



Energiebilanz im Ablationsgebiet der Pasterze

BACHELORARBEIT

Manuel Theurl, 01610570

8. Dezember 2019

Abstract (English)

The aim of this thesis is to create a model for the energy balance in the ablation area of a glacier by using weather data. The chosen glacier for this study is the Pasterze in Austria. The developed program should be a useful tool to edit the data, calculate the energy balance and create visualizations to represent the generated data. Because there are also ablation measurements included in case of the Pasterze, it is possible to analyze the measured and modeled melting water.

By comparing the measured and modeled melting water a conclusion over the validity of the modeled energy balance can be made. With a functioning model the effect of phenomena like “global dimming” and “global brightening” on the melting of the glacier in the ablation area can be examined.

All the necessary logic, the calculations and visualizations are done with the programming language Python. The formulas used are mainly taken from Cuffey und Paterson, 2010, S. 153-157. While programming, a graphical user interface (GUI) will be developed as well. With the GUI the functionality of the software is easy accessible and applicable. The GUI is public, a download and installation description is included in the thesis.

As a result it can be said, that the meltwater calculated out of the ablation measurements is strongly correlating with the modeled meltwater. The model therefore is representing the reality well. Further, it turns out, that phenomena like “global dimming” and “global brightening” have a significant impact on the melting of a glacier in the ablation area.

Abstract

Ziel dieser Arbeit ist es, aus Wetterdaten ein Modell für die Energiebilanz für das Ablationsgebiet eines Gletschers zu finden. Als Beispielgletscher dient hier die Pasterze in Österreich. Es soll ein gesamtheitliches Programm entwickelt werden, dass die Aufbereitung der Daten, die Berechnung der Energiebilanz und anschauliche Darstellungsmethoden bietet. Im Falle der Pasterze liegen auch Ablationsmessungen vor, wodurch eine Untersuchung des berechneten und des aus der Energiebilanz modellierten Schmelzwassers möglich ist.

Es soll somit erörtert werden, ob das modellieren der Energiebilanz aus Wetterdaten sinnvoll ist und ähnliche Werte für die Ablation bzw. das Schmelzwasser folgen, wie aus den Messungen dazu. Mit dem fertigen Modell kann auch der Fragestellung nachgegangen werden, inwieweit sich die Phänomene “Global dimming” bzw. “Global brightening” auf das Abschmelzen des Gletschers im Ablationsgebiet auswirken.

Die Untersuchungen erfolgen mit der Programmiersprache Python, wobei die Formeln zur Berechnung der Energiebilanz stark an Cuffey und Paterson, 2010, S. 153-157 angelehnt sind. Im Zuge der Programmierung wird ein GUI mitentwickelt, welches die Funktionalität der Software anschaulich aufbereitet darbietet. Das GUI ist öffentlich zugänglich, eine Beschreibung zum Download und zur Installation ist in der Arbeit ersichtlich.

Als Resultat folgt, dass es eine starke Korrelation zwischen dem aus den Ablationsmessungen errechneten Schmelzwasser und dem modellierten Schmelzwasser gibt. Das Modell repräsentiert die Realität somit gut. Weiters stellt sich außerdem heraus, dass sich Phänomene wie “Global dimming” bzw. “Global brightening” signifikant auf das Abschmelzen eines Gletschers im Ablationsgebiet auswirken.

Vorwort und Danksagung

Mein persönlicher Wunsch war ein Thema für die Bachelorarbeit zu finden, welches einerseits eine Verbindung zu den Bergen hat und andererseits Programmierkenntnisse verlangt. Als begnadeter Osttiroler Bergläufer und “Schitouren-Geher” war die Energiebilanz im Ablationsgebiet der Pasterze somit ein perfektes Thema.

Ich danke an dieser Stelle meinem Bachelorarbeit-Betreuer Herrn Ass.-Prof. Dr. Abermann Jakob der mir einerseits viel Freiraum zur selbstständigen Gestaltung der Arbeit gelassen hat und mich andererseits tatkräftig mit tollen Ideen, zahlreicher wissenschaftlicher Literatur und persönlich bei zahlreichen Treffen unterstützt hat. Ein Dank geht außerdem auch an die Wetterstation bei der Pasterze (TODO Name?), die Wetterdaten vom Ablationsgebiet der Pasterze zur Verfügung gestellt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretisches Grundwissen	1
2.1	Pasterze und Ablationsgebiet	1
2.2	Energiebilanz	3
2.2.1	Energiebilanz Komponenten	3
2.2.2	Albedo	4
2.3	“Global dimming” und “Global brightening”	5
3	Methodik	7
3.1	Berechnung der Energiebilanz	7
3.2	Periodische Trendelimination	9
3.3	Berechnung des resultierenden Schmelzwassers	9
3.4	Bereinigung der Ablationsmessung	10
3.5	Programmierung in Python	11
3.5.1	Umgebung	11
3.5.2	Unittesting	11
3.5.3	Grafisches Userinterface	12
3.6	Softwareverwaltung	16
3.6.1	Download und Installation	16
3.6.2	Update	17
4	Ergebnisse und Interpretation	18
4.1	Energiebilanz	18
4.2	Ablation, Schmelzwasser	22
4.3	Änderung des Eisdickenverlustes bei “global dimming” bzw. “global brightening”	26
4.4	Periodische Trendelimination der Energiebilanz	27
5	Fazit	30
6	Literaturverzeichnis	31

Abbildungsverzeichnis

1	Großglockner und Pasterze	2
2	Längenverluste der Pasterze nach Einzeljahren und in Summe seit 1856	2
3	Energiebilanz Komponenten	3
4	Spektrale Relektorkurven von Eis und Schnee	5
5	GUI Read-Frame	13
6	GUI Scope/Energy Balance-Frame	13
7	GUI Sum-Frame	14
8	GUI Plot-Frame	14
9	GUI Beispiel Plot	15
10	GUI Download-Frame	15
11	Energiebilanz gesamter Messzeitraum, Zeitintervall 10 Minuten	18
12	Energiebilanzkomponenten Monatsmittel	19
13	Energiebilanz gesamter Messzeitraum, tagweise gemittelt	20
14	Strahlungskomponente im gesamten Messzeitraum, tagweise gemittelt	21
15	Sensible und latente Wärme im gesamten Messzeitraum, tagweise ge- mittelt	21
16	Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive Ablationsmessungn, tagweise gemittelt	22
17	Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive gemessenem und modellierten Schmelzwasser, tagweise gemittelt	23
18	Vergleich gemessenes Schmelzwasser und Temperatur in den Jahren 2017 und 2018	24
19	Energiebilanz im Sommer 2017 inklusive der in Wasseräquivalent um- gerechneten Ablation und dem modellierten Schmelzwassertagweise ge- mittelt	25
20	Energiebilanz im Sommer 2018 inklusive gemessenem und modellierten Schmelzwasser, tagweise gemittelt	25
21	Vergleich modelliertes und gemessenes Schmelzwasser in den Jahren 2017 und 2018	26
22	Trendelimination der Energiebilanz, tagweise gemittelt	28
23	Trendelimination der Strahlungskomponente der Energiebilanz, tag- weise gemittelt	29
24	Trendelimination der sensiblen und latenten Wärme der Energiebilanz, tagweise gemittelt	29

Tabellenverzeichnis

1	Python Module mit Erklärung	11
2	Energiebilanz Mittel	19
3	Korrelation zwischen gemessenem und modellierten Schmelzwasser . .	24
4	Auswirkung von global dimming oder global brightening auf den Eisdickenverlust innerhalb vom 1. Juni bis 1. September im Jahr 2018 . .	27

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 *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*² und ein Volumen von 1.7 *km*³ (vgl. 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. 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. 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. Lieb und Slupetzky, 2011, S. 24).

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



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

Der erwähnte Längenverlust wird mit folgender Abbildung ersichtlich.

