Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 66 (2009)

Artikel: Gletscher : unberechenbare Zeitgenossen?
Autor: Bauder, Andreas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-324109

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Andreas Bauder*

Gletscher: unberechenbare Zeitgenossen?

Einleitung

Die Gletscher sind bereits den Zeitgenossen Hallers im alpinen Landschaftsbild ins Auge gestochen. Ihre vielschichtige Bedeutung für die Menschen ist inzwischen intensiv erforscht. Die Naturforscher wie auch die Bewohner der Alpen erkannten schnell, dass die Gletscher keineswegs statische Gebilde sind, sondern bei genauerer Betrachtung ein spannendes dynamisches Verhalten offenbaren. Dies ist das Resultat des Zusammenspiels vieler Prozesse. Die Gletscher stehen dabei in intensiver Wechselwirkung mit ihrer Umgebung. Die Auswirkungen sind deshalb für die Menschen von grosser Bedeutung. Gletscher faszinieren den Beobachter insbesondere, weil Veränderungen von ganz unterschiedlicher Geschwindigkeit beobachtet werden können. Der langen Tradition der Alpenforschung in der Schweiz und vor allem dem unermüdlichen Einsatz einiger Idealisten ist es zu verdanken, dass heute lange und einmalige Messreihen von den Schweizer Gletschern existieren. Dank dem technischen Fortschritt eröffneten sich der Gletscherforschung immer wieder neue Messmethoden und gleichzeitig wurden numerische Modelle laufend verfeinert und erweitert. Viele wichtige Erkenntnisse sind daraus abgeleitet worden. Direkte Feldmessungen sind zudem unerlässlich, um eingesetzte Verfahren und Methoden zu eichen oder zu validieren. Anhand verschiedener Resultate ausgewählter Beispiele aus den Schweizer Alpen soll versucht werden, Methoden der Gletscherforschung aufzuzeigen, die es ermöglichen, das Verhalten der Gletscher nicht nur zu verstehen, sondern auch zu berechnen und vorherzusagen.

Lebendige Gletscher

Zentral für das Verhalten der Gletscher ist die Eigenschaft des Eises, sich unter dem Einfluss der Schwerkraft als zähflüssige Masse zu deformieren. Ein Gletscher fliesst deshalb kontinuierlich den Abhang hinunter. Sein Fortbestehen ist nur solange gewährleistet, als dauernd neu gebildetes Eis für Nachschub sorgt. Deshalb vermag sich ein Gletscher nur so weit auszudehnen, als der Eisnachschub nicht durch den Eisverlust gebremst wird.

* Dr. Andreas Bauder, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich

In *Abbildung 1 oben* sind am Beispiel des Unteraargletschers Messungen der Eisfliessgeschwindigkeit an der Oberfläche gezeigt. Ist die räumliche Ausdehnung der Eismasse bekannt, können mit einem Fliessmodell die Spannungen und Bewegungen innerhalb der Eismasse berechnet werden. Stellvertretend dafür sind Resultate der vertikalen Geschwindigkeit eines dreidimensionalen Fliessmodells in *Abbildung 1 unten* dargestellt. Alpine Gletscher weisen oft recht komplexe geometrische Verhältnisse auf, so auch beim Unteraargletscher. Diese widerspiegeln sich in den Geschwindigkeiten. Während an der Oberfläche ein generell recht gleichmässiger Verlauf auszumachen ist, zeigen die vertikalen Geschwindigkeiten im Innern grosse kleinräumige Unterschiede.

Wird die Fliessgeschwindigkeit zu gross, so lässt sich das Eis nicht mehr verformen und es öffnen sich Spalten. Das Spaltenmuster deutet Fliessrichtung und räumliche Änderung der Fliessgeschwindigkeit an. Zusammen mit der Oberflächentopographie können daraus zudem auch Unterschiede in der Eisdicke abgeleitet werden: an Buckeln mit Spalten ist eine geringere Dicke zu erwarten als in flachen Zonen ohne Spalten. Bei steilen Eismassen wie bei Hängegletschern kann das Öffnen von Spalten so weit führen, dass Teile ihren Halt verlieren und abbrechen. Numerische Simulationsmodelle sind inzwischen in der Lage, beobachtete Ereignisse solcher Art nachzurechnen (Pralong & Funk, 2006) und ermöglichen zudem, eine entsprechende Entwicklung aufzuzeigen und in der Folge auch den Zeitpunkt des Abbrechens zu prognostizieren.

