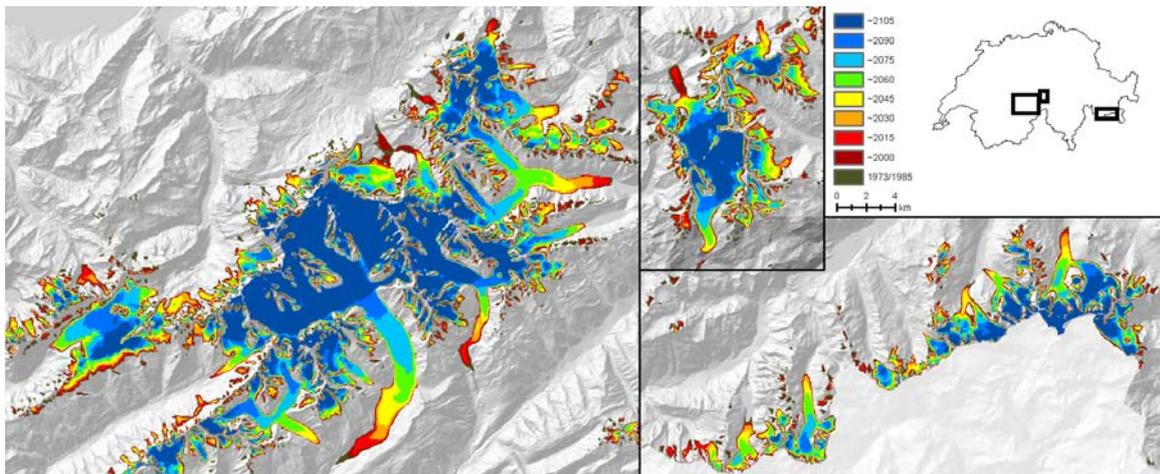


Schlussbericht CCHydro

Ergebnisse vom Teilprojekt CCGLinCH:

Grossräumige Modellierung von Schwund- szenarien für alle Schweizer Gletscher: Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Grosseinzugsgebiete



Geographisches Institut, Universität Zürich

Andreas Linsbauer, Frank Paul, Wilfried Haeberli



Universität
Zürich^{UZH}

Kö 'Cwhtci 'f gu'Dwpf guco w'hÄ 'Wo y gn'*DCHW+

Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Auftragnehmer:** Universität Zürich, Geographisches Institut
- Autoren:** Andreas Linsbauer, Frank Paul, Wilfried Häberli
- Begleitung BAFU:** David Volken, Bruno Schädler, Hugo Aschwanden, Dominique Bérod, Gian Reto Bezzola, Willy Geiger, Roland Hohmann, Adrian Jakob, Ronald Kozel, Petra Schmockler-Fackel
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1. Einführung	4
2. Untersuchungsgebiet und verwendete Daten	5
2.1 Untersuchungsgebiet	5
2.2 Verwendete Daten	6
3. Methoden	7
3.1 Verwendete Modelle	7
3.2 Analysen	7
4. Ergebnisse	9
4.1 Zukünftige Gletscherausdehnung	9
4.2 Regionale Analysen	11
4.3 Validierung an GPR-Profilen und Vergleich GlabTop mit ITEM	12
4.4 Kodierte Grids	14
5. Diskussion	14
5.1. Ergebnisse der zusätzlichen Modellierungen	14
5.2 Unsicherheiten der Modelle	15
6. Fazit	16
Literatur	17

Zusammenfassung

Dieser Schlussbericht ist eine Ergänzung zum bereits vorliegenden Schlussbericht für das Projekt “Klimaänderung und Wasserkraft”. Während in letzterem die verwendeten Modelle, Klimaszenarien sowie die Ergebnisse der zukünftigen Gletscherentwicklung für das Wallis dargestellt sind, werden hier die Ergebnisse für die ganze Schweiz unterteilt nach Grosseinzugsgebieten sowie ein Vergleich zwischen den mit dem Modell GlabTop modellierten Gletscherdicken und den Ergebnissen des Modells ITEM sowie GPR-Profilen präsentiert. Zudem wird der Einfluss der Unsicherheiten bei der Bestimmung der Gletscherdicken auf die Szenarien der zukünftigen Gletscherentwicklung abgeschätzt.

Die Vergletscherung der Schweiz wird von den Einzugsgebieten Rhone und Aare dominiert, die fast 80% der gesamten vergletscherten Fläche ausmachen. Im Wallis finden sich die grössten und dicksten Gletscher (Grosser Aletsch, Gorner). Insbesondere diese Gletscher werden bis zum Jahrhundertende massiv an Volumen verlieren. Nur in den höchsten Regionen der Alpen wird es gemäss den modellierten Szenarien auch im Jahr 2100 noch ganzjähriges Eis geben. Im Mittel über die ganze Schweiz und mit Modell 2 “Dickenabnahme” nimmt die Gletscherfläche bis 2100 um etwa 60% ab (im Wallis nur um etwa 40%) wenn man den beobachteten Dickenverlust der Periode 1985-2010 fortschreibt. Das Modell 1 “GWL-Verschiebung” berücksichtigt die Gletscherdicke nicht und ergibt eine schnellere und damit auch gesamthaft stärkere Flächenabnahme von gut 80% bis 2100. Der derzeitige Anstieg der Temperatur ist allerdings stärker als in den beschriebenen Berechnungen angenommen und wesentliche Rückkoppelungseffekte (Albedoverminderung durch Staubeintrag, Seebildung, etc.) sind nicht berücksichtigt. Der berechnete Gletscherschwund muss deshalb als konservativ bezeichnet werden und könnte in Wirklichkeit drastischer sein. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Eisdicke ($\pm 30\%$) wirkt sich nicht linear aus. Während bei 30% dünnerem Eis der Zeitpunkt des entsprechenden Vergletscherungsgrades im Vergleich zur Referenzsimulation rund 20 Jahre früher eintritt, erfolgt dies bei 30% dickerem Eis rund 10 Jahre später.

Der Vergleich von GlabTop mit den GPR Profilen der VAW/ETHZ und dem Gletscherbettmodell ITEM zeigt im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung. Das räumliche Muster der berechneten Eisdickenverteilung ist bei beiden Modellen sehr ähnlich, da diese im Prinzip auf gleichen eismechanischen Ansätzen beruhen (u.a. neigungsabhängige Gletscherdicke). Die meisten GPR-Profile (20 von 26) liegen innerhalb des Unsicherheitsbereichs der mit GlabTop modellierten Eisdicken. Lokal gibt es Bereiche mit grösseren Abweichungen und die grossen Radartiefen des Rhonegletschers werden von keinem der beiden Modelle erreicht. Für den Glacier de Corbassière und den Zinalgletscher ist GlabTop oftmals näher an den mit GPR bestimmten Gletscherdicken als ITEM. Letzteres berechnet generell etwa 20-30% höhere Gletschervolumen als GlabTop, was auf seinen starken Glättungseffekt zurückzuführen sein könnte. Die beiden verglichenen Modelle sind interessante Alternativen für die Abschätzung der räumlichen Eisdickenverteilung. Das GlabTop-Modell hat dabei den Vorteil, dass es einfach und schnell für grosse Gebirgsräume anzuwenden ist, einen robusten/transparenten geometrischen Ansatz verwendet, für grosse Gletscher mit empirisch abgestützten maximalen Schubspannungen arbeitet und die Bett-Topographie deshalb wohl recht realistisch glättet.

Unabhängig von der zukünftigen Entwicklung des Klimas werden insbesondere die grössten Gletscher weiterhin massiv an Volumen verlieren, da sie weit von Gleichgewichtszuständen entfernt sind; ihre Betten sind zudem wenig geneigt und ihre Oberflächen geraten deshalb in immer tiefere Lagen. Für die weitere Entwicklung der mittleren und kleinen Gletscher ist der Unsicherheitsbereich der Klimaszenarien ähnlich bedeutend wie die Unsicherheiten in den Modell-Annahmen (z.B. Gletscherdicke, Albedoveränderung).

