



Global Cryosphere Watch - Sonnblick Gletscher- und Schneedeckenmonitoring GCW-S_G 2014 - 2018

GZ: BMLFUW-UW.1.3.2/0129-V/4/2014

Endbericht, vorgelegt am 30.1.2019

Bernhard Hynek, Anton Neureiter, Daniel Binder, Marion Greilinger, Gernot Weyss

*Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus
(BMNT, vormals BMLFUW, Projektleitung Abt. I/4)*

 Bundesministerium
Nachhaltigkeit und Tourismus

 **ZAMG**
Zentralanstalt für
Meteorologie und
Geodynamik

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Zusammenfassung.....	3
2. Übersicht über das Klima am Sonnblick 2014 - 2018	4
3. Massenbilanzmessung konventionell.....	10
3.1 Direkt gemessene saisonale Massenänderungen	10
3.2 Geodätische Aufnahmen und Berechnung von Höhenunterschieden	13
4. Aufbau und Erweiterung des Automatischen Messnetzes	17
5. Gletschermonitoring durch Automatische Kameras	21
6. Energiebilanzmonitoring	33
6.1 EMBS Kleinfleißkees	33
6.2 EMBS Pasterze	37
6.3 MBS Goldbergkees	40
6.4 MBS Pasterze	42
7. Abflussmonitoring	43
7.1 Abfluss Goldbergkees.....	43
7.2 Abfluss Kleinfleißkees.....	45
8. Datenprüfung, -Assimilation und Nahe-Echtzeit-Monitoring	47
9. Ionendepositionsmessungen in der Winterschneedecke	49
10. Publikationen auf Datenbasis des Monitorings.....	52
10.1 Peer Reviewed Papers.....	52
10.2 Tagungsbeiträge	52
10.3 Universitäre Abschlussarbeiten	53
10.4 Presseaussendungen zu den laufenden Projektergebnissen.....	53

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes GCW-S_G wurde das langjährige glazialhydrologische Monitoring im Bereich des Sonnblicks und des Großglockners im Zeitraum 2014 bis 2018 erfolgreich durchgeführt und deutlich erweitert. Das Monitoring ist Teil des umfangreichen internationalen Forschungsprogrammes des Sonnblick Observatoriums. Folgende Schwerpunkte standen im Rahmen des Projektes GCW-S_G im Vordergrund:

- Etablierung des Sonnblicks als „Super Site“ im Netzwerk Global Cryosphere Watch
- Fortführung des langjährigen Gletschermassenbilanz- und Schneedecken-Monitorings
- Fortführung des Monitorings der chemischen Zusammensetzung der Winterschneedecke, der Energiebilanz der Gletscher und des Glazialabflusses
- Erweiterung des Messprogrammes auf die Pasterze
- Automatisierung des Monitorings durch Online-Datenanbindung
- Entwicklung eines Nahe-Echtzeit-Monitorings unter Einbindung unterschiedlicher Messungen

Das glazialhydrologische Monitoring im Bereich des Sonnblicks und des Großglockners konnte zu einem Vorzeigeprojekt für ein standardisiertes Kryosphärenmonitoring im Global Cryosphere Watch Programm (www.globalcryospherewatch.org) der WMO entwickelt werden. Die vorliegenden Messserien zeigen in beispielhafter Weise das Schrumpfen der Alpengletscher als direkte Folge der gegenwärtigen Erwärmung.

Durch die detaillierte Messung von räumlich verteilter Winter- und Jahresbilanz, zeitlich hochauflösender Energie- und Massenbilanz und des Gebietsabflusses, der Messung des Klimas am Sonnblick und räumlich verteilter Messungen des Niederschlags und der Schneehöhe wurde ein Langzeit-Datensatz weitergeführt, anhand dessen sich unser Prozessverständnis und unsere Modellvorstellungen bezüglich der Wechselwirkung zwischen Klima und Gletschern im Konkreten und der Gebirgshydrologie im Allgemeinen ständig verfeinern.

Die drei Gletscher Goldbergkees, Kleinfleißkees und Pasterze sind im Beobachtungszeitraum der letzten 5 Jahre stärker geschmolzen als in vergleichbaren 5-Jahreszeiträumen zuvor, obwohl das Jahr 2014 auf den Gletschern am Sonnblick seit langem wieder einen zwischenzeitlichen Massenzuwachs gebracht hat. Die Sommer 2015, 2017 und 2018 waren extrem heiß, sodass die Gletscher in diesen Sommern pro Jahr fast zwei Meter an Eisdicke verloren haben. In den letzten 5 Jahren haben die Gletscher an der Oberfläche (klimatisch bedingte Massenänderung) 6.3 Meter (Sonnblickgletscher) bzw. 7.0 Meter (Pasterze) an Eisdicke verloren, das entspricht ca. 18% bzw. 16% ihrer Gesamtmasse und führte zu einer Reduktion ihrer mittleren Eisdicke auf ca. 29 (Sonnblickgletscher) respektive 37 Meter (Pasterze).

Im Rahmen dieses 5-Jahres-Projektes konnte ein völlig autarkes und relativ wartungsarmes Messnetz von automatischen Kameras aufgebaut werden. Neben des Monitorings und der Visualisierung der laufenden Veränderungen der Gletscher dienen die Fotos vor allem zu einer besseren Erfassung der räumlichen Verteilung der Schneebedeckung und der Abschmelzung, was letztlich die Genauigkeit der Massenbilanzmessung erhöht. Um die zeitliche Variabilität der Akkumulation und Ablation genauer erfassen zu können, wurden die bestehenden Energiebilanzstationen durch Ablationssensoren erweitert und auch eine zusätzliche Station auf der Pasterze installiert. Fast alle dieser Messstationen sind mittlerweile mit Datenübertragung ausgestattet, sodass der Zustand der Gletscher mittlerweile in Nahe-Echtzeit zur Verfügung steht.

Die Messungen der Schneechemie sind mittlerweile zu einer weltweit einzigartigen langen Zeitreihe an Ionenkonzentrationen der Schneedecke angewachsen und erlauben Aussagen über Trends sowie detaillierte Auswertungen von außergewöhnlichen Depositionsereignissen aus Ferntransport wie z.B. Saharastaub. Es konnte gezeigt werden, dass die Konzentrationen von SO_4^{2-} , NO_3^- und H^+ signifikant rückläufig sind und einen saisonalen Verlauf mit erhöhten Frühjahrskonzentrationen zeigen. Zudem konnte eine Methode zur retrospektiven Identifikation von Saharastaubschichten entwickelt werden, die es ermöglicht diese Schichten in Vorjahresprofilen und somit für die gesamte 30-jährige Zeitreihe zu identifizieren und deren Einfluss auf den Ioneneintrag und auf den Säurehaushalt der Schneedecke zu untersuchen.

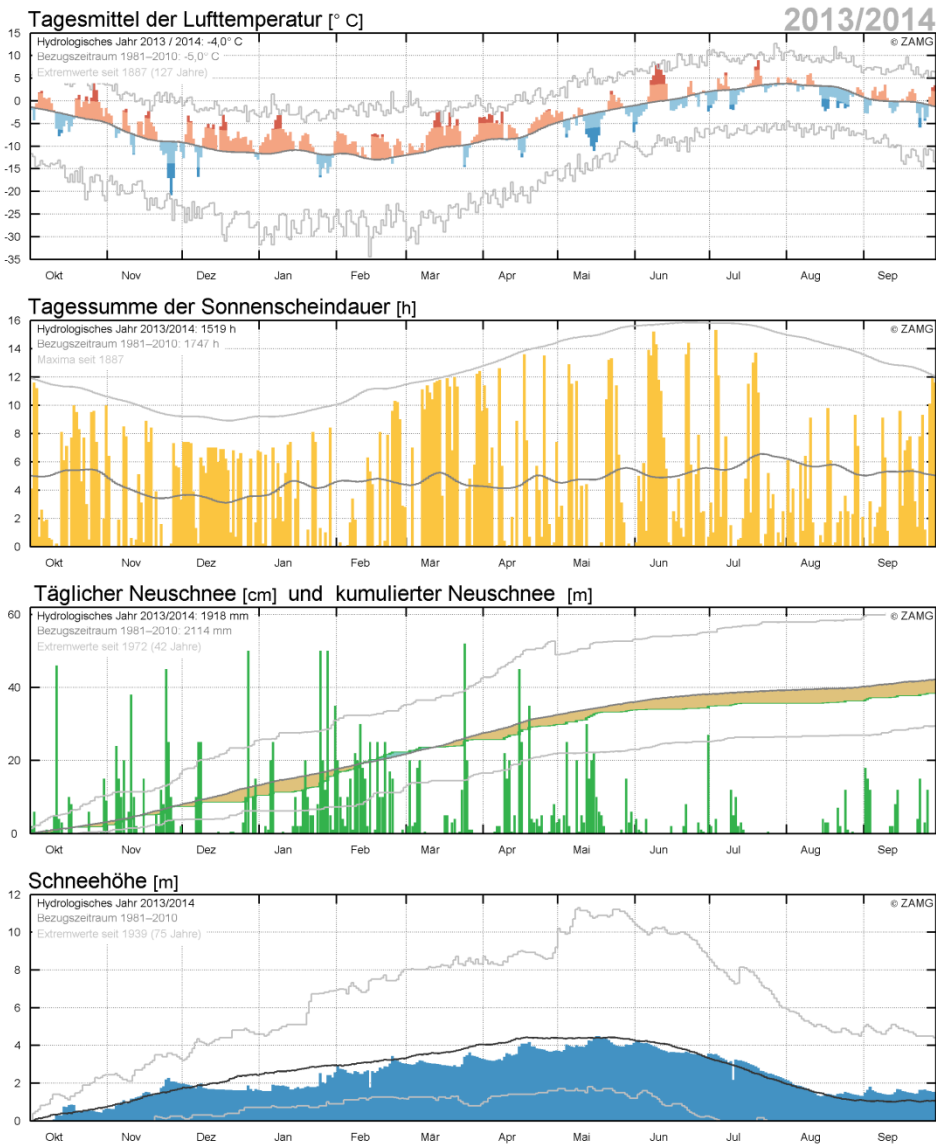
2. Übersicht über das Klima am Sonnblick 2014 - 2018

Bevor in den nächsten Kapiteln auf die eigentlichen Messergebnisse im Detail eingegangen wird, soll in diesem Kapitel in Kurzform das am Sonnblick-Observatorium gemessene Klima im Projektzeitraum (genauer: in den hydrologischen Jahren 2013/14 bis 2017/18) dargestellt werden, da die klimatischen Bedingungen ja zum größten Teil die Ursache für die gemessenen Gletscher- und Schneedeckenänderungen darstellen. Gerade im gleichzeitigen detaillierten Erfassen von Gletscher- und Klimaschwankungen besteht ja der große Nutzen dieses Langzeitmonitorings, da auf dieser soliden Datenbasis komplexe Einzelprozesse in der Summe ihrer Wirkungen quantifiziert werden können.

Für diese Klimaübersicht wurden Daten der Station Sonnblick (3105m) verwendet, da es die Station ist, die den untersuchten Gletschern am nächsten ist und vor allem mit einer durchgehenden Messreihe seit 1871 aufwarten kann, sodass die Messungen der letzten 5 Jahre auch in Bezug zu frühen Messungen gesetzt werden können. Konkret sind die Klimaelemente in den Grafiken auf der nächsten Seite auch als Abweichungen zum 30jährigen Mittel 1981-2010 dargestellt, zudem ist die Schwankungsbreite der Messungen im Laufe der letzten ca. 150 Jahre ersichtlich.



Abbildung: Das Sonnblick-Observatorium und das Zittelhaus am Gipfel des Hohen Sonnblicks (3105m) Ende September 2018. Blickrichtung NO, im Vordergrund das Kleinfleißkees (Foto: G. Weyss).



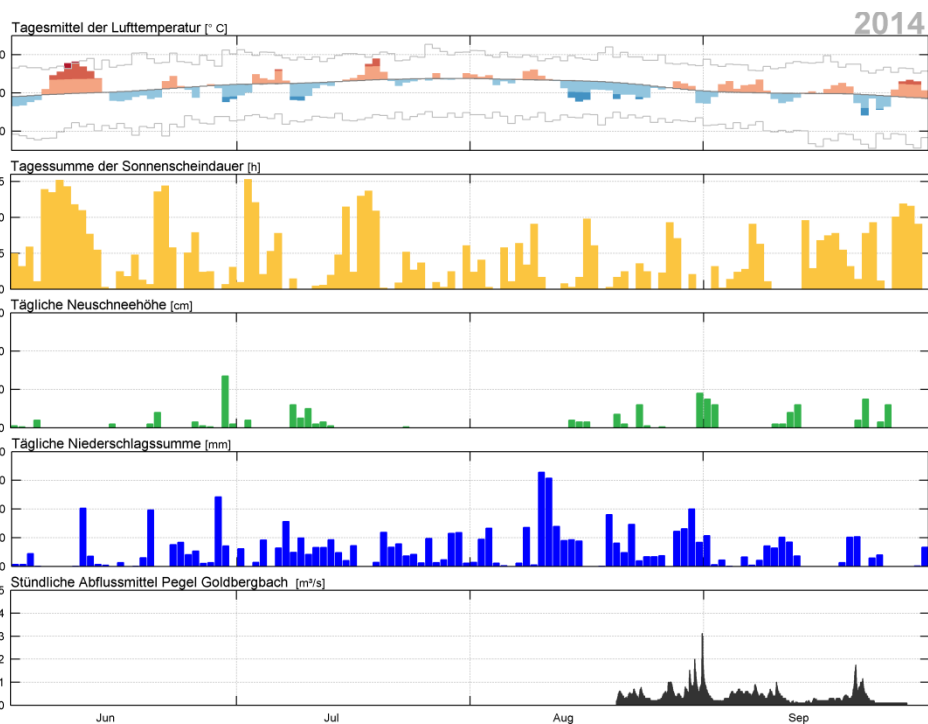
**Überblick über einige Klima-
elemente am Sonnblick im
hydrologischen Jahr 2013/14:**

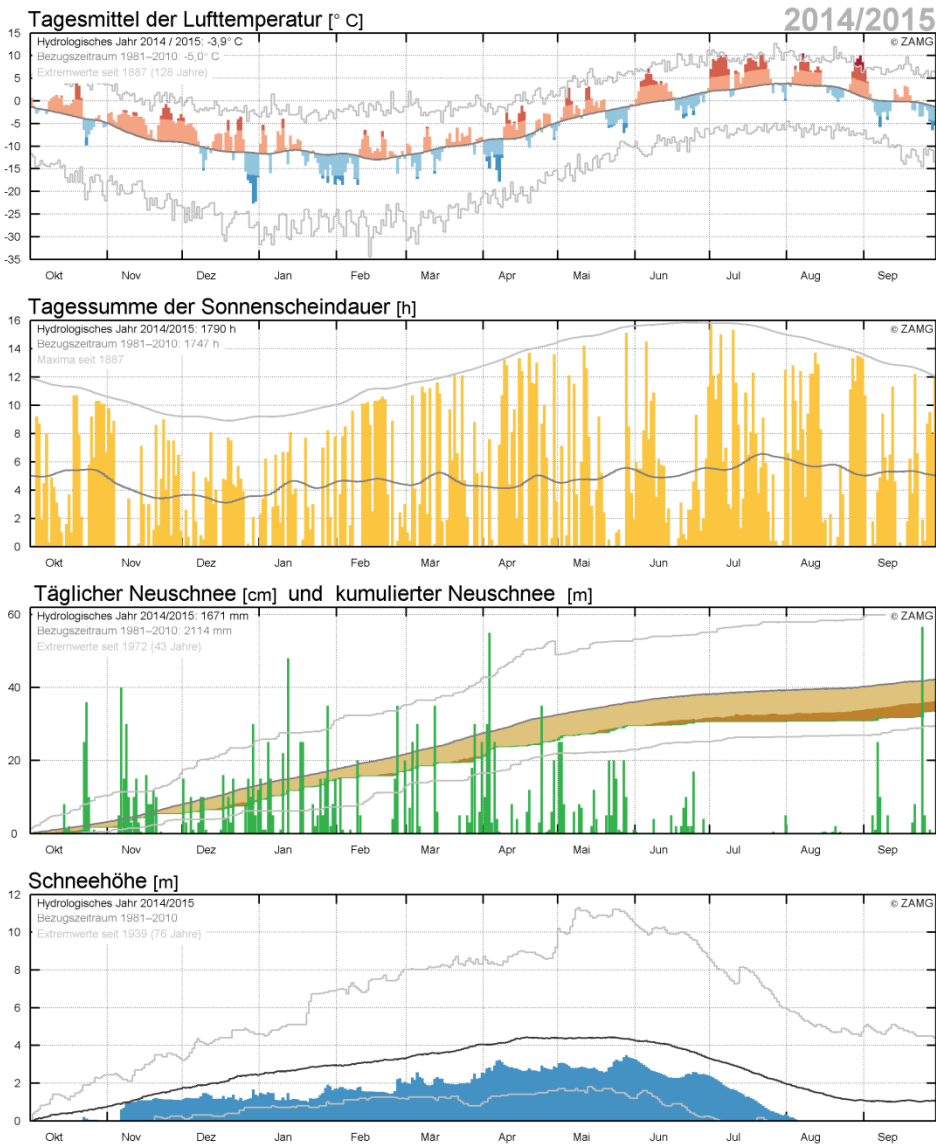
Auffallend im Haushaltjahr 2013/14 ist die geringe Sonnenscheindauer von 1519h, (30jähriges Mittel:1747h) und über weite Strecken eine dem langjährigen Mittelwert entsprechenden Schneehöhe, die gegen Ende des Haushaltjahres sogar überdurchschnittlich hoch ist. In Summe führt das Klima in diesem Jahr zu leichten Massenzuwächsen auf den Sonnblick-Gletschern, nicht aber auf der Pasterze.



**Darstellung einiger Klima-
elemente am Sonnblick und des
gemessenen Abflusses während
der Ablationsperiode 2014:**

Es fehlen längere Schönwetter-
perioden, fast täglich
Niederschlag, signifikanter
Schneefall auch in den
Sommermonaten, eine markante
Kaltluftströmung Mitte August
beendet die Schmelze frühzeitig.
In diesem Sommer bilanzierten
die Gletscher tw. positiv. Der
Abflusslogger am GOK war defekt
und lieferte im Juli und bis Mitte
August leider keine brauchbaren
Daten.



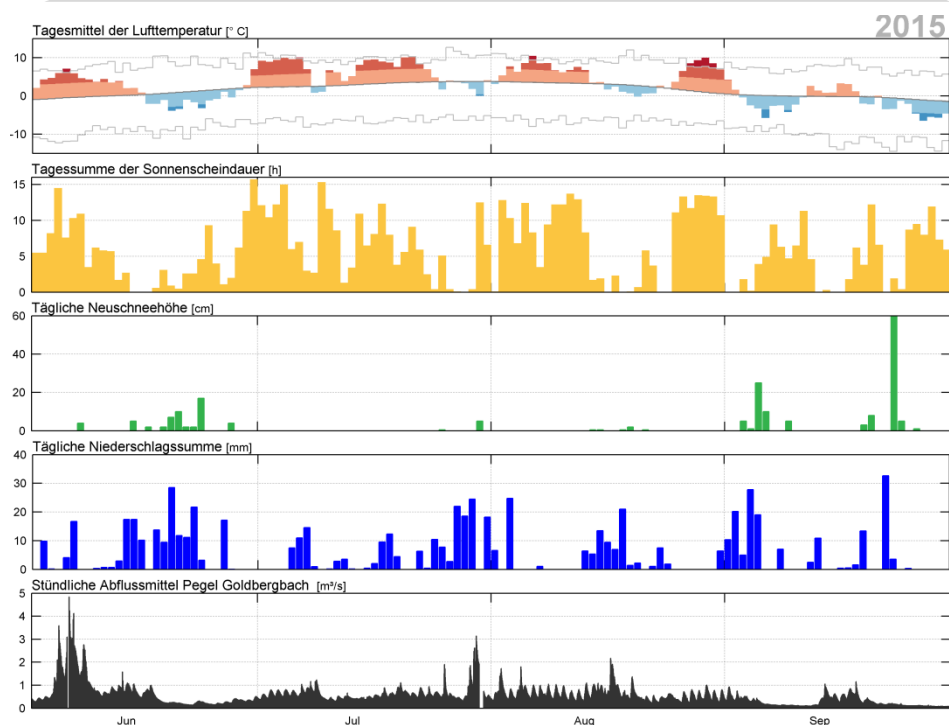


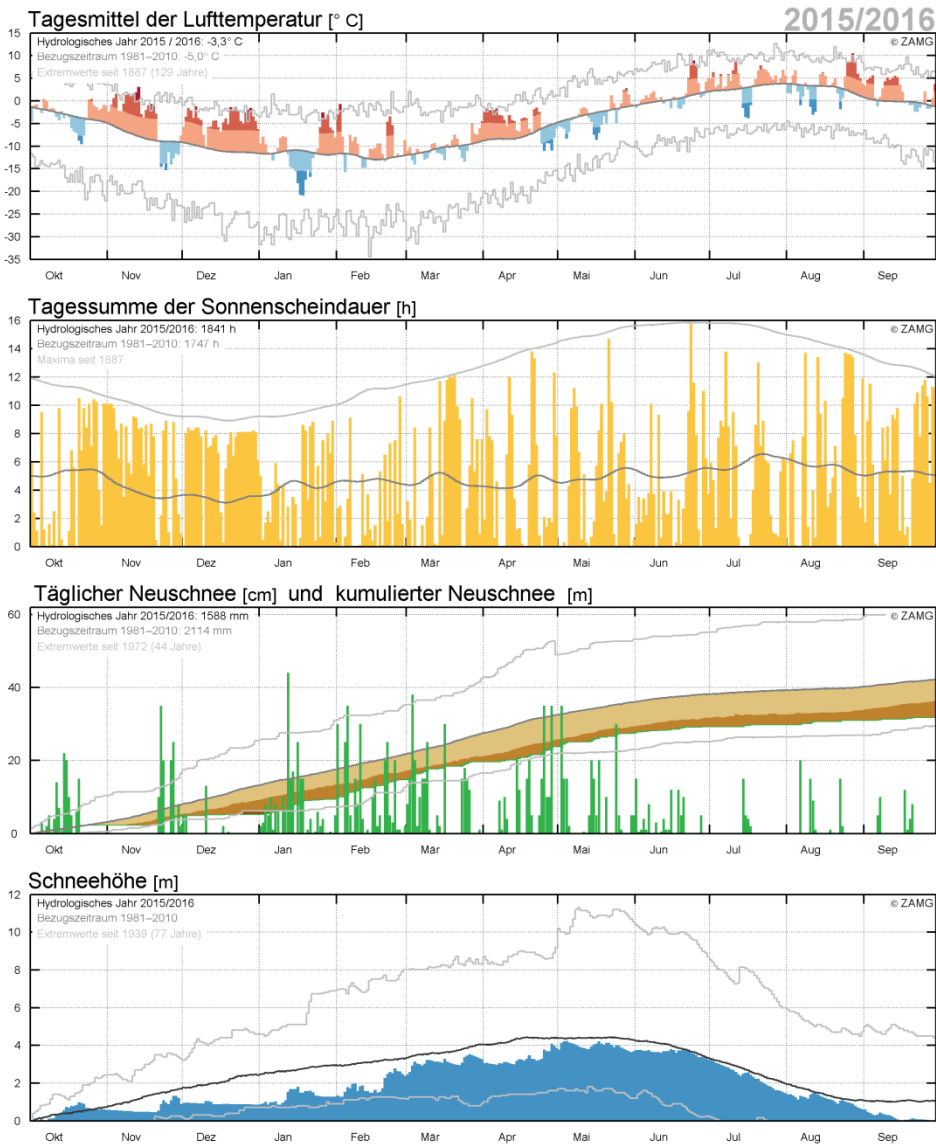
Überblick über einige Klimatelemente am Sonnblick im hydrologischen Jahr 2014/15:

Im Gegensatz zum Sommer 2014 gab es im Sommer 2015 mehrere aufeinanderfolgende Schönwetterperioden, Ende August sogar mit neuen Rekordtemperaturen am Sonnblick. Die Neuschneemengen waren stark unterdurchschnittlich und spiegelten sich in einer geringen Schneehöhe am Sonnblick mit Ausaperung schon Anfang August wieder. In Summe führte diese Witterung zu einer extremen Gletscherschmelze, die Firnrücklagen aus den Vorjahren (vor allem aus 2014) schmolzen fast zur Gänze weg und die Gletscher verloren eine Eisschicht von knapp 2 Metern. Die Massenverluste waren in einem ähnlichen Bereich wie im „Jahrhundertsommer“ 2003.

Darstellung einiger Klimatelemente am Sonnblick und des gemessenen Abflusses während der Ablationsperiode 2015:

Gut sichtbar am Verlauf von Temperatur und Sonnenscheindauer sind 5 markante Schönwetter- und Hitzeperioden im Sommer 2015. Im gesamten Juli und August gab es zudem keinen nennenswerten Schneefall auf 3100m Seehöhe. Erst der Schneefall um den 20.9.2015 beendete die Ablationsperiode auf den Gletschern, wie auch am Zurückgehen des Gebietsabflusses zu sehen ist.





