

Seminar zur Integrativen Geographie (Ansätze in der Hydrologie), 402.212  
Sommersemester 2018/19



# Energiebilanz im Ablationsgebiet der Pasterze

BACHELORARBEIT

Manuel Theurl, 01610570  
17. November 2019

## Abstract

# **Vorwort**

# Danksagung

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 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” und “Global brightening” . . . . .	6
<b>3 Methodik</b>	<b>8</b>
3.1 Berechnung der Energiebilanz . . . . .	8
3.2 Periodische Trendelimination . . . . .	10
3.3 Berechnung des resultierenden Schmelzwassers . . . . .	10
3.4 Bereinigung der Ablationsmessung . . . . .	11
3.5 Programmierung in Python . . . . .	12
3.5.1 Umgebung . . . . .	12
3.5.2 Unittesting . . . . .	12
3.5.3 Grafisches Userinterface . . . . .	13
3.6 Softwareverwaltung . . . . .	19
3.6.1 Download und Installation . . . . .	19
3.6.2 Update . . . . .	20
<b>4 Ergebnisse und Interpretation</b>	<b>21</b>
<b>5 Fazit</b>	<b>30</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>30</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Großglockner und Pasterze . . . . .	2
2	Längenverluste der Pasterze nach Einzeljahren und in Summe seit 1856	3
3	Energiebilanz Komponenten . . . . .	4
4	Spektrale Relektorkurven von Eis und Schnee . . . . .	6
5	GUI Read-Frame . . . . .	14
6	GUI Scope/Energy Balance-Frame . . . . .	15
7	GUI Sum-Frame . . . . .	16
8	GUI Plot-Frame . . . . .	17
9	GUI Beispiel Plot . . . . .	18
10	GUI Download-Frame . . . . .	19
11	Energiebilanz gesamter Messzeitraum . . . . .	21
12	Energiebilanz gesamter Messzeitraum 2 tägliches Mittel . . . . .	22
13	Strahlungskomponente im gesamten Messzeitraum . . . . .	23
14	Sensible und latente Wärme im gesamten Messzeitraum . . . . .	23
15	Sensible Hitze im gesamten Messzeitraum . . . . .	24
16	Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive Ablationsmessung	25
17	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	25
18	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	26
19	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	26
20	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	27
21	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	27
22	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	28
23	Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat . . . . .	28

## **Tabellenverzeichnis**

1	Python Module mit Erklärung . . . . .	12
2	Energiebilanz Mittel . . . . .	21

# 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. 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 ( $3798\text{ m}$ ) ist trotz der Abschmelztendenzen nach wie vor der größte Gletscher der Ostalpen. Messungen aus dem Jahre 2006 ergeben eine damalige Länge von  $8.3\text{ km}$ , eine Fläche von  $17.3\text{ km}^2$  und ein Volumen von  $1.7\text{ km}^3$  (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.

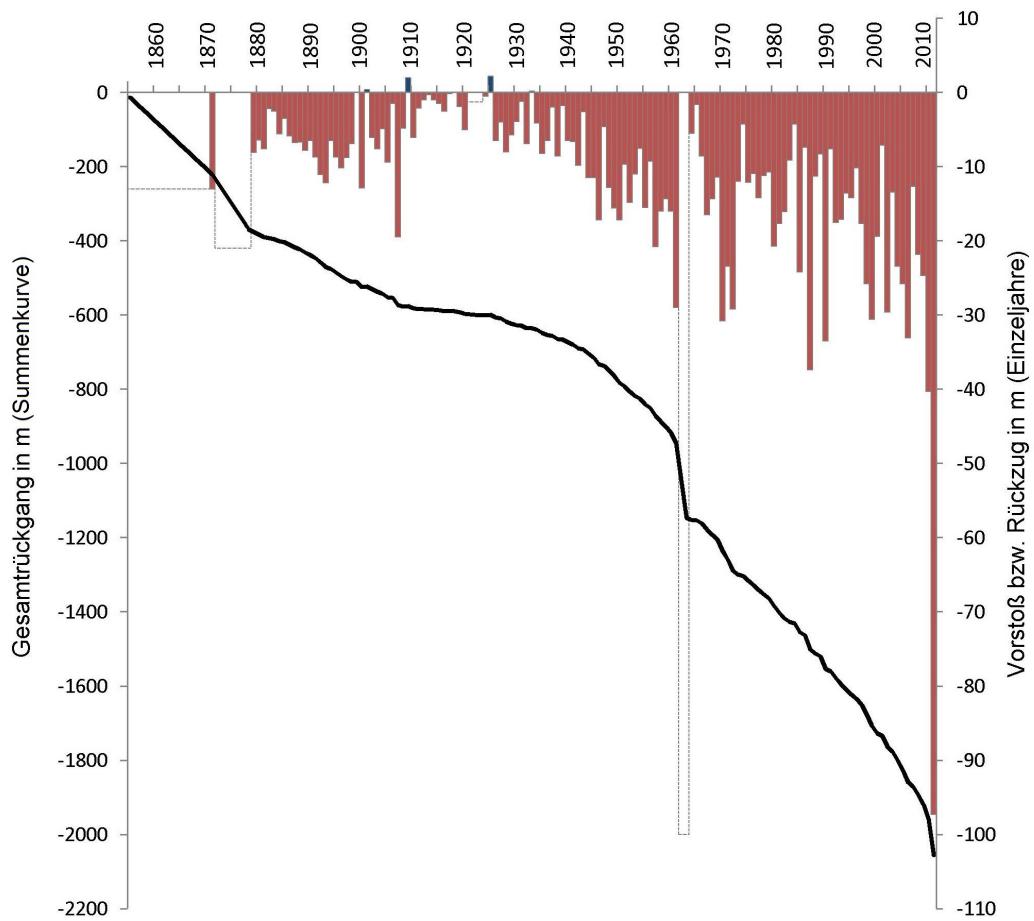


Abbildung 2: Längenverluste der Pasterze nach Einzeljahren und in Summe seit 1856  
(Quelle: Breininger, Wakonigg und G. Lieb, o.D.)

## 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.

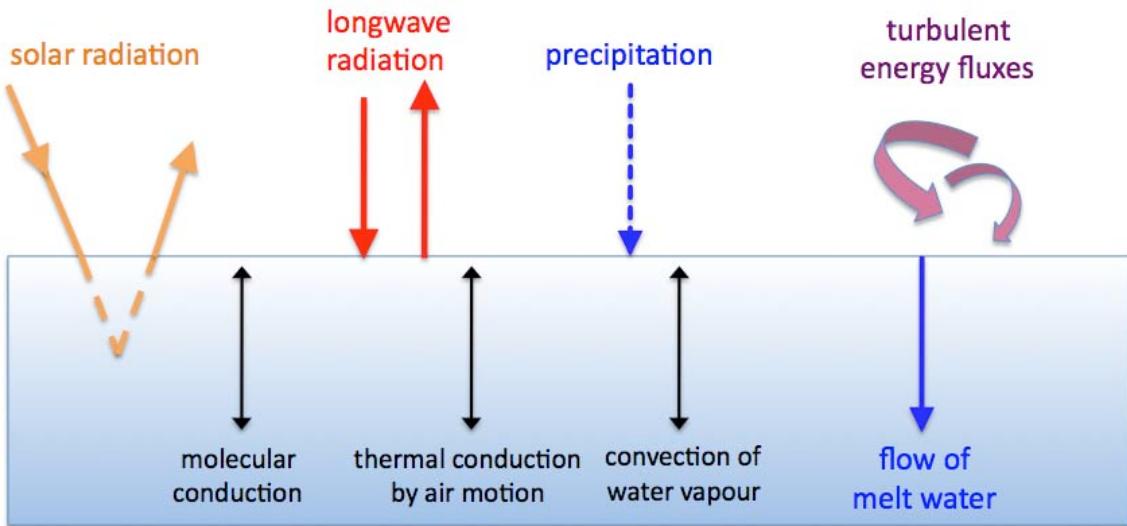


Abbildung 3: Energiebilanz Komponenten (Oerlemans, 2010)

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 kurzweligen 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 Wärmefluss dar. „Molecular conduction“ bezeichnet die Wärmeleitung durch Kollision von mikroskopisch kleinen Partikeln. Die Reibungshitze wirkt sich durch das Reiben des Eises an der Oberfläche ebenfalls 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.

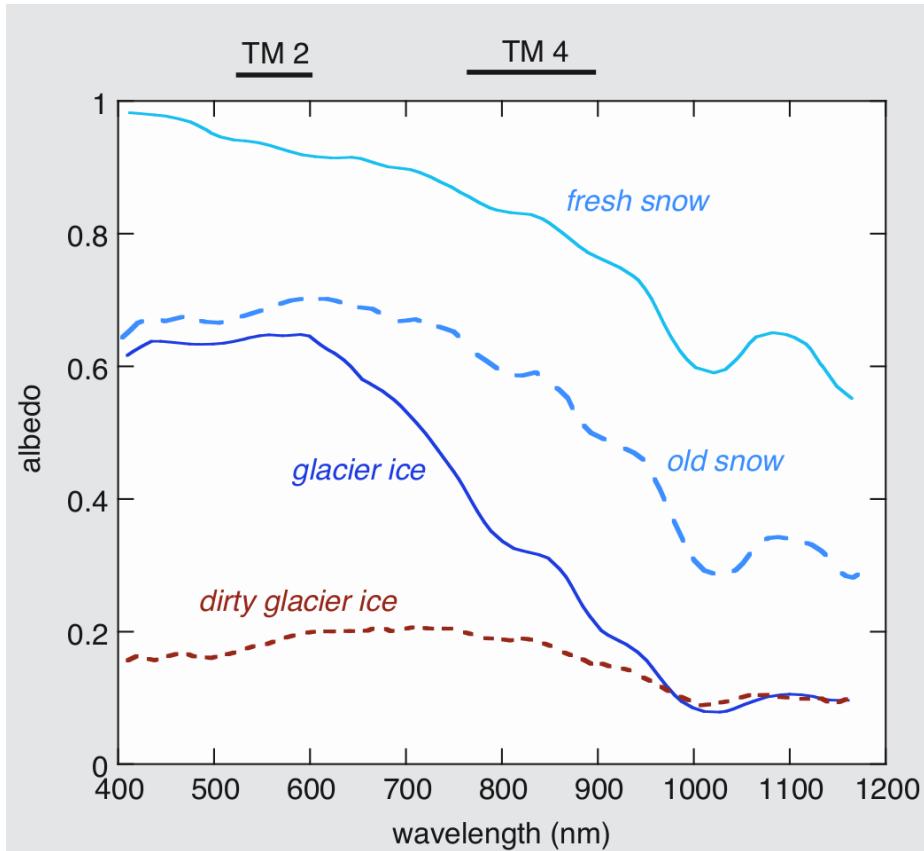


Abbildung 4: Spektrale Relektorkurven von Eis und Schnee (Oerlemans, 2010)

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” und “Global brigthening”

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 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 fest-

gestellt 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 brigthening” die Gletscher schlagartig an Größe verloren hätten (vgl. Wild, 2009, S. 24).