1. Einführung

Das Projekt CCGLinCH (Climate Change impacts on glaciers in Switzerland) wurde zu gleichen Teilen von zwei Projekten gefördert, (1) 'Klimaänderung und Wasserkraft' im Auftrag von Swisselectric Research, Bundesamt für Energie (BFE), Kanton Wallis, und Forces Motrices Valaisannes FMV SA, sowie (2) 'Klimaänderung und Hydrologie' (CCHydro) im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Weiterhin gibt es eine enge Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt NELAK des NFP61 (Nachhaltige Wassernutzung). Im Rahmen von CCGLinCH liegt die Unterscheidung zwischen (1) und (2) im Wesentlichen in der räumlichen Abgrenzung des Untersuchungsgebietes: (1) - Wallis, (2) - ganze Schweiz und ihre Grosseinzugsgebiete. Die Grundlegende Fragestellung war für beide Teilprojekte die gleiche: "Wie werden sich unter vorgegebenen Klimaszenarien die Gletscher in der Schweiz in Zukunft verändern". Da für (1) bereits ein umfassender Schlussbericht erstellt wurde (Paul et al., 2011), beschränkt sich dieser Bericht auf die ergänzenden Untersuchungen im Rahmen des CCHydro Projektes. Das Hauptziel von CCGLinCH für beide Projekte ist die Bereitstellung von Rasterdaten der Gletscherflächenentwicklung mit 100 m Auflösung in Zeitschritten von 5 Jahren (Zeitraum 1990-2100) als Eingangsdatensatz für das hydrologische Modell PREVAH und unter Verwendung vorgegebener Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert (Bosshard et al., 2011). Überdies soll für alle Gletscher und Zeitschritte eine mittlere, jeweils mit Schnee bedeckte Fläche ermittelt werden um im hydrologischen Modell das Ablations- vom Akkumulationsgebiet unterscheiden zu können.

Für das hydrologischen Modell PREVAH stellt die Verteilung der Gletscherfläche mit der Höhe einen wichtigen Inputparameter dar, welcher die Menge des im Sommer anfallenden Schmelzwassers stark beeinflusst (Viviroli et al., 2009). Da die Gletscher in den letzten zwei Jahrzehnten stark geschrumpft sind und die Temperaturen gemäss Klimaszenarien weiter steigen werden, werden sich auch die Gletscher weiter verkleinern (Zemp et al., 2006). Die Flächen-Höhenverteilung der Gletscher wird sich dadurch markant verändern und hydrologische Simulationen würden entsprechend ungenau. Um diesen Mangel zu beheben, wurde die zukünftige Entwicklung der Gletscherfläche für die ganze Schweiz mit zwei verschiedenen Modellen ermittelt: (a) Verschiebung der Gleichgewichtslinie (GWL-Modell) und (b) parametrisierte Dickenabnahme. Bis anhin wurde nur das GWL-Modell verwendet um die für PREVAH benötigten Gletscherflächen zu erstellen. Für das zweite Modell (b) musste zusätzlich für alle Gletscher noch das Gletscherbett modelliert werden. Dafür wurde (c) das Modell GlabTop verwendet welches in Paul und Linsbauer (2012) sowie im WWK Bericht von CCGLinCH detailliert beschrieben ist. Aus den modellierten Gletscherbetten lassen sich noch zahlreiche Details für weitergehende Studien ableiten, so z.B. die Orte möglicher zukünftiger Gletscherseen in Übertiefungen (Linsbauer et al., 2009, subm.) welche auch im Rahmen des NELAK Projektes Verwendung fanden (Künzler et al., 2010).

Die folgenden Untersuchungen sind bereits im WWK Bericht (Paul et al., 2011) beschrieben und werden deshalb in diesem Ergänzungsbericht nicht wiederholt:

- Bereitstellung von Eingangsdatensätze (100 m Auflösung in 5-Jahreszeitschritten) für die hydrologische Modellierung mit PREVAH (für WSL und GIUB)
- Modellierung der Gletscherveränderung in der Schweiz mit einfachen aber robusten und transparenten Methoden
- Vergleich GWL-Reaktionsmodell – parametrisierte Dickenabnahme
- Detektion von Übertiefungen in den modellierten Gletscherbetten (Orte möglicher zukünftiger Seen)

Im Rahmen dieses ergänzenden Berichtes wurden noch einige zusätzliche Untersuchungen durchgeführt welche im Folgenden ausführlich dargestellt werden:

- Analyse Flächen/Volumenschwund in Grosseinzugsgebieten
- Validierung von GlabTop mit ausgewählten Radar-Profilen
- Vergleich der Gletscherbetten von GlabTop und ITEM
- Unsicherheiten im Volumenschwund durch ungenaue Eisdickenverteilung
- Erstellung von kodierten Grids für die hydrologische Modellierung.

2. Untersuchungsgebiet und verwendete Daten

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Modellierungen der Gletscherentwicklung wurden innerhalb CCGLinCH für die ganze Schweiz durchgeführt. Die spezifische Auswertung erfolgte für das WWK-Projekt mit Fokus auf das Wallis und für CCHydro bezogen auf die Schweizer Grosseinzugsgebiete und hier insbesondere die vergletscherten (Abb. 1). Kenndaten der jeweiligen Regionen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Der Vergletscherungsgrad schwankt um etwa eine Grössenordnung und ist im Einzugsgebiet Wallis bei weitem am grössten, da hier auch die grössten Eismassen zu finden sind. Das Einzugsgebiet Aare (bis Thun) beherbergt ebenfalls noch einige grössere Gletscher, hat im Vergleich zum Wallis jedoch eine kleinere Gesamtfläche, wodurch der Vergletscherungsgrad ebenfalls entsprechend hoch ist. Bei den fünf anderen Einzugsgebieten spielt die Vergletscherung nur noch eine untergeordnete Rolle.

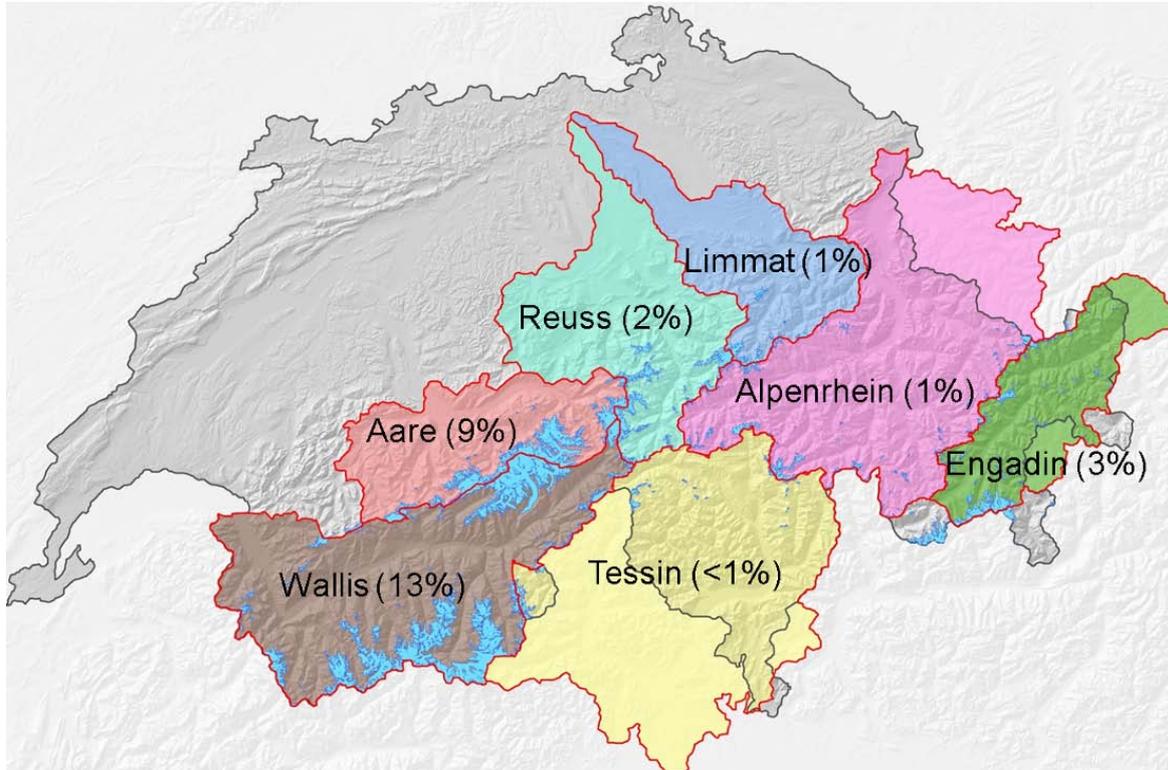


Abb. 1: Grosseinzugsgebiete der Schweizer Alpen und ihr Vergletscherungsgrad.