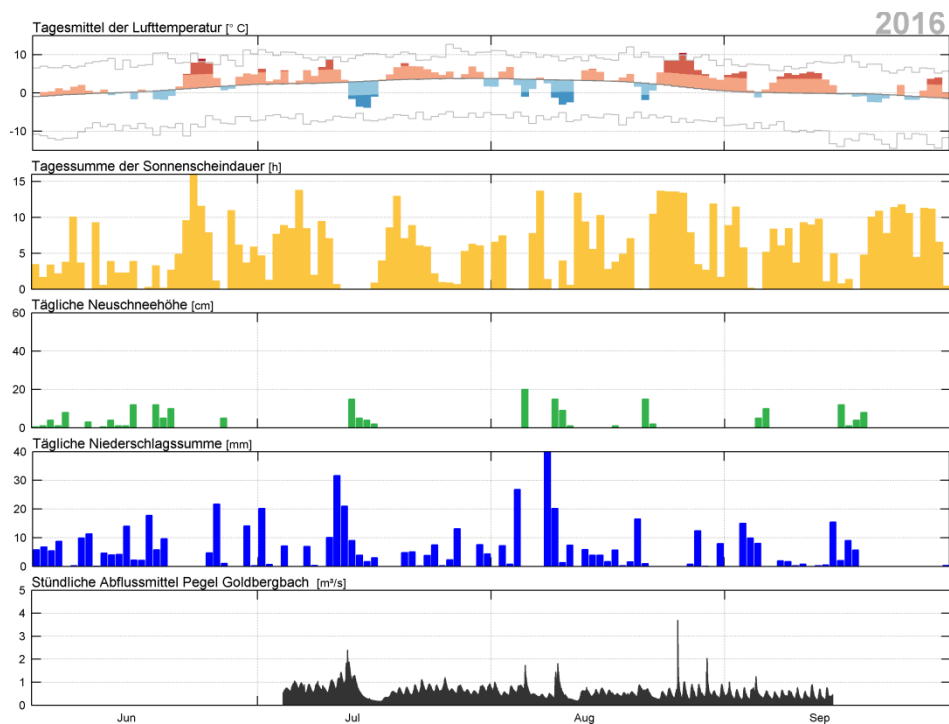
Überblick über einige Klimaelemente am Sonnblick im hydrologischen Jahr 2015/16:

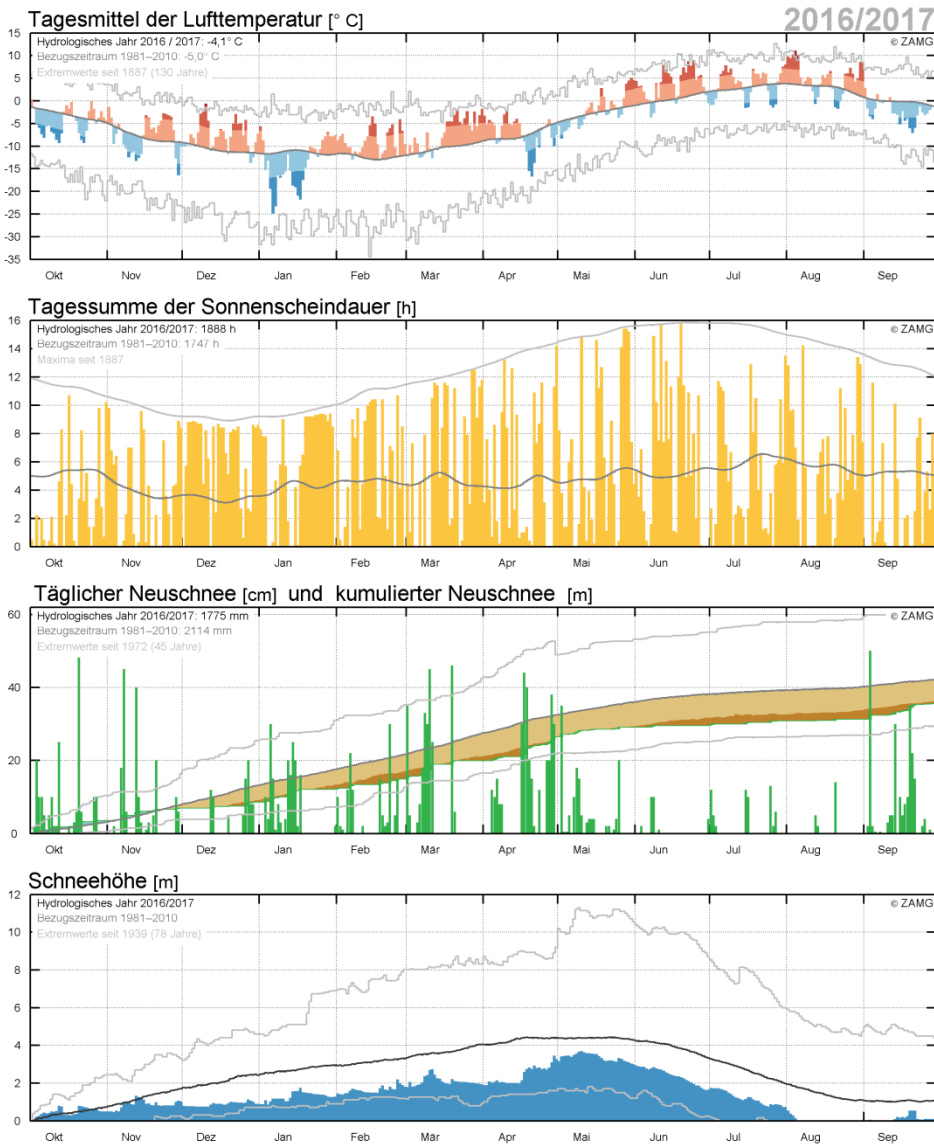
Der Winter – also die Akkumulationsperiode der Gletscher – war 2015/16 über weite Strecken viel wärmer und reicher an Sonnenschein als das langjährige Mittel, gleichzeitig auch die Neuschneemengen vergleichsweise gering, was zu einer unterdurchschnittlichen Schneehöhe über weite Strecken des Winters führte, die aber gegen Ende der Akkumulationsperiode wieder im durchschnittlichen Bereich lag, also zu einer durchschnittlichen Winterakkumulation führte. Die Schneedecke am Sonnblick schmolz erst Mitte September vollständig. Auf den Gletschern bedeutete dies zwar Massenverluste, aber in wesentlich geringerem Ausmaß wie in den eher extremen Jahren der Projektlaufzeit 2015, 2017 und 2018.



Darstellung einiger Klimaelemente am Sonnblick und des gemessenen Abflusses während der Ablationsperiode 2016:

Markant am Sommer 2016 waren Schneefälle Mitte Juli und Anfang bis Mitte August, die die Schmelzwasserproduktion für ein paar Tage verringerten, und eine lang andauernde, sehr warme Phase im Spätsommer, die den letzten Winterschnee auf den Gletschern am Sonnblick nahezu vollständig abschmelzen ließ. In diesen Zeitraum fiel auch der spontane Ausfluss des proglazialen Sees am Goldbergkees in der Nacht des 25./26. August, erkennbar an der Abflussspitze des Pegels Goldbergkees.





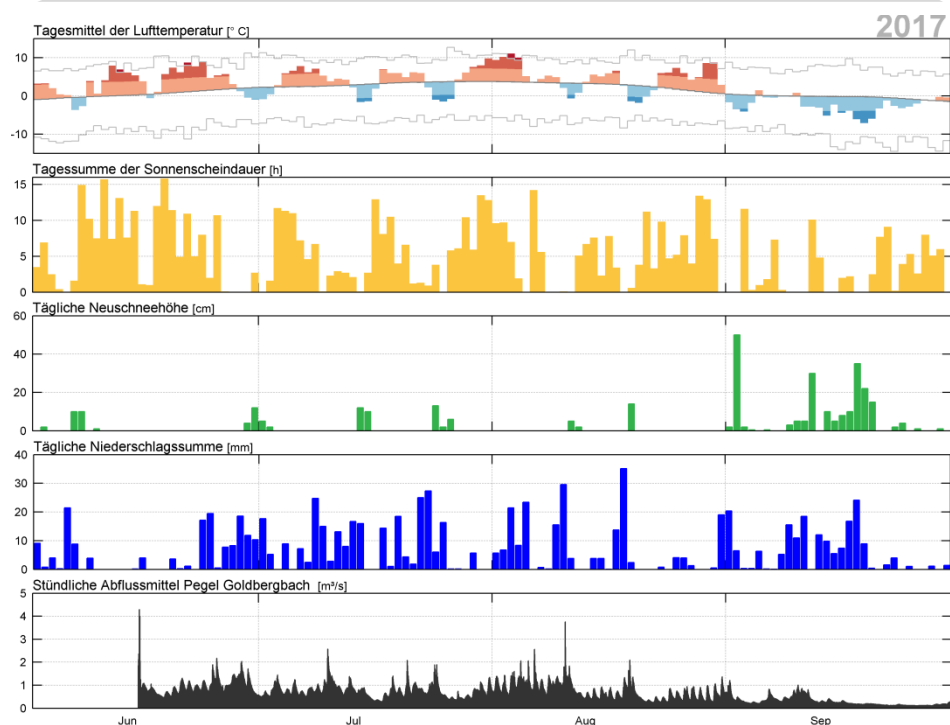
Überblick über einige Klimatelemente am Sonnblick im hydrologischen Jahr 2016/17:

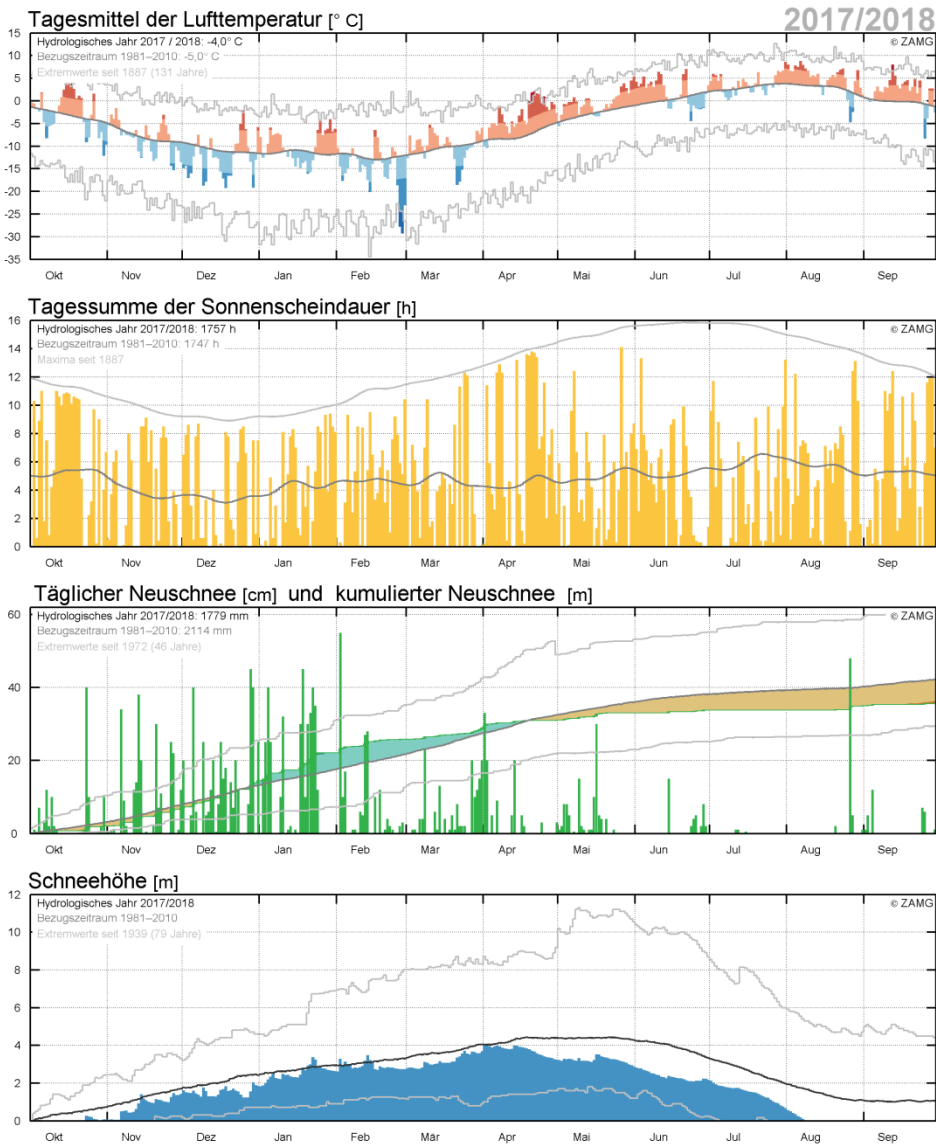
Der Schneedeckenaufbau am Sonnblick im Winter 2016/17 war stark unterdurchschnittlich, die Winterakkumulation der Gletscher jedoch nur 10% geringer als im Mittel. Der durchwegs heiße Sommer 2017, der zwar immer wieder von Schneefällen unterbrochen war, führte jedoch zu einem schnellen Abbau der ohnehin unterdurchschnittlichen Schneedecke auf den Gletschern und führte in Summe zu annähernd so hohen Massenverlusten wie das Haushaltsjahr 2014/15. Ein früher Wintereinbruch Anfang September verhinderte eine neuerliche Rekordschmelze.



Darstellung einiger Klimatelemente am Sonnblick und des gemessenen Abflusses während der Ablationsperiode 2017:

Auch im Sommer 2017 mehrere lang andauernde Schönwetterperioden am Sonnblick, die zwar immer wieder durch (leichte) Schneefälle unterbrochen wurden, welche durch ihre geringen Neuschneemengen die Schmelzwasserproduktion allerdings nur kurzfristig verringerten. Der markante Wintereinbruch Anfang September beendete zumindest auf den höher gelegenen Gletscherteilen die Abschmelzperiode frühzeitig.





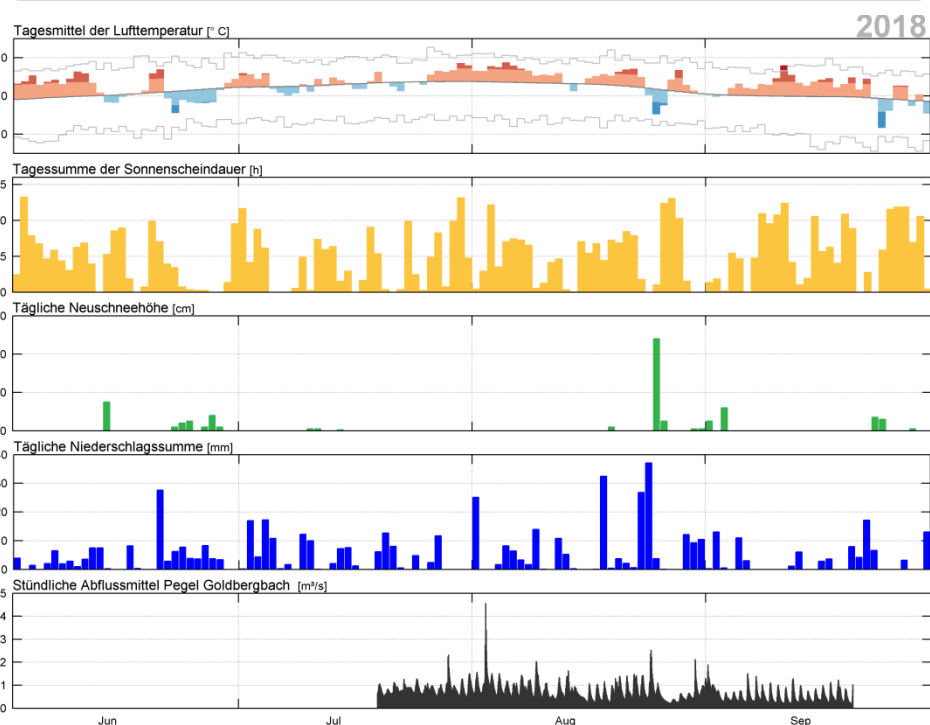
Überblick über einige Klimaelemente am Sonnblick im hydrologischen Jahr 2017/18:

Das hydrologische Jahr 2017/18 zeichnete sich durch die größte Schneeeakkumulation auf den Sonnblickgletschern seit 20 Jahren aus. Dies wird allerdings am Schneehöhenpegel des Sonnblicks nicht sichtbar, der ist Anfang Mai eher unterdurchschnittlich, da das warme Wetter im April die Schneedecke stark komprimiert, allerdings nicht zu einem Massenverlust führt, sondern zu einer höheren Dichte der Schneedecke. Ein durchwegs zu heißer Frühling und Sommer führten trotz der mächtigen Schneedecke in Summe zu extremen Massenverlusten der Gletscher in den Hohen Tauern. Der Sommer 2018 reiht sich somit unter die Sommer der extremsten Massenverluste der Gletscher, von denen viele im letzten Jahrzehnt liegen: 2003, 2011, 2012, 2015, 2017, und 2018.



Darstellung einiger Klimaelemente am Sonnblick und des gemessenen Abflusses während der Ablationsperiode 2018:

Durchwegs zu warme Temperaturen, nur ein signifikanter Schneefall Ende August und auch ein sehr warmer September führten im Sommer 2018 zu einer vollständigen Ausaperung der Gletscher und zu extremen Eisdickenverlusten im Bereich von eineinhalb bis zwei Metern gemittelt über die gesamte Gletscherfläche.



3. Massenbilanzmessung konventionell

3.1 Direkt gemessene saisonale Massenänderungen

Die 3 vermessenen Gletscher Goldbergkees, Kleinfleißkees und Pasterze sind im Beobachtungszeitraum der letzten 5 Jahre stärker weggeschmolzen als in vergleichbaren 5-Jahreszeiträumen zuvor, obwohl das Jahr 2014 auf den Gletschern am Sonnblick seit langem wieder einen geringen Massenzuwachs gebracht hat. Aber die Sommer 2015, 2017 und 2018 waren ähnlich heiß wie der Sommer 2003, wo die Gletscher fast zwei Meter an Eisdicke verloren haben. In den letzten 5 Jahren haben die Gletscher an der Oberfläche (klimatisch bedingte Massenänderung) 6.3 Meter (Sonnblickgletscher, 1.3 Meter/ Jahr) bzw. 7.0 Meter (Pasterze, 1.4 Meter/Jahr) an Eisdicke verloren, das entspricht ca. 18% bzw. 16% ihrer Gesamtmasse und führte zu einer Reduktion ihrer mittleren Eisdicke auf ca. 29 (Sonnblickgletscher) respektive 37 Meter (Pasterze).

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Ergebnisse der Winter- und Jahresmassenbilanzen, die im Laufe des Projektes (2014 – 2018) berechnet wurden, graphisch dargestellt. Die jährlichen Werte in der nachstehenden Abbildung sind die wesentlichen Ergebnisse des Massenbilanzmonitoring, sie beschreiben den mittleren Eisdickenverlust pro Jahr über die Gesamtgletscherfläche in Metern Wasseräquivalent. An dieser Grafik sieht man, dass sich die Massenverluste der Gletscher im letzten Jahrzehnt gegenüber dem Jahrzehnt davor beschleunigt haben, d.h. es kam im letzten Jahrzehnt zu einer Häufung von sehr gletscherungünstigen Jahren.

Tabelle: Wichtigste Ergebnisse des Massenbilanzmonitorings von Kleinfleißkees und Goldbergkees 2014-2018, berechnet auf der Gletscherfläche von 2015.

		Kleinfleißkees (FLK)					Mittel	Goldbergkees (GOK)					Mittel
		2014	2015	2016	2017	2018		2014	2015	2016	2017	2018	
Gletscherfläche (2015)	km ²	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79		1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	
Akkumulationsfläche	km ²	0.61	0.00	0.26	0.00	0.00		0.60	0.01	0.10	0.01	0.01	
Verhältnis von Akkumulationsfläche zu Gesamtfläche		78%	0%	33%	0%	0%		59%	1%	10%	1%	1%	
Höhe Gleichgewichtslinie	m Seehöhe	2800	>3100	2990	>3100	>3100		2890	>3100	2960	>3100	>3100	
Winterakkumulation (bw)	m Wassers.	1.7	1.5	1.5	1.2	1.8	1.5	1.8	1.8	1.8	1.6	2.1	1.8
Jährliche Massenänderung (b)	m Wassers.	0.5	-1.4	-0.4	-1.8	-1.4	-0.9	0.1	-1.9	-0.9	-1.8	-1.7	-1.2
jährliche Volumenänderung	m Seitenlänge Würfel Wasser	73	-103	-70	-112	-103	-63	41	-125	-96	-123	-121	-85

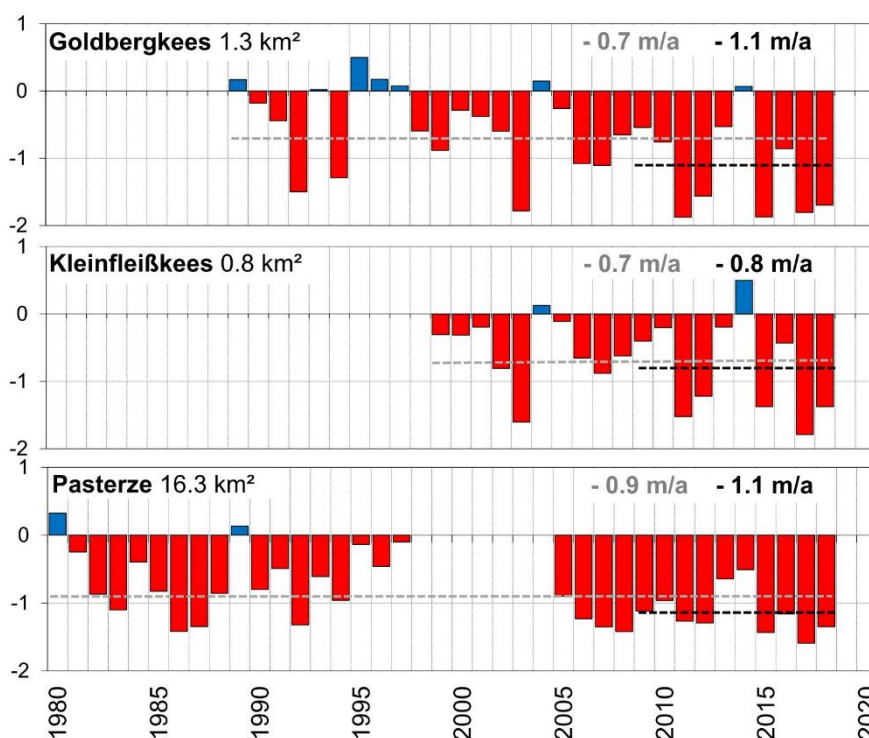


Abbildung: Zeitreihe der gemessenen mittleren jährlichen Massenbilanz in Meter Wasseräquivalent. Mittelwerte über die gesamte Messreihe sind in grau dargestellt. Der Mittelwert über die letzten 10 Jahre ist in schwarz dargestellt. Derzeit verlieren die Gletscher pro Jahr 1.3 – 1.4 Meter an Eisdicke.

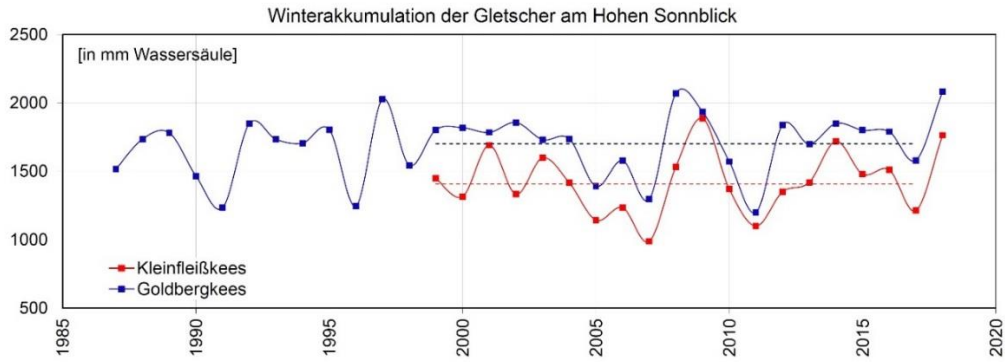


Abbildung: Winterakkumulation am Goldbergkees und am Kleinfließkees seit Beginn der jeweiligen Messreihe.

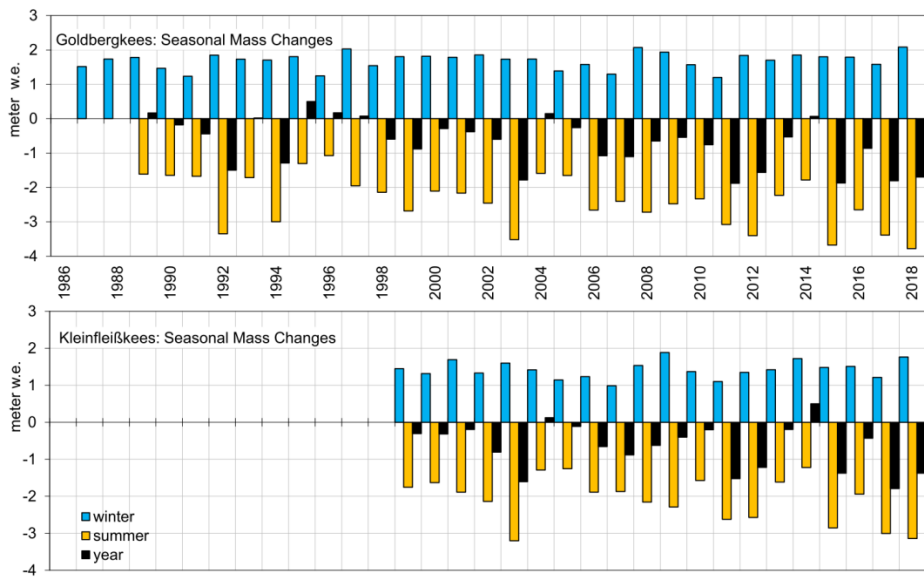


Abbildung: Gemeinsame Darstellung von Winter-, Sommer und Jahresmassenbilanz von Goldbergkees (oben) und Kleinfließkees (unten) seit Beginn der jeweiligen Messreihe.

