



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt

Ökologische und ökonomische Auswirkungen des
Gletscherrückgangs im alpinen Raum“

verfasst von / submitted by

Julian Plenk, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien, 2020 / Vienna 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 199 509 510 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Lehrverbund
UF Französisch Lehrverbund
UF Geographie und Wirtschaft Lehrverbund

Betreut von / Supervisor

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, am 9.6. 2020

Inhaltsverzeichnis

Erklärung.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Kurzzusammenfassung.....	V
Abstract.....	VI
Danksagung.....	VII
1. Einleitung.....	1
2. Forschungsfragen und Hypothesen.....	3
3. Methodik.....	4
4. Theoretische Grundlagen.....	6
4.1. Gletscher als Teil der Kryosphäre.....	6
4.2. Zeitliche Entwicklung der Gletscher in den Alpen.....	10
4.2.1. Beispiel Pasterze.....	15
4.2.2. Beispiel „Übergossene Alm“.....	17
4.3. Einflussfaktoren auf die Massenbilanz eines Gletschers.....	19
5. Aktuelle Nutzung der Gletscher durch den Menschen.....	22
5.1. Wasserkraftwerke.....	22
5.2. Skitourismus.....	25
6. Auswirkungen des Gletscherrückgangs.....	29
6.1. Energieerzeugung.....	30
6.2. Trinkwasserversorgung.....	43
6.3. Gefahr durch Felsstürze.....	46
7. Diskussion.....	49
8. Résumé.....	57
9. Perspektiven.....	59
10. Bibliographie.....	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Massenbilanz eines Gletschers – Quelle: Zepp 2017:188.....	7
Abbildung 2: Entwicklung der österreichischen Gletscher (Zeitraum 1890-2019) – Quelle: Patzelt 2018:9-13; Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2020:6; eigene Darstellung.....	11
Abbildung 3: Entwicklung der Schweizer Gletscher (Zeitraum 1850-2100) – Quelle: Job et al. 2011:12.....	14
Abbildung 4: Entwicklung der Vergletscherung im südlichen Wallis – Quelle: Job et al. 2011:11....	15
Abbildung 5: Entwicklung der Pasterze – Quelle: http://www.gletscherarchiv.de/files/11-202063-pasterze-2019-2.jpg ; eigene Bearbeitung.....	16
Abbildung 6: Nährgebietsveränderungen der Pasterze je nach Temperaturanstieg – Quelle: Lieb/Slupezky 2011:141.....	17
Abbildung 7: Übergossene Alm (August 2018) – Quelle: https://oekastatic.orf.at/static/images/site/oeka/20180834/dsc_2612.5789390.jpg	18
Abbildung 8: Entwicklung der Winter- Sommer und Gesamtmassenbilanz am Vernagtferner im Zeitraum 1964-2011 (türkis: Winterbilanz, rot: Sommerbilanz, gelb: Gesamtbilanz, inklusive der jeweiligen linearen Trends) – Quelle: Mayer et al. 2013:228.....	20
Abbildung 9: Speichersee Mooserboden Kaprun (aufgenommen am 2. Juni 2020) – Quelle: eigene Aufnahme.....	23
Abbildung 10: Jährlicher Gletscherschmelzwasserüberschuss im Verhältnis zum Gesamtabfluss – Quelle: Lambrecht/Mayer 2009:360.....	25
Abbildung 11: Gletscherzusammenschluss Pitztal-Ötztal – Quelle: Stern 2020:74.....	27
Abbildung 12: Saisonale Abflussmengen des Rheins bei Basel – Quelle: Job et al. 2011:15.....	32
Abbildung 13: Zeitliche Veränderung des mittleren Tagesabflusses in den Einzugsgebieten von Gorner und Mattmark – Quelle: Farinotti et al. 2011:277.....	35
Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Wasserkrafterzeugung aus dem Gletschermassenverlust – Quelle: Schaefli et al. 2019:624.....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Saisonal schwankende Teile der Kryosphäre (Zeitraum 1967-2014) – Quelle: Willmes et al. 2015:26.....	8
Tabelle 2: Perennierende Teile der Kryosphäre (Stand 2014) – Quelle: Willmes et al. 2015:26.....	9
Tabelle 3: Veränderung der Gletscherflächen im Einzugsgebiet von Kraftwerken – Quelle: Job et al. 2011:12.....	31
Tabelle 4: Veränderung der mittlere saisonalen Abflüsse 2021-2050 verglichen mit 1980-2009 – Quelle: Weingartner et al. 2013:244.....	34

Kurzzusammenfassung

Seit einigen Jahrzehnten ist das globale Klima von einem Anstieg der Temperaturen geprägt, wodurch sich auch große Veränderungen im Bereich der Kryosphäre ergeben. Ziel dieser Arbeit ist es, auf die Bedeutung einzugehen, die die Gletscher in den Alpen auf ihre Umwelt haben. Für viele erscheinen diese als unveränderliche Eismassen in den Bergen, die schon immer da waren. Daraus ergibt sich die Problematik, dass das Bestehen von Gletschern und die Möglichkeit diese wirtschaftlich zu nutzen als selbstverständlich erachtet werden. Tatsächlich werden viele jedoch bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verschwunden sein, was teils weitreichende Auswirkungen mit sich bringen kann.

Aufbauend auf den aktuellen Forschungsstand werden der massive Gletscherrückgang seit dem Ende der letzten Kleinen Eiszeit beschrieben und jene Faktoren ermittelt, die hauptsächlich ausschlaggebend für die anhaltenden negativen Massenbilanzen sind, auch in Hinblick darauf, inwiefern Eingriffe des Menschen hierbei eine Rolle spielen. Im Hauptteil der Arbeit geht es um die Folgen, die aus dem Gletscherrückzug resultieren. Es wird geklärt, welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen zu erwarten sind, wenn weniger Schmelzwasser zur Verfügung steht, oder wenn durch das Verschwinden von riesigen Eismassen, Erosionsprozesse in Gang gesetzt werden. Folgende Ergebnisse lassen sich daraus ableiten.

Geringere Abflussmengen nach dem Abschmelzen der Gletscher führen vor allem in den glazialen Regimen zu deutlichen Rückgängen in der Stromproduktion aus Wasserkraft, während etwa für die Trinkwasserversorgung hingegen keine Gefahr besteht. Außerdem kann die fehlende Stützfunktion der Gletscher zu vermehrten Felssturzereignissen führen. Hierbei ist aber meist ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren erforderlich.

Abstract

For some decades, the global climate has been characterised by a rise in temperatures, which has also resulted in major changes in the cryosphere. The aim of this thesis is to address the importance of alpine glaciers for their environment. As glaciers are often seen as unchanging ice masses which have always been there, their existence as well as the possibility of exploiting them economically are taken for granted. In fact, however, many will have disappeared by the end of the 21st century, which can have far-reaching consequences.

Based on the current state of research, the massive retreat of glaciers since the end of the Little Ice Age is described and the factors which are mainly responsible for the continuing negative mass balances are determined, also with regard to the extent to which human intervention influences this process. The main part of the thesis deals with the consequences resulting from glacier retreat. It will be clarified which ecological and economic effects can be expected if less meltwater is available or if erosion processes are set in motion by the disappearance of huge ice masses.

The following results can be deduced. Reduced runoff after the melting of the glaciers leads to significant reductions in hydroelectric power production, especially in glacial regimes, while drinking water supplies are not at risk. In addition, the lack of a supporting function of the glaciers can lead to an increase in rockfall events. However, this usually requires an interplay of several factors.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Danksagung

Nach sechs Jahren Studium gilt mein besonderer Dank dem lebensfrohen, aufgeschlossenen und unglaublich vielseitigen Wien, in dem ich eine wunderbare Zeit verbringen durfte, sowie all den alten Wegbegleitern und neu gefundenen Freunden, die diesen Ort zum meinem zweiten Zuhause machten.

Aus all diesen möchte ich hier noch folgenden Personen hervorheben:

Meine Eltern **Bettina** und **Siggi** und meine **Großeltern**, neben dem Korrekturlesen vor allem dafür, dass ihr mich während all der Zeit stets unterstützt und mir dadurch diesen Weg ermöglicht habt.

Markus und **Martin** für einen reflektierten zweiten Blick auf diese Arbeit.

Stefan, den besten Studienkollegen überhaupt, für die langjährige und immer förderliche Zusammenarbeit seit der ersten Vorlesung.

Kathi für das Einbringen deiner perfekten Englischkenntnisse in diese Arbeit.

Nicole, Yves, Lisa K., Sarah, Lisa H., Daniela und **Jana** für die vielen lustigen Momente im In- und Ausland, beim Skifahren, Volleyball oder gemütlichen Zusammensitzen.

Karina für den ein oder anderen Apfelstrudel, Cheddar-Popcorn mit Zuckerwatte, Erinnerungen an gemeinsame Tennisversuche, Wildwasserrutschen, 14-Stunden lange Busfahrten, den Blick über die Dächer von Bergen und vieles mehr.

DANKE und MERCI,

ihr seids die Besten.

Nicht zuletzt danke ich natürlich auch Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade dafür, dass Sie es mir ermöglicht haben, mich im Rahmen dieser Masterarbeit mit einem Thema zu beschäftigen, dem ich mich sehr verbunden fühle und dem ich auch in Zukunft noch großes Interesse schenken werde.

1. Einleitung

Als „ewiges Eis“ gelten die Gletscher der Berge nicht nur für die Menschen im Alpenraum, sondern weit darüber hinaus. Es ist eine Bezeichnung, die gleichsam als Mythos, wie auch als Hindernis angesehen werden kann. Einerseits verkörpert sie ein Bild von weißen Berggipfeln, unberührter Natur und hochalpinen Landschaften als Ziel für Alpinisten und Abenteurer – Vorstellungen, die in hohem Maße für das heutige Prestige der Alpen als Urlaubsort und Lebensraum verantwortlich sind. Dem gegenüber steht andererseits die Illusion, dass es sich hierbei um einen immerwährenden Zustand handelt, doch das Eis der Gletscher ist den Alpen ebenso wenig dauerhaft immanent wie anderen Hochgebirgen der Erde. Es ist über viele Jahrhunderte hinweg entstanden und droht nun in nur wenigen Jahrzehnten vielerorts vollkommen zu verschwinden. Dennoch wird es oftmals als selbstverständlich angesehen oder der Zeitpunkt des Abschmelzens noch als zu weit in der Zukunft erachtet, als dass man sich darüber Gedanken machen müsste, sodass die Folgen, welche aus dem Rückzug der Gletscher erwachsen, nur getrübt wahrgenommen werden.

Das Aufzeigen eben dieser und sie ins Zentrum der Aufmerksamkeit zu rücken, ist deshalb das klare Ziel dieser Arbeit. Es soll in Zeiten der globalen Klimaerwärmung, wo sich Ökosysteme auf der ganzen Welt an sich ändernde Gegebenheiten anpassen müssen, ein besonderes Augenmerk auf die hochalpine Alpenregion und die Gletscher, die sie prägen, gerichtet werden. Zunächst soll die Entwicklung der Gletscher seit der letzten Kleinen Eiszeit mit Hilfe der teils über 150 Jahre alten Messreihen dargestellt werden, um anschließend davon ausgehend die Einflussfaktoren auf die Massenbilanz zu analysieren. Ebenso gilt es zu klären, inwieweit deren gegenwärtige wirtschaftliche Nutzung für den Tourismus oder die Energieerzeugung durch Wasserkraft eine mögliche Beeinträchtigung mit sich bringt.

Die Beurteilung der Auswirkungen des Gletscherrückgangs gliedert sich wiederum in drei Teilbereiche. Es werden die Folgen in Bezug auf Energieerzeugung und Trinkwasserversorgung anhand sich verändernder Abflussregime untersucht, sowie in Bezug auf eine potentiell erhöhte Wahrscheinlichkeit für Felsstürze aufgrund einer fehlenden stabilisierenden Funktion der Eismassen nach deren Abschmelzen.