Gross-EZG Name	F(EZG) km ²	F(Gl) km ²	Vergl. %	mittl. h m	V(Eis) km ³
Aare (Thun)	2450	229	9.4	56	12.8
Engadin	2305	80	3.5	36	2.8
Limmat	2405	28	1.1	33	0.9
Reuss	3430	88	2.6	38	3.3
Alpenrhein	6345	74	1.2	22	1.6
Tessin	6712	30	0.4	21	0.6
Wallis	5385	741	13.8	67	50.0

Tabelle 1: Vergletscherung in den Grosseinzugsgebieten der Schweizer Alpen, mit $F(EZG)$ der totalen Fläche, bzw. $F(Gl)$ der vergletscherten Fläche, dem Grad der Vergletscherung (Vergl.), der mittleren Eisdicke (mittl. h), und dem Eisvolumen $V(Eis)$ modelliert mit GlabTop.

2.2 Verwendete Daten

Bei der Arbeit für CCHydro wurden grundsätzlich dieselben Daten benutzt, wie im WWK-Schlussbericht beschrieben. Zusätzlich wurden drei weitere Datensätze verwendet: (A) Grosseinzugsgebiete, (B) Radarprofile und (C) Eisdickenverteilungen gemäss dem Modell ITEM von Farinotti et al. (2009b).

(A) Grosseinzugsgebiete

Für die Auswertung per Grosseinzugsgebiet wurde von der WSL die Perimeter der Grosseinzugsgebiete für die ganze Schweiz als digitales Vektorfile zur Verfügung gestellt. Ausgewählt wurden davon sieben vergletscherte Grosseinzugsgebiete (Fig. 1).

(B) Radarprofile

Für die Validierung des GlabTop Modells wurden von der VAW/ETHZ für drei Gletscher gemessene Radardaten (GPR-Profile) zur Verfügung gestellt: Rhone (7 Profile), Zinal (8 Profile), und Corbassière (11 Profile). Die Profile von Rhone- und Zinal Gletscher wurden in der Studie von Farinotti et al. (2009b) zur Modellkalibrierung verwendet und die Profile aller drei Gletscher wurden von Farinotti et al. (2009a) für die Abschätzung des gesamten Gletschervolumens verwendet. Mit Radarprofilen kann eine Aussage über die Gletscherdicke an den jeweiligen Querschnitten gemacht werden, sie haben aber ebenfalls gewisse Unsicherheiten (z.B. 2D-Analyse, nicht berücksichtigte laterale Effekte, Glättungseffekt der Messmethode). Zudem können Radarmessungen auf Gletschern nur an gut zugänglichen, spaltenfreien und daher relativ flachen Stellen durchgeführt werden, typischerweise sind die Gletscher dort besonders dick. Dies ist bei der Interpretation zu berücksichtigen

Eisdickenverteilung mit ITEM

Die Radarprofile selber sagen noch wenig über die räumliche Verteilung der Eisdicke zwischen den Profilen aus, hierzu müssen sie noch räumlich interpoliert werden. Dies ist nicht ganz einfach und eine Vielzahl von Methoden wurde zu diesem Zweck entwickelt (Bauder et al. 2003; Binder et al. 2009; Fischer, 2009). Das von Farinotti et al. (2009b) entwickelte Modell verwendet die GPR Profile um den aus dem Fliessgesetz resultierenden Massenfluss lokal zu kalibrieren. Für den Modellvergleich mit GlabTop wurde uns von der VAW/ETHZ die mit ITEM modellierten Eisdickenverteilungen für die drei oben genannten Gletscher zur Verfügung gestellt. Es sind dies die nicht kalibrierten Modellläufe bei denen ein $C=0.53$ (für weitere Erläuterungen zu C siehe Farinotti et al. 2009b) verwendet wurde.

3. Methoden

3.1 Verwendete Modelle

Die drei auch für diese Studie verwendeten Modelle sind ausführlich im WWK-Schlussbericht beschrieben (Paul et al., 2011). Ihre Funktionsweise und ihr Zweck werden deshalb an dieser Stelle nur kurz zusammengefasst:

- **(a) GWL-Modell**
Das Gleichgewichtslinien-Reaktionsmodell (GWL-Modell) ist ein flächenbasiertes Gletscherrückzugsmodell, das auf eine Temperaturerhöhung mit einem GWL-Anstieg reagiert. Durch Anpassung von Akkumulations- und Ablationsgebiet wird die Gletschergrosse verändert und die zuunterst gelegenen Gletscherteile abgeschnitten (siehe auch Paul et al., 2007). Eine einfache Koppelung mit Klimaszenarien ist möglich, sie hat allerdings retrospektiv zu erfolgen, d.h. die Gletscher reagieren auf eine klimatische Änderung in der Vergangenheit.
- **(b) Parametrisierte Dickenabnahme**
Bei diesem Modell wird ein beobachteter Trend der mittleren Dickenabnahme pro Höhenzone in die Zukunft fortgeschrieben. Die aus dem Vergleich von zwei digitalen Höhenmodellen zwischen 1985 und 2000 festgestellte Dickenabnahme wurde dazu als räumliches Mittel pro Grosseinzugsgebiet gegen die Höhe aufgetragen und daraus eine Parametrisierung abgeleitet. Für das Modell wird angenommen das die beobachtete Dickenabnahme eine Reaktion auf 1 °C Temperaturerhöhung über einen Zeitraum von 25 Jahren ist). Ein Fünftel dieser Dickenänderung wird dann in 5 Jahresschritten von der modellierten Eisdickenverteilung subtrahiert. Die Gletscherfläche verschwindet, wenn die Eisdicke null (oder kleiner) wird.
- **(c) GlabTop (Glacier bed Topography)**
Das Modell GlabTop dient zur grossräumige Modellierung der Eisdickenverteilung und Betttopografien von Gletschern und basiert auf einer empirischen Beziehung zwischen mittlerer Schubspannung und Höhenausdehnung der Gletscher. Die räumliche Verteilung der Eisdicken ist abhängig von der lokal gemittelten Neigung entlang von Fliesslinien innerhalb von Höhenintervallen mit 50 m Äquidistanz. Durch eine Subtraktion der Eisdickenverteilung vom Ausgangshöhenmodell entsteht eine modelliertes Bett der Topographie unter dem Gletscher, in der sich Übertiefungen lokalisieren lassen, welche als potentielle Orte für die Bildung von zukünftigen Seen angesehen werden können (siehe Paul und Linsbauer, 2012, Linsbauer et al., in review).

3.2 Analysen

Sowohl die Resultate des GWL-Reaktionsmodells als auch der parametrisierten Dickenabnahme wurden mit den Geometrien der Grosseinzugsgebieten digital verschnitten um eine regionale Analyse der Gletscherflächenentwicklung vorzunehmen.

Unsicherheit Eisdickenabschätzung

Da die Eisdickenabschätzung mit GlabTop eine Unsicherheit von lokal etwa $\pm 30\%$ beinhaltet (siehe Linsbauer et al., in review), wurde die Gletscherentwicklung über die Dickenparametrisierung auch noch mit einer 30% grösseren bzw. kleineren Eisdickenverteilung durchgeführt

(bei ansonsten unveränderter Parametrisierung) und wieder mit den Einzugsgebieten verschnitten.

Neue Interpolation zwischen den Basispunkten

In der Implementierung von GlabTop wie sie in Paul und Linsbauer (2012) sowie im WWK-Schlussbericht beschrieben sind, wurde eine IDW-Interpolation (*Inverse Distance Weighting*) mit Standardparametern für die Interpolation der kontinuierlichen Dickenwerte zwischen den Basispunkten angewendet. Wir haben jetzt zusätzlich eine *TopoToRaster*-Interpolation durchgeführt, was eine Glättung der Betttopographie bewirkt und weniger Artefakte zur Folge hat. Im Vergleich mit den GPR Profilen werden beide Varianten gezeigt.