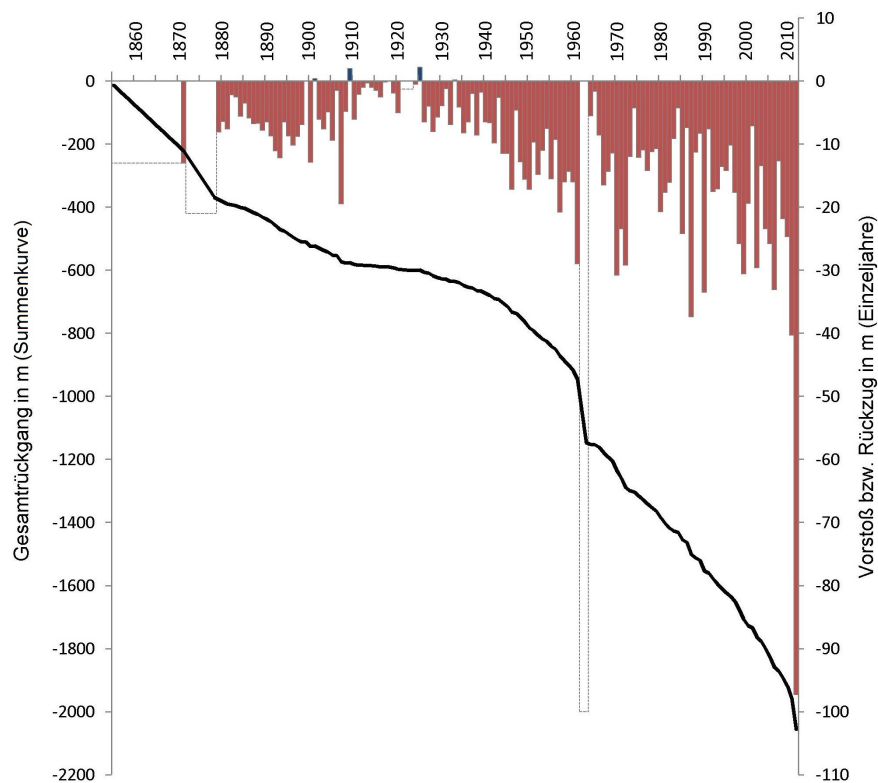


Abbildung 2: Längenverluste der Pasterze nach Einzeljahren und in Summe seit 1856 (Quelle: B. Wakonigg, H. Wakonigg und Lieb, o.D.)

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.

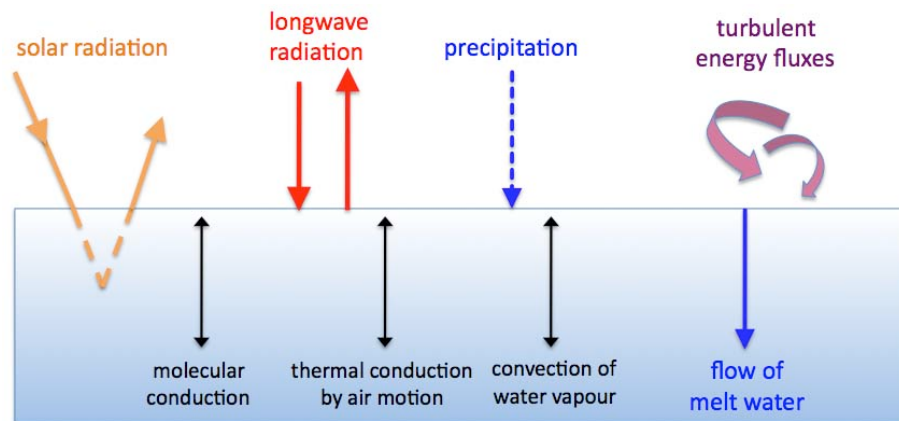


Abbildung 3: Energiebilanz Komponenten (Oerlemans, 2010)

Den größten Anteil am Energiefluss hat die Strahlungskomponente. 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°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. 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.

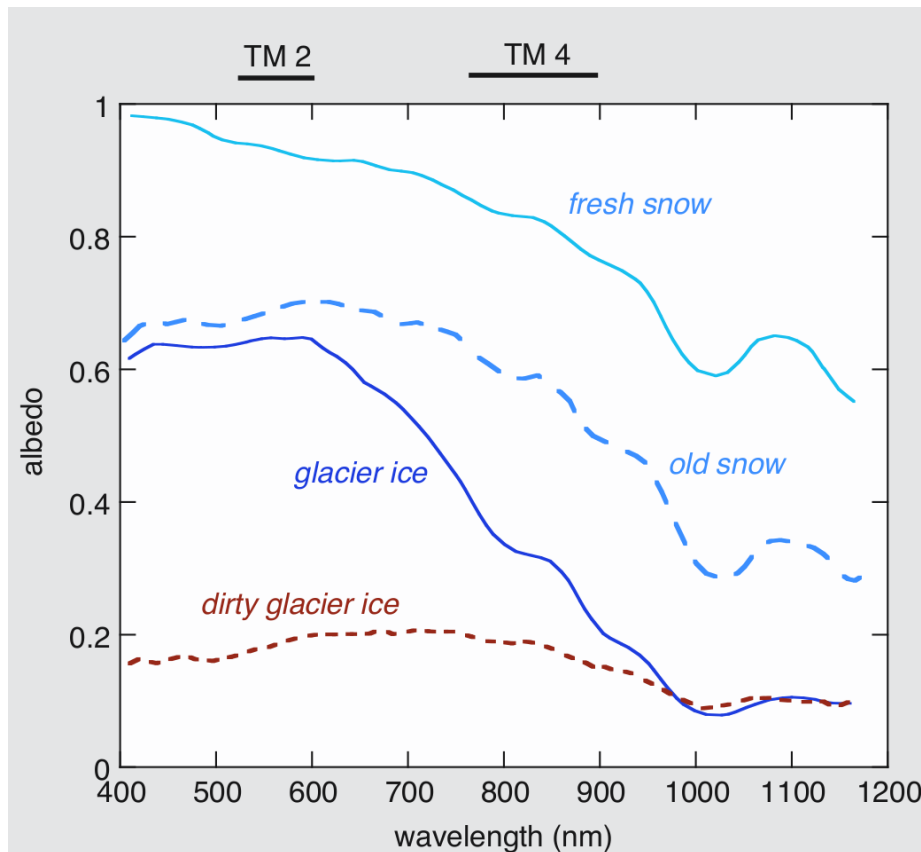


Abbildung 4: Spektrale Relektorkurven von Eis und Schnee (Oerlemans, 2010)

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 brightening”

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 brightening” die Gletscher schlagartig an Größe verloren hätten (vgl. Wild, 2009, S. 24). Zwischen -3 und -9 W/m^2 wird von “global dimming” gesprochen, von $+1$ bis $+4$ von “global brightening” (vgl. Wild, 2012, S. 28).

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 ankommenden kurzwelligen Strahlung, E_S^\uparrow der reflektierten kurzwelligen 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 kurzwelligen Strahlung vom Einfallswinkel 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 bei Eis im Infrarotbereich ungefähr 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.

$\mu(z)$ 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. Bei dieser Trendelimination soll aber der lineare Trend eben aufrecht erhalten bleiben. Aus der genannten Methode folgt somit, dass die Wertereihe 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 oder nur der sensible und latente Wärmeeintrag.

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 nämlich von einem isothermen Eislayer mit Temperatur um den Schmelzpunkt ausgegangen werden.

f_r bezeichnet den Anteil vom Schmelzwasser, der im Eislayer wiedergefroren. 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°C und $L_f = 3.34 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ der latenten Schmelzwärme von purem Eis bei 0°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 ΔT . 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°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 Druck-Transducer gemessen. Dieser misst den Druckunterschied zwischen Sensor und Eisoberfläche. 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 Ablation von einem auf den nächsten Schritt über einen gewissen Threshold-Wert vergrößert. Dieser Grenzwert ist in der Software mit 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 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

3.5.2 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 4 und für die Berechnungen der sensiblen

Wärme 3 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 4) zwischen 0.002 und 0.004 herauskommen.

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

Sensible Wärme Bei gegebenem Luftdruck von 800 *hPa*, Windgeschwindigkeit von 5 *m/s*, Lufttemperatur von 5°C und Transferkoeffizienten von 0.002 soll das Ergebnis der sensiblen Wärme (Formel 3) zwischen 47 und 53 *W/m²* liegen.

Weiters erwähnt ist, dass von einer schmelzenden Eisoberfläche ausgegangen wird und weil die Eisoberflächentemperatur nach Stefan Boltzmann (Formel 5) berechnet wird, wird der Funktion als langwellige Ausstrahlung ein Wert von 1000 *W/m²* 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.