## 3 Methodik

### 3.1 Berechnung der Energiebilanz

Cuffey und Paterson (2010) geben in Kapitel 5 “Mass Balance Processes: 2. Surface Ablation and Energy Budget” detaillierte Formeln zur Berechnung der Energiebilanz an. 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 an kommenden kurzweligen Strahlung,  $E_S^\uparrow$  der reflektierten kurzweligen Strahlung,  $E_L^\downarrow$  der an kommenden langwelligen Strahlung,  $E_L^\uparrow$  der reflektierten langwelligen Strahlung  $E_G$  dem Energiefloss 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 Einfallwinkel und von der atmosphärischen Durchlassungsfähigkeit

Um die spürbaren und latenten Wärmeflüsse  $E_H$  und  $E_E$  zu berechnen, schildern Cuffey und Paterson eine Berechnungsmethode über den “Bulk Aerodynamic Approach” und die “Flux-gradient Theory” (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  $\text{W/m}^2$  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  $\text{kPa}$ .

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

$\mu(z)$  und  $T_a(z)$  stehen für die Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur gemessen in

Höhe  $z$ ,  $P$  für den Luftdruck in Einheit Pascal.

### 3.2 Periodische Trendelimination

Im Falle der Pasterze liegen leider nur für 3 Jahre Messdaten für die Berechnung der Energiebilanz zur Verfügung. Deshalb kann durch eine periodische Trendelimination keine aussagekräftige Annahme über eventuellen Trend getroffen werden. Trotzdem wird die Möglichkeit zur periodischen Trendelimination in die Software implementiert, um z.B. bei anderen Gletschern und längeren Datenaufzeichnungen bzw. in Zukunft auch bei der Pasterze Trendanalysen durchzuführen.

Eine Periode dauert bei der Energiebilanz genau ein Jahr. Die Bereinigung von der Periode erfolgt auf die Weise, dass der erste Wert nach dem vollendeten Jahr vom Wert im ersten Jahr zu dieser Zeit abgezogen wird. Es wird dabei immer jener Wert vom ersten Jahr gesucht, welcher datumsmäßig (abzüglich von der Jahresanzahl) am nächsten zum betrachteten Wert liegt. Dieser Vorgang wird für alle weiteren Werte wiederholt. Soll ein eventueller linearer Trend erhalten bleiben, so müssen die Werte immer bezogen auf das erste Jahr abgezogen werden. Wird nämlich immer nur das Vorjahr dafür verwendet, so fällt dieser lineare Trend auch noch weg. In diesem Fall könnten dann die entstandenen Residuen auf Normalverteilung überprüft werden.

In diesem Fall soll aber der lineare Trend eben aufrecht erhalten bleiben. Aus der genannten Methode folgt somit, dass die Werte Reihe zumindest größer als ein Jahr sein muss, ansonsten kann kein periodischer Trend eliminiert werden.

Im Zuge der Durchführung wird nicht nur die errechnete Energiebilanz an sich trendeliminiert, sondern auch Einzelteile, wie z.B. nur die Strahlungsenergie und nur der sensible und latente Hitzeeintrag.

### 3.3 Berechnung des resultierenden Schmelzwassers

Formel (vgl. Cuffey und Paterson, 2010, S. 142)

$$\rho_w L_f \dot{m}_s [1 - f_r] + \int_0^{\Delta z} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dz = E_N \quad (9)$$

gibt einen Zusammenhang zwischen Nettoenergiebilanz und der Schmelzrate  $\dot{m}$  vom Gletschereis. Wenn die Temperatur im betrachteten Eislayer den Schmelzpunkt erreicht hat, dann fällt der zweite Term der Gleichung durch

$$\int_0^{\Delta z} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dz = 0 \quad (10)$$

weg. Um die errechnete Energiebilanz auf Plausibilität zu überprüfen, indem die gemessene Ablation (später umgerechnet in Schmelzwasser) mit dem modellierten Schmelzwasser verglichen wird, reicht es für diese Analyse aus, nur den Zeitraum von 1. Juni bis 1. September zu betrachten. In diesem Zeitraum kann deshalb von einem isothermen Eislayer mit Temperatur um den Schmelzpunkt ausgegangen werden.

$f_r$  bezeichnet den Anteil vom Schmelzwasser, der im Eislayer wiedergefriert. Es folgt somit die für diese Fragestellung relevante Nettoablationsrate

$$\dot{m}_s [1 - f_r] = E_N / \rho_w L_f, \quad (11)$$

wobei  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  der Wasserdichte bei  $0^\circ C$  und  $L_f = 3.34 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$  der latenten Schmelzwärme von purem Eis bei  $0^\circ C$  entspricht (vgl. Cuffey und Paterson, 2010, S. 142).

Die errechnete Nettoablationsrate hat die Einheit  $\text{m}^3/\Delta T$ , mit

$$W = \dot{m}_s [1 - f_r] \cdot \Delta T \cdot 1000 \quad (12)$$

folgt somit das tatsächliche Schmelzwasser in Liter über einen gewissen Zeitraum  $\Delta T$ . Durch

$$A_{meas} = W \cdot \rho_i \quad (13)$$

kann die gemessene Ablation in Meter ebenfalls in Schmelzwasseräquivalent umgerechnet werden.  $\rho_w = 917 \text{ kg/m}^3$  steht dabei für die Dichte von purem Eis bei  $0^\circ C$ .

Analog dazu kann auch das modellierte Schmelzwasser durch

$$A_{mod} = -\frac{W}{\rho_i} \quad (14)$$

noch in Ablation in Meter umgerechnet werden.

### 3.4 Bereinigung der Ablationsmessung

Die Ablation wird bei der Pasterze mit einem TODO gemessen blabla wie funktioniert usw. Der Sensor schmilzt allerdings von Zeit zu Zeit gänzlich aus und muss wieder neu positioniert werden. Dies hat zur Folge, dass in den Messdaten Sprünge sind.

Um diese Sprünge softwareseitig zu bereinigen, wird darauf abgefragt ob sich die gemessene TODO von einem auf den nächsten Schritt über einen gewissen Threshold-Wert vergrößert. Dieser Grenzwert ist in der Software mit TODO 10 cm bei einer Messauflösung von 10 Minuten angenommen. Die Differenz des Sprunges wird dann bei den folgenden Messungen angebracht um so eine stetig abnehmende Kurve zu generieren.

## 3.5 Programmierung in Python

### 3.5.1 Umgebung

Die entwickelte Software wurde im Programm Pycharm Professional Edition objekt-orientiert 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

### 3.5.2 Unitesting

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  $hPa$ , Windeschgeschwindigkeit von  $5 m/s$ , Lufttemperatur von  $5^\circ C$  und Transferkoeffizienten von 0.002 soll das Ergebnis der sensiblen Hitze, Formel ??, zwischen 47 und  $53 W/m^2$  liegen.

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

Der Test wird wiederum angenommen.

### 3.5.3 Grafisches Userinterface

Das Grafische Userinterface (GUI) setzt sich aus den Teilen

- Read
- Scope/Energy balance
- Sum
- Plot
- Download

zusammen.

In **Read** kann eine Messdatei eingelesen werden.