Die Verhältnisse von neu gebildetem Eis und Verlust durch Schmelze werden durch die Massenbilanz eines Gletschers beschrieben. Wie die antreibenden Einflüsse durch die Witterungsbedingungen, so ist auch die Massenbilanz an der Oberfläche grossen Fluktuationen von Jahr zu Jahr unterworfen. Aus wiederholter Vermessung der Gletscheroberfläche wird die Veränderung des Eisvolumens bestimmt. Für verschiedene Schweizer Gletscher existieren mehrere solche Aufnahmen im Abstand von einigen Jahren bis mehreren Dekaden zurück bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts (Bauder et al., 2007). Mit einem Massenbilanzmodell, das Schneeakkumulation und Schmelze berechnet, konnte schliesslich aus der Eisvolumenänderung und vorhandenen punktuellen Messungen der Schneeakkumulation und Schmelze sowie meteorologischen Messreihen die Massenbilanz in saisonaler Auflösung bis zurück ins Jahr 1865 rekonstruiert werden (Huss et al., 2008a). Die aufsummierte Jahresbilanz für die vier Gletscher Grosser Aletsch, Rhone, Gries und Silvretta ist in *Abbildung 2* dargestellt. Es sind grosse Unterschiede im Massenverlust der vier Gletscher vorhanden. Die Schwankungen von Jahr zu Jahr hingegen verlaufen parallel. Diese Unterschiede sind einerseits in der dynamische Reaktion der einzelnen Gletscher als auch in unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen begründet. In den letzten rund hundert Jahren lassen sich weiter je zwei Dekaden ausmachen mit Massengewinn (I, III) und erhöhtem Massenverlust (II, IV). Weiterführende Untersuchungen zeigen zudem, dass die