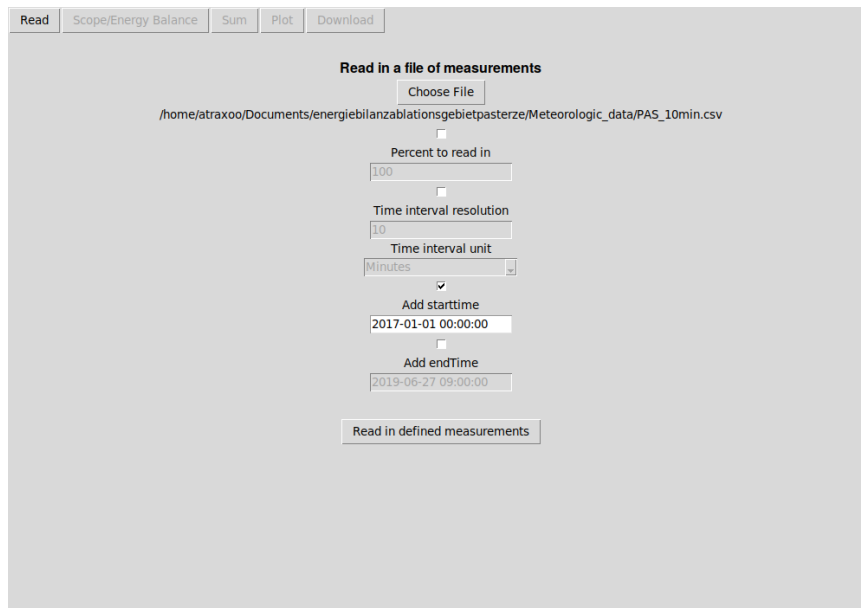


Abbildung 5: GUI Read-Frame

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

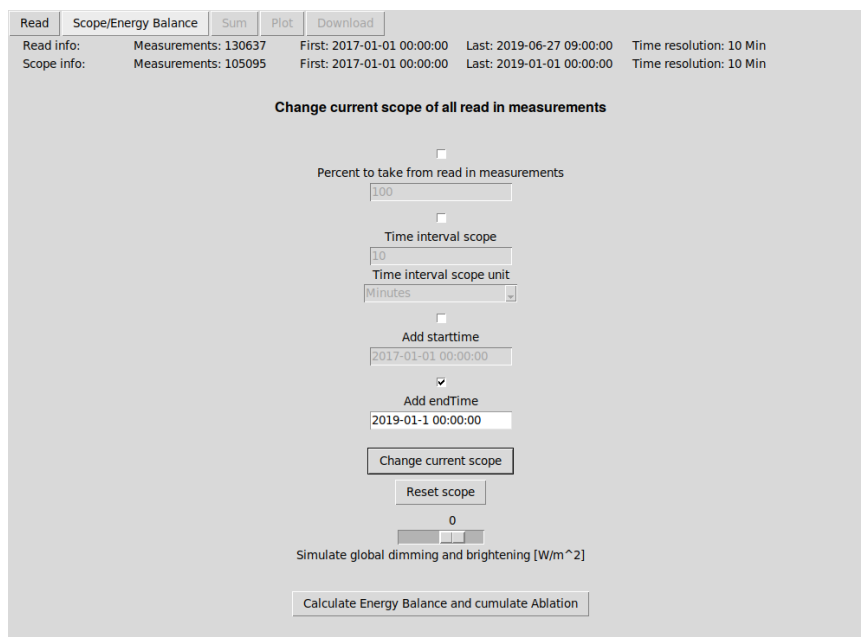


Abbildung 6: GUI Scope/Energy Balance-Frame

Bei **Sum** können einzelne Messungen zusammengefasst 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/m²]

Calculate Energy Balance and cumulate Ablation

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.

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
Sum info:	Measurements every 2 Days minutes summed			

General settings

Use summed measurement
☒

Accumulate Plots
☐

Energy balance

Total energy balance

Second axis
☒

☒ Show measured ablation [m]
☐ Show measured and calculated ablation water equivalent [l]

sw_radiation_in
sw_radiation_out
lw_radiation_in
lw_radiation_out
sensible_heat
latent_heat

Energy selected components

Trend Elimination

Trend eliminate total energy balance

Trend eliminate selected components

Abbildung 8: GUI Plot-Frame

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

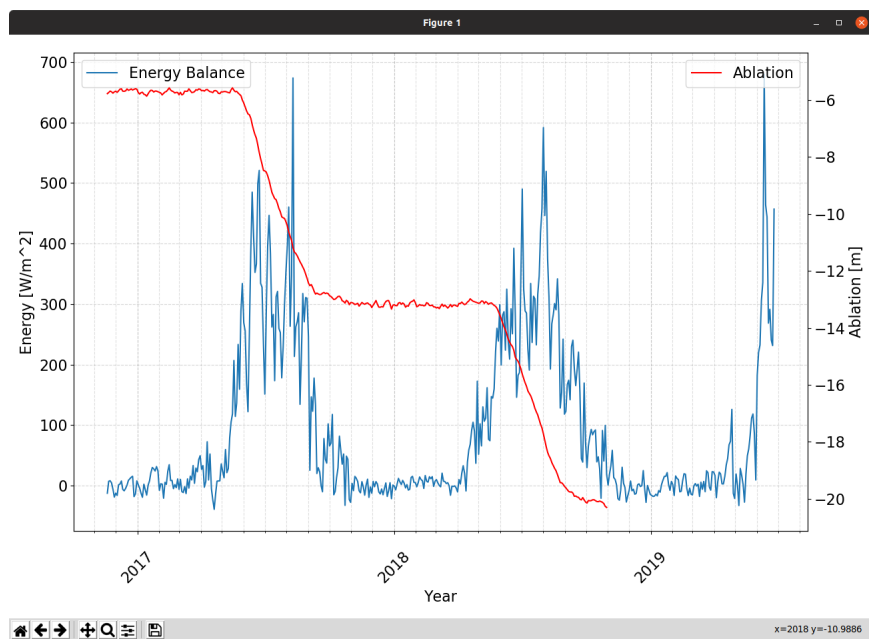


Abbildung 9: GUI Beispiel Plot

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

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
Sum info:	Measurements every 2 Days minutes summed			

Download generated data to .csv

Total energy balance

Cleaned Ablation

Relative Ablation (incl. modelled Ablation)

Water equivalent [Summed measurements]

sw_radiation_in
 sw_radiation_out
 lw_radiation_in
 lw_radiation_out
 sensible_heat
 latent_heat

Selected components

Abbildung 10: GUI Download-Frame

Eine detaillierte Beschreibung des GUI befindet sich unter <https://bitbucket.org/atraxoo/energiebilanzablationsgebietpasterze/wiki/Home> im Wiki des Projektes auf der Plattform Bitbucket.

3.6 Softwareverwaltung

3.6.1 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.

3.6.2 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

4.1 Energiebilanz

Abbildung 11 zeigt die errechnete Energiebilanz über den gesamten Messzeitraum von Ende 2016 bis Mitte 2019.

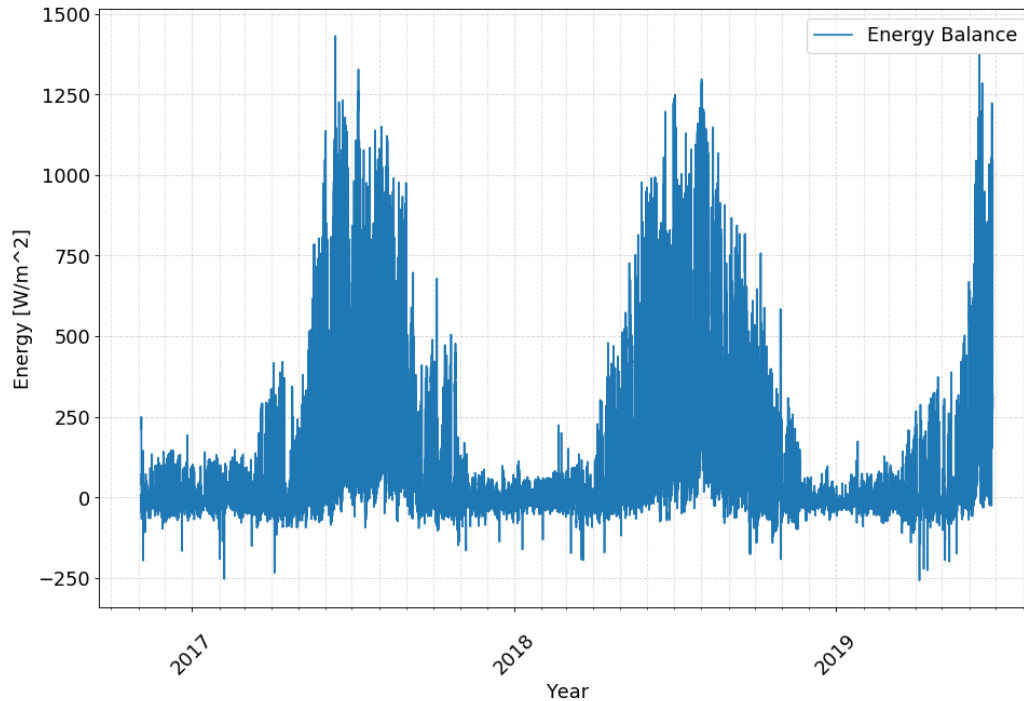


Abbildung 11: Energiebilanz gesamter Messzeitraum, Zeitintervall 10 Minuten

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 $1500 W/m^2$, die Minima bei ca. $-250 W/m^2$. Diese ungleiche Verteilung ist erklärbar durch die Messungen im Ablationsgebiet des Gletschers. Hier sollte ja das Jahresmittel deutlich positiv sein. Folgende Tabelle zeigt einen Überblick der Energiebilanz in den Jahren 2017 und 2018. Weiters werden in der darauf folgenden Abbildung 12 die einzelnen Komponenten der Energiebilanz monatlich gemittelt dargestellt.