Denn nur wenn eine Welt ohne Gletscher gezeichnet wurde und die Folgen in ökologischer wie auch in ökonomischer Hinsicht bekannt sind, wird klar, welche Bedeutung diese für den Lebensraum Alpen haben und es kann ein breites Verständnis dafür entstehen, weshalb gerade dieses Ökosystem es wert ist, geschützt zu werden. Viele Fragen zu den tatsächlichen Auswirkungen des

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Gletscherrückzugs mögen noch unbeantwortet sein, Prognosen angezweifelt werden und dennoch soll Einigkeit darin bestehen, dass weiß bedeckte Alpengipfel ein nicht ewig währendes Privileg darstellen.

2. Forschungsfragen und Hypothesen

Im Zuge dieser Arbeit sollen aufbauend auf den aktuellen Forschungsstand, verschiedene Studien miteinander verglichen werden. Es herrscht breiter Konsens darüber, dass ein Großteil der Alpengletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verschwunden sein wird, und dass infolgedessen etwa auch die Abflussmengen beeinflusst werden können. Seit 1997 ist diesbezüglich auch die Anzahl der Publikationen in der Schweiz kontinuierlich angestiegen. (vgl. Ayala et al. 2020:14) Welche Folgen aber konkret für einzelne Regionen oder den Alpenraum als Ganzes zu erwarten sind, ist noch zu klären. Aufgabe dieser Arbeit ist es demnach auch bestehende Unklarheiten zu benennen und daraus resultierend zu weiteren Untersuchungen anzuregen.

Um auf die in der Einleitung erwähnten Punkte einzugehen und genauer zu hinterfragen, bilden folgende Forschungsfragen samt dazugehöriger Hypothesen, die zur Beantwortung der Fragestellung beitragen sollen, die Grundlage dieser Masterarbeit.

F1: Durch welche Faktoren wird die Entwicklung der Gletscher in den Alpen maßgeblich beeinflusst?

H1: Steigende Temperaturen sind hauptverantwortlich für das verstärkte Schmelzen der alpinen Gletscher seit der letzten Kleinen Eiszeit.

H2: Eingriffe des Menschen in die Gletscherwelt der Alpen zur wirtschaftlichen Nutzung können sich negativ auf die Massenbilanz auswirken.

Die Forschungsfrage F1 dient zunächst dazu, die Entwicklung der Gletscher seit der letzten Kleinen Eiszeit zu analysieren und gleichzeitig jene Faktoren zu ermitteln, die hier den größten Einfluss haben. Daran anschließend soll die Forschungsfrage F2 dazu beitragen, einige mit dem Abschmelzen der Gletscher verbundenen Folgen aufzuzeigen und Trends für die zukünftige Entwicklung abzubilden.

F2: Welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen resultieren aus dem zunehmenden und andauernden Abschmelzen der Gletscher in den Alpen?

H3: Je weniger Gletscherschmelzwasser vorhanden ist, desto geringer ist die Energieproduktion durch Wasserkraft im Alpenraum.

H4: Sinkende Gletscherschmelzwassermengen können einen Mangel in der Trinkwasserversorgung im Alpenraum verursachen.

H5: Durch den Gletscherrückzug werden Felsstürze im Hochgebirge begünstigt.

3. Methodik

Die folgende Masterarbeit zum Thema „Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt - Ökologische und ökonomische Auswirkungen des Gletscherrückgangs im alpinen Raum“ wurde mit Hilfe der hermeneutischen Methode erstellt. Ziel dieser oft auch als Literatarbeit bezeichneten Vorgangsweise ist es, gemäß Bässler (2014:63), dass bereits vorhandene Erkenntnisse und Meinungen zum aktuellen Forschungsstand verglichen und analysiert werden. Auf diese Art und Weise soll eine kritische und reflektierte Auseinandersetzung mit der behandelten Literatur erfolgen, damit letztendlich die Forschungsfragen F1: *„Durch welche Faktoren wird die Entwicklung der Gletscher in den Alpen maßgeblich beeinflusst?“*, und F2: *„Welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen resultieren aus dem zunehmenden Abschmelzen der Gletscher in den Alpen?“*, beantwortet werden können.

Am Beginn jeder Literatarbeit steht zunächst einmal die Aufgabe, sich mit dem Thema vertraut zu machen. Gerade bei umfangreicheren Arbeiten ist dafür nach Lärer et al. (2010:4) eine systematische Literaturanalyse empfohlen, denn eine gewissenhafte Literaturrecherche kann als Basis jeder wissenschaftlichen Arbeit angesehen werden. Ein systematisches Vorgehen dabei ist vor allem deshalb vorteilhaft, um den Überblick über die zahlreichen verschiedenen Quellen zu behalten und ein Durchsuchen von unterschiedlichen Datenbanken beziehungsweise deren Dokumentation zu ermöglichen.

Noch vor der eigentlichen Literaturanalyse muss allerdings ein Fokus festgelegt werden, um das zu behandelnde Themengebiet einzugrenzen, insbesondere, wenn es sich wie hier um ein recht weitläufiges Thema handelt. Mit der Formulierung einer Forschungsfrage, sowie der Erstellung einer vorläufigen Gliederung sind die Ziele und die Ausrichtung der Arbeit konkretisiert worden und zwar vor dem Hintergrund, den aktuellen Stand der Wissenschaft aus einer neutralen Position heraus wiederzugeben. Bei der Auswahl der Literaturquellen wurde einerseits auf die Aktualität Wert gelegt, besonders in den Bereichen, wo die Folgen des Gletscherrückgangs und mögliche Anpassungsmaßnahmen dafür behandelt werden und andererseits auf die wissenschaftliche Fundiertheit der Quellen. In Bezug auf die Wahl der Forschungsfrage und den dazugehörigen Forschungshypothesen wurde neben einer präzisen Formulierung auch darauf geachtet, dass diese sich auf einen abgegrenzten Bereich beziehen, damit sie im Folgenden mit den zur Verfügung stehenden Mitteln auch beantwortet werden können.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Der Prozess der Literaturrecherche konzentrierte sich wegen der mehrere Wochen lang geschlossenen Bibliotheken in Österreich, aufgrund der Corona Pandemie in erster Linie auf Quellen, die in digitaler Form verfügbar sind. Dafür wurden auf die Datenbanken der Universitäten Wien und Salzburg, sowie auf Google Scholar, ResearchGate und ScienceDirect zurückgegriffen, in Erwartung, Zugang zu möglichst fundierten Publikationen zu erhalten. Besonders wichtig bei Literaturrecherchen ist natürlich immer eine überlegte Auswahl und Verwendung der passenden Suchbegriffe und Schlüsselworte. Damit diese auch zu einer breiten Auswahl an Ergebnissen führen, wurde die Suche um Synonyme und englische Übersetzungen erweitert, denn eine größere Zahl an Suchbegriffen hat naturgemäß auch differenziertere Resultate zur Folge. Eine weitere Spezifizierung wurde mit der Verwendung von Operatoren wie *and*, *or* oder *not* vorgenommen. Die Suche kann mit deren Hilfe weiter verfeinert werden und irrelevante Publikationen werden herausgefiltert. Folgende Suchbegriffe wurden letztendlich für die Recherche herangezogen und untereinander kombiniert: *Gletscher, Alpen, Alpenraum, Österreich, Schweiz, Italien, Frankreich, Gletscherrückgang, Auswirkungen/Folgen, Abschmelzen, Gletscherschmelzwasser, (Trink-)wasserversorgung, Energieerzeugung, Wasserkraft, Stromproduktion, Felsstürze, Vergletscherung.*

Aus den daraus resultierenden Ergebnissen wurde schließlich versucht, vorrangig auf jenen aufzubauen, die die jüngsten Daten und Erkenntnisse enthielten, um den aktuellen Forschungsstand bestmöglich zusammenzufassen.

4. Theoretische Grundlagen

Am Beginn dieser Arbeit sollen einleitend zunächst einmal einige Begriffe und Fragen aufgegriffen werden, um anschließend auf die Bedeutung des Themas für Mensch und Umwelt eingehen zu können. Gletscher werden häufig im Zusammenhang mit dem anthropogen verursachten Klimawandel genannt. Die meisten unter ihnen verlieren kontinuierlich an Masse und viele drohen in wenigen Jahrzehnten ganz verschwunden zu sein. Im folgenden Kapitel wird deshalb einerseits geklärt, nach welchen Kriterien ein Gletscher eigentlich definiert wird und andererseits, wie sich die alpinen Gletscher seit dem Ende der letzten Kleinen Eiszeit vor 170 Jahren entwickelt haben. Zusätzlich sollen jene Faktoren angeführt werden, die die Massenbilanz eines Gletschers hauptverantwortlich beeinflussen.

4.1. Gletscher als Teil der Kryosphäre

Die Gletscher und Eisschilde der Erde erstrecken sich insgesamt über 14,9 Mio km², das entspricht ca. 10% der Landfläche und sie dienen dabei als Speicher von mehr als drei Viertel des weltweiten Süßwassers. Schon aus diesen wenigen Zahlen lässt sich somit deren globale Bedeutung, nicht nur als landschaftsformende Kraft in den Gebirgen herauslesen. (vgl. Zepp 2017:187)

An jenen Orten wo über mehrere Jahre hinweg im Winter mehr Schnee fällt, als während des Sommers schmilzt, verdichtet sich dieser nach zahlreichen Schmelz- und Gefrierzyklen immer mehr, sodass zunächst Firn und im Laufe von mehreren Jahrzehnten schließlich Gletschereis entsteht. (vgl. Fischer 2018:3) Die Dichte erhöht sich dabei durch die zahlreichen Temperaturwechsel um den Gefrierpunkt, durch einsickerndes Schmelzwasser, sowie durch die Last von sich darüber legenden Schneedecken von 30-60kg/m³ bei lockerem Neuschnee auf 917kg/m³ bei Eis. Gleichzeitig sinkt das Porenvolumen von bis zu 97% auf beinahe 0%. (vgl. Zepp 2017:188)

Das Eis ist allerdings nicht als eine starre Masse anzusehen, sondern es bleibt verformbar und fließt aufgrund der Schwerkraft in Richtung Tal. Bei Alpengletschern treten Geschwindigkeiten zwischen 30 und 150m/Jahr auf, das bedeutet pro Tag eine Bewegung von 2-4m. Verglichen damit ist etwa die Fließgeschwindigkeit am Rand des grönländischen Eisschildes mit 3-10km/Jahr deutlich höher. Abhängig ist das neben dem Gefälle in erster Linie von der totalen Eismächtigkeit. (vgl. Zepp 2017:190) Generell führen warme Sommer und geringe Neuschneemengen im Winter zum

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Schmelzen der Gletscher. Grundsätzlich kann außerdem festgehalten werden, dass kleine und steile Gletscher sensibler auf das Klima reagieren als große und flache. (vgl. Fischer 2018:3)

Gletscher entstehen immer am Festland. Entscheidend dabei ist, dass in den Regionen der Akkumulation mehr fester Niederschlag hinzukommt, als in den Regionen der Ablation wegschmilzt. (vgl. Willmes et al. 2015:27) Zusätzlich muss im Akkumulationsgebiet eine Fläche vorhanden sein, die ausreichend groß ist und nicht zu stark geneigt, damit sich Niederschlag in Form von Schnee ansammeln kann. (vgl. Zepp 2017:189) Abhängig vom Gefälle, ihrer Mächtigkeit und dem Nachschub fließen die Gletscher talwärts von den Nährgebieten in die Zehrgebiete und zwar soweit, bis der Massenverlust und der Nachschub ausgeglichen sind. (vgl. Willmes et al. 2015:27)