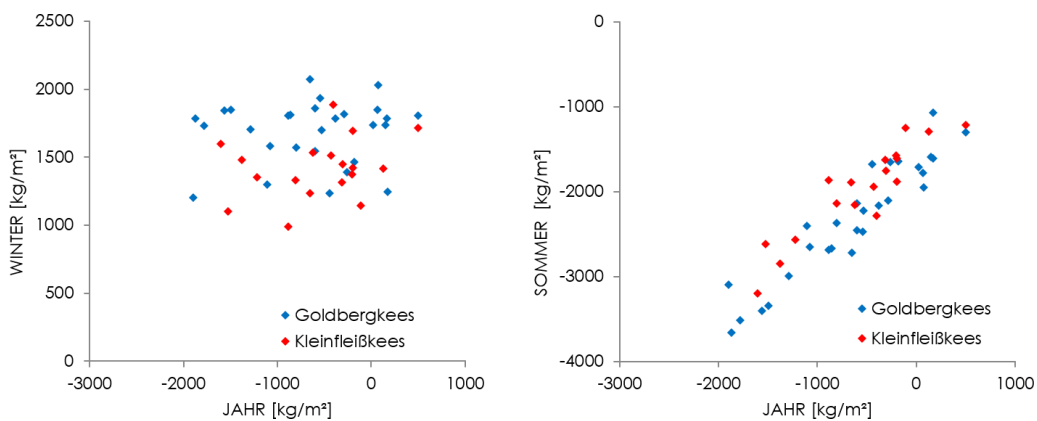
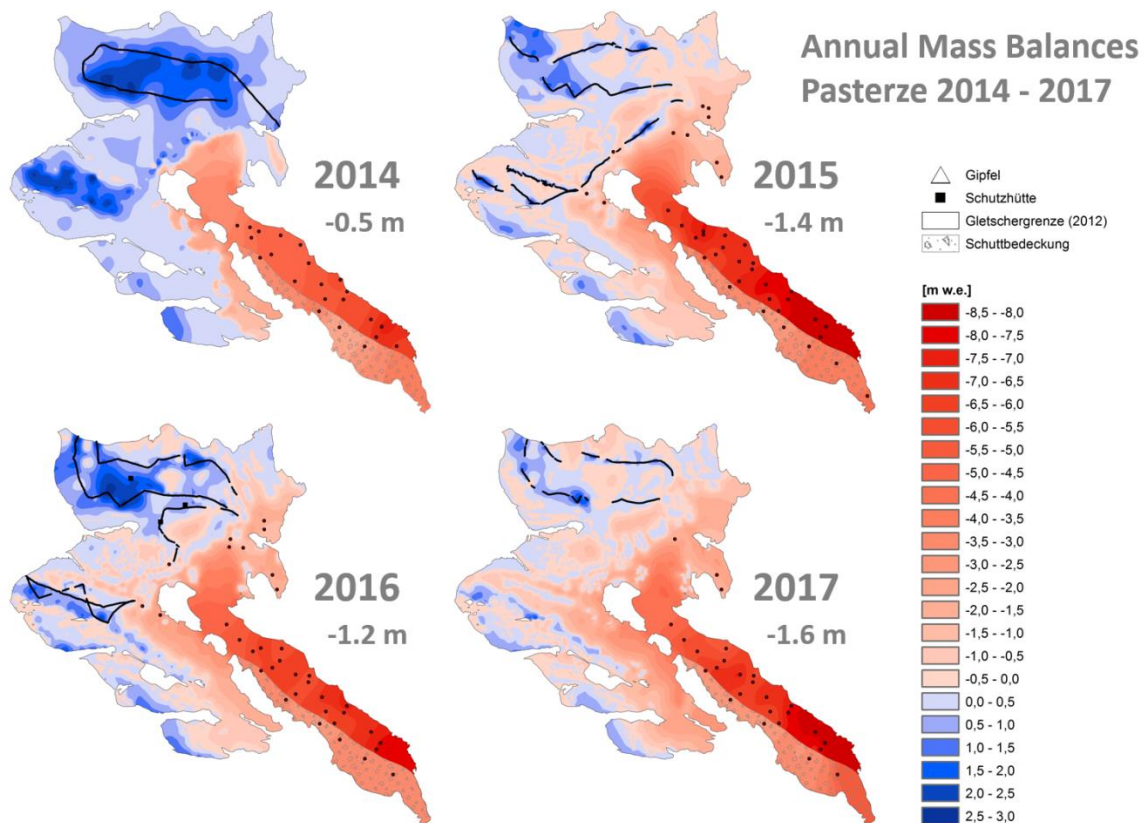
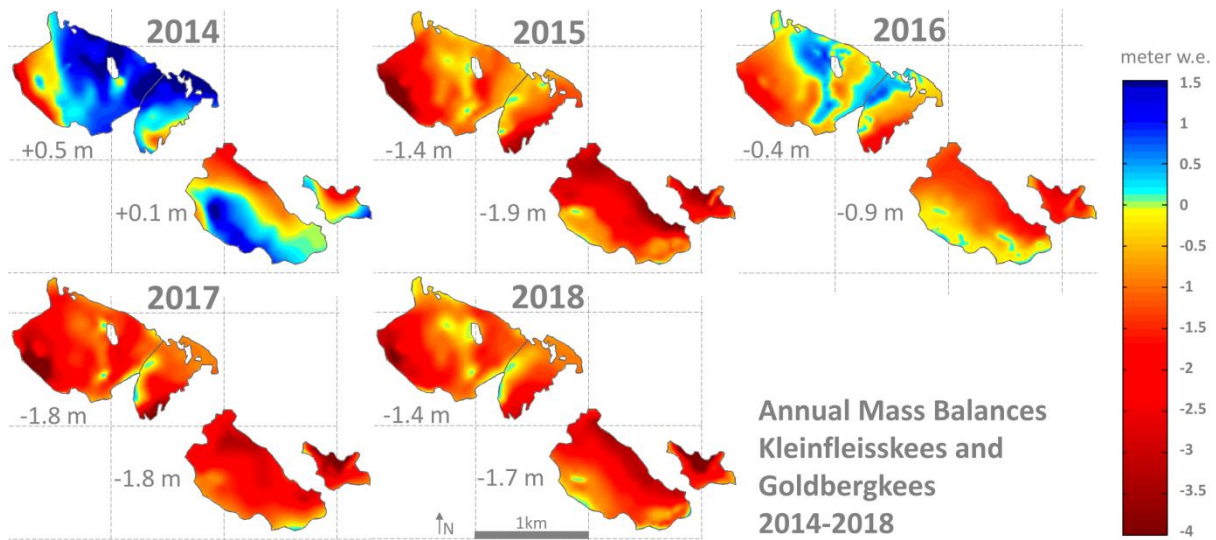
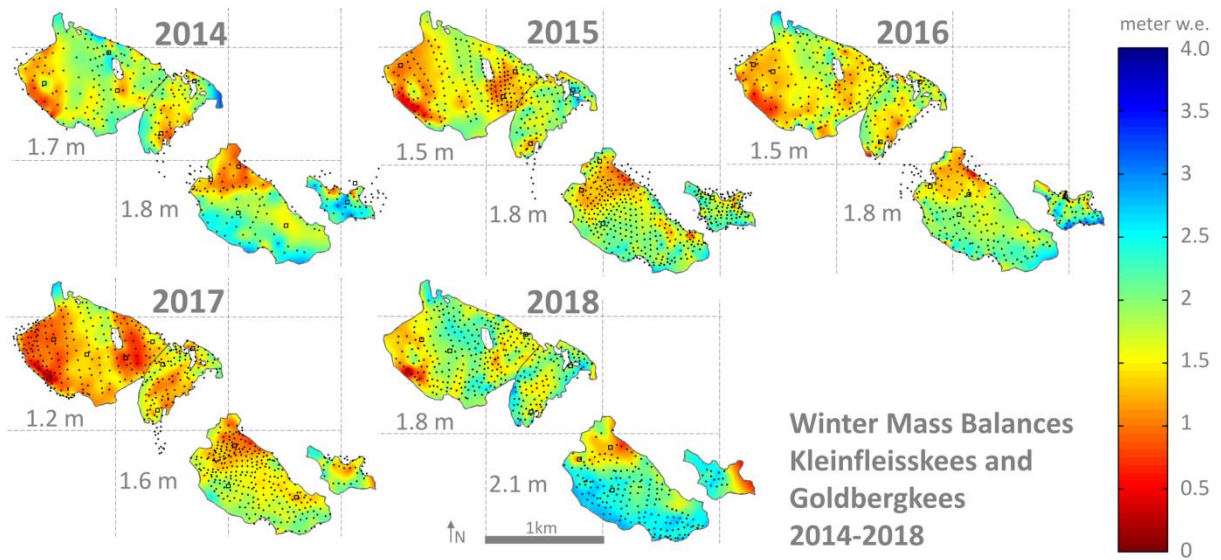


Abbildung: Zusammenhang zwischen Winter- und Jahresbilanz (links) und Sommer- und Jahresbilanz. Man sieht, dass ein Großteil der Variabilität der Massenbilanz im Sommer liegt und der Zuwachs im Winter von untergeordneter Bedeutung für die Massenentwicklung der Gletscher ist.

Abbildung nächste Seite: Oben: Räumliche Verteilung der Wintermassenbilanzen 2014-2018 am Goldbergkees und am Kleinfließkees. Mitte: Räumliche Verteilung der Jahresmassenbilanzen 2014-2018 am Goldbergkees und am Kleinfließkees. Unten: Räumliche Verteilung der Jahresmassenbilanzen 2014-2017 der Pasterze samt Darstellung der Messpunkte. (Die exakte Verteilung von 2018 ist noch in Ausarbeitung).



3.2 Geodätische Aufnahmen und Berechnung von Höhenunterschieden

Zusätzlich zu den jährlichen bzw. saisonalen Messungen der Massenänderung, also des Massenzuwachses bzw. –verlustes an mehreren Punkten der Gletscheroberfläche samt Hochrechnung der Werte auf die gesamte Gletscherfläche werden üblicherweise alle fünf bis 10 Jahre geodätische Aufnahmen der Gletscheroberfläche gemacht, um Volums- und Flächenunterschiede berechnen zu können und die jährlichen Messungen gegebenenfalls mit dieser genaueren Messung zu homogenisieren (gemeinsame Publikation Zemp et al., 2013).

Am Goldbergkees und am Kleinfleißkees wurde die letzte flächendeckende Aufnahme 2009 in Form eines Airborn Laser Scans im Zuge der Landesvermessung durchgeführt. In den letzten Jahren wurden immer wieder einzelne Gletscherteile mittels einer neuen Technologie, bei der low coast Sensoren zum Einsatz kommen („structure from motion Photogrammetrie“) in einem terrestrischen Verfahren aufgenommen. Im August 2018 wurde jedoch unter kombinierter Anwendung von terrestrischen Fotos und einer Drohne die Topographie des Goldbergkeeses und des Kleinfleißkeeses vollständig aufgenommen. Gleichzeitig wurde die Gletscheroberfläche mittels sehr genauem dGPS vermessen. Diese Messungen befinden sich zurzeit in Auswertung, die reinen dGPS-Messungen sind jedoch in nachstehender Abbildung dargestellt, und zwar als Höhenänderungen zur letzten Aufnahme von 2009.

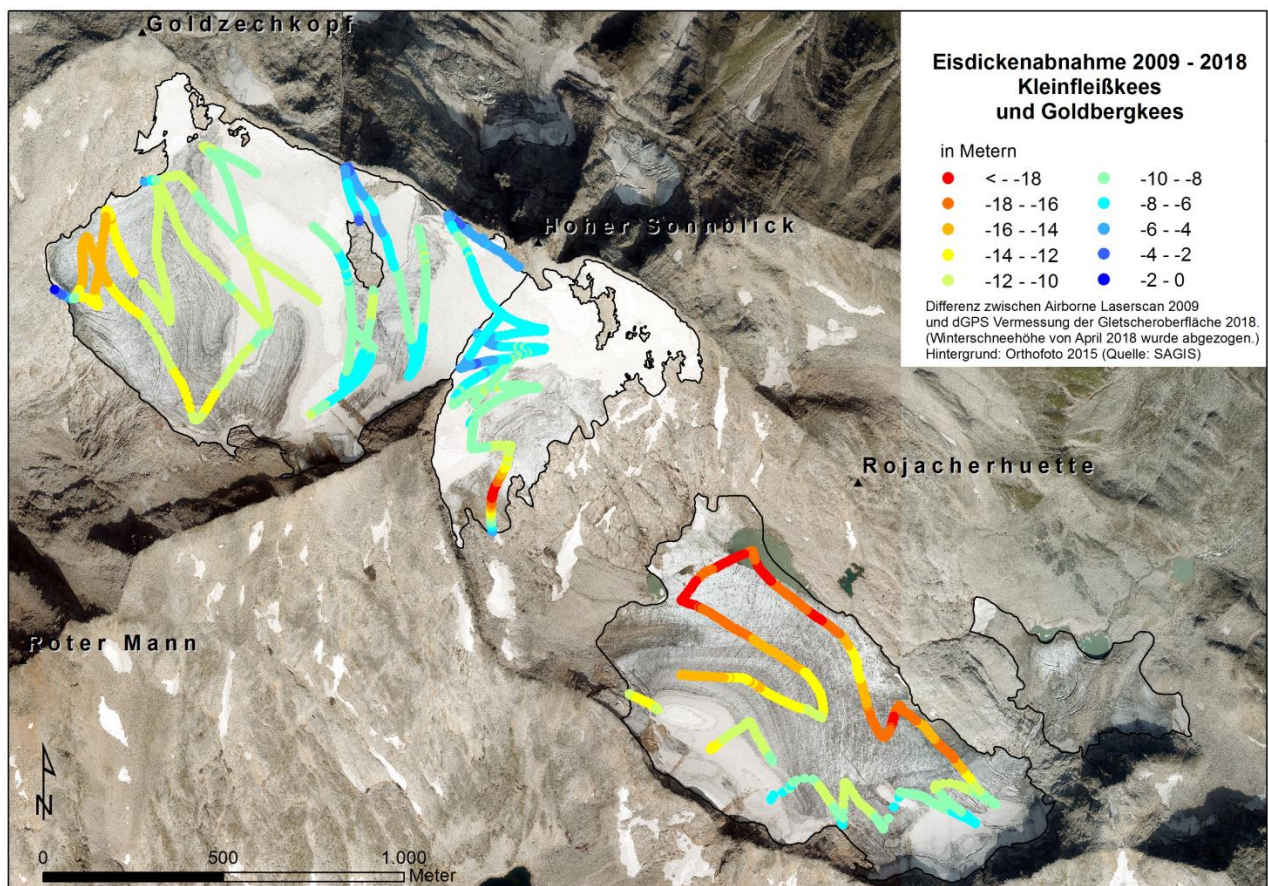


Abbildung: Messung der Eisdickenabnahme des Kleinfleißkeeses und des Goldbergkeeses zwischen 2009 und 2018. Eine Berechnung der flächenhaften Eisdickenänderung ist derzeit noch in Auswertung.

Auch an der Pasterze wird die flächenhafte Messung der Absinkbeträge immer genauer. Für die Messungen 2017 verwendete die ZAMG zusätzlich zur Aufnahme mittels Structure from motion Photogrammetrie in Zusammenarbeit mit dem arktischen Universitätszentrum UNIS und der Firma Snow Scan GmbH erstmalig einen 3D-Laserscanner der österreichischen Firma Riegl Laser Measurement Systems, der speziell für Schnee und Eis optimiert wurde. Damit sind Details bis in den Zentimeterbereich messbar. Durch Vergleichsmessungen von 2015 und 2012 können so die Absinkbeträge an der Pasterzenzunge für die letzten zwei bis fünf Jahre sehr genau berechnet werden.



Abbildung: Die Geländeaufnahme der Pasterzenzunge mittels SFM-Photogrammetrie und Terrestrischem Laser Scan fand am 30 und 31.8. 2017 statt, einer der letzten Schönwettertage 2017, zugleich der Zeitpunkt der maximalen Ausaperung. Von links nach rechts: B.Hynek (ZAMG), L. Bührlé (ZAMG), A. Prokopp (UNIS), A.Neureiter (ZAMG) und D.Zingerle (BOKU).

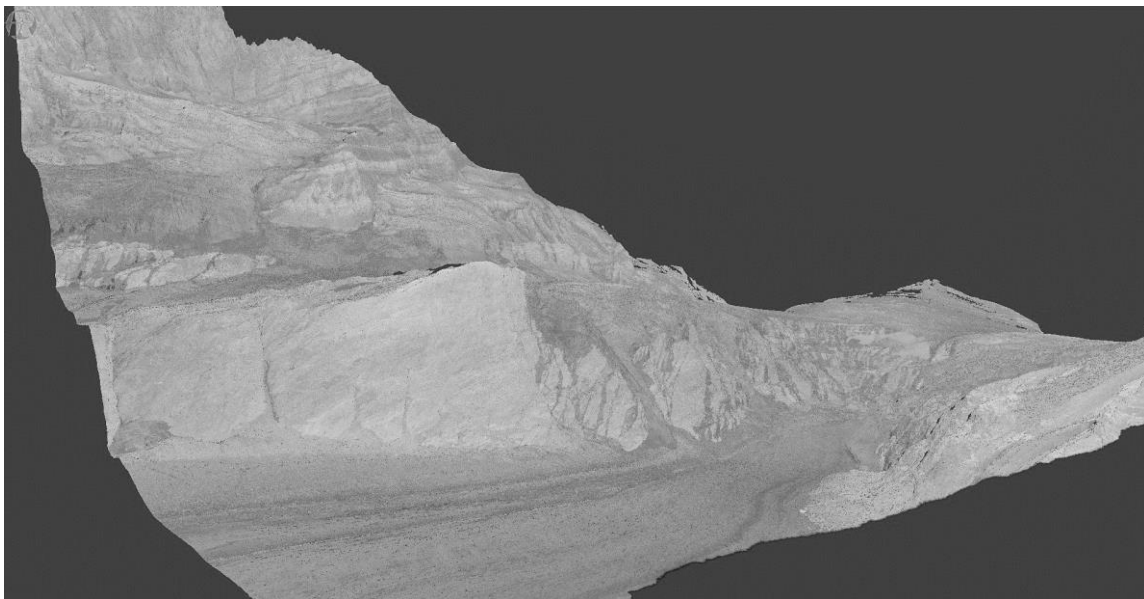


Abbildung: Rohdaten Punktwolke der hinteren Aufnahme der Pasterzenzunge aus dem Laser Scan.

Abbildung nächste Seite oben: Eisdickenänderung der Pasterze in den Zeiträumen zwischen dem Gletscherinventare 1969, 1998 und 2012 und mit einem update bis 2015 für die Gletscherzunge. Diese unabhängige Messung der Volumenänderung bzw. der Massenänderung zeigt eine große Übereinstimmung zu den jährlich direkt gemessenen Abschmelzraten. Auch hier zeigt sich, dass die Eisdickenverluste in den letzten beiden Jahrzehnten extrem waren im Vergleich zu der früheren Periode 1969- 1998. In den Höhenänderungen 2012-2015 zeigen sich die beiden Einsinkgebiete an der orographisch linken Seite der Pasterzenzunge, wo zusätzlich zu den oberflächlichen Abschmelzraten auch noch signifikante basale Abschmelzraten dazukommen, die durch das Eindringen und Unterspülen des Eises von durch die Sonne erwärmten Bächen zustande kommen.

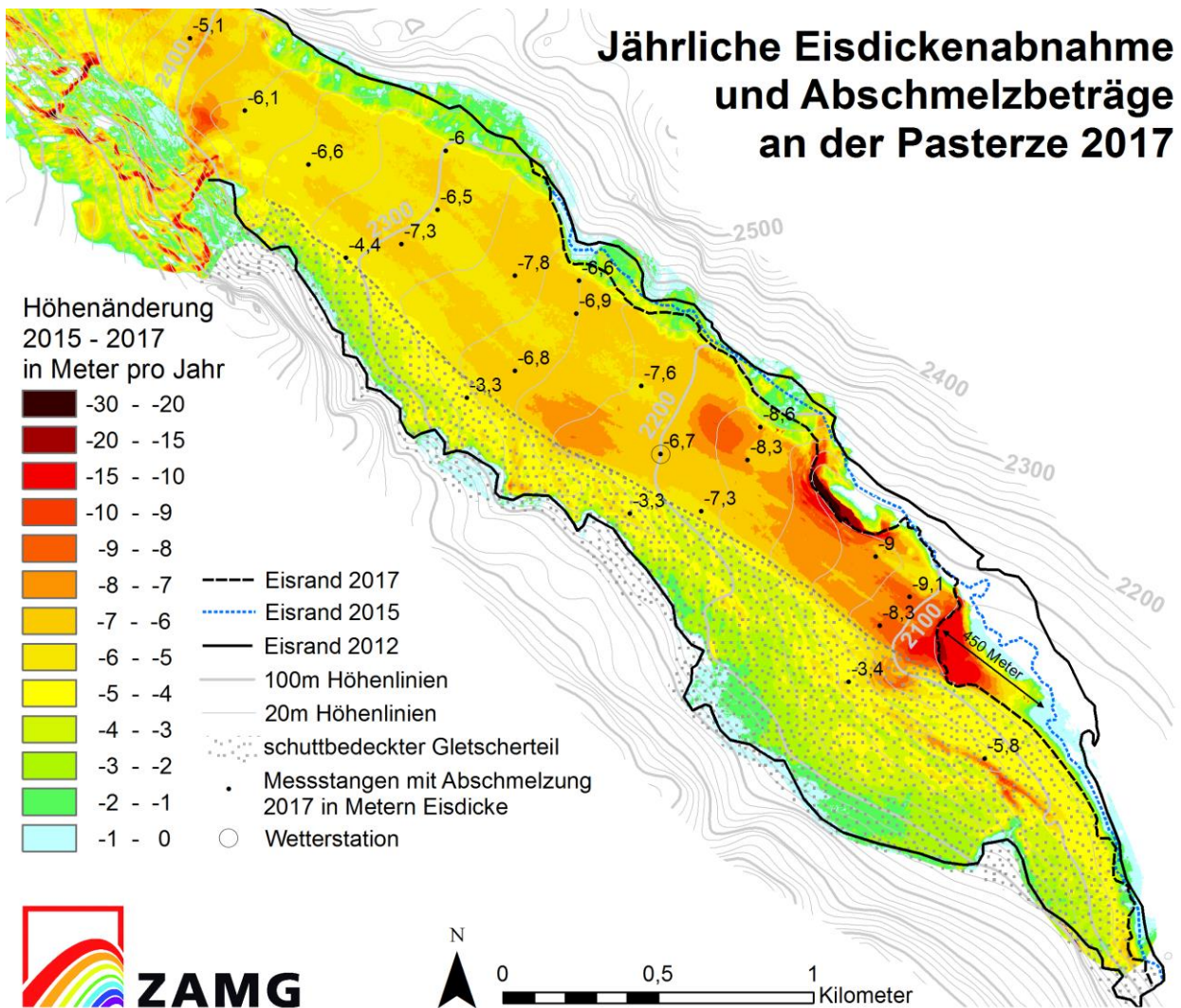
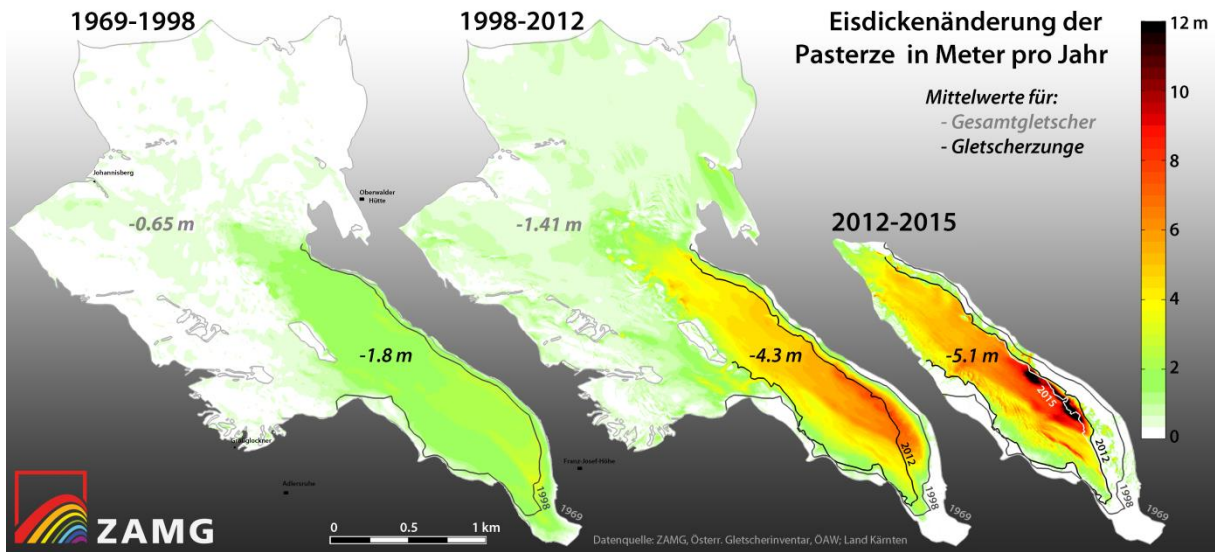


Abbildung: Flächendeckende Analyse der Eisdickenänderung an der Pasterzenzunge 2015-2017 dargestellt in Meter pro Jahr. Mittels terrestrischer Structure from motion - Photogrammetrie wurde 2015 und 2017 jeweils ein Höhenmodell der Pasterzenzunge erstellt und die Höhenänderung der Gletscheroberfläche bestimmt. Zusätzlich sind Abschmelzbeträge an den Ablationspegeln von 2017 und Änderungen der Gletscherfläche eingezeichnet. Datenquelle: ZAMG, KAGIS.



Abbildung: Veränderung der Pasterze innerhalb von zwei Jahren fotografiert von der automatischen Kamera am Freiwanddeck.