Validierung an GPR-Profilen und Vergleich mit ITEM

Für die Validierung der GlabTop Resultate wurden GPR-Profile der drei erwähnten Gletscher verwendet und für den Vergleich mit dem ITEM Modell der VAW/ETHZ zusätzlich die Resultate der ITEM-Modellierungen (Farinotti et al. 2009b) verglichen. Die mit GlabTop und ITEM modellierten Gletscherbettprofile werden aus den jeweiligen Höhenmodellen am Ort der GPR-Profile extrahiert und mit deren Werten verglichen (Höhenwerte (z) an gegebenen Koordinaten (x, y)). Überdies wurde für jeden der drei Gletscher die Höhenwerte der modellierten Betten im Längsprofil (entlang einer zentralen Fliesslinie) extrahiert.

Kodierte Grids

Aufgrund der Modellresultate von GlabTop (siehe Linsbauer et al., in review) und WWK-Schlussbericht Kapitel 4.3 und 5.1) sowie der Gletschermodellierung mit der parametrisierten Dickenabnahme (siehe Kapitel 4.2 und 5.2 im WWK-Schlussbericht), wurden kodierte Grids als Eingabedaten für das hydrologische Modell PREVAH erstellt. Diese enthalten Informationen über die potentiellen Seen, Ablations- bzw. Akkumulationsgebiet des Gletschers, die Dickenänderung und die Gletscherdicke und sind in einem siebenstelligen Rasterdatensatz erfasst. Auch diese Grids liegen in 5-Jahresschritten vor (Modellstart 1990) und sind nach folgendem Schema kodiert:

- 1: Seen \rightarrow 0: nein, 1: ja
- 2: Gletscher \rightarrow 0: nein, 1: Ablation, 2: Akkumulation
- 345: Dickenänderung (dm/Jahr) \rightarrow 0: keine Änderung, 1-999: 0.1 m - 99.9 m
- 67: Gletscherdicke (Hektometer) \rightarrow 0: kein Gletscher, 1-99: 10 m - 990 m

Die einzelnen Datensätze wurden wie folgt erstellt:

- Die Seen stammen aus der Modellierung mit den Gletscherumrissen von 1973 und dem DHM von 1985; es wurden nur Übertiefungen > 1 ha berücksichtigt.
- Die Unterteilung in Akkumulations-/Ablationsgebiet erfolgte für die 15 Grids der ersten Szenarioperiode gemäss der GWL-Unterteilung aus dem GWL-Modell. Für die weiteren Grids der zweiten Szenarioperiode wurde die GWL-Unterteilung gemäss dem mittleren Szenario des Temperaturanstiegs ausgewählt (siehe Kapitel 4.1 im WWK-Schlussbericht).
- Die Dickenänderung brauchte drei Ziffern, da gemäss unserer Parametrisierung an einigen Orten mehr als 10 m Dickenverlust pro Jahr stattfanden. Dies kann in Bezug zur Eisdicke ein grosser Betrag sein, da grosse Dickenänderungen zumeist in Regionen mit vergleichsweise dünnem Eis stattfinden.
- Die Eisdicke stammt aus derselben Modellierung wie die der Übertiefungen (Umrisse von 1973, DHM von 1985).

4. Ergebnisse

4.1 Zukünftige Gletscherausdehnung

Flächenänderung

In **Fig. 2** sind die relativen Flächenänderungen für die ganze Schweiz und die beiden Methoden (GWL-Modell und Modell Dickenabnahme) dargestellt. Für das Dickenabnahme-Modell sind drei Kurven dargestellt, die Referenzsimulation (rot) sowie die sich aus den 30% dickeren (grün) bzw. dünneren (blau) Eisdicken ergebenden Verläufe. Für das GWL-Modell gibt es bis zum Szenariozeitraum 1 (2020-2050) nur eine Kurve (Reaktion auf einen GWL Anstieg um 150 m Mitte der 1980er Jahre), für den anschliessenden Zeitraum (bis 2100) jedoch drei Kurven gemäss den drei unterschiedlichen Klimaszenarien (Anstieg der GWL um weitere 100 m, 200 m, bzw. 300 m.

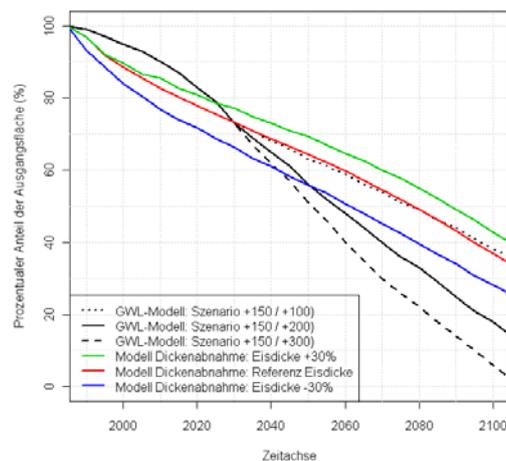


Fig. 2: Änderung der Gletscherfläche mit der Zeit für beide Modelle (blau, rot und grün: Modell Dickenabnahme) und für das GWL Reaktionsmodell (schwarz).

Die Flächenabnahme ist bis zur Mitte der ersten Szenarioperiode (2035) mit dem Dickenabnahme Modell etwas stärker, danach entspricht die mit der unveränderten Eisdickenverteilung gerechnete Abnahme ziemlich genau dem GWL Modell mit dem geringsten GWL Anstieg (um +150/+100). Während die drei mit dem Dickenabnahme-Modell gerechneten Flächenentwicklungen weitgehend parallel verlaufen, wird der Unterschied für die drei mit dem GWL Modell gerechneten Simulationen immer grösser. Ab dem Jahr 2050 werden die Flächenänderungen mit dem GWL Modell für einen GWL Anstieg um +200 bzw. +300 m bis 2035 generell grösser als mit dem Dickenabnahme Modell. Bis zum Jahr 2100 verbleiben mit letzterem noch 25-40% der Gletscherfläche, mit dem GWL Modell zwischen 10 und 35%. Die Unsicherheit in der Eisdicke hat also einen kleineren Effekt auf die noch verbleibende Eisfläche im Jahr 2100, als die Unsicherheiten im Temperaturverlauf aus dem Klimamodell. Man muss allerdings anmerken das beide Modelle nicht direkt miteinander vergleichbar sind, da sie doch von sehr unterschiedlichen Annahmen ausgehen.

Modellunsicherheit durch Eisdickenverteilung

Für das Dickenabnahmemodell spielt neben der Höhenlage der vergletscherten Gebiete vor allem die Eisdickenverteilung eine entscheidende Rolle bei der Flächen- und Volumenabnahme. Sehr dünne Gletscherpartien verschwinden relativ schnell wenn sie tief gelegen sind, die dicken Bereiche bleiben (flächenmässig) jedoch lange unverändert. In **Fig. 3** sind die zuvor

geschilderten Unsicherheiten in der Eisdickenverteilung für drei Regionen (Aletsch, Rhone, Bernina) visuell dargestellt. Dort wo das Eis sehr dick ist, sind die Unterschiede eher klein, dort wo es dünner ist aber vergleichsweise gross. Für die grossen Gletscher sind die Unsicherheiten in der modellierten Gletscherdicke für den Verlauf der Flächenentwicklung deshalb eher nicht entscheidend. Da deren Betten aber eher flach sind, können ab einem gewissen Zeitpunkt in sehr kurzer Zeit grosse Flächenverluste erfolgen.