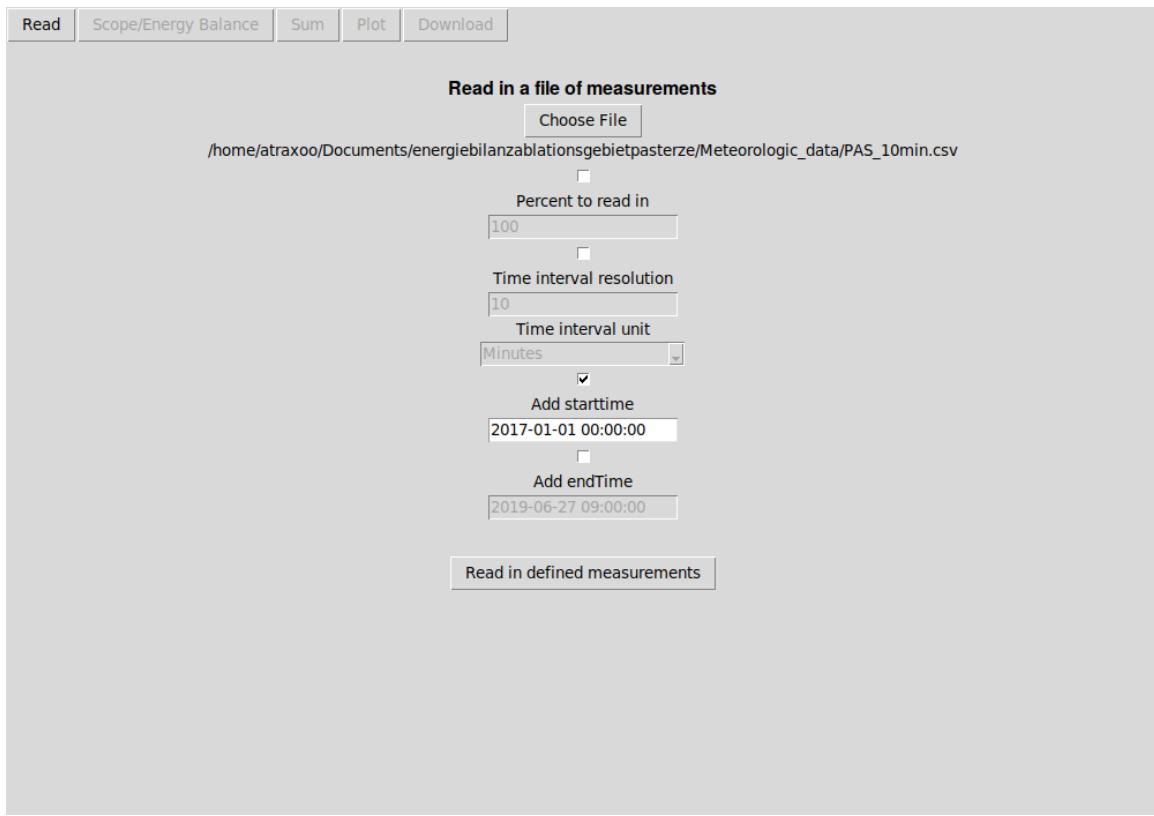


Abbildung 5: GUI Read-Frame

Im Fenster **Scope/Energy balance** kann der momentane Betrachtungszeitraum verändert werden und die Energiebilanz gerechnet werden.

Read Scope/Energy Balance Sum Plot Download

Read info: Measurements: 130637 First: 2017-01-01 00:00:00 Last: 2019-06-27 09:00:00 Time resolution: 10 Min  
Scope info: Measurements: 105095 First: 2017-01-01 00:00:00 Last: 2019-01-01 00:00:00 Time resolution: 10 Min

**Change current scope of all read in measurements**

Percent to take from read in measurements  
100

Time interval scope  
10  
Time interval scope unit  
Minutes

Add starttime  
2017-01-01 00:00:00

Add endTime  
2019-01-1 00:00:00

**Change current scope**

**Reset scope**

0

Simulate global dimming and brightening [W/m<sup>2</sup>]

**Calculate Energy Balance and cumulate Ablation**

The screenshot shows a software interface for managing and analyzing measurement data. At the top, there are tabs for 'Read', 'Scope/Energy Balance' (which is currently selected), 'Sum', 'Plot', and 'Download'. Below the tabs, two sections provide 'Read info' and 'Scope info' with specific details like measurement counts, first and last dates, and time resolutions. The main area is titled 'Change current scope of all read in measurements'. It contains several input fields and checkboxes: a checkbox for 'Percent to take from read in measurements' set to 100; a checkbox for 'Time interval scope' set to 10, with a dropdown for 'Time interval scope unit' showing 'Minutes'; checkboxes for 'Add starttime' (set to 2017-01-01 00:00:00) and 'Add endTime' (set to 2019-01-1 00:00:00); a large bold button labeled 'Change current scope'; a 'Reset scope' button; and a slider or input field set to 0. At the bottom, there's a button labeled 'Calculate Energy Balance and cumulate Ablation'.

Abbildung 6: GUI Scope/Energy Balance-Frame

Bei **Sum** können einzelne Messungen zusammengefasst werden.

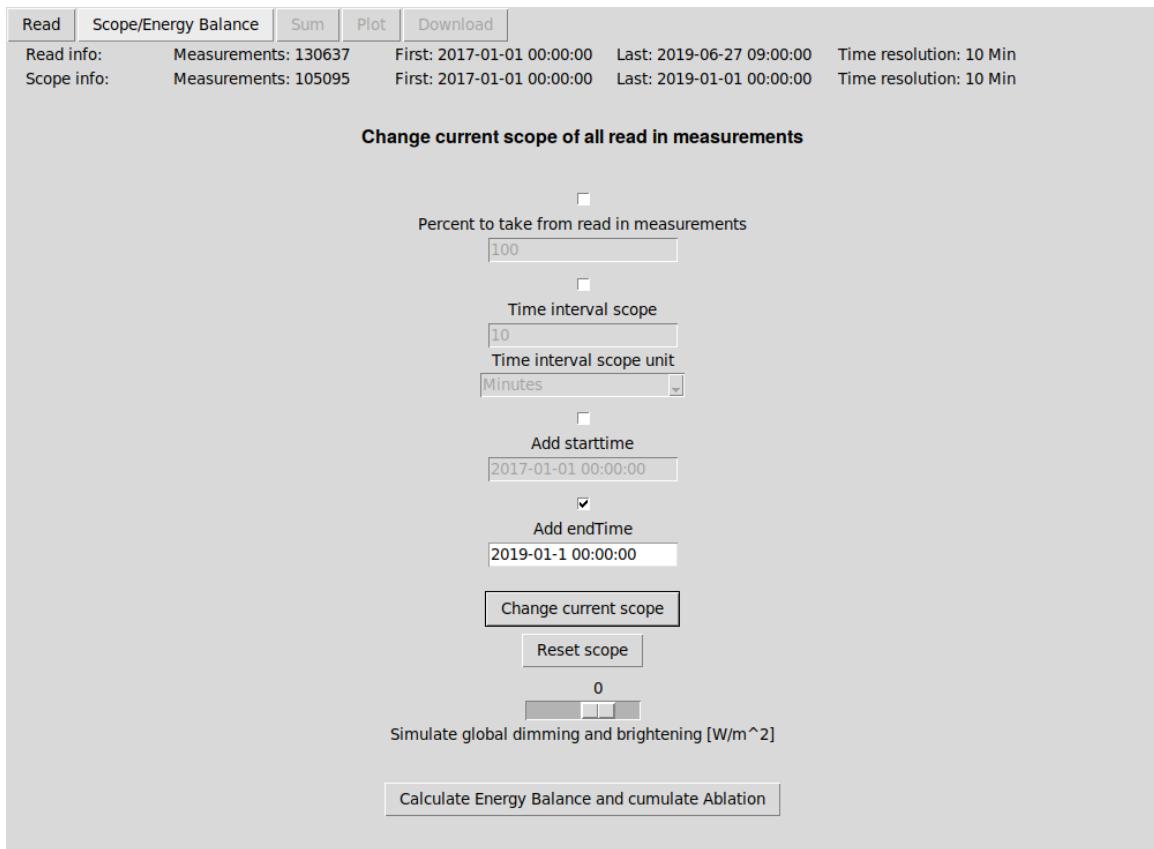


Abbildung 7: GUI Sum-Frame

In **Plot** können die Ergebnisse als graphische Darstellungen betrachtet werden. Es ist dabei möglich die gesamte Energiebilanz sowie deren Einzelteile zu plotten. Weiters kann die Ablation oder die errechnete gemessene und modellierte Eisschmelze als zweite Achse eingeblendet werden. Auch die Trendelimination kann visualisiert werden.

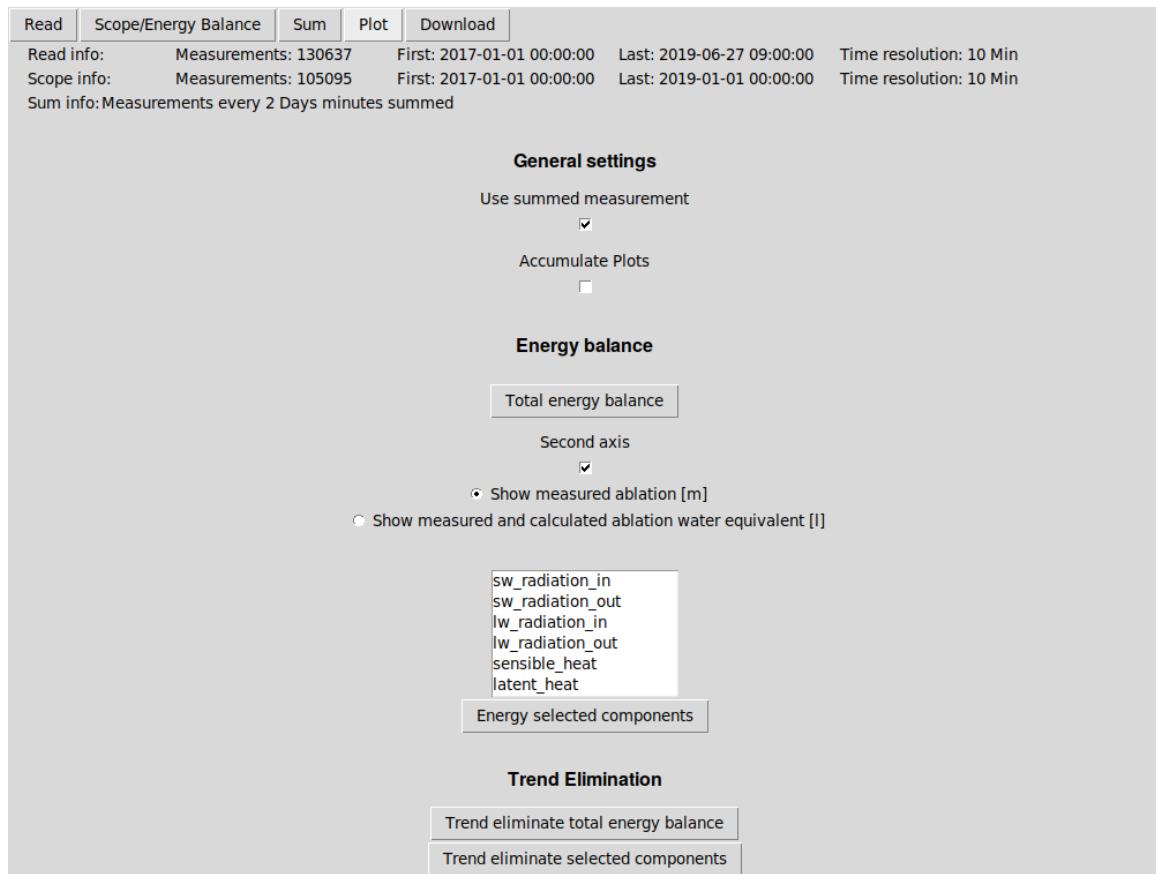


Abbildung 8: GUI Plot-Frame

Beim erstellen des Plots erscheint ein neues Fenster in welchem der Plots vergrößert bzw. verkleinert, verschoben, .. und heruntergeladen werden kann.

