

Teilprojekt Gletscherszenarien EZG Reuss/Vierwaldstättersee

Schlussbericht



Blick über die Gletscherflächen des Hüfifirns und das Einzugsgebiet der Reuss (Foto: M. Huss)

Auftraggeber:

Aufsichtskommission Vierwaldstättersee

Amt für Umwelt Nidwalden, Stansstadterstrasse 59, 6371 Stans

Amt für Umweltschutz, Klausenstrasse 4, 6460 Altdorf

Auftraggeber

Aufsichtskommission Vierwaldstättersee

Christian Wüthrich, Amt für Umweltschutz, Klausenstrasse 4, 6460 Altdorf

Gérald Richner, Amt für Umwelt Nidwalden, Stansstadterstrasse 59, 6371 Stans

Impressum

Autoren: **Dr. Andreas Linsbauer** **Dr. Matthias Huss**
Departement Geowissenschaften, Gruppe Alpine Cryosphere & Geomorphology,
Université de Fribourg / Universität Freiburg
Chemin du Musée 4
1700 Fribourg
Tel: 026 300 90 32 Tel: 026 300 90 15
E-Mail: andreas.linsbauer@unifr.ch E-Mail: matthias.huss@unifr.ch

Seitenzahl: 23

Verteiler

Aufsichtskommission Vierwaldstättersee:
Christian Wüthrich, Gérald Richner

Departement Geowissenschaften, Université de Fribourg / Universität Freiburg:
Dr. Andreas Linsbauer, Dr. Matthias Huss, Prof. Dr. Martin Hoelzle

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Grundlagen	4
3	Die Gletscher im EZG der Reuss	6
3.1	Gletscherinventare: Veränderungen von Flächen und Volumen	6
3.2	Gletschervolumen und Eisdicken	7
3.3	Gletscherbetttopografie und Übertiefungen	9
4	Zukünftige Gletscherentwicklung/szenarien	12
4.1	Gletscher Rückzug	12
4.2	Gletscher-Speicheränderung.....	13
4.3	Entwicklung der Gletscherabflüsse und Vergletscherung	15
5	Schlussbemerkungen	20
6	Anhang.....	21

1 Einleitung

Im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees können als Folge des Klimawandels periodische Engpässe im Wasserdargebot auftreten. Mit einer neuen, standardisierten Methode werden gefährdete Gebiete identifiziert und auf einer Karte dargestellt. Dies schafft die Grundlagen für ein gezieltes Wassermanagement.

Problemstellung Im Auftrag des BAFU soll im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees eine Methode zur Situationsanalyse des Wasserdargebots und -bedarfs und zur Erstellung von Wasserknappheitskarten verwendet und getestet werden. Die zukünftige Entwicklung der Gletscher ist in dieser Methode allerdings nur rudimentär berücksichtigt. Es fehlen Informationen und Daten zu den zukünftigen Gletscherszenarien.

Auftrag Die Aufsichtskommission Vierwaldstättersee hat das Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg beauftragt, basierend auf den bereits publizierten Modellen und Resultaten, Gletscherszenarien für das EZG Vierwaldstättersee/Reuss bereit zu stellen.

Folgende Arbeiten sollen durchgeführt werden:

- Abschätzung der vorhandenen Eisreserven der Gletscher,
- Berechnung der Gletscherbett-Topografien und Lokalisierung von Übertiefungen (potentielle zukünftige Seen),
- Charakterisierung der Übertiefungen (Fläche, Volumen, Tiefe) und eine grobe Abschätzung der Entstehungswahrscheinlichkeit für Seen,
- Modellierung der Gletscherentwicklung basierend auf Klimaszenarien,
- Abschätzung der zukünftigen Abflussentwicklung der Gletscher.

2 Grundlagen

Für das Erarbeiten und Zusammenstellen der Daten und Abbildungen und die Verfassung des Schlussberichtes konnte auf folgende Grundlagen zurückgegriffen werden:

Studien und Modelle

[S1] Farinotti, D. et al., 2017. How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison eXperiment, *The Cryosphere*, 11(2), pp.949–970.

- [S2] Fischer, M. et al., 2014. The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), pp.933–945.
- [S3] Fischer, M., Huss, M. & Hoelzle, M., 2015. Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980-2010. *The Cryosphere*, 9(2), pp.525–540.
- [S4] Frey, H. et al., 2014. Estimating the volume of glaciers in the Himalayan-Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), pp.2313–2333.
- [S5] Gletscherberichte 1881-2017. "Die Gletscher der Schweizer Alpen", Jahrbücher der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) herausgegeben seit 1964 durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. No. 1-136, (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>).
- [S6] Huss, M., et al., 2012-2016. „Gletscher-Speicheränderung in der Schweiz“, Berichte zur Gletscher-Speicheränderung in der Schweiz bezogen auf Hydrologische Jahre. Erstellt von der Universität Freiburg und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich zuhanden des BAFUs. No. 1-5.
- [S7] Huss, M. & Farinotti, D., 2012. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(4), pp.1–10.
- [S8] Huss, M. & Hock, R., 2015. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, pp.1–22. Available at: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2015.00054>.
- [S9] Linsbauer, A. et al., 2013. Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 54(63), pp.241–253.
- [S10] Linsbauer, A. et al., 2016. Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya-Karakoram region. *Annals of Glaciology*, 57(71), pp.119–130.
- [S11] Linsbauer, A., Paul, F. & Haeberli, W., 2012. Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with glabtop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(3), pp.1–17.

3 Die Gletscher im EZG der Reuss

3.1 Gletscherinventare: Veränderungen von Flächen und Volumen

*Gletscher-
inventare*

Gletscherinventare umfassen die Umrisse, Flächen und verschiedene Kenngrößen zu einem bestimmten Zeitpunkt für eine möglichst umfassende Stichprobe aller Gletscher eines Gebietes. Dafür werden die Abgrenzung und Fläche jedes einzelnen Gletschers zu einem Zeitpunkt bestimmt. Aus topographischen Karten und Höhenmodellen der jeweiligen Periode werden anschliessend für jeden Gletscher topographische Kenngrößen (z.B. minimale, mittlere, und maximale Höhe) abgeleitet. Für die Schweizer Alpen liegen solche Inventare für die Jahre 1850 (nachträglich rekonstruiert), 1973 und 2010 (aus Luftbildern) und für 1998/99 und 2003 (aus Satellitendaten) vor.

*Vergletscherung
EZG Reuss*

Für die Gletscher im EZG des Vierwaldstättersees bzw. der Reuss werden in Abbildung 1 die Schweizer Gletscher Inventare (SGI) von 1973, 2000 und 2010 dargestellt. Die Tabelle 1 zeigt die flächenmässigen Vergletscherung und das darauf basierende geschätzte Eisvolumen (siehe dazu Kapitel 3.2).

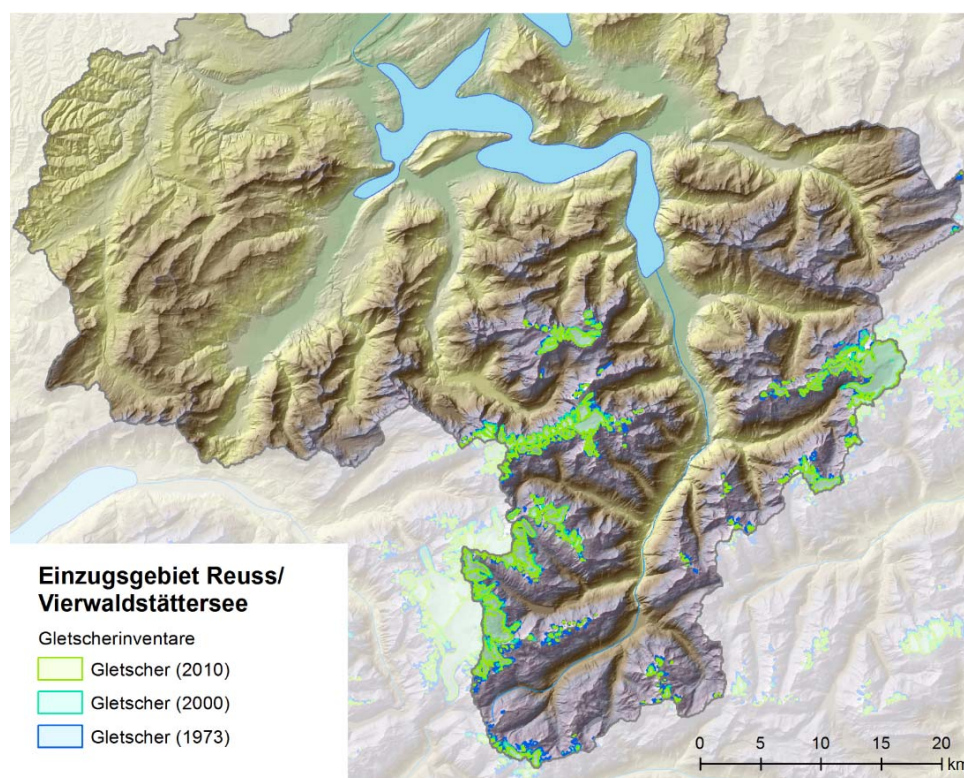


Abbildung 1: Vergletscherung des EZG Reuss gemäss den Schweizer Gletscherinventaren von 1973, 2000 und 2010.