Als fiktive Grenze trennt die Gleichgewichtslinie das Nährgebiet vom Zehrgebiet, wie in der untenstehenden Abbildung 1 zu sehen ist. An dieser Linie ist die Massenbilanz laut Definition ausgeglichen, darüber ist sie positiv und darunter negativ. Abhängig von den vorherrschenden klimatischen Faktoren kann sie jedes Jahr weiter nach oben oder nach unten wandern. Da Massenbilanzmessungen aufwändig sind und deshalb nur an wenigen Gletschern vorgenommen werden können, wird ersatzweise oft die klimatische Schneegrenze ermittelt. (vgl. Zepp 2017:189)

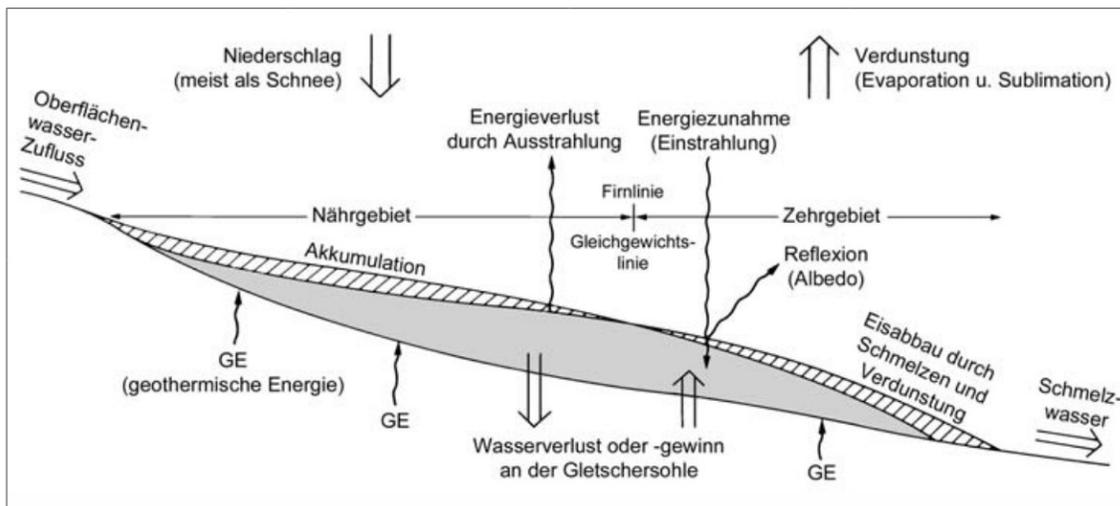


Abbildung 1: Massenbilanz eines Gletschers – Quelle: Zepp 2017:188

Als Anforderung, damit eine mehrjährige Eis- Firn- und Schneefläche als Gletscher definiert wird, gilt eine Mindestgröße von 10.000m² und diese muss Anzeichen von Bewegung aufweisen. (vgl. Alean 2010:44)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Gletscher können in verschiedenen Formen auftreten. Die Bezeichnung richtet sich dabei danach, wie und welches Relief überlagert wurde. Aufgrund des steilen Geländes ist in den Alpen der Typ der alpinen Talgletscher mit den oft kilometerlangen Zungen am weitesten verbreitet. Daneben gibt es die Gruppe der Deckgletscher, zu denen die Eisschilde Grönlands und der Antarktis gehören, aber auch kleinere Plateaugletscher in Skandinavien oder im Hochgebirge. Diese überdecken Hochplateaus und weisen nur kurze Gletscherzungen auf. (vgl. Zepp 2017:189)

Neben dem Permafrost, Schnee, Meereis, sowie See- und Flusseis, sind die Gletscher Teil der Kryosphäre. Diese verteilt sich in stark unterschiedlicher Ausbreitung und je nach Jahreszeit über alle Kontinente und spielt somit auch eine entscheidende Rolle für das Klima der Erde (siehe Tabelle 1 und 2). Sie ist sowohl Teil der Landoberfläche, als auch der Ozeane und bildet wie die Atmosphäre, die Hydrosphäre, die Lithosphäre und die Biosphäre ein Subsystem des globalen Klimasystems. Eingeteilt wird die Kryosphäre einerseits in die saisonalen Eisflächen, hierzu zählen beispielsweise Schnee, Meereis oder See- und Flusseisflächen, die im Verlauf eines Jahres unterschiedlich stark ausgebreitet sind und andererseits in die perennierenden Eisflächen wie Eisschilde, Gebirgsgletscher oder Permafrostgebiete. (vgl. Willmes et al. 2015:25)

Bei Untersuchungen der Kryosphäre gibt es mitunter Schwierigkeiten für die Logistik. Kälte und schlechte Zugänglichkeit erschweren die Forschung und verlangen speziell angepasste und somit auch teure Geräte. Für die Beobachtung der Ausdehnung der Schneedecke oder des Meereises wird hingegen auf Satellitendaten zurückgegriffen. (vgl. Willmes et al. 2015:27-28)

Tabelle 1: Saisonal schwankende Teile der Kryosphäre (Zeitraum 1967-2014) – Quelle: Willmes et al. 2015:26

Typ	Erdhälfte	Fläche in Mio km ²		Ganzjähriges Mittel
		Mittl. jährliches Minimum	Mittl. jährliches Maximum	
Meereis	Nordhalbkugel	6,4 (SEP)	15,2 (MRZ)	ca. 23
	Südhalbkugel	3,1 (FEB)	18,5 (SEP)	
Schnee	Nordhalbkugel	3,0 (AUG)	47,1 (JAN)	ca. 20
	Südhalbkugel	–	0,3 (JUL)	

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Tabelle 2: Perennierende Teile der Kryosphäre (Stand 2014) – Quelle: Willmes et al. 2015:26

Region	Fläche in Mio km²	Prozent der globalen Landfläche
Grönländischer Eisschild	1,77	1,2
Antarktischer Eisschild	12,25	8,3
Gebirgsgletscher	0,74	0,5
Terrestrischer Permafrost	13,3 – 17,7	9-12

In den oben stehenden Tabellen 1 und 2 ist die Ausdehnung der einzelnen Teile der Kryosphäre auf der Erde angeführt. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass die von Meereis und Schnee bedeckte Fläche je nach Jahreszeit stark variiert. Das Meereis verringert sich im Sommer auf der Nordhalbkugel auf gut ein Drittel und auf der Südhalbkugel sogar auf ein Sechstel. Noch deutlicher ist der Unterschied bei der Schneebedeckung. Im Vergleich zum Jänner sinkt diese bis August auf der Nordhalbkugel auf weniger als ein Fünfzehntel, während auf der Südhalbkugel wegen der fehlenden Landmasse in der polaren und gemäßigten Klimazone gar keine nennenswerte Schneedecke in den Sommermonaten verzeichnet wird. Tabelle 2 gibt an, dass die perennierenden Teile der Kryosphäre vor allem aus den beiden Eisschilden in Grönland und der Antarktis bestehen. Die Gletscher hingegen haben nur eine sehr geringe Ausdehnung und bedecken etwa 0,5 % der Landfläche auf der Erde.

Aus den Daten von Willmes et al. (2015:26) ergibt sich außerdem, dass im ganzjährigen Mittel ca. 57,76 km² der Erdoberfläche mit Schnee oder Eis bedeckt sind. Das entspricht in etwa 11,3% und wegen ihres daraus resultierenden Einflusses auf das globale Klima, ist die Kryosphäre von großem Interesse für die Forschung.

Die insgesamt gesehen große Fläche und die physikalischen Eigenschaften des gefrorenen Wassers bewirken eine sehr hohe Albedo von bis zu 90% und beeinflussen so den Energiehaushalt der Erdoberfläche. Ca. 30% der Sonnenenergie werden global gesehen durchschnittlich von der Erde reflektiert. Ohne die Kryosphäre wäre dieser Wert deutlich geringer und die Erde somit wärmer. Man spricht deshalb vom Prozess der Eis-Albedo-Rückkopplung. Veränderungen bezüglich der Ausdehnung der Kryosphäre führen zu einer positiven Verstärkung. Kommt es zu einem Rückgang, wird mehr Sonnenstrahlung absorbiert, das Klima erwärmt sich und das Schmelzen von Schnee und Eis wird weiter begünstigt. Umgekehrt tritt dieser Effekt genauso ein bei einer Ausbreitung der Kryosphäre, da dann in der Folge immer mehr Sonnenstrahlung reflektiert wird. Am stärksten

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

betroffen von Veränderungen im Klima sind generell jene Bereiche der Kryosphäre, die im Verlauf eines Jahres große Schwankungen in Bezug auf die Ausdehnung aufweisen, wie die Schneedecke oder das Meereis. (vgl. Willmes et al. 2015:26)

Ein anderer Aspekt bei dem die Kryosphäre eine bedeutende Position einnimmt, ist der globale Wasserhaushalt. 85% des weltweiten Süßwassers sind in Form von Schnee und Eis gebunden. Der Großteil davon in den Eisschilden Grönlands und der Antarktis. (vgl. Willmes et al. 2015:26)

Im globalen Kontext gesehen spielen die Gebirgsgletscher in den Alpen und anderen Hochgebirgen sowohl in Bezug auf die flächenmäßige Ausdehnung, als auch auf die Bedeutung als Süßwasserspeicher natürlich eine geringere Rolle. Ihr Volumen liegt unter einem Prozent der Gesamteismasse auf der Erde, weshalb Willmes et al. (2015:27) zufolge keine Rückkopplungen auf das Weltklima zu erwarten sind. Die Betrachtung muss deshalb von einer kleineren Ebene aus erfolgen, sprich aus der Sicht einzelner Länder, die direkt von den Veränderungen der Gletscher betroffen sind.

4.2. Zeitliche Entwicklung der Gletscher in den Alpen

Oft werden Gletscher – regional auch Ferner oder Kees genannt – als „ewiges Eis“ bezeichnet, denn auf den ersten Blick mögen sie mächtig und allen äußeren Einflüssen erhaben wirken. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich jedoch, dass dem keineswegs so ist. Änderungen des Klimas führen immer auch zu Veränderungen der Gletscher. Wie bereits erwähnt besteht ein Gletscher aus einem Nährgebiet und einem Zehrgebiet. Bei einem gleichbleibenden Klima steht deren Größe im Verhältnis 2:1, das Nährgebiet ist also doppelt so groß wie das Zehrgebiet. Wenn dieses Verhältnis aufgrund von Klimaerwärmungen oder -abkühlungen verändert wird, beeinflusst das in der Folge, ob ein Gletscher schrumpft oder wächst. (vgl. Fischer 2018:3)

Wie sich das Klima im Laufe eines Jahres auf den Gletscher auswirkt, wird durch die Massenbilanz ausgedrückt. Fischer (2018:4) definiert diese wie folgt:

Die Massenbilanz [...] eines Gebirgsgletschers der Alpen ist die Summe des Gewinnes durch Schnee (Akkumulation), der binnen weniger Jahre zu Firn und binnen weniger Jahrzehnte zu Eis wird, und des Verlustes durch Schmelze (Ablation). Wenn im hydrologischen Jahr, also zwischen 1. Oktober und 30. September mehr Eis schmilzt als Winterschnee den Sommer überdauert, spricht man von einer negativen Massenbilanz. (Fischer 2018:4)

Hält dieser Zustand über mehrere Jahre hinweg an, nehmen Volumen und Fläche des Gletschers ab und er ist sozusagen auf dem Rückzug. Ist die Massenbilanz ausgeglichen (Veränderung um weniger