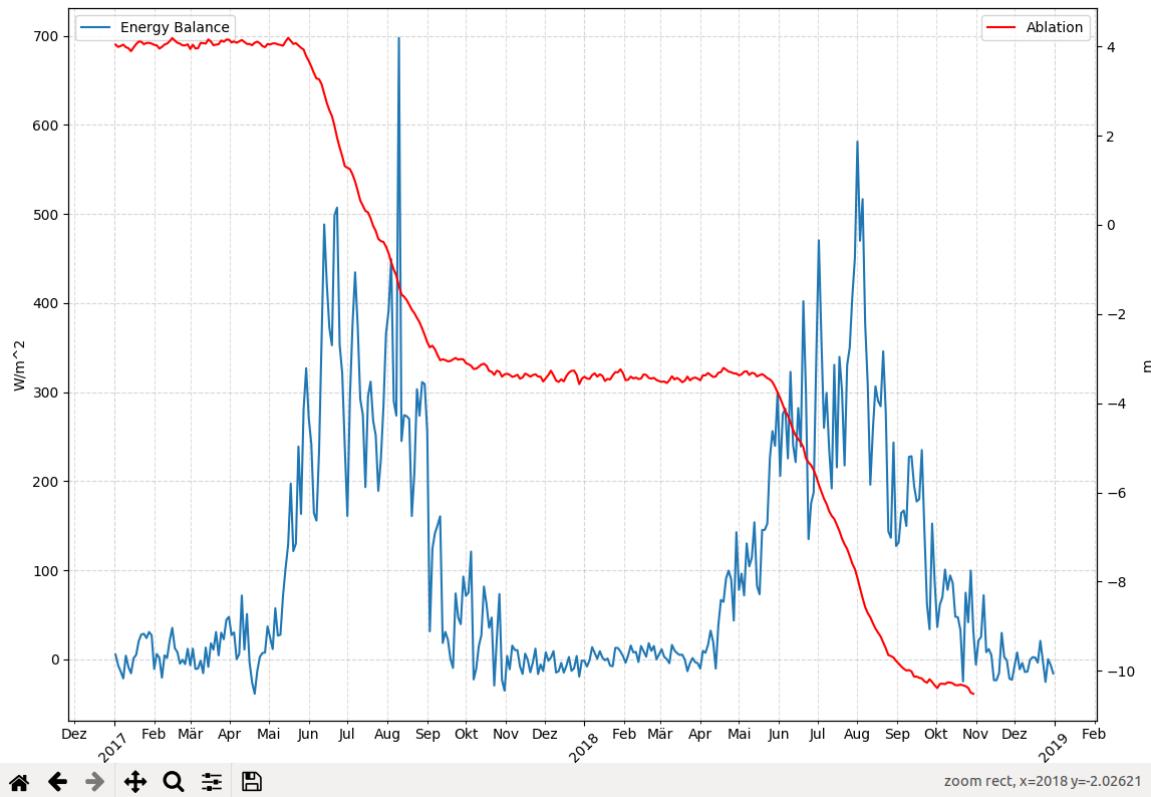


Abbildung 9: GUI Beispiel Plot

Im **Download**-Bereich können die erzielten Ergebnisse noch in Form von Wertetabellen heruntergeladen werden.

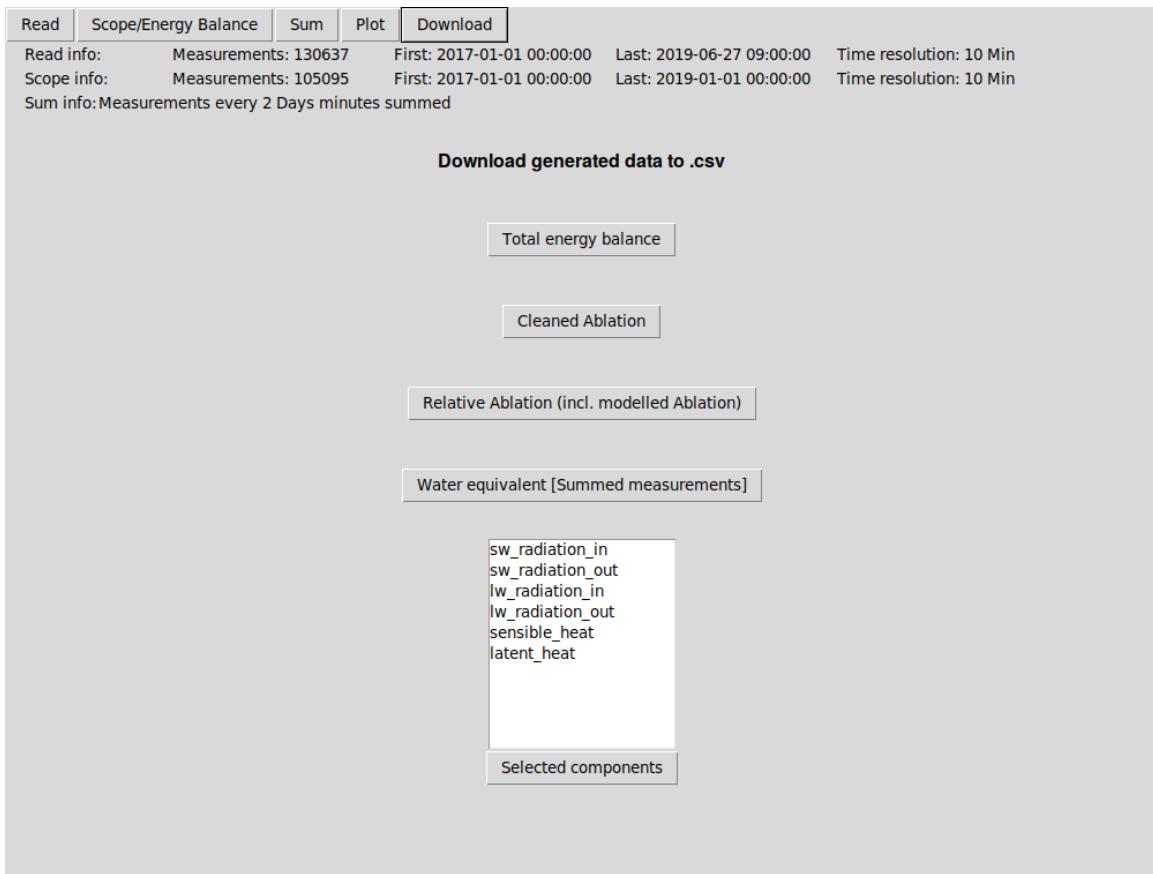


Abbildung 10: GUI Download-Frame

Eine detaillierte Beschreibung des GUI befindet sich unter TODO LINK im Wiki des Projektes auf der Platform Bitbucket.

## 3.6 Softwareverwaltung

### 3.6.1 Download und Installation

Die Open Source Version der Software ist öffentlich auf der Platform 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 herunterge-

laden. 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.

### **3.6.2 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.

## 4 Ergebnisse und Interpretation

Abbildung ?? zeigt die errechnete Energiebilanz über den gesamten Messzeitraum von Ende 2016 bis Mitte 2019.