Tabelle 1: Vergletscherte Flächen und geschätztes Eisvolumen im EZG Reuss gemäss den Schweizer Gletscherinventaren SGI 1973, 2000 und 2010 und modellierten Eisdicken.

	SGI 1973	SGI 2000	SGI 2010
vergletscherte Fläche (km ²)	85.5	71.3	60.8
geschätztes Eisvolumen (km ³)	3.5-4.0	2.8-3.2	2.3-2.6

**Eisvolumen-
änderung**

In Kombination mit zu den Inventaren zeitlich passenden Höhenmodellen wurde, basierend auf dem SGI 1973 und dem SGI 2010, die Flächen- und Massenveränderung für die Gletscher ermittelt. Für das EZG Reuss ergibt sich daraus eine mittlere Massenänderung von -0.62 m/Jahr . Das entspricht einem Verlust von ca. 1.4 km^3 Gletschereis für die Zeitperiode 1973-2010. Dieser jährliche Eisdickenverlust aufgeteilt auf die einzelnen Gletscher ist in Abbildung 2 dargestellt.

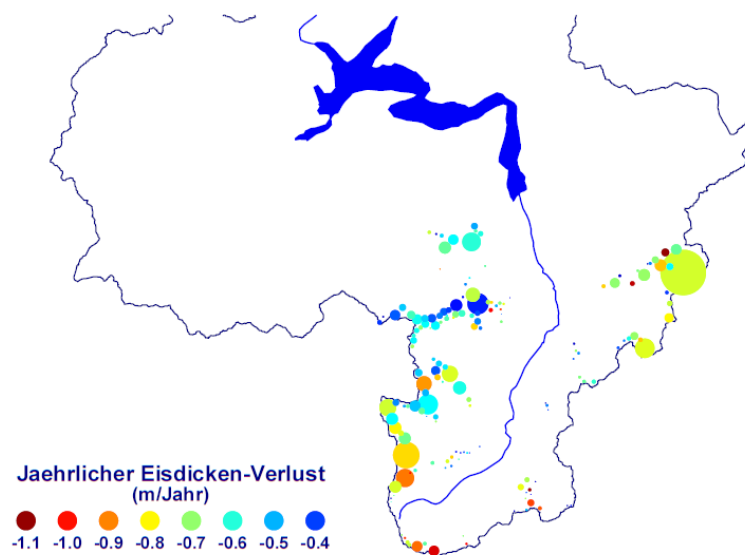


Abbildung 2: Berechneter jährlicher Eisdickenverlust (in m/Jahr) pro Gletscher für die Zeitperiode 1973-2010.

3.2 Gletschervolumen und Eisdicken

**Modellieren von
Eisdicken**

Basierend auf Gletscherumrissen und Höhenmodellen (z.B. von swisstopo) lassen sich die Eisdicken für Gletscher modellieren. Es gibt dafür verschiedene Ansätze und Modelle. Meist wird dabei die Eisdicke von der Oberflächenneigung des Gletschers abgeleitet, z.B. über eine Parametrisierung der Schubspannung oder über das Berücksichtigen der Massenerhaltung und des Eisfließens.

**Räumlich ver-
teilte Eisdicken**

Die Resultate dieser Modelle sind räumlich verteilte Gletscher-Eisdicken-Schätzungen wie in Abbildung 3 gezeigt. Die hier dargestellten Eisdicken basieren auf den Gletscherumrissen des SGI 2000 und dem swisstopo Höhenmodell (DHM25) von 1995. Für das gesamte Einzugsgebiet wie auch für die einzelnen Gletscher können statistische Kennwerte (wie z.B. minimale, maximale und mittlere Dicke, Volumen) extrahiert werden (siehe Abbildung 4, Tabelle 2). Die geschätzten Eisvolumen für die Gletscher des EZG Reuss betragen für das Jahr 2010 noch $2.3 - 2.6 \text{ km}^3$ (Tabelle 1).

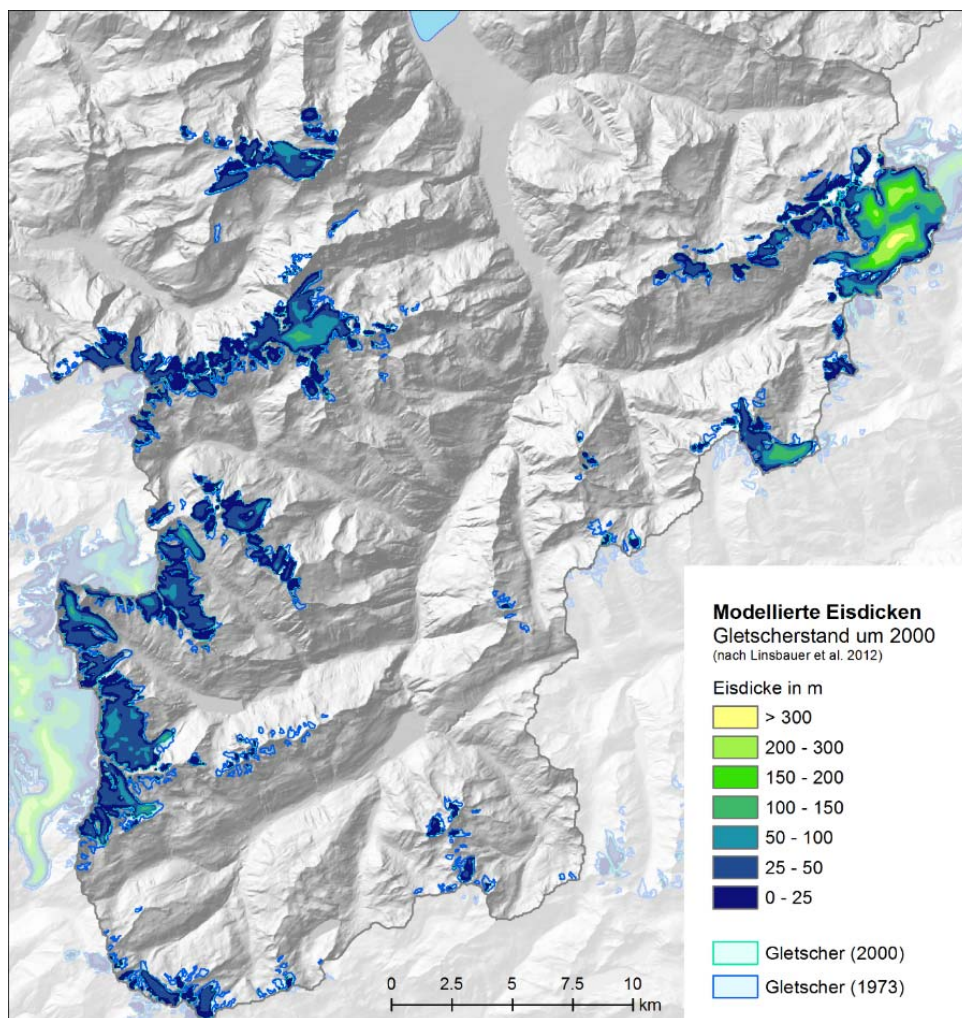


Abbildung 3: Modellerte Eisdickenverteilung für die Gletscher im EZG Reuss.

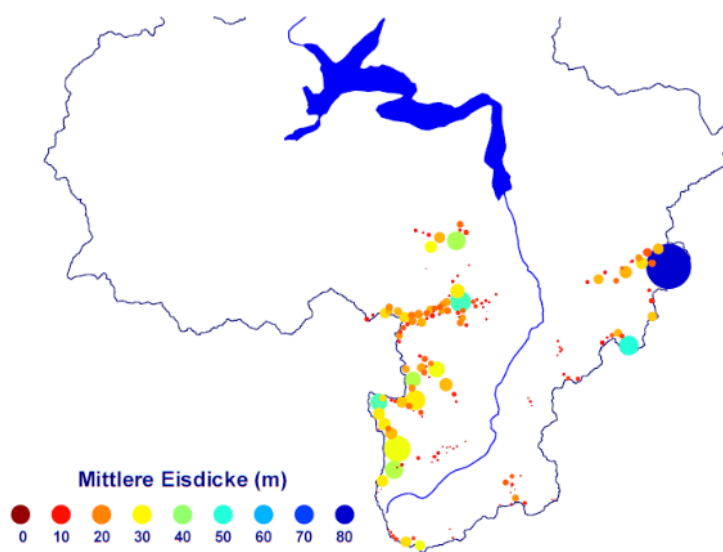


Abbildung 4: Mittlere Eisdicken für die Gletscher des EZG Reuss für das SGI 2010.

Hüfifirn

Der Hüfifirn ist der prominenteste Gletscher im ganzen EZG. Dieser Gletscher bedeckt eine Fläche von ca. 13 km² weist auch die grössten Eisdicken auf. Durchschnittlich ist das Eis fast hundert Meter mächtig. An der dicksten Stelle schätzen wir, dass rund 360 Meter Eis vorhanden sind. Das ergibt ein Gesamtvolumen von knapp 1.5 km³ im Jahr 2000 (Tabelle 2). Der Hüfifirn vereint damit in etwa die Hälfte des gesamten Eisvolumens im EZG Reuss.