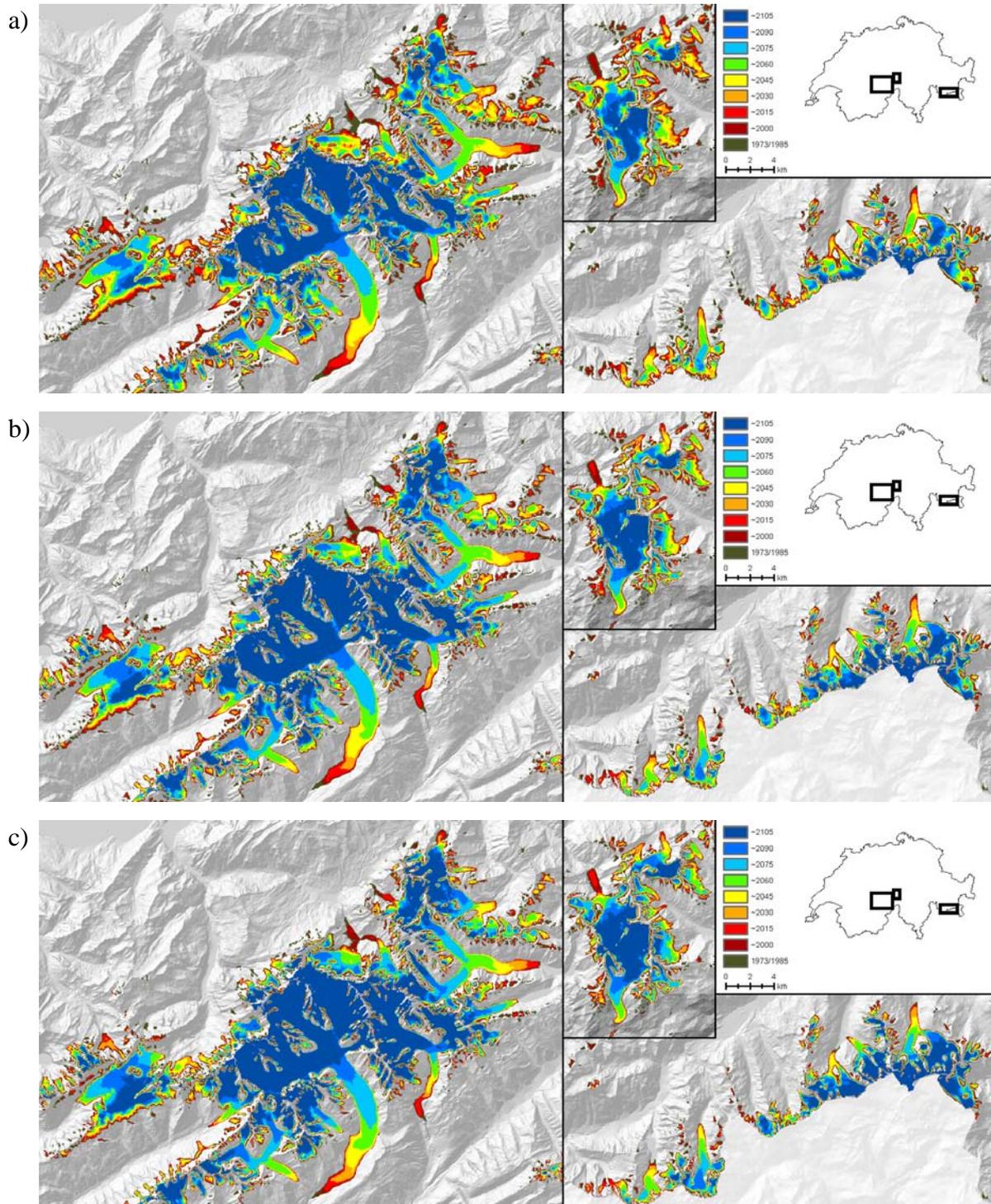


Fig. 3: Flächenentwicklung in den Regionen Aletsch (links), Rhone (mitte) und Bernina (rechts) mit dem Dickenabnahme Modell. a) Gletscherdicke -30%, b) Referenz, c) +30%.

4.2 Regionale Analysen

In **Fig. 4** sind die prozentualen Änderungen der Gletscherflächen bzw. -volumen der verwendeten beiden Gletscherrückzugsmodelle aufgeteilt nach den Grosseinzugsgebieten abgebildet. Alle drei Grafiken zeigen ein ähnliches Bild: Die vergletscherten Flächen nehmen im Laufe dieses Jahrhunderts in allen Grosseinzugsgebieten stark ab. In den Einzugsgebieten mit einer geringen Vergletscherung (Limmat, Reuss, Alpenrhein, Tessin) geht dies relativ schnell. Bis zur Mitte des Jahrhunderts dürften in diesen Gebieten die Vergletscherung um mindestens die Hälfte im Vergleich zu 1985 zurückgegangen sein und bis zum Ende des Jahrhunderts verschwinden die Gletscher ganz. Die Einzugsgebiete von Aare und Engadin mit einem mittleren Vergletscherungsgrad sind dagegen etwas resistenter und es hat auch noch am Ende des 21. Jahrhunderts Eis. Das Wallis mit der grössten Gletscherfläche sowie den dicksten und grössten Gletschern dominiert den Trend für die ganze Schweiz.

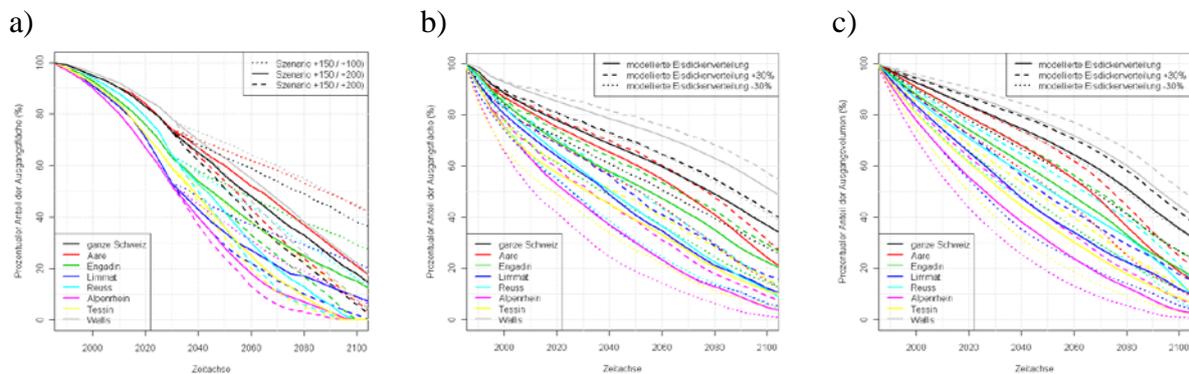


Fig. 4: Relative Gletscheränderungen von 1985 bis 2100 für jedes Grosseinzugsgebiet separat, sowie für die ganze Schweiz. a) Flächenänderung gemäss GWL Modell und b) gemäss Dickenabnahme Modell. c) Volumenänderung gemäss Dickenabnahme Modell.

In **Fig. 4a** sind die Kurven gemäss dem GWL-Modell dargestellt. Wie bereits für **Fig. 2** erläutert, gibt es bis 2035 ein Szenario und danach 3 Szenarien die retrospektiv angewandt werden. Für die Szenarien mit dem hohen (gestrichelte Linien) und dem mittleren (durchgezogene Linien) Temperaturanstieg geht die Vergletscherung sehr stark zurück. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist gemäss diesem Modell in den wenig vergletscherten Einzugsgebieten kein Eis und in den anderen nur noch wenig Gletscherfläche (10-20%) vorhanden. Die hochgelegenen Gletscher in diesen Einzugsgebieten bestimmen den Schlusspurt. Beim Szenario mit dem geringem Temperaturanstieg und somit einem viel geringem Anstieg der GWL können sich die Gletscher vor allem in den Einzugsgebieten Wallis, Aare und Engadin noch lange halten. Dies bestimmt dann auch den Verlauf für die gesamte Schweiz.