Tabelle 2: Energiebilanz Mittel

Jahr	Strahlungskomp.		Sensible/Latente Wärme		Gesamtenergiebilanz	
	Jun-Aug	Gesamt	Jun-Aug	Gesamt	Jun-Aug	Gesamt
2017	62.5	42.4	79.5	58.1	142.0	100.4
2018	49.8	48.2	64.2	60.9	114.0	109.1

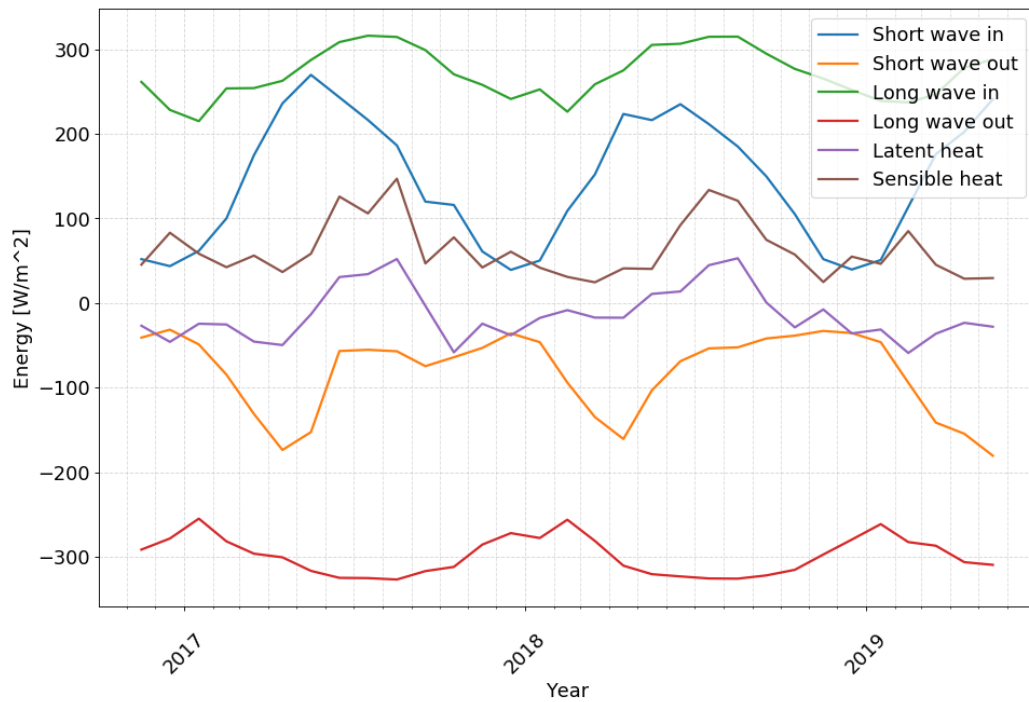


Abbildung 12: Energiebilanzkomponenten Monatsmittel

Der stärkste periodische Trend ist bei der eintreffenden kurzwelligen Strahlung zu erkennen. Den größten positiven Energieeintrag stellt allerdings die langwellige eintreffende Strahlung dar. Generell lässt sich feststellen, dass die langwelligen Strahlungskomponenten einen geringeren periodischen Trend aufweisen, als die kurzwelligen. Der Wärmeeintrag (bzw. Verlust) der sensiblen und latenten Wärme ist zwar deutlich kleiner als der der einzelnen Strahlungskomponenten, kann aber trotzdem keineswegs ignoriert werden.

Abbildung 13 zeigt nochmals die Energiebilanz über den gesamten Messzeitraum, jedoch wurde hier jeweils ein Tag gemittelt.

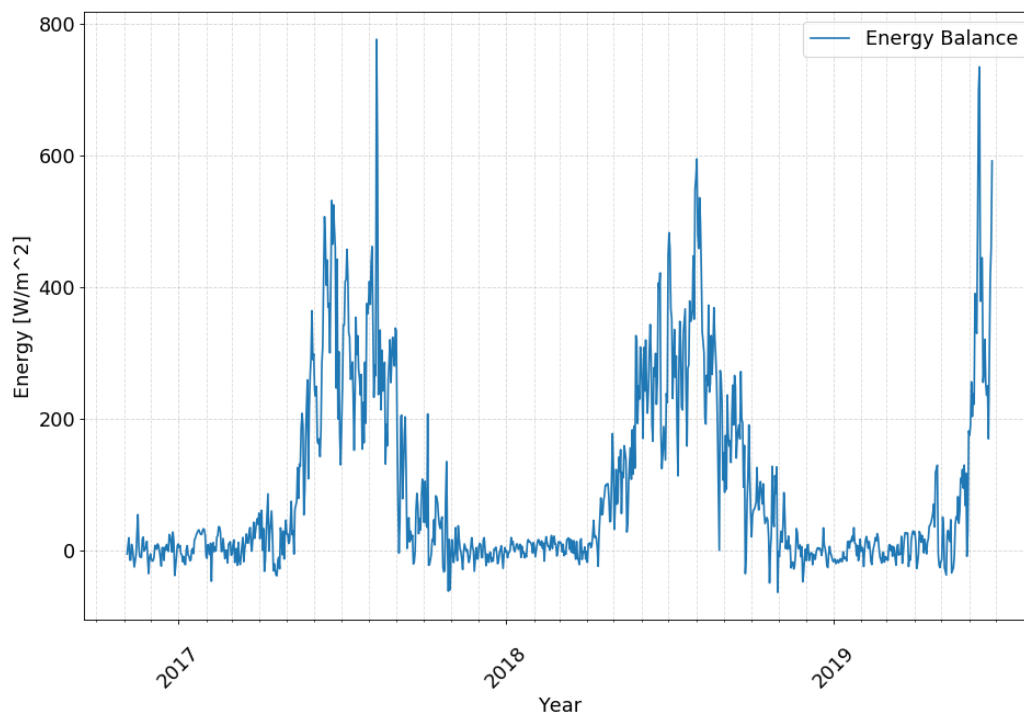


Abbildung 13: Energiebilanz gesamter Messzeitraum, tagweise gemittelt

Dies resultiert in einem glatteren Verlauf der Kurve, wobei es im Bereich des Sommers zwischen unterschiedlichen Tages-Werten trotzdem noch Abweichungen von teils 300 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 zwei Ausreißer nach oben im August 2017 und im Juni 2019 zum Vorschein. Diese Werte von mehr als 700 W/m^2 sind mit knapp 200 W/m^2 Vorsprung die größten Werte im betrachteten Zeitraum. Durch Darstellung von einzelnen Komponenten der Energiebilanz kann erörtert werden, woraus diese Maximalwerte hervorgehen.

Abbildung 14 zeigt die kombinierten Bestandteile “Short wave in”, “Short wave out”, “Long wave in” und “Long wave out”, Abbildung 15 hingegen nur die sensible und latente Wärme. Die periodische Schwingung ist bei der ersteren Abbildung deutlicher ausgeprägt.