Tabelle 2: Flächen, geschätzte Eisdicken und Volumen für die grössten Gletscher im EZG Reuss für den Gletscherstand um das Jahr 2000.

Gletschername	Fläche (km²)	Eisdicke (m)		Volumen (km³)
		maximale	mittlere	
Hüfifirn	13.22	367	111	1.464
Dammagletscher	4.75	112	39	0.184
Flachensteinfirn	2.91	102	28	0.082
Glatt Firn	2.88	117	56	0.161
Brunnifirn	2.52	148	57	0.145
Tiefengletscher	2.41	112	31	0.074
Blüemlisalpfin	2.05	90	36	0.074
Chelengletscher	2.02	122	34	0.069

3.3 Gletscherbetttopografie und Übertiefungen

Gletscherbett

Um die Topographie des Gletscherbettes zu visualisieren, werden die räumlich verteilten Eisdicken Modellierungen von den Oberflächenmodellen (Höhenmodellen) abgezogen. Diese Subtraktion ergibt ein digitales Höhenmodell ohne Gletscher (Abbildung 5).

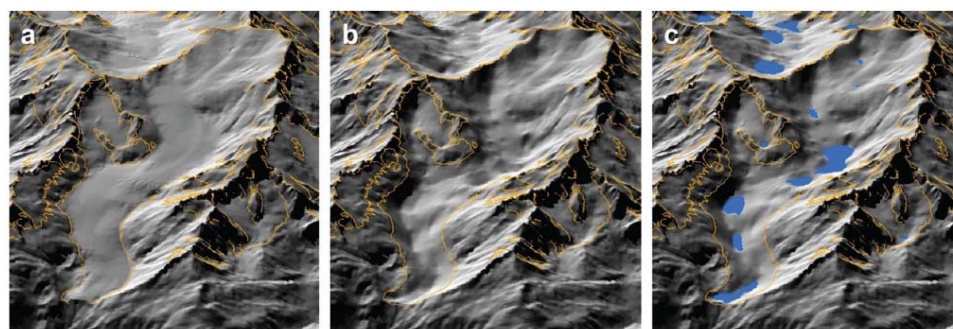


Abbildung 5: Rhonegletscher aus der Vogelperspektive a) Höhenmodell des Gletschers, b) modellierte Gletscherbetttopographie und c) detektierte Übertiefungen.

Glaziale Übertiefungen als zukünftige Seen

Da die erosiven Kräfte eines Gletschers in der Lage sind, grosse Übertiefungen in den Gletscherbetten auszuheben, können in den modellierten Gletscherbetten diese glazialen Übertiefungen detektiert werden (Abbildung 5). Mit dem fortschreitenden Temperaturanstieg und dem Gletscherschwund werden die Gletscherbetten und deren Übertiefungen freigelegt. In solchen Übertiefungen können sich nach dem Rückgang der Gletscher neue Seen entwickeln. Jüngste Beispiele aus der Schweiz sind der „Gletschersee“ beim Unterer Grindelwaldglet-

scher, der See am Triftgletscher, die neuen Seen im Vorfeld des Palü- und Gauligletschers oder der gegenwärtig rasch wachsende See an der Zunge des Rhonegletschers. Der Hufisee im EZG Reuss ist ein klassischer Übertiefungssee, der sich nach 1960 nach dem Rückzug des Gletschers gebildet hat wie Abbildung 6 sehr schön zeigt. Als Folge des fortgesetzten Gletscherschwundes dürften innerhalb der nächsten Jahre und Jahrzehnte zahlreiche weitere neue Seen entstehen.

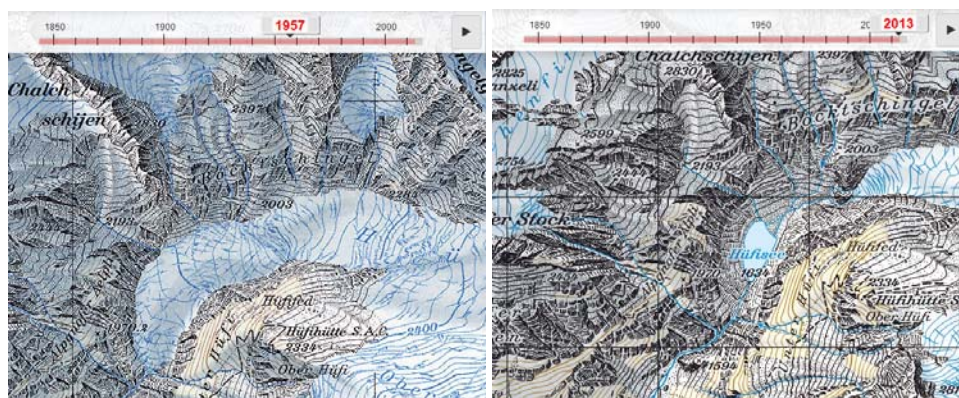


Abbildung 6: Ausschnitte der swisstopo Landeskarte von 1957 und 2013, welche die Entstehung des Hufisees in einer klassischen Gletscherübertiefung zeigen.

Übertiefung =
See?

Allerdings muss nicht an jedem Ort an dem ein Modell eine Übertiefung prognostiziert, ein See entstehen. Übertiefungen können zu flach sein, sie können sich nach dem Rückzug des Eises schnell mit Sedimenten füllen oder in Wirklichkeit nicht vorhanden sein. Mit grosser Wahrscheinlichkeit gibt es eine Übertiefung im Gletscherbett, wenn der Gletscher eine deutliche Neigungsänderung von flach zu steil und eine Verengung vorweist, also über einen schmalen Eisfall fliesst (Abbildung 7). Der Hufifirn zum Beispiel weist oberhalb seiner aktuellen Gletscherzunge zwei solche Stellen auf, an denen eine grosse Übertiefung vorhanden sein könnte und wo in Zukunft mit einem Gletschersee zu rechnen ist.

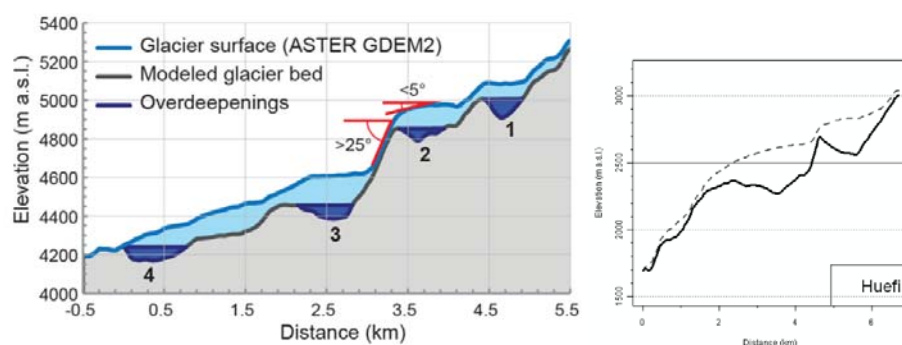


Abbildung 7: Längsprofil eines Gletschers zur Illustration der möglichen Übertiefungen in dessen Bett und ein Längsprofil des Hufifirns.

*Übertiefungen
im EZG Reuss*

Abbildung 8 gibt einen Überblick über die modellierten Übertiefungen, also die potentiellen zukünftigen Seen im EZG Reuss. Dargestellt sind die Übertiefungen mit einem Volumen grösser als 10^6 m^3 aus vier verschiedenen Modellläufen. Die einzelnen Modellläufe ergeben unterschiedliche Werte in Bezug auf Fläche, Volumen und Tiefen, aber sie bewegen sich in derselben Grössenordnung. Bezüglich der Lokalisierung der Übertiefungen sind sich die Modelle einig: Die Orte, an welchen die Übertiefungen prognostiziert werden, sind relativ robust. Grosse Übertiefungen sind im Bett des Hufifirns zu erwarten und allenfalls im Bereich des Blüemlisalp- und des Brunnifirns. Die Übertiefungen im Zungenbereich des Damma-, Tiefen- und Sidelengletschers haben sich schon mehrheitlich mit Sedimenten gefüllt.