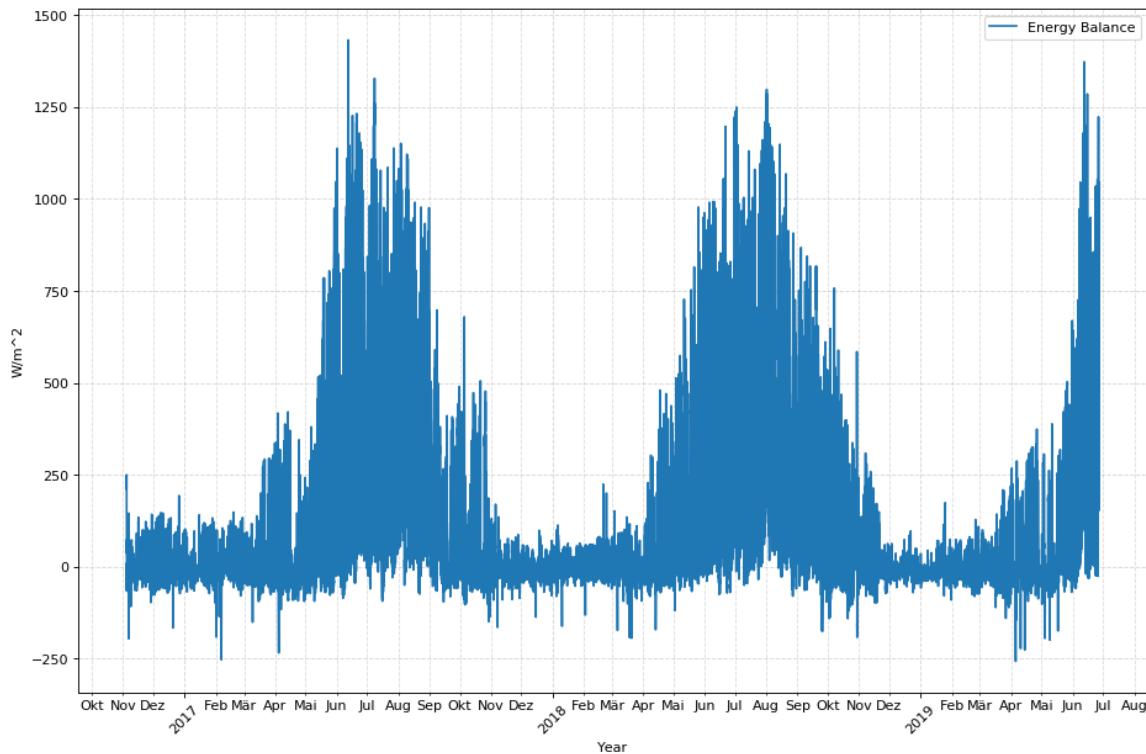


Abbildung 11: Energiebilanz gesamter Messzeitraum

Es sind leider nur knapp drei Jahre ausreichend Messdaten zur Berechnung der Energiebilanz verfügbar. An den Daten ist deutlich ein periodischer Verlauf erkennbar mit Maximum im Sommer und Minimum im Winter. Die Spitzen der Energiebilanz liegen bei knapp  $1500 \text{ W/m}^2$ , die Minima bei ca  $-250\text{W/m}^2$ . Diese ungleiche Verteilung ist erklärbar durch die Messungen im Ablationsgebiet des Gletschers. Hier sollte ja das Jahresmittel deutlich positiv sein. Folgende Tabelle zeigt die zwei Mittelwerte der Energiebilanz in den Jahren 2017 und 2018.

Tabelle 2: Energiebilanz Mittel

	2017	2018
Energiebilanz Mittel [ $\text{W/m}^2$ ]	100.4	109.1

Die nachfolgende Abbildung zeigt den gleichen Zusammenhang wie zuvor, jedoch wurden hier jeweils zwei Tage gemittelt.

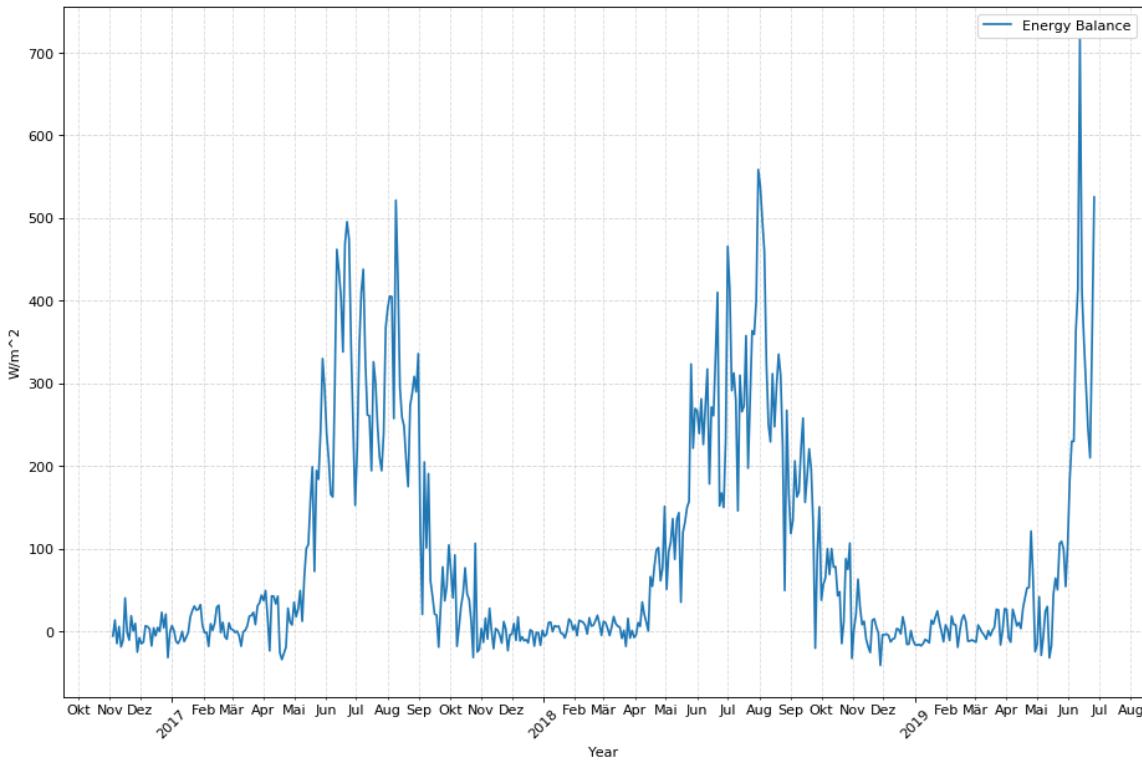


Abbildung 12: Energiebilanz gesamter Messzeitraum 2 tägliches Mittel

Dies resultiert in einem glatteren Verlauf der Kurve, wobei es im Bereich des Sommers zwischen unterschiedlichen 2-Tages-Werten trotzdem noch Abweichungen von teils  $300 \text{ W/m}^2$  gibt. Dies lässt sich auf unterschiedliche Wetterlagen zurückführen und könnte gut mit Sonnenscheinzeiten pro Tag usw. verglichen werden.

Das Aufsummieren der Bilanzen bringt einen Ausreißer gegen Ende der Messreihe im Juni 2019 zum Vorschein. Dieses zweitägige Mittel von mehr als  $700 \text{ W/m}^2$  ist mit knapp  $200 \text{ W/m}^2$  Vorsprung der größte Wert im betrachteten Zeitraum. Durch Darstellung von einzelnen Komponenten der Energiebilanz kann erörtert werden, woraus dieser Maximalwert hervorgeht.

Abbildung 13 zeigt die kombinierten Bestandteile "Short wave in", "Short wave out", "Long wave in" und "Long wave out", Abbildung ?? hingegen nur die sensible und latente Wärme. Die periodische Schwimung ist bei der erstenen Abbildung deutlicher ausgeprägt. Bei der sensiblen und latenten Wärme ist ersichtlich, dass in den Wintermonaten die Summe der beiden relativ konstant bleibt. Es ist also nicht der Fall, dass um Winterbeginn Ende Dezember die Werte am niedrigsten sind.

Der genannte Ausreißer zum Ende der Messreihe kann bei der latenten und sensiblen Wärme erkannt werden. Es muss also noch genauer differenziert werden.