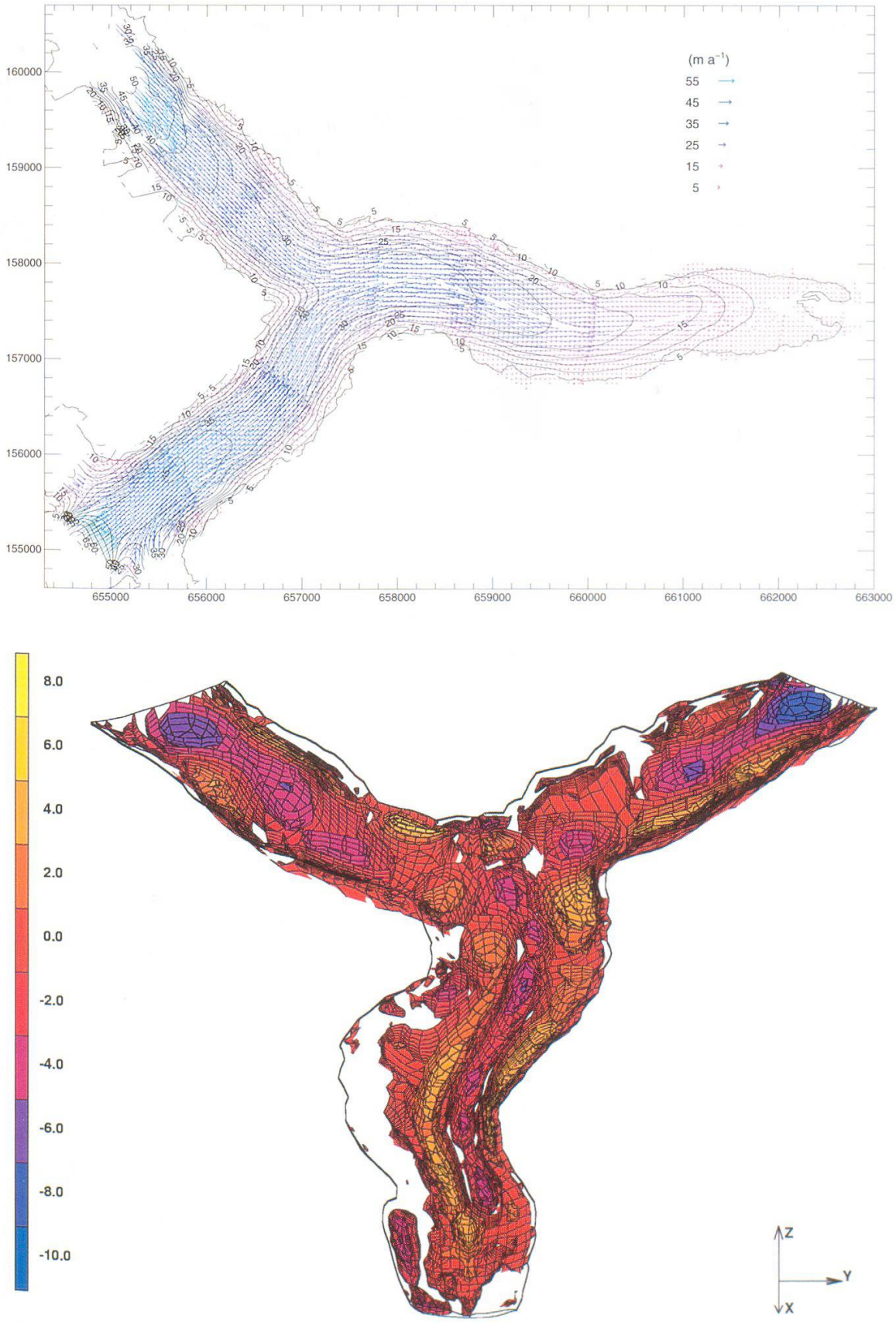

Abbildung 1: Unteraargletscher: photogrammetrische Messungen der horizontalen Geschwindigkeit an der Gletscheroberfläche (oben) und berechnete Verteilung der vertikalen Geschwindigkeit (unten). (Bauder, 2001)