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

als einen Meter jährlich) spricht man von einem stationären Gletscher und bei einer positiven Massenbilanz kommt es zu einem Gletschervorstoß. Dabei werden jede Menge Schutt und Felsen mittransportiert, die dann am Gletscherende liegenbleiben und Moränenwälle bilden. Frühere Ausdehnungen der Gletscher können auch durch den Gletscherschliff rekonstruiert werden. (vgl. Fischer 2018:4)

In Österreich haben die Gletschermessungen, wie auch in anderen Alpenländern, eine lange Tradition. Grund dafür war, dass zwischen 1250 und 1850 zur Zeit der Kleinen Eiszeit die meisten Gletscher wuchsen und teilweise landwirtschaftliche Flächen und Siedlungen bedrohten, indem sie Seen in einem gefährlichen Ausmaß aufstauten. Im Jahr 1891 begann dann die systematische Beobachtung der österreichischen Gletscher vom Alpenverein unter der Leitung von Eduard Richter. Ermittelt wurde die Länge der Gletscher mittels Abstandmessung zwischen bestimmten Fixpunkten und dem Gletscherrand. (vgl. Fischer 2018:6)

Die mittlerweile über 135 Jahre lange Messreihe in Österreich bildet die Grundlage für die Erforschung und das Verständnis, wie die Gletscher auf Klimaveränderungen reagieren. Mit den Jahrzehnten wurden die Messungen immer umfangreicher und auf immer mehr Gebiete ausgedehnt. Von den anfangs 16 untersuchten Gletschern stieg die Anzahl zeitweise auf bis zu 129 und liegt mit Stand 2019 bei 92. Der aktuelle Stand wird jährlich vom Alpenverein im sogenannten „Gletscherbericht“ veröffentlicht. Die Ergebnisse aus den Aufzeichnungen der letzten 135 Jahre sind in der folgenden Abbildung 2 angeführt und weisen auch große Parallelen zu Schweizer Statistiken auf. (vgl. Patzelt 2018:7-9)

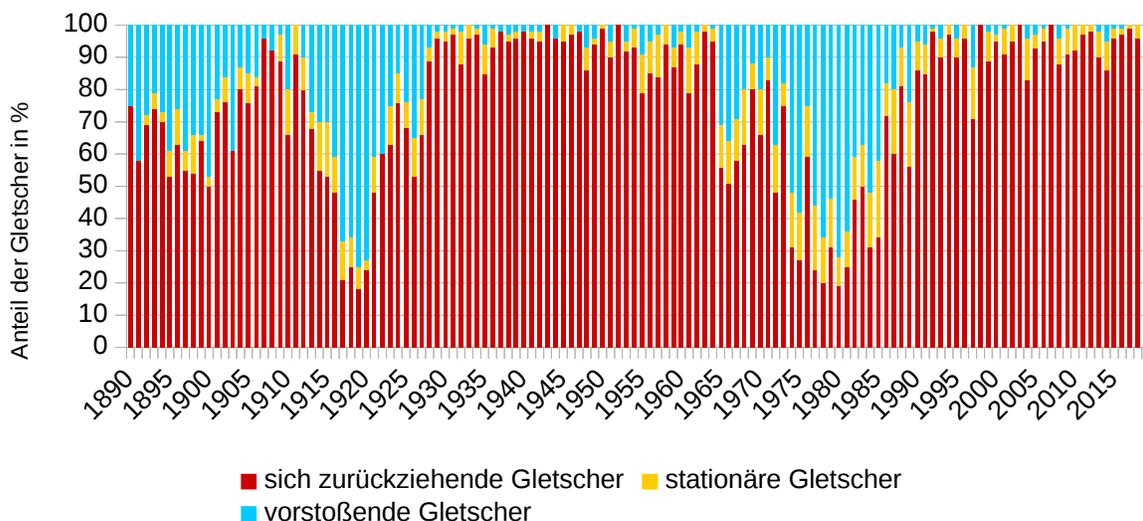


Abbildung 2: Entwicklung der österreichischen Gletscher (Zeitraum 1890-2019)
– Quelle: Patzelt 2018:9-13; Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2020:6; eigene Darstellung

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

In der Abbildung 2 sind alle untersuchten Gletscher Österreichs seit 1980 angeführt. Angegeben ist die jährliche prozentuelle Verteilung von Gletschern, die sich zurückziehen, die stationär sind und jenen, die vorstoßen. Obwohl die Anzahl der untersuchten Gletscher über die Jahre hinweg stark variiert, kann dennoch ein allgemeiner Trend abgelesen werden, da in der Regel die Messungen auf den Gletschern fortgeführt und erweitert wurden und nicht auf andere Gletscher verlagert, außerdem hat sich zumindest ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine anähernd gleichbleibende Zahl an untersuchten Gletschern etabliert. Bei der Betrachtung der Abbildung wird nun deutlich, dass im 20. Jahrhundert zwei kurze Wachstumsperioden zwischen 1915 und 1925 und zwischen 1971 und 1985 verzeichnet wurden. In diesen Abschnitten hatten zeitweise bis zu 75% der Gletscher eine positive Massenbilanz. Sowohl in den Jahren dazwischen, als auch danach haben jedoch fast alle Gletscher an Masse verloren. Teilweise wurde, wie in den Jahren 2003 oder 2007, kein einziger Vorstoß gemessen.

Gleichzeitig wurde im österreichischen Alpenraum im Vergleich zum Jahr 1880 ein mittlerer Temperaturanstieg von 2°C verzeichnet, während sich dieser global gesehen nur auf 0,85°C beläuft. Rund 50% dieses Anstiegs erfolgten erst seit dem Jahr 1980. (vgl. Buckel et al. 2018:49)

Davon beeinflusst haben die Gletscher in Österreich seit dem Ende der letzten Kleinen Eiszeit um 1850 ca. zwei Drittel ihrer Fläche verloren. Das bedeutet einen Rückgang von 941km² auf 328km². (vgl. Buckel et al. 2018:47) Für das Bundesland Tirol bedeutend das beispielsweise, dass nur noch weniger als 3% der Gesamtfläche vergletschert sind. Dieser Rückzug schafft einerseits neuen Lebensraum für Flora und Fauna, andererseits führt er aber gleichzeitig auch zu Veränderungen im Mikroklima und der lokalen Hydrologie, beeinflusst durch sich ändernde Albedowerte und mitunter fehlendes Schmelzwasser. Eine systematische Untersuchung findet seit 1891 bei ca. 10% der österreichischen Gletscher statt. Um detailliertere Aussagen treffen zu können, ist es jedoch notwendig zusätzlich auch die Veränderungen in der Massenbilanz zu messen. Ab dem Jahr 1953 entstand darum in den Ötztaler Alpen am Hintereis- und am Kesselwandferner die längste Massenbilanzreihe der Welt. (vgl. Fischer/Hartl 2013:31-33)

Fischer/Hartl (2013:42) weisen allerdings darauf hin, dass die Reaktionen von Gletschern auf das Klima sehr unterschiedlich ausfallen können. Um einen Trend herauslesen zu können, bedarf es deshalb einer geeigneten Stichprobe. Zu diesem Zweck wurde die Entwicklung von fünf Tiroler Gletschern (Vernagtferner, Hintereisferner, Kesselwandferner, Jamtalferner, Mullwitzkees) nahe des Alpenhauptkammes miteinander verglichen. Sie unterscheiden sich in ihrer Topographie und Höhenlage teils deutlich voneinander und sollen so die unterschiedlichen Reaktionen aufzeigen.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Die Wetterstation Vent im Tiroler Ötztal liegt in unmittelbarer Nähe zu drei der genannten Gletscher. Im Verlauf der letzten 100 Jahre wurde dort auf einer Seehöhe von 1908m ein Temperaturanstieg im Zehnjahresmittel während der Ablationsperiode von 1,6°C verzeichnet. Bezüglich der Niederschlagsmengen in der Akkumulationsperiode wurde keine statistisch relevante Veränderung festgestellt. Die individuelle Beschaffenheit der Gletscher bewirkte nun trotz der räumlichen Nähe unterschiedliche Entwicklungen auf klimatische Veränderungen. Während der Kesselwandferner in den kühleren 1970er Jahren um ca. 600m wuchs, verlor der Hintereisferner weiter an Länge (die Masse stieg bei beiden an). Begründet ist das durch die Topographie der beiden Gletscher. Bei ersterem wurde die Akkumulation schnell an die kurze und steile Zunge weitergegeben, bei letzterem hingegen erreicht die Akkumulation die tiefer gelegene flache Zunge nicht. Auch die Massenbilanz ist aus diesem Grund beim Hintereisferner meist negativer als bei den benachbarten Gletschern. Der Kesselwandferner hat durch die höhere Lage ein größeres Akkumulationsgebiet im Verhältnis zur Ablationszone und demzufolge auch weniger negative Massenbilanzen. Insgesamt fallen diese verglichen mit früheren Jahrzehnten jedoch auch zunehmend negativer aus. (vgl. Fischer/Hartl 2013:41-43)

Für das hydrologische Jahr 2018/19 wurde der Gletscherbericht von Gerhard Karl Lieb und Andreas Kellerer-Pirklbauer erstellt. Die Autoren kamen dabei zu dem Ergebnis, dass es sich trotz der überdurchschnittlich großen Schneemengen in den Wintermonaten beiderseits des Alpenhauptkammes um ein insgesamt sehr gletscherungünstiges Jahr gehandelt hat. Von den 92 untersuchten Gletschern befanden sich 86 auf dem Rückzug, fünf verblieben stationär und nur bei einem konnte ein geringer Vorstoß verzeichnet werden. Im Vergleich zu den Vorjahren wurde der Gletscherschwund durch die großen Schneereserven, die die Eismassen bis in den Spätsommer hinein schützten, allerdings etwas eingebremst, sodass der mittlere Längenverlust mit 14,3m unter den 17,2m aus dem Jahr 2017/18 und dem Rekordwert von 25,2m aus dem Jahr 2016/17 blieb. Im langjährigen Durchschnitt seit 1960 liegt der Wert aber nichtsdestotrotz im obersten Viertel. Die größten Verluste wurden etwa am Bärenkopfkees, am Ochsentaler Gletscher und am Schweikertferner beobachtet. Stationär verhielten sich das Landeckkees, das Kleinfleißkees, das Simonykees, der Gletscher am Roten Kopf und das Kleinlendkees, sowie das Maurerkees, bei dem ein Vorstoß von 2,2m verzeichnet wurde. Die Autoren stellen aber klar, dass das nicht auf gletschergünstige Ernährungsbedingungen zurückzuführen ist, sondern auf lokale topographische Gegebenheiten und man deshalb nicht von einem aktiven Vorstoß sprechen kann. (vgl. Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2020:7-9)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Ähnliche Entwicklungen werden in den anderen Alpenländern beobachtet, wo ebenfalls seit einigen Jahrzehnten verstärkte Rückgänge verzeichnet werden und wo mit keiner Trendumkehr gerechnet wird. Haeberli et al (2012:93) zufolge erstrecken sich die Alpengletscher auf eine Gesamtfläche von ca. 1800km² mit einem Volumen von geschätzten 80km³. Pro Jahr verringert sich deren Ausdehnung um 40km² und deren Masse um ungefähr 2km³, sodass bis zum Ende des 21. Jahrhunderts selbst bei den großen Gletschern nur noch kleine Reste übrig bleiben werden. Einen genaueren Einblick in die Entwicklung der Schweizer Gletscher zeigen die folgenden Abbildungen 3 und 4.