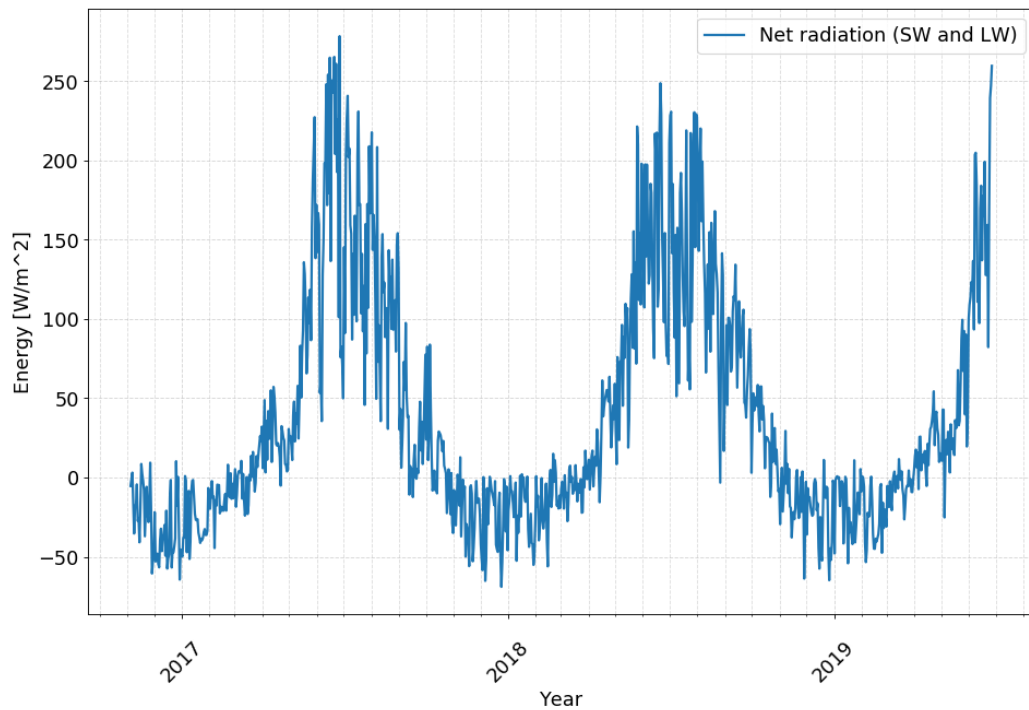


Abbildung 14: Strahlungskomponente im gesamten Messzeitraum, tagweise gemittelt

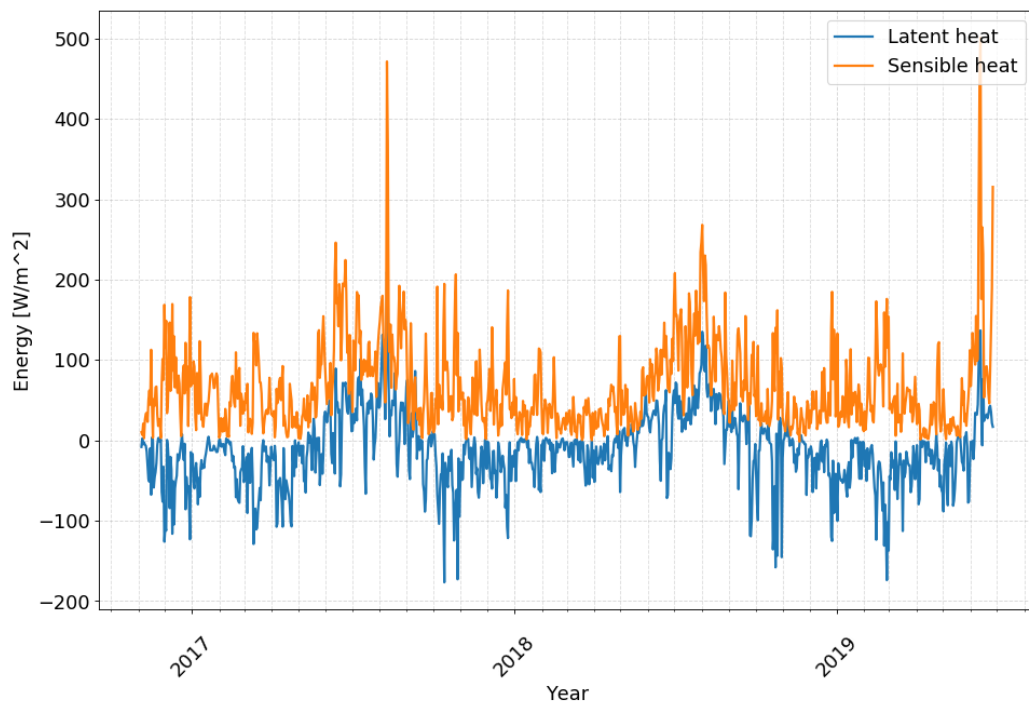


Abbildung 15: Sensible und latente Wärme im gesamten Messzeitraum, tagweise gemittelt

Es stellt sich heraus, dass die genannten hohen Werte der Energiebilanz, bei der sensiblen Wärme auftreten. In der Berechnung der sensiblen Wärme fließen die Messgrößen Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Eistemperatur mit ein. Bei genauerer Betrachtung der Messwerte stellt sich heraus, dass alle drei Komponenten zu diesen Zeiten hohe Werte aufweisen. Hohe Temperatur, hoher Luftdruck und gleichzeitig hohe Windgeschwindigkeit resultiert in einem hohen sensiblen Wärmeeintrag.

4.2 Ablation, Schmelzwasser

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 keine Änderung der Ablation. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Masse des Gletschers im Winter stagniert, da in diesem Zeitraum durch Schneefall Akkumulation auftritt, diese aber in der Ablationsmessung nicht sichtbar ist. Zu beobachten ist, dass die Energiebilanz schon vor dem eigentlichen Beginn der Schmelze erhöht ist. Grund dafür ist, dass zuerst der liegende Schnee noch weggeschmolzen werden muss und erst dann die positive Energiebilanz Eisschmelze verursacht.

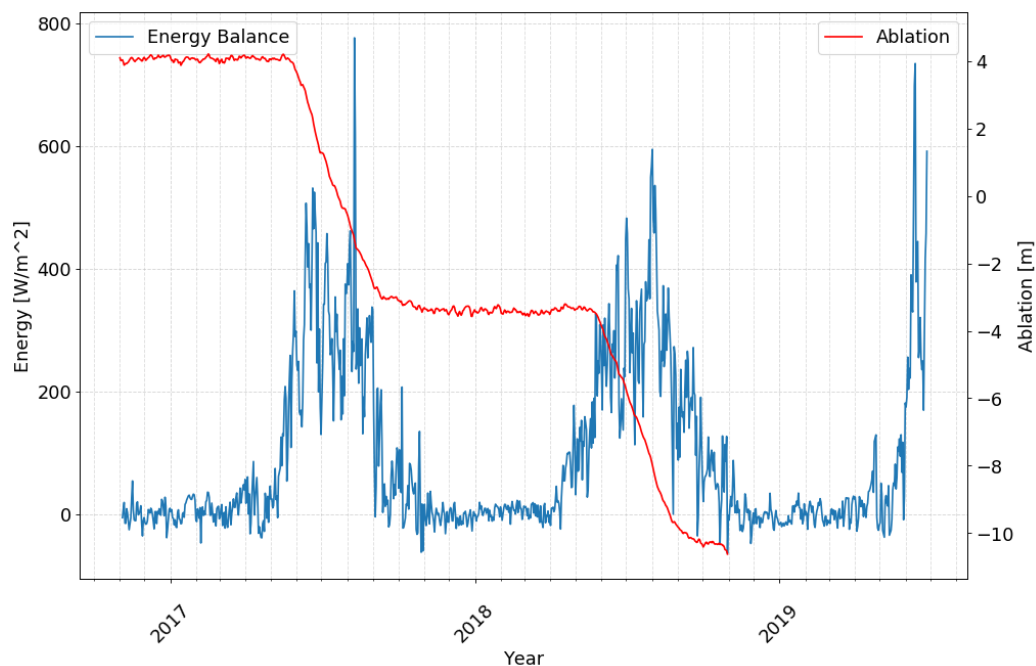


Abbildung 16: Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive Ablationsmessung, tagweise gemittelt

Folgende Abbildung zeigt die Energiebilanz im gesamten Messzeitraum, wobei zusätz-

lich das durch die Ablationsmessung errechnete und das modellierte Schmelzwasser aus der Energiebilanz dargestellt wird. Wie bereits in der Durchführung erwähnt, wird für die Modellierung nur der Teil zwischen 1. Juni und 1. September pro Jahr verwendet, da zu dieser Zeit der Eislager als isotherm mit 0 Grad angenommen werden kann, was die Modellierung erleichtert.