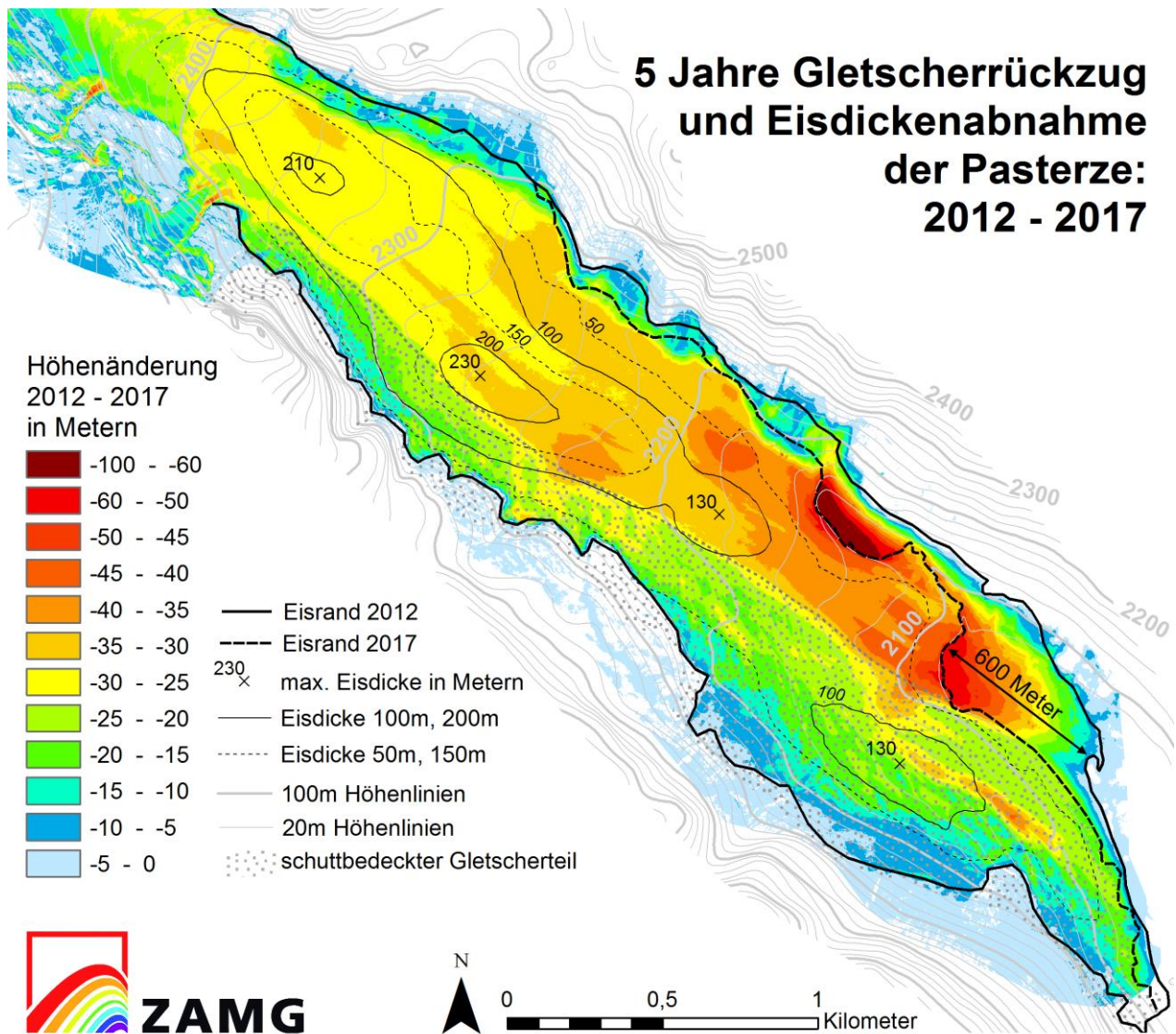


Abbildung: Eisdickenänderung an der Pasterzenzunge in den letzten fünf Jahren (2012-2017): Im Mittel ging die Eisdicke an der Gletscherzunge um 25 Meter zurück. Die Extremwerte liegen bei über 60 Meter Eisdickenverlust in den letzten fünf Jahren. Bei linearer Extrapolation der Abschmelzbeträge in die Zukunft, könnte die gesamte Gletscherzunge der Pasterze in 40 Jahren völlig verschwunden sein. Datenquelle: ZAMG, KAGIS.

4. Aufbau und Erweiterung des Automatischen Messnetzes

Ein Ziel des Projektes war der Aufbau eines weitgehend automatischen Messnetzes, das die Daten erfasst, die zur Berechnung der Massenänderung der Gletscher benötigt werden. Die Strategie bestand darin, die zwei bestehenden Energiebilanzstationen mit einer Datenübertragung auszustatten und zwei zusätzliche Stationen zur Messung der Massenbilanz und Energiebilanz in stündlicher Auflösung zu ermöglichen. Diese Stationen messen die zeitlichen Variationen der Massenbilanz an den Punkten, wo sie stehen. Weiters war das Ziel, möglichst viele automatische Kameras zu installieren, die einen Großteil der Gletscherfläche abdecken sollen und mit denen der Schneebedeckungsgrad der Gletscher in mindestens täglicher Auflösung gemessen werden kann.

Gemeinsam mit mehreren Partnern (photo-webcam.eu, Universität Graz, Grohag und TGM Wien) konnte hier ein hervorragendes Netz von automatischen Kameras von sehr hoher Qualität und Zuverlässigkeit installiert werden, sodass es derzeit auf der Pasterze fünf dieser Webcams gibt und am Sonnblick drei, eine vierte ist in Planung. Alle Kameras arbeiten völlig autark, machen alle zehn Minuten ein Foto, das über Richtfunk weitergeleitet wird und sofort im Netz verfügbar gemacht wird. Die Fotos sind hier zu sehen und in verschiedenen Auflösungen downloadbar: <https://gletscher-zamg.foto-webcam.eu/> Die Errichtung dieses Messnetzes war langwierig und kostenintensiv und wurde aus mehreren Projekten bzw. Institutionen finanziert. Der Link zu den Fotos von 4 Kameras auf der Pasterze (FKK, GLO, BUR und PAS) ist nicht öffentlich, da der Österreichische Alpenverein die Betreuung der Kameras auf seinem Grund als öffentlich zugängliche Webcams mit dem Hinweis auf die Persönlichkeitsrechte der Bergsteiger untersagt hat. Die Kamera am Freiwanddeck ist jedoch auf dem Grund der Agrargenossenschaft Pasterzenalpe, die einen Betrieb als Webcam nicht untersagt hat. Die Wartungskosten der automatischen Kameras, sowie Kosten der Datenübertragung wurde bis jetzt von der ZAMG getragen.

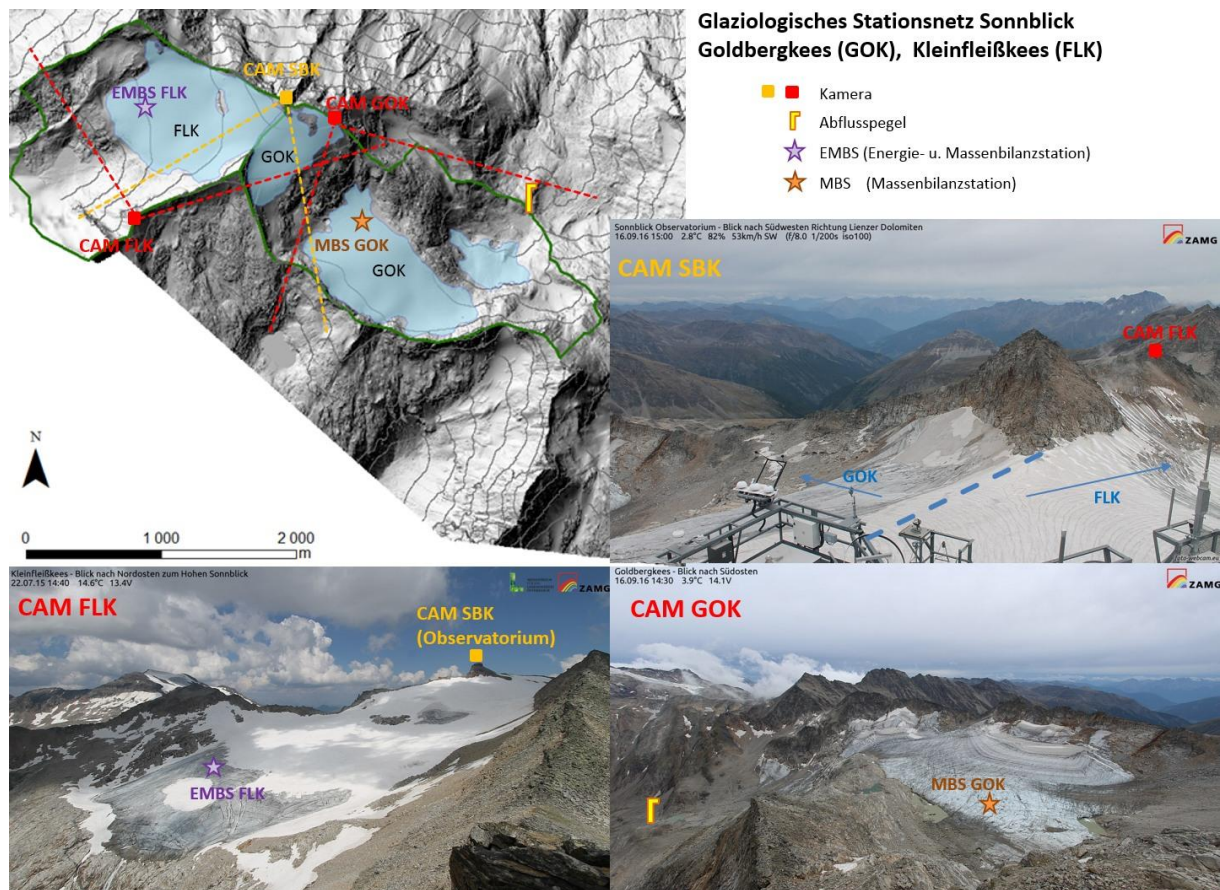


Abbildung vorige Seite: Skizze des Stationsnetzwerkes auf den Gletschern Goldbergkees (GOK) und Kleinfleißkees (FLK). Es gibt dort mittlerweile 3 hochqualitative Webcams, eine Energie- und Massenbilanzstation am FLK und eine Massenbilanzstation am GOK.

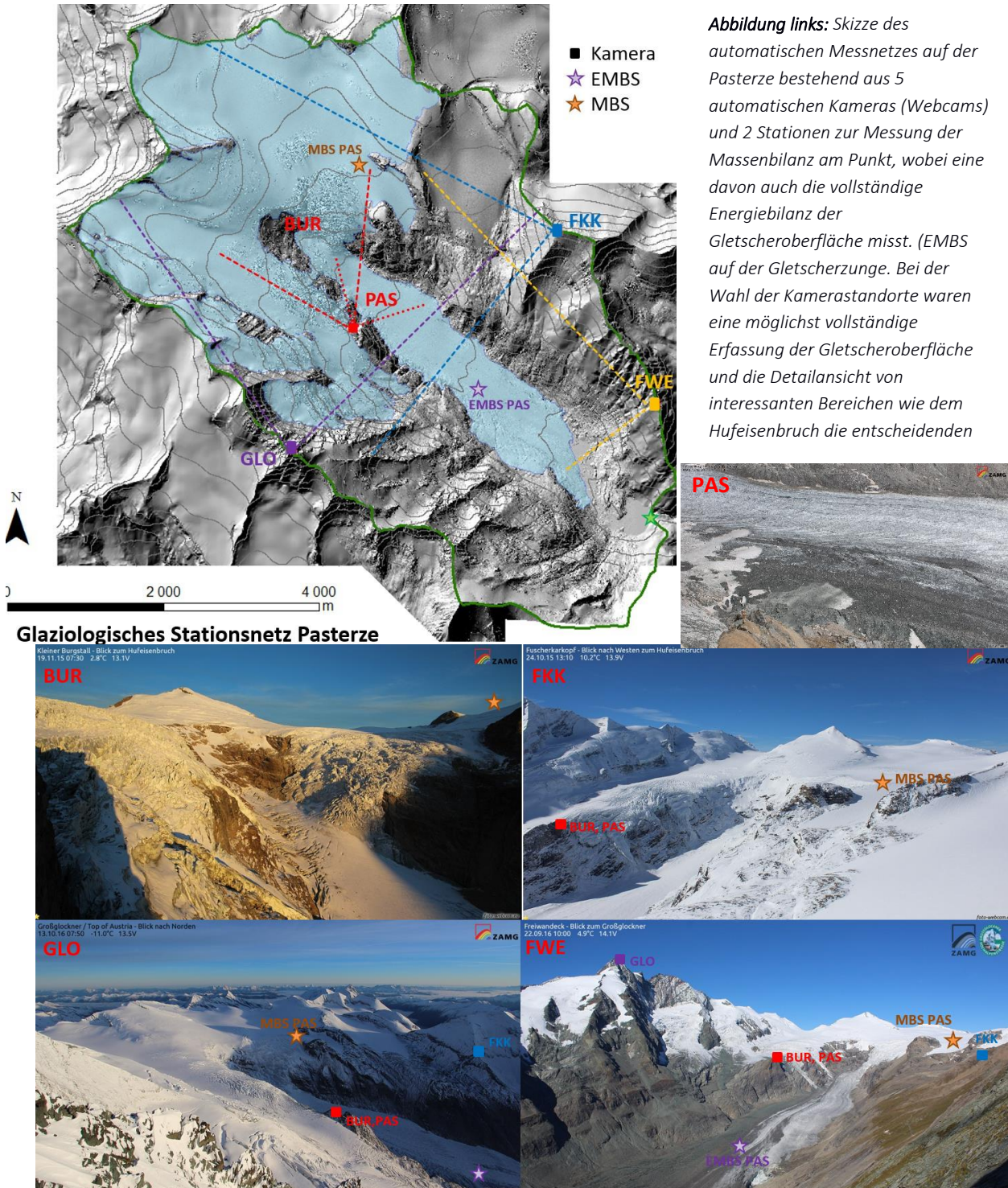


Abbildung: Blickwinkel der 5 automatischen Webcams. In die jeweiligen Fotos ist die Lage der anderen Stationen eingezeichnet.



Abbildung: Fotos der Energie- und Massenbilanzstationen (EMBS, oben links: FLK, oben rechts: PAS) und der Massenbilanzstationen (MBS, unten links: PAS oberer Boden, GOK). An allen 4 Stationen werden die Schneehöhe mittels Ultraschall und die Eisablation mit einem im Eis eingebohren Drucksensor, der mit einem Wasserschlauch mit der Station verbunden ist, gemessen. An den Energiebilanzstationen wird zusätzlich die gesamte Meteorologie gemessen, sodass der Energieaustausch an der Grenzschicht zwischen Atmosphäre und Gletscheroberfläche berechnet werden kann.



Abbildungen: Oben: Die autarke Webcam am Freiwanddeck (Pasterze) bestehend aus Solarpanel, Richtfunkantenne, Kameragehäuse mit Kamera und Steuerung und Schaltschrank mit Laderegler und Akku. **Unten:** Fotos von der Montage der höchstgelegenen automatischen Kamera Österreichs, ca. 50m unterhalb des Gipfels des Großglockners.



5. Gletschermonitoring durch Automatische Kameras

Die im Zeitraum 2014-2016 installierten hochqualitativen Webcams am Sonnblick und am Großglockner liefern einen umfangreichen Foto-Datensatz, der für unterschiedlichste Fragestellungen Material liefert, das erst nach und nach ausgewertet werden kann, da auch teilweise die Methodik zur Bildauswertung erst entwickelt werden muss. Vorläufig kann man sagen, dass durch das Netzwerk an automatischen Kameras das Gletschermonitoring auf den drei Gletschern auf eine neue Qualitätsstufe gehoben wurde, da vor allem die räumliche Verteilung der Massenbilanz nun wirklich gemessen wird und somit weniger Spielraum für Interpretationen lässt. Die ersten drei bis fünf Jahre an Daten zeigen bereits, dass dieser Bilddatensatz umso wertvoller wird, je länger er wird, da hier auch der Rückgang der Gletscher in einer für die Öffentlichkeit unmittelbar erfahrbare und anschauliche Weise dokumentiert werden kann, z.B. durch Zeitraffer-Animationen aus den Bildern. Nachfolgend soll ein Überblick gegeben werden, zu welchen Fragestellungen das Bildmaterial ausgewertet werden kann bzw. schon ausgewertet wurde:

1. Monitoring des Schneebedeckungsgrades (Modellvalidierung, räumliche Verteilung der Massenbilanz, Möglichkeit der Rückberechnung der Winterakkumulation)
2. Berechnung von Fließgeschwindigkeiten mittels feature-tracking
3. Bildhafte Darstellung der generellen Gletscherrückzugs (Vergleichsfotos)
4. Darstellung der Gletscheroberflächenveränderung (Genese von Spaltenzonen und Einbrüchen, Schmelzwasserseen, Zunahme der Schuttbedeckung etc.)
5. Darstellung des Gletscherfließens (z.B. Animationen des Hufeisenbruches)
6. Monitoring von peri- oder proglazialen Phänomenen wie z.B. dem Gletschersee Goldbergkees und seinen Ausbrüchen.
7. Sichtbarmachen von Lawinen und anderen räumlich stark variablen Akkumulationsprozessen.



Abbildung: Übersicht über die derzeit in Betrieb stehenden acht automatischen Kameras auf den Gletschern Goldbergkees, Kleinfleißkees und Pasterze. Link zu den Fotos: <https://gletscher-zamq.foto-webcam.eu/> bzw. www.glacio-live.at/webcams

Abbildung nächste Seite: Fotos des Kleinfleißkees (im Hintergrund das Sonnblick-Observatorium) am jeweiligen Ende des Sommers (2014-2018) bei minimaler Schneebedeckung. Sehr schön sichtbar die vollständige Ausaperung des Gletschers in den Sommern 2015, 2017 und 2018 mit einer Akkumulationsfläche kleiner 1% (alle noch verbliebenen weißen Flächen sind Firn aus den Vorjahren), die positive Massenbilanz 2014 mit ca. 78% Akkumulationsfläche und die durchschnittlich negative Massenbilanz 2016 mit einem Anteil der Akkumulationsfläche von 33% an der Gesamtgletscherfläche.





Abbildung: Maximale Ausaperung des Goldbergkeeses in den Jahren 2016-2018. Die Kamera am Goldbergkees konnte im August 2016 installiert werden. In den Jahren 2015, 2017 und 2018 aperte das Goldbergkees fast vollständig aus (1% Akkumulationsfläche), 2016 war die Ausaperung etwas geringer mit 10% Akkumulationsfläche und 90% Ablationsfläche.



Abbildung: Maximale Ausdehnung des oberen Pasterzenbodens in den Jahren 2016-2018 aufgenommen von der automatischen Kamera direkt unter dem Gipfel des Großglockners, die im Oktober 2015 installiert wurde. Die Akkumulationsflächen waren 2017 am geringsten, etwas größer 2018 und am größten 2016. Folglich waren auch die Gesamtmassenverluste des Gletschers 2017 am größten und 2016 am geringsten. Die Kamera ist eine große Hilfe bei der Kartierung von Akkumulations- und Ablationsflächen am oberen Pasterzenboden und erhöht somit auch signifikant die Genauigkeit der Berechnung der Gesamtmassenänderung der Pasterze.

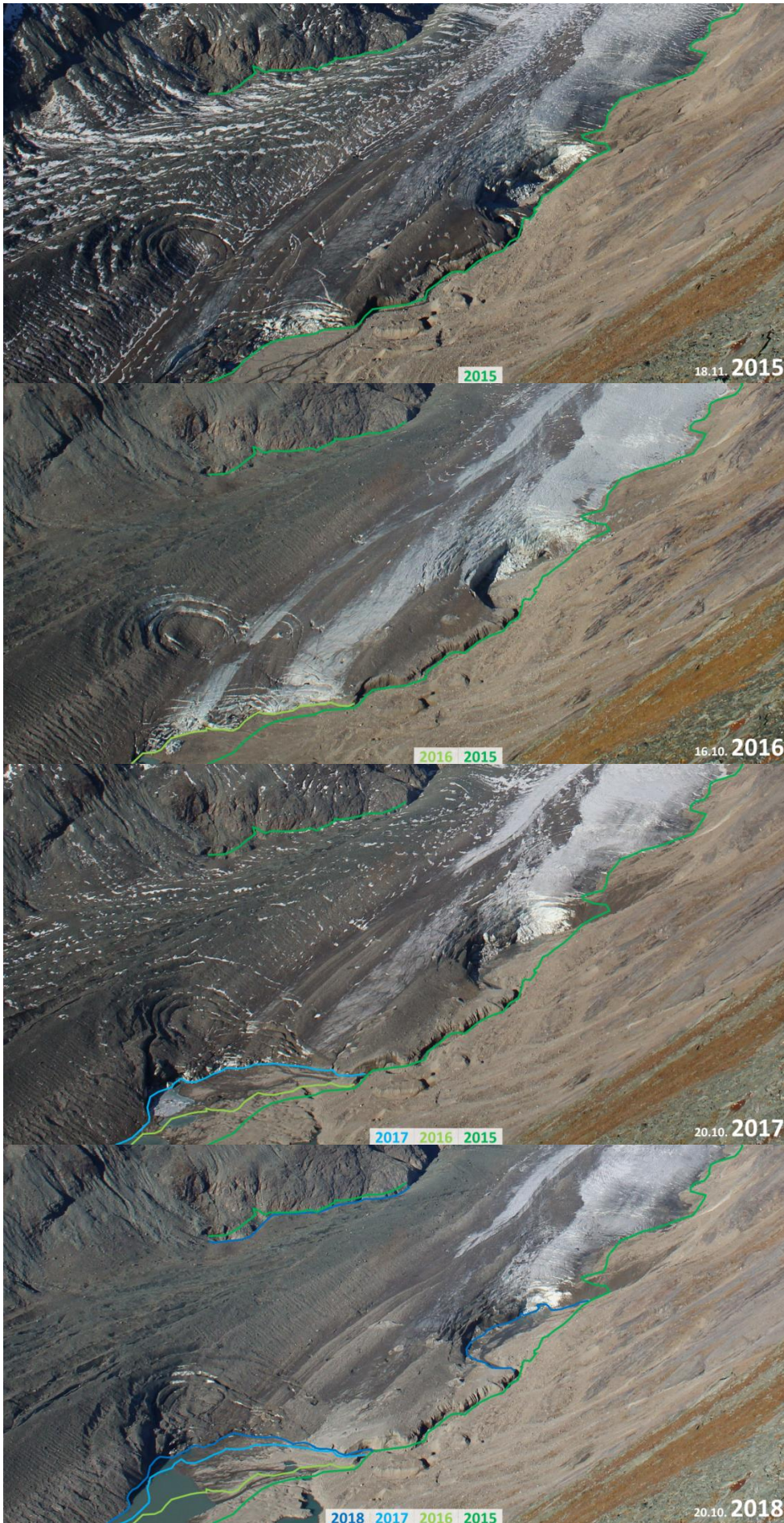
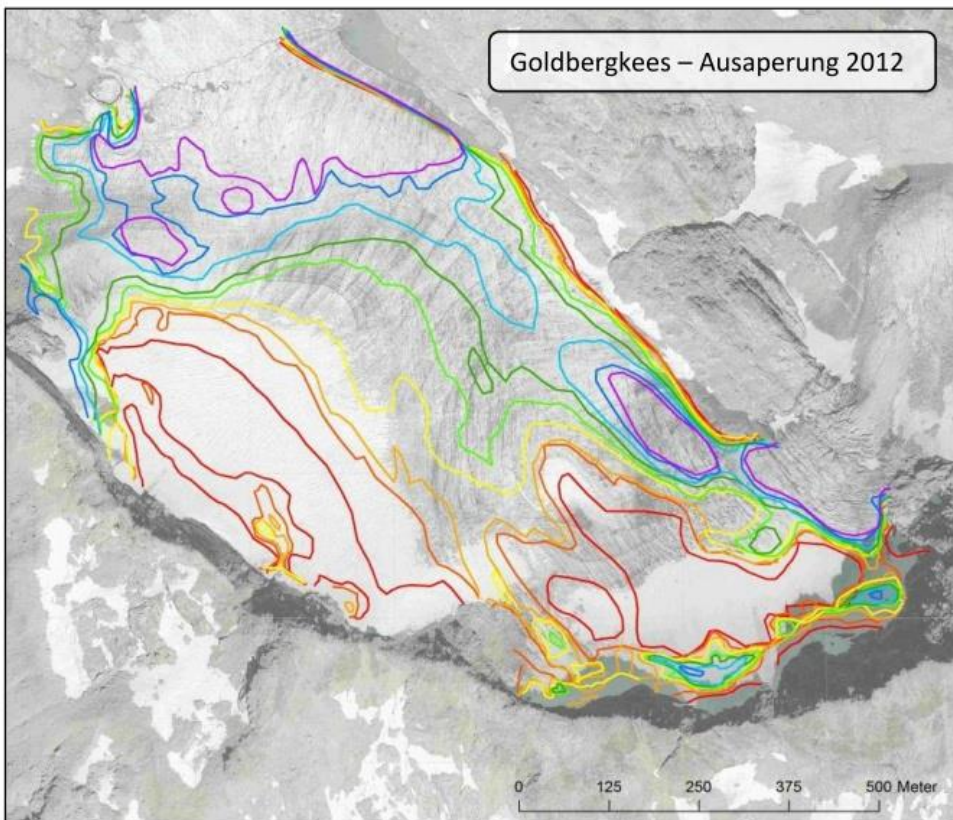
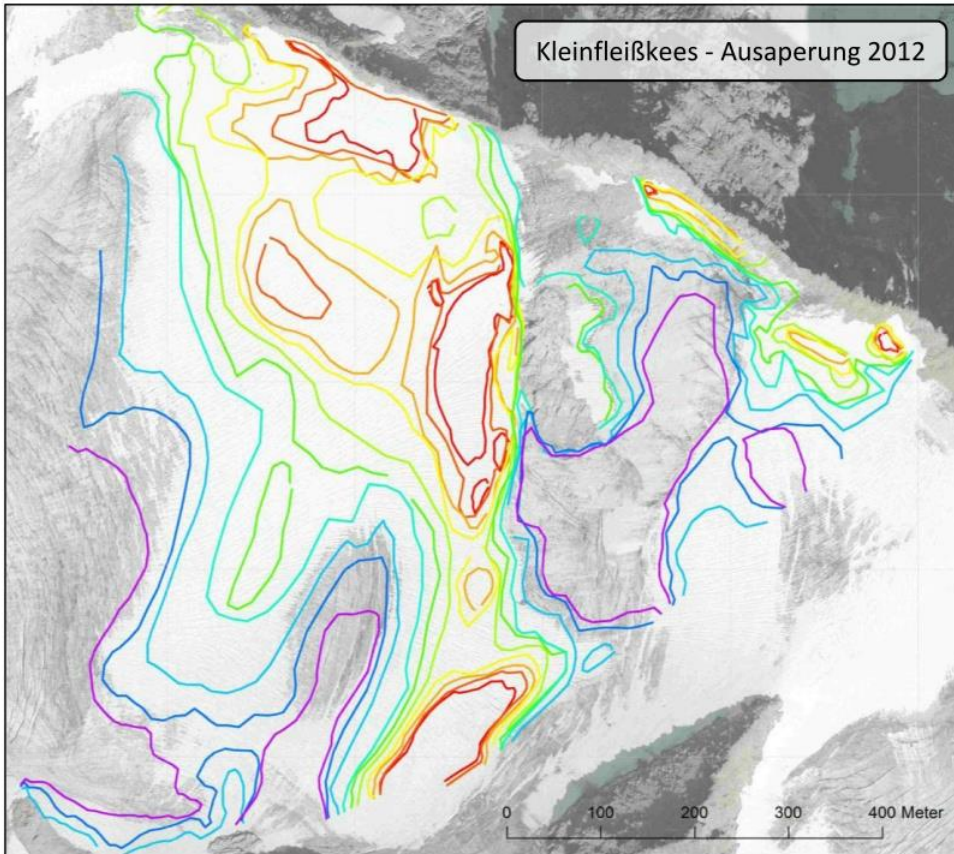
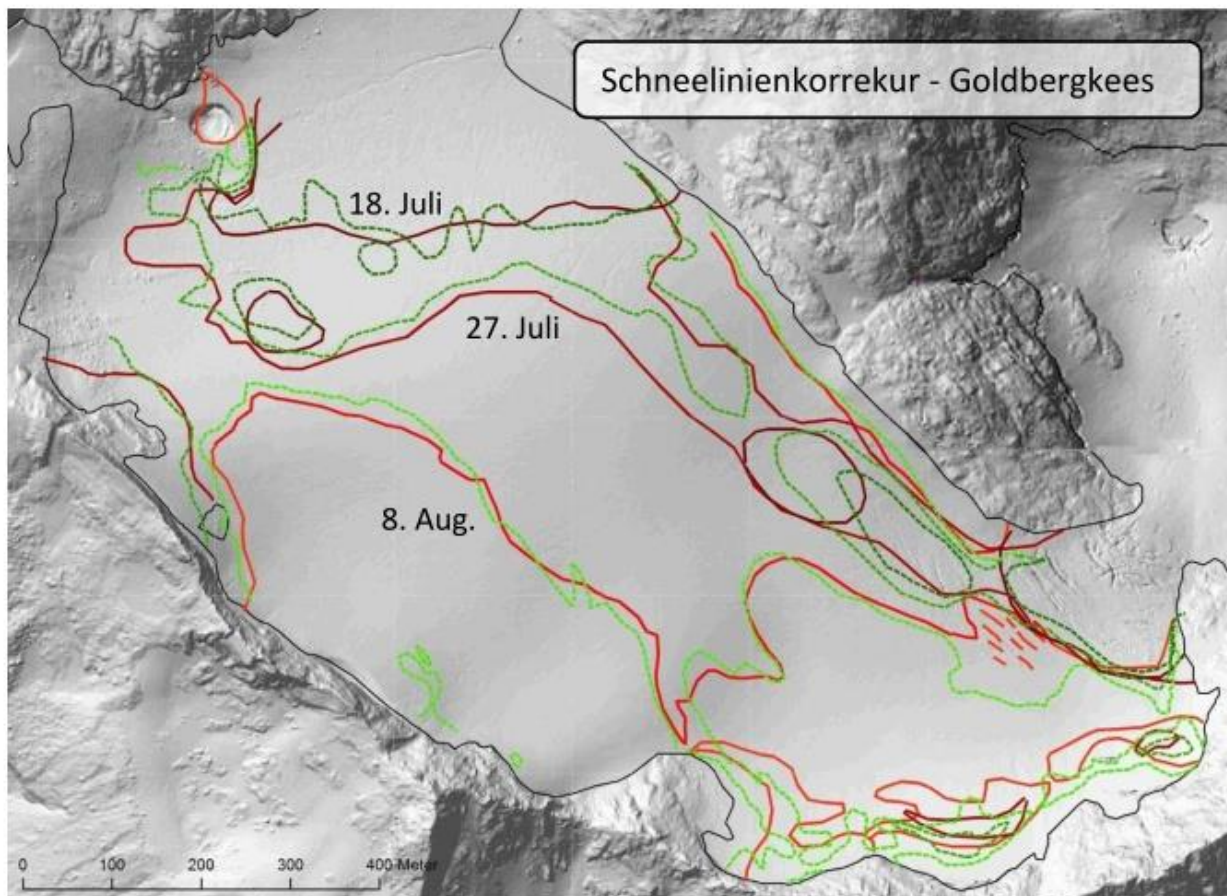
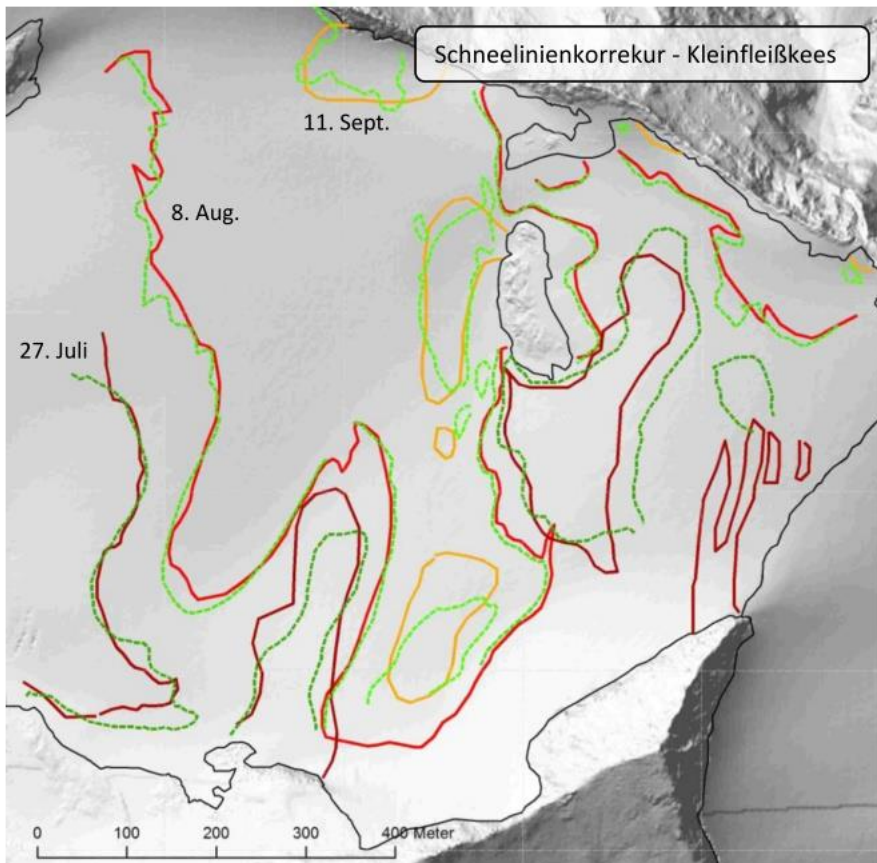