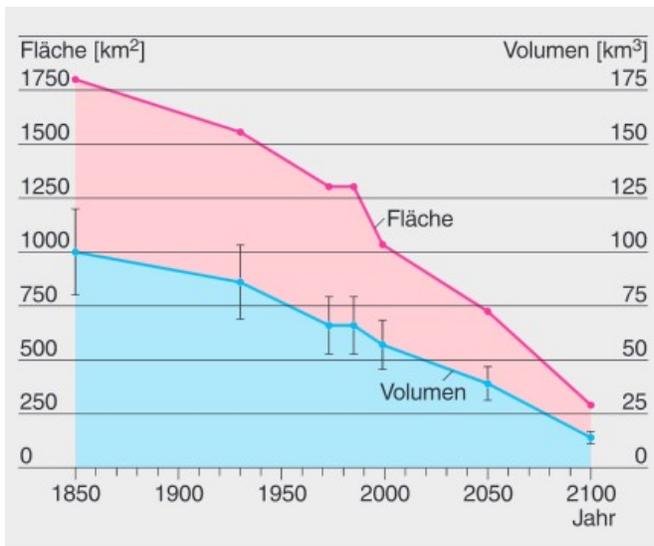


Abbildung 3: Entwicklung der Schweizer Gletscher (Zeitraum 1850-2100) – Quelle: Job et al. 2011:12

In der obenstehenden Abbildung 3 sieht man den dramatischen Rückgang der Schweizer Gletscher seit 1850 inklusive einer Prognose bis ins Jahr 2100. Die Gletscherfläche wird sich im angegebenen Zeitraum um gut 85% verringern, das Volumen um ca. 80%. Bei letzterem gibt es allerdings eine deutlich größere Schwankungsbreite, aufgrund der aufwendigeren Messmethoden und der damit verbundenen weniger umfangreichen Datenlage.

Job et al. (2011:9) haben etwa für die Schweiz Prognosen aufgestellt, wonach bis 2100 nur noch 15% der Gletscherfläche von 1850 verbleiben werden. Damit decken sich auch die Ergebnisse von Linsbauer et al. (o. J.:11), die für die wenig vergletscherten Einzugsgebiete von Limmat, Reuss oder dem Rhein ein fast komplettes Verschwinden der Gletscher bis zum Ende des Jahrhunderts vorhersagen. Einzig im Kanton Wallis werden sich bis dahin noch größere Gletscherflächen halten können, die mit ihrem Schmelzwasser auch einen Einfluss auf die Hydrologie ausüben.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

In der folgenden Abbildung 4 ist der zu erwartende Rückgang der Gletscher in den Walliser Alpen zu sehen. Die Gletscherzungen verschwinden in den allermeisten Fällen fast vollständig und es bleiben nur kleine Reste der heute noch teils mächtigen Gletscher in sehr hohen Lagen zurück.

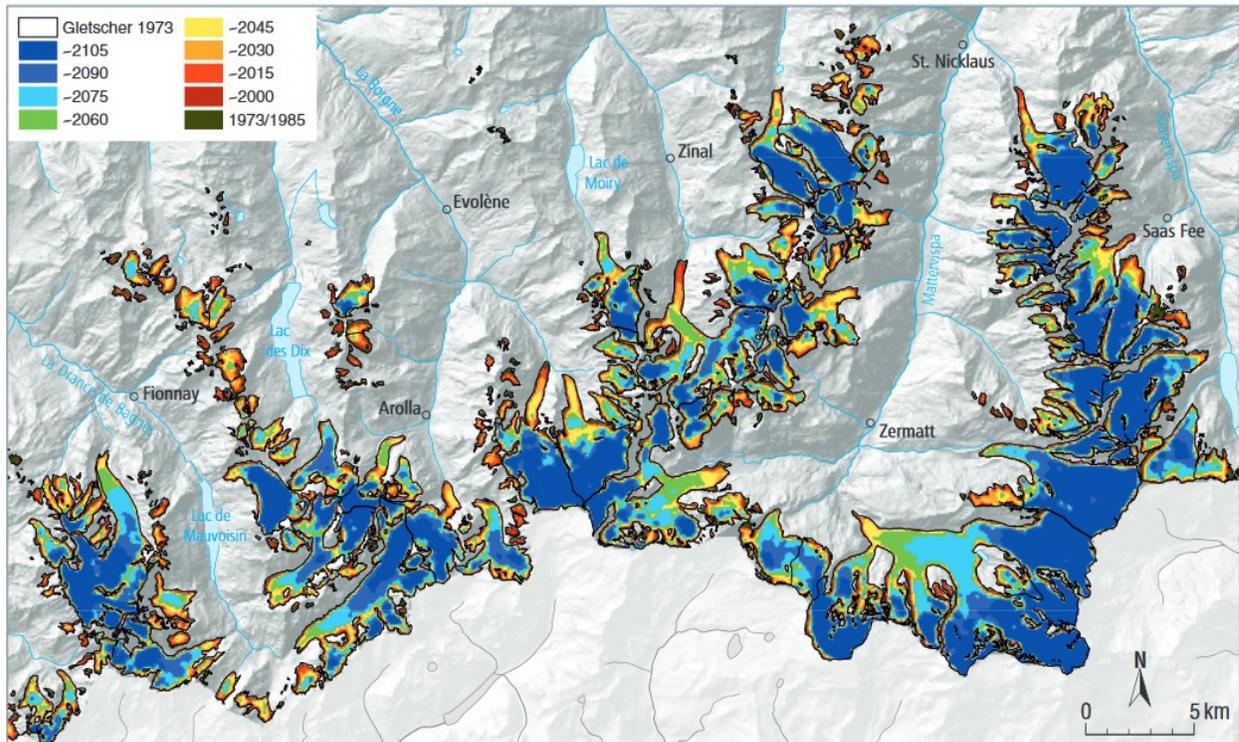


Abbildung 4: Entwicklung der Vergletscherung im südlichen Wallis – Quelle: Job et al. 2011:11

Im Folgenden wird nun die Entwicklung zweier österreichischer Gletscher seit dem Ende der Kleinen Eiszeit näher betrachtet. Zum Einen handelt es sich hierbei um die Pasterze im Schatten des Großglockners und zum anderen um die „Übergossene Alm“ im Hochkönigmassiv.

4.2.1. Beispiel Pasterze

Eine besondere Position in der österreichischen Glaziologie nimmt die Pasterze ein. Als größter und höchstgelegener Gletscher des Landes wird ihr besonders viel Beachtung geschenkt. Ihre Untersuchung und Erforschung hat eine lange Tradition. Begründet wurde sie 1832 von Erzherzog Johann. Zehn Jahre später wurde eine erste Karte des Pasterzengletschers erstellt und seit 1879 – also ca. ein Jahrzehnt bevor die Alpenvereine in Österreich und Deutschland eine regelmäßige Beobachtung begannen, wurden jährliche Messungen vorgenommen. Damit blickt die Pasterze auf die längste ununterbrochene Datenreihe aller Alpengletscher zurück. (vgl. Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2018:33-35)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Ursprünglich wurde mit dem Begriff Pasterze eigentlich ein größeres Gebiet im Schatten des Großglockners bezeichnet, bis er sich schließlich im 20. Jahrhundert als Kurzform für das Pasterzen-Kees durchsetzte und seither synonym dafür verwendet wird. Ihren Höchststand erreichte sie zum Ende der letzten Kleinen Eiszeit um 1850. Seitdem ist sie von einem starken Rückgang betroffen (siehe Abbildung 5). Verglichen mit anderen alpinen Gletschern hielt sich der Flächenrückgang noch einigermaßen in Grenzen, die Länge des Gletschers verkleinerte sich bis 2012 etwa von 11,4km auf 8,1km. Das Gesamtvolumen jedoch hat sich seit 1850 von 3,1km³ auf 1,16km³ ca. auf ein Drittel reduziert. Zwar hat die Pasterze aktuell noch die klassische Erscheinung eines alpinen Talgletschers mit ihren flachen Firnbecken, die in großer Höhe liegen, und der 4km langen Gletscherzunge, doch durch den zunehmend fehlenden Eisnachschub droht die Zunge die Verbindung zu den Nährgebieten zu verlieren, womit der Pasterze auch ihr wichtigstes Merkmal als Talgletscher abhanden kommen würde. (vgl. Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2018:31-32)

Durch die relativ tiefe Lage der Gletscherzunge auf nur 2350-2100 m über der Adria ist die Pasterze oft von großen jährlichen Massenverlusten betroffen. Zwischen 2018 und 2019 hat sich die Pasterze um 60 m zurückgezogen, das entspricht dem vierthöchsten Wert Österreichs. Entlang der Gletscherzunge wurde ein fortschreitender flächiger Zerfall beobachtet, sowie eine Vergrößerung des Pasterzensees durch das zunehmende Schmelzwasser. (vgl. Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2020:13)

Im Gegensatz zu vielen kleineren Gletschern werden an der Pasterze auch Profilmessungen vorgenommen. Anhand vorab definierter Linien wie der Seelandlinie, der Wasserfalllinie oder der Burgstalllinie wird die Höhenänderung im Vergleich zum Vorjahr ermittelt. Durch Messungen an insgesamt 25 Punkten auf der Gletscherzunge ergab sich ein mittlerer Höhenverlust von 5,8 m, was ein geringfügig höherer Wert ist als in den Jahren zuvor. (vgl. Lieb/Kellerer-Pirklbauer 2020:15)



1938



2000



2019

Abbildung 5: Entwicklung der Pasterze – Quelle: <http://www.gletscherarchiv.de/files/11-202063-pasterze-2019-2.jpg>; eigene Bearbeitung

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Für die Zukunft wird der Pasterze von Lieb/Slupezky (2011: 140-142) ein weiteres Abschmelzen bescheinigt, selbst wenn sich die Jahresdurchschnittstemperaturen nicht noch weiter erhöhen würden. Eine genaue Prognose kann den Autoren zufolge zwar nicht abgegeben werden, sie gehen allerdings davon aus, dass durch das Ausapern des Hufeisenbruchs immer weniger Eisnachschub zur Gletscherzunge kommt und diese sich nach und nach zu einem abgetrennten Toteiskörper entwickeln wird. Wie in der Abbildung 6 zu sehen ist, führen schon Temperaturanstiege von nur wenigen Grad zu einer massiven Verringerung der Nährgebietsfläche und damit gar eine Umkehr stattfinden könnte und der Stand von 1850 wieder erreicht wird, bräuchte es mehrere Jahrhunderte lang kalte und niederschlagsreiche Sommer.