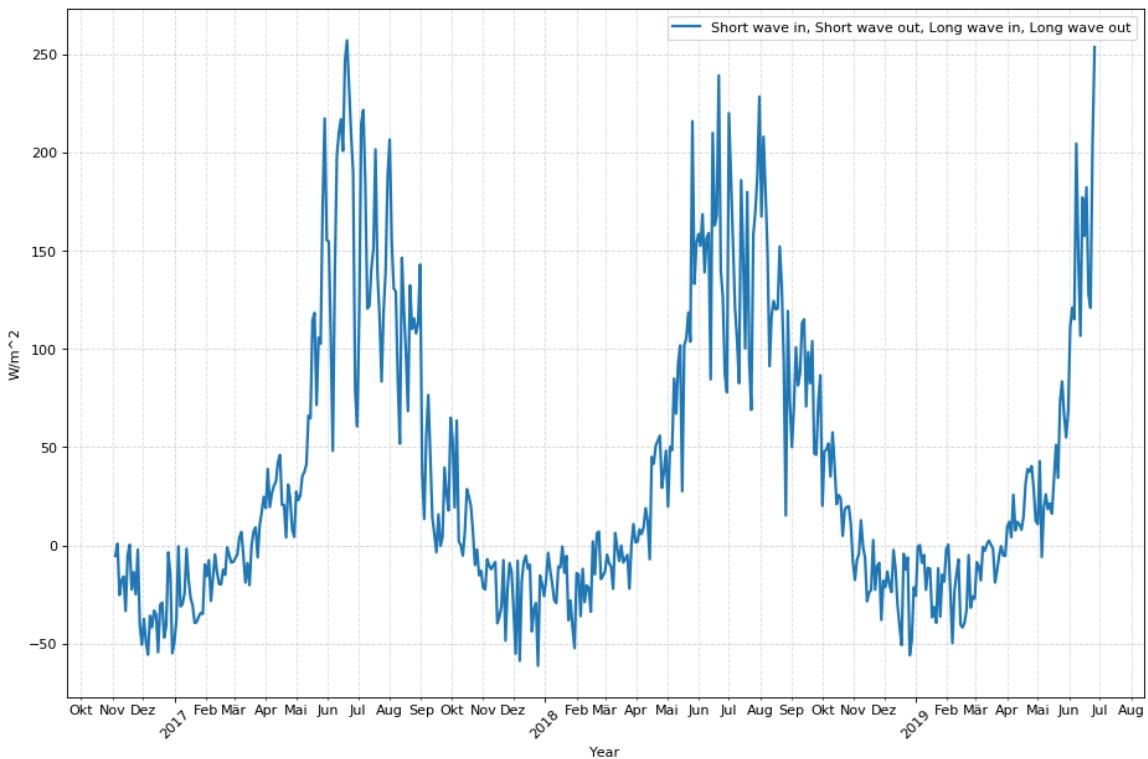


Abbildung 13: Strahlungskomponente im gesamten Messzeitraum

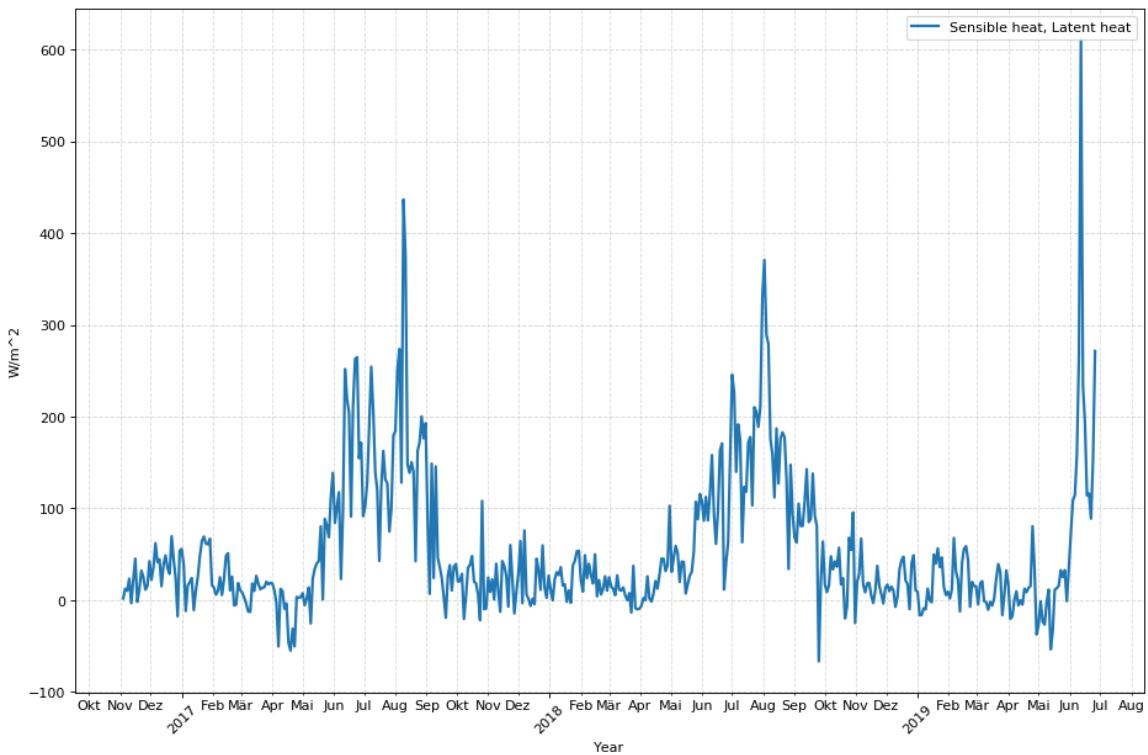


Abbildung 14: Sensible und latente Wärme im gesamten Messzeitraum

Es stellt sich heraus, dass der genannte hohe Wert der Energiebilanz, siehe Abbildung 15, bei der sensiblen Wärme auftritt. In der Berechnung der sensiblen Hitze fließen die Messgrößen Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Eistemperatur mit ein. Bei genauerer Betrachtung der Messwerte fallen insbesondere hohe TODO Temperaturen und evtl Hitzesommer nachweis Literatur Zeitungsartikel oder ähnliches???

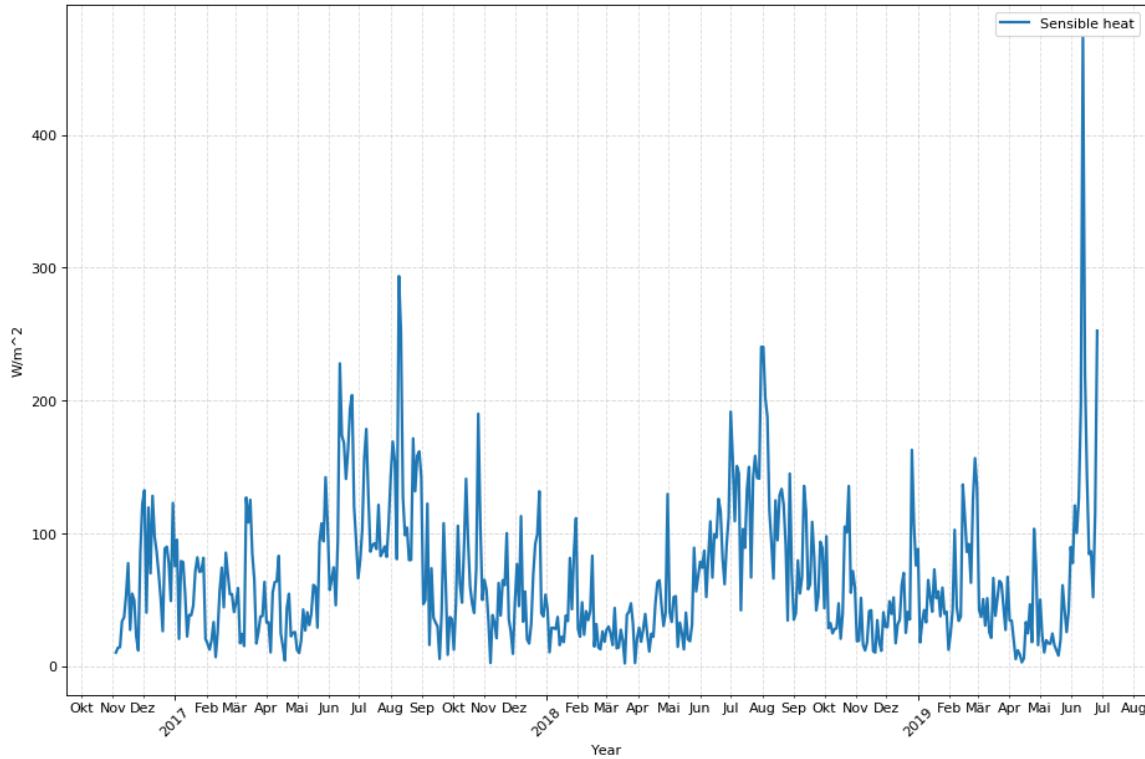


Abbildung 15: Sensible Hitze im gesamten Messzeitraum

In Abbildung 16 wird zusätzlich zur errechneten Energiebilanz die bereinigte Ablation visualisiert. Wie zu erwarten, gibt es immer im Sommer bei hoher Energiebilanz Eisschmelze und im Winter Stagnation. Zu beobachten ist, dass die Energiebilanz schon vor dem eigentlichen Beginn der Schmelze erhöht ist. Grund dafür ist, dass zuerst der liegende Schnee noch wegeschmolzen werden muss und erst dann die positive Energiebilanz Eisschmelze verursacht.

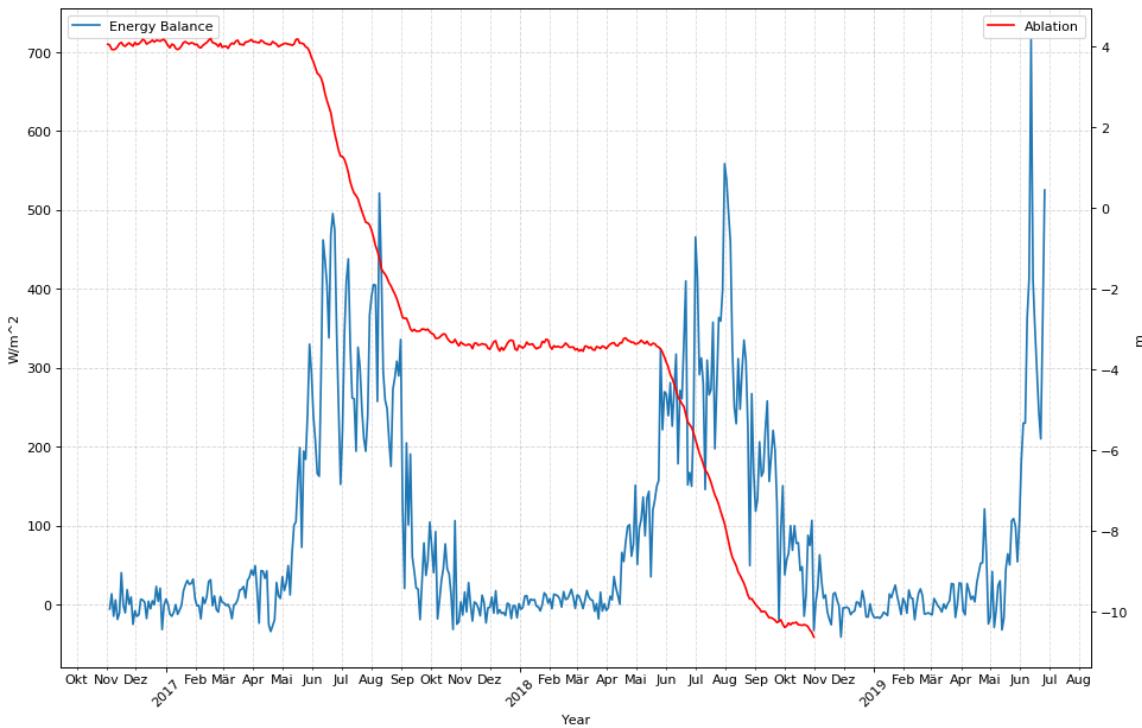


Abbildung 16: Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive Ablationsmessung