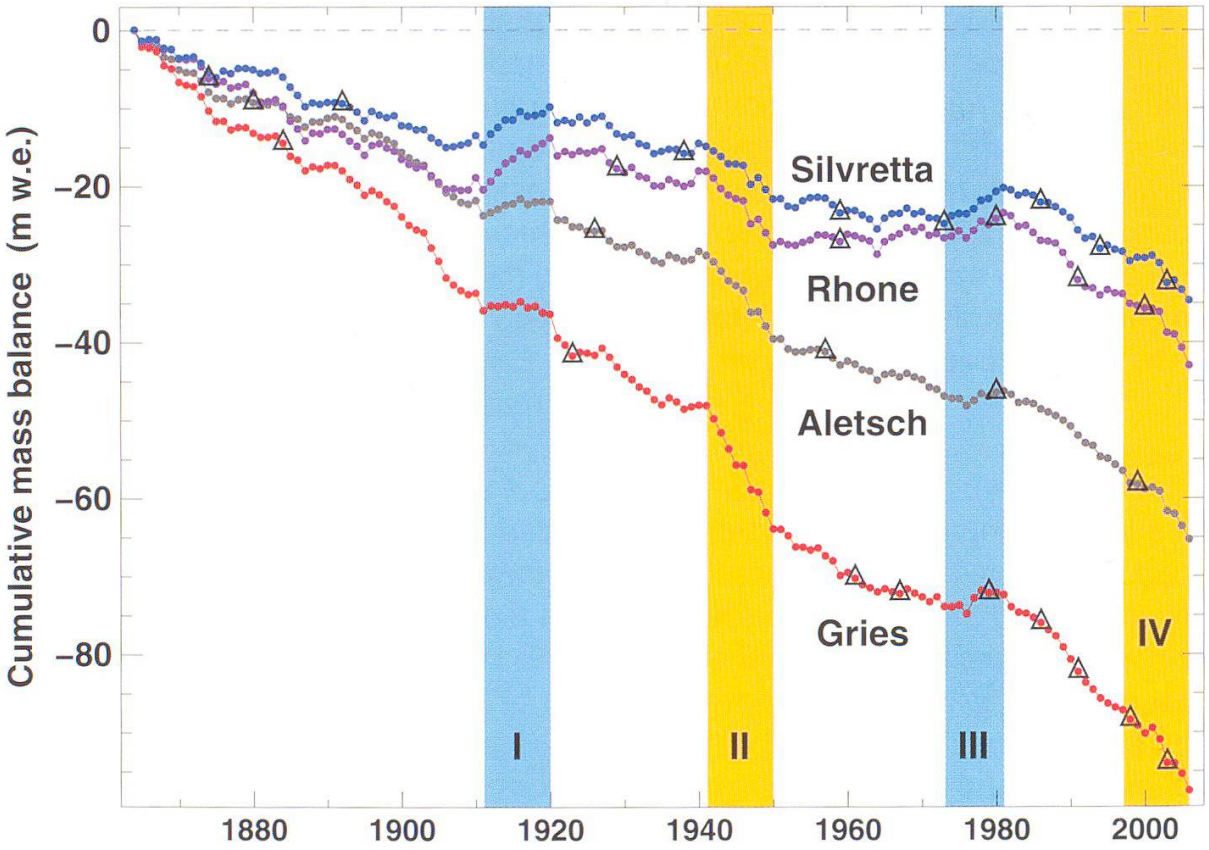

Abbildung 2: Kumulative Entwicklung der Massenbilanz der vier Gletscher Grosser Aletsch, Rhone, Gries und Silvretta seit 1865. Je zwei Perioden mit Massengewinn (I, III) und grossem Massenverlust (II, IV) sind speziell hervorgehoben. (Huss et al., 2008a)

Schmelzbedingungen in Periode II intensiver waren als in Periode IV, obwohl deutlich höhere Temperaturen vorherrschten (Huss & Bauder, 2009).

Eine weitere wichtige Rolle für das Verhalten der Gletscher spielt das Schmelzwasser. Dieses sucht sich von der Oberfläche über Spalten und Strudellöcher durch Kanäle einen Weg bis an den Gletschergrund und diesem entlang, bis es schliesslich an der Gletscherzunge den Gletscher wieder verlässt. Hoher Wasserdruck an der Gletscherbasis führt denn auch zu verminderter Gleitreibung und einer Beschleunigung der Eismasse. Diese ist oft begleitet durch eine an der Oberfläche messbare Hebung. Das Schmelzwasserangebot variiert stark sowohl saisonal als auch tageszeitlich. Der Abfluss durch den Gletscher vermag dieses Signal etwas zu dämpfen. Die Entwicklung der Abflusskanäle durch den Gletscher hängt von zwei sich entgegenwirkenden Prozessen ab: der Erweiterung des Kanals durch die Schmelze wegen der turbulenten Reibung an der Kanalwand einerseits und der Kontraktion durch den Eisüberlagerungsdruck anderseits. Wie mit Modellrechnungen nachgewiesen werden konnte, überwiegt die Kanalerweiterung die Einengung, solange dauernd Wasser nachfliesst. Das bedeutet wiederum, dass wenn einmal ein Kanal gebildet ist, der Abfluss progressiv ansteigen wird, bis das Reservoir erschöpft ist. Diese Eigenschaft ist bei gletschergestauten Schmelz-

wasserseen – wie zurzeit am Unteren Grindelwaldgletscher vorhanden – von Bedeutung (Werder et al., im Druck). Entsprechende Modellrechnungen ermöglichen sodann auch Spitzenabflüsse und Zeitdauer abzuschätzen.

Unterschiede in der Eisbildung, dem Abschmelzen und der Fliessbewegung sowie in deren Zusammenspiel führen schliesslich dazu, dass die Gletscher ihre Ausdehnung verändern. Entsprechende numerische Simulationsmodelle, wie für die verschiedenen Prozesse bereits einzeln vorgestellt, ermöglichen es zusammengefügt, die gut dokumentierten Veränderungen der Gletscher in der Vergangenheit nachzurechnen und die weitere Entwicklung in der Zukunft abzuschätzen. Mit den zurzeit verfügbaren Szenarien für das zukünftige Klima (Frei, 2007) wurde die Entwicklung des Grossen Aletschgletschers bis zum Ende des 21. Jahrhunderts berechnet (Huss et al., 2007). *Abbildung 3 oben* zeigt für das wahrscheinlichste Szenarium die räumliche Ausdehnung des grössten Alpengletschers zu den drei Zeitpunkten 2025, 2050 und 2075. Während bis Mitte des Jahrhunderts noch keine allzu grosse Veränderung hervortritt, setzt anschliessend ein markanter Rückzug ein. Grosse Unterschiede ergeben sich jedoch für die Entwicklung der Gletscherfläche je nach Wahl des Szenariums. Der zeitliche Verlauf bis Ende des Jahrhunderts ist in *Abbildung 3 unten* für das wahrscheinlichste Szenarium (2) zusammen mit zwei extremen Szenarien (1 und 3) dargestellt. Es wurde jeweils auch ein Unsicherheitsbereich ermittelt.