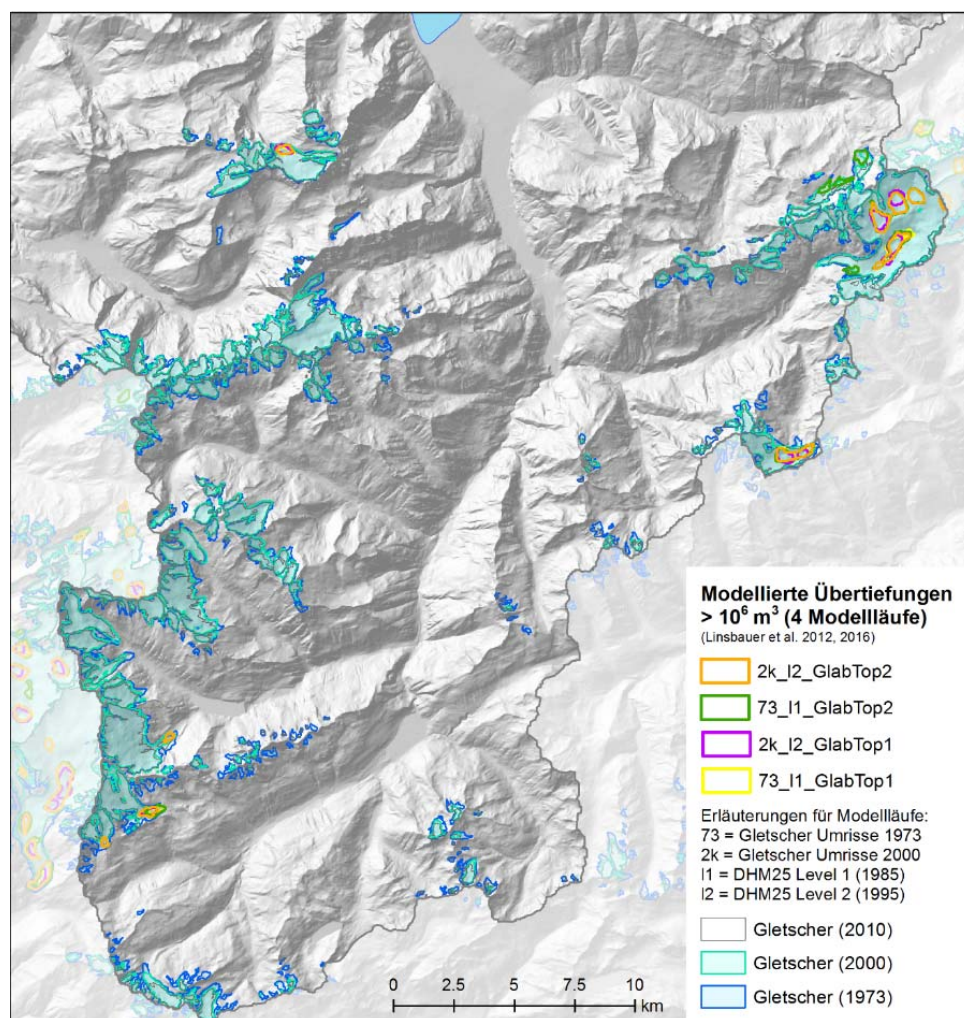


Abbildung 8: Modellierte Übertiefungen (potentielle zukünftige Seen) in den Gletscherbetten des EZG Reuss.

4 Zukünftige Gletscherentwicklung/szenarien

4.1 Gletscher Rückzug

Modelle für die zukünftige Gletscherentwicklung

Gletscherinventare, Höhenmodelle, modellierte Eisdicken und Massenbilanzmodelle erlauben zusammen mit Szenarien für die Klimaentwicklung die Geometrie-Veränderungen von Gletschern zu berechnen. Solche Modelle werden in der Regel zu einem Zeitpunkt initialisiert, an dem die Gletscher einigermassen im Gleichgewicht mit dem Klima waren. Für die Schweiz war das in den 1970er/80er Jahren der Fall, weshalb sich das SGI 1973 und die darauf basierende Eisdickenverteilung als Startpunkt für eine Modellierung der Gletscherzukunft anbieten. Die in Abbildung 9 dargestellte zukünftige Gletscherentwicklung basiert auf einem moderatem Klimaszenario mit einem Temperaturanstieg von $+2^{\circ}\text{C}$ bis Mitte Jahrhundert, und einem Temperaturanstieg von $+4^{\circ}\text{C}$ bis Ende Jahrhundert.

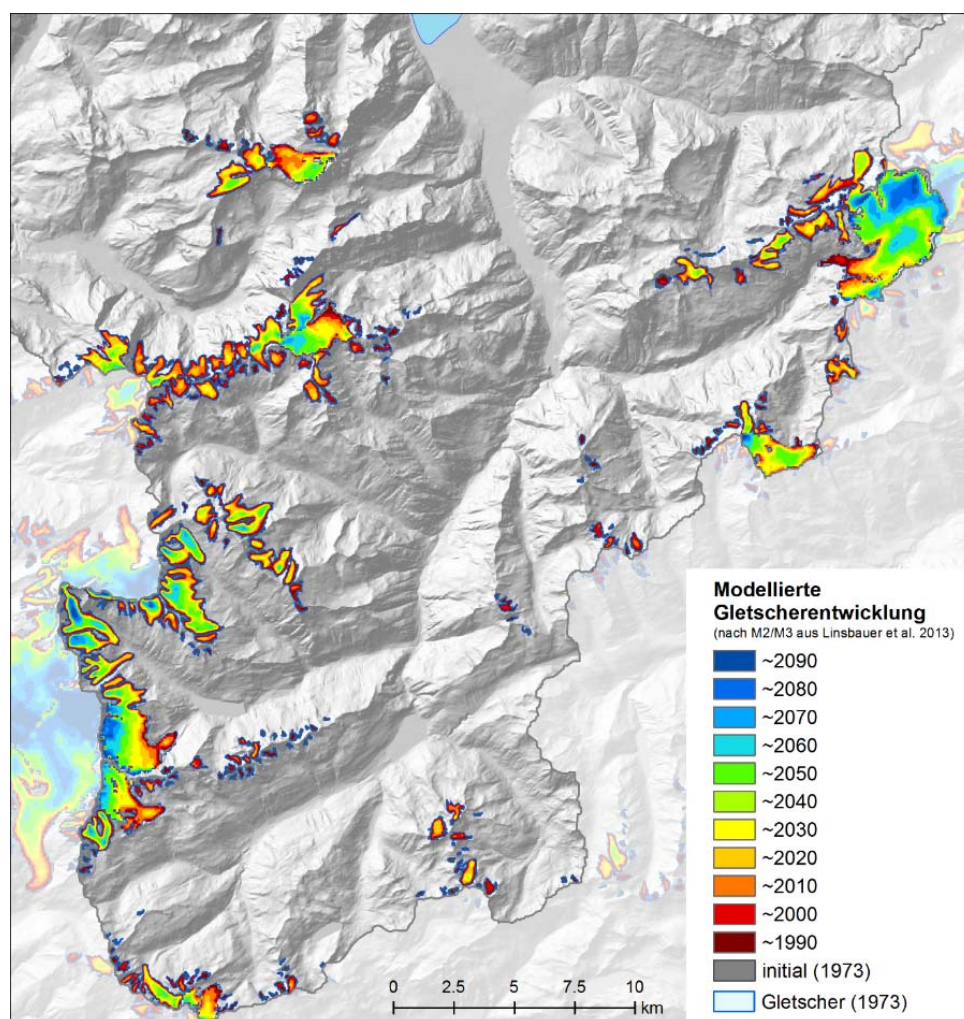


Abbildung 9: Modellierter zukünftiger Gletscherentwicklung bis Ende Jahrhundert für ein moderates Klimaszenario.

<i>Modell-unsicherheiten</i>	Die dargestellte Gletscherentwicklung ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Die verwendeten Modelle enthalten viele Vereinfachungen und wurden für die regionale Abschätzung eines grösseren stark vergletscherten Gebietes entwickelt. Die Modellierung beruht auf einer Schätzung der Eisdicke, welche an sich schon einen grossen Unsicherheitsbereich hat. Die Reaktion der Gletscher erfolgt auf einen linearen Temperaturanstieg ohne Berücksichtigung des Niederschlags und spezielle Bedingungen wie sie für die Gletscher im EZG Reuss gelten (z.B. starke Beschattung, Ernährung mit Lawinenschnee).
<i>Gesamtheitliche Entwicklung</i>	Die einzelnen dargestellten Zeitschritte für einen spezifischen Gletscher müssen nicht unbedingt der Wirklichkeit entsprechen, die Abbildung gibt einen Überblick über die gesamtheitliche Gletscherentwicklung der Region. Modellrechnungen verschiedener Komplexität für realistische Szenarien weiterer Erwärmung ergeben seit vielen Jahren übereinstimmend, dass wesentliche Teile des noch verbleibenden alpinen Eisvolumens bereits bis zur Jahrhundertmitte abschmelzen und auch grosse Gletscher in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts bis auf kleine Reste verschwinden dürften.

4.2 Gletscher-Speicheränderung

<i>Gletscher-Speicher-änderung</i>	Die Universität Freiburg führt zusammen mit der ETH Zürich seit 2011 für das BAFU eine jährliche Analyse der Gletscher-Speicheränderung in grossen Schweizer Einzugsgebieten durch. Dabei fliessen massgebend die durch verschiedene Hochschulen gemessenen Massenbilanzen von Schweizer Gletschern ein, welche die Veränderung des Eisvolumens im jeweiligen Jahr dokumentieren. Diese Daten werden mit aktualisierten Informationen zur vergletscherten Fläche in den Schweizer Alpen und Modellstudien zur räumlichen Variabilität der Gletscher-Massenbilanz kombiniert. Für jedes vergletscherte Gross-Einzugsgebiet kann somit das Wasservolumen errechnet werden, welches im hydrologischen Jahr zusätzlich durch Gletscherschmelze geliefert, bzw. durch die Gletscher zurückgehalten wurde.
<i>Gletscher-Speicheränderung für das EZG Reuss</i>	Abbildung 10 zeigt die Gletscher-Speicheränderung (dS) für das EZG Reuss. Dargestellt ist der Prozentsatz der Speicheränderung zum Gesamtvolumen des vorhandenen Gletschereises. Die Jahre 2013, 2014 und 2016 zeigen Jahre mit weniger intensiven Verlusten im Gegensatz zu den Jahren 2011, 2012 und 2015. Die relativen jährlichen Verluste bewegen sich zwischen 0.5% und 5.3% des Eisvolumens. Dies ist im schweizweiten Vergleich eher viel, da die Gletscher im EZG Reuss ziemlich klein und damit dünner sind. Die Gletscher-Speicheränderung ist in erster Linie eine Funktion der Gletscherfläche, aber regionale Unterschiede der Massenbilanz beeinflussen die Magnitude der Speicheränderung. Die Gletscher im EZG Reuss bürsteten in den letzten Jahren zwischen 124 und 11 Millionen m ³ an Eis pro Jahr ein.