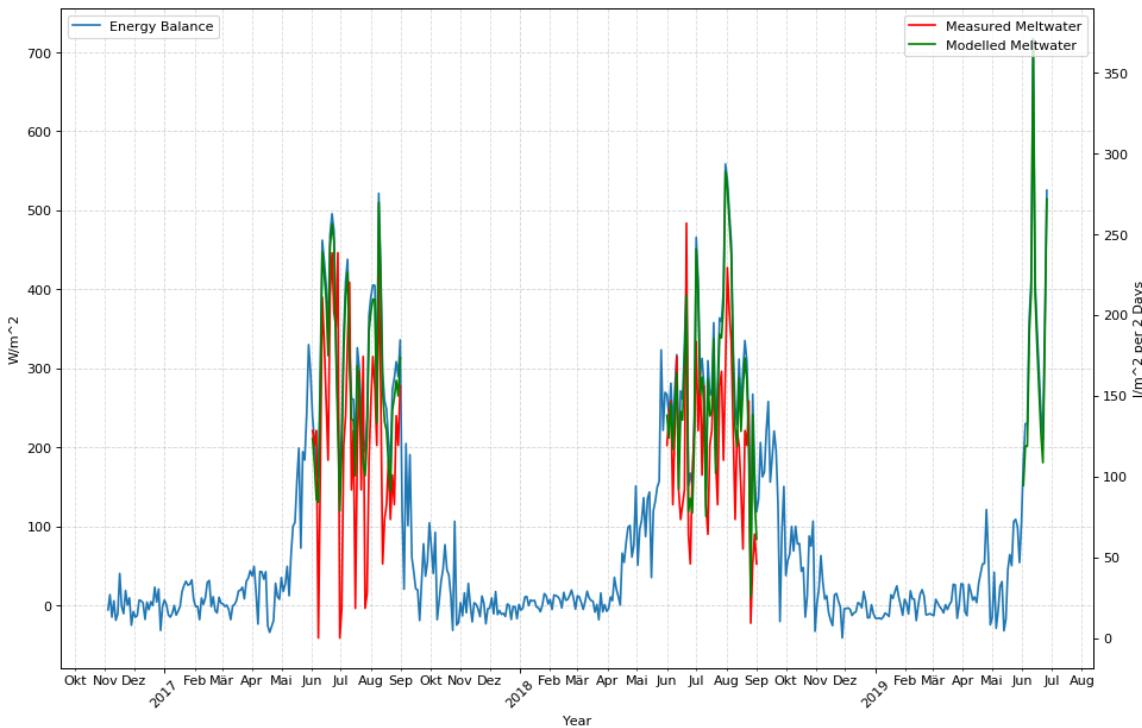


Abbildung 17: Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive gemessenem und modellierten Schmelzwasser

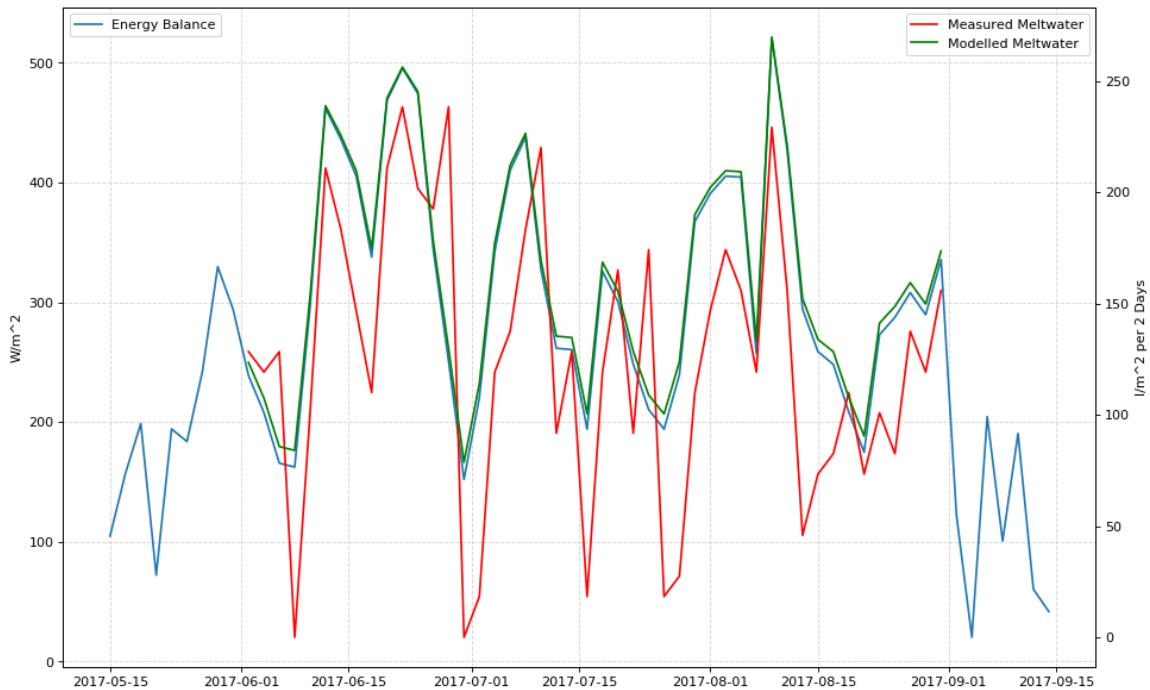


Abbildung 18: Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat

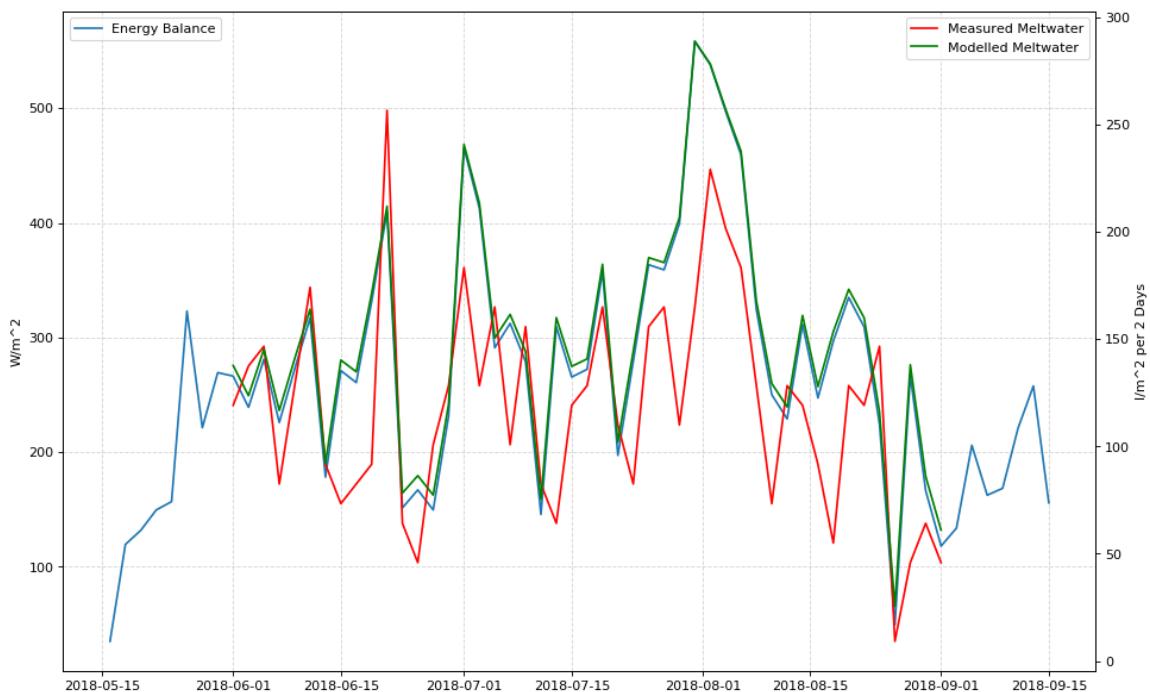


Abbildung 19: Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat

Bei sehr Ablaiton 0 oder größer 0 wird 0 als Schmelzwasser angenommen .. deshalb die Spitzen nach unten?