In **Fig. 4b** ist die prozentuale Flächenveränderung und in **Fig. 4c** die prozentuale Volumenveränderung gemäss dem Modell Dickenabnahme für die Grosseinzugsgebiete dargestellt. Die durchgezogenen Linien stehen hierbei für die Parametrisierung mit der Eisdickenverteilung aus GlabTop (Referenz) sowie mit jeweils 30% dickeren und dünnerem Eis. Auch hier zeigen die Einzugsgebiete von Aare und Wallis geringere relative Verluste als die anderen Regionen. Zur Mitte des Jahrhunderts sind im Wallis noch mehr als 60% und am Ende des Jahrhunderts noch etwa 30% der Fläche und des Volumens vorhanden. Die übrigen Einzugsgebiete verlieren ihre Gletscher hingegen fast vollständig (0-10% der Ausgangsfläche im Jahr 2100). Die Unsicherheiten in den Eisdicken haben einen direkten Einfluss auf die prozentualen Anteile von Fläche und Volumen. Eine 30% kleinere bzw. grössere Eisdicke hat etwa die gleiche

Auswirkung wie eine um 50 m höhere bzw. niedrigere GWL in den Szenarien mit dem GWL Modell. Während bei 30% dünnerem Eis der Zeitpunkt des entsprechenden Vergletscherungsgrades im Vergleich zur Referenzsimulation rund 20 Jahre früher eintritt, erfolgt dieser bei 30% dickerem Eis nur rund 10 Jahre später. Zudem ist zum gleichen Zeitpunkt die Differenz zum Vergletscherungsgrad der Referenzsimulation jeweils grösser für die 30% dünneren Gletscher als für die 30% dickeren.

4.3 Validierung an GPR-Profilen und Vergleich GlabTop mit ITEM

In **Fig. 5** sind die mit GlabTop berechneten Eisdickenverteilungen (Umrisse von 1999, DHM von 1995) der drei Gletscher mit Validierungsdaten (Rhone, Corbassière, Zinal) zusammen mit den Profillinien der Radarmessungen dargestellt. In den kleinen Graphiken ist jeweils die Höhe gegen die Distanz aufgetragen und die folgenden Querprofile eingetragen:

- (1) die Resultate der GlabTop-Modellierung mit zwei Interpolationsvarianten für die Basispunkte (IDW und *TopoToRaster*)
- (2) ein 30%-Unsicherheitsbereich bezogen auf die *TopoToRaster* Modellierung
- (3) die Resultate aus der Modellierung mit ITEM, und
- (4) die Radarmessungen entlang der markierten Profillinien.

Der Vergleich der Profile zeigt, dass GlabTop die parabelförmige Gletscherbetttopographie in meist guter Übereinstimmung mit den Radarmessungen wiedergibt. Für die meisten Profile liegen die gemessenen Werte innerhalb des $\pm 30\%$ Unsicherheitsbereich der Modellierung. Insgesamt liegt für 20 von 26 Profilen die mittlere Dicke der Radarprofile innerhalb des 30%-Unsicherheitsbereichs der modellierten Werte an den Orten der GPR-Messungen. Beim Rhonegletscher sind die gemessenen Eisdicken bei einigen Profilen (b, c) allerdings um einiges grösser als die modellierten. Weder GlabTop noch ITEM können diese grossen Tiefen reproduzieren. Während beim Zinalgletscher GlabTop die Eisdicken im Vergleich zu den Radarmessungen eher unterschätzt, ist beim Corbassièregletscher kein derartiger Trend festzustellen. Hier gibt es bei einigen Profilen (e, c) aber Abweichungen zwischen der modellierten und gemessenen Form des Gletscherbettes. Für den Corbassière und den Zinalgletscher ist GlabTop oftmals näher an den mit GPR bestimmten Gletscherdicken als ITEM.

Generell sind die modellierten Eisdicken mit ITEM etwa 20-30% höher als mit GlabTop, was auf die starke Glättung von ITEM zurückzuführen sein könnte. Im Bezug auf die Form der Betttopographie zeigen beide Modelle jedoch einen sehr ähnlichen Verlauf. Letzteres wird auch in den drei Längsprofilen in **Fig. 5** deutlich (rechts unten). Übertiefungen sind bei beiden Modellen an etwa ähnlichen Stellen zu finden, was ein gewisses Vertrauen in die generelle Form der modellierten Gletscherbetten gibt. Im Längsprofil des Rhonegletschers ist die stärkere Glättung des Bettes durch die *TopoToRaster* Interpolation gut zu sehen. Mit dieser Interpolation der Eisdickenwerte zwischen den Basispunkten ergeben sich etwas höhere mittlere Gletscherdicken und -volumen, sowie eine etwas geringere Anzahl von Seen (ihre Lage verändert sich allerdings kaum).

Die wesentlichen Rückschlüsse aus diesem Vergleich sind:

1. Die Topographie (Form) der Gletscherbetten ist vergleichsweise robust
2. Die lokalen Unsicherheiten der Eisdickenschätzung sind gross ($\pm 30\%$) und nur schwierig zu beheben.
3. Die Resultate von ITEM und die GPR Daten liegen im Bereich dieser Unsicherheit.

4. Beide Modelle treffen den generellen Verlauf der GPR-Profile ähnlich gut.
5. ITEM gibt für den gesamten Gletscher eine etwa 20-30% höhere Eisdicke aus.
6. Die Unsicherheiten der modellierten Gletscherdicken fließen direkt in die Szenarien der zukünftigen Gletscherentwicklung ein.