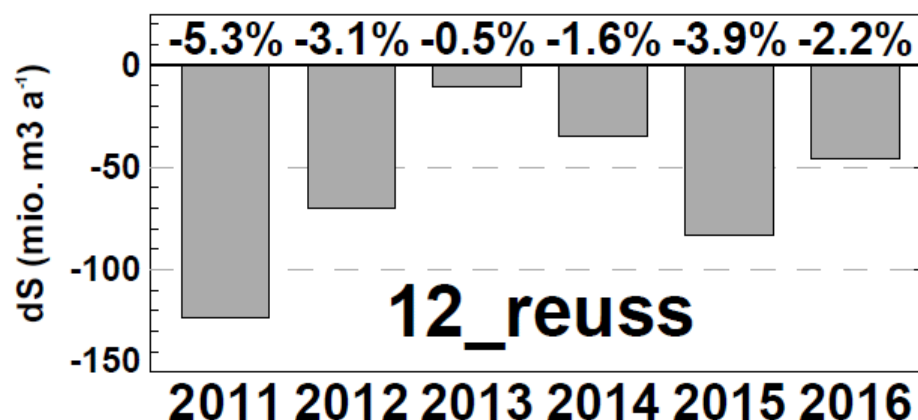


Abbildung 10: Gletscherspeicheränderung für das EZG Reuss.

Massenbilanz-gletscher

Die Ermittlung der Gletscher-Speicheränderung basiert auf direkten Messungen von Gletscher-Massenbilanzen. Im EZG Reuss werden seit 2012 die saisonalen Massenbilanzen von Schwarzbach- und St. Annafirm durch die Universität Freiburg gemessen. Abgesehen von der Messung 2013 am Schwarzbachfirm, sind alle jährlichen Massenbilanzen negativ (Abbildung 11) und die kumulierte Massenbilanzkurve zeigt einen stark negativen Trend.

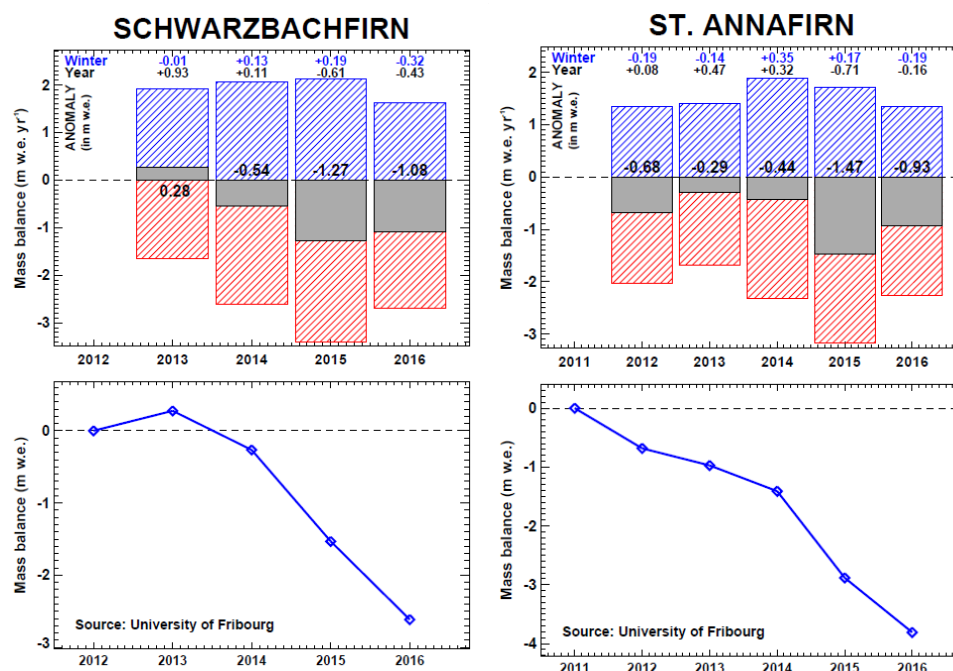


Abbildung 11: Massenbilanzen für Schwarzbach- und St. Annafirn (blau: Winterbilanz (Akkumulation); rot: Sommerbilanz (Ablation); grau: Jahresbilanz).

4.3 Entwicklung der Gletscherabflüsse und Vergletscherung

Abfluss- Modellierung

Um die zukünftige Veränderung der Abflüsse für alle Gletscher im EZG Reuss abschätzen zu können, greifen wir auf Resultate eines Gletscher-Modells zurück, das für grossflächige Anwendungen, also für die ganzen Alpen, bzw. die ganze Welt entwickelt wurde. Dabei wird die Schmelze, sowie der Rückzug aller Gletscher einzeln basierend auf globalen Klimamodellen berechnet. Das Modell ist aber vereinfacht; genauere Studien spezifisch für das EZG Reuss wären möglich. Trotzdem erlaubt es das Modell die Abflussentwicklung bis 2100 auf jährlicher, sowie auf monatlicher Basis für das EZG Reuss, sowie beliebige Teileinzugsgebiete zu analysieren. Die Resultate beziehen sich ausschliesslich auf die um 2003 vergletscherten Flächen des EZG Reuss (Gletscherabfluss) und nicht auf das gesamte Gebiet. Dafür wäre eine Kombination mit hydrologischen Modellen nötig.

Jahresabfluss, Gletscherfläche

Der Klimawandel und der damit verbundene Gletscherschwund haben einen Einfluss auf die Entwicklung von Jahresabflüssen und Vergletscherung. Abbildung 12 zeigt eine Zukunftsprognose für die Entwicklung von Jahresabfluss und Gletscherflächen aller im Jahr 2003 vergletscherten Gebiete im EZG Reuss. Die Einzugsgebiete bleiben bei dieser Modellierung bis 2100 gleich gross, aber die Gletscherflächen werden immer kleiner. Bis Mitte Jahrhundert werden voraussichtlich rund 60% der Gletscherfläche im Vergleich zu heute verschwunden sein. Die Unsicherheit aufgrund der Klimaentwicklung ist beträchtlich: Gemäss einigen Klimamodellen könnte bereits um 2060 alles Gletschereis im EZG Reuss geschmolzen sein, nach anderen Modellen wäre um 2060 noch mehr als die Hälfte vorhanden. Der Einfluss des Gletscherrückgangs auf den modellierten Jahresabfluss aus den heute vergletscherten Flächen ist relativ gering. Zwischen 2000 und 2020 ist ein kleiner Anstieg zu erkennen, der damit erklärt wird, dass im Gletschereis gespeichertes Wasser freigesetzt wird. Anschliessend nehmen die Jahresabflüsse leicht ab und pendeln sich Ende Jahrhundert bei ca. 80% im Vergleich zum Jahr 2000 ein.