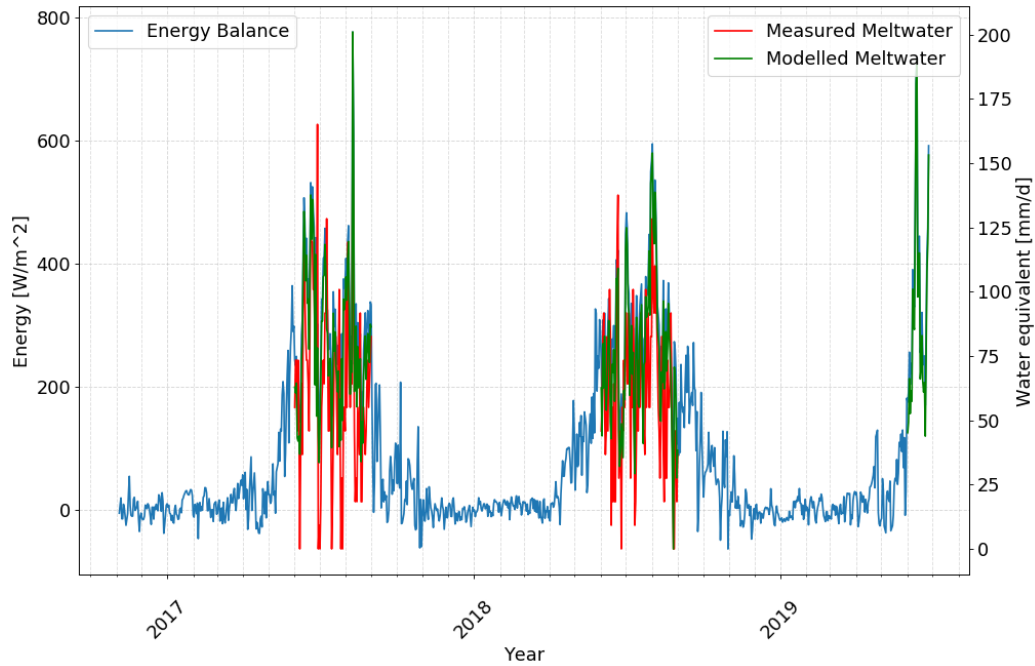


Abbildung 17: Energiebilanz im gesamten Messzeitraum inklusive gemessenem und modellierten Schmelzwasser, tagweise gemittelt

Auffallend ist, dass das gemessene Schmelzwasser abweichend zum modellierten teilweise deutlich weniger ist und im Jahr 2017 sogar häufig bei 0 [mm/d] liegt. Kein gemessenes Schmelzwasser bedeutet, dass in der Ablationsmessung kein Rückgang der Eisdicke zu erkennen ist. Wird Abbildung 18 betrachtet, so kann erkannt werden, dass teils trotz Tagesdurchschnittstemperatur über ca. 4°C keine Ablation gemessen wird.

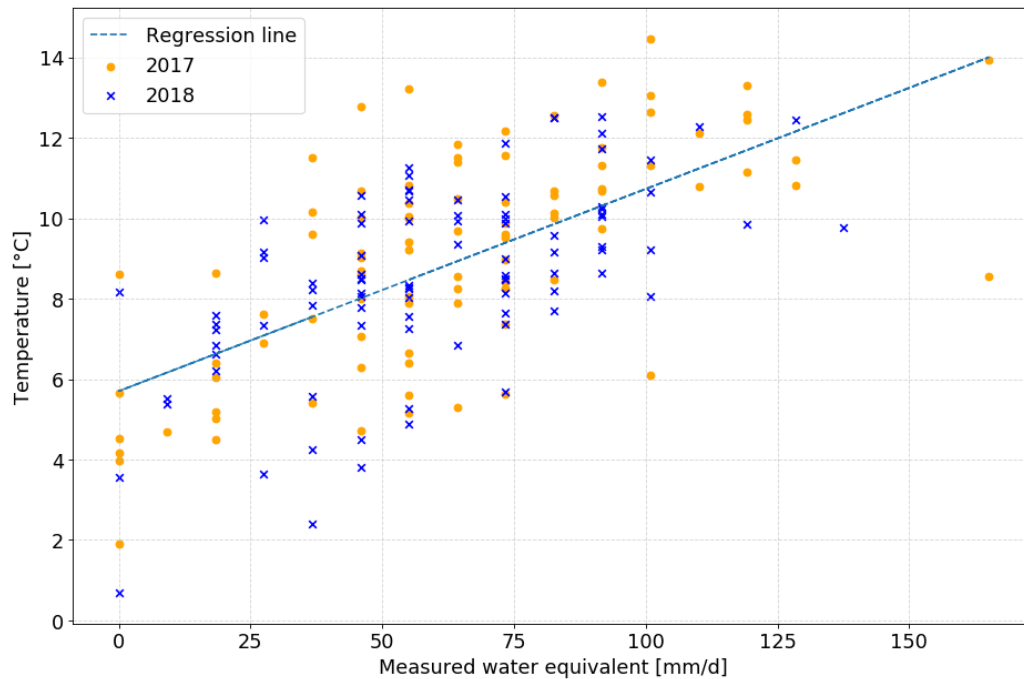


Abbildung 18: Vergleich gemessenes Schmelzwasser und Temperatur in den Jahren 2017 und 2018

Abbildung 19 und 20 zeigen den Zusammenhang in Abbildung 17 für die zwei Jahre 2017 und 2018 vergrößert auf. Tendenziell wird im Modell insbesondere bei Energiebilanzspitzen eine größere Menge an Schmelzwasser angenommen. Der Verlauf der Kurve vom gemessenen Schmelzwasser an sich wird aber sehr gut von der Kurve des modellierten Schmelzwasser wiedergegeben. In folgender Tabelle wird diese visuelle Interpretation in Form vom Korrelationskoeffizienten nach Pearson in Zahlen ausgedrückt.

Tabelle 3: Korrelation zwischen gemessenem und modellierten Schmelzwasser

Sommermonate	Korrelation nach Pearson
2017	0.72
2018	0.63

Ab einer Korrelation von 0.7 wird von einer starken Korrelation gesprochen. Das angenommene Modell repräsentiert also durchaus die Realität.

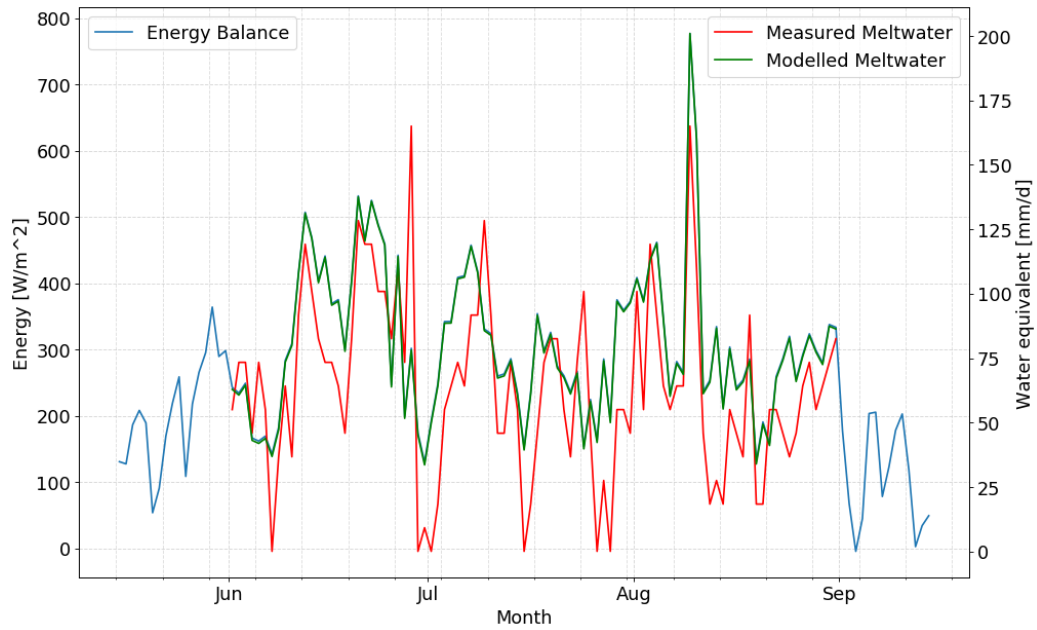


Abbildung 19: Energiebilanz im Sommer 2017 inklusive der in Wasseräquivalent umgerechneten Ablation und dem modellierten Schmelzwassertagweise gemittelt

