in konzeptionellen hydrologischen Modellen.

Die Komponenten, die zur Schneeschmelze beitragen, sind die kurzwellige Strahlung, langwellige fühlbare Wärmeaustausch, die Strahlung, der die latente Verdunstungswärme, der Bodenwärmestrom und die übertragene Wärme vom Niederschlag (Mazurkiewicz, et al., 2008). Die Sonne ist die Hauptenergiequelle für jegliche hydrologischen Prozesse auf der Erde. Die Sonnenstrahlung besteht hauptsächlich aus kurzwelligen Strahlungsanteilen. Die kurzwellige Strahlung, die auf der Erde auftrifft, besteht aus direkten und diffusen Strahlungsanteilen. Ein Teil davon, die Albedo, wird reflektiert. (Singh & Singh, 2001). Physikalische Modelle, wie beispielsweise Alpine3D (Lehning, et al., 2006), Crocus (Vionnet, et al., 2011) oder ISNOBAL (Marks, et al., 1999) simulieren die Schneeschmelze durch das abbilden der Energiebilanz. Diese Modelle weisen eine erhöhte Komplexität auf und sind damit auch rechenaufwendiger als einfache konzeptionelle Ansätze.



Abbildung 1: Energiebilanz der Schneedecke (Fletcher, 2005);

 $_{m}^{}Q_{e}^{e}$ = latente Verdunstungswärme, $_{m}^{}Q_{h}^{e}$ = fühlbarer Wärmestrom, $_{m}^{}Q_{p}^{e}$ = Energieübertragung durch Niederschlag, $_{m}^{}Q_{e}^{e}$ = Energieaustausch innerhalb der Schneedecke, $_{m}^{}Q_{g}^{e}$ = Bodenwärmestrom, $_{m}K^{e}$ = kurzwellige Strahlung, $_{m}L^{e}$ = langewellige Strahlung, $_{m}^{}V_{e}^{e}$ = Energiefluss zur Erdoberfläche, $_{m}[e^{e}$ = Energiefluss weg von der Erdoberfläche;

"Day-Degree" Ansätze basieren auf der These des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Schmelze. Bereits 1887 ist dieser stark korrelierende Zusammenhang von Temperatur und Schmelzraten bei einer Analyse des Suldenferner Gletschers angewandt worden (Finsterwalder & Schunk, 1887).

Oftmals werden in "Day-Degree" Ansätzen variable "Day-Degree" Faktoren, auch Gradtag-Faktoren, genannt, zur Beschreibung der Schmelze verwendet. 1943 hat Linsley bei einer Studie zur Implementierung des "Day-Degree" Ansatzes bei der Abflussvorhersage des San-Joaquin und Sacramento Einzugsgebiets in Kalifornien erkannt, dass die "Day-Degree" Faktoren eine monatliche Varianz aufweisen. Er erklärte dies mit der allmählichen Schneereifung während der Schmelzsaison, der saisonalen Variation der Luftfeuchtigkeit, der Solarstrahlung und weiteren Faktoren, die auf die Schmelze Einfluss nehmen und für welche die Lufttemperatur kein ausreichender Index zur Beschreibung ist. (Linsley, 1943). Des Weiteren können sich Gradtag-Faktoren auch hinsichtlich der Landbedeckung unterscheiden. Weiss und Wilson schrieben hierzu 1957, dass bei bewaldeten Flächen der mittlere saisonale

"Day-Degree" Faktor etwa um die Hälfte geringer als bei nicht bewaldeten Flächen ist (Weiss & Wilson, 1958). Eine weitere Variabilität weist der Gradtag-Faktor hinsichtlich unterschiedlicher Schneedichten auf, worauf Martinec im Jahr 1960 hinwies. Im Laufe der Schmelzsaison nimmt in der Regel auch die Schneedichte zu. Die Schneedichte korreliert sehr stark mit dem Gradtag-Faktor, welcher ebenso im Laufe der Schmelzsaison zunimmt (Martinec, 1960).

Eine Weiterentwicklung der "Day-Degree" Methode ist im konzeptionellen Niederschlags-Abflussmodell COSERO (Nachtnebel, et al., 1993) implementiert, welches auch von der Verbund AG verwendet wird. Hierbei werden neben der Temperatur auch das Verhältnis von spezifischer Wärme von Wasser und Schmelzenergie berücksichtigt. Zudem wird der Gradtag-Faktor über eine Gleichung bestimmt, welche die Albedo in Abhängigkeit vom Schneealter mit einfließen lässt. Weiters wird der Schnee über die Tiefe mittels einer Log-Normalverteilung in fünf Klassen eingeteilt, was unter anderem eine indirekte Mitberücksichtigung von Topografie und Vegetation zulässt. Zudem werden die Sublimation sowie die Umverteilung von Schnee in Abhängigkeit von der Schneedichte, Steigung, Landbedeckung und Schneetiefe miteinberechnet (Frey & Holzmann, 2015).

Eine der aktuellsten Studien zum Thema Schneeschmelzmodellierung ist jene von Massmann aus dem Jahr 2019. Es wird die Performance von vier verschiedenen Modellen hinsichtlich der Schneeschmelze mit unterschiedlichen Inputdaten verglichen. Diese vier Modelle sind ein einfacher "Day-Degree" Ansatz, ein "Day-Degree" Ansatz mit integriertem Strahlungsbeiwert, ein klassischer Energiebilanz- und Massenbilanzansatz und ein klassischer Energiebilanz- und Massenbilanzansatz mit reduzierten Inputdaten. Wenn eine Kalibrierung der Parameter möglich ist und qualitativ gute Daten vorliegen, weisen alle vier Modelle eine gute Performance auf. Die Studie zeigt auch, dass sich eine schlechte Qualität der Strahlungsdaten enorm negativ auf die Performance von strahlungsbasierten Modellen auswirkt. Es ist weiters erkennbar, dass bei qualitativ guter Datengrundlage ohne Kalibrierung der Parameter physikalisch-basierte Modelle am besten abschneiden. Bei einer Kalibrierung mittels "SNODAS"-Daten kann die Performance nicht-physikalischer Modelle deutlich gesteigert werden. Hierbei liegt die Modellgüte des temperaturbasierten "Day-Degree" Modells mit integriertem Strahlungsterm nur knapp hinter jener des physikalischen Modells (Massmann, 2019).

Aktuell forscht das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur Wien im Auftrag der Verbund AG an der Verbesserung der Zuflussprognose von Speicherseen, die zur Energiegewinnung genutzt werden mit Fokus auf die Schneedeckenmodellierung, dem Projekt "SnowModVis". Das Untersuchungsgebiet dieses Projekts ist ein hochalpines Kopfeinzugsgebiet am Kölnbreinspeicher im Maltatal, Kärnten. Gegenwärtig wird von der Verbund AG dort das konzeptionelle Modell COSERO auf einer Skala von 1x1km operationell betrieben. Schneedeckenprozesse finden allerdings auf einer viel kleineren Skala statt und somit muss ermittelt werden, ob ein solches Modellkonzept diese ausreichend im räumlichen Mittel erfassen kann oder ob ansonsten erweitere Konzepte, die sich auch für den operationellen Betrieb eignen noch ergänzt werden müssen. In diesem Projekt soll unter anderem darauf eingegangen werden, inwieweit die Schmelzprozesse mit einfachen, mehr oder weniger fortgeschrittenen "Day-Degree" Methoden, beschrieben werden können (Universität für Bodenkultur Wien, 2021). Genau dieser Aufgabe widmet sich diese Masterarbeit und ist somit im Forschungsvorhaben des Projekts "SnowModVis" verankert.

In dieser Masterarbeit kommen zwei Modellansätze zur Anwendung, um die Schneeschmelze bezüglich ihres zeitlichen Verlaufs und der Schmelzmenge zu beschreiben. Auf der einen Seite wird die Schneeschmelze mit Hilfe des physikalischbasierten Modells Alpine3D (Lehning, et al., 2006) beschrieben, welches die wichtigsten physikalischen Prozesse (Massen- und Energieaustausch), die zwischen Atmosphäre, Schnee und Boden stattfinden, simuliert (Eidg. Forschungsanstalt WSL, www.slf.ch, 2020). Auf der anderen Seite kommt eine Schneeschmelzsimulation mittels eines einfachen temperaturbasierten "Day-Degree" Ansatzes zur Anwendung, welcher lediglich auf den Eingangsgrößen Temperatur und Niederschlag basiert. Abschließend werden die beiden Ansätze verglichen, analysiert und entsprechende Schlussfolgerungen gezogen.

1.2. Fragestellungen

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Problemstellung des Projekts "SnowModVis" und soll aufzeigen, inwieweit ein einfacher temperaturbasierter "Day-Degree" Ansatz geeignet ist, zeitlich und räumlich hochauflösende simulierte Schmelzprozesse zu beschreiben. Es wird ein "Day-Degree" Ansatz mit gebietskonstantem "Day-Degree" Faktor verwendet, um den Einfluss der kurzwelligen Strahlung auf die Schneeschmelze unvoreingenommen überprüfen zu können. Somit kann die größtmögliche Differenz der Modelle ohne vorherige Anpassung des "Day-Degree" Faktors aufgezeigt werden. Auf Grundlage dessen soll dargelegt werden, ob es einen Zusammenhang zwischen den möglichen vorkommenden Differenzen der beiden Modelle und den auftretenden kurzwelligen Strahlungswerten gibt.

Als Untersuchungsgebiet wird ein rund 17,35km² großes Areal im Bereich des hochalpinen Kölnbreinspeichers im Grenzgebiet zwischen Kärnten und Salzburg definiert. Die Simulationen werden in fünf Wintersaisonen in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumlichen Auflösung von 50x50m durchgeführt. Temperatur- und Niederschlagsdaten, welche für beide Modelle als Input gebraucht werden, sind ident. Zudem wird eine Skalenuntersuchung durchgeführt, die Aufschluss darüber geben soll, inwieweit sich mögliche Unterschiede der beiden Modellsimulationen durch ein Mitteln der Ergebnisse auf einen 1x1km Raster verändern.

Somit ergeben sich folgende Fragstellungen:

Wie groß sind die Unterschiede hinsichtlich Schneeschmelzmengen und Zeitpunkt des Ausschmelzens durch Simulationen der Schmelzprozesse zwischen einem "Day-Degree" Ansatz und einem physikalisch-basiertem Modell auf einer kleinen räumlichen Skala von 50x50m? Ändern sich die möglichen Unterschiede während der Schmelzperiode? Erkennt man ähnliche Charakteristiken und Trends beim Vergleich der fünf simulierten Saisonen? Welche Auswirkungen ergeben sich auf die möglichen Differenzen der beiden Modelle, wenn die Schneeschmelze auf eine größere Skala von 1x1km aggregiert wird?

Wie stark sind die Zusammenhänge zwischen den möglichen Abweichungen des "Day-Degree" Ansatzes zum physikalisch-basierten Modell und der auf die Schneedecke eintreffenden kurzwelligen Strahlung?

2. Methoden

2.1. Gebietsbeschreibung

Das Untersuchungsgebiet liegt im Grenzbereich der Bundesländer Kärnten und Salzburg, nahe des Kölnbreinspeichers im Maltatal.



Abbildung 2: Lage des Untersuchungsgebiets (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2020)

Das Untersuchungsgebiet liegt zwischen rund 1700 und 3000 Höhenmeter über Adria (m ü.A.) und ist in etwa 17,35 km² groß. Zur Erstellung eines Höhenmodells sind die digitalen Geländemodelle von Salzburg und Kärnten herangezogen worden, welche öffentlich abrufbar sind. Das digitale Geländemodell von Kärnten ist mit einer Auflösung von 10x10m verfügbar (Land Kärnten, 2020). Zur digitalen Geländebeschreibung von Salzburg ist ein Geländemodell mit einer Auflösung von 5x5m herangezogen worden (Land Salzburg, 2020).

Für die weitere Bearbeitung der Fragestellungen ist eine räumliche Auflösung von 50x50m ausreichend. Somit sind die Geländemodelle der beiden Bundesländer verschmolzen und anschließend auf die genannte Auflösung gesetzt worden. In Abbildung 4 ist die topografische Charakteristik des Untersuchungsgebiets ersichtlich. Auf Grundlage des digitalen Geländemodells sind die Expositionen bestimmt und in Abbildung 5 dargestellt worden, um die Gegebenheiten hinsichtlich Hangausrichtungen visuell zu veranschaulichen. Zudem sind in Abbildung 5 die

"Points" of Interest" ("POI") sichtbar, welche für eine im Verlauf dieser Arbeit vorgestellte Zeitreihenanalyse herangezogen werden.

Es handelt sich um ein alpines Gebiet, welches großteils über der Waldgrenze liegt und somit durch alpine Landbedeckungstypen charakterisiert werden kann. Vorwiegend ist das Untersuchungsgebiet von Felsen ohne Vegetation und in tieferen Regionen von Flächen mit spärlicher Vegetation geprägt, wie in Abbildung 3 und Abbildung 6 zu erkennen ist.

Abbildung 3 ist vom nordöstlichen Ende des Kölnbreinspeichers in Richtung Nordost (Kaltwandspitze) aufgenommen worden. Es zeigt beispielhaft die typisch alpinen Vegetationsformen und charakteristische topografischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet.



Abbildung 3: Foto von der Begehung des Untersuchungsgebiets am 16.08.2020 (aufgenommen von Armin Alexander Ebner, BSc)

Im Hintergrund ist in den weiters vorgestellten Karten die "Geoland Basemap" eingeblendet, welche öffentlich verfügbar ist (Stadt Wien und Österreichische Länder, 2020).



Topografische Untersuchungsgebietsübersicht

Abbildung 4; Topografische Untersuchungsgebietsübersicht



Abbildung 5: Darstellung der Expositionen im Untersuchungsgebiet



Abbildung 6: Landbedeckung 2018 – CORINE 2018 (Umweltbundesamt GmbH, 2020)

2.2. Datengrundlage

Da es im Untersuchungsgebiet keine öffentlich verfügbaren Daten von meteorologischen Messstationen gibt, werden die Daten fünf naheliegender Klimastationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) herangezogen, welche in weiterer Folge auf das Untersuchungsgebiet interpoliert werden (siehe Abbildung 7). Diese fünf Stationen sind St. Michael/Lungau, Sonnblick, Katschberg, Mallnitz und Bad Gastein.

	1	1	
Klimastation	Seehöhe	Breite	Länge
St. Michael/Lungau	1052m	47,09444427°	13,62277699°
Sonnblick	3109m	47,05416489°	12,95750046°
Katschberg	1635m	47,06055450°	13,61472225°
Mallnitz	1197m	46,99194336°	13,16666603°
Bad Gastein	1092m	47,11055374°	13,13333321°

Tabelle 1; Stationshöhen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2021)

(Koordinatenangaben: EPSG:4326 - WGS 84)

Jegliche meteorologischen Inputdaten werden in einer räumlichen Auflösung von 50x50 Meter und einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde für die Wintersaisonen 2013/14, 2014/15, 2015/16, 2016/17, 2017/18 generiert.

Wie bereits erwähnt, kommen zwei unterschiedliche Modelle zur Anwendung. Es handelt sich um ein physikalisch-basiertes Modell (Alpine3D) und einen "Day-Degree" Ansatz.

Die Datengrundlage ist für beide Ansätze gleich, jedoch benötigt das physikalischbasierte Modell eine größere Bandbreite an Eingangsparametern. Tabelle 2: Meteorologische Inputdaten

Physikalisch-basiertes Modell	"Day-Degree" Ansatz
Temperatur	Temperatur
Niederschlag	Niederschlag
langwellige Strahlung	
kurzwellige Strahlung	
Windrichtung	
Windgeschwindigkeit	
relative Feuchtigkeit	

Zusätzlich benötigt MeteolO (Bavay & Egger, 2014), die Bibliothek die für die Dateninterpolation herangezogen wird, räumliche Inputdaten. Diese sind die Landnutzung und ein Höhenmodell, welche ebenso mit einer räumlichen Auflösung von 50x50m generiert worden sind.

- Landnutzung CORINE 2018 (Umweltbundesamt GmbH, 2020)
- Digitales Geländemodell
 - DGM Kärnten verfügbar in einer räumlichen Auflösung von 10x10m (Land Kärnten, 2020);
 - DGM Salzburg verfügbar in einer räumlichen Auflösung von 5x5m (Land Salzburg, 2020);



Abbildung 7: Lage der ZAMG-Stationen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2021)

2.3. Interpolation der meteorologischen Daten

Die genannten meteorologischen Inputdaten werden auf das Untersuchungsgebiet mit einer räumlichen Auflösung von 50x50m und einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde mit Hilfe der frei verfügbaren Bibliothek MeteolO interpoliert.

MeteolO berücksichtigt räumliche Informationen, wie Topografie oder Landnutzung sowie Stationsdaten zur Dateninterpolation. Der Algorithmus testet sämtliche gewünschte Interpolationsmethoden und wählt dann für eine bestimmte Variable und einen bestimmten Zeitschritt die Interpolationsmethode mit dem besten Ergebnis (Bavay & Egger, 2014). In Tabelle 3 sind die Interpolationsmethoden aufgelistet, mit welchen die meteorologischen Inputdaten interpoliert worden sind.

Temperatur	Inverse Distanzwichtung mit oder ohne "Lapse Rate" (Bavay & Egger, 2014);	
	oder: "Standard Lapse Rate", welche monatlich angepasst wird (Liston & Elder, 2006);	
Niederschlag	räumliche Interpolation des Niederschlags, dann Reduktion der Niederschlagsdaten entlang der Steilhänge (Spence & Bavay, 2013) und räumliche Interpolation des Niederschlags mit Korrektur der Werte in jedem Pixel, abhängig von der topografischen Windexposition (Winstral, et al., 2002);	
Niederschlag	oder: Interpolation der Niederschlagsdaten mittels der Barnes-Interpolationsmethode (Koch, et al., 1983) und anschließende Anwendung einer nichtlinearen Niederschlagsanpassungsfunktion mit einem höhenabhängigen Niederschlagsfaktor (Liston & Elder, 2006);	
Windgeschwindigkeit und Windrichtung	gkeitInterpolation mittels der Barnes-Interpolationsmethodeg(Koch, et al., 1983) und Modifizierung diese gerasterten	

Tabelle 3: Tabellarische Auflistung der angewendeten Interpolationsmethoden

	Geschwindigkeits- und Richtungsdaten mit einem einfachen topografiebasiertem Windmodell (Liston & Sturm, 1998);
relative Luftfeuchtigkeit	Räumliche Interpolation der nahezu linearen Taupunkttemperatur mit der Barnes-Interpolationsmethode (Koch, et al., 1983) und einer "Lapse Rate"; die Daten werden dann auf die relative Luftfeuchtigkeit für jede Rasterzelle zurückkonvertiert (Liston & Elder, 2006);
kurzwellige Strahlung	Inverse Distanzwichtung
langwellige Strahlung	wird generiert, da keine gemessen Daten verfügbar sind (Dilley & O'brien, 1998);

2.4. Verwendete Modelle zur Berechnung der Schneeschmelze und Simulationsübersicht

2.4.1. Physikalisch-basiertes Modell – Alpine3D

"Alpine 3D ist ein räumliches, dreidimensionales Schneedecken- und Erdoberflächen-Modell, das vom SLF entwickelt wurde. Es simuliert auf einer Gebirgs-Topographie die wichtigsten physikalischen Prozesse (Massen- und Energieaustausch), die zwischen Atmosphäre, Schnee und Boden stattfinden. Es besteht aus verschiedenen Modulen, die je nach Bedarf hinzugeschaltet werden können:

- Schneedecke, Vegetation und Boden ("SNOWPACK")
- Schneetransport ("SnowDrift")
- Strahlung ("EBalance")
- Abfluss ("runoff")"

(Eidg. Forschungsanstalt WSL, www.slf.ch, 2020)

Die physikalischen Prozesse werden sehr detailliert und hochauflösend beschrieben. Dies hat den Hintergrund, dass Prozesse wie beispielsweise Lawinenbildung, Permafrost-Dynamik, Oberflächenzustandsmanagement (Straßenwetterbeurteilung und Vorhersage) oder auch Studien zu Auswirkungen des Klimawandels von kleinräumigen Variabilitäten zwischen der Erdoberfläche und der Atomsphäre abhängig und stark beeinflusst sind und somit abgebildet werden können. Nach

Angabe der Autoren ist es ihres Wissens das einzige Modell, das Strahlungsenergiebilanz, Schneeverwehungen, Vegetation, Schneeund Bodendynamik beschreibt und kombiniert. Somit ist es zur Beschreibung der Schneevariabilität, vor allem in steilen alpinen Gebieten, prädestiniert (Lehning, et al., 2006).

Alpine3D - SNOWPACK

Der Kern von Alpine3D ist SNOWPACK, ein eindimensionales Schnee-, Vegetationund Bodenmodul zur Modellierung der Schneedecke, welches vom Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF entwickelt worden ist und auch international, beispielsweise zur Unterstützung bei der Lawinenwarnung, eingesetzt wird. Es beschreibt Massen- und Energieflüsse, die zwischen Boden, Schnee und Atmosphäre stattfinden und kann somit die Schneedeckenentwicklung und Schneestratographie in Detailgrad beschreiben, was unter anderem Aussagen hohem über die Schneestabilität ermöglicht. Des Weiteren ist eine Finite Elemente Methode der Wärmetransportgleichung, welche eine Beschreibung der Schneeverfestigung und der Wasserdampfströme ermöglicht, integriert. Die Wasserflüsse im Schnee und im Boden können entweder über ein einfaches Eimermodell ("bucket model") oder einen komplexeren Ansatz unter Verwendung der Richard's Gleichung beschrieben werden (Wever, et al., 2013). Zudem ist ein Modul zur Beschreibung des Energie- und Massenaustauschs zwischen den unterschiedlichen Vegetationsformen bzw. zwischen Vegetation, Boden und Schnee implementiert ("canopy modul"). Der Boden wird als vier-Komponenten-Materie, bestehend aus Matrix, Luft, Wasser und Eis, behandelt. Ident zur Beschreibung der Schneedecke werden Massen und Energieflüsse sowie die Umwandlungsprozesse von Wasser in verschiedene Phasen beschrieben. Physikalische wie Eigenschaften, Wärmespeicherkapazität, Wärmeleitfähigkeit und Matrixeigenschaften werden ebenso in Betracht gezogen. Zusammenfassend ermöglicht SNOWPACK eine detaillierte Beschreibung der Energie- und Massenflüsse zwischen der Atmosphäre und der Kryosphäre (Lehning, et al., 2006).



Abbildung 8: Die wichtigsten physikalischen Prozesse, die SNOWPACK beschreibt (Eidg. Forschungsanstalt WSL, www.slf.ch, 2020)

2.4.2. "Day-Degree" Ansatz

Schneeschmelzprozess

Mehrere Studien haben bewiesen, dass die Schmelze in hoher Korrelation zur Lufttemperatur steht. Bei der Schmelze von Eis ist beispielsweise ein Korrelationskoeffizient von bis zu 0,96 nachgewiesen worden. (Braithwaite & Olesen, 1989)

"Day-Degree" Ansätze basieren auf der Annahme, dass die Schneeschmelze proportional zur Differenz der Lufttemperatur und der Basistemperatur ist. Der Faktor dieser Proportionalität wird "Day-Degree" Faktor genannt. Somit kann die Schmelzrate über folgende Beziehung (Formel 1) beschrieben werden:

$$M = \begin{cases} m_f * (T_a - T_b), wenn \ T_a > T_b \\ 0, wenn \ T_a \le T_b \end{cases}$$
(Formel 1)

M...Schmelze [mm/d] $m_{f}...$ "Day-Degree" Faktor [d⁻¹ °C⁻¹] = 4,5 d⁻¹ °C⁻¹ $T_{a}...$ Temperatur [K] $T_{b}...$ Basistemperatur [K] (Hock, 2003)

Die Basistemperatur T_b ist jene Temperatur, ab welcher die Schmelze beginnt. Diese wird grundsätzlich bei "Day-Degree" Ansätzen mit 0°C festgelegt, was einer Temperatur von 273,15 Kelvin entspricht (U.S. Department of Agriculture (USDA), 2004).

Der Day-Degree Faktor wird für diese Studie mit 4,5 d⁻¹ °C⁻¹ angenommen, welcher für das Weissfluhjoch so bestimmt worden ist (Zingg, 1951). Da das Weissfluhjoch eine hohe Ähnlichkeit zum Untersuchungsgebiet nahe des Kölnbreinspeichers aufweist, wird der "Day-Degree" Faktor ident festgelegt.

Wie bereits erwähnt, werden zur Beantwortung der Problemstellung Zeitsprünge von einer Stunde gewählt. Somit wird der "Day-Degree" Faktor, der in der Literatur zumeist als Gradtag-Faktor beschrieben wird, durch 24 dividiert, um die Schmelzproportionalität und Schmelzrate pro Stunde zu erhalten.

Subtrahiert man unter der Bedingung, dass die Temperatur größer als null Grad Celsius ist, die Schmelzrate vom Schneewasseräquivalent des vorherigen Zeitschrittes (i-1) erhält man den Schneewasseräquivalent zum aktuellen Zeitpunkt (i).

wenn,
$$T_a > T_b \rightarrow SWE_i = SWE_{i-1} - M_i$$
 (Formel 2)

Schneeakkumulation

Da der Fokus dieser Masterarbeit auf den Schmelzprozessen liegt, werden in weiterer Folge, pro simulierte Saison, nur die Schmelzperioden in den Monaten Mai und Juni analysiert. Da es jedoch auch zu Frühjahrsschneefällen kommen kann, wird die Schneeakkumulation mit einer einfachen Summation beschrieben. Wenn die Temperatur zum aktuellen Zeitpunkt (i) kleiner gleich null Grad Celsius ist und Niederschlag stattfindet wird der Schneewasseräquivalent vom vorherigen Zeitschritt (i-1) zum aktuellen Niederschlag addiert.

wenn,
$$T_a \le T_b \to SWE_i = SWE_{i-1} + Niederschlag_i$$
 (Formel 3)

2.4.3. Simulationsübersicht

Mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumlichen Auflösung von 50x50m werden die Schmelzsaisonen 2014 bis 2018 simuliert. Bei einer Auflösung von 50x50m ergibt dies 68x102 Rasterzellen im Untersuchungsgebiet, was 6936 Rasterzellen entspricht. Mittels der beschriebenen Interpolationsmethoden gibt es für

jede Rasterzelle stündliche interpolierte meteorologische Inputs und somit auch simulierte Ergebnisse.

Für den Simulationsstart je Saison für das physikalische-basierte Modell Alpine3D wurde der 1. Oktober gewählt. Da zu dieser Zeit das Untersuchungsgebiet schneefrei war, wird der Startwert des Schneewasseräquivalents bei den Alpine3D-Simulationen mit 0mm festgelegt. Die Simulationen des "Day-Degree" Ansatzes beginnen jeweils am 1. Mai. Als Startwert des Schneewasseräquivalent des "Day-Degree" Ansatzes am 1. Mai wird der Schneewasseräquivalent von Alpine3D am 1. Mai herangezogen.

 $SWE_{Day-Degree Ansatz}(1.Mai) \triangleq SWE_{Alpine3D}(1.Mai)$ (Formel 4)

Auch für die weiterführende Analyse bzw. Vergleiche der beiden Modelle wird nur der Zeitraum ab dem 1.Mai in Betracht gezogen.

Die Simulationen beider Modelle enden am 30. Juni, da zu diesem Zeitpunkt der überwiegende Anteil des Schnees im Untersuchungsgebiet abgeschmolzen ist

	Alpine 3D	Day-Degree Ansatz
simulierte Saisonen	2014, 2015, 2016, 2017, 2018	
zeitliche Auflösung	1h	
räumliche Auflösung	50m x 50m	
Simulationsstart	1.Oktober	1.Mai
Simulationsende	30.Juni	

Tabelle 4: Simulationsübersicht

Aufgrund der Tatsache, dass es im Untersuchungsgebiet keine plausiblen Messdaten zur Validierung der Ergebnisse gibt, wird angenommen, dass das physikalischbasierte Modell Alpine3D die Schneeschmelze annähernd real abbilden kann.

3. Analyse der Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse basiert auf folgenden Punkten:

- Zeitreihenanalyse in stündlicher Auflösung an vier ausgewählten Punkten in unterschiedlicher Exposition ("Points of Interest")
- Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse alle zwei Wochen zwischen
 1. Mai und 30. Juni (15. Mai, 29. Mai, 12. Juni, 26. Juni)
- Skalenuntersuchung am 29.Mai 2017 50x50m vs. 1x1km
- Vergleich der kumulierten Strahlung bis zum 15. Mai, 29. Mai, 12. Juni und 26. Juni zur absoluten Differenz der Schneeschmelze, berechnet mit den beiden Modellen am 15. Mai, 29. Mai, 12. Juni und 26. Juni

Die vier genannten Analysezeitpunkte beziehen sich jeweils auf Ergebnisse am jeweiligen beziehungsweise bis zum jeweiligen Tag um 00:00 Uhr.

In der nachstehenden Analyse wird die Saison 2017 vorgestellt und diskutiert. Die anderen simulierten Saisonen befinden sich im Anhang und werden im Kapitel 3.5 zusammengefasst erläutert.

3.1. Meteorologischer Überblick des Analysezeitraums

Zu Beginn der Analyse ist es wichtig einen groben Überblick über die grundlegenden meteorologischen Parameter im Analysezeitraum vom 1. Mai bis zum 30. Juni zu erhalten, um Beobachtungen besser interpretieren und einschätzen zu können.

Es handelt sich folgend um Darstellungen täglicher Untersuchungsgebietsmittelwerte. Es ist ein Mittelwert der 6936 Rasterzellen für jeden stündlichen Zeitschritt gebildet worden. Diese stündlichen Zeitschritte sind wiederum für einen Tag gemittelt worden. Bei den Niederschlagsdaten sind die stündlichen Gebietsmittelwerte auf den Tag aufsummiert worden.

In hellblau sind die vier Analysezeitpunkte (15. Mai, 29. Mai, 12. Juni und 26. Juni) markiert.

Bei den Niederschlags- und Temperaturdaten sowie den kurzwelligen Strahlungsdaten handelt es sich, wie bereits beschrieben, um die mittels MeteolO interpolierten Daten. Die dargestellten Schneewasseräquivalentdaten sind jene aus der Simulation mit Alpine3D.

3.1.1. Temperatur

Zusätzlich zur täglichen mittleren Temperatur ist in Rot ist die null Grad Celsius Linie abgebildet.



Abbildung 9: Mittlere tägliche Temperatur im Frühjahr 2017

3.1.2. Strahlung



Abbildung 10: Mittlere tägliche kurzwellige Strahlung 2017

3.1.3. Niederschlag



Abbildung 11: Mittlerer täglicher Niederschlag 2017

3.1.4. Schneewasseräquivalent



Abbildung 12: Mittlerer täglicher Schneewasseräquivalent im Jahr 2017

3.1.5. Interpretation der Meteorologie im Analysezeitraum

Um den 15. Mai liegt die Temperatur im Mittel nur bei rund drei Grad Celsius über null Grad Celsius und zusätzlich gibt es ein kleineres Niederschlagsereignis. Demzufolge schneit es in höheren Lagen, während es in tieferen Lagen regnet und zusätzlich die Schneedecke schmilzt. Zusammenfassend liegt hier in der vertikalen Erstreckung im Untersuchungsgebiet eine inhomogene Situation bezüglich Schneeschmelze vor.

Zwei Wochen später ist die mittlere Temperatur sehr deutlich über null Grad Celsius und folglich finden im gesamten Untersuchungsgebiet Schmelzprozesse statt.

Die Analysezeitpunkte im Juni sind geprägt von hohen Temperaturen und demzufolge auch von Schmelzprozessen in den Bereichen im Untersuchungsgebiet, in denen noch Schnee liegt.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass vom 1. Mai bis zum 30. Juni eine nahezu kontinuierliche Schmelze im Untersuchungsgebiet (siehe Abbildung 12) und keine erheblichen Akkumulationen (Frühjahrsschneefälle) zu beobachten sind.

Zudem ist ein Zusammenhang zwischen der mittleren kurzwelligen Strahlung (siehe Abbildung 10) und der Temperatur ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass sich die Hochund Tiefpunkte zum Teil ähnlich ausbilden. Zum anderen hängt die Strahlung auch mit dem Niederschlag zusammen. Dies ist davon abhängig, ob im ganzen Untersuchungsgebiet Niederschläge stattfinden beziehungsweise ob es sich um Starkregenereignisse kürzerer Dauer oder um länger andauernde Niederschläge handelt. Bei größeren Niederschlagsereignissen, wie beispielsweise am 6. Juni 2017, weist der Strahlungsverlauf einen Tiefpunkt auf. Es ist auch erkennbar, dass die Bewölkung Einfluss auf die Strahlung hat. Manche Knicke im Strahlungsverlauf stehen weder mit dem Temperaturverlauf, noch den Niederschlägen in Zusammenhang. Zudem lässt sich folgern, dass auch an kalten Tagen, wie zu Beginn der Analyse bei tieferen Temperaturen, die Strahlung sehr hoch sein kann.



3.2. Zeitreihenanalyse der "Points of Interest" im Frühjahr 2017

Abbildung 13: Lage der vier "Points of Interest" im Untersuchungsgebiet

Die "Points of Interest" liegen allesamt auf rund 2500m über Adria und sind unterschiedlich exponiert (siehe Abbildung 13). Ein Nordhang weist eine Exposition von 0° auf. Die Zählrichtung ist im Uhrzeigersinn.



Abbildung 14: Grafische Darstellung der Exposition der "Points of Interest"

Somit sind die "Points of Interest" hinsichtlich ihrer Exposition repräsentativ verteilt, was zusammenfassend in Abbildung 14 und Tabelle 5 ersichtlich ist.

Analyse der Ergebnisse

"Points of Interest"	Exposition
POI 21°	21° - Nordnordost
POI 117°	117° - Südostost
POI 229°	229° - Südwest
POI 312°	312° - Nordwest

Tabelle 5; Tabellarische Übersicht der Exposition der "Points of Interest"

In den folgenden Abbildungen (siehe Abbildung 15 bis Abbildung 18) sind die Zeitreihen der Rasterzellen, in denen die "Points of Interest" liegen, zu sehen.



Abbildung 15: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI 21°"



Abbildung 16: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI" 117°"



Abbildung 17: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI 229°"



Abbildung 18: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI 312°"

Die Startwerte des Schneewasseräquivalents liegen am 1. Mai beim "POI 21°", "POI 117°" und beim "POI 312°" zwischen 500mm und 600mm. Diese Werte unterscheiden sich eklatant vom "POI 229°", welcher am 1. Mai einen Schneewasseräquivalent von rund 300mm aufweist.

Wie bereits erwähnt, wird als Startwert für den "Day-Degree" Ansatz jener Wert des physikalisch-basierten Modells Alpine3D vom 1. Mai verwendet. Anschließend ist zu sehen, dass die Schneedecke bei der Simulation mit dem "Day-Degree" Ansatz deutlich später abschmilzt. Die größte Zeitdifferenz der beiden Modellansätze zwischen dem vollkommenen Abschmelzen der Schneedecke weist hierbei der "POI 229°" mit 10 Tagen auf. Zudem ist zu erkennen, dass die Schneeschmelze simuliert durch den "Day-Degree" Ansatz zu Beginn bei "POI 21°", und in kleinerem Ausmaß bei "POI 117°", überschätzt wird. Weiters ist ersichtlich, dass sich die Zeitreihen der beiden Modelle bei "POI 21°" und "POI 117°" am stärksten ähneln, wohingegen bei den anderen Zeitreihen die Unterschiede der beiden Modelle gleich offensichtlich sind. Die Zeitreihen der beiden Modelle bei "POI 229" stimmen zwar anfangs gut überein, aber wie bereits beschrieben, unterschätzt der "Day-Degree" Ansatz die Schmelze im weiteren Verlauf, im Vergleich zu den anderen "Points of Interest", am deutlichsten.
	Startwert SWE [mm]	Abschmelzzeit- punkt Alpine3D	Abschmelzzeitpunkt "Day-Degree" Ansatz	Differenz der Abschmelz- zeitpunkte [d]
POI 21°	582	06.06.2017	10.06.2017	4
POI 117°	572	04.06.2017	9.06.2017	5
POI 229°	331	20.05.2017	30.05.2017	10
POI 312°	523	31.05.2017	04.06.2017	4

Tabelle 6: Übersicht der Zeitreihenanalyse

3.3. Räumliche Darstellung der Ergebnisse im Frühjahr 2017

3.3.1. Simulationsergebnisse und Modelldifferenzen im Frühjahr 2017

Die folgenden Abbildungen (siehe Abbildung 19 bis Abbildung 21) dienen zur Veranschaulichung der Modellergebnisse und der absoluten Modelldifferenzen im Analysezeitraum an den genannten Analysezeitpunkten (15. Mai, 29. Mai, 12. Juni). Die Darstellung am 26. Juni entfällt, da nahezu kein Schnee mehr liegt. Die räumlichen Darstellungen der Veränderungen des Schneewasseräquivalents zeigen, wie schon die Zeitreihenanalyse, dass der "Day-Degree" Ansatz die Schmelze unterschätzt. Im Gegensatz zur Alpine3D-Simulation wird bei der Simulation mittels "Day-Degree" Ansatz erkennbar, dass die Schneeschmelze später einsetzt und somit tendenziell länger Schnee liegt. Darüber hinaus zeigt diese Analyse, dass die Abweichungen zwischen den beiden Modellen mit der Dauer deutlich zunehmen. Bis zum 15. Mai sind die Differenzen überall im Untersuchungsgebiet unter 120mm. In Abbildung 20 und in Abbildung 21 ist zudem ersichtlich, dass diese Abweichungen im Verlauf der Schmelzsaison vor allem an West- und Südhängen am größten sind. Mitte Juni beträgt die Differenz an West- und Südhängen bis zu 420mm, hingegen an Nordbeziehungsweise Osthängen ist diese zu diesem Zeitpunkt mit bis zu rund 240mm deutlich geringer. Eine absolute Differenz pro Rasterzelle wird nur dann gebildet, wenn in beiden Modellsimulationen in der jeweiligen Rasterzelle Schnee liegt.





15.Mai 2017 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



15.Mai 2017 - ΔSWE [mm]



Abbildung 19: Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse am 15.Mai





29.Mai 2017 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



29.Mai 2017 - ΔSWE [mm]



Abbildung 20: Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse am 29. Mai





12.Juni 2017 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



12.Juni 2017 - ΔSWE [mm]



Abbildung 21; Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse am 12. Juni

3.3.2. Skalenuntersuchung am 29. Mai 2017

Folgend wird eine Skalenuntersuchung beispielhaft in der Mitte der betrachteten Schmelzperiode für den 29. Mai 2017 durchgeführt. Die Exposition, und Höhenlage der Pixel sind im Allgemeinen abhängig von der gewählten Skala. Bei der gewählten 50x50m Skala wird dies für das Untersuchungsgebiet relativ fein aufgelöst dargestellt (siehe Abbildung 5), wohingegen bei einer Auflösung von 1x1km die Exposition und Höhenlage viel stärker gemittelt wird. Hierbei sind, in Dunkelgrau dargestellt, zuerst 1x1km Rasterzellen im Untersuchungsgebiet definiert worden (siehe Abbildung 22). Wenn mehr als 50 Prozent der Fläche in einer 1x1km Rasterzelle, ausgehend aus der Schneebedeckung der 50x50m-Modellsimulation, mit Schnee bedeckt sind, wird die 1x1km Rasterzelle als Schneezelle gewertet. Folgend werden die mit einer Auflösung von 50x50m ermittelten Differenzen auf jene Schneezellen des 1x1km Raster zugeschnitten. Auf Grundlage dessen sind die in Tabelle 7 ersichtlichen statistischen Parameter ermittelt worden. Bei den 1x1km Rasterzellen handelt es sich um Mittelwerte der Differenzen der 50x50m Rasterzellen.



1x1km: 29.Mai 2017 - ΔSWE [mm]



Vor allem die Spannweiten der Modelldifferenzen sind durch die Bildung der Mittelwerte auf einen 1x1km Raster im Unterschied zur 50x50m-Auflösung wesentlich geringer. Es lässt sich erkennen, dass speziell jene 1x1km Rasterzellen, welche hauptsächlich südlich und westlich exponierte Bereiche beinhalten, hohe mittlere Differenzen aufweisen. Umgekehrt ist ersichtlich, dass Rasterzellen, welche größten Teils Nord- oder Osthänge beinhalten, relativ geringe mittlere Modellabweichungen aufweisen.

Tabelle 7 fasst grundlegende statistische Parameter der unterschiedlichen räumlichen Auflösungen zusammen. Durch das Mitteln der Werte auf 1x1km Rasterzellen sinkt die mittlere Abweichung vom Mittelwert, die Standartabweichung, um 16,5mm. Somit lässt sich folgern, dass sich Differenzen zwischen den beiden Modellsimulationen, aufgrund beispielsweise unterschiedlicher Expositionen oder Höhenlagen, zum Teil ausmitteln. Dies bestätigen auch die ermittelten Maxima und Minima. Bei einer räumlichen Auflösung von 1x1km verringert sich, wie erwähnt, die Spannweite enorm. Somit kann man annehmen, dass sich Schmelzmengen bei einer weiterführenden Zuflussprognose bei Simulationen mit räumlichen Auflösungen von 1x1km im alpinen Gelände um einiges ungenauer einschätzen lassen.

	50x50m	1x1km
Mittelwert der Differenzen [mm]	78,1	81,2
Standartabweichung der Differenzen [mm]	55,9	39,4
Minimalwert der Differenzen [mm]	0,1	29,2
Maximalwert der Differenzen [mm]	308,3	149,2

Tabelle 7; Statistische Parameter der Skalenuntersuchung am 29. Mai 2017

3.4. Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung im Frühjahr 2017

Wie bereits erwähnt, werden in der folgenden Analyse jene Rasterzellen miteinbezogen, in welchen in beiden Modellen Schnee liegt und folglich eine absolute Differenz gebildet wird. Zudem werden diese Analysen, in welchen Korrelationen zwischen kurzwelliger Strahlung und absoluten Differenzen hergestellt werden nur dann durchgeführt, wenn zum jeweiligen Zeitpunkt zumindest in 50 Rasterzellen im Untersuchungsgebiet eine Differenz gebildet werden kann.

In den folgenden Abbildungen werden die Abweichungen der beiden Simulationen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung in Relation gestellt und überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen der kurzwelligen Strahlung und den Modellabweichungen gibt.

Die Darstellungen zeigen die Simulationsabweichungen am 15. Mai, am 29. Mai und am 12. Juni in Relation zu der kumulierten kurzwelligen Strahlung bis zum 15. Mai, 29. Mai und 12. Juni.

Der Analysezeitpunkt am 26. Juni 2017 entfällt, da nahezu kein Schnee mehr im Untersuchungsgebiet lag.

Zudem werden die Korrelationen in drei Höhenstufen (1700 - 2115m ü.A., 2115 - 2530m ü.A., über 2530m ü.A.) separat analysiert.

3.4.1. Analyse der Ergebnisse am 15. Mai 2017



Abbildung 23: Korrelation am 15. Mai 2017 (gesamtes Untersuchungsgebiet)



Korrelation am 15.Mai 2017 - Höhenstufe: zwischen 1700 und 2115m ü.A. Δ SWE[mm] am 15.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.27 | mittlere Dif. = 28mm

Abbildung 24: Korrelation am 15. Mai 2017 (zwischen 1700 und 2115m ü.A.)



Korrelation am 15.Mai 2017 - Höhenstufe: zwischen 2115 und 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 15.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.02 | mittlere Dif. = 44mm

Abbildung 25: Korrelation am 15. Mai 2017 (zwischen 2115 und 2530m ü.A.)

Korrelation am 15.Mai 2017 - Höhenstufe: über 2530m ü.A.



Abbildung 26: Korrelation am 15. Mai 2017 (über 2530m ü.A.)

Da die mittlere Gebietstemperatur (siehe Abbildung 9) nur rund 3°C über dem Nullpunkt liegt, finden Schmelzprozesse nur in tieferen und sonnenexponierteren Lagen stattfinden. Zudem gibt es leichte Schneefälle in höheren Regionen und Regen in tiefergelegenen Bereichen des Untersuchungsgebiets, was aus den Niederschlagsdaten ersichtlich ist (siehe Abbildung 11).

Unterteilt man das Untersuchungsgebiet in die drei erwähnten Höhenstufen (siehe Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26) sind in tieferen Lagen Korrelationen zwischen der kurzwelligen Strahlung und den Simulationsdifferenzen erkennbar.

Da in der vertikalen Erstreckung des Untersuchungsgebiets keine konstante klimatische Situation zu diesem Zeitpunkt vorliegt, sind auch die Korrelationen zwischen der kurzwelligen Strahlung und den Simulationsdifferenzen relativ gering und in der obersten Höhenstufe sogar gegenläufig.

Die Boxplots in Abbildung 27 veranschaulichen dies. Die kumulierte kurzwellige Strahlung ist in sonnenexponierten Lagen klar am höchsten. Bei den Differenzen der Modellsimulationen ist jedoch, wie bereits erwähnt, kein klarer Trend erkennbar.



Boxplots der kumulierten Strahlung [W/m²] bis zum 15.Mai 2017

N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)



Abbildung 27: Boxplots zur Analyse am 15. Mai 2017





Abbildung 28: Korrelation am 29. Mai 2017 (gesamtes Untersuchungsgebiet)



Korrelation am 29.Mai 2017 - Höhenstufe: zwischen 2115 und 2530m ü.A. ASWE[mm] am 29 Mai vs. kum. Strahlung [w/m^2] - $B^2 = 0.72$ | mittlere Dif. = 86mm

Abbildung 29: Korrelation am 29. Mai 2017 (zwischen 2115 und 2530m ü.A.)

Analyse der Ergebnisse



Korrelation am 29.Mai 2017 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 29.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.34 | mittlere Dif. = 82mm

Abbildung 30: Korrelation am 29. Mai 2017 (über 2530m ü.A.)

In den tieferen Regionen des Untersuchungsgebiets liegt zu diesem Zeitpunkt kein Schnee mehr. Dieser Analysezeitpunkt befindet sich mitten in der Hauptschmelzsaison. Die Temperaturen sind im gesamten Untersuchungsgebiet über 0°C (siehe Abbildung 9). Es finden somit im deutlich gesamten Untersuchungsgebiet Schmelzprozesse statt. Es sind klare Korrelationen zwischen den kumulierten Strahlungswerten und den Modelldifferenzen erkennbar. Je höher die kurzwellige Strahlung, desto höher die Modelldifferenz. Dies wird zusammenfassend in den Boxplots in Abbildung 31 nochmals verdeutlicht, dass an Nord- und Osthängen kurzwellige Strahlung und Differenzen wesentlich geringer sind, als an Süd- und Westhängen. Zudem ist ersichtlich, dass sich dieser Zusammenhang in der Höhenstufe zwischen 2115 und 2530m über Adria ab Modelldifferenzen von 50mm und in der Höhenstufe über 2530m über Adria ab Modelldifferenzen von 100mm am deutlichsten ausbildet.



Abbildung 31: Boxplots zur Analyse am 29. Mai 2017





Abbildung 32: Korrelation am 12. Juni 2017 (gesamtes Untersuchungsgebiet)

Es liegt nur mehr im obersten Bereich des Untersuchungsgebiets Schnee, welcher nun abschmilzt. Wiederum ist eine klare Korrelation zwischen den Modelldifferenzen und den kumulierten kurzwelligen Strahlungswerten erkennbar (siehe Abbildung 32). Westlich und südlich exponierte Teile des Untersuchungsgebiets weisen wesentlich größere Modelldifferenzen und auch kurzwellige Strahlungswerte als nördlich und östlich exponierte Bereiche auf (siehe Abbildung 33).



Abbildung 33: Boxplots zur Analyse am 12. Juni 2017

3.5. Analyseübersicht aller simulierten Saisonen

Die vorgestellte Analyse der Saison 2017 wurde auch für die Schmelzsaisonen 2014, 2015, 2016 und 2018 durchgeführt. Die nachstehenden Tabellen sind ein Überblick der Analyseergebnisse aller simulierten Saisonen. Im Anhang befindet sich die detaillierte Analyse

Tabelle 8 zeigt die mittlere Differenz der Schneeschmelze der beiden angewendeten Modelle. Die Farbskala reicht von Grün (geringe mittlere Differenz) bis hin zu Rot (hohe mittlere Differenz). Die "NA" Werte ("not available values") bedeuten, dass diese Korrelation nicht berechnet worden ist, da zu diesem Zeitpunkt in der jeweiligen Höhenstufe in weniger als 50 Rasterzellen in den Modellsimulationen Schnee liegt.

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2014	1700m - 2115m	34	67	NA	NA
	2115m -2530m	59	250	212	65
	> 2530m	36	207	269	263
	gesamtes Gebiet	46	225	253	233

Tabelle 8: Mittlere Simulationsdifferenzen aller simulierten Saisonen

2015		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
	1700m - 2115m	NA	25	NA	NA
	2115m -2530m	131	70	NA	NA
	> 2530m	126	162	249	120
	gesamtes Gebiet	128	100	249	120

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
	1700m - 2115m	12	NA	NA	NA
2016	2115m -2530m	37	106	NA	NA
	> 2530m	28	114	187	NA
	gesamtes Gebiet	32	111	186	NA

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2017	1700m - 2115m	28	NA	NA	NA
	2115m -2530m	44	86	NA	NA
	> 2530m	24	82	215	NA
	gesamtes Gebiet	35	83	214	NA

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
	1700m - 2115m	NA	NA	NA	NA
2018	2115m -2530m	104	155	NA	NA
	> 2530m	113	235	NA	100
	gesamtes Gebiet	110	230	NA	100

Generell ist die Tendenz zu erkennen, dass die mittleren Simulationsdifferenzen im Verlauf der Schmelzsaison zunehmen und gegen Ende vor allem die unteren und mittleren Bereiche im Untersuchungsgebiet ausapern. In der nachfolgenden Diskussion wird auf die Simulationsdifferenzen, auch in Bezug zu meteorologischen Ereignissen explizit eingegangen.

In Tabelle 9 sind die Bestimmtheitsmaße R² zwischen der kumulierten kurzwelligen Strahlung bis zum jeweiligen Analysezeitpunkt und den zu dem Zeitpunkt auftretenden Differenzen in den jeweilig simulierten Rasterzellen zu sehen. Die Farbskala reicht von Grün (hohe Korrelation) bis hin zu Rot (geringe Korrelation). Es besteht insofern ein Zusammenhang, dass hohe Modelldifferenzen mit hohen kumulierten kurzwelligen Strahlungswerten zum Teil sehr hoch korrelieren. Es gibt auch Ausnahmen, sprich gegenläufige Zusammenhänge. Diese sind in Hellgrau hinterlegt.

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße R^2 (Korrelation: Δ SWE vs. kumulierte kurzwellige Strahlung) aller simulierten Saisonen

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2014	1700m - 2115m	0,03	0,14	NA	NA
	2115m -2530m	0,54	0,82	0,74	0,15
	> 2530m	0,00	0,61	0,65	0,00
	gesamtes Gebiet	0,15	0,64	0,68	0,01

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2015	1700m - 2115m	NA	0,72	NA	NA
	2115m -2530m	0,86	0,05	NA	NA
	> 2530m	0,75	0,73	0,38	0,24
	gesamtes Gebiet	0,75	0,26	0,38	0,24

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2016	1700m - 2115m	0,11	NA	NA	NA
	2115m -2530m	0,57	0,87	NA	NA
	> 2530m	0,03	0,62	0,48	NA
	gesamtes Gebiet	0,19	0,65	0,49	NA

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2017	1700m - 2115m	0,27	NA	NA	NA
	2115m -2530m	0,02	0,72	NA	NA
	> 2530m	0,16	0,34	0,58	NA
	gesamtes Gebiet	0,00	0,45	0,58	NA

		15.Mai	29.Mai	12.Juni	26.Juni
2018	1700m - 2115m	NA	NA	NA	NA
	2115m -2530m	0,24	0,00	NA	NA
	> 2530m	0,22	0,37	NA	0,17
	gesamtes Gebiet	0,24	0,40	NA	0,17

Diskussion

Die Ergebnisse der Tabelle 9 werden ebenso in der nachstehenden Diskussion genauer beleuchtet. Generell kann man sagen, dass bei fortgeschrittener Schmelze die Bestimmtheitsmaße steigen und ebenso eine klare Verbindung zu den meteorologischen Besonderheiten gegeben ist. Wie auch nachfolgend in der Diskussion ausgeführt, ist beispielsweise die Saison 2015 von einer früh eintretenden Schmelze im ganzen Untersuchungsgebiet geprägt. Es sind demzufolge bereits zu Beginn hohe Korrelationen zwischen kurwelliger Strahlung und Simulationsdifferenzen erkennbar. Zudem gibt es an wenigen Analysezeitpunkten einen gegenläufigen Zusammenhang, je höher die kurzwellige Strahlung, desto geringer die Modelldifferenzen. Rund um diese Analysezeitunkte gab es entweder Schneeakkumulationen, die Schmelze fand nur an sonnenabgewendeten Bereichen im Gebiet statt oder die kurzwelligen Strahlungswerte waren verhältnismäßig gering und es war demzufolge beispielweise bewölkt. Eine weitere Begründung ist, dass an diesen Analysezeitpunkten die jeweilige Höhenstufe zum größten Teil ausgeapert war und nur mehr der restliche Schnee an sonnenabgewendeten Bereichen abschmilzt. Im Anhang befinden sich die Gegenüberstellungen zwischen kumulierter kurzwelliger Strahlung und den Simulationsdifferenzen der weiters simulierten Saisonen.

4. Diskussion

Bereits bei der räumlichen Analyse der simulierten Saisonen ist der Trend erkennbar, dass im Verlauf der Schmelzsaison vor allem westlich und südlich exponierte Bereiche im Untersuchungsgebiet die höchsten Modellabweichungen bezüglich Schneeschmelze aufweisen. Hierbei handelt es sich um jene Gebiete, die auch am strahlungsexponiertesten sind, was in den dargestellten Boxplots (siehe zum Beispiel Abbildung 31) ersichtlich ist. Auch die Zeitreihenanalyse verfestigt den Eindruck, dass vor allem in strahlungsausgesetzten Bereichen des Untersuchungsgebiets die Modelldifferenzen am größten sind. Bei der vorgestellten Saison 2017 weist der "POI 229°" den geringsten Startwert des Schneewasseräquivalents von rund 300mm, aber zugleich auch die höchste zeitliche Differenz von 10 Tagen der Abschmelzzeitpunkte zwischen den beiden Modellansätzen auf. Auch bei den anderen vorgestellten Saisonen bestätigt sich dieses Bild (siehe Anhang). Grundsätzlich lässt sich daraus folgern, dass die Modellgüte des "Day-Degree" Ansatzes nicht mit den Höhenstufen in Zusammenhang gebracht werden kann, jedoch sehr wohl mit den Expositionen. An strahlungsabgewendeten Bereichen im Untersuchungsgebiet, wie in den räumlichen

Diskussion

Darstellungen als auch bei den Zeitreihenanalysen ersichtlich, sind die Modellabweichungen wesentlich geringer, als an strahlungsexponierteren Lagen. Durch Erhöhung der räumlichen Auflösung auf 1x1km, mitteln sich die unterschiedlich großen Modelldifferenzen aufgrund unterschiedlicher Expositionen zum Teil aus. Bei der Skalenuntersuchung, beispielhaft durchgeführt am 29.Mai 2017, wird dies deutlich sichtbar. Der Unterschied der Modelldifferenzen hinsichtlich Exposition wird, wie mehrfach beschrieben, im Verlauf der Schmelzsaison größer. Somit würde sich auch eine Erhöhung der räumlichen Auflösung auf einen 1x1km-Raster im Laufe der Schmelzsaison immer stärker auf die simulierten Schmelzmengen auswirken.

Wie einleitend erwähnt beeinflussen mehrere Faktoren die Schneeschmelze, wobei die kurzwellige Strahlung als Haupttreiber fungiert und der Zusammenhang dieser mit den absoluten Modelldifferenzen in dieser Studie untersucht worden ist. Somit sind bei der Gegenüberstellung der absoluten Differenzen des Schneewasseräquivalents zu den kumulierten kurzwelligen Strahlungswerten teils hohe Korrelationen erkennbar. Bei der Saison 2017 ist zu erkennen, dass vor allem zu Beginn der Schmelzsaison bis Mitte Mai 2017 keine konstante Wettersituation in der vertikalen Erstreckung im Untersuchungsgebiet vorliegt. Die mittleren Temperaturen liegen in der ersten Maiwoche unter null Grad Celsius und in mittleren und hohen Lagen finden Schneeakkumulation statt. In der zweiten Maiwoche steigt die mittlere Temperatur etwas über null Grad Celsius. Somit schneit es in höheren Lagen und es regnet in tieferen Bereichen des Untersuchungsgebiets. Aus diesen Gründen sind keine hohen Korrelationen zwischen den auftretenden kurzwelligen Strahlungen und den Modelldifferenzen beim Analysezeitpunkt am 15. Mai 2017 erkennbar. In der höchsten über Adria ist der Zusammenhang über 2530m Höhenstufe zwischen Modelldifferenzen und kurzwelliger Strahlung gegenläufig. Hohe Modelldifferenzen stehen in einem geringen Zusammenhang mit niederen kumulierten kurzwelligen Strahlungswerten Betrachtet man sich jedoch die weiteren Analysezeitpunkte der Saison 2017, zu denen die Schmelze in nahezu allen Bereichen des Untersuchungsgebiets von statten geht und die Temperaturen im ganzen Untersuchungsgebiet deutlich über null Grad Celsius liegen, ist die Korrelation zwischen der kurzwelligen Strahlung und den Modelldifferenzen deutlich nachweisbar.

Tabelle 8 und Tabelle 9 bieten einen Analyseüberblick der mittleren Modelldifferenzen und den Korrelationen zwischen den Modelldifferenzen zu den kumulierten kurzwelligen Strahlungswerten in den verschiedenen Höhenstufen und zu den

Diskussion

genannten Analysezeitpunkten aller simulierten Saisonen. Generell sind zu Beginn der Schmelzsaisonen, Anfang Mai, als auch am Ende der Schmelzsaisonen, Ende Juni, die Zusammenhänge zwischen kurzwelliger Strahlung und Modelldifferenzen zumeist sehr gering. Zu Beginn der Schmelzsaisonen liegt die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet zumeist im Bereich von null Grad Celsius und Schmelze findet in geringem Ausmaß nur in tiefergelegenen Gebieten und dort auch oftmals nur in sonnenexponierten Teilbereichen des Untersuchungsgebiets statt. Somit ist der Einfluss der kurzwelligen Strahlung auf die Schmelze zu Beginn der Schmelzsaisonen oftmals nicht eindeutig erkennbar. Eine Ausnahme zeigt hierbei die Saison 2015. In diesem Jahr setzte die Schmelze etwas früher ein. Somit befinden wir uns am ersten Analysezeitpunk bereits mitten in der Schmelzsaison, was die mittleren Temperaturen belegen. Dies erklärt auch die bereits zu Beginn hohen Korrelationen von einem Bestimmtheitsmaß von bis zu 0,86. Danach ist die Korrelation wieder etwas geringer, sogar in der untersten Höhenstufe eindeutig gegenläufig, sprich geringe kumulierte kurzwellige Strahlungswerte stehen in Zusammenhang mit hohen Modelldifferenzen, was mit einem Kälteeinbruch mit ausgiebigem Frühjahrsschneefall um den 20. Mai 2015 in Zusammenhang gebracht werden kann. Aus diesem Grund findet keine Schmelze statt. Auch die kurzwelligen Strahlungswerte sind sehr tief, was auf einen hohen Bewölkungsgrad schließen lässt. In nahezu allen Saisonen ist erkennbar, dass gegen Ende der Schmelzsaisonen Ende Juni, aber auch beispielsweise in der Saison 2018 schon am 29. Mai in der Höhenstufe 2215- 2530m über Adria die Korrelationen nur mehr sehr gering sind. Dies liegt daran, dass teilweise fast kein Schnee mehr liegt, wodurch auch nur mehr wenige Rasterzellen in der Analyse berücksichtigt werden. Zudem liegt Schnee dann auch nur mehr in höheren sonnenabgewendeten Regionen im Untersuchungsgebiet und somit ist auch der Zusammenhang zwischen kurzwelliger Strahlung und Modelldifferenzen nicht mehr klar herstellbar. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wenn um den jeweiligen Analysezeitpunkt Schneekumulation stattfinden und demzufolge die kurzwelligen Strahlungswerte gering sind, inkonsistente meteorologische Bedingungen in der vertikalen Erstreckung des Untersuchungsgebiets vorliegen oder Schmelze gegen Ende der Schmelzsaisonen nur mehr in höheren sonnenabgewendeten Lagen stattfindet, keine oder nur geringe Zusammenhänge zwischen kurzwelliger Strahlung und Modellabweichungen feststellbar sind. Befindet man sich jedoch mitten in der Hauptschmelzsaison und es findet Schmelze nahezu überall im Untersuchungsgebiet statt, wird der

Zusammenhang zwischen kurzwelliger Strahlung und Modellabweichungen eindeutig ersichtlich.

Generell ist schnell zu erkennen, dass die "Day-Degree" Methode im Vergleich zu Alpine3D die Schmelze im Verlauf der Schmelzsaison vor allem an strahlungsausgesetzten Teilbereichen des Untersuchungsgebiets unterschätzt. Aufgrund von Schneesetzungen, damit einhergehender erhöhter Schneedichte und geringerer Albedo, wurde in etlichen Studien, der Gradtag-Faktor im Laufe der Schmelzsaison erhöht, worauf unter anderem Rango und Martinec hinweisen (Rango & Martinec, 1995). Auf eine Anpassung ist in dieser Arbeit allerdings explizit verzichtet worden, da für die Beantwortung dieser Fragestellungen der klassische "Day-Degree" Ansatz mit gebietskonstantem "Day-Degree" Faktor verwendet wird, um den Einfluss der kurzwelligen Strahlung auf die Schmelze unvoreingenommen überprüfen zu können. Es wird versucht, die größtmögliche Differenz der Modelle mit Hilfe von zeitlich als auch räumlich hochauflösenden Inputdaten ohne vorherige Anpassung des "Day-Degree" Faktors aufzuzeigen.

Betreffend der Modellgüte weisen die Modellentwickler von Alpine3D darauf hin, dass sich das modular aufgebaute Modell in ständiger Entwicklung befinde, aber schon jetzt sein vielseitiges Potenzial in einer Reihe von Anwendungen gezeigt hat, und es zudem eine Stärke des Modells ist, den Massen- und Energieaustausch in gebirgigem Gelände genau beschreiben zu können. Wie bereits in der Modellbeschreibung erwähnt, werden auch Schneeumlagerungen mit Hilfe des Moduls "SnowDrift" beschrieben (Lehning, et al., 2006). Grundsätzlich wären in situ Messungen zur Validierung der Ergebnisse wichtig. Doch da Validierungsdaten nicht verfügbar waren, baut diese Arbeit auf der Annahme auf, dass Alpine3D die Realität möglichst nahe abbilden kann. Der hier angewendete "Day-Degree" Ansatz erzielt an sonnen- und somit strahlungsabgewendeten Teilbereichen des Untersuchungsgebiets im Vergleich zu Alpine3D gute Ergebnisse. Schaut man sich jedoch strahlungsexponiertere Lagen an, dann sind die Schwächen des temperaturbasierten "Day-Degree" Ansatzes, wie bereits diskutiert, klar erkennbar. Somit sind Ansätze mit Implementierung von kurzwelligen Strahlungsparametern in diesen Bereichen durchaus sinnvoll.

Wie bereits einleitend angeführt, konnte nachgewiesen werden, dass bei einer Kalibrierung mittel "SNODAS"-Daten ein "Day-Degree" Modell mit einem integriertem Strahlungsfaktor bessere Ergebnisse liefert, als das klassische "Day-Degree" Modell

(Massmann, 2019). Auch Kustas und Rango vergleichen in einer Studie ein klassisches "Day-Degree" Modell mit einem, das die Strahlung mitberücksichtigt. Die Strahlung wird indirekt über ein einfaches Modell bestimmt, welches unter anderem die meteorologischen Parameter Bewölkungsgrad, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit heranzieht, um die Strahlung zu berechnen. Auch dieser Ansatz zur Implementierung der Strahlung führt zu einer Verbesserung der "Dav-Degree" Methode (Kustas & Rango, 1994). Wie bereits mehrfach ausgeführt, konnten durch diese zeitlich und räumlich hochauflösend durchgeführten Simulationen der beiden Modelle teils hohe Korrelationen zwischen kurzwelliger Strahlung und Modelldifferenzen nachgewiesen werden. Somit unterstreicht diese Arbeit die Wichtigkeit einer Berücksichtigung von Strahlung in "Day-Degree" Ansätzen. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass eine gute Qualität der Strahlungsdaten enorm wichtig bei der Implementierung von Strahlungsparametern in "Day-Degree" Ansätzen ist (Massmann, 2019). Kustas und Rango konnten in ihrer Studie diese Unsicherheit mittels indirekter Bestimmung der Strahlung über ein einfaches Modell umgehen (Kustas & Rango, 1994). Eine indirekte Bestimmung der Strahlung kann als probates Mittel zur Verifizierung von Strahlungsdaten herangezogen werden.

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Schlussfolgernd, um auf die eingangs gestellten Fragstellungen im Detail einzugehen, ist festzustellen, dass speziell in sonnenexponierten und somit strahlungsexponierten Gebieten die Differenzen der beiden Modelle im Bezug zur Schneeschmelze mit der Zeit deutlicher zunehmen als in sonnenabgewendeten Bereichen des Untersuchungsgebiets. Bei der Zeitreihenanalyse der Saison 2017 wird sichtbar, dass beim Vergleich des nördlich mit dem südlich exponierten "Point of Interest" die Abschmelzzeitpunkte 7 Tage auseinander liegen (siehe Tabelle 6). Im Verlauf der Schmelzsaison ist klar erkennbar, dass sich die Modelldifferenzen vor allem in strahlungsintensiven Arealen dieses Gebiets deutlich vergrößern. Die räumlichen Darstellungen und die Gegenüberstellungen von kumulierter kurzwelliger Strahlung zu Modelldifferenzen untermauern dies eindeutig. Somit lässt sich bei diesen zeitlich und räumlich hochauflösend durchgeführten Simulationen festhalten, dass es zwischen den Abweichungen der Simulationen mittels des "Day-Degree" Ansatzes zu jenen von Alpine3D und der Strahlung einen Zusammenhang gibt, eindeutig bestätigen. Zusätzlich lässt sich sagen, dass ein einfacher temperaturbasierter "Day-Degree" Ansatz mit einem gemäß der Literatur angewendeten einheitlichen Gradtag-Faktor, der für die Höhenlage und das Klima des Einzugsgebiets charakteristisch ist, die Schmelze vor allem in Bereichen mit hohen kurzwelligen Strahlungswerten im Verlauf der Schmelzsaison deutlich unterschätzt.

Um die durchgeführten Analysen in dieser Arbeit richtig interpretieren zu können, ist es zudem wichtig, wie bereits diskutiert, jeweils die meteorologische Situation im Untersuchungsgebiet zu und vor den Analysezeitpunkten in Betracht zu ziehen, vor allem, wenn diese im Untersuchungsgebiet in der vertikalen Erstreckung einem klaren Höhentrend unterliegt und Schmelzprozesse nicht überall im Gebiet stattfinden. Herrschen konstante meteorologische Bedingungen und Schneeschmelze findet nahezu überall im Untersuchungsgebiet statt, kann der Zusammenhang der Strahlung mit den Modelldifferenzen in allen Saisonen eindeutig nachgewiesen werden.

Ändert man die räumliche Skala auf eine Rastergröße von 1x1km, weisen jene Rasterzellen, die hauptsächlich strahlungsintensive Areale beinhalten, die höchsten mittleren Modelldifferenzen auf. Weiters ist die Spannweite im Vergleich mit der 50x50m Simulation durch das Mitteln der Werte um einiges geringer. In topographisch auf kleinräumiger Skala differenten alpinen Gelände wird auf Grundlage dieser Analyse empfohlen, möglichst kleine räumliche Auflösungen in Betracht zu ziehen, um die Unterschiede aufgrund von Exposition berücksichtigen zu können und in weiterer Folge eine plausible Schmelzsimulation durchführen zu können.

Weiterführend kann diese Problemstellung auf unterschiedlichste Art und Weise behandelt und diskutiert werden. Es kann der Einfluss der weiters auf die Schneeschmelze einwirkenden Faktoren, wie beispielsweise der langwelligen Strahlung, untersucht werden. Hinsichtlich der aus ein paar Kilometern Entfernung in das Gebiet interpolierten Stationsdaten, wäre eine Sensitivitätsanalyse sinnvoll. Zudem könnten die meteorologischen Inputdatensätze, beispielsweise auch mit INCA-Forecastdaten oder INCA-Hindcastdaten verglichen werden. Die Validierung der Ergebnisse wäre insgesamt von großem Interesse. Hierzu müssen aber zuerst Zeitreihen von Messwerten zu Schneehöhe oder Schneewasseräguivalent beziehungsweise zum Abfluss über mehrere Jahre vorliegen. 2021 soll eine ZAMG-Messtation. die auch Schneehöhenmessungen durchführt. direkt am Kölnbreinspeicher installiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Validierung dieser Ergebnisse mit Hilfe von Sattelitendaten. Man könnte beispielsweise mittels Sentinel-

Schlussfolgerung und Ausblick

2 Daten eruieren, wo Schnee liegt und wo nicht und folglich den Zeitpunkt des Ausschmelzens der Modelle verifizieren. In weiterer Folge könnte dann eine Kalibrierung des "Day-Degree" Faktors durchgeführt und dieser speziell für dieses Untersuchungsgebiet und für kleine Skalen (wie hier z.B. für 50x50m) definiert werden. Die in dieser Arbeit aufgezeigten Schneeschmelzdifferenzen zu bestimmten Zeitpunkten und Expositionen könnten in einem nächsten Schritt dazu dienen, eine geeignete Anpassung eines Gradtag-Faktors abzuleiten. Weiters besteht die Möglichkeit einer schrittweisen Implementierung von Strahlungs-, Topografie- oder beispielsweise auch Vegetationsparametern in den "Day-Degree" Ansatz und einer weiterführenden Analyse ob und wenn ja sich dadurch die Modellperformance des "Day-Degree" Ansatzes in zeitlich und räumlich hochauflösenden Simulationen verbessert. Zudem kann auch die Variabilität des Gradtag-Faktors untersucht und analysiert werden. Überdies wäre es eine interessante Aufgabenstellung, einen simplen Schmelzterm nicht mit einem Gradtag-Faktor, sondern mit einem Strahlungsfaktor zu definieren und darauf aufbauend zu analysieren, inwieweit dies eine Verbesserung der Schmelzsimulation in strahlungsexponierten Gebieten gegenüber einem temperaturbasiertem "Day-Degree" Ansatz darstellt. Allerdings stellt sich bei der Möglichkeit einer Hinzunahme von Strahlungsinformation als weiterer Modellinputparameter die Frage, ob man dann nicht gleich stattdessen einfachere physikalisch-basierte Modelle verwenden sollte, wie einleitend erwähnt in der Studie von Massmann (2019) aufgezeigt wird. Natürlich sind physikalisch-basierte Modelle rechenintensiver, aber man könnte diese beispielsweise nur für kleine hochalpine Kopfeinzugsgebiete anwenden und mit den weniger aufgelösten konzeptionellen Modellen die größeren Gebiete zur operationellen Vorhersage abdecken.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Hrsg.). (21. 12 2020). https://www.data.gv.at. Von https://www.data.gv.at/anwendungen/bundeslaendergrenzen-oesterreich/ abgerufen
- Bavay, M., & Egger, T. (2014). *MeteoIO 2.4.2: a processing library for meteorological data.*
- Braithwaite, R. J., & Olesen, O. B. (1989). *Calculation of glacier ablation from air temperature, West Greenland.*
- Dilley, A., & O'brien, D. (1998). Estimating downward clear sky long-wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water.
- E-Control. (2020). *Statistikbroschüre* 2019 Unsere Energie in Zahlen gemessen. Wien: E-Control.
- Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.). (23. 12 2020). *www.slf.ch*. Von https://www.slf.ch/de/services-und-produkte/alpine-3d.html abgerufen
- Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.). (23. 12 2020). *www.slf.ch*. Von https://www.slf.ch/de/schnee/schneedecke/schneedeckenshymodellierung.htm l abgerufen
- Finsterwalder, S., & Schunk, H. (1887). Der Suldenferner. Zeitschrift des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins, 18, S. 72-89.
- Fletcher, C. (2005). Investigations into Seasonal Predictability of North Atlantic Winter *Climate.*
- Frey, S., & Holzmann, H. (2015). A conceptual, distributed snow redistribution model. *Hydrology and Earth System Science, 19*, S. 4517-4530.
- Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, *282*, S. 104-115.
- Koch, S., DesJardins, M., & Kocin, P. (1983). An interactive Barnes objective map analysis scheme for use with staellite and conventional data. *Journal of Climate* and Applied Meteorology, 22(9), S. 1487-1503.

- Kustas, W., & Rango, A. (1994). A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model. *Water Resources Research, 30*(5), S. 1515-1527.
- Land Kärnten (Hrsg.). (21. 12 2020). *https://www.data.gv.at*. Von https://www.data.gv.at/katalog/dataset/25ab688b-5b8b-4363-a1a8-17662dc05db8 abgerufen
- Land Salzburg (Hrsg.). (21. 12 2020). *https://www.data.gv.at*. Von https://www.data.gv.at/katalog/dataset/d585e816-1a36-4c76-b2dc-6db487d22ca3 abgerufen
- Lehning, M., Michael, I., Gustafsson, D., Nguyen, T., Stahli, M., & Zappa, M. (2006). ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrol. Process.*, 20, S. 2111-2128.
- Linsley, R. (1943). A simple procedure for the day-to-day forecasting of runoff from snow-melt. *American Geophysical Union, 3*, S. 62-67.
- Liston, G. E., & Sturm, M. (1998). A snow-transport model for complex alpin terrain.
- Liston, G., & Elder, K. (2006). Meteorological Distribution System for High-Resolution Terrestrial Modeling (MicroMet). *Journal of Hydrmeteorology, 7*, S. 217-234.
- Marks, D., Domingo, J., Susong, D., Link, T., & Garen, D. (1999). A spatially distributed energy balance snowmelt modelfor application in mountain basins. *Hydrol. Process., 13*, S. 1935-1959.
- Martinec, J. (1960). The Day-Degree Factor for Snowmelt-Runoff Forecasting.
- Massmann, C. (2019). Modelling Snowmelt in Ungauged Catchments. Water, 11(2).
- Mazurkiewicz, A., Callery, D., & McDonnell, J. (2008). Assessing the controls of the snow energy balanceand water available for runoff in a rain-on-snow environment. *Journal of Hydrology, 354*, S. 1-14.
- Nachtnebel, H., Baumung, S., & Lettl, W. (1993). *Abflussprognosemodell für das Einzugsgebeit der Enns uns Steyr.* Wien.
- Rango, A., & Martinec, J. (1995). Revisiting the Degree-Day Method for Snowmelt Computations. (A. W. Association, Hrsg.) *Water Resources Bulletin, 31*(4).
- Singh, P., & Singh, V. (2001). *Snow and Glacier Hydrology.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