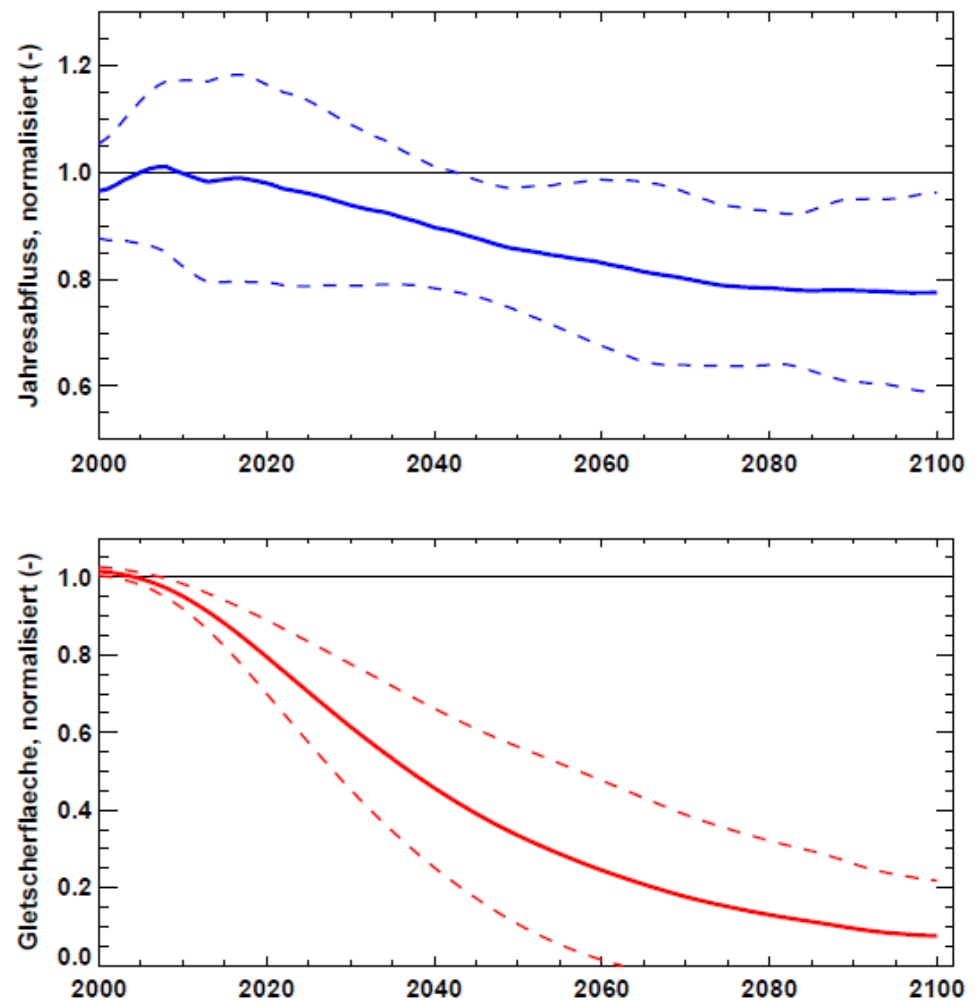


Abbildung 12: Entwicklung Jahresabfluss und Gletscherfläche im EZG Reuss.

Sommerabfluss

Die Gletscherschmelze spielt für den Abfluss vor allem in den Sommermonaten eine wichtige Rolle. Während sich der Jahresabfluss in vergletscherten Gebieten nur relativ wenig ändert, ist der Einfluss von Gletscherrückgang auf das Abflussregime stark. Im Zuge des Klimawandels nimmt der Juni-Abfluss bis Ende Jahrhundert deutlich zu, während der August-Abfluss extrem zurückgeht (Abbildung 13).

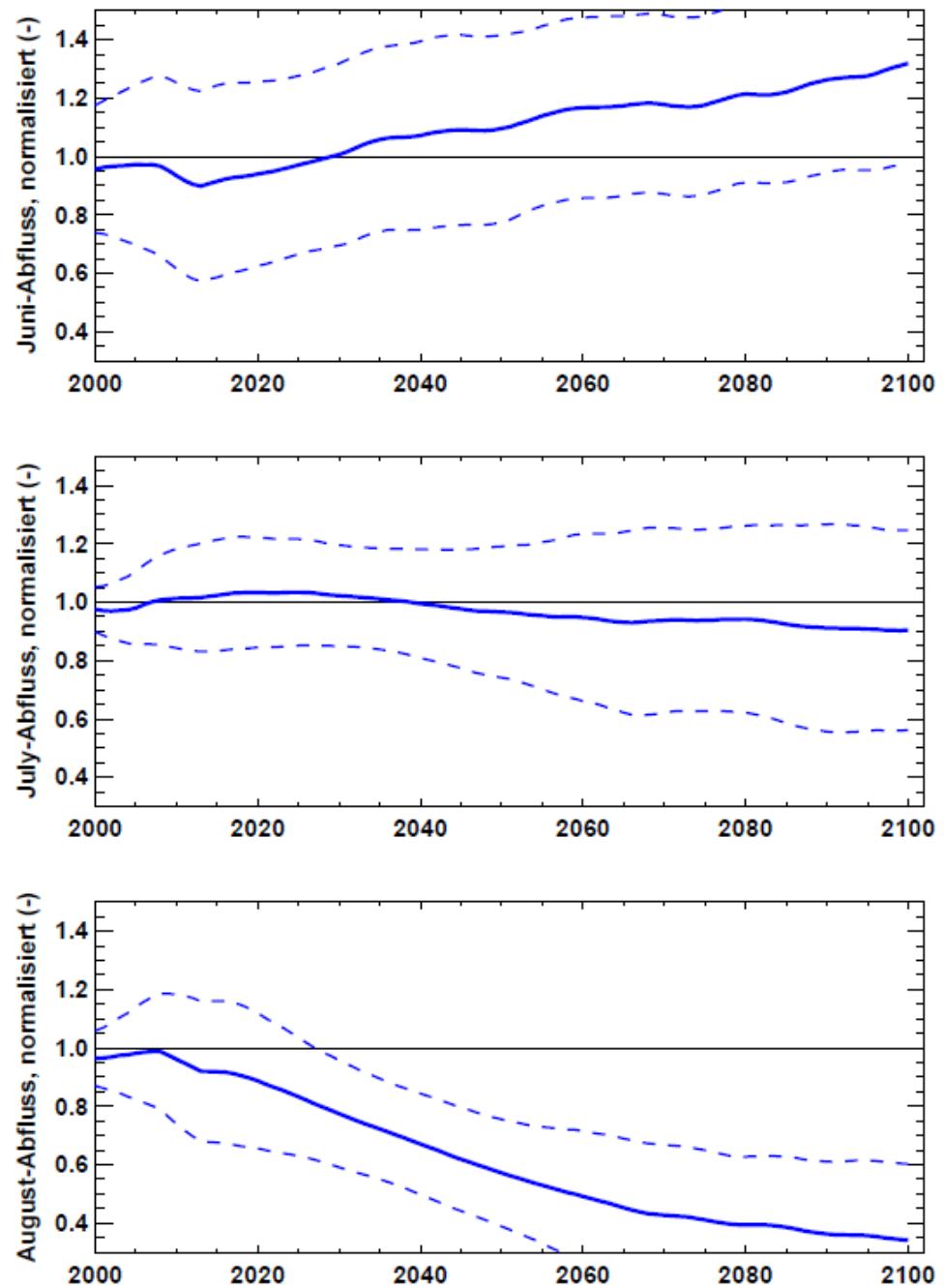


Abbildung 13: Entwicklung des Sommerabflusses im EZG Reuss.

Abflussregime

Dieses Muster zeigt sich auch im Abflussregime der Gletscher im EZG Reuss (Abbildung 14). Die Abflussspitzen verschieben sich vom August in den Juni. Ende Jahrhundert tragen die Gletscher im EZG Reuss im Hochsommer nur noch einen kleinen Teil zum Gesamtabfluss des EZGs bei.

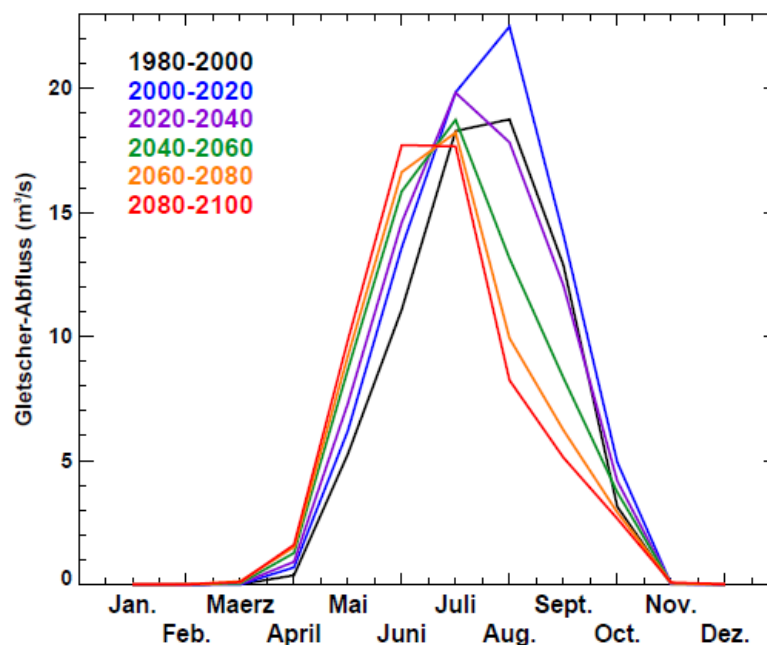


Abbildung 14: Entwicklung des Abflussregimes im EZG Reuss.

Abfluss- Änderung

Abbildung 15 zeigt die Entwicklung der zukünftigen Abflüsse von Gletschern relativ zur Periode 1980-2000 für das ganze EZG Reuss. In Blau ist der Referenz-Gletscherabfluss für das Jahr 1990, in Rot sind die erwarteten Änderungen in Zeitschritten dargestellt. Bis 2010 trägt die Gletscherschmelze zu einem höheren Abfluss in allen Monaten des Jahres bei. Mit der Zeit verlagert sich der Abfluss immer stärker in den Frühling und Frühsommer. Vor allem im August und September ist bis 2100 mit einem Abfluss-Rückgang aus den heute vergletscherten Gebieten von bis zu 60% zu rechnen.

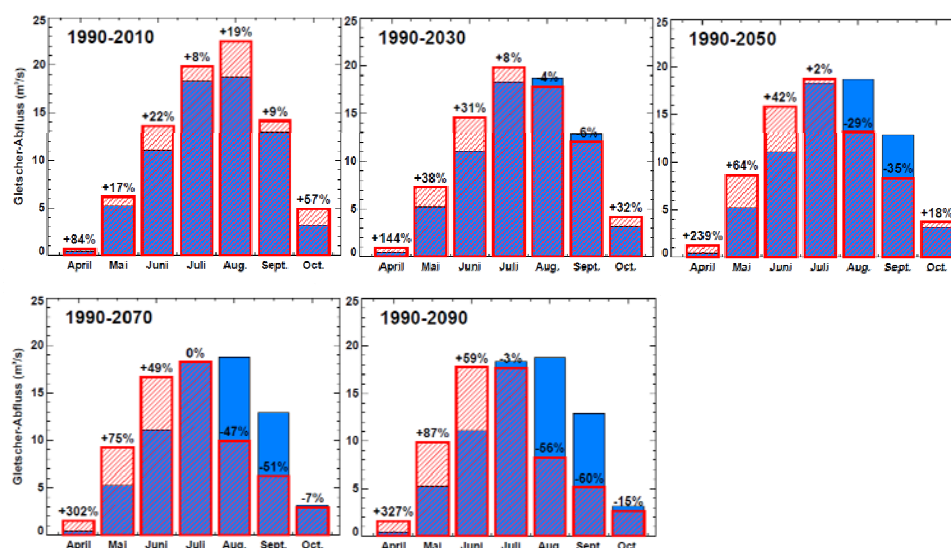


Abbildung 15: Veränderung des Gletscherabflusses in Zeitschritten.

*Analyse für
Teileinzugs-
gebiete*

Die in diesem Kapitel vorgestellten Resultate und Analysen beziehen sich auf alle Gletscher im EZG Reuss, können aber auch für jedes beliebige Teileinzugsgebiet vorgenommen werden. Um die Übersicht nicht zu verlieren, werden in diesem Bericht die Abbildungen exemplarisch nur für das gesamte EZG Reuss gezeigt. Die Analysen wurden aber auch für die „hydrologischen Bilanzierungsräume“ (vom GIUB) und die „Einzugsgebiete 40 km²“ (vom BAFU) erstellt (für eine Übersicht, siehe Abbildung 16 im Anhang). Diese Resultate liegen in diesem Bericht in einer tabellarischen Zusammenstellung vor. Auf Anfrage können die entsprechenden Grafiken (Abbildungen 12-15 für Teileinzugsgebiete) und detaillierten Datenreihen aber geliefert werden.

*Bilanzierungs-
räume*

Tabelle 3 im Anhang zeigt eine Zusammenstellung der Resultate basierend auf den 12 vergletscherten hydrologischen Bilanzierungsräumen (Datengrundlage GIUB) des EZG Reuss. Aufgelistet sind pro Einzugsgebiet die vergletscherte Startfläche (Fläche 2003), die prozentuale Gletscher-Flächenänderung (ΔA), der mittlere Gletscherabfluss für Juli und August für die Zeitperiode 2000-2020 ($Q_{gl,Jul}$ 2010, $Q_{gl,Aug}$ 2010), sowie die prozentuale Veränderung des Abflusses für Juli und August (ΔQ_{Jul} , ΔQ_{Aug}) im Laufe der Zeit. Alle Werte in der Tabelle (ausser die Fläche 2003) stehen für ein Mittel einer 20-Jahresperiode und die angegebene Jahreszahl dient als Platzhalter und Namensgeber für die entsprechende Periode (z.B.: 2010 ist der Platzhalter für die Periode 2000-2020).

*Einzugsgebiete
40 km²*

Analog zu den Bilanzierungsräumen ist in Tabelle 4 im Anhang die Analyse basierend auf dem BAFU Datensatz „Einzugsgebiete 40km²“ zusammengefasst.

5 Schlussbemerkungen

<i>Gletscherdaten</i>	Für das Projekt Wasserknappheitskarten der Aufsichtskommission Vierwaldstättersee hat das Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg Daten und Informationen zu den Gletscherszenarien für das EZG Vierwaldstättersee/Reuss zusammengestellt. Dabei wurden die Eisreserven der Gletscher abgeschätzt, die Gletscherbetttopographien berechnet und die zukünftigen Übertiefungen lokalisiert und charakterisiert, sowie die Gletscherentwicklung bis Ende Jahrhundert modelliert um Angaben über die zukünftigen Veränderungen in der Gletscherflächen und des Gletscher-Abflusses machen zu können.
<i>Veränderung der Vergletscherung</i>	Annähernd 60 km ² des EZG Reuss sind nach wie vor vergletschert und speichern ein Eisvolumen von 2.3 – 2.6 km ³ . Für die Zeitperiode von 1973-2010 wurde ein Verlust von 15 km ² Gletscherfläche und 1.4 km ³ Gletschermasse festgestellt. Mit dem Klimawandel und dem damit verbunden Gletscherschwund ist mit einem weiteren starken Rückgang der Gletscher zu rechnen. Bis Ende Jahrhundert werden voraussichtlich 90% der Gletscherflächen im Vergleich zu heute verschwunden sein. Die Unsicherheit aufgrund der Klimaentwicklung ist allerdings beträchtlich.
<i>Übertiefungen</i>	Mit dem Rückgang der Gletscher werden vom Eis erodierte Übertiefungen in Felsuntergrund freigelegt, in denen in Zukunft Seen entstehen können. Grosse Übertiefungen (zukünftige Seen) sind im Bett des Hüfifirns zu erwarten und allenfalls im Bereich des Blüemlisalp- und des Brunnifirns. Die Übertiefungen im Zungenbereich des Damma-, Tiefen- und Sidelengletschers haben sich schon mehrheitlich mit Sedimenten gefüllt.
<i>Veränderungen des Gletscher Abflusses</i>	Die Gletscherschmelze spielt für den Abfluss vor allem in den Sommermonaten eine wichtige Rolle. Während sich der Jahresabfluss in vergletscherten Gebieten nur relativ wenig ändert, ist der Einfluss von Gletscherrückgang auf das Abflussregime stark. Die Abflussspitzen verschieben sich vom August in den Juni. Ende Jahrhundert tragen die Gletscher im EZG Reuss im Sommer nur noch einen kleinen Teil zum Gesamtabfluss des EZGs bei. Vor allem im August und September ist bis 2100 mit einem Abfluss-Rückgang aus den heute vergletscherten Gebieten von bis zu 60% zu rechnen.

Uni Fribourg

9. Mai 2017

Dr. Andreas Linsbauer



Dr. Matthias Huss



6 Anhang

Tabelle 3: Analyse von Vergletscherungsgrad und Abflussänderung in den vergletscherten hydrologischen Bilanzierungsräumen des EZG Reuss (Erläuterungen siehe Text).

Bilanzierungsräume EZG-Name	Fläche 2003 (km ²)	Relativ zu 2010		Q _{gl,Jul} 2010 (m ³ s ⁻¹)	Q _{gl,Aug} 2010 (m ³ s ⁻¹)	Relativ zu 2010							
		ΔA 2030 (%)	ΔA 2090 (%)			ΔQ _{Jul} 2030 (%)	ΔQ _{Jul} 2050 (%)	ΔQ _{Jul} 2070 (%)	ΔQ _{Jul} 2090 (%)	ΔQ _{Aug} 2030 (%)	ΔQ _{Aug} 2050 (%)	ΔQ _{Aug} 2070 (%)	ΔQ _{Aug} 2090 (%)
Engelberg	6.182	-46.5	-97.8	1.870	2.054	-0.1	-28.3	-6.6	-49.9	-7.0	-60.7	-9.4	-65.2
Urseren	5.575	-44.2	-97.7	1.649	1.901	-5.4	-29.7	-16.3	-59.6	-17.2	-71.2	-20.1	-74.9
Andermatt	0.654	-61.3	-100.0	0.185	0.210	-0.5	-39.0	-10.5	-63.9	-11.7	-72.9	-16.0	-75.3
Goeschenen	16.318	-39.9	-92.0	4.609	5.311	-6.9	-29.2	-16.6	-54.5	-17.9	-66.3	-20.3	-70.3
Wassen	7.760	-53.5	-97.8	2.252	2.531	-2.5	-34.9	-10.7	-57.7	-10.8	-66.2	-13.7	-69.9
Gurtellen	0.682	-66.5	-100.0	0.195	0.215	0.0	-41.0	-9.6	-64.1	-10.0	-72.2	-14.1	-74.7
Maderandertal	20.362	-27.0	-91.8	6.010	6.853	1.8	-9.8	-4.1	-26.6	-13.6	-51.4	-19.3	-66.1
Silenen	0.025	-99.2	-100.0	0.007	0.007	2.3	-54.0	-7.9	-64.3	-8.0	-69.3	-12.3	-72.2
Erstfeld	4.688	-33.3	-95.0	1.385	1.563	-0.3	-19.5	-7.0	-41.2	-10.4	-58.5	-12.8	-66.9
Schaechental	1.715	-55.3	-99.9	0.585	0.624	2.1	-25.0	-3.7	-51.2	-3.6	-57.4	-5.7	-61.9
Isenthal	3.668	-42.6	-98.1	1.228	1.333	3.3	-21.6	-2.3	-44.7	-2.3	-56.0	-4.2	-61.7
Muotathal	0.110	-82.3	-100.0	0.036	0.039	4.5	-39.1	-1.6	-54.8	-1.2	-58.9	-2.9	-63.8

Tabelle 4: Analyse von Vergletscherungsgrad und Abflussänderung in den vergletscherten BAFU Teileinzugsgebieten 40 km² des EZG Reuss (Erläuterungen siehe Text).