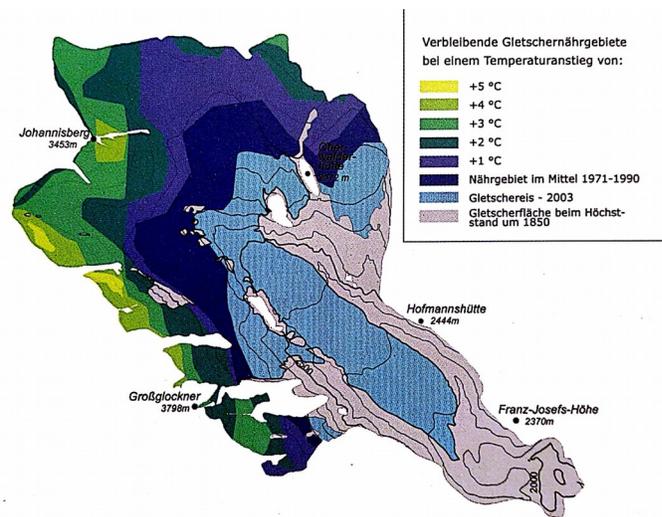


Abbildung 6: Nährgebietsveränderungen der Pasterze je nach Temperaturanstieg – Quelle: Lieb/Slupezky 2011:141

4.2.2. Beispiel „Übergossene Alm“

Kleinere oder tiefer gelegene Gletscher sind in den letzten Jahrzehnten ebenso stark vom Gletscherrückgang betroffen gewesen, mit dem Resultat, dass diese oft in kleine Teile zerfallen, oder gänzlich verschwunden sind. Ein Beispiel dafür ist der als „Übergossene Alm“ bezeichnete Gletscher des Hochkönigs in den Salzburger Kalkalpen. Der einst mächtige Gletscher bedeckte im Jahr 1969 noch eine Fläche von 1,636km² und war damit der einzige Plateaugletscher der Ostalpen. Im Laufe von nur 30 Jahren reduzierte sich seine Ausdehnung allerdings um 99,8% auf nur mehr 0,001868km². Es blieben also noch knapp 2000m², die sich bis in Jahr 2007 nochmals auf ca. 1150m² verringerten. (vgl. Goldberger 2013:1)

Im Sommer 2013 stellte Prof. Heinz Slupezky bei einer Begehung fest, dass nach Abschmelzen des Altschnees keine geschlossene Gletscherfläche mehr vorhanden ist und man deshalb von einer „Übergossenen Alm“ im eigentlichen Sinn nicht mehr sprechen kann (siehe Abbildung 7). Sowohl der Zentralgletscher, als auch die Eisfläche in der Seilermulde sind in einzelne Gletscherflecken zerfallen. (vgl. Goldberger 2013:2-3)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Als Grund für das Verschwinden der Übergossenen Alm nennt Slupezky (2013:5) in erster Linie den Temperaturanstieg und damit verbunden die Verschiebung der Schneefallgrenze nach oben. Mittlerweile liegt die Nullgradlinie meist weit über 3000 m und somit zu hoch für viele Gletscher in den Alpen. Dadurch fällt der Niederschlag häufiger in Form von Regen anstatt in Schnee. Erholungsphasen während des Sommers in Folge von Kaltlufteinbrüchen, die für einige Tage eine schützende Schneedecke mit sich bringen, werden seltener oder bleiben in manchen Jahren ganz aus.

Aufgrund der topografischen Bedingungen haben sich diese Veränderungen im Hochkönigmassiv noch stärker ausgewirkt als anderswo. Der Großteil der „Übergossenen Alm“ lag in den 1970er Jahren noch auf einer Seehöhe zwischen 2600 m und 2850 m. Durch das Nach-oben-Wandern der Gleichgewichtslinie um mindestens 150 m wurde sehr schnell die gesamte Gletscherfläche zum Zehrgebiet. Steilere Gletscher sind im Vergleich dazu weniger stark betroffen, da immer noch Teile als Nährgebiet in größeren Höhen verbleiben. Außerdem fehlten auf der weiten Fläche des Hochkönigplateaus große Mulden, die als Nährgebiet für größere Gletscherzungen hätten dienen können. Stattdessen wuchsen die Gletscher in den kleinen Mulden in Zeiten stärkerer Vergletscherung zusammen und bildeten so einen breiten Plateaugletscher. (vgl. Slupezky 2013:6)



Abbildung 7: Übergossene Alm (August 2018) – Quelle:
https://oekastatic.orf.at/static/images/site/oeka/20180834/dsc_2612.5789390.jpg

4.3. Einflussfaktoren auf die Massenbilanz eines Gletschers

Wie schon in Kapitel 4.1. erwähnt, setzt sich die Massenbilanz eines Gletschers aus der Masse der Niederschläge, die hinzukommt bzw. jener, die abschmilzt, zusammen. Anzumerken ist dabei, dass die Massenbilanz stets schneller auf Klimaänderungen und damit ein unausgeglichenes Gleichgewicht zwischen Akkumulations- und Ablationsgebiet reagiert, als die Länge der Gletscherzunge. In den mittleren Breiten der Nordhalbkugel wird sie in der Regel für den Zeitraum eines hydrologischen Jahres – von 1. Oktober bis 30. September – gemessen. Als Instrument dafür wird meist die direkte glaziologische Methode verwendet. Dabei werden Ende September Ablationspegel angebracht, anhand derer dann im kommenden Jahr die Ablation abgelesen werden kann. Zusätzlich ist es notwendig, im Akkumulationsgebiet die Schneemenge und dessen Beschaffenheit zu messen. Die ermittelten Daten werden auf die Gletscherfläche hochgerechnet und in kg oder m³ angegeben. Ausschlaggebend für Veränderungen der Massenbilanz sind in erster Linie Änderungen des Klimas. (vgl. Fischer/Hartl 2013:34-43)

Laut Patzelt (2018:14) gelten einerseits die jährlichen Niederschlagsverhältnisse und andererseits die Temperaturen während der Abschmelzperiode als die wichtigsten Faktoren für die Entwicklung der Massenbilanz von Gletschern. Je nach den Gegebenheiten wirken sich diese unterschiedlich stark und mitunter auch verzögert auf die Längenänderung der Gletscherzunge aus.

Ein Gletscher darf jedenfalls nicht als statische Eismasse gesehen werden. Er steht in ständigem Energieaustausch mit der Atmosphäre, der sich als saisonaler Zyklus in Form von sich abwechselnden Oberflächenprozessen zeigt. In den Wintermonaten ist die Akkumulation vorherrschend und in den Sommermonaten die Ablation. Gletscher geben das über Jahre und Jahrzehnte auftretende Klima wieder, während das tägliche Wettergeschehen so gut wie keinen Einfluss auf den Massenumsatz übt. Aus diesem Grund eignen sie sich auch besonders gut um langfristige Klimaveränderungen zu beobachten. Zur Bestimmung der Massenbilanz eines Gletschers wird diese in eine Sommer- und eine Winterbilanz unterteilt. (vgl. Mayer et al. 2013:220)

Messungen der Winterbilanz am Vernagtferner im Jahr 2011 kamen, ähnlich zu früheren Untersuchungen, zu dem Ergebnis, dass sich die Schneemengen während der Akkumulationsperiode bis 30. April weitgehend gleichmäßig, mit einer leichten Zunahme in Bezug auf die Höhenlage, auf der Gletscherfläche verteilt haben. Ausnahmen bildeten nur kleinräumige Bereiche infolge von Windverwehungen oder Lawinenabgängen. Die Sommerbilanz hingegen beschreibt die Phase der Ablation bis zum Ende des hydrologischen Jahres am 30. September. (vgl. Mayer et al. 2013:224-

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

225) Eine Zusammenstellung dieser beiden Bilanzen der letzten 60 Jahre ist in Abbildung 8 zu sehen.

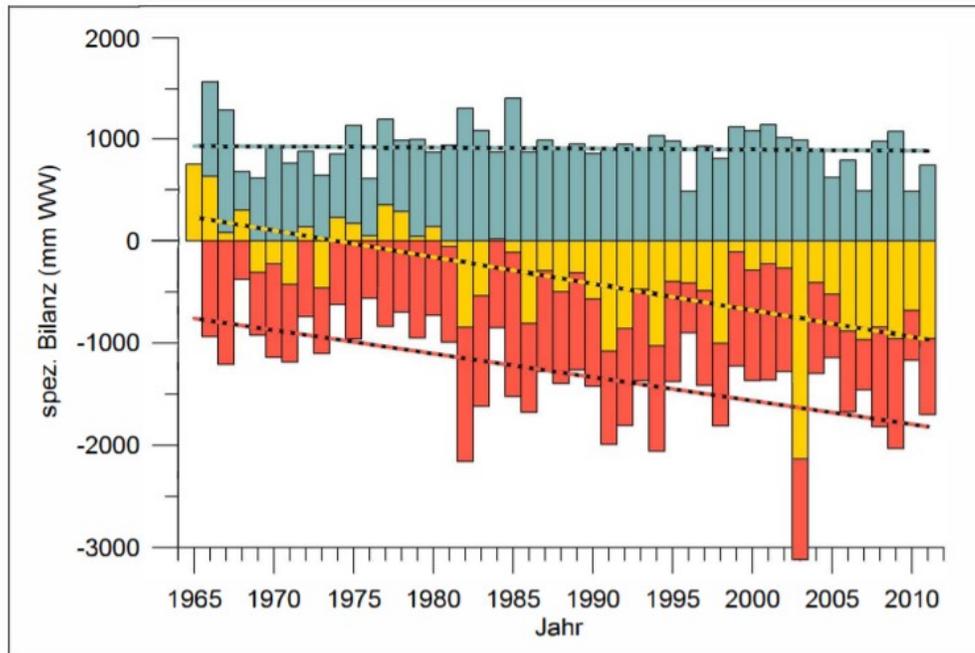


Abbildung 8: Entwicklung der Winter- Sommer und Gesamtmassenbilanz am Vernagtferner im Zeitraum 1964-2011 (türkis: Winterbilanz, rot: Sommerbilanz, gelb: Gesamtbilanz, inklusive der jeweiligen linearen Trends) – Quelle: Mayer et al. 2013:228

Seit 1966 werden am Vernagtferner zusätzlich zu den Messungen der Gesamtbilanz im September auch die Werte der Winterbilanz Ende April ermittelt, deren Ergebnisse in Abbildung 8 angeführt sind. Aus den daraus gewonnen Daten lässt sich ablesen, dass im Zeitraum 1966-2011 bei den Niederschlagsmengen im Winter zwar eine leichte Abnahme verzeichnet wurde, den Hauptausschlag für die sinkende Gesamtbilanz geben aber die stark steigenden Ablationswerte im Sommer. (vgl. Mayer et al. 2013:227) Diese Beobachtungen decken sich auch weitgehend mit Messungen auf anderen alpinen Gletschern, bei denen während der letzten 30 Jahre keine nennenswerte Veränderung der Zuwachsgewinne durch Schneefall feststellbar war. (vgl. Escher-Vetter 2011:75)

Auch ein Vergleich der beiden Jahre 1977 und 2003 zeigt, dass am Vernagtferner nach fast identischen Niederschlagswerten in den Wintermonaten aufgrund von deutlich wärmeren Temperaturen im Sommer 2003 enorme Unterschiede in der Massenbilanz die Folge waren. Während sich die Gleichgewichtslinie 1977 bei 2984 m über dem Meer einpendelte und somit sehr

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

tief lag, stieg sie 2003 auf über 3400m und das Ablationsgebiet erstreckte sich demnach auf die gesamte Gletscherfläche. Als Resultat standen sich letztendlich die Jahre mit dem positivsten und dem negativsten Massenhaushalt der Messreihe gegenüber. (vgl. Mayer et al. 2013:228-230)

5. Aktuelle Nutzung der Gletscher durch den Menschen

Oft mögen Gletscher als starre Eismassen hoch oben im Gebirge gesehen werden, die fernab der Zivilisation wenig Beachtung im Alltag der Menschen finden. Tatsächlich werden sie aber auf verschiedenste Weise genutzt und sind dadurch manchmal präsender als auf den ersten Blick erkennbar. Sei es im Tourismus für Wanderungen auf und rund um den Gletscher oder als Skigebiete, die bis weit in den Sommer hinein mit perfekten Pisten werben, sei es, indem das Schmelzwasser in Stauseen gespeichert wird, um anschließend für die Energieerzeugung verwendet zu werden. Damit die Bedeutung der Gletscher stärker in den Fokus rückt, werden im Folgenden deshalb zwei Nutzungsgebiete näher beleuchtet. Zudem soll geklärt werden, ob die aktuelle Nutzung der Gletscher einen Einfluss auf die Entwicklung der Massenbilanz übt.

5.1. Wasserkraftwerke

In vielen Alpenländern vor allem in den flächenmäßig kleineren Staaten Österreich und der Schweiz spielt die Ressource Wasser eine gewichtige Rolle bei der Energieerzeugung. Mit einem Anteil von 26,4 % (vgl. BMNT 2018:8) kommt etwa gut ein Viertel des in Österreich erzeugten Stroms aus Wasserkraftwerken, in der Schweiz sind es sogar 59,9% (vgl. Präsenz Schweiz 2019). Für eine möglichst effiziente Nutzung dieser natürlichen Ressource wurden Kraftwerke nicht nur an den großen Strömen wie Donau und Rhône errichtet, sondern auch kleinere Gebirgsbäche mit Staumauern zu großen Seen aufgestaut, wie etwa in Kaprun.