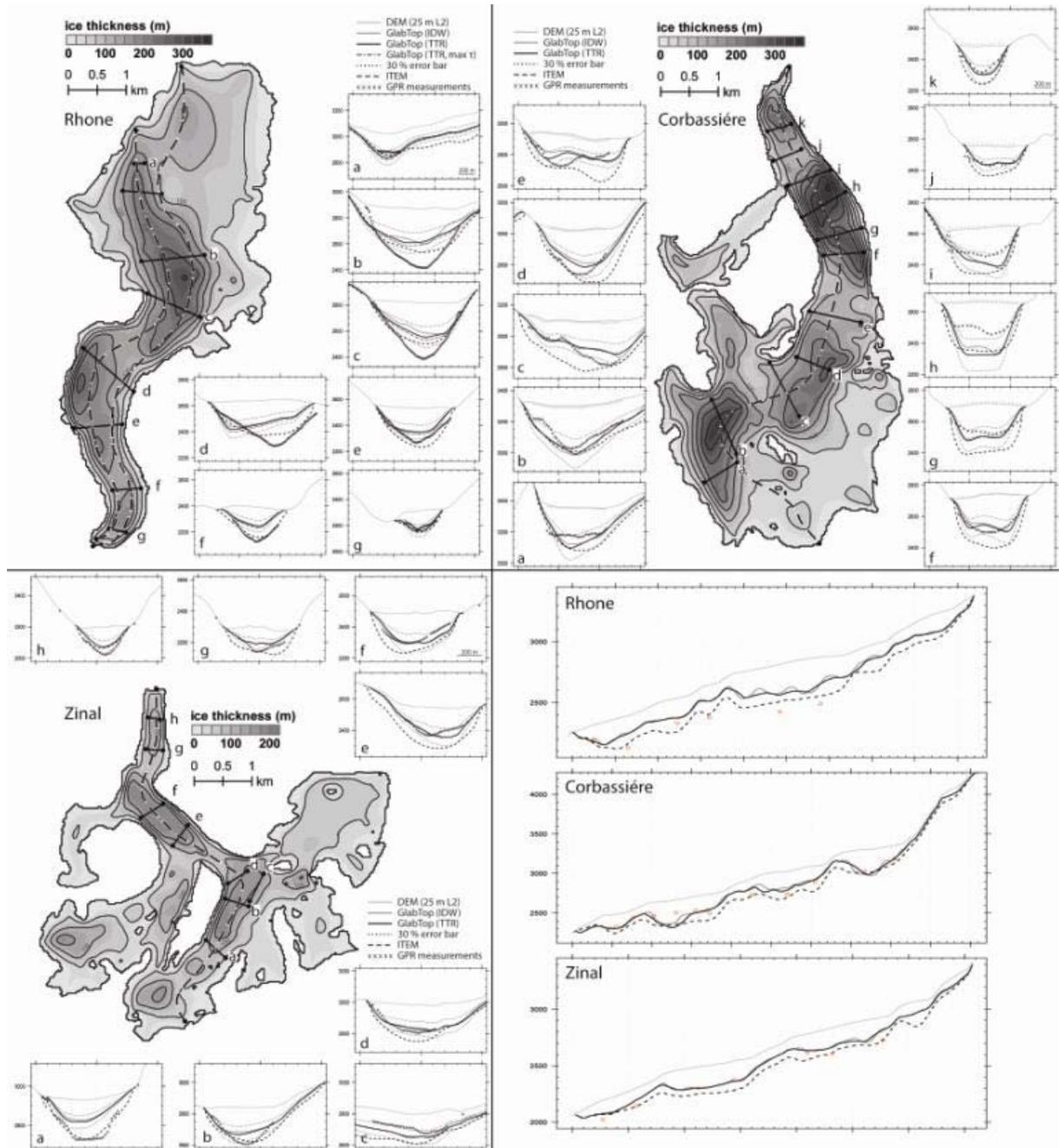


Fig. 5: Modellerte Eisdickenverteilungen mit GlabTop für die Gletscher Rhone (links oben), Corbassière (rechts oben) und Zinal (links unten) innerhalb der Gletscherumrisse von 1999. Markiert und mit Buchstaben versehen sind die Orte der GPR-Profile (dicke schwarze Striche) sowie die zentrale Fliesslinie der Gletscher (gestrichelt). Die kleinen Graphiken zeigen Querprofile entlang den jeweiligen GPR-Messungen. Es sind jeweils die beiden GlabTop Modellierungen (IDW, bzw. TopoToRaster-Interpolation), ein 30% Unsicherheitsbereich, die gemessenen Eisdickenwerte und die ITEM-Modellierung eingetragen. Die Graphiken rechts unten zeigen Profile entlang der zentralen Fliesslinien für die drei Gletscher.

4.4 Kodierte Grids

Die kodierte Grids wurden gemäss der Beschreibung in Abschnitt 3.2 erstellt, aber bis jetzt noch nicht weiter analysiert oder angewendet. Sie sollen zu einem späteren Zeitpunkt als Eingabedatensatz für das PREVAH-Modell dienen, welches dafür zuvor noch umgeschrieben werden muss. In Fig. 6 ist für drei Zeitpunkte aus der Simulation die ersten beiden Ziffern der Kodierung (Seen, Ablations- und Akkumulationsgebiet) farblich dargestellt. Inwiefern diese Datensätze helfen werden noch realistischere Modellierungen des zukünftigen Abflusses zu berechnen bleibt abzuwarten.

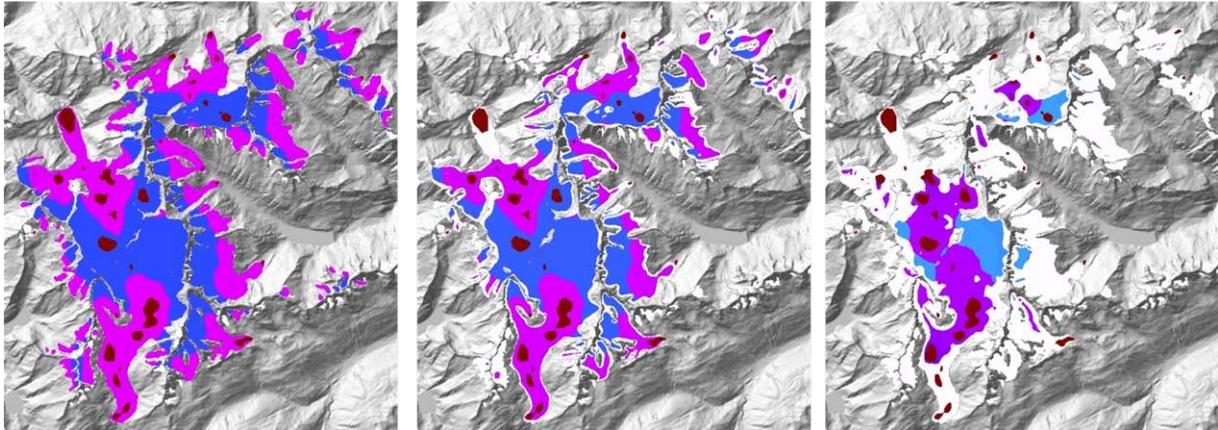


Fig. 6: Kodierte grids für drei Zeitpunkte am Beispiel der Gletschergruppe um Rhone und Triftgletscher.

5. Diskussion

5.1. Unsicherheiten und Gletscherschwund

Die hier jetzt berücksichtigten Unsicherheiten in den modellierten Eisdicken ($\pm 30\%$) wirken sich nicht linear aus. Die Verzögerung der Schmelze durch 30% dickeres Eis ist kleiner als die Beschleunigung durch dünneres Eis. Dies liegt hauptsächlich an der Selbstverstärkung der Schmelze beim Einsinken der Gletscheroberfläche. Ist der Gletscher tatsächlich dicker, liegt sein Bett entsprechend tiefer und das Eis dort erfährt eine stärkere Schmelze. Wenn das Eis erst mal dünn ist zeigen die vormals dicksten Gletscher grosse Flächenverluste über einen kurzen Zeitraum. Das hängt im Wesentlichen mit ihren vergleichsweise nur wenig geneigten Betten im Zungenbereich zusammen. Bei den kleinen (wesentlich dünneren) Gletschern wirkt sich der Unsicherheitsbereich in der Eisdicke hingegen sehr viel direkter aus (Fig. 3).

Die regionalen Unterschiede des Gletscherschwundes in den Grosseinzugsgebieten mit ihren unterschiedlichen Vergletscherungsgraden sind gross. Vor allem die stark vergletscherten Einzugsgebiete werden auch am Ende des 21. Jahrhunderts noch Eisreserven haben und damit auch weiterhin die Hydrologie beeinflussen. Für Einzugsgebiete mit einer geringeren Vergletscherung fällt in der ersten Hälfte des Jahrhunderts noch Schmelzwasser aus den schwindenden Gletschern an, danach dürfte dieser Beitrag aber eine eher untergeordnete Rolle spielen.

5.2 Interpretation der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Gletscherentwicklungsmodelle (GWL und Dickenabnahme) erlauben es mögliche zukünftige Gletscheränderungen für grosse Gebiete (ganze Schweiz) in einer mittleren Auflösung (100 m) zu berechnen. Die hierfür getroffenen Vereinfachungen sind gewichtig, ermöglichen es jedoch mit nur wenigen Eingabedaten auszukommen und sehr schnell zu rechnen (wenige Minuten). Das Herunterbrechen der Modellergebnisse auf Grosseinzugsgebiete ist sicher noch vertretbar, für kleine Einzugsgebiete oder gar einzelne Gletscher dürfen allerdings keine präzisen Ergebnisse mehr erwartet werden. Beide Modelle sind mit den Mittelwerten aller Schweizer Gletscher kalibriert und machen deshalb auch nur auf dieser Stufe gültige Aussagen. Die gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Modelle für einzelne Gletscher ist in diesem Zusammenhang allerdings sehr vielversprechend.

Die Kopplung der Modelle an Klimamodellszenarien ist möglich, geht allerdings auch von starken Vereinfachungen aus (lineare Fortschreibung von Trends). In Anbetracht der grossen Unsicherheiten in den Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung, ist diese Annahme aber wahrscheinlich immer noch sehr brauchbar. Insbesondere wenn noch ein weiteres (hydrologisches) Modell 'angehängt' wird, welches seinerseits Unsicherheiten hat. Für die Modellierung des zukünftigen Abflusses aus Grosseinzugsgebieten halten wir den Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle (Klima, Gletscher, Hydrologie) in Anbetracht der jeweiligen Unsicherheiten für etwa äquivalent.

Das sehr einfache Modell zur Bestimmung der Gletscherdicke hat gewiss seine Unsicherheiten, nicht nur in Bezug auf die absolute Gletscherdicke, sondern auch in Bezug auf das modellierte Bett selber. Allerdings zeigt der Vergleich mit den Radarprofilen und den Ergebnissen des komplexeren Modells ITEM, das man mit dem bescheidenen Aufwand von GlabTop eine ebenso gute Annäherung an die Realität erreichen kann. Die beiden verglichenen Modelle sind interessante Alternativen für die Abschätzung der räumlichen Eisdickenverteilung. Das GlabTop-Modell hat dabei den Vorteil, dass es einfach und schnell für grosse Gebirgsräume anzuwenden ist, einen robusten und transparenten geometrischen Ansatz verwendet, für grosse Gletscher mit empirisch abgestützten maximalen Schubspannungen arbeitet und die Bett-Topographie nicht so stark glättet.