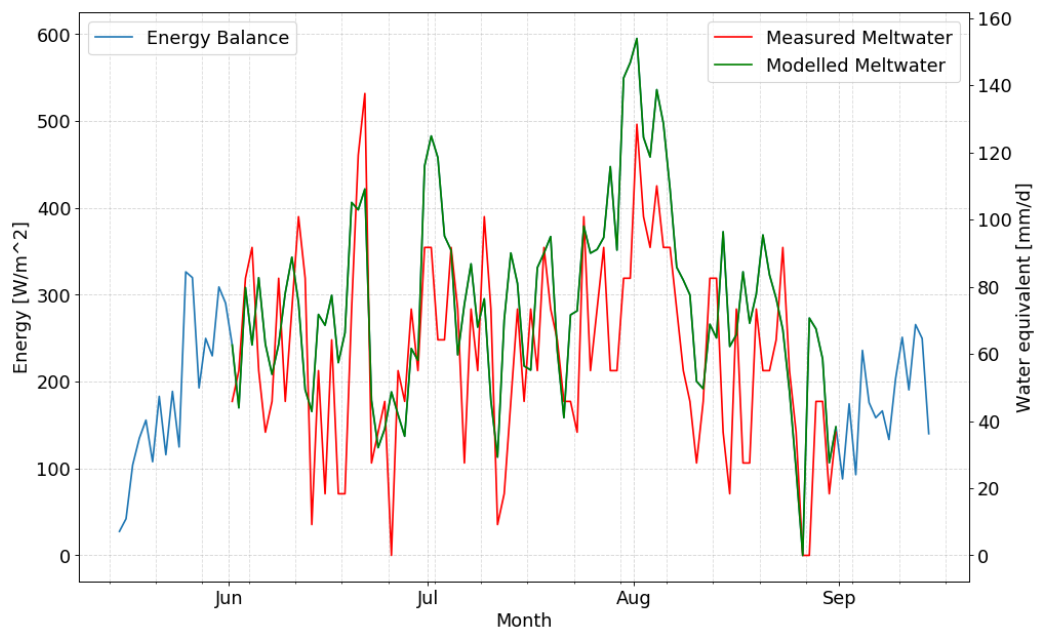


Abbildung 20: Energiebilanz im Sommer 2018 inklusive gemessenem und modellierten Schmelzwasser, tagweise gemittelt

Abbildung 21 stellt anhand eines Scatter-Plots das modellierte und gemessene Schmelzwasser unmittelbar gegenüber. Im Idealfall liegen dabei alle Punkte auf der Regressionsgeraden und diese weist eine Steigung von 45° auf und verläuft durch den Ursprung

des Koordinatensystems. Der lineare Trend ist im Falle dieser Darstellung deutlich ersichtlich, allerdings beträgt die Steigung der Regressionsgeraden nur ca 28° und sie schneidet die y-Achse ca. beim Wert 40 [mm/d]. Dies bedeutet einerseits, dass das Modell bei sehr niedrigen gemessenen Werten für die Wasseräquivalenz bereits deutlich höhere Werte prädiziert und andererseits, dass tendenziell im Vergleich zum Gemessenen eher zu viel Schmelzwasser modelliert wird.

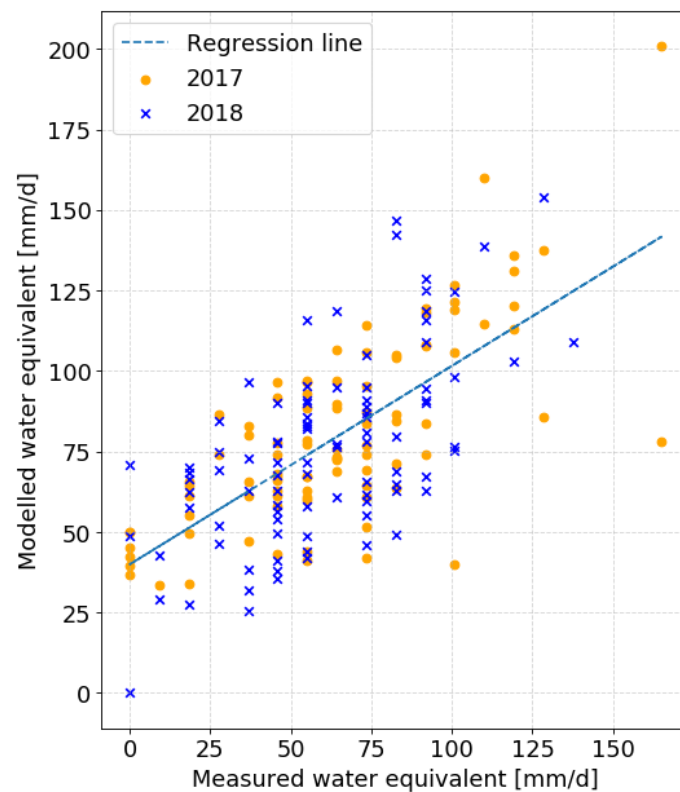


Abbildung 21: Vergleich modelliertes und gemessenes Schmelzwasser in den Jahren 2017 und 2018

4.3 Änderung des Eisdickenverlustes bei “global dimming” bzw. “global brightening”

Da das theoretische Modell der Energiebilanz und das daraus folgende Schmelzwasser gut mit der Realität übereinstimmt, können auch weitere Analysen über Veränderung der Energiebilanz durch “global dimming” und “global brightening” und dessen Auswirkung auf das Schmelzwasser vorgenommen werden. Um die Veränderung greifbarer zu machen, wird das Schmelzwasser, wie in der Durchführung beschrieben, in Eisdickenverlust umgerechnet.

Für diese Analyse wird wieder das Jahr 2018 von 1. Juni bis 1. September (siehe Abbildung 20) verwendet. In diesem Zeitraum ergibt sich ein gemessener Gesamteisdickenverlust von 5.99 m und ein modellierter von 7.59 m . Es spiegelt sich die Erkenntnis aus Abbildung 21 wieder, wo festgestellt wurde, dass tendenziell im Gegensatz zum Gemessenen zu viel Schmelzwasser modelliert wird. Bei der Simulation von “global dimming” und “global brightening” wird die Veränderung dieses Eisdickenverlustes im Modell untersucht. Damit diese Änderungen so gut wie möglich der Realität entsprechen, werden alle Änderung noch mit dem Faktor $5.99/7.59$ multipliziert. Das Ergebnis ist in Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4: Auswirkung von global dimming oder global brightening auf den Eisdickenverlust innerhalb vom 1. Juni bis 1. September im Jahr 2018

Zusätzliche W/m^2	-9	-6	-3	0	+3
Differenz [cm]	-18	-12	-6	0	6

Es kann erkannt werden, dass sich “global dimming” und “global brightening” sehr wohl signifikant auf die Änderung der Eisdicke eines Gletschers im Ablationsgebiet auswirken. Bei knapp 10 W/m^2 kleinerer Energiebilanz über die Sommermonate ergibt sich bereits ein um 18 cm geringerer Eisdickenverlust. Der Zusammenhang ist linear und kann somit mit ca. 6 cm pro 3 W/m^2 weiter fortgesetzt werden.

4.4 Periodische Trendelimination der Energiebilanz

Wie bereits erwähnt, machen Trendeliminationen bei einer so kurzen Zeitreihe wenig Sinn. Trotzdem zeigt Abbildung 22 das Ergebnis der periodischen Trendelimination der Messreihe. Ein Jahr an darstellbaren Daten fällt durch die verwendete Methode (siehe Kapitel 3.2) dabei weg. Interpretation der Darstellung macht wenig Sinn, über die betrachteten Jahre nimmt die Energiebilanz allerdings leicht aber.