Das Abflussregime von letzteren ist in den Alpen oft niveoglazial geprägt und somit gekennzeichnet durch eine große Saisonalität, da es vor allem in den Frühlings- und Sommermonaten stark vom Schmelzwasser abhängig ist. Wasser, das in Form von Schnee und Eis sozusagen zwischengespeichert wurde, schmilzt nun, und kann zur Energieproduktion genutzt werden. Der alpine Permafrostboden verhindert im Frühling das Einsickern des Schmelzwassers, sodass jährliche Hochwasserabflüsse in der Auftauperiode die Folge sind. Diese Abflussspitzen sind deutlich höher als die mittleren Jahresabflüsse und fließen in Form von slush streams mit teils hoher Geschwindigkeit direkt in die Bäche, während in den übrigen Teilen des Jahres viel geringere Wassermengen von den Flüssen geführt werden. (vgl. Zepp 2017:217)

Mit Stand 2017 gibt es im Alpenraum insgesamt 1019 Wasserkraftwerke mit einer Mindestleistung von 5MW. Den Großteil davon bilden mit 59% die Laufkraftwerke, 33% sind Speicherkraftwerke

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

und die restlichen 8% sind als Pumpspeicherkraftwerke konstruiert. Dadurch ergibt sich für die beteiligten Staaten nicht nur die Möglichkeit, emissionsfrei Energie zu erzeugen, sondern es können die natürlichen Ressourcen auch dafür genutzt werden, weniger stark von Öl- und Gasimporten aus dem Osten abhängig zu sein. In Summe wird so eine Leistung von 62,8 GW erreicht. Trotz der absolut gesehen geringeren Anzahl von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken erzeugen diese mit 68% mehr als zwei Drittel der Gesamtleistung. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass Laufkraftwerke oft in kleineren Dimensionen errichtet wurden, im Vergleich zu den Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken, wo meist sehr hohe Kraftwerksleistungen verzeichnet werden. (vgl. Römer et al. 2017:98-107)

Nach denselben Kriterien wurden von Römer et al. (2017:108) in Österreich 196 Wasserkraftwerke verzeichnet. Deren Aufteilung in die drei Kategorien Lauf-, Speicher-, und Pumpspeicherkraftwerke ist dabei ähnlich zum Durchschnitt des Alpenraums. Anzumerken ist jedoch auch hier die vergleichsweise hohe Leistung von letzteren beiden, die um 70% höher ist als jene der Laufkraftwerke.

Vertiefend lohnt sich hier der Blick auf die räumliche Verteilung der österreichischen Wasserkraftwerke. Während sich die zehn leistungsstärksten Laufkraftwerke allesamt im Alpenvorland entlang der Donau (darunter Altenwörth, Greifenstein oder Ybbs-Persenbeug) befinden, liegen die vergleichbaren Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke aufgrund der geographischen Gegebenheiten ausschließlich in inneralpinen Tälern. Zu den größten zählen dabei unter anderem die Anlagen in Silz, dem



Abbildung 9: Speichersee Mooserboden Kaprun (aufgenommen am 2. Juni 2020) – Quelle: eigene Aufnahme

Kaunertal, Kaprun (siehe Abbildung 9) oder das Maltakraftwerk im Mölltal. Daraus ergibt sich nicht nur ein regionaler wirtschaftlicher Nutzen, sondern auch eine große Verantwortung für ganz Österreich, da es ja zu den Hauptaufgaben von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken zählt, die Energie zu speichern und bei Nachfragespitzen abzugeben. (vgl. Römer et al. 2017:109)

Das eben erwähnte Pumpspeicherkraftwerk Kaprun zählt zu den größten und ob seiner Entstehungsgeschichte auch zu den bekanntesten Anlagen Österreichs. Sein Einzugsgebiet umfasst

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

99,3 km³ und speichert die Abflüsse aus der Kapruner Ache, der Fuscher Ache und der Möll. Bei letzterer gilt es anzumerken, dass sie südlich der Wasserscheide des Alpenhauptkammes liegt, ihr Abfluss jedoch im Speicher Margaritze aufgefangen wird und anschließend durch einen Stollen zum Speicher Mooserboden auf der Nordseite der Alpen umgeleitet wird. Der Vergletscherungsgrad des Einzugsgebietes ist zwar im Zeitraum 1969-1998 von 43% auf 37% gesunken, stellt aber neben den mittleren Jahresniederschlagsmengen immer noch eine der wichtigsten Einflussgrößen dar. Vor allem der Speicher Margaritze wird zu einem Großteil aus dem Schmelzwasser der Pasterze gespeist, da hier auch geringere Niederschlagsmengen verzeichnet werden. Insgesamt gesehen bewirkt die Kraftwerksanlage erhebliche Veränderungen für den Abfluss der Kapruner Ache. Während die mittleren Sommerabflüsse von 14 auf 6,8m³/s verringert werden, erhöhen sich die Winterabflüsse von 1,8 auf 9,1m³/s. (vgl. Kobau et al. 2011:23-24)

Durch das Errichten von inneralpinen Talsperren wird das Schmelzwasser aus Schnee und Eis demnach aktiv zur Erzeugung und Speicherung von Energie genutzt. Die Rentabilität dieser Kraftwerke ist allerdings abhängig von der künftigen Entwicklung der Abflussmenge in Anbetracht des Rückgangs der Gletscher als Wasserreservoir. (vgl. Haeberli et al. 2012:97)

Lambrecht/Mayer (2009:353-356) haben deshalb versucht, den Schmelzwasseranteil der Gletscher auf Monatsbasis zu ermitteln, welcher in negativen Massenbilanzjahren zusätzlich zum normalen Gletscherabfluss auftritt. Zu diesem Zweck wurde die jährliche Massenänderung für einzelne Gletschergruppen berechnet und anschließend auf die monatliche Gletscherschmelze skaliert durch Einbeziehung der Temperaturdaten aus nahegelegenen Wetterstationen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass das gesamte Schmelzwasser wegen der geringen Verdunstung und des hohen Anteils des Oberflächenabflusses im Hochgebirge direkt abfließt, ohne vorher zwischengespeichert zu werden.

Lambrecht/Mayer (2009:353-356) kommen demzufolge zu dem Ergebnis, dass sich der Anteil des zusätzlichen Gletscherabflusses im Untersuchungszeitraum (1969 bis 1998) auf 1,5-9% beläuft, abhängig vom jeweiligen Grad der Vergletscherung (4-40%) im Einzugsgebiet. In den Sommermonaten erhöht sich der Anteil auf durchschnittlich 3-12%, wobei in stark vergletscherten Einzugsgebieten auch Werte von 25% verzeichnet wurden. Generell ist der Anteil im Jahresdurchschnitt allerdings eher gering. In Jahren mit mäßig negativen Massenbilanzen macht glaziales Schmelzwasser etwa 10% des Gesamtabflusses der Rofenache in Vent (41% Gletscherbedeckung) und etwa 4% des Inn in Innsbruck (4% Gletscherbedeckung) aus. Von

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

größerer Bedeutung ist deshalb die Ausgleichsfunktion der Gletscher, die dazu führt, dass Niederschlag zeitverzögert in den Sommermonaten abgegeben wird.

In Zeiten des Gletscherrückgangs wird dieser Vorgang zusätzlich verstärkt und ein erhöhter Abfluss im Vergleich zu Jahren mit einer positiven Gletschermassenbilanz ist die Folge. Diese Zunahme der jährlichen Gletscherschmelzwassermengen ist auch in Abbildung 10 zu sehen. Seit dem Jahr 1983 wird durch die anhaltenden negativen Massenbilanzen, welche ab den 1980er Jahren durchgehende beobachtet werden, eine deutliche Steigerung sowohl am Pegel Mayrhofen, als auch etwas weiter flussabwärts am Pegel Hart verzeichnet. (vgl. Lambrecht/Mayer 2009:357-360)

Inwiefern sich dadurch Auswirkungen auf die Energieproduktion ergeben, beziehungsweise eventuelle Anpassungen notwendig werden, wenn der überdurchschnittliche Abfluss aufgrund von stark geschrumpften Gletschermassen zurückgeht, wird in Kapitel 6.1. näher beschrieben.

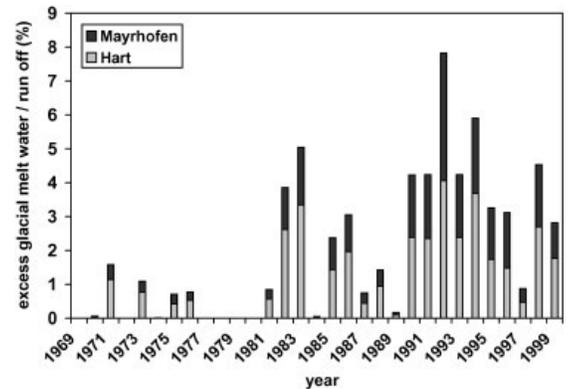


Abbildung 10: Jährlicher Gletscherschmelzwasserüberschuss im Verhältnis zum Gesamtabfluss – Quelle: Lambrecht/Mayer 2009:360

5.2. Skitourismus

Kein Sport wird wohl mehr mit den Alpen assoziiert als das Skifahren. Schneebedeckte Berge locken TouristInnen aus dem In- und Ausland an, und dementsprechend groß ist das Interesse von Frankreich bis Slowenien, sich dieses Image zu bewahren. Spätestens mit dem jährlichen Weltcupauftakt Ende Oktober am Rettenbachferner in Sölden wird der Skisport auch von den Medien nach der Sommerpause wieder in das Zentrum der Aufmerksamkeit gerückt. Nicht überall ist die Begeisterung fürs Skifahren freilich so groß wie in Österreich, eine bedeutende Rolle als Tourismusmagnet nimmt es aber im gesamten Alpenraum ein. Durch die globale Klimaerwärmung ist nun aber auch der Tourismus und insbesondere der Wintertourismus von großen Veränderungen betroffen. Steigende Temperaturen führen dazu, dass sich der Betrieb von kleineren und tiefer gelegenen Skigebieten nicht mehr rentiert und diese deshalb stillgelegt werden. Die logische Folge ist also der Blick nach oben in höhere, schneesichere Lagen – ins Reich der Gletscher.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Die Ursprünge der Erschließung von Gletschern für den Skisport in den Alpen gehen auf die 1960er Jahre zurück. 1963 wurde das erste Gletscherskigebiet am Stilsfer Joch in Südtirol eröffnet und nur wenige Jahre später zogen Österreich (Kitzsteinhorn 1966) und die Schweiz (Piz Corvatsch 1964) nach. In jener Zeit wurde dem Skibetrieb auf Gletschern großes Potential zugeschrieben, einerseits zur Saisonverlängerung im Frühling und Herbst und andererseits auch zur Nutzung als reine Sommerskigebiete. Sinkende Zahlen ab den 1980ern im Skisport insgesamt führten allerdings dazu, dass nicht alle der geplanten Projekte auch realisiert wurden. Außerdem ließ schon damals ein verstärktes Abschmelzen der Gletscher an der Langfristigkeit Zweifel aufkommen. Nachdem um die Jahrtausendwende einige Gletscherskigebiete geschlossen wurden, ist deren Zahl seitdem konstant geblieben. (vgl. Schmude/Berghammer 2015:289-290)

Auf den ca. 5000 Alpengletschern gibt es mit Stand 2015 29 Gletscherskigebiete, die von Schmude/Berghammer (2015:290) in folgende fünf Kategorien unterteilt werden. Nur vier wie zum Beispiel der Hintertuxer Gletscher oder Zermatt werden als Ganzjahresskigebiete genutzt, das heißt sie sind im Jahr nur maximal 40 Tage lang für Inspektionen und dergleichen geschlossen. In acht Regionen werden die Anlagen nur während der klassischen Wintersaison von November bis Ende April genutzt, während bei der größten Gruppe mit 12 Gletscherskigebieten, darunter das Kitzsteinhorn, Sölden, und „Les Trois Valées“ in der Savoie, die Saison in den Frühling und den Herbst hinein verlängert wird. Vier Gebiete öffnen im Sommer als auch im Winter, sind aber in der Zwischensaison nicht in Betrieb und das Stilsfer Joch ist ausschließlich in den Sommermonaten geöffnet.