Eine Reihe von hier nicht berücksichtigten Rückkopplungen können ihrerseits einen grossen Einfluss auf die weitere Entwicklung der Gletscher haben (siehe auch Haeberli et al., in press). Dazu zählen sicherlich der Einfluss einer zunehmender Schuttauflage (Jouvet et al., 2011), einer verringerten Albedo (Oerlemans et al., 2009), dem Kalben in Seen, subglaziale Schmelzprozesse (Kollaps), oder zunehmende Beschattung (Paul, 2010). Der Einfluss dieser Prozesse wird sicher bei jedem Gletscher anders ausfallen und lässt sich deshalb nicht pauschal abschätzen. Eine bessere Regionalisierung der Modelle (z.B. mit gletscherspezifischen Sensitivitäten für eine gegebene Änderung des Klimas) wäre zwar machbar, löst aber das Problem der Unsicherheiten in den Eingabedaten (z.B. Niederschlag aus Klimamodellen im Hochgebirge) nicht wirklich. In diesem Sinne erwarten wir auch keine Verbesserung der Aussagekraft, wenn von Klimaparametern abhängige Verbesserungen vorgenommen werden. Die Berücksichtigung gletscherspezifischer Reaktionszeiten funktioniert mit den beiden hier verwendeten Modellen leider nicht, da jeder Gletscher dann nach einer gewissen Zeit auf ein anderes Klimasignal reagiert. Die sich hieraus ergebenden Konsequenzen sind allerdings bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

6. Fazit

Die hier verwendeten vereinfachten Modelle basieren auf physikalisch robusten Methoden und sind schnell und transparent aber ohne Dynamik (Gletscherfliessen). Die GIS-basierte Implementierung erlaubt es eine grosse Zahl von Gletschern sowie grosse vergletscherte Gebieten zu modellieren. Dafür sind nur wenige und generell vorhandene Daten (Gletscherumrisse, Höhenmodelle) notwendig. Die drei angewandten Modelle liefern:

- wichtige Informationen zur Eisdickenverteilung von Gletschern und deren Betttopographie
- mit den modellierten Übertiefungen Orte möglicher zukünftiger Bildung von Seen
- einen vertieften Einblick in die zukünftige grossräumige Gletscherentwicklung in guter Übereinstimmung mit anderen Modellen

Die Unsicherheiten der Modelle sind vielfältig und gross, aber liegen im Bereich der Unsicherheiten der vor- bzw. nachgeschalteten Klima- bzw. hydrologischen Modelle. Der Miteinbezug von Klimaszenarien in die Modelle ist zurzeit nur beschränkt möglich und hier auch nur die Änderung der Temperatur (keine Berücksichtigung der Niederschlagsänderung, die ja ihrerseits sehr unsicher ist). Die Unsicherheiten bei den zukünftigen Temperaturen bestimmen die Bandbreite der möglichen Gletscherentwicklung.

Die regionalen Analysen zeigen, dass die am stärksten vergletscherten Regionen (Wallis, Aare) ihre Gletscher am längsten behalten und damit den Volumenverlust dominieren. Allerdings arbeitet das Dickenabnahmemodell nur höhenabhängig und andere Faktoren wurden nicht berücksichtigt (Albedoveränderung, subglaziale Erosion, Schuttbedeckung, Beschattung). Kleine, gut geschützte Gletscher (z.B. durch Schnee, Schutt oder Schatten) können sich noch lange erhalten. Da Gletscher retrospektiv reagieren, ist für die grössten unter ihnen (Aletsch, Gorner, Unteraar) wegen der langen Reaktionszeit die Entwicklung bereits vorgegeben und ihr weiterer Rückgang unvermeidbar.

Dank

Wir danken den Auftraggebern der Projekte 'Klimaänderung und Wasserkraft' sowie 'Klimaänderung und Hydrologie' für die Möglichkeit diese Studie im Rahmen der Dissertation von Andreas Linsbauer durchzuführen. Die verwendeten digitalen Geländemodelle DHM25 level 1 und 2 sind von swisstopo und die GPR-Messungen sowie die entsprechenden ITEM-Eisdickenverteilungen von der VAW/ETHZ.

Literatur

- Bauder, A. Funk, M. & Gudmundsson, G. H. (2003), The ice-thickness distribution of Unteraargletscher, Switzerland, *Annals of Glaciology* **37**(6), 331-336.
- Binder, D. Brückl, E. Roch, K. Behm, M. Schöner, W. & Hynek, B. (2009), Determination of total ice volume and ice-thickness distribution of two glaciers in the Hohe Tauern region, Eastern Alps, from GPR data, *Annals of Glaciology* **50**(51), 71-79(9).
- Bosshard, T. Kotlarski, S. Ewen, T. & Schär, C. (2011), Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal, *Hydrology and Earth System Sciences* **15**(9), 2777-2788.
- Farinotti, D. Huss, M. Bauder, A. & Funk, M. (2009a), An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps, *Global and Planetary Change* **68**(3), 225-231.
- Farinotti, D. Huss, M. Bauder, A. Funk, M. & Truffer, M. (2009b), A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers, *Journal of Glaciology* **55**, 422-430.
- Fischer, A. (2009), Calculation of glacier volume from sparse ice-thickness data, applied to Schaufelferner, Austria, *Journal of Glaciology* **55**, 453-460.
- Haeberli, W. Paul, F. & Zemp, M. (in press), Vanishing glaciers in the European Alps, *The Pontifical Academy of Sciences, Scripta Varia 118, Fate of Mountain Glaciers in the Anthropocene, Working Group 2-4 April 2011, Vatican City*.
- Jouvet, G. Huss, M. Funk, M. & Blatter, H. (2011), Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate, *Journal of Glaciology* **57**(206), 1033-1045.
- Künzler, M. Huggel, C. Linsbauer, A. & Haeberli, W. (2010), Emerging risks related to new lakes in deglaciating areas of the Alps, in J.-P. Malet; T. Glade & N. Casagli, ed., *Mountain Risks: Bringing Science to Society. Proceedings of the "Mountain Risk" International Conference, 24-26 November 2010, Firenze, Italy, CERG Editions, Strasbourg, France, pp. 453-458*.
- Linsbauer, A. Paul, F. Hoelzle, M. Frey, H. & Haeberli, W. (2009), The Swiss Alps without glaciers – a GIS-based modelling approach for reconstruction of glacier beds, in R. Purves; S. Gruber; R. Straumann & T. Hengl, ed., *Proceedings of Geomorphometry 2009, University of Zurich, Zurich, Switzerland, , pp. 243-247*.
- Linsbauer, A. Paul, F. P. & Haeberli, W. (in review), Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: A new, fast and robust approach., *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*.
- Oerlemans, J. Giesen, R. & Van Den Broeke, M. (2009), Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland), *Journal of Glaciology* **55**(192), 729-736.
- Paul, F. (2010), The influence of changes in glacier extent and surface elevation on modeled mass balance. *The Cryosphere*, **4**, 569-581.

- Paul, F. & Linsbauer, A. (2012), Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines and a DEM, *International Journal of Geographical Information Science*.
- Paul, F. Maisch, M. Rothenbuehler, C. Hoelzle, M. & Haeberli, W. (2007), Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling, *Global Planet Change* **55**(4), 343-357.
- Paul, F. Linsbauer, A. & Haeberli, W. (2011), Grossräumige Modellierung von Schwundszenerarien für alle Schweizer Gletscher, Klimaänderung und Wasserkraft, Sektorielle Studie Wallis, Modul B Gletscherszenarien, Technical report, WWK-Schlussbericht des Geographischen Instituts der Universität Zürich (GIUZ).
- Viviroli, D. Zappa, M. Gurtz, J. & Weingartner, R. (2009), An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools, *Environmental Modelling & Software* **24**(10), 1209-1222.
- Zemp, M. Haeberli, W. Hoelzle, M. & Paul, F. (2006), Alpine glaciers to disappear within decades?, *Geophys. Res. Lett.* **33**(13), L13504.