Einzugsgebiete 40km ² EZG-Nr.	Fläche 2003 (km ²)	Relativ zu 2010		Q _{gl,Jul} 2010 (m ³ s ⁻¹)	Q _{gl,Aug} 2010 (m ³ s ⁻¹)	Relativ zu 2010							
		ΔA	ΔA			ΔQ _{Jul}	ΔQ _{Jul}	ΔQ _{Jul}	ΔQ _{Jul}	ΔQ _{Aug}	ΔQ _{Aug}	ΔQ _{Aug}	ΔQ _{Aug}
		2030 (%)	2090 (%)			2030 (%)	2050 (%)	2070 (%)	2090 (%)	2030 (%)	2050 (%)	2070 (%)	2090 (%)
100160	1.627	-41.5	-93.1	0.4732	0.5388	0.9	-25.1	-4.5	-50.9	-4.2	-61.6	-6.2	-65.1
100247	1.326	-46.5	-95.6	0.4309	0.4651	1.6	-26.4	-2.4	-46.4	-2.0	-54.8	-3.6	-60.1
100682	0.110	-72.5	-92.9	0.0357	0.0385	4.9	-36.1	1.3	-50.6	2.1	-53.5	1.8	-57.8
101033	0.384	-51.3	-96.0	0.1323	0.1384	4.6	-24.0	1.7	-41.2	1.5	-49.1	0.2	-55.1
101266	15.340	-20.0	-86.2	4.5087	5.1100	3.5	-4.2	0.9	-16.4	-9.0	-42.9	-14.6	-59.9
102753	1.335	-49.0	-95.5	0.4504	0.4820	2.8	-22.4	-1.1	-49.2	-0.8	-54.3	-2.1	-58.7
103304	7.608	-47.4	-92.6	2.1665	2.4529	-1.2	-31.6	-7.0	-53.1	-6.4	-60.7	-8.5	-64.8
103487	0.396	-76.1	-98.9	0.1270	0.1292	4.4	-37.6	-0.2	-51.2	0.3	-56.0	-2.4	-60.7
104042	3.307	-32.8	-92.9	0.9056	1.0622	2.2	-15.8	-9.7	-49.6	-14.9	-66.3	-18.7	-71.6
104635	0.770	-39.8	-88.0	0.2051	0.2286	-4.4	-30.8	-8.7	-44.9	-8.5	-55.7	-9.8	-61.4
105367	3.462	-36.6	-92.4	1.0204	1.1955	-6.3	-26.6	-15.7	-55.3	-15.5	-66.8	-17.8	-71.3
106122	11.511	-34.5	-87.6	3.1715	3.6572	-5.9	-25.8	-13.2	-48.7	-13.8	-60.9	-15.6	-65.8
106424	3.115	-33.8	-89.4	1.0417	1.1342	4.3	-17.0	1.1	-39.1	1.6	-49.7	1.1	-54.5
106579	0.052	-61.1	-83.6	0.0201	0.0197	5.4	-16.3	5.8	-28.5	5.1	-32.1	6.5	-37.3
106607	4.645	-29.4	-88.9	1.3443	1.5273	1.0	-17.5	-3.8	-38.1	-6.2	-54.0	-7.7	-61.7
106609	0.560	-60.0	-93.6	0.1707	0.1878	4.6	-33.3	-0.6	-53.3	0.3	-58.6	-1.9	-61.9
106993	2.011	-43.7	-94.5	0.5665	0.6485	1.0	-27.2	-6.0	-54.4	-6.2	-64.2	-9.0	-68.1
107108	0.011	-89.6	-100.0	0.0039	0.0037	5.5	-40.9	0.5	-50.2	0.1	-56.3	-3.1	-60.7
107317	0.038	-85.5	-100.0	0.0115	0.0114	4.6	-42.6	-0.5	-52.0	0.2	-56.3	-2.9	-61.5
107626	3.798	-41.7	-91.6	1.1671	1.2730	2.1	-25.1	-1.6	-44.1	-1.4	-53.0	-2.6	-57.5
107851	5.095	-40.1	-88.7	1.4342	1.6794	-3.3	-29.2	-10.7	-54.0	-11.0	-62.9	-13.1	-66.5
108056	0.359	-53.8	-98.9	0.1024	0.1156	0.8	-34.1	-6.6	-58.1	-7.2	-68.3	-11.3	-72.0
108097	0.673	-59.2	-96.5	0.1884	0.2105	1.1	-37.9	-5.8	-59.2	-5.4	-66.8	-8.9	-70.3
108413	0.082	-79.3	-99.2	0.0223	0.0237	1.6	-49.0	-5.7	-63.2	-5.5	-67.5	-9.6	-71.5
109538	0.031	-86.0	-100.0	0.0083	0.0083	0.6	-52.5	-6.9	-61.5	-7.1	-66.5	-11.1	-70.3
109798	0.170	-72.0	-99.1	0.0510	0.0561	-0.7	-50.3	-8.2	-66.7	-6.8	-72.7	-10.9	-75.9
109969	0.296	-58.3	-97.2	0.0814	0.0924	0.4	-38.0	-6.9	-61.1	-7.2	-68.5	-11.1	-71.9

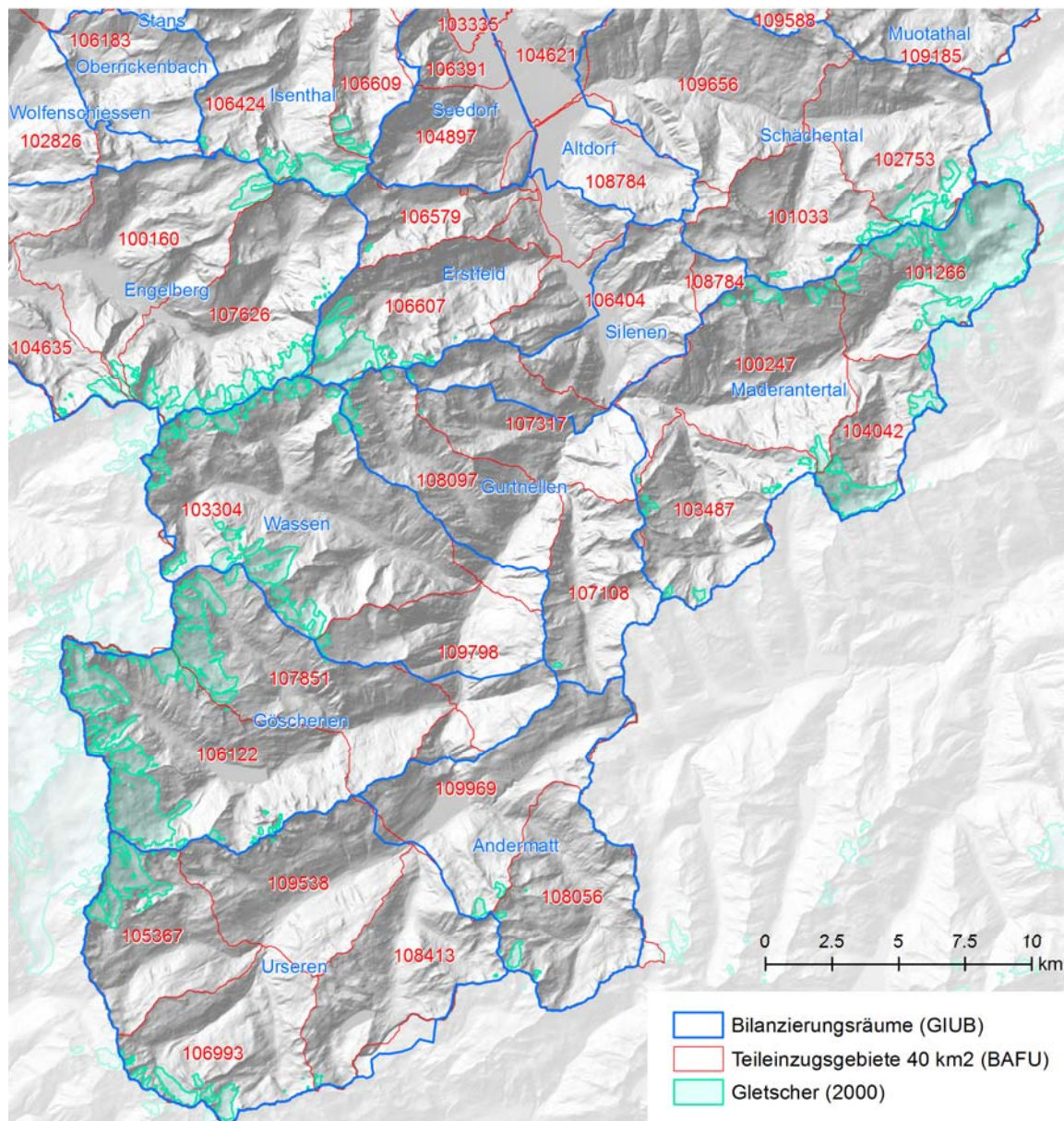


Abbildung 16: Übersicht über die Teileinzugsgebiete im EZG Reuss.