Selbst in den hochgelegenen Gletscherskigebieten wirkt sich allerdings der anthropogen verursachte Klimawandel auf den Betrieb aus. Bereits 1993 wurde auf der Zugspitze, dem einzigen Gletscherskigebiet Deutschlands, damit begonnen, Teile des Gletschers mit Planen abzudecken oder Schnee über den Sommer hinweg in Depots zu konservieren. Anderenorts wie am Mölltaler Gletscher wird versucht, zusätzlich durch künstliche Beschneigung einen frühen Saisonstart im Spätsommer sicherzustellen. All diese Maßnahmen sind jedoch mit hohen Kosten verbunden und aus ökologischer Sicht oft fragwürdig. In Punkto Schneesicherheit weisen die Gletscherskigebiete aber sicherlich ihren größten Vorteil gegenüber anderen Destinationen auf, der sich in Zukunft noch weiter verstärken könnte. (vgl. Schmude/Berghammer 2015:291-292)

Um die Attraktivität weiter zu steigern, wird einerseits versucht den Komfort zu verbessern, wie durch die 2019 eröffnete Gondelbahn in Kaprun, mit der eine neue und schnellere Verbindung zum

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Gletscher am Kitzsteinhorn hergestellt wurde, andererseits sollen durch das Zusammenschließen von Skigebieten die Kapazitäten erhöht und somit auch mehr BesucherInnen angelockt werden.

Ein derzeit stark diskutiertes Projekt ist die als „Gletscherehe“ bezeichnete Verbindung von Pitztal und Ötztal. Dabei sollen drei neue Liftanlagen, ein Speicherteich und ein 614m langer Skitunnel errichtet, 64ha Pistenflächen auf dem Karles-, dem Hangenden- und dem Mittelbergferner geschaffen, sowie der Grat eines Vorgipfels um 40hm abgetragen werden (siehe Abbildung 11). (vgl. DAV o. J.)

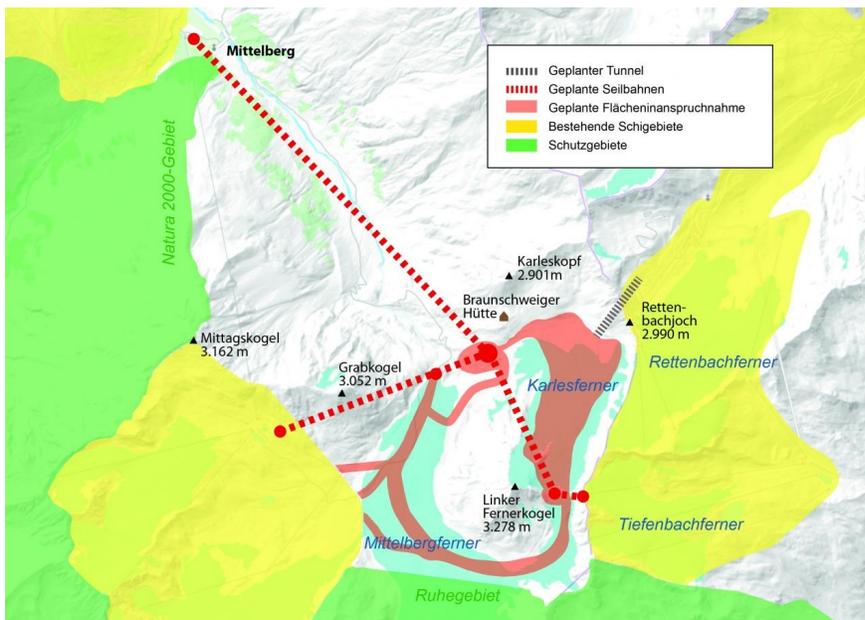


Abbildung 11: Gletscherzusammenschluss Pitztal-Ötztal – Quelle: Stern 2020:74

Die Interessen von Wirtschaft und NaturschützerInnen stehen sich hierbei gegenüber, weshalb die Suche nach einer Einigung auch schon länger andauert. Das betroffene Gebiet rund um den Linken Fernerkogel wurde 1981 nach mehreren Überarbeitungen nicht als Ruhegebiet definiert, was eine Erschließung als Skigebiet ausgeschlossen hätte. Stattdessen wurde die Grenze weiter südlich gezogen, um diese Option aufrechtzuerhalten. Zehn Jahre später folgte ein Beschluss zum absoluten Gletscherschutz in Tirol, wonach jegliche Beeinträchtigung der Gletscher verboten sei. 2004 wurde dieser Beschluss abgeändert, indem einzelne Bereiche wie der Linke Fernerkogel ausgenommen wurden. Nach aktueller Gesetzeslage ist die Erschließung neuer Skigebiete verboten, ausgenommen sind jedoch sowohl die Erweiterung, als auch der Zusammenschluss bereits bestehender Skigebiete. Diesen Zusatz machen sich die Bergbahnen von Pitztal und Ötztal zunutze, auch wenn die neuen

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Anlagen mit einer eigenen Zubringerbahn, einem Skizentrum und mehreren neuen Pisten auch alle Charakteristika eines eigenständigen Skigebietes erfüllen würden. 2016 wurde das Projekt offiziell eingereicht. Der ursprünglich im Februar 2020 geplante Termin zur Verhandlung im UVP-Genehmigungsverfahren wurde auf Ansuchen der Projektwerber abgesagt. Aufgrund der breiten öffentlichen Kritik wird davon ausgegangen, dass an Redimensionierungsmaßnahmen gearbeitet wird, um die landschaftlichen Eingriffe zu reduzieren. Die Frage nach einer endgültigen Entscheidung ist damit vorerst vertagt. (vgl. Stern 2020:72-74)

6. Auswirkungen des Gletscherrückgangs

Dass sich die Gletscher in den Alpen seit dem Ende der letzten Kleinen Eiszeit kontinuierlich auf dem Rückzug befinden, wurde in Kapitel 4 bereits dargestellt. Direkt mit den Änderungen des Klimas verbunden ist der Wasserkreislauf und das insbesondere im Alpenraum. Hier können bereits geringfügige Abweichungen zu langfristigen Konsequenzen führen, da sowohl die Schneedecke als auch der Rückzug der Gletscher einen Einfluss auf die zur Verfügung stehenden Wasserressourcen haben. (vgl. Weingartner et al. 2013:239)

Prognosen zur künftigen Entwicklung stützen sich hierbei stets auf klimatische Modelle, die anhand vergangener und aktueller Messungen erstellt werden. Aus den bis ca. ins Jahr 1850 zurückreichenden Messreihen lässt sich ablesen, dass die globale Klimaerwärmung über dem Alpenbogen stärker ausfällt, als in anderen Regionen. Vor allem die Temperaturen im Sommer und Winter steigen besonders stark an. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist vielerorts langfristig von einem Rückgang der Niederschlagsmengen in den Sommermonaten auszugehen. (vgl. Job et al. 2011:5) Zudem ist es wahrscheinlich, dass es aufgrund der höheren Luftfeuchtigkeit zu einer Zunahme sowohl in der Anzahl, als auch in der Intensität von Starkregenereignissen kommen wird. (vgl. Job et al. 2011:8)

In der Schweiz stiegen in den letzten drei Jahrzehnten die Temperaturen jeweils um $0,35^{\circ}\text{C}$ an. Der Anstieg ist damit um das 1,6-fache größer als der Durchschnitt auf der Nordhalbkugel. Die Jahresniederschläge nahmen ebenfalls um 8% zu. Da durch die höheren Temperaturen jedoch gleichzeitig steigende Verdunstungsraten verzeichnet wurden, verblieben die jährlichen Abflussmengen bisher konstant. Für die Schweiz ergibt sich bis ins Jahr 2099 nach Job et al. (2011:5) folgendes Szenario. Während sich die Temperaturen auf dem gesamten Staatsgebiet relativ gleichmäßig um bis zu 4°C erhöhen, ergeben sich bei der Entwicklung der Niederschläge größere räumliche Unterschiede. Für das nördliche Flachland wird von einer Zunahme ausgegangen, für die Gebirgstäler im Süden hingegen von einer Abnahme. Kleinräumige Ausnahmen sind jedoch nicht auszuschließen, da die Niederschlagsprognose von einer Vielzahl an Faktoren abhängt. (vgl. Job et al. 2011:6-8)

Wie bereits in Kapitel 4.3. beschrieben, sind steigende Temperaturen bei gleichzeitig sinkenden Niederschlagsmengen, wie sie für das Schweizer Hochgebirge und den gesamten Alpenraum erwartet werden, äußerst ungünstige Bedingungen für die Entwicklung der Gletscher. Ziel dieser Arbeit ist es nun aber auch, näher auf die Folgen einzugehen, die vom vermehrten Abschmelzen der

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Alpengletscher zu erwarten sind. Im Zuge davon soll in diesem Kapitel die Forschungsfrage F2: „*Welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen resultieren aus dem zunehmenden und andauernden Abschmelzen der Gletscher in den Alpen?*“, beantwortet werden.

Einige davon sind naheliegend. Gibt es keine Gletscher mehr, ist es natürlich auch nicht möglich, auf ihnen skizufahren. Aufgrund der Höhenlage und der damit verbundenen Schneesicherheit ist in den meisten Fällen zwar nicht anzunehmen, dass diese Skigebiete ganz verschwinden, ein Betrieb in den Sommermonaten wird allerdings immer aufwändiger und somit auch teurer werden. Andere Folgen sind weniger klar ersichtlich, weshalb folgende Hypothesen hierzu aufgestellt wurden und untersucht werden sollen:

H3: Je weniger Gletscherschmelzwasser vorhanden ist, desto geringer ist die Energieproduktion durch Wasserkraft im Alpenraum.

H4: Sinkende Gletscherschmelzwassermengen können einen Mangel in der Trinkwasserversorgung im Alpenraum verursachen.

H5: Durch den Gletscherrückzug werden Felsstürze im Hochgebirge begünstigt.

6.1. Energieerzeugung

Sich verändernde Zuflüsse aufgrund des Rückgangs der Gletscher bringen sowohl neue Optionen, als auch Herausforderungen für die Energieerzeugung mit sich. Im folgenden Kapitel soll deshalb erläutert werden, ob und wie diese durch geringere Schmelzwassermengen beeinträchtigt werden.

Haeberli et al. (2012:97) stellen klar, dass ein Rückzug der Gletscher auch Veränderungen in Bezug auf die Zuflüsse zu alpinen Stauseen zur Folge hat. In den letzten 40 Jahren wurde dabei ein Zuwachs durch die verstärkte Gletscherschmelze verzeichnet, der abhängig von der klimatischen Entwicklung und der jeweiligen kleinräumigen geographischen Situation auch noch bis zu 30 Jahre anhalten kann. Dieser Trend wird jedoch jedenfalls nur so lange fortbestehen, wie Gletscher vorhanden sind, die abschmelzen können. Für die Zeit danach gehen Haeberli et al. (2012:97) von einem starken und mittelfristig unumkehrbaren Rückgang der Zuflussmengen aus.

In den Schweizer Gletschