



# Energiebilanz im Ablationsgebiet der Pasterze

BACHELORARBEIT

Manuel Theurl, 01610570  
13. November 2019

# Abstract

# Vorwort

# Danksagung

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretisches Grundwissen</b>	<b>1</b>
2.1	Pasterze und Ablationsgebiet . . . . .	1
2.2	Energiebilanz . . . . .	3
2.2.1	Energiebilanz Komponenten . . . . .	3
2.2.2	Albedo . . . . .	5
2.3	“Global dimming” . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Methodik</b>	<b>8</b>
3.1	Berechnung der Energiebilanz . . . . .	8
3.2	Trendelimination . . . . .	10
3.3	Berechnung des resultierenden Schmelzwassers . . . . .	10
3.4	Programmierung in Python . . . . .	10
3.4.1	Umgebung . . . . .	10
3.4.2	Unittesting . . . . .	10
3.4.3	Graphical User Interface . . . . .	11
3.5	Softwareverwaltung . . . . .	11
3.5.1	Download und Installation . . . . .	11
3.5.2	Update . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Interpretation</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>14</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Großglockner und Pasterze (Fotos: Gerhard K. Lieb vom 22.09.2006, Bildbearbeitung: Ulf Oberth) . . . . .	2
2	Längenverluste der Pasterze nach Einzeljahren und in Summe seit 1856 (Quelle: Breininger, Wakonigg und G. Lieb, o.D.) . . . . .	3
3	Energiebilanz Komponenten (Oerlemans, 2010) . . . . .	4
4	Spektrale Relektorkurven von Eis und Schnee (Oerlemans, 2010) . . .	6

# Tabellenverzeichnis

1	Python Module mit Erklärung . . . . .	10
---	---------------------------------------	----

# 1 Einleitung

Die Pasterze am Fuße des Großglockners in Österreich ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen. Durch eine Betrachtung der Energiebilanz im Ablationsgebiet dieser, soll es ermöglicht werden, das Wissen über die Pasterze und vor allem auch über das Abschmelzen dieser zu vertiefen. Der vom Menschen verursachte Klimawandel und die damit zusammenhängende globale Temperaturzunahme spielt eine wesentliche Rolle bei der Betrachtung der Energiebilanz und bildet gleichzeitig das Bindeglied zwischen Hydrologie und Soziologie. Thematisch passt diese Arbeit also perfekt zu dem Ausgangsartikel “Socio-hydrology: A new science of people and water” von M. Sivapalan, H. Savenije and G. Blöschl. Durch Wetterdaten von der Wetterstation bei der Pasterze und geeignete Energiebilanz-Kalkulationen soll somit ein Modell generiert werden, dass die Vergangenheit beschreibt, die Gegenwart bestätigt und Prognosen für die Zukunft erstellt.

## 2 Theoretisches Grundwissen

Um die vorgestellte Forschungsfrage und die damit zusammenhängenden Methoden einwandfrei verstehen zu können, braucht es ein gewisses Grundwissen über die Pasterze an sich, über die Energiebilanz sowie über das Phänomen “Global dimming” bzw. “Global brightening”.

### 2.1 Pasterze und Ablationsgebiet

Die Pasterze beim Großglockner (3798 *m*) ist trotz der Abschmelztendenzen nach wie vor der größte Gletscher der Ostalpen. Messungen aus dem Jahre 2006 ergeben eine damalige Länge von 8.3 *km*, eine Fläche von 17.3 *km*<sup>2</sup> und ein Volumen von 1.7 *km*<sup>3</sup> (vgl. G. K. Lieb und Slupetzky, 2011, S. 10). Der Großglockner und die Pasterze stellen eine “fachlich perfekte” Modellregion dar und sind damit wohl stark für die “österreichische Bergästhetik” verantwortlich (vgl. G. K. Lieb und Slupetzky, 2011, S. 13).

Die Pasterze hatte um das Jahr 1850 ihren Höchststand. Seit diesem Zeitpunkt nimmt die Eismasse sowie die Gletscherlänge, wie in Abbildung 2 ersichtlich, aufgrund klimatischer Veränderungen stetig ab (vgl. G. K. Lieb und Slupetzky, 2011, S. 17).

Die kleine Eiszeit von ca. 1260-1860 zerstörte (durch den Hochstand 1850) Spuren von früheren Vorstößen wie zum Beispiel Moränen. Funde von Holz und Torf vor



dem aktuellen Eisrand ergaben jedoch ein Alter von 9000 Jahren, was bedeutet, dass die Pasterze schon zumindest seit dem frühen Holozän existiert (vgl. G. K. Lieb und Slupetzky, 2011, S. 24).

Folgende Abbildung zeigt einen Überblick vom Großglockner, den umliegenden Bergen und der Pasterze.

### Großglockner [3798m] und Pasterze

Blick vom Fuscherkarkopf [3331m] Richtung SSW bis WNW

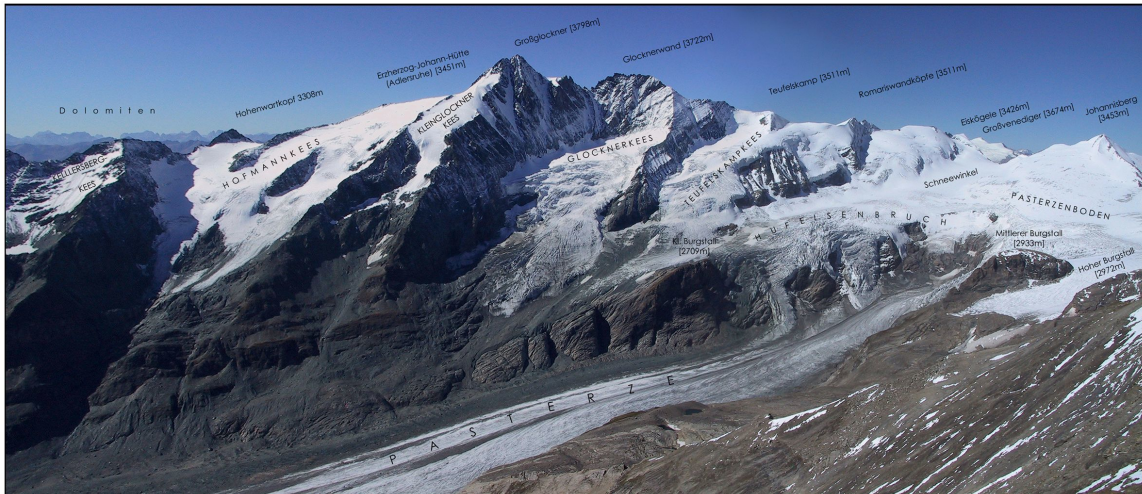


Abbildung 1: Großglockner und Pasterze (Fotos: Gerhard K. Lieb vom 22.09.2006, Bildbearbeitung: Ulf Oberth)

Der erwähnte Längenverlust wird mit folgender Abbildung ersichtlich.

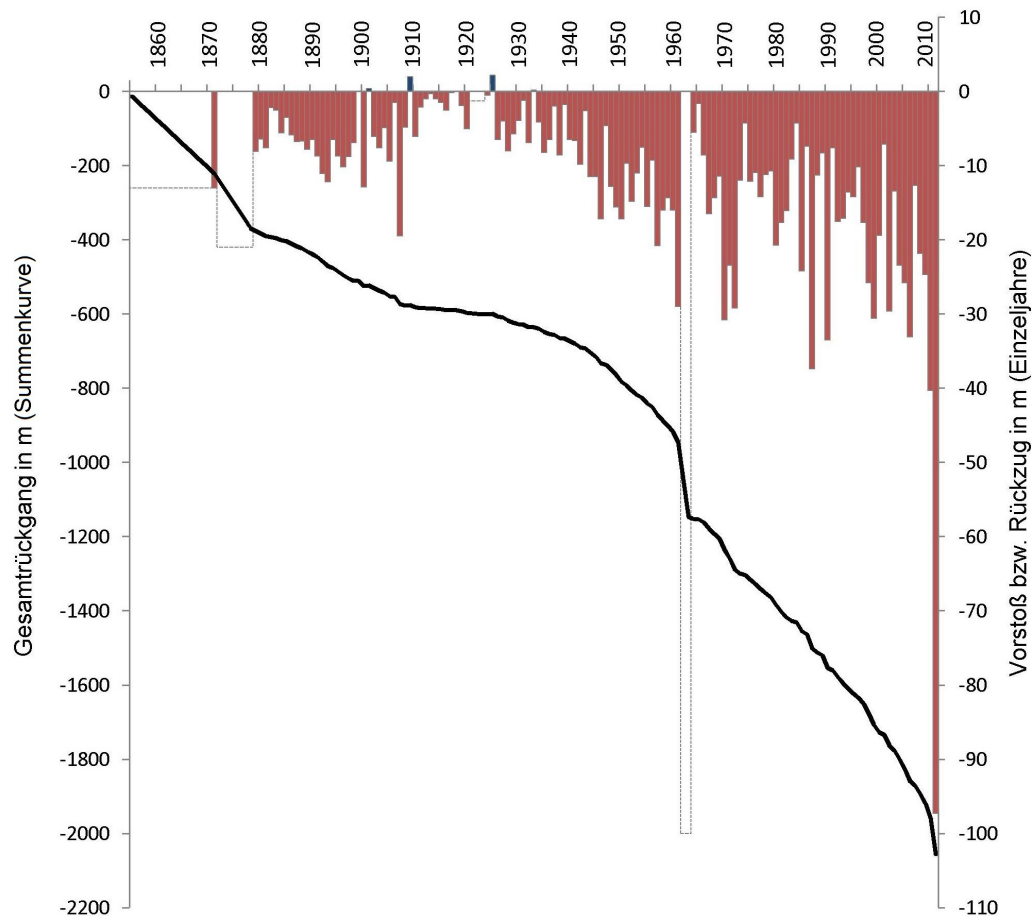


Abbildung 2: Längenverluste der Pasterze nach Einzeljahren und in Summe seit 1856 (Quelle: Breininger, Wakonigg und G. Lieb, o.D.)

## 2.2 Energiebilanz

### 2.2.1 Energiebilanz Komponenten

Um die Energiebilanz in der oberen Schicht eines Gletschers zu verstehen, müssen die einzelnen Komponenten, welche einen Einfluss auf die Energiebilanz haben, betrachtet werden. Abbildung 3 gibt einen Überblick über diese Komponenten.

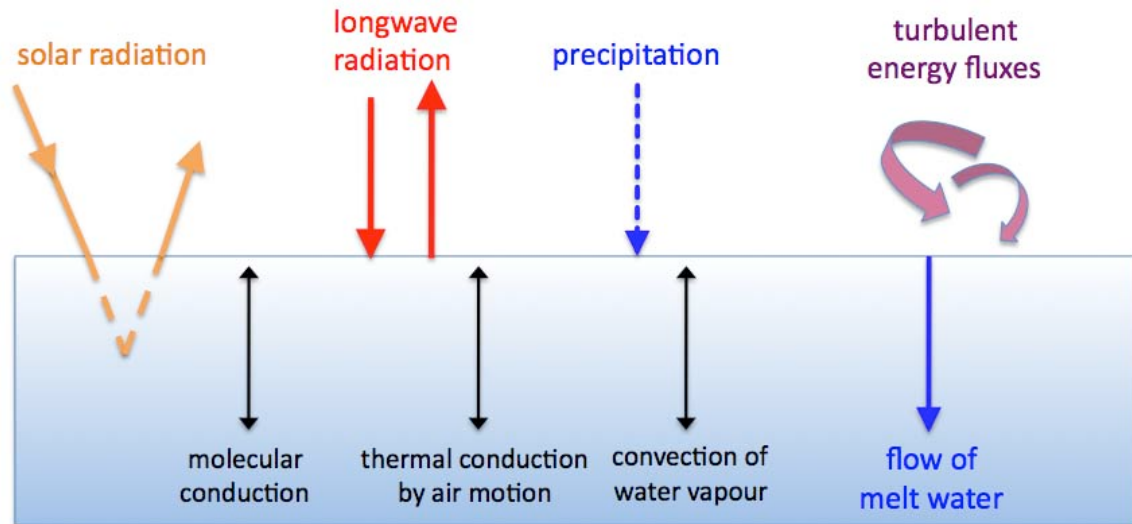


Abbildung 3: Energiebilanz Komponenten (Oerlemans, 2010)

Den größten Anteil am Energiefluss hat die kurzwellige Sonnenstrahlung. Typischerweise liegt dieser Anteil bei ein paar Hundert Watt pro Quadratmeter. Je nach Beschaffenheit der Gletscheroberfläche wird mehr oder weniger dieser kurzwelligen Strahlung reflektiert. Der Prozentsatz, welcher angibt, wie viel Strahlung reflektiert wird, wird mit Albedo bezeichnet (siehe Kapitel 2.2.2). Jener Teil, der nicht reflektiert wird, dringt in den Gletscher ein, wirkt sich also positiv auf die Energiebilanz aus.

Langwellige Strahlung wird (fast) vollständig vom Gletscher absorbiert. Der Gletscher strahlt gleichzeitig aber auch langwellige Strahlung wieder ab. Bei warmen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit und Präsenz von Wolken, ist die Bilanz der langwelligen Strahlung positiv, ansonsten ist sie im Normalfall negativ.

Wolken führen nämlich dazu, dass weniger kurzwellige Sonnenstrahlung und mehr langwellige Strahlung zur Gletscheroberfläche gelangt. Für die Energiebilanz ist dabei aber noch wichtig zu wissen, ob der Gletscher ein hohes Albedo (z.B. Neuschnee) oder niedriges Albedo (z.B. Eis) aufweist. Ein hohes Albedo würde dazu führen, dass der Großteil an kurzwelliger Strahlung reflektiert wird. Nimmt also die Bewölkung zu, so gibt es mehr langwellige Strahlung die trotzdem absorbiert werden kann. Daraus folgt eine positive Auswirkung auf die Energiebilanz.

Simultan dazu wirkt sich Bewölkung bei niedrigem Albedo negativ auf die Energiebilanz aus. Der kurzwellige Strahlungseffekt würde dabei nämlich dem langwelligen überwiegen, da kurzwellige Strahlung energiereicher ist als langwellige.

Ob sich der Niederschlag positiv oder negativ auf die Energiebilanz des Gletschers auswirkt hängt von der Temperatur von diesem ab. Je nachdem ob die Temperatur höher oder niedriger ist als die Gletscheroberflächentemperatur ist die Auswirkung positiv oder negativ. Die Energieflüsse, welche hier wirken, sind aber sehr klein.

Turbulente Energieflüsse zwischen der Gletscheroberfläche und der Atmosphäre wirken sich signifikant auf den Energiefluss aus. Grundvoraussetzung für diese turbulenten Energieflüsse ist, dass die Lufttemperatur über dem Gefrierpunkt liegt. Grund dafür ist, dass die Energieflussrichtung im Gletscher dem Gradienten der Temperatur entspricht, was bedeutet, dass der Energiefluss in Richtung der Gletscheroberfläche verläuft. Je nach dem wie hoch die Lufttemperatur und wie hoch die Luftfeuchtigkeit ist, kann nun entweder durch Verdunstung Kälte oder durch Kondensation Wärme entstehen. Bei einer Lufttemperatur von  $10^{\circ}\text{C}$  beispielsweise, stellt die relative Feuchtigkeit von 50 % den Wendepunkt zwischen positiver ( $> 50\%$ ) und negativer ( $< 50\%$ ) Auswirkung auf die Energiebilanz dar.

Der Fluss von Schmelzwasser innerhalb des Gletschers stellt einen latenten Wärme-  
fluss dar. “Molecular conduction” bezeichnet die Wärmeleitung durch Kollision von mikroskopisch kleinen Partikeln, ebenfalls wirkt sich die Reibungshitze durch das Reiben des Eises an der Oberfläche positiv auf die Energiebilanz auf.

Kleine Energieflüsse entstehen auch noch durch Hitze- und Wasserdampftransport durch Konvektion im Schnee oder Firn. Diese Flüsse wirken sich aber vor allem auf die Metamorphose der Schneekristalle aus und sind abhängig von der Dichte des Schnees und vom Temperaturgradienten im Schnee (vgl. Oerlemans, 2010, S. 16, 17).

### **2.2.2 Albedo**

Die Albedo bezeichnet das Verhältnis zwischen rückgestrahltem und einfallendem Licht. Sie gibt also den Prozentsatz an Strahlung an, der beispielsweise vom Gletscher reflektiert wird. Folgende Abbildung gibt einen Überblick über das Rückstrahlvermögen von verschiedenen Oberflächenbedeckungen eines Gletschers.

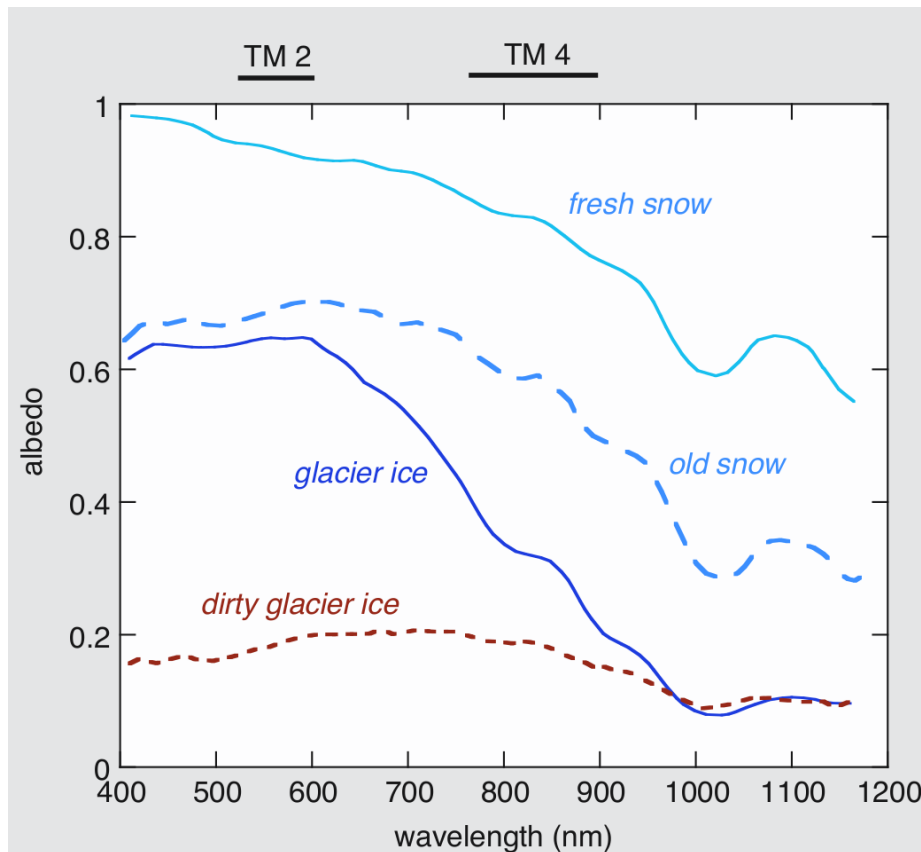


Abbildung 4: Spektrale Relektorkurven von Eis und Schnee (Oerlemans, 2010)

Auf der Pasterze verringert sich die Nettostrahlung welche sich positiv auf die Energiebilanz des Gletschers auswirkt mit zunehmender Höhe. Grund dafür ist eben genau die Albedo, denn Schnee bedeckt die höher liegenden Teile des Gletschers und reflektiert mehr Strahlung. Das Eis im Ablationsgebiet absorbiert sehr viel Strahlungsenergie (vgl. Cuffey und Paterson, 2010, S. 171).

## 2.3 “Global dimming”

Eine der Hypothesen greift auch das Thema “Global Dimming” auf. Mehrere Langzeitstudien von Oberflächenstrahlungsmessungen haben gezeigt, dass die Strahlung, welche auf der Erdoberfläche ankommt im Hinblick auf eine dekadische Zeit nicht konstant ist, d.h. sich auch innerhalb von 10er-Jahren signifikant ändern kann. Diese Änderungen wurden unter den Begriffen “Global dimming” und “Global brightening” zusammengefasst, wobei der Begriff “global” sich auf die Summe von diffuser und direkter Sonnenstrahlung bezieht und nicht auf global, im Sinne von “auf der ganzen Welt”.

Änderung der Oberflächenstrahlung können nicht nur bei wolkigen Bedingungen festgestellt werden, sondern auch bei einer wolkenfreien Atmosphäre. Das deutet darauf hin, dass sich der Mensch durch Einbringung von Aerosolen in die Atmosphäre auf diese Oberflächenstrahlung auswirkt (vgl. Wild, 2009, S. 1).

Aerosole können diese Oberflächenstrahlung verändern, indem sie die Sonnenstrahlen streuen oder absorbieren. Weiters können die Aerosole als Kondensationskerne bei der Wolkenbildung agieren und somit diese fördern. Insgesamt reduzieren also Aerosole die Oberflächenstrahlung. Eine der Hauptursachen von “global dimming” ist somit die Erzeugung von Aerosolen durch die Industrie (vgl. Wild, 2009, S. 14).

Die Oberflächenstrahlung bzw. die kurzwellige Sonnenstrahlung spielt, wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, eine große Rolle in der Energiebilanz der Gletscher. Auf der Nordhalbkugel sei zu beobachten gewesen, dass bis zu den 1980-Jahren keine signifikanten Änderungen in den Flächenbedeckungen der Gletscher stattgefunden hat, aber ab ca. 1980 mit dem Effekt des “global brightening” die Gletscher schlagartig an Größe verloren hätten (vgl. Wild, 2009, S. 24).

## 3 Methodik

### 3.1 Berechnung der Energiebilanz

Cuffey und Paterson (2010) gibt in Kapitel 5 “Mass Balance Processes: 2. Surface Ablation and Energy Budget” detaillierte Formeln an, zur Berechnung der Energiebilanz. Ausgegangen wird von Formel

$$E_N = \underbrace{E_S^\downarrow + E_S^\uparrow + E_L^\downarrow + E_L^\uparrow}_{E_R} + E_G + E_H + E_E + E_P, \quad (1)$$

wobei  $E_N$  dem Nettoenergiefluss in die Oberfläche,  $E_S^\downarrow$  der ankommenden kurzweligen Strahlung,  $E_S^\uparrow$  der reflektierten kurzweligen Strahlung,  $E_L^\downarrow$  der ankommenden langwelligen Strahlung,  $E_L^\uparrow$  der reflektierten langwelligen Strahlung  $E_G$  dem Energiefluss unter der Oberfläche,  $E_P$  dem Energieeintrag durch Niederschlag und  $E_H$  und  $E_E$  den spürbaren und latenten Wärmeflüssen durch Zirkulation entsprechen.  $E_R$  ist die Summe aller Strahlungen und gibt somit die Nettostrahlung an (positiv für Energieeintrag in den Gletscher).

Ausgehend von dieser Grundgleichung beschreibt Cuffey und Paterson weitere Aspekte die zu berücksichtigen sind, wie zum Beispiel

- Schmelzrate, abhängig auch von Dicke
- Wiedergefrieren von Schmelzwasser in den unteren Schichten erzeugt Wärme
- Abhängigkeit der kurzweligen Strahlung vom Einfallswinkel und von der atmosphärischen Durchlassungsfähigkeit

Um die spürbaren und latenten Wärmeflüsse  $E_H$  und  $E_E$  zu berechnen, zeigt Cuffey und Paterson eine Berechnungsmethode über den “Bulk Aerodynamic Approach” und die “Flux-gradient Theory” auf (vgl. Cuffey und Paterson, 2010, S. 153–157).

Die genaue Herleitung dieser Formeln kann dort nachgelesen werden, als Ergebnis folgen schlussendlich aber die zwei Formeln

$$E_E = 22.2 C^* \mu(z) (e_a - e_s) \quad (2)$$

für den latenten und

$$E_H = 0.0129 C^* P \mu(z) (T_a(z) - T_s) \quad (3)$$

für den sensiblen Wärmefluss.  $C^*$  ist dabei der Transferkoeffizient und wird mit

$$C^* = \frac{k_o^2}{\ln^2(z/z_0)} \quad (4)$$

berechnet, wobei  $k_o = 0.4$  die Karmans Konstante,  $z_0$  die Messhöhe über dem Eis ist, in welcher die Windgeschwindigkeit gemessen wird und  $z = 0.003 \text{ m}$  dem Rauheitsparameter entspricht. Tabelle 5.4 in Cuffey und Paterson 2010 zeigt, dass dieser Parameter bei Eis im Ablationsgebiet zwischen 1 und 5 Millimetern beträgt. Deshalb wird er in den Berechnungen hier mit dem Mittelwert 3 Millimeter angenommen.

$T_s$  entspricht der Oberflächentemperatur des Eises und wird mithilfe vom Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$I = e \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5)$$

berechnet.  $e$  entspricht der Emissivität, welche laut TODO bei Eis im Infrarotbereich ca. 1 ist.  $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8}$  entspricht der Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T$  der Oberflächentemperatur des Körpers.  $I$  ist die abgestrahlte Energie in  $W/m^2$  welche hier in Form der langwelligen Ausstrahlung gegeben ist. Somit folgt durch Umstellungen die Oberflächentemperatur

$$T = \sqrt[4]{\frac{I}{\sigma}} \quad (6)$$

$e_a$  entspricht dem tatsächlichen Wasserdampfdruck in der Luft und wird aus dem Sättigungswasserdampfdruck

$$e_{a_{saturated}} = 0.6108 \cdot e^{17.27 \cdot \frac{T_a}{T_a + 237.3}} \quad (7)$$

durch

$$e_a = \frac{rel_{humidity}}{100} \cdot e_{a_{saturated}} \quad (8)$$

berechnet.  $T_a$  entspricht dabei der Lufttemperatur in Grad Celsius und die Einheit des Ergebnisses  $e_a$  ist  $kPa$ .

$e_s$  wird analog zu  $e_a$  berechnet, nur dass statt der Lufttemperatur  $T_a$  die mit Formel 6 berechnete Eisoberflächentemperatur verwendet wird.

weitere  $e$  und  $e_s$  in Formel 3  $P$   $T(z)$  und  $T$  in Formel 2



## 3.2 Trendelimination

## 3.3 Berechnung des resultierenden Schmelzwassers

## 3.4 Programmierung in Python

### 3.4.1 Umgebung

Die entwickelte Software wurde im Programm Pycharm Professional Edition objektorientiert geschrieben. Die verwendete Python Version ist Python 3.6.

Die verwendeten Module und deren Zweck in der Software werden in folgender Tabelle erklärt:

Tabelle 1: Python Module mit Erklärung

Modul	Zweck
tkinter	Erstellung des GUI
os	Ordnerverwaltung
configparser	Verwaltung der Konfigurationsdatei
numpy	Erstellung und Handhabung von Arrays
matplotlib	Grafische Darstellung der Daten
math	Berechnungsfunktionen (Logarithmus, Wurzel, e-Funktion, ..)
datetime	Verwaltung von Zeit und Datum
unittest	Erstellung einer Testumgebung

### 3.4.2 Unittesting

Das Python Modul unittest wird dazu verwendet, Funktionen des Programmes zu überprüfen. Für diese Arbeit wird es dazu verwendet, die Richtigkeit der Formeln für die Berechnung der Energiebilanz zu gewährleisten.

Cuffey und Paterson bieten auf Seite 157 Testwerte und das dazugehörige Ergebnis für den Transfer Koeffizienten  $C^*$  von Formel ?? und für die Berechnungen der sensiblen Hitze ?? an.

**Transfer Koeffizient** Bei gegebener Messhöhe zwischen 1 und 2 Metern und Oberflächenrauheit von 1 - 5 Millimetern (entspricht der Oberflächenrauheit von Eis im

Ablationsgebiet, Tabelle 5.4) soll ein Wert für den Transferkoeffizienten, Formel ?? zwischen 0.002 und 0.004 herauskommen.

Der Test mit einer Messhöhe von 1.5 Metern und Oberflächenrauheit von 2 Millimetern wird angenommen.

**Sensible Hitze** Bei gegebenem Luftdruck von 800 *hPa*, Windeschwindigkeit von 5 *m/s*, Lufttemperatur von 5°C und Transferkoeffizienten von 0.002 soll das Ergebnis der sensiblen Hitze, Formel ??, zwischen 47 und 53 *W/m<sup>2</sup>* liegen.

Weiters erwähnt ist, dass von einer schmelzenden Eisoberfläche ausgegangen wird und weil die Eisoberflächentemperatur nach Stefan Boltzmann (Formel ??) berechnet wird, wird der Funktion als langwellige Ausstrahlung ein Wert von 1000 *W/m<sup>2</sup>* mitgegeben, womit die Eistemperatur in der Berechnung bei 0 liegt.

Der Test wird wiederum angenommen.

### 3.4.3 Graphical User Interface

## 3.5 Softwareverwaltung

### 3.5.1 Download und Installation

Die Open Source Version der Software ist öffentlich auf der Plattform Bitbucket unter dem Namen EnergiebilanzAblationsgebietPasterze zugänglich. Mit Klick auf Clone erscheint ein Text, der kopiert und im Terminal im gewünschten Verzeichnis ausgeführt werden muss. Git muss dafür am Rechner installiert sein.

Beispiel:

Terminal: `git clone git@bitbucket.org:atraxoo/energiebilanzablationsgebietpasterze.git`

Es wird nun die gesamte Software, inklusive einer Messdaten Beispieldatei heruntergeladen. Weiters wird ein Verzeichnis Exe heruntergeladen, in dem sich eine ausführbare .exe Datei befindet, womit das Programm unter Windows direkt und ohne Installation von Python ausgeführt werden kann.

Empfehlenswerter, vor allem im Bezug auf Updates, ist es allerdings, die Software direkt mit Python auszuführen. Dafür muss Python 3.6 oder Python 3.7 am Rechner installiert sein. Für die richtige Funktion der Software müssen gewisse Python Module

installiert werden, welche sich in der requirements.txt Datei befinden. Diese Pakete können automatisiert mit dem Befehl

Windows Terminal: `pip install -r requirements.txt`

Linux Terminal: `pip3 install -r requirements.txt`

installiert werden.

Optional aber empfehlenswert ist außerdem die Verwendung einer virtual environment in Python. In der offiziellen Python Dokumentation unter <https://docs.python.org/3/library/venv.html> ist eine Erklärung dazu zu finden.

Nachdem die Module installiert wurden, kann die Software mit

Windows Terminal: `python main.py`

Linux Terminal: `python3 main.py`

gestartet werden.

### **3.5.2 Update**

Die aktuellste Version der Open Source Version kann mit

Terminal: `git pull` (Im Software Verzeichnis)

heruntergeladen werden. Zur direkt ausführbaren .exe Version gibt es keine Updates. Download .. `git pull` .. bzw exe als externer Link auf ein Google drive zip zb Besser aber `git pull` für Updates evtl requirements.txt installieren GUI ausführen Kurzanleitung mit Bildern zum Bedienen der Software

## 4 Ergebnisse und Interpretation

Doc File

## 5 Fazit

## 6 Literaturverzeichnis

Cuffey, K.; Paterson, W. S. B. (2010): The physics of glaciers. 4th ed. Burlington MA: Butterworth-Heinemann/Elsevier.

Lieb, G. Karl; Slupetzky, H. (2011): Die Pasterze. Salzburg: A. Pustet.

Wakonigg, B.; Wakonigg, H.; Lieb, G. K.: Längenänderung der Pasterze. Hg. v. Institut für Geographie und Raumforschung. Online verfügbar unter <https://geographie.uni-graz.at/de/forschung/forschungsgruppen/aladyn/projekte/pasterze/messergebnisse/laengenaenderung> zuletzt geprüft am 10.06.2019.

Wild, M. (2009): Global dimming and brightening: A review. In: J. Geophys. Res. 114, 21, S. 1319. DOI: 10.1029/2008jd011470.