- Spence, R., & Bavay, M. (2013). Precipitation Redistribution for Snow Models. *Journal* of Hydrometeorology, 3, S. 524-538.
- Stadt Wien und Österreichische Länder (Hrsg.). (21. 12 2020). www.basemap.at. Von https://www.basemap.at/application/index.html#{%22center%22:[1506539.827 462635,5989045.234254445],%22zoom%22:8.51929788139116,%22rotation %22:0,%22layers%22:%220000100000%22} abgerufen
- U.S. Department of Agriculture (USDA) (Hrsg.). (2004). National Engineering Handbook. Abgerufen am 1. Jänner 2021 von https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch11.pdf
- Umweltbundesamt GmbH (Hrsg.). (21. 12 2020). *https://www.data.gv.at*. Von https://www.data.gv.at/katalog/dataset/clc2018 abgerufen
- Universität für Bodenkultur Wien (Hrsg.). (25. 01 2021). *www.forschung.boku.ac.at*. Von https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&me nue id in=300&id in=13378 abgerufen
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Faroux, S., Le Moigne, P., . . . Willemet, J.M. (2011). The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, *4*, S. 2365-2415.
- Weiss, L., & Wilson, W. (1958). Snow-Melt Degree-Day Ratios Determined from Snow-Lab Data. *American geophysical Union, 39*(4), S. 681-688.
- Wever, N., Fierz, C., Bavay, M., & Lehnig, M. (2013). Snow cover runoff and stream discharge modelling during snow melt in Alpine terrain.
- Winstral, A., Elder, K., & Davis, R. (2002). Spatial snow modeling of wind resdistributed snow using terrain-based parameters. *Journal of Hydrometeorology*, *3*, S. 524-536.
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Hrsg.). (3. 7 2021). *www.zamg.ac.at.* Von https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/messnetze/wetterstationen abgerufen
- Zingg, T. (1951). Beziehung zwischen Temperatur und Schmelzwasser und ihre Bedeutung für Niederschlags- und Abflussfragen.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiebilanz der Schneedecke (Fletcher, 2005); 2
Abbildung 2: Lage des Untersuchungsgebiets (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2020)6
Abbildung 3: Foto von der Begehung des Untersuchungsgebiets am 16.08.2020 (aufgenommen von Armin Alexander Ebner, BSc)
Abbildung 4; Topografische Untersuchungsgebietsübersicht
Abbildung 5: Darstellung der Expositionen im Untersuchungsgebiet
Abbildung 6: Landbedeckung 2018 – CORINE 2018 (Umweltbundesamt GmbH, 2020) 10
Abbildung 7: Lage der ZAMG-Stationen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2021)
Abbildung 8: Die wichtigsten physikalischen Prozesse, die SNOWPACK beschreibt (Eidg. Forschungsanstalt WSL, www.slf.ch, 2020)
Abbildung 9: Mittlere tägliche Temperatur im Frühjahr 2017 21
Abbildung 10: Mittlere tägliche kurzwellige Strahlung 2017 21
Abbildung 11: Mittlerer täglicher Niederschlag 2017 22
Abbildung 12: Mittlerer täglicher Schneewasseräquivalent im Jahr 2017 22
Abbildung 13: Lage der vier "Points of Interest" im Untersuchungsgebiet 24
Abbildung 14: Grafische Darstellung der Exposition der "Points of Interest"
Abbildung 15: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI 21°" 25
Abbildung 16: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI" 117°" 26
Abbildung 17: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI 229°" 26
Abbildung 18: Schneewasseräquivalent im Analysezeitraum 2017 "POI 312°" 27
Abbildung 19: Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse am 15.Mai 29
Abbildung 20: Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse am 29. Mai 30
Abbildung 21; Räumliche Darstellung der Simulationsergebnisse am 12. Juni 31
Abbildung 22; Skalenuntersuchung am 29. Mai 2017

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 23: Korrelation am 15. Mai 2017 (gesamtes Untersuchungsgebiet) 35
Abbildung 24: Korrelation am 15. Mai 2017 (zwischen 1700 und 2115m ü.A.) 35
Abbildung 25: Korrelation am 15. Mai 2017 (zwischen 2115 und 2530m ü.A.) 36
Abbildung 26: Korrelation am 15. Mai 2017 (über 2530m ü.A.) 36
Abbildung 27: Boxplots zur Analyse am 15. Mai 2017 37
Abbildung 28: Korrelation am 29. Mai 2017 (gesamtes Untersuchungsgebiet) 38
Abbildung 29: Korrelation am 29. Mai 2017 (zwischen 2115 und 2530m ü.A.) 38
Abbildung 30: Korrelation am 29. Mai 2017 (über 2530m ü.A.) 39
Abbildung 31: Boxplots zur Analyse am 29. Mai 2017 40
Abbildung 32: Korrelation am 12. Juni 2017 (gesamtes Untersuchungsgebiet) 41
Abbildung 33: Boxplots zur Analyse am 12. Juni 2017 42

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1; Stationshöhen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2021) 11
Tabelle 2: Meteorologische Inputdaten
Tabelle 3: Tabellarische Auflistung der angewendeten Interpolationsmethoden 14
Tabelle 4: Simulationsübersicht
Tabelle 5; Tabellarische Übersicht der Exposition der "Points of Interest" 25
Tabelle 6: Übersicht der Zeitreihenanalyse 28
Tabelle 7; Statistische Parameter der Skalenuntersuchung am 29. Mai 2017 34
Tabelle 8: Mittlere Simulationsdifferenzen aller simulierten Saisonen
Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße R^2 (Korrelation: Δ SWE vs. kumulierte kurzwellige
Strahlung) aller simulierten Saisonen 44

9. Anhang

9.1. Saison 2014

9.1.1. Räumliche Darstellung der Ergebnisse

15.Mai 2014 - SWE [mm] Alpine3D



SWE [mm]
0 - 100
100 - 200
200 - 300
300 - 400
400 - 500
500 - 600
600 - 700
700 - 800
800 - 900
900 - 1000
1000 - 1100

15.Mai 2014 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



15.Mai 2014 - ΔSWE [mm]







SWE [mm]
0 - 100
100 - 200
200 - 300
300 - 400
400 - 500
500 - 600
600 - 700
700 - 800
800 - 900
900 - 1000
1000 - 1100

60 - 120

240 - 300

29.Mai 2014 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



29.Mai 2014 - ΔSWE [mm]



12.Juni 2014 - SWE [mm] Alpine3D





12.Juni 2014 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



12.Juni 2014 - ΔSWE [mm]





Anhang







26.Juni 2014 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



26.Juni 2014 - ΔSWE [mm]









Anhang



9.1.3. Zeitreihenanalyse






9.1.4. Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung





Korrelation am 15.Mai 2014 - Höhenstufe: zwischen 1700 und 2115m ü.A.

Korrelation am 15.Mai 2014 - Höhenstufe: zwischen 2115 und 2530m ü.A. $\Delta SWE[mm]$ am 15.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.54 | mittlere Dif. = 59mm



Korrelation am 15.Mai 2014 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. Δ SWE[mm] am 15.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0 | mittlere Dif. = 36mm









Korrelation am 29.Mai 2014 - Höhenstufe: zwischen 1700 und 2115m ü.A. Δ SWE[mm] am 29.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.14 | mittlere Dif. = 67mm

Korrelation am 29. Mai 2014 - Höhenstufe: zwischen 2115 und 2530m ü.A. Δ SWE[mm] am 29. Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.82 | mittlere Dif. = 250mm



Korrelation am 29. Mai 2014 - Höhenstufe: über 2530m ü. A. Δ SWE[mm] am 29. Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.61 | mittlere Dif. = 207mm







Korrelation am 12.Juni 2014 - Höhenstufe: zwischen 2115 und 2530m ü.A. Δ SWE[mm] am 12.Juni vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.74 | mittlere Dif. = 212mm

Korrelation am 12.Juni 2014 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 12.Juni vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.65 | mittlere Dif. = 269mm



Boxplots ΔSWE [mm] am 12.Juni 2014

N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)









∆SWE [mm] am 26.Juni



9.2. Saison 2015

9.2.1. Räumliche Darstellung der Ergebnisse





60 - 120

480 - 540

15.Mai 2015 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



15.Mai 2015 - ΔSWE [mm]













29.Mai 2014 - ΔSWE [mm]











12.Juni 2015 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



12.Juni 2015 - ΔSWE [mm]











26.Juni 2015 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



26.Juni 2015 - ΔSWE [mm]





9.2.2. Meteorologischer Überblick





9.2.3. Zeitreihenanalyse



Schneewasseräquivalent - 2015 POI 117° (Südostost), 2428m ü.A.





9.2.4. Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung







Korrelation am 15.Mai 2015 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 15.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.75 | mittlere Dif. = 126mm



Boxplots ΔSWE [mm] am 15.Mai 2015

N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)













Boxplots ∆swe [mm] am 12.Juni 2015 N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)



Boxplots der kumulierten Strahlung [W/m²] bis zum 12. Juni 2015 N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)





Korrelation am 12.Juni 2015 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 12.Juni vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.38 | mittlere Dif. = 249mm



Boxplots ΔSWE [mm] am 26.Juni 2015









9.3. Saison 2016

9.3.1. Räumliche Darstellung der Ergebnisse





SWE [mm]
0 - 100
100 - 200
200 - 300
300 - 400
400 - 500
500 - 600
600 - 700
700 - 800
800 - 900
900 - 1000
1000 - 1100

15.Mai 2016 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



15.Mai 2016 - ΔSWE [mm]











29.Mai 2016 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



29.Mai 2016 - ΔSWE [mm]





0 - 60 60 - 120







12.Juni 2016 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



12.Juni 2016 - ΔSWE [mm]





9.3.2. Meteorologischer Überblick





9.3.3. Zeitreihenanalyse



Schneewasseräquivalent - 2016 POI 117° (Südostost), 2428m ü.A.





9.3.4. Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung











ΔSWE [mm] am 15.Mai

ò



Korrelation am 29.Mai 2014 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 29.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.61 | mittlere Dif. = 207mm



Boxplots ΔSWE [mm] am 29.Mai 2016 N (315° - 45°), Ο (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)



Boxplots der kumulierten Strahlung [W/m²] bis zum 29. Mai 2016
N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)





Korrelation am 12.Juni 2016 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 12.Juni vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.48 | mittlere Dif. = 187mm



Boxplots ΔSWE [mm] am 12.Juni 2016

N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)



Boxplots der kumulierten Strahlung [W/m²] bis zum 12. Juni 2016 N (315° - 45°), O (45° - 135°), S (135° - 225°), W (225° - 315°)



9.4. Saison 2018

9.4.1. Räumliche Darstellung der Ergebnisse

15.Mai 2018 - SWE [mm] Alpine3D







15.Mai 2018 - ΔSWE [mm]









29.Mai 2018 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



29.Mai 2018 - ΔSWE [mm]











26.Juni 2018 - SWE [mm] "Day-Degree" Ansatz



26.Juni 2018 - ΔSWE [mm]



ΔSWE [mm] 0 - 60 60 - 120 120 - 180 180 - 240 240 - 300 300 - 360 360 - 420 420 - 480 480 - 540 540 - 600

9.4.2. Meteorologischer Überblick







9.4.3. Zeitreihenanalyse



Schneewasseräquivalent - 2018 POI 117° (Südostost), 2428m ü.A.





9.4.4. Gegenüberstellung der Simulationsabweichungen zur kumulierten kurzwelligen Strahlung



99
Anhang



Korrelation am 15.Mai 2018 - Höhenstufe: zwischen 2115 und 2530m ü.A. ASWE(mm) am 15 Mai vs. kum. Strahlung (w/m²) - $\mathbb{R}^2 = 0.24$ L mittlere Dif. = 104mm

Korrelation am 15.Mai 2018 - Höhenstufe: über 2530m ü.A. ΔSWE[mm] am 15.Mai vs. kum. Strahlung [w/m²] - R² = 0.22 | mittlere Dif. = 113mm



Boxplots ΔSWE [mm] am 15.Mai 2018









Anhang





Boxplots der kumulierten Strahlung [W/m²] bis zum 29. Mai 2018
N $(315^\circ$ - $45^\circ),$ O $(45^\circ$ - $135^\circ),$ S $(135^\circ$ - $225^\circ),$ W $(225^\circ$ - $315^\circ)$



Korrelation am 26.Juni 2018





Anhang