Abbildung: Veränderung der Pasterze innerhalb von 3 Jahren (2015-2018):

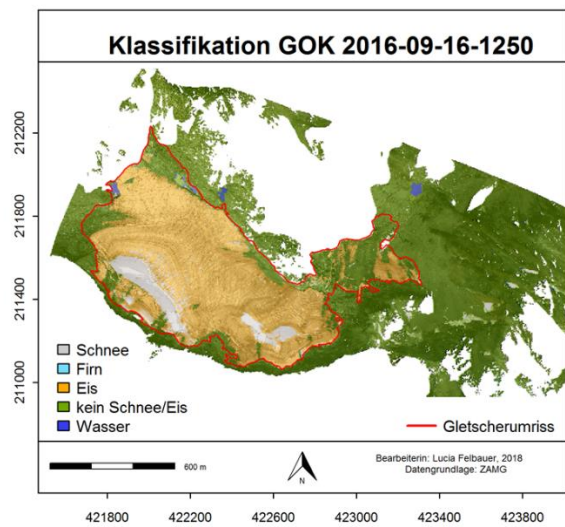
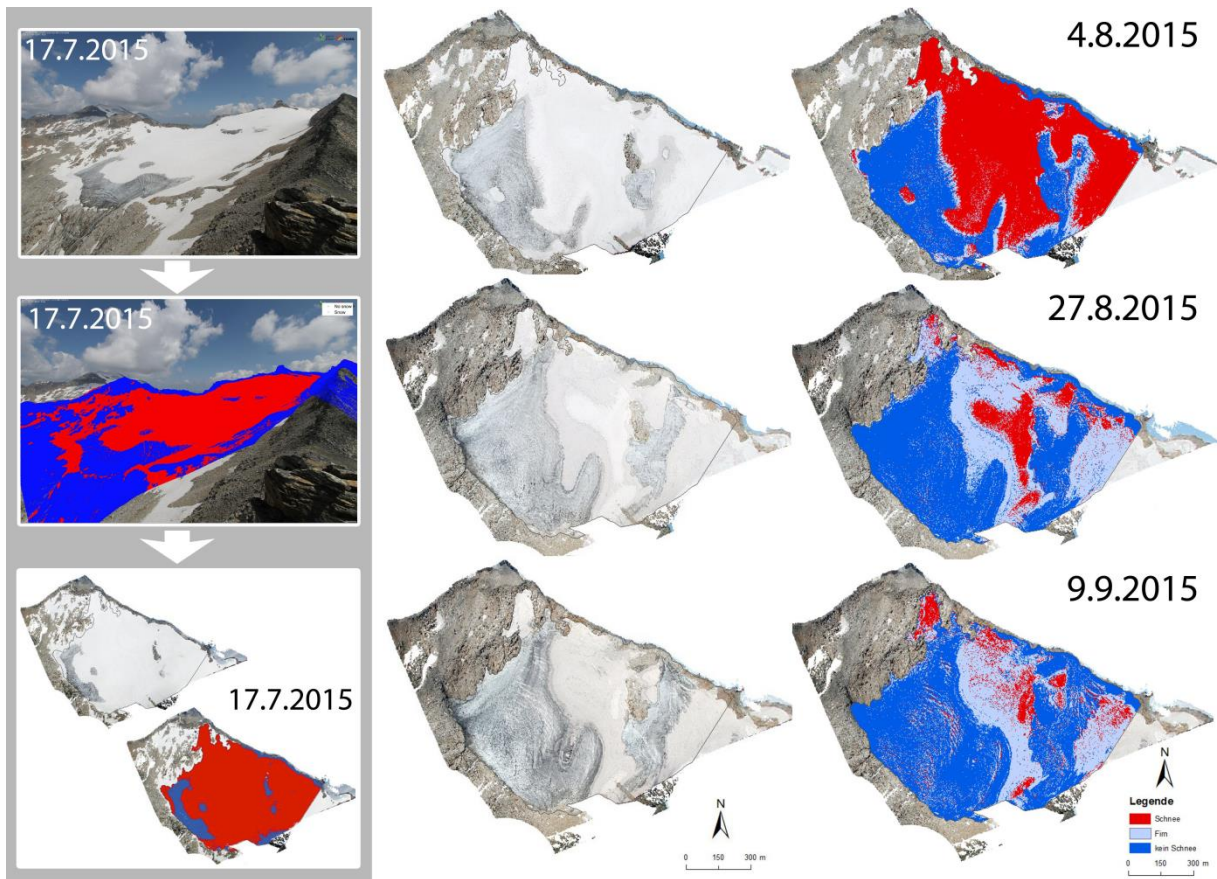
Die Ausschnitte aus den Fotos der Kamera am Freiwanddeck jeweils nach Ende des Sommers zeigen den Rückgang der Eisfläche in nur drei Jahren. Im weitgehend schuttfreien, orographisch linken Teil der Gletscherzunge verliert der Gletscher pro Jahr ca. 10 Meter an Höhe, in den von den Fotos abgedeckten Zeitraum gibt es hier also einen Höhenverlust von über 30 Metern! Kommen zusätzlich noch subglaziale Schmelzprozesse hinzu sind die Eisdickenverluste sogar deutlich höher. Daraus ergibt sich ein rasanter Rückzug des Gletschers von mehr als 100 Metern pro Jahr in diesem Bereich. Der schuttbedeckte Bereich des Gletschers (in den Bildern links vorne) sind die Absinkbeträge geringer, daher ist auch die Längenänderung geringer. Im Laufe dieses Rückzugs entstehen immer wieder neue Spaltenzonen, die den Zerfallsprozess der Pasterze sichtbar machen und auch beschleunigen.



Abbildungen: Schneelinienkartierung von verschiedenen Zeitpunkten der Ablationsperiode 2012 am Kleinleißkees (FLK, oben) und am Goldbergkees (GOK, unten) anhand von Bildern von automatischen Low Cost Kameras. Ergebnisse aus der Masterarbeit von S. Jaraus (2016).

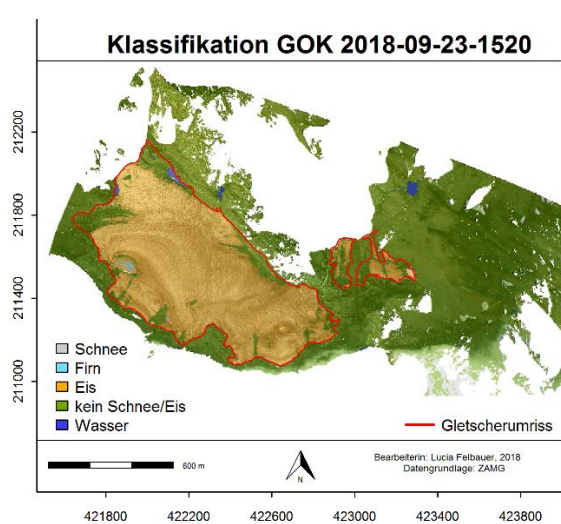
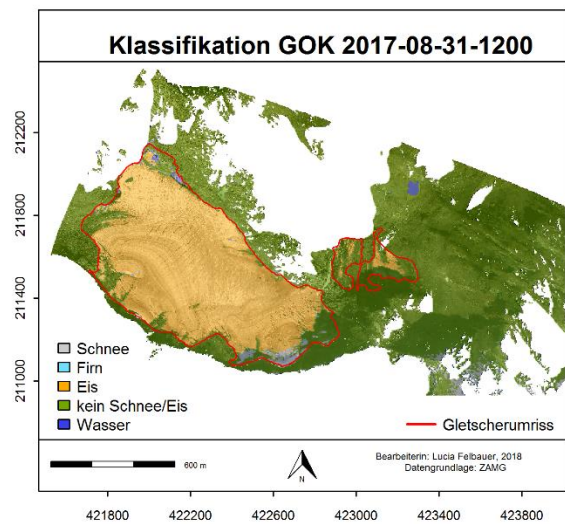


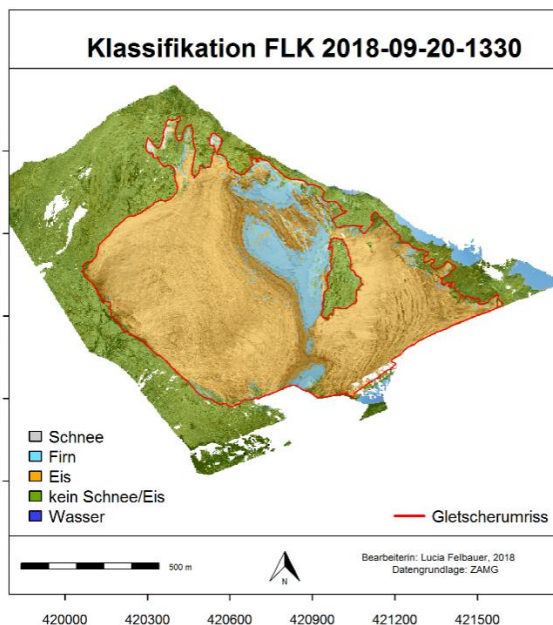
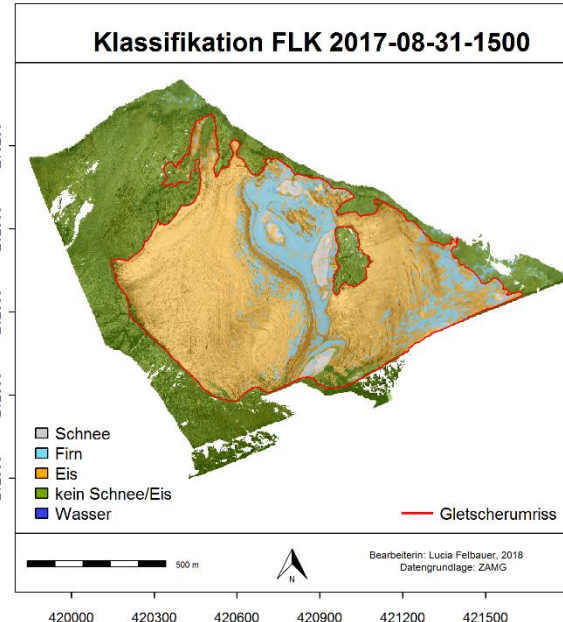
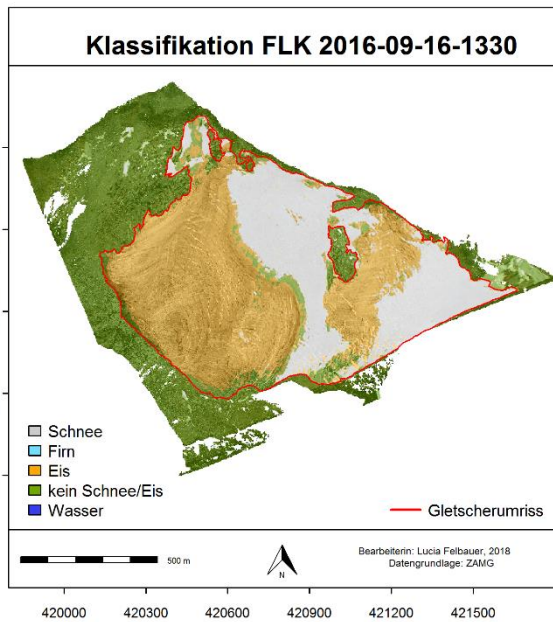
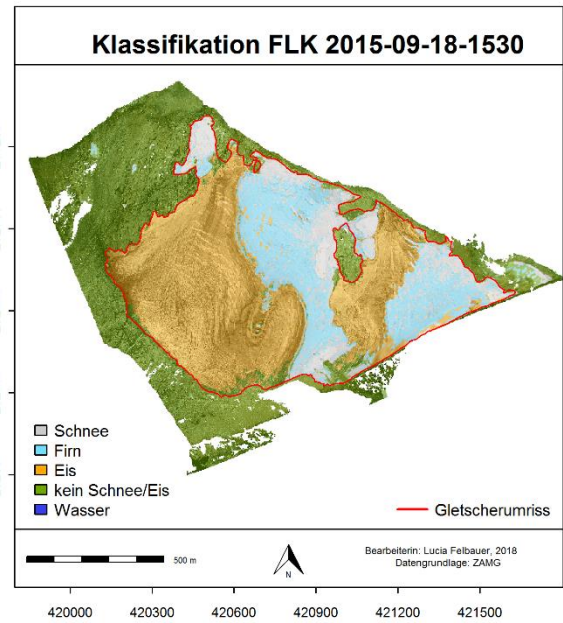
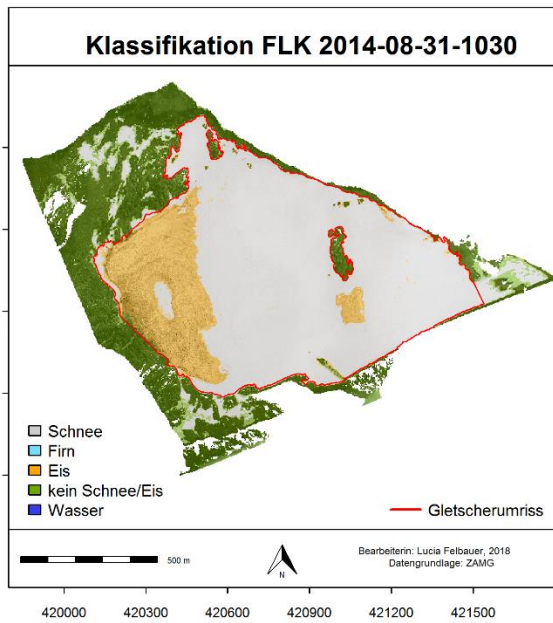
Abbildungen: Schneelinienkartierung der Ausaperung 2012 am Kleinleißkees (FLK, oben) und am Goldbergkees (GOK, unten) anhand von Bildern von automatischen Low Cost Kameras (rot-orange) und Vergleich von tatsächlichen Schneelinien mit GNSS aufgenommen (grün). Ergebnisse aus der Masterarbeit von S. Jarausich (2016).



Abbildungen oben: Georeferenzierung von Gegenhangfotos der Webcam am Kleinfleißkees und Oberflächenklassifikation in die Klassen Schnee/ Firn/ Eis vom Sommer 2015. Ergebnisse aus der Masterarbeit von I. Rojs (2016) unter Verwendung der matlab-Software practise (Härer et al., 2016).

Abbildungen links und unten: Georeferenzierung und automatische Oberflächenklassifikation von Fotos der maximalen Ausaperung des Goldbergkees in den Jahren 2016-2018 berechnet mit einer neu entwickelten Methode zur Oberflächenklassifikation..





Abbildungen: Georeferenzierung und automatische Oberflächenklassifikation von Fotos der maximalen Ausdehnung des Kleinfleißkeeses in den Jahren 2014-2018. Obwohl die automatische Oberflächenklassifizierung noch Fehler beinhaltet sind die großen Unterschiede in den Haushaltsjahren 2014-2018 sehr gut sichtbar. Im einzigen Jahr mit positiver Massenbilanz 2014 hat das Kleinfleißkeeses auch gegen Ende des Haushaltsjahres an mehr als 75% der Oberflächen noch Winterschnee liegen, während in den extrem negativen Jahren 2015, 2017 und 2018 sehr wenig bis gar keine Fläche mit Schnee bedeckt ist.

Goldbergkees - Blick nach Südosten
25.08.16 09:40 12.0°C 13.4V

25.08.2016



25.08.2016



26.08.2016



Abbildung: Proglazialer See Goldbergkees, Aufnahmen der automatischen Kamera Goldbergkees. Von 25.8.2016 (Oben und Detail Mitte) und einen Tag später (Detailaufnahme unten). Der durch das Eis aufgestaute Gletschersee hat sich in der Nacht einen Weg durch das Eis gefunden. Die vom Eis aufgestaute Wassermenge stellt durchaus ein Gefährdungspotential für die flussabwärts liegende Infrastruktur dar.



Abbildung: Proglazialer See Goldbergkees, Aufnahmen der automatischen Kamera Goldbergkees von 22.5.-15.06.2016. Man sieht hier das Anwachsen des Sees während der Schneeschmelze bis zum 14. Juni. In der Nacht auf 15. Juni fließt der See ab und wird sich nach diesem Ereignis nicht wieder füllen. Offensichtlich wurde durch die beiden Ausbrüche ein Abflusskanal erzeugt, der weiterhin besteht.

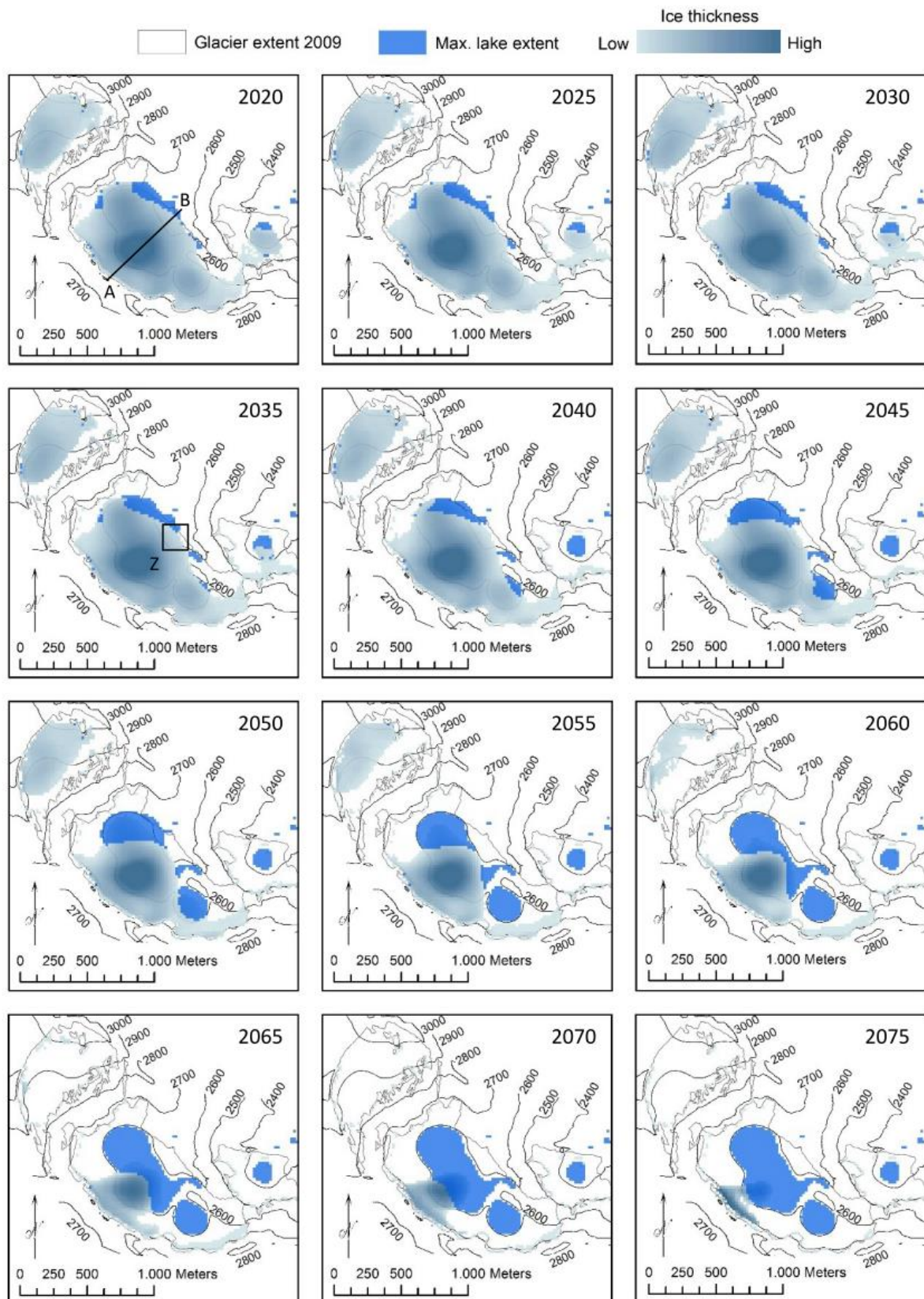


Abbildung: Zeitliche Entwicklung des maximal möglichen Seeausmaßes für die Jahre 2020 bis 2075, basierend auf Daten aus dem Gletschermonitoring: Oberflächentopographien, Eisdickendaten und der modellierten zukünftigen Gletscherentwicklung basierend auf dem Klimaszenario A1B. Ergebnis aus der Masterarbeit von M. Glanz (2017)

6. Energiebilanzmonitoring

6.1 EMBS Kleinfleißkees

Die Energie- und Massenbilanz-Station (EMBS) Kleinfleißkees wurde am 15.01.2011 in Betrieb genommen. An diesem Standort werden Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Schneehöhe und die Strahlungsbilanz gemessen. Die Messung der Strahlungsbilanz umfasst ankommende und reflektierte kurzwellige Strahlung und auf- und abwärts gerichtete langwellige Strahlung. Zusätzlich befindet sich noch ein Messgerät zur Ermittlung der Neigung am Mastarm an dem das Messgerät für die Erfassung der Strahlung montiert ist. Seit Sommer 2016 wird auch die Eisablation automatisch erfasst. Für die Stromversorgung steht ein Solarpanel zur Verfügung, das die über Tags gewonnene Energie in einer Batterie (befindet sich im wasserdichten Schaltschrank) speichert. Die Daten werden in einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten gespeichert. Die Messungen der Strahlung werden zusätzlich noch in Minutenaufösung im Speicher abgelegt. Weiter befindet sich im Schaltschrank ein Datenlogger der die gewonnenen Daten speichert. Die Datenübertragung erfolgt über GSM.

Wegen dem hohen Wartungsaufwandes nahe des Akkumulationsgebietes, wurde die Station am 3.4. 12. 2013 weiter ins Ablationsgebiet verlegt. Anfang 2014 wurde die Speicherkarte überschrieben, was zu einem Datenverlust der 10 Minutendaten von fünf Monaten führte. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden nur die Stundendaten mittels GSM übertragen. Dies diente vor allem als Funktionskontrolle der Station. Dieses Ereignis veranlasste uns die Datenspeicherung und Übertragung zu überdenken, was dann auf alle Stationen in weiterer Folge übertragen wurde. Seit 2014 werden die 10 Minuten Daten via GSM übertragen und der Speicher wurde so erweitert, dass ein ganzes Jahr darauf abgelegt werden kann ohne überschrieben zu werden. Das restliche Jahr lief die Station problemlos. Da es bei der Stationsausführung mit einem eingebohrten Mast immer wieder zu Problemen mit der Neigung kam, wurde die Station am 31.07.2015 abgebaut und auf einem Stativ neu aufgebaut. Auf diesem Wege wurde die Station neuerlich verlegt. Im Zuge von Wartungsarbeiten wurde 09.08.2016 der automatische Ablationssensor ins Eis eingebohrt und der Ausgleichsbehälter am Mast montiert und mit dem Schaltschrank verbunden. Bei Wartungsarbeiten am 25.07.2017 wurde ein gebrochenes Gelenk beim Stativ entdeckt und es wurde vorsorglich die Station umgelegt und außer Betrieb genommen. Es wurden die Sensoren mitgenommen und am Sonnblick-Observatorium verwahrt. Am 17./18. 08.2017 wurde die Station wieder aufgestellt. Somit kam es zu einem dreiwöchigen Datenausfall. Nach Schneefällen wurde das Solarpaneel ab dem 27. 03.2018 zugeschnitten, nach 7 Tagen wurde die Stromzufuhr zu allen Verbrauchern vom Laderegler automatisch unterbrochen um den Akku nicht völlig zu entladen. Am 24.04.2018 wurde im Rahmen des Gletscherpraktikums die EMBS Kleinfleißkees auf ein neues Stativ gestellt, da das alte Stativ über die Jahre vom Schneedruck deformiert wurde. Für die Messung der Schneehöhe wurde ein weiteres temporäres Stativ ins Eis eingebohrt und der Sensor mit dem Logger verbunden. Der Ausgleichsbehälter vom Ablationssensor wurde bis zum Sommer am alten Stativ belassen, die Sensorkabel wurden verlängert und am Datenlogger angeschlossen. Es kam zu einem zweiwöchigen Datenausfall. Am 21.08.2018 wurde das alte und defekte Material der ehemaligen Station abtransportiert. Die nachfolgende Tabelle des Wartungsprotokolls zeigt wie aufwändig ein möglichst störungsfreier Betrieb einer derartigen Messstation auf dem Gletschereis ist. Insgesamt wurde die Station Kleinfleißkees 25 Mal für Wartungen besucht. In weiterer Folge zeigen die Abbildungen die wichtigsten Arbeiten an der Station und beispielhaft die graphische Aufbereitung der Stationsdaten aus dem Haushaltsjahr 2016/17. Die Abschließende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf während der Projektlaufzeit.

Tabelle: Wartungsprotokoll der Station Kleinfleißkees ab dem Jahr 2014.

Kleinfleißkees

Wartungsprotokoll AWS

Datum, Uhrzeit	Person	Schneehöhe [cm]	Änderung Messniveau	Distanz US vorher [cm]	Distanz US nachher [cm]	Schlauch im Eis [cm]	Pegel im Eis [cm]	Höhe UK Ausgleichsbehälter [cm]	Sensor- tausch	Kommentar	Aktiv	
19.09.2018 09:45 - 19.09.2018 09:55	Gernot Weyss	0	NEIN	434					NEIN	JA	JA	Link
21.08.2018 06:25 - 21.08.2018 11:45	Gernot Weyss	0	JA	0	428				JA	JA	JA	Link
25.04.2018 09:00 - 25.04.2018 11:00	Gernot Weyss	305	JA		93				NEIN	JA	JA	Link
24.04.2018 09:00 - 24.04.2018 15:50	Gernot Weyss	305	NEIN	96					NEIN	JA	JA	Link
24.04.2018 13:00 - 24.04.2018 20:00	Gernot Weyss		NEIN						NEIN	NEIN	NEIN	Link
05.04.2018 08:33 - 05.04.2018 08:38	Anderer Mitarbeiter (siehe Bemerkung)		NEIN	68					NEIN	JA	JA	Link
28.02.2018 12:30 - 28.02.2018 13:40	Gernot Weyss	285	JA	150	166				NEIN	JA	JA	Link
19.10.2017 10:50 - 19.10.2017 14:12	Gernot Weyss	54	JA	344	431				NEIN	JA	JA	Link
17.08.2017 08:00 - 17.08.2017 10:00	Gernot Weyss		NEIN						NEIN	JA	JA	Link
16.08.2017 12:00 - 16.08.2017 12:05	Gernot Weyss		NEIN						JA	JA	JA	Link
25.07.2017 11:22 - 25.07.2017 17:11	Gernot Weyss	3	JA	350	350				NEIN	JA	JA	Link
13.06.2017 10:00 - 13.06.2017 14:20	Gernot Weyss	135	JA	339	215				NEIN	JA	JA	Link
26.05.2017 12:00 - 26.05.2017 12:05	Anderer Mitarbeiter (siehe Bemerkung)	230	NEIN	290					NEIN	JA	JA	Link
04.05.2017 12:00 - 04.05.2017 12:05	Gernot Weyss	247	NEIN						NEIN	JA	JA	Link
29.03.2017 17:52 - 29.03.2017 18:00	Gernot Weyss	165	JA	192	335				NEIN	JA	JA	Link
08.03.2017 13:23 - 08.03.2017 13:28	Anton Neureiter	150	NEIN	205					NEIN	NEIN	JA	Link
09.08.2016 12:00 - 09.08.2016 14:00	Gernot Weyss	0	JA	530	230				NEIN	NEIN	JA	Link
07.06.2016 12:00 - 07.06.2016 12:05	Anderer Mitarbeiter (siehe Bemerkung)		NEIN	285					NEIN	JA	JA	Link
06.05.2016 07:45 - 06.05.2016 08:23	Gernot Weyss	340	NEIN	213					NEIN	NEIN	JA	Link
17.03.2016 09:00 - 17.03.2016 14:30	Gernot Weyss	252	JA	93	293				NEIN	JA	JA	Link
27.01.2016 12:00 - 27.01.2016 12:05	Anderer Mitarbeiter (siehe Bemerkung)	140	NEIN	210					NEIN	JA	JA	Link
08.01.2016 12:00 - 08.01.2016 12:05	Anderer Mitarbeiter (siehe Bemerkung)	120	NEIN	275					NEIN	JA	JA	Link
27.09.2015 12:00 - 27.09.2015 12:05	Gernot Weyss	60	NEIN	560					NEIN	NEIN	NEIN	Link
31.07.2015 11:30 - 31.07.2015 13:30	Gernot Weyss	12	JA	490	360				NEIN	JA	JA	Link
01.05.2015 12:00 - 01.05.2015 12:05	Bernhard Hynek	426	NEIN	215					NEIN	JA	JA	Link
22.04.2015 07:10 - 22.04.2015 08:10	Gernot Weyss		NEIN	275					NEIN	NEIN	JA	Link
27.09.2014 12:00 - 27.09.2014 12:05	Gernot Weyss	60	NEIN	560					NEIN	NEIN	JA	Link
30.04.2014 12:00 - 30.04.2014 12:05	Bernhard Hynek	426	JA	86	215				NEIN	JA	JA	Link



Abbildung: Stationsverlegung EMBS Kleinfleißkees am 3./4. 12. 2013 (Fotos B. Hynek).



Abbildung: Stationsverlegung und Umbau auf ein Stativ am 31.07.2015 (Fotos G. Weyss).



Abbildung: EMBS Kleinfleißkees inklusive des montierten Ausgleichbehälters des automatischen Ablationspegels (09.08.2016) (Foto: G. Weyss).



Abbildung: Abbau der Station am 25.07.2017 und Wiederinbetriebnahme am 18.08.2017 (Fotos: G. Weyss).



Abbildung: Links die alte eingeschneite Station am 24.04.2018 und rechts die neu Station mit der temporären Schneehöhenmessung am 30.06.2018 (Fotos: Gernot Weyss).

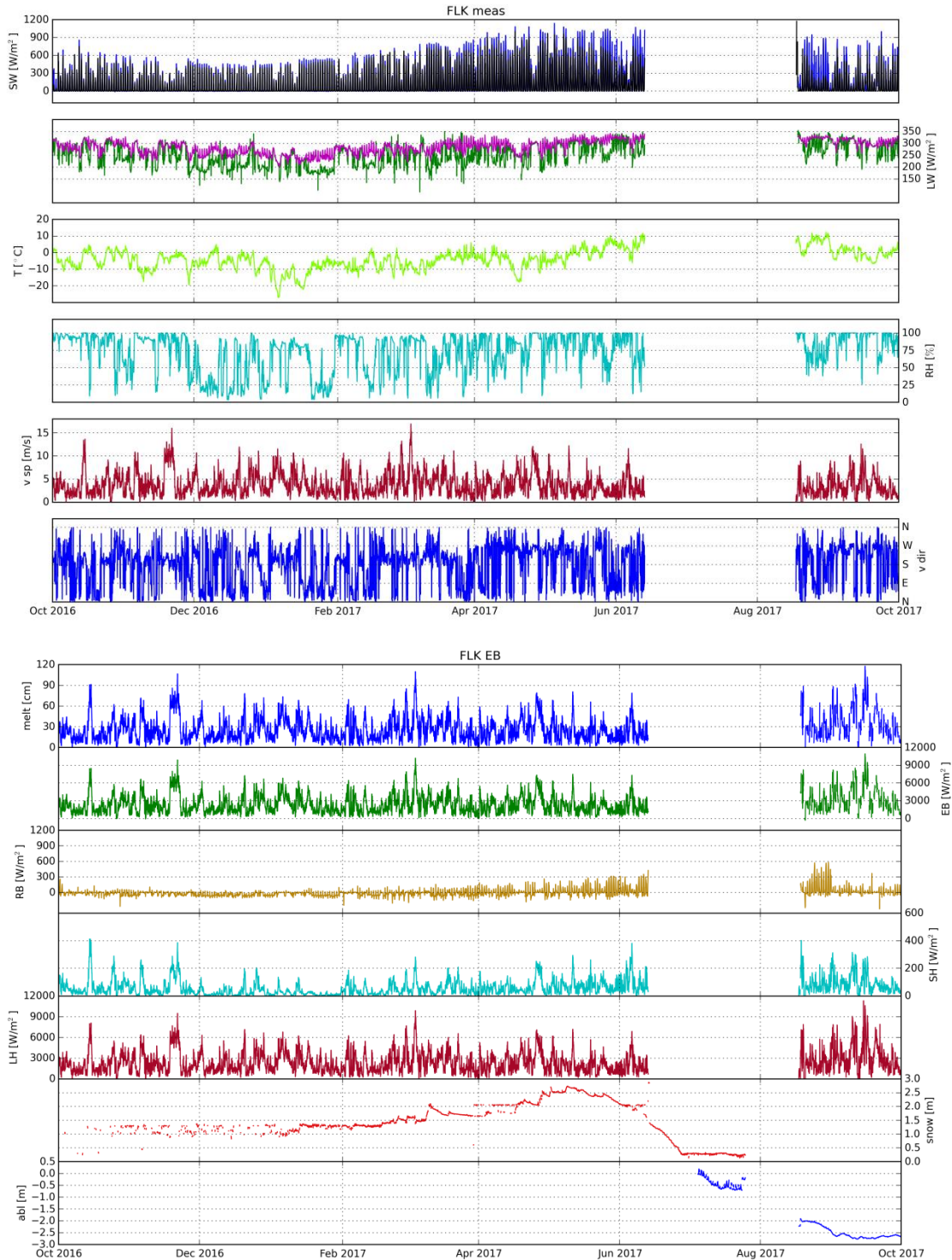


Abbildung: Zeitreihe für das Haushaltsjahr 2016/17 der wichtigsten Daten der EMBS Kleinfleißkees.

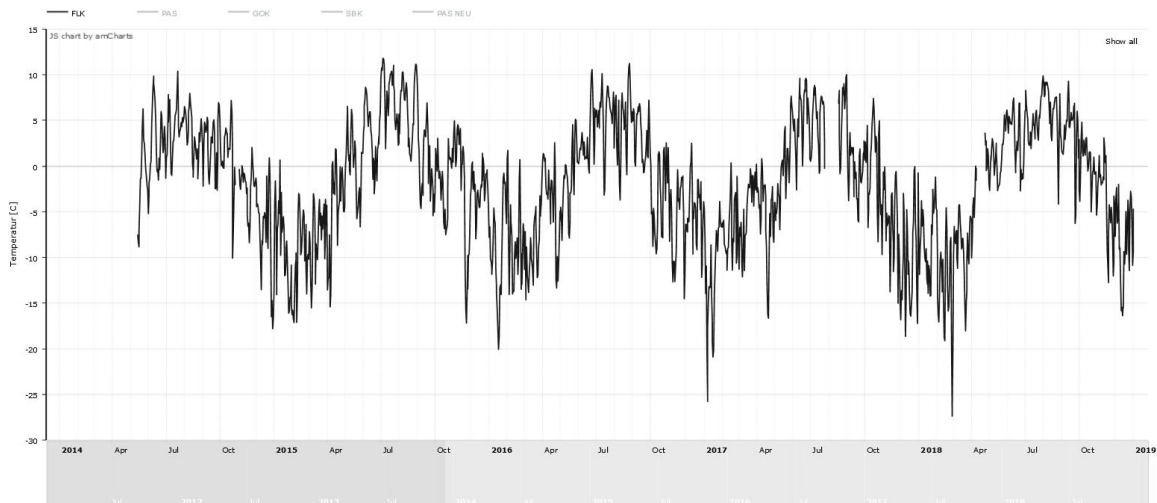


Abbildung: Verlauf der Temperatur (2014 – 2018) Station Kleinfleißkees.

6.2 EMBS Pasterze

Die Station Pasterze wurde am 19.10.2012 aufgestellt und in Betrieb genommen. Die Ausstattung ist ident mit der Station am Kleinfleißkees. Auch hier werden die Parameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Schneehöhe und die Strahlungsbilanz gemessen. Seit Sommer 2015 wird auch hier die Ablation erfasst. Aufgrund der Position an der Gletscherzunge der Pasterze, die geringere Schneehöhen aufweist und dem geringen Gefälle ist der Schneedruck bei weiten niedriger als an der Station Kleinfleißkees. Dadurch sind Wartungs- und Reparaturarbeiten an der Station bedeutend seltener. Der Querarm der Station, wo das Strahlungsmessgerät und der Ultraschallsensor für die Ermittlung der Schneehöhe montiert sind muss deshalb nicht nach oben oder unten verschoben werden. Anders als an der Station Kleinfleißkees, mit weit höheren Niederschlägen, wo man den Abstand von Schneeoberfläche und Sensor im Auge haben muss und gegebenenfalls den Querarm höher oder niedriger stellen muss. In der kompletten Laufzeit kam es nur zu einem Datenausfall. Durch die Kombination eines Defektes des Speicherkartenadapters am Datenlogger und des Ausfalles des GSM-Modems gibt es eine Datenlücke von viereinhalb Monaten. Wartungsarbeiten im Winter sind hier wegen der Unzugänglichkeit (Straßensperre und Lawinengefahr) nicht möglich. Am 04.07.2015 wurde der automatische Ablationssensor in Betrieb genommen. Nachdem in diesem Jahr die Fernübertragung nicht funktioniert hat, wurde das Modem am 28.08.2015 getauscht. Durch die Speicherkarte kam es deshalb aber zu keinen Datenlücken. Das montierte Modem fiel aber im Winter wieder aus. In Kombination mit dem schon beschriebenen Defekt des Speicherkartenadapters kam es zur einzigen Datenlücke. Am 30.06.2016 wurden das GSM Modem und das CF-Modul getauscht. Aus diesem Grund wird jedes Jahr, bei den letzten Feldarbeiten, die Speicherkarte getauscht, um bei einem Ausfall der automatischen Übertragung in den Wintermonaten eine Gewährleistung der Datenaufzeichnung zu haben. Am 04.11.2016 wurde beim Ultraschallsensor die Transducer-Membran ausgetauscht, der Strahlungssensor gereinigt und das Trocknungsmittel gewechselt. Während eines Sturmereignisses Ende Oktober 2018 wurden an der AWS Pasterze Windböen bis 46 m/s (165,6 km/h) und ein 10 Minuten Mittelwert von bis zu 26 m/s (93,6 km/h) gemessen. Das waren die höchsten bisher gemessenen Windgeschwindigkeiten an diesem Standort. Die folgenden Abbildungen zeigen Arbeiten an der Station. Einen Einblick in die erfassten Daten zeigt graphische Aufbereitung der Stationsdaten aus dem Haushaltsjahr 2016/17 und die Abbildung der Windgeschwindigkeit, die das vorher genannte Sturmereignis veranschaulicht.

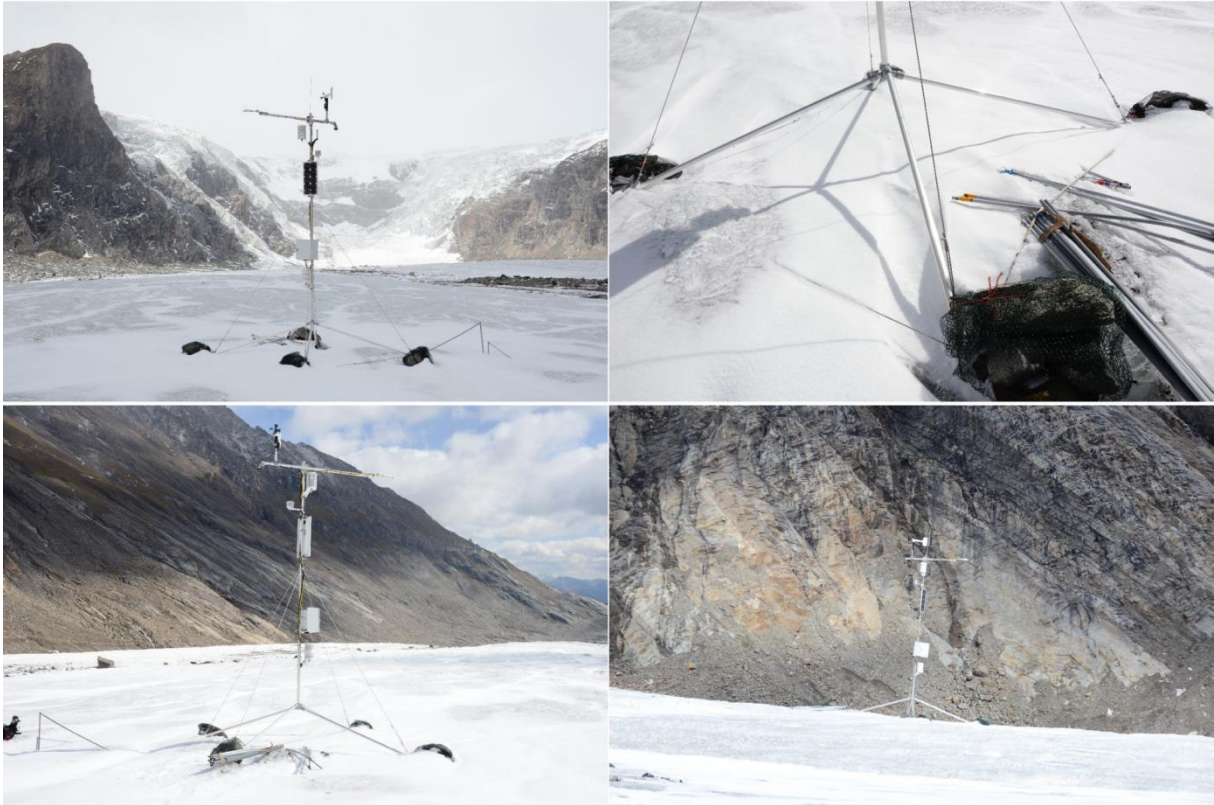


Abbildung: Aufbau der Station Pasterze. Aufgenommen am 24.09.2014 (Fotos: G. Weyss).



Abbildung: EMBS Pasterze am 04.07.2015 mit montierten automatischen Ablationssensor (Foto G. Weyss).

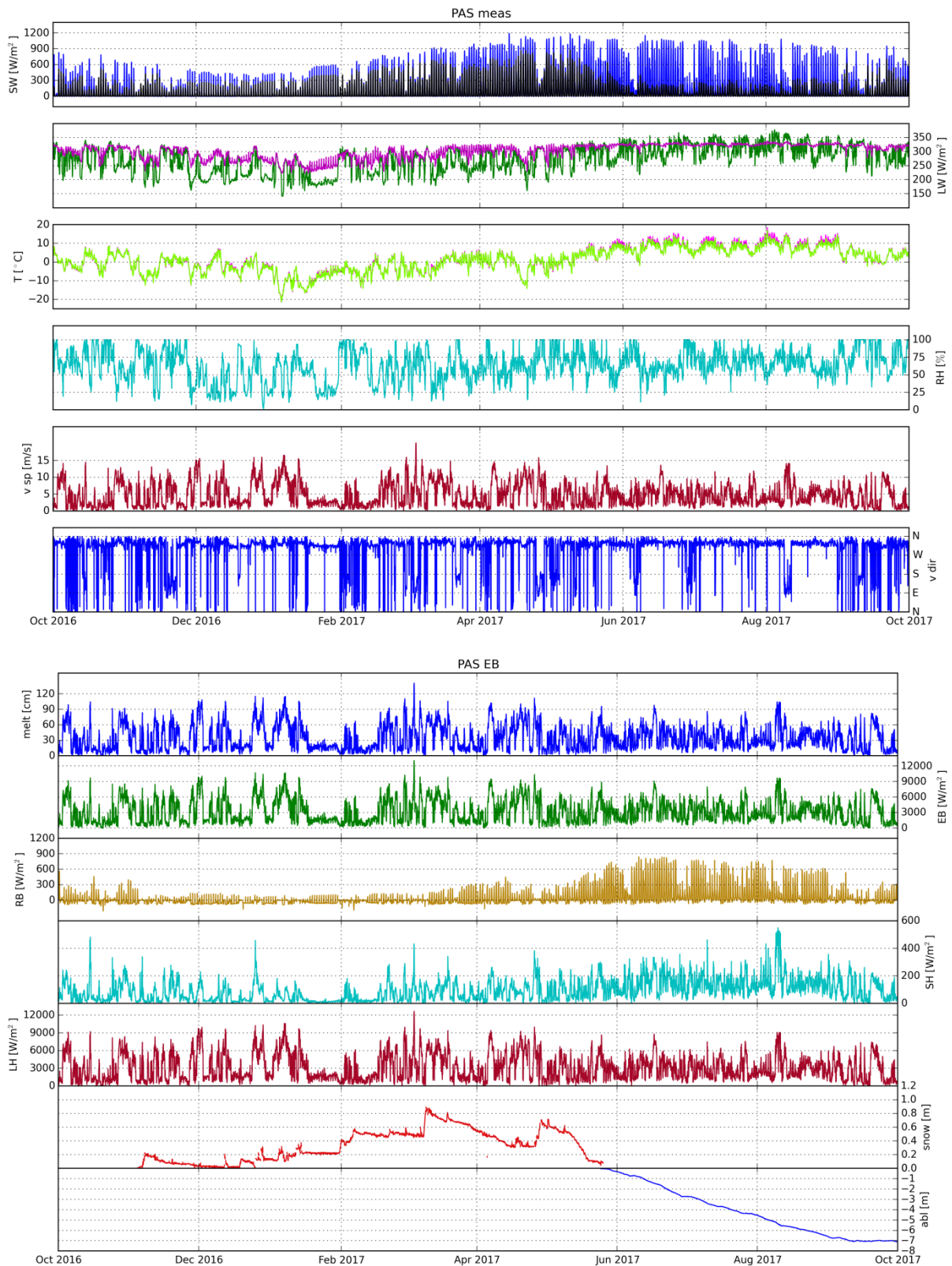


Abbildung: Zeitreihe für das Haushaltsjahr 2016/17 der wichtigsten Daten der EMBS Pasterze.

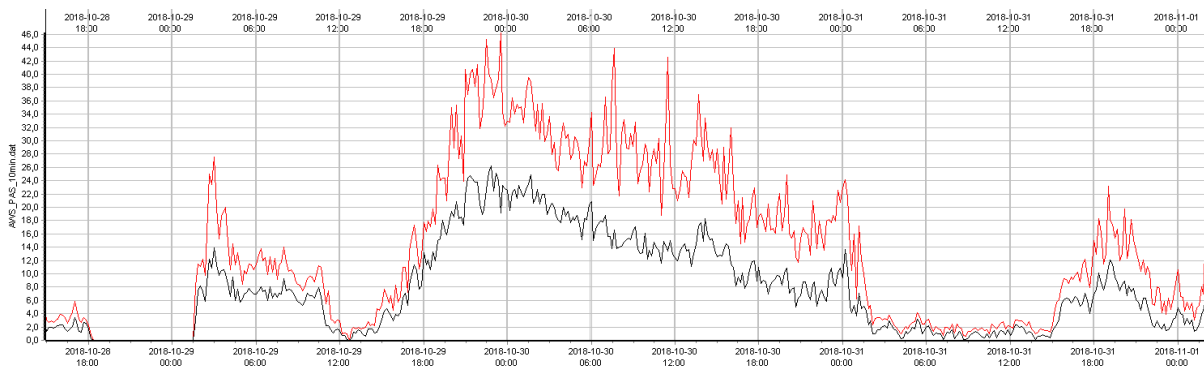


Abbildung: 10 Minutenwert (schwarz) und Maximum (rot) der Windgeschwindigkeit gemessen von der EMBS Pasterze vom 29.10. bis 31.10.2019.

6.3 MBS Goldbergkees

Die Massenbilanzstation Goldbergkees wurde im Sommer 2016 aufgestellt und am 03.11.2016 der Ablationssensor in Betrieb genommen. Neben dem Ablationssensor und dem Ultraschallsensor, der die Schneehöhe ermittelt, wird auch Temperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen. Die Daten werden wie bei den anderen Stationen via GSM-Netz übermittelt und auch auf einer Speicherkarte abgelegt. Am 30.03.2017 wurde die Station höhergestellt. Der Ultraschallsensor wurde auf einer Höhe von 329 cm über der Schneeoberfläche befestigt. Da der Ultraschall-Schneehöhensensor (MaxBotix MB7384 HRXL-MaxSonar-WRST) keine ausreichende Datenqualität lieferte wurde der Sensor am 20.10.2017 durch einen Campbell Scientific SR50A (#8101) ersetzt, der auch bei den anderen Stationen zum Einsatz kommt. Im Laufe des Jahres 2018 zeigte es sich, dass der Ablationssensor keine korrekten Daten liefert. Der Sensor wurde am 22.08.2018 ausgeschmolzen und für ein Service abtransportiert. Die folgenden Abbildungen zeigen die wichtigsten Arbeiten an der Station. Die graphische Aufarbeitung der Daten illustriert eine Gegenüberstellung der Stationen Pasterze und Goldbergkees. Hier werden für das Haushaltsjahr 2016/17 Schneehöhe und Eisabschmelzung dargestellt. So wird der Verlauf der Winterakkumulation und Schmelze im Sommer vergleichbar. Am Goldbergkees (2625m Seehöhe) fiel unter anderem wegen der Höhenlage mehr Schnee als auf der Pasterze (2202m Seehöhe). Je früher die Schneedecke verschwindet, desto stärker schmilzt das Eis ab. Am Messpunkt Pasterze schmolz die Eisdicke im Sommer 2017 daher um mehr als sieben Meter. Die Eisdicke am Goldbergkees ging um 3.7 Meter zurück.

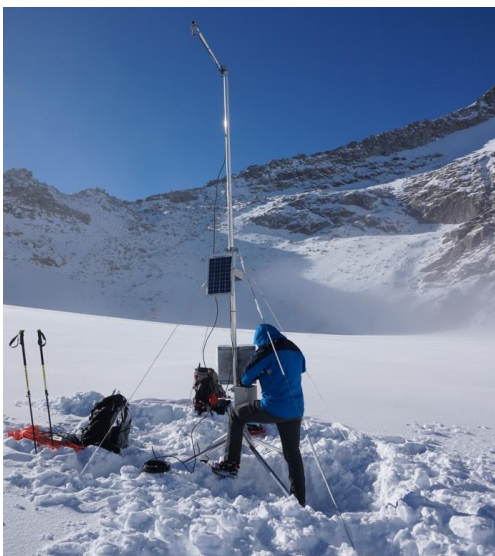


Abbildung: Montage des Ablationssensors am 03.11.2016 (Foto G. Weyss).



Abbildung oben: Vor und nach der Mastverlängerung am 30.03.2017 der Massenbilanzstation am Goldbergkees (Fotos: G. Weyss).

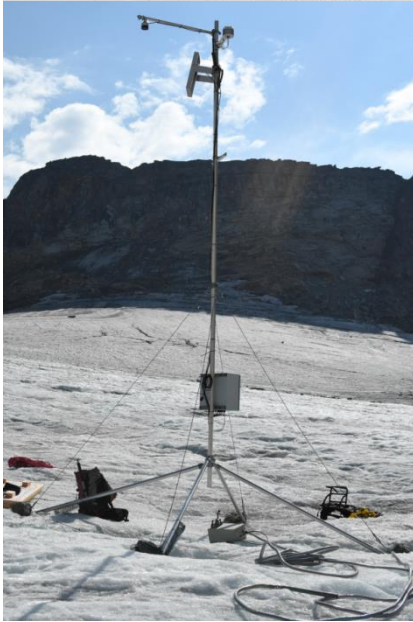
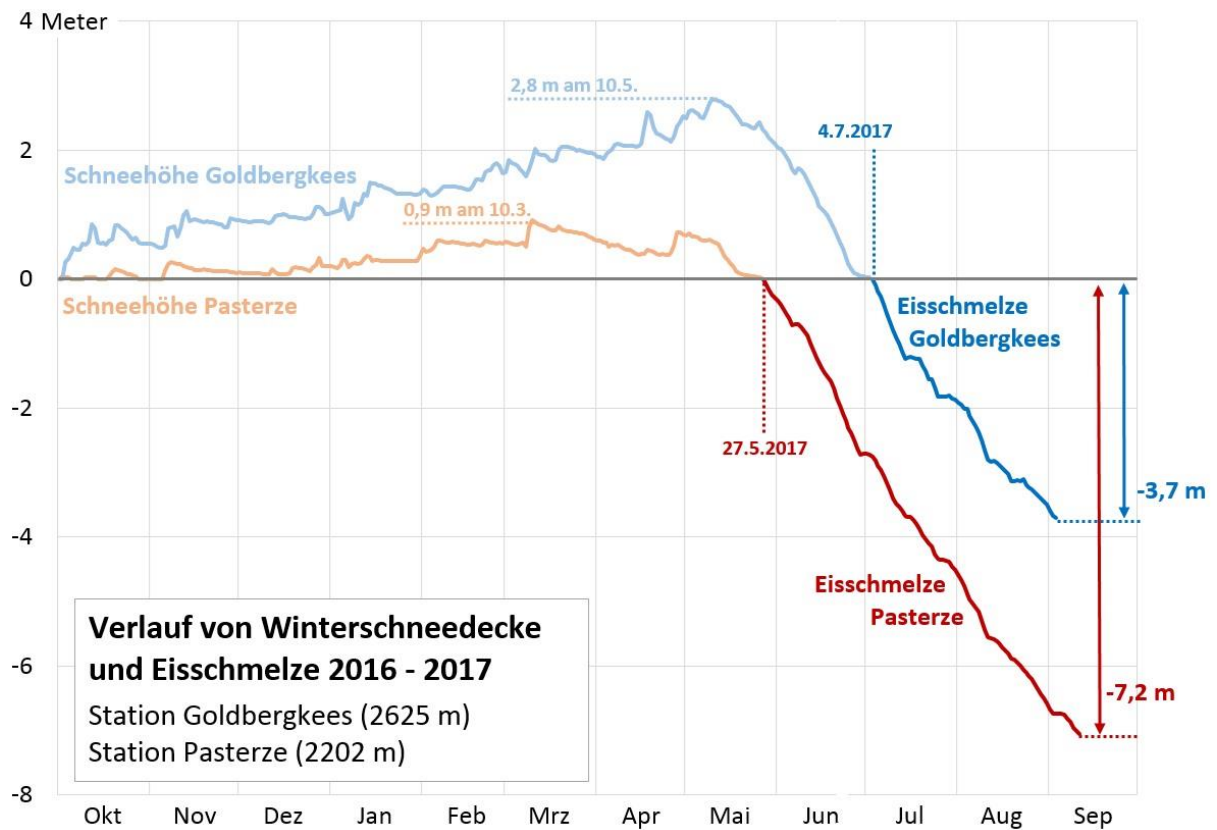


Abbildung links: Die Massenbilanzstation nach dem Abbau des defekten Ablationssensors am 22.08.2018 (Foto: G. Weyss).

Abbildung unten: Verlauf von Schneehöhe und Eisschmelzung an den Messstationen Goldbergkees (blau) und Pasterze (rot).



6.4 MBS Pasterze

Am 29. 05.2018 wurde die MBS Pasterze im Bereich zwischen Großen und Mittleren Burgstall in der Umgebung der Oberwalderhütte neu aufgestellt. Die Station wurde auf die Schneeoberfläche gestellt, da ein Vergraben bis zur Eisoberfläche unmöglich war. Zu beachten ist, dass der Schneehöhensensor mit Abschmelzen der gesamten Schneedecke erst in Folge die Schneehöhe angibt. Die Daten der Schneehöhe lassen sich aus den Daten vom Ablationssensor berechnen. Die Station speichert wie alle anderen Stationen 10 Minuten-Werte folgender Parameter: Lufttemperatur und -feuchte, der Abstand der jeweiligen Oberfläche (Eis oder Schnee) zum Ultraschallsensor und den relativen Druck am unteren Endes des Ablationssensors. Der Ablationssensor zeigt allerdings einen deutlichen Offset, der bei der Auswertung der Daten berücksichtigt werden muss. Die Daten werden täglich mittels GSM-Verbindung abgerufen und in die Datenbank übernommen und auch vor Ort auf einer Speicherkarte gesichert. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Station nach der Inbetriebnahme am 29.05.2018. Die graphische Aufbereitung der Daten zeigt den Verlauf der Schneehöhe des aktuellen Winters.

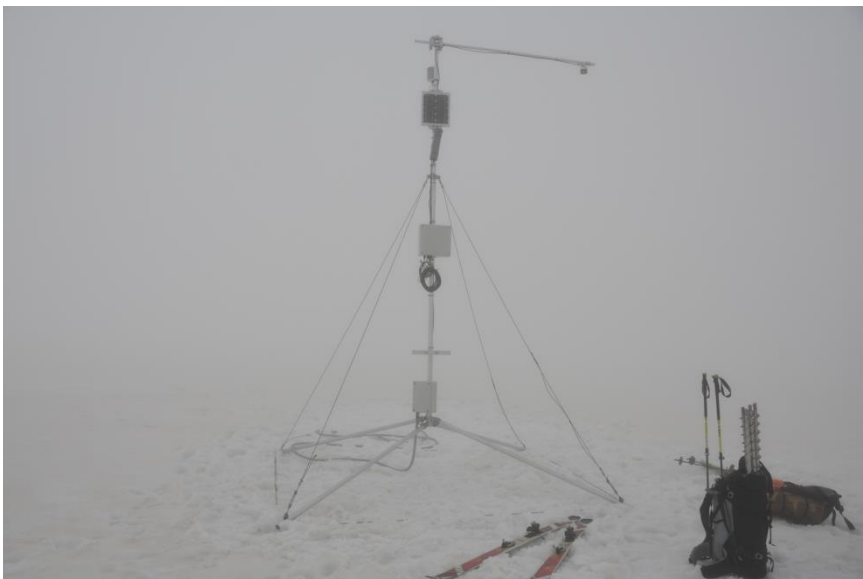


Abbildung: Schlechte Witterung 29.05.2018. Dem Tag der Stationsinbetriebnahme (Foto: Gernot Weyss).

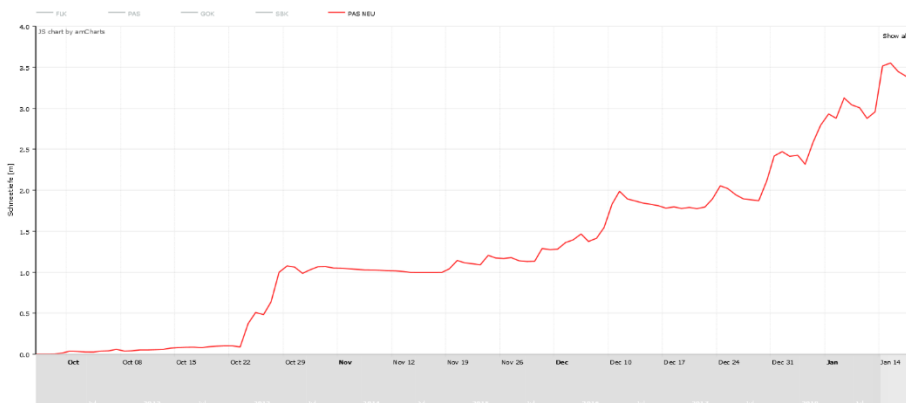


Abbildung: Zeitlicher Verlauf der Schneehöhe des aktuellen Winters 2018/19.

7. Abflussmonitoring

7.1 Abfluss Goldbergkees

Das Einzugsgebiet des Goldbergbaches wird durch die Abflussmessstation in 2350 m abgegrenzt, den höchsten Punkt bildet der Gipfel des Hohen Sonnblicks in 3105 m. Der größte Teil des Gebietes ist Ost und Nord, der Bereich unter dem Gipfel Süd exponiert. Die Einzugsgebietsfläche beträgt 2,72 km², davon sind 1,03 km² vergletschert (bestimmt für das Jahr 2015). Der Goldbergbach entwässert nach Norden und mündet in Kolmsaigurn in die Hüttwinkelache, diese bildet mit der Seidelwinkelache bei Wörth die Rauriserache welche schließlich bei Taxenbach in die Salzach mündet. Im Herbst 2002 wurde zum ersten Mal eine Pegelstation zur Messung der Schmelzabflüsse des Goldbergkees an dem Gletschersee beim Gebietsauslass installiert. Seither wird die Station jedes Jahr während der Schmelzperiode wieder aufgebaut, um Abflüsse in einem viertelstündlichen Intervall aufzuzeichnen. Über den Winter muss die Pegelstation abgebaut werden, um die Zerstörung durch hohe Schneedrücke bzw. Lawinen zu vermeiden. Die Messstation arbeitet mit dem Einperlsystem, wobei Luft durch einen Kunststoffschlauch in den Einperltopf an der Gewässersohle gepumpt wird. Die Daten werden auf einem Datenlogger abgespeichert. Es werden jährlich Abflussmessungen durchgeführt um die Pegelschlüsselkurve des natürlichen Profils am Gebietsauslass zu bestimmen.

In der Laufzeit des Projektes kam es zu Ausbrüchen des proglazialen Sees. Am 15. 06 2017 wurde in ca. 9 Stunden eine Summe von knapp über 100.000 m³ Wasser gemessen. Im Vergleich dazu wurden beim Seeausbruch vom 25.08.2016 ca. 60.000 m³ Abfluss gemessen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Pegelstation, Abflussmessungen und die Abflussganglinie vom Gletscherseeausbruch vom 15.06.2017. Anschließend folgen die Abflusszeitreihen.



Abbildung: Inbetriebnahme des Abflusspegels am Goldbergbach am 14.06.2017 (links) und Abflussmessung zur Erstellung der Pegelschlüsselkurve am 20.08.2014(rechts) (Fotos: G. Weyss).

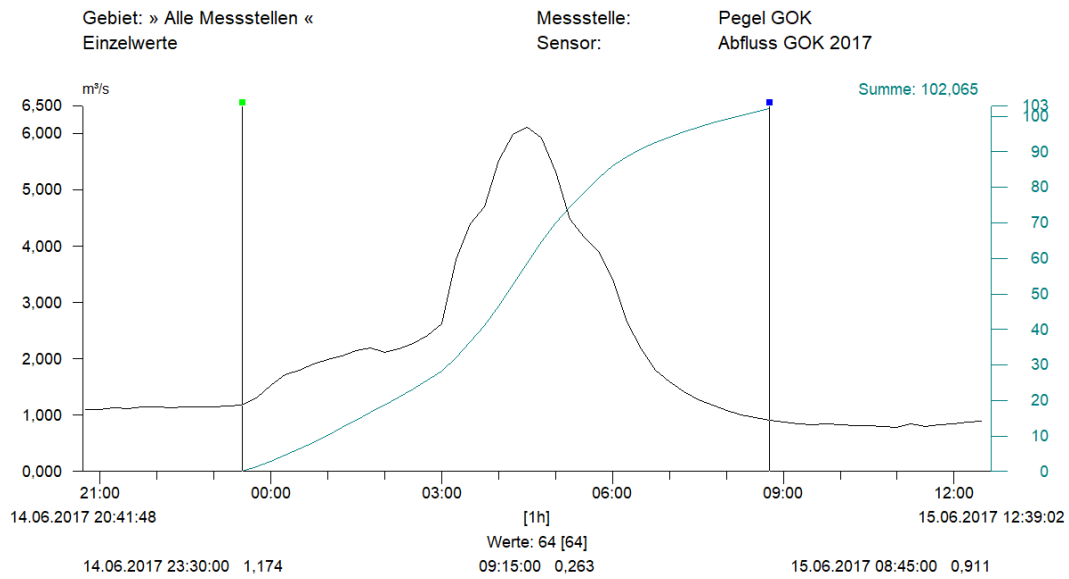


Abbildung: Abflussganglinie mit kumulierten Abfluss am Pegel Goldbergbach während des Ausbruches des proglazialen Sees am 15.06.2017

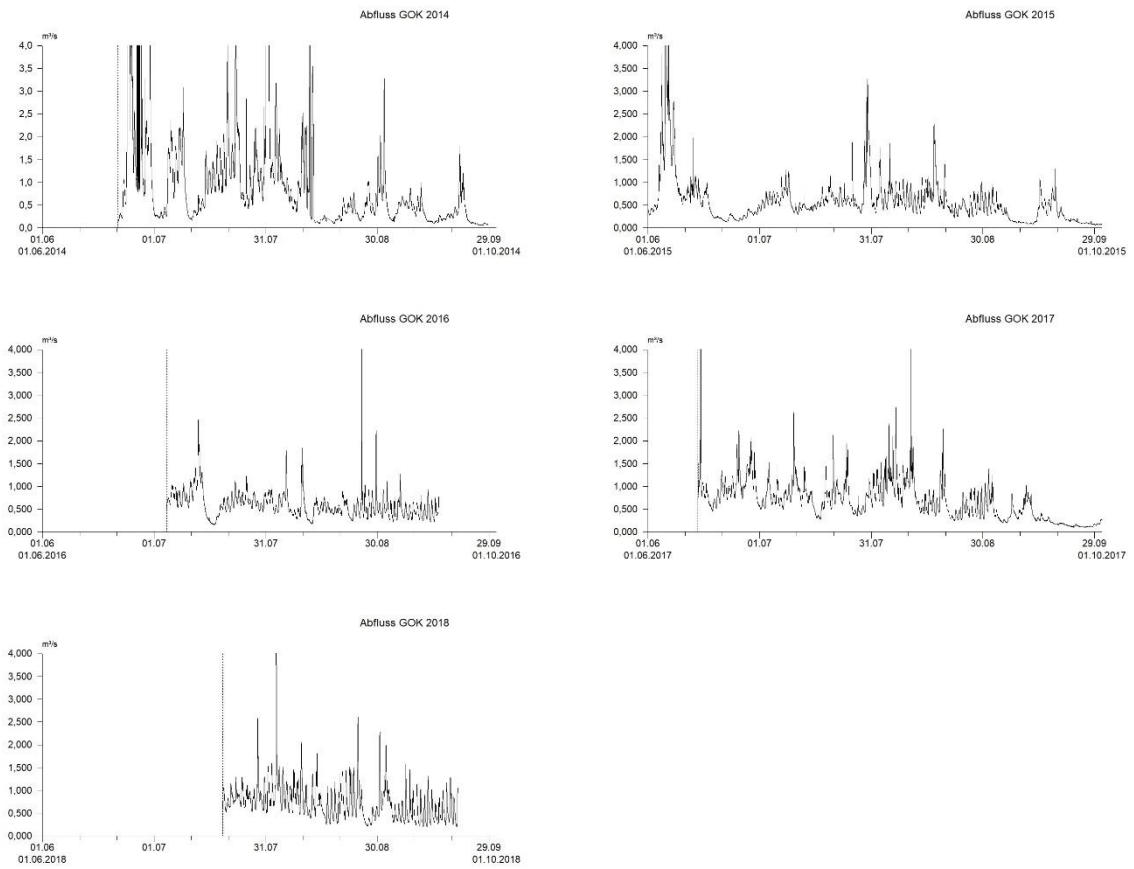


Abbildung: Zeitreihen der Abflussganglinien des Pegels Goldbergbach.

7.2 Abfluss Kleinfleißkees

Seit dem August 2004 werden die Abflüsse des Kleinfleißkees kontinuierlich gemessen. Die Pegelstation wurde am Einlaufbauwerk einer Bachwasserfassung der KELAG errichtet. Die Messstation arbeitet auf dem Prinzip eines Schwimmpiegels mit Winkeldekodierer, der die Daten in einem Logger abspeichert. Im Herbst 2004 wurde diese Station dann in den an die Bachfassung anschließenden Stollen verlegt. Das Einzugsgebiet des Kleinfleißbaches hat eine Fläche von 2,1 km² mit einer vergletscherten Fläche von etwa 0,79 km² (bestimmt für den Gletscherstand 2015). Der Gebietsauslass befindet sich auf einer Höhe von 2504 m. und den höchsten Punkt im Gebiet bildet der Gipfel des Sonnblicks auf 3105 m. Das Einzugsgebiet ist hauptsächlich Nordwest und West exponiert. Der Kleinfleißbach wird, wie bereits angesprochen, gefasst und für die energetische Nutzung ausgeleitet. Der Stollen führt zum Großsee, welcher mit dem Hochwurtenspeicher eingespiegelt ist. Von dort aus wird das Wasser im Krafthaus Innerfragant und weiter im Krafthaus Ausserfragant in die Möll abgearbeitet.

Ein Problem im Stollen sind Rückstauereignisse. Die Daten während dieser kurzen Perioden sind nicht brauchbar. Bei einem solchen Rückstau am 31.07.2014 ist der Pegelschwimmer hängen geblieben. Die Daten vom 31.07.2014 bis 20.10.2014 sind somit leider nicht brauchbar. Aus diesem Grund wurden ab dem Jahr 2015 Drucksensoren der Firmen Solinst und Onset redundant zur kontinuierlichen Messung der Pegelstation installiert. Dadurch werden Datenausfälle während hängengebliebenen Pegelschwimmer vermieden. Da diese Drucksensoren empfindliche auf Frostereignisse reagieren werden sie im Frühsommer ausgelegt und bei den Endablesungen wieder eingesammelt. Im Sommer 2017 wurde die Pegelstation von der KELAG demontiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Abflusspegel im Überleitungsstollen sowie den Drucksensor der redundant die Höhe des Abflusses registriert. Danach folgen die Abflusszeitreihen. Hier zeigt sich, dass die Rückstauereignisse in den letzten Jahren zugenommen haben. Dies erforderte eine Rücksprache mit der KELAG und notfalls mit einer Verlegung des Ausbringortes für den Drucksensor.



Abbildung: Abflusspegel Kleinfleißbach (links) und der installierte Drucksensor (rechts) am 13.06.2017 im Überleitungsstollen (Fotos: G.Weys).

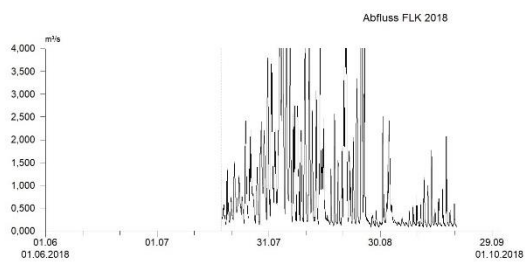
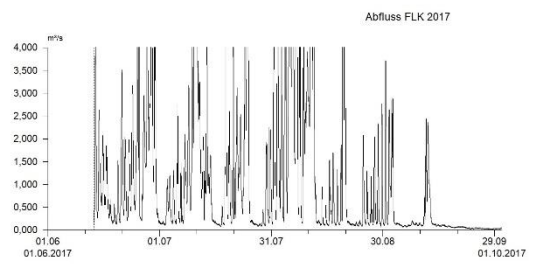
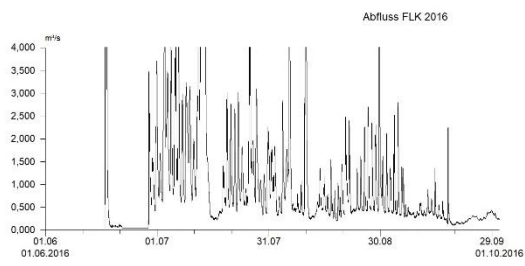
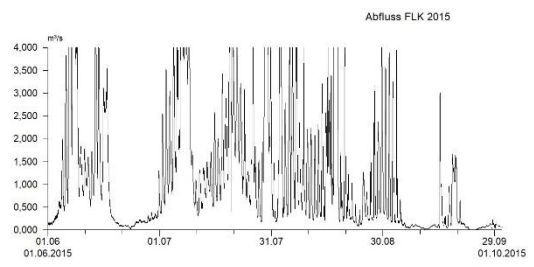
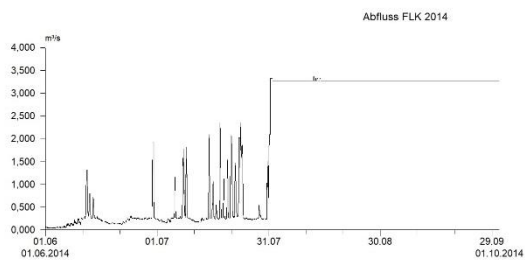


Abbildung: Zeitreihen der Abflussganglinien des Pegels Kleinfleißbachbach.

8. Datenprüfung, -Assimilation und Nahe-Echtzeit-Monitoring

Für die Stationsdaten der EMBS und MBS wurde ein Qualitätsmanagement-Konzept erstellt und weiten Teilen auch schon verwirklicht. Es wurde eine Datenbank aufgebaut in der alle Informationen zusammenlaufen und gewartet werden. Hier werden Metadaten, Wartungsdaten und Messdaten in separaten Tabellen laufend abgelegt. Die Metadaten werden über das Wartungsprotokoll eingegeben. Informationen über Sensorik (Modell, Hersteller, Seriennummer, Kalibrierungsfaktoren und Messunsicherheit), Sensorgeschichte (welcher Sensor wurde an welcher Station von wann bis wann verwendet) und Stationsgeschichte (Verortung wie zum Beispiel bei einer Verlegung) werden dadurch automatisch erfasst.