Solche Modellrechnungen für die Zukunft sind die entscheidenden Grundlagen, um die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Alpenraum abzuschätzen (Huss et al., 2008b). Erste Resultate deuten denn auch entscheidende Veränderungen beim Abfluss an. Dies trifft nicht nur auf die Menge, sondern auch auf die saisonale Verteilung zu. Das typisch glaziale Abflussregime mit Spitzen in den Sommermonaten Juni bis September wird sich allmählich in ein nivales Regime mit bereits früh einsetzender Schneeschmelze im Frühling verschieben.

Fazit

Die für das Verhalten der Gletscher wichtigsten Prozesse sind in den physikalischen Grundlagen weitgehend verstanden. Diese Kenntnis ist auch umgesetzt in verschiedenen numerischen Simulationsmodellen, die es erlauben, sich abspielende Entwicklungen zu verfolgen und Auswirkungen zu prognostizieren. Entscheidende Bedeutung für das Erkennen einer Entwicklung jedoch kommt den auslösenden Bedingungen zu. Wie oft bei Naturphänomenen spielt auch bei den Gletschern dabei das zufällige Zusammentreffen verschiedener Bedingungen eine Rolle. Obwohl viele dieser notwendigen Bedingungen verstanden sind, bestehen in den meisten Fällen grosse Unsicherheiten über Verlauf und Veränderung der entscheidenden Einflussgrössen. Die Seltenheit einiger Ereignisse erschwert das weitere