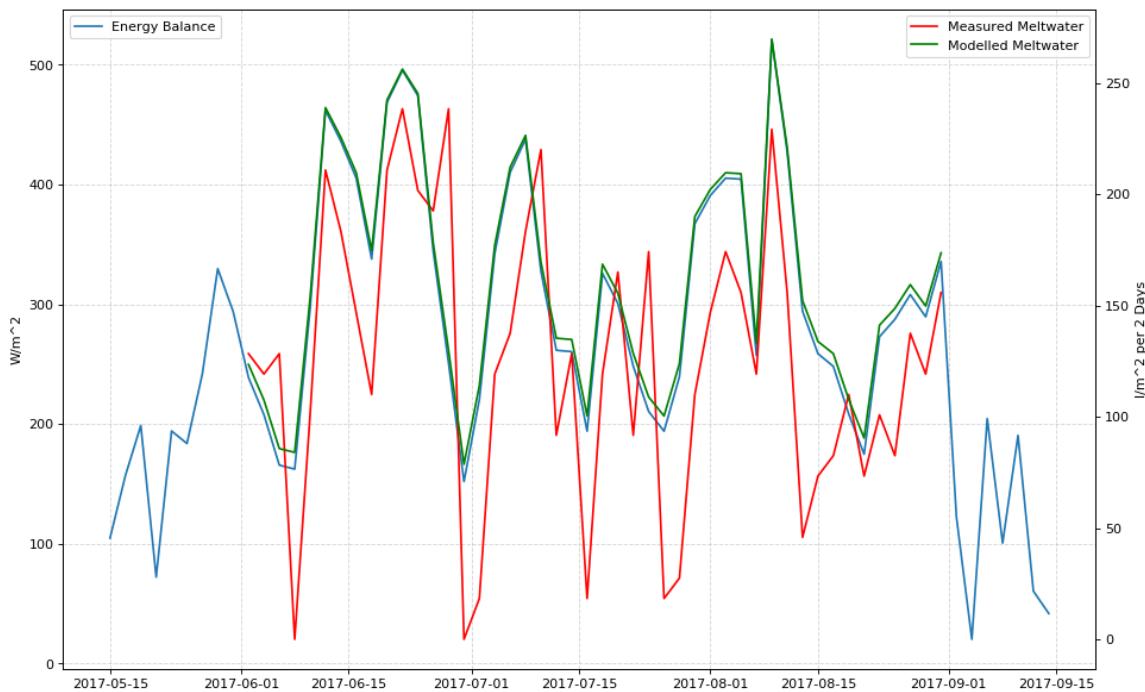


Abbildung 20: Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat

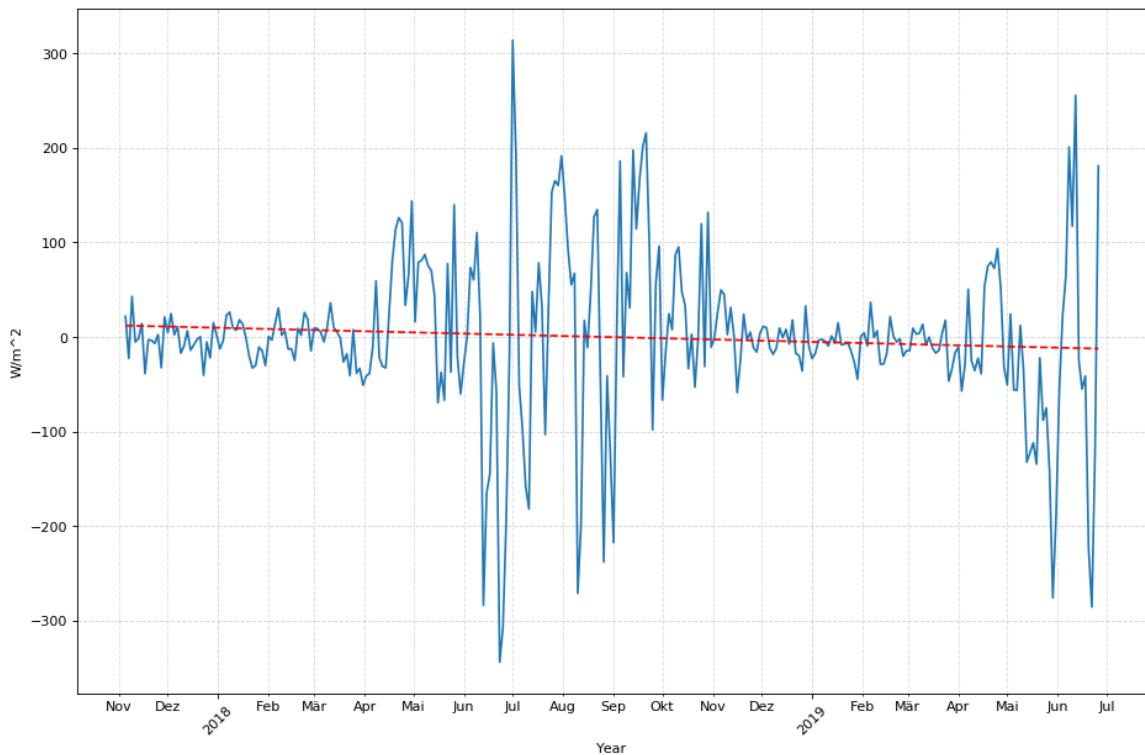


Abbildung 21: Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat

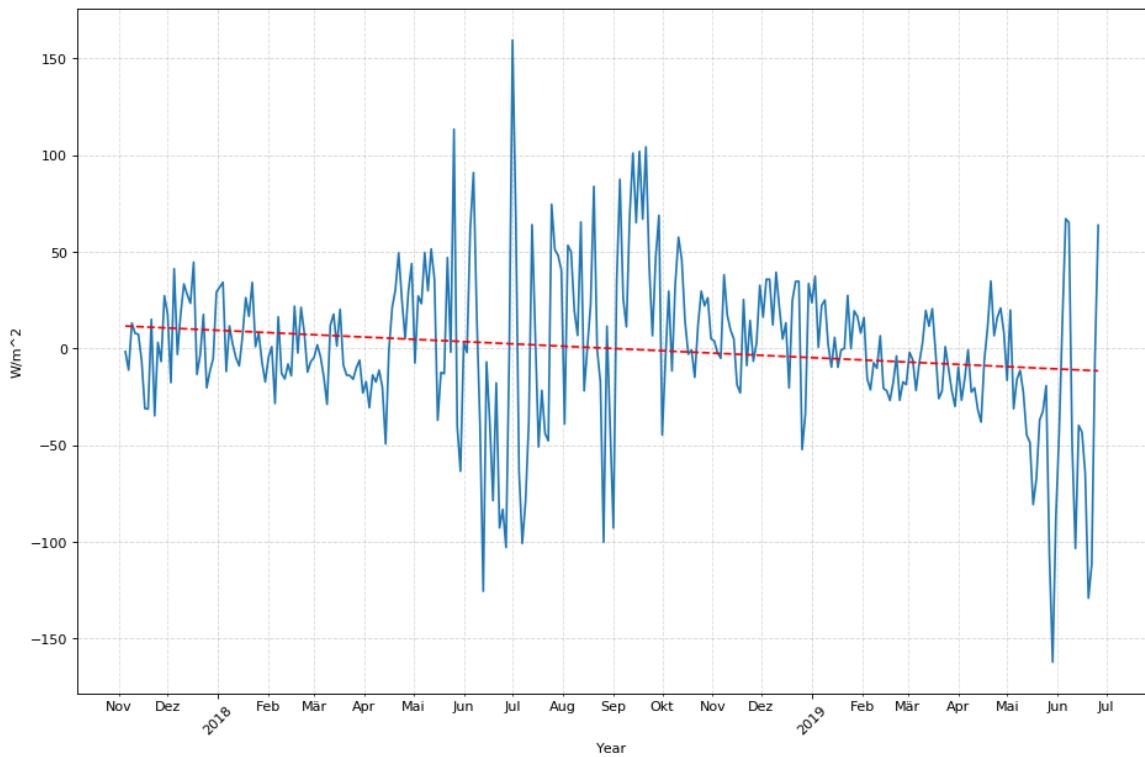


Abbildung 22: Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat

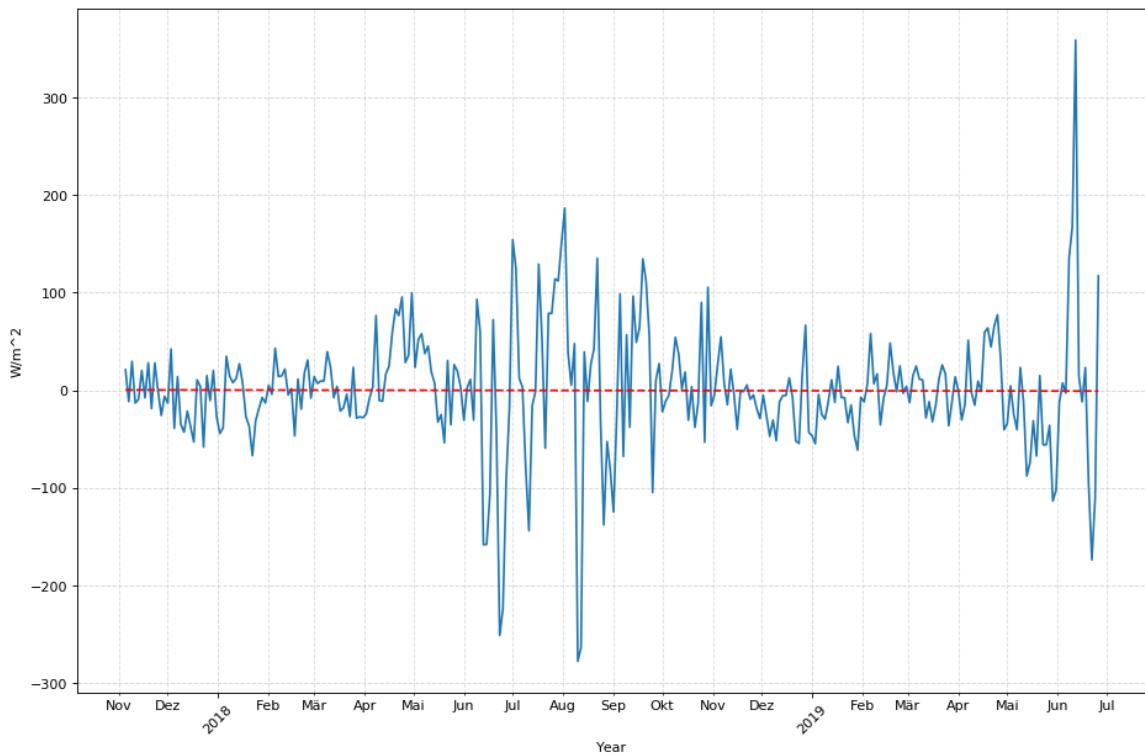


Abbildung 23: Kompletter Zeitraum aufsummiert nur sensible und latent heat

simulieren von global dimming brightening und schauen wie es sich im modelled meltwater auswirkt modelled immer etwas mehr als beim wirklichen .. vor allem bei niedriger EB, welchen Grund könnte das haben?

beim simulieren von Global Dimming bzw. Global brightening wird das theoretische Schmelzwasser berechnet und in Eisäquivalent umgerechnet. Damit wird ein greifbarer Wert geliefert, wie viel das Eis bei diesem Phänomen tatsächlich an Eisdicke gewinnt bzw. verliert.

## **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.