Bei den Messdaten werden Rohdaten und konvertierte Daten (z.B. Mikrovolt und W/m^2 bei Strahlungsdaten) abgespeichert. Zusätzlich werden auch Qualitäts-Flags pro Station, Parameter und Zeitschritt abgelegt. Die laufende Qualitätsprüfung wird mit entsprechenden Algorithmen für alle Parameter, wobei nicht die Messwerte sondern die QC Flags verändert werden.

Ein Beispiel für einen entsprechenden Algorithmus ist die Verifikation der Schneehöhe. Hier wurde auf die Arbeit von S. Terzago et al. aufgebaut. Der Verifizierungsalgorithmus beinhaltet einen maximalen täglichen Zuwachs von 150 cm Schnee und eine maximale Schmelze von 50 cm. Liegt die Minimumtemperatur der letzten 24 Stunden über $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, werden alle Zuwächse auf ungültig gesetzt. Mit den Schneeschmelzmodellen von Carr (1998), Wiesner (1970) und Bruce&Clark (1966) wird eine Schmelz-Abschätzung durchgeführt. Wenn für eines der drei Modelle die Differenz der vorhergesagten Schneehöhe (nach Schmelze) und der aktuellen Schneehöhe weniger oder gleich 12cm ist, dann werden die Werte als gültig angesehen. Ansonsten wird nochmal mit 3 Bedingungen gefiltert: Differenz zwischen berechneter und gemessener Schneehöhe mehr als 12cm, die gemessene Schneehöhe unterscheidet sich zum Vortag um mehr als 3cm und die Minimumtemperatur war unter $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann wird Schneefall angenommen und die Schneehöhe bestätigt. Des Weiteren wird eine händische/visuelle Kontrolle der Daten auf Tagesbasis durchgeführt.

Die Wartung erfolgt über ein einheitliches Wartungshandbuch für alle Stationen. Wartungsprotokolle werden anschließend in die Wartungsdatenbank eingetragen und sind somit für jeden nachvollziehbar. In weiterer Folge werden im Rahmen des Nahe-Echtzeit-Monitorings geprüfte Daten einzelner Parameter der Datenbank visuell aufgearbeitet und sind dann über die Website <http://www.glacio-live.at> einsehbar. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die Datenverfügbarkeit der einzelnen Stationen und einen Rohdatenprüfungsplot für Schneehöhe und Ablation der Station Kleinfleißkess.

GCW Datacenter

Jahr: 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 **2018** 2019
 Monat: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 **12**

	Kleinfleißkees 10min (FLK_10)	Goldbergkees Massenbilanz (MB_GOK)	Sonnblick (SBK_10)	Pasterze 10min (PAS_10)	Pasterze 2 Massenbilanz (MB_PAS)	Freya 240min (freya_240)	Goldbergkees Alt 10min (GOK_10)
Karte anzeigen	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Vorhandene Daten	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Daten 2019	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Schneehöhe	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Alle Daten (letzte 1000 Zeilen)	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Tabellenstruktur	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Alle Wartungsprotokolle	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Ablation manuell ändern	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
01.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
02.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
03.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
04.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
05.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
06.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
07.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
08.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
09.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
10.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
11.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
12.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
13.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
14.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
15.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
16.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen
17.12.18	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen	Öffnen

Vergleichsplots

Schneehöhe	Link
Ablation	Link
Temperatur	Link
Relative Feuchte	Link
Windgeschwindigkeit	Link
Kurzwellige Strahlung (in)	Link
Langwellige Strahlung (in)	Link
Kurzwellige Strahlung (out)	Link
Langwellige Strahlung (out)	Link

Abbildung: Überblick über die aktuellen Stationen und deren Datenverfügbarkeit für 17 Tage im Dezember 2018.

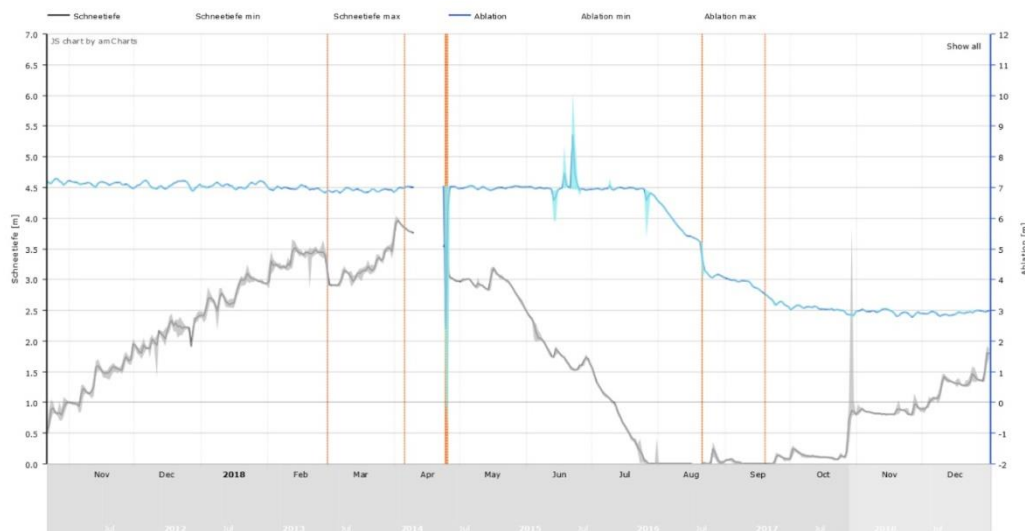


Abbildung: Rohdatenprüfungsplot zur visuellen Kontrolle von Ultraschall-Distanz (grau) als Basis für Schneehöhenmessung und Eistiefe des Drucksensors (blau) als Basis für Ablationsmessung an der Station Kleinfleißkees von Oktober 2017 bis Dezember 2018. Die vertikalen Linien zeigen die Zeitpunkte der durchgeführten Wartungsbesuche an. Gut zu erkennen ist auch der Datenausfall im April 2018.

9. Ionendepositionsmessungen in der Winterschneedecke

Seit nunmehr mehr als 30 Jahren (1987-2018) wird im Rahmen der Winterbilanzmessung Ende April, d.h. am Ende der Winterperiode vor Eintritt der relevanten Schneeschmelze, die Schneedecke beprobt und hinsichtlich der Ionenkomposition (Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Ammonium, Sulfat, Nitrat, Chlorid) analysiert. Zudem werden auch der pH-Wert zur Berechnung der Protonenkonzentration sowie die Leitfähigkeit gemessen. Die Entnahme der Schneeproben erfolgt vertikal in 10cm Inkrementen über die gesamte Profiltiefe bis zum Sommerhorizont des letzten Jahres. Schicht für Schicht wird Schnee entnommen und tiefgekühlt zur chemischen Analyse nach Wien an die Technische Universität Wien (AG „Environmental Analytics“ unter Ao.Prof. Dr. Anne Kasper-Giebl) gebracht. Zusätzlich zu der Beprobung der Schneedecke werden Kornform, Korngröße, Härte, Wassergehalt, Temperatur und Dichte der einzelnen Schichten bestimmt. Die mittels Ionenchromatographie gemessenen Konzentrationen wurden mit Hilfe der Schneehöhenmessung der Schneepegel auf saisonale Werte (Herbst, Winter, Frühling) umgerechnet.

Ein Langzeitmonitoring dieser Art ist weltweit einzigartig. Es werden zwar immer wieder einzelne Messkampagnen für einen befristeten Zeitraum über maximal ein paar Jahre durchgeführt oder einzelne Extremereignisse betrachtet, jedoch gibt es keine vergleichbare Zeitreihe über Jahrzehnte. Die Gletscher rund um das Sonnblickobservatorium bieten, aufgrund der exponierten Lage fernab von anthropogenen Einflüssen, einen optimalen Probenahmestandort für dieses Monitoring. Außerdem ermöglicht das nahegelegene Observatorium mit unzähligen meteorologischen und luftchemischen Messungen eine detaillierte Interpretation der Messungen hinsichtlich folgender Ziele:

- * Zuordnung einzelner Schichten zu Niederschlagsereignissen und deren Beschreibung
- * Quantifizierung des Beitrags aus Ferntransport von Schadstoffen in Europa an der Deposition
- * Verständnis der Prozesskette: Luftschadstoff - Einbindung in den Niederschlag – Deposition

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Langzeitreihe der Schneechemiemessungen am Goldbergkees (GOK), sowie ein 2013 für vergleichende Auswertungen eingeführter Probenahmeort am Kleinfleißkees (FLK), weitergeführt. Im Jahr 2014 war allerdings wetterbedingt eine Probenahme am FLK nicht möglich.

Anfang 2016 wurden die Ergebnisse der Messreihe am GOK von 1987-2014 im Journal „Atmospheric Environment“ publiziert. Zu dieser erfolgte auch eine Presseaussendung mit Schwerpunkt „Versauerung der Gletscher rückläufig“ welche auch ein Radiointerview für Ö1 „Wissen Aktuell“ mit sich brachte. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit sind:

- * SO_4^{2-} , NO_3^- und H^+ sind über den fast 30-jährigen Beobachtungszeitraum signifikant rückläufig.
- * Der Rückgang der Ionenkonzentrationen und Depositionen ist geringer als der Rückgang der zugehörigen Emissionen.
- * Die Ionenkonzentrationen von SO_4^{2-} , NH_4^+ und H^+ unterliegen einer Saisonalität mit einem Maximum im Frühling.
- * Anthropogene und mineralische Beiträge stellen die Hauptquellen der Ionen im Schnee dar.

Die Schneedecke des Haushaltsjahres 2015/2016 wies deutlich erkennbare Saharastaubschichten auf, welche auch in der chemischen Zusammensetzung der einzelnen 10cm Schichten, aufgrund stark erhöhter Konzentrationen, auffällig hervortraten. Dies wurde zum Anlass genommen um im Rahmen einer Bachelorarbeit an der TU Wien Anfang 2017 intensive Auswertungen hinsichtlich des Einflusses von Saharastaub auf die Ionendeposition durchzuführen. Basierend darauf wurde eine Methode zur retrospektiven Identifikation von Saharastaubschichten entwickelt, die es ermöglicht diese Schichten in Vorjahresprofilen und somit für die gesamte 30-jährige Zeitreihe zu identifizieren und deren Einfluss auf den Ioneneintrag und auf den Säurehaushalt der Schneedecke zu untersuchen.

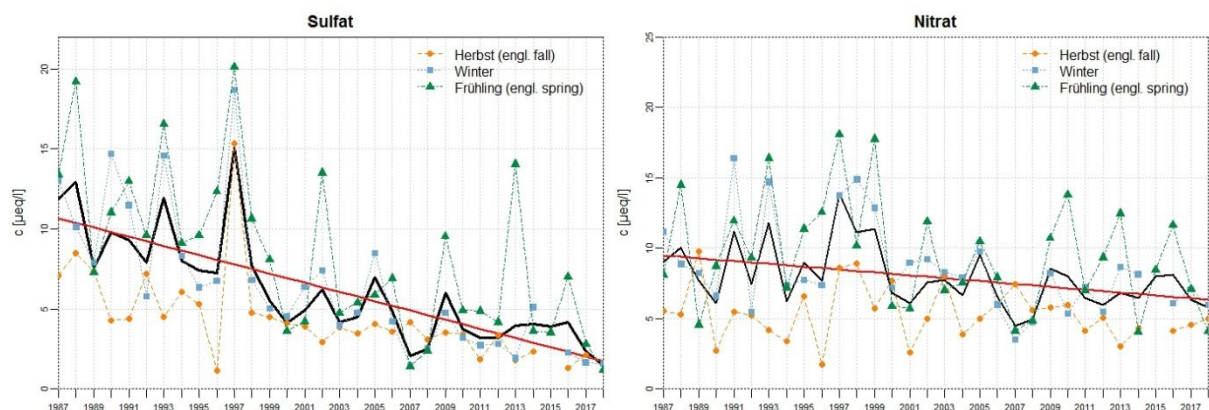
Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden 2018 im Journal „Frontiers in Earth Science, Section Cryospheric Science“ publiziert. Die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit sind:

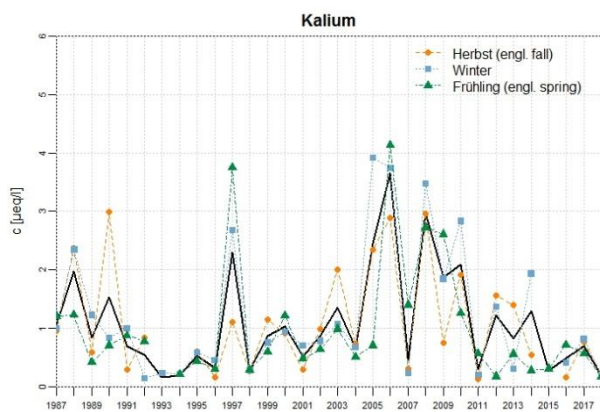
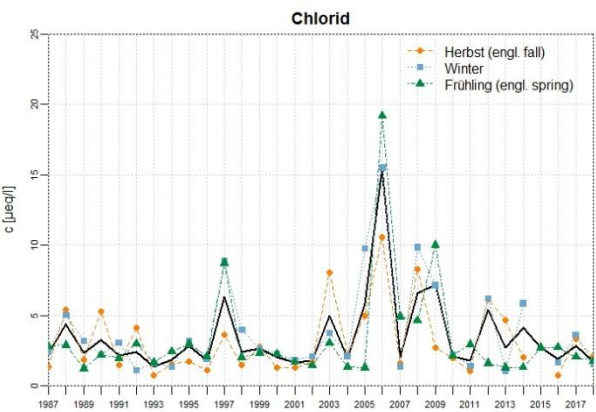
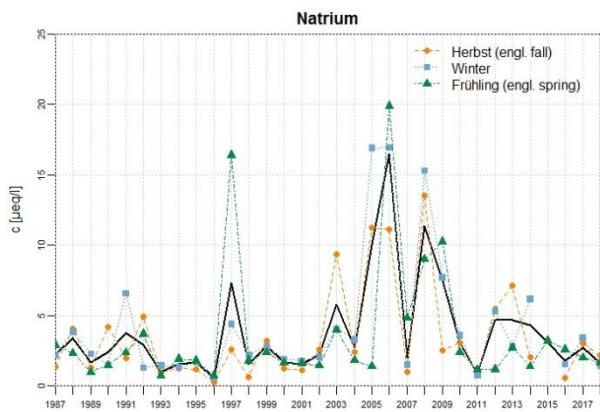
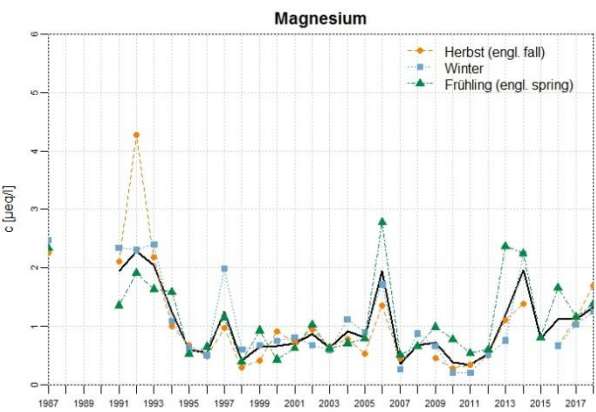
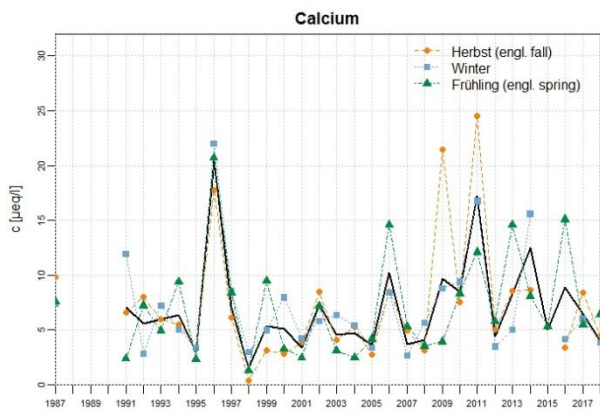
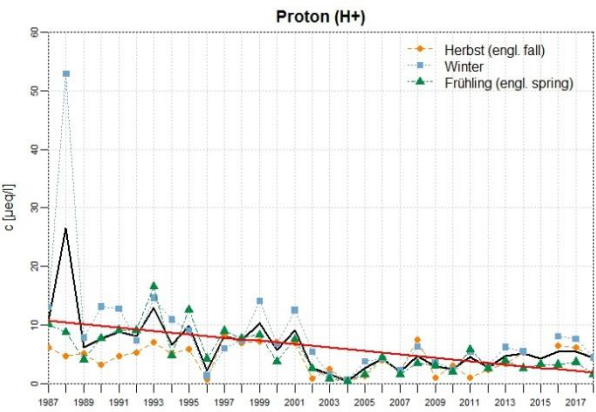
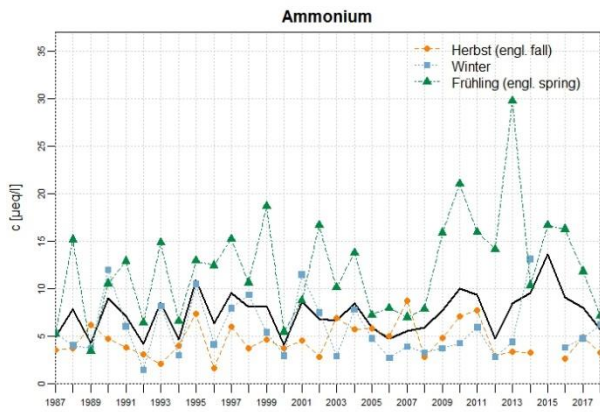
- * Ein pH-Wert > 5.6 zusammen mit einer Ca^{2+} -Konzentration > $10\mu\text{eq/l}$ stellen einen Indikator zur Identifikation von Saharastaub belasteten Schneeschichten dar.
- * Vor allem Mg^{2+} , Ca^{2+} und H^+ Depositionen sind vom Saharastaubeintrag beeinflusst.
- * Die Langzeittrends der Ionendepositionen sind vom Saharastaubeintrag unbeeinflusst.

Oben angeführte Arbeiten und zugehörige Publikationen sowie die Datenreihe an sich stellen eine einzigartige Basis dar um weiterführende Arbeiten wie z. B. Einfluss von Saharastaub auf im Schnee lebende Mikroorganismen oder den Einfluss von Schadstoffdepositionen auf die Ökologie zu untersuchen.

In nachstehender Grafik ist die Langzeitreihe der Ionenkonzentrationen in $\mu\text{eq/l}$ am GOK dargestellt. Man erkennt weiterhin den, wie schon für den Zeitraum 1987-2014 beschrieben, abnehmenden Trend der SO_4^{2-} , NO_3^- und H^+ Konzentrationen sowie die erhöhten Frühjahrskonzentrationen von SO_4^{2-} , NH_4^+ und H^+ aufgrund beginnender Konvektion und stärkeren lokalen Einfluss.

Eine vergleichende Auswertung hinsichtlich Trends ist für den bisherigen FLK-Datensatz noch nicht sinnvoll, da die jährlichen Schwankungen noch keine Aussagen dahingehend zulassen. Weiterführende Arbeiten würden jedoch einen Vergleich der GOK und FLK Daten vorsehen.





Abbildungen diese und vorige Seite: Zeitreihen der Ionenkonzentrationen in $\mu\text{eq/l}$ am GOK. Die schwarze Linie repräsentiert die jährliche mittlere Ionenkonzentration, die anderen Punkte und Linien stellen die saisonalen Mittelwerte dar. In rot ist die Trendlinie von 1987-2018 eingezeichnet. In den Jahren 1988-1990 wurde Ca^{2+} und Mg^{2+} nicht gemessen.

10. Publikationen auf Datenbasis des Monitorings

10.1 Peer Reviewed Papers

Fischer A., Stocker-Waldhuber M., Seiser B., Hynek B., and Slupetzky H. **Glaciological monitoring in Hohe Tauern National Park.** *eco.mont. Journal on Protected Mountain Areas Research*, 6(1), 2014.

Weiser U., M. Olefs, W. Schöner, G. Weyss, and B. Hynek, 2015: **Correction of broadband snow albedo measurements affected by unknown slope and sensor tilts.** *The Cryosphere*, 10, 775-790, 2016. doi:10.5194/tc-10-775-2016. <http://www.the-cryosphere.net/10/775/2016/tc-10-775-2016.pdf>

Greilinger, M., Schöner, W., Winiwarter, W. and Kasper-Giebl, A. (2016). **Temporal changes of inorganic ion deposition in the seasonal snow cover for the Austrian Alps (1983–2014).** *Atmospheric Environment*, 132, 141-152., doi:10.1016/j.atmosenv.2016.02.040

Greilinger, M., Schauer, G., Baumann-Stanzer, K., Skomorowski, P., Schöner, W., & Kasper-Giebl, A. (2018). **Contribution of Saharan Dust to Ion Deposition Loads of High Alpine Snow Packs in Austria (1987–2017).** *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00126>

10.2 Tagungsbeiträge

Binder D., Zwinger T., Hauser B., Hynek B., Schöner W. and Weyss G. (2014): **Spatially distributed reconstruction of the surface mass balance of Pasterze glacier, Austria, employing a full Stokes model.** Poster presentation EGU General Assembly 2014. *Geophysical Res. Abstracts*. Vol. 16, EGU2014-15062-1, EGU General Assembly 2014.

Jaraus S., Hynek B., Weyss G., Schöner W. (2014): **Snowline monitoring by automatic cameras. Methods and accuracy.** Poster presentation at the Alpine Glaciology Meeting in Innsbruck, 27.-28.2.2014.

Greilinger M., Bartsch A., Kasper-Giebl A., Schöner W., Winiwarter W. Schreiner E. (2015): **Temporal trends of the ionic composition in the wintertime snow cover of two high alpine sampling sites over three decades (1983 – 2014),** Virtual Alpine Observatory Symp., Salzburg and IUGG – 26th General Assembly, Prague, Czech Republic.

Greilinger, M., Schauer, G., Kasper-Giebl, A. (2017). **Monitoring of Saharan Dust – Influence on aerosol composition and snow chemistry.** Conference Proceedings of the 6th International Symposium for Research in Protected Areas 2017. Salzburg, 2.-4.Nov.2017

Hynek, B., Weyss, G., Neureiter, A., Binder, D., Schöner, W., 2017: **From annual glacier mass balances towards a remote monitoring of near real-time mass changes.** Conference Proceedings of the 6th International Symposium for Research in Protected Areas 2017. Salzburg, 2.-4.Nov.2017

Greilinger, M., Kau, D., Schauer, G., Kasper-Giebl, A. (2017) **Identification of mineral dust layers in high alpine snow packs,** 23.-28.04.2017, EGU General Assembly, Vienna, Austria. (Poster)

Greilinger, M., Kau, D., Schauer, G., Kasper-Giebl, A. (2017). **Impact of Saharan dust on deposition loads at a remote high alpine monitoring site in Austria,** 28.-31.03.2017, Virtuelle Alpenobservatorium, Bozen. (Vortrag)

Greilinger, M., Flandorfer, C., Hirtl, M., Lotteraner, C., Piringer, M., Schauer, G., Baumann-Stantzer, K., Kasper-Giebl, A. (2017) **Saharan dust under observation – From modelling and tracing towards in-situ measurements,** 28.-31.03.2017, VAO= Virtuelle Alpenobservatorium, Bozen, Italien (Poster)

Hynek, B., Weyss, G., Neureiter, A., Binder, D., & Olefs, M. (2018). **Entwicklung eines Nahe-Echtzeit Gletscher-Informationssysteme**. Vortrag Österr. Klimatag 2018, Salzburg.

Hynek, B., Weyss, G., Neureiter, A., Binder, D., & Olefs, M. (2018). **Towards a remote monitoring of near real-time glacier mass balances**. Poster EGU General Assembly 2018, Wien.

Hynek, B., Prokop, A., Bührle, L., Zangerle, D., & Neureiter, A. (2018). **Multiple crowd-sourced SfM-DEMs of a valley glacier: Validation by LIDAR and surface change detection 2012-2017**. Poster EGU General Ass. 2018, Wien.

10.3 Universitäre Abschlussarbeiten

Glanz, M. 2017: **Past Evolution and Future Scenario of the Glacial Lake at Goldbergkees (Hohe Tauern, Austria)**. Master Thesis. Universität Graz.

Jaraus, S. 2016: **Georeferenzierung terrestrischer Gegenhangphotographien auf den Gletschern des Hohen Sonnblicks**. Master Thesis. Universität für Bodenkultur, Wien.

Rojs, I. 2016: **Entwicklung einer Methode zur automatisierten Bestimmung der Massenbilanz eines Alpengletschers**. Master Thesis. Universität Graz.

Glatz, C. 2016: **Klassifikation von schneebedeckten/schneefreien Gebieten für die zeitliche Entwicklung des Massenhaushaltes eines ausgewählten Gletschers (Kleinfleißkees)**. Bachelor Thesis. Universität Wien.

10.4 Presseaussendungen zu den laufenden Projektergebnissen

Hynek, 7.5.2014: Winterbilanz der Gletscher [\[Link\]](#)

Hynek, 15.10.2014: Massenverluste der Gletscher heuer etwas geringer [\[Link\]](#)

Hynek, 13.5.2015: Winterbilanz der Gletscher; neues Messprojekt von Wissenschaft und Schule [\[Link\]](#)

Hynek, 10.12.2015: Gletscher sehr stark geschmolzen [\[Link\]](#)

Hynek, 8.6.2016: Langzeitstudie am Sonnblick: weniger Luftschadstoffe in der Schneedecke [\[Link\]](#)

Hynek, 1.6.2017: Winter-Gletscherbilanz: 10% weniger Schnee [\[Link\]](#)

Hynek, 31.10.2017: Gletscher heuer extrem stark geschmolzen! [\[Link\]](#)

Hynek, 8.6.2018: Gletscher: größte Schneemenge im Winter seit 20 Jahren! [\[Link\]](#).

Neureiter, 29.11.2018: Pasterze erneut stark geschmolzen! [\[Link\]](#).

Die Presseaussendungen zum Thema Gletschermonitoring fanden meist breites Medieninteresse. Es folgten Beiträge und Interviews in fast allen österr. Tageszeitungen, im Radio und im Fernsehen (Orf ZIB, Servus TV).