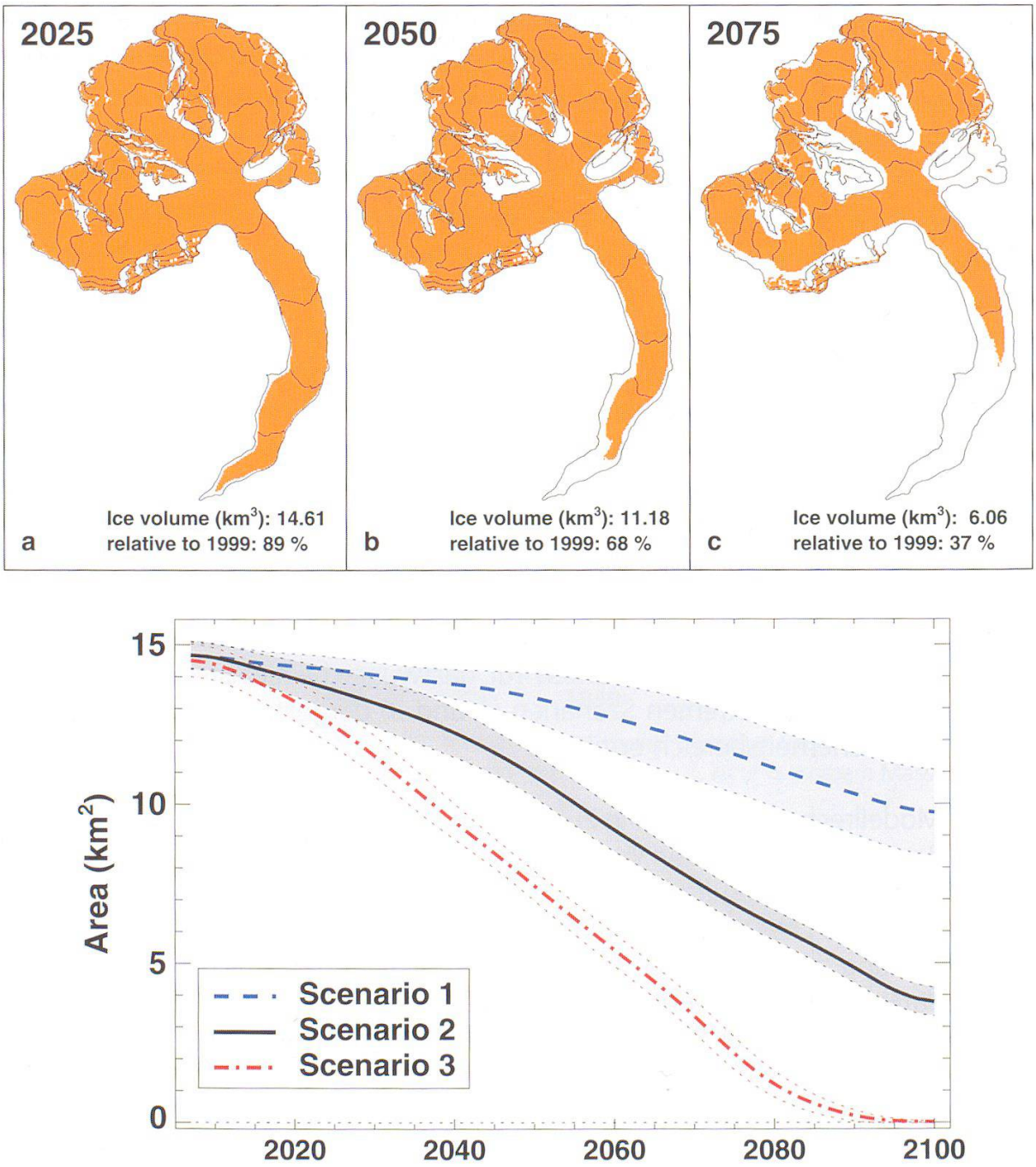

Abbildung 3: Prognose für die zukünftige Ausdehnung des Grossen Aletschgletschers: räumliche Ausdehnung im Jahr 2025, 2050 und 2075 (oben) und zeitliche Entwicklung der Gletscherfläche für drei unterschiedliche Klimaszenarien (unten). (Huss et al., 2007)

Erforschen. Meist ist das rechtzeitige Erkennen Zufall. Die Gletscher in den Schweizer Alpen werden die Beobachter wie die Forschenden weiterhin in Atem halten und viele spannende und manchmal auch unerwartete Verhaltensmuster offenbaren.

Die präsentierten Beispiele sollen einen Überblick vermitteln. Es handelt sich dabei keinesfalls um eine umfassende, abschliessende Darstellung. Es sind teilweise auch

erste Resultate aus der aktuellen Forschung, die noch weiterer Analysen bedürfer um die entsprechenden Schlussfolgerungen zu erhärten. Dank gilt allen Fachko legen, auch ehemaligen, die zum Stand der Erkenntnisse beigetragen haben.

Literatur

Bauder, A. (2001). Bestimmung der Massenbilanz von Gletschern mit Fernerkundungsmethoden un Fliessmodellierungen. Mitteilungen 169, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologi der ETH Zürich. ff. 171.

Bauder, A., Funk, M. & Huss, M. (2007). Ice volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps sinc the end of the 19th century. Annals of Glaciology, 46:145–149.

Frei, C. (2007). Die Klimazukunft der Schweiz. In Klimaänderung und die Schweiz 2050 – Erwartet Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Beratendes Organ für Fragen der Klimaär derung (OcCC), http://www.occc.ch. 12–16.

Huss, M. & Bauder, A. (2009). 20th-century climate change inferred from four long-term point obse vations of seasonal mass balance. Annals of Glaciology, 50(50):207–214.

Huss, M., Bauder, A., Funk, M. & Hock, R. (2008a). Determination of the seasonal mass balance of fou alpine glaciers since 1865. Journal of Geophysical Research, 113(F1):F01015.

Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A. & Funk, M. (2007). Grosser Aletschgletscher in the 21th centur Modelling glacier evolution and stream-flow runoff. 5th Swiss Geoscience Meeting, Geneva 16. 17.11.2007.

Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A. und Funk, M. (2008b). Modelling runoff from highly glacierized alpin drainage basins in a changing climate. Hydrological Processes, 22(19):3888–3902.

Pralong, A. und Funk, M. (2006). On the instability of avalanching glaciers. Journal of Glaciolog 52(176):31–48.

Werder, M.A., Bauder, A., Funk, M. & Keusen, H.R. (im Druck). Hazard assessment investigations i connection with the formation of a lake on the tongue of the Unterer Grindelwaldgletscher, Be nese Alps, Switzerland. Natural Hazards.