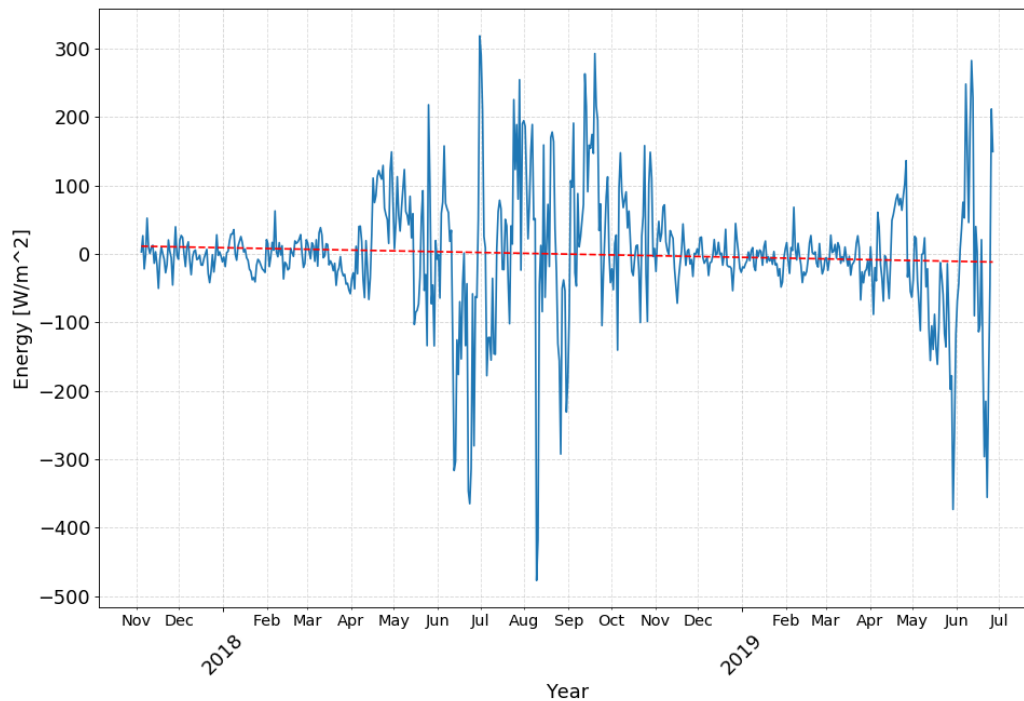


Abbildung 22: Trendelimination der Energiebilanz, tagweise gemittelt

Werden die Strahlungskomponente, sowie die der sensible und latente Wärmeeintrag der Energiebilanz separat betrachtet, kann erkannt werden, dass die Abnahme aus der Strahlungskomponente resultiert. Die sensible und latente Wärme bleibt im Mittel über den betrachteten Zeitraum annähernd Konstant.

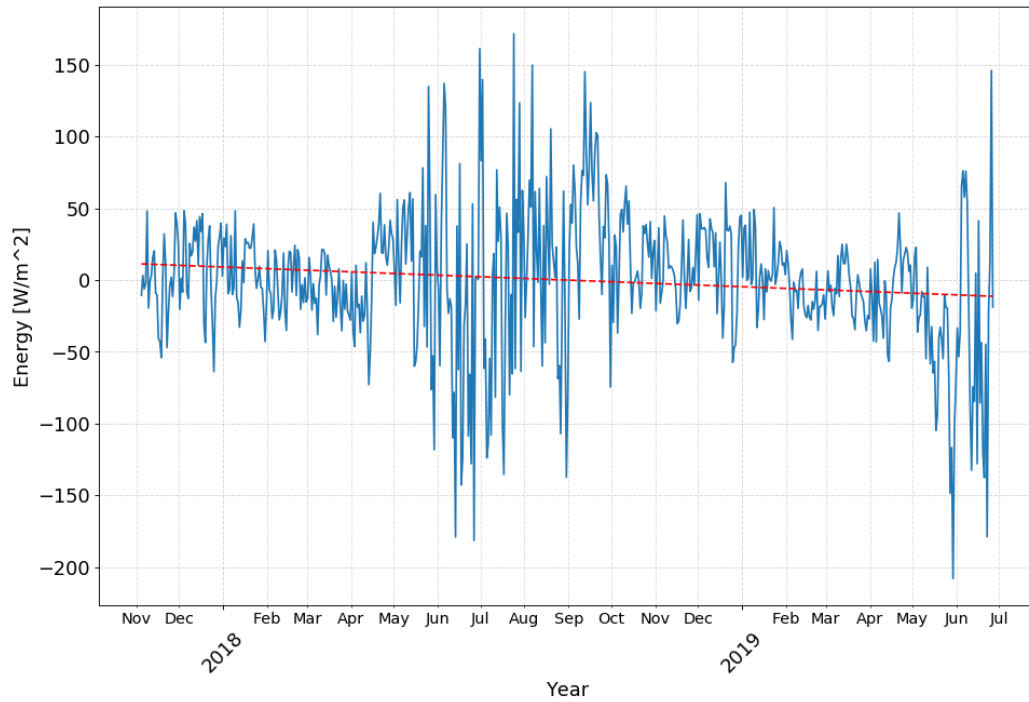


Abbildung 23: Trendelimination der Strahlungskomponente der Energiebilanz, tagweise gemittelt

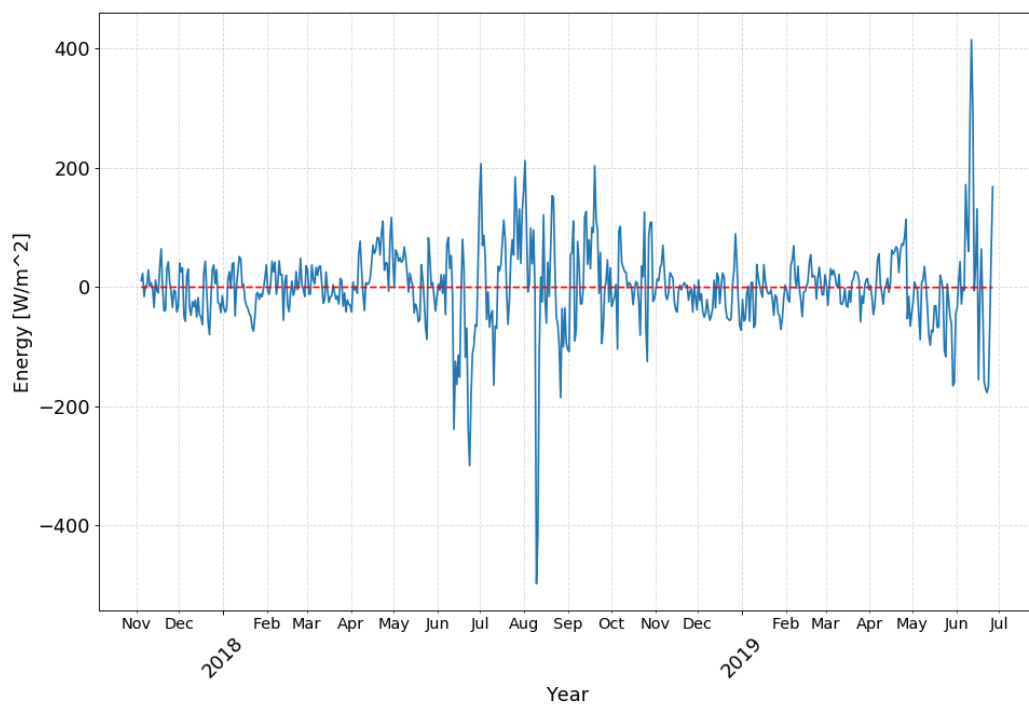


Abbildung 24: Trendelimination der sensiblen und latenten Wärme der Energiebilanz, tagweise gemittelt

5 Fazit

6 Literaturverzeichnis

Literatur

- Cuffey, K. und W. S. B. Paterson (2010). *The physics of glaciers*. 4th ed. Burlington MA: Butterworth-Heinemann/Elsevier. ISBN: 0123694612.
- Lieb, G. K. und H. Slupetzky (2011). *Die Pasterze*. Salzburg: A. Pustet. ISBN: 3702506527.
- Oerlemans, J. (2010). *The Microclimate of Valley Glaciers*. Igitur. URL: https://books.google.at/books?id=MUA%5C_nQEACAAJ.
- Wakonigg, B., H. Wakonigg und G. K. Lieb (o.D.). *Längenänderung der Pasterze*. Hrsg. von Institut für Geographie und Raumforschung. URL: <https://geographie.uni-graz.at/de/forschung/forschungsgruppen/aladyn/projekte/pasterze/messergebnisse/laengenaenderung/>.
- Wild, M. (2009). “Global dimming and brightening: A review”. In: *Journal of Geophysical Research* 114.21, S. 1319. ISSN: 0148-0227. DOI: 10.1029/2008jd011470.
- (Jan. 2012). “Enlightening Global Dimming and Brightening”. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.1, S. 27–37. DOI: 10.1175/bams-d-11-00074.1. URL: <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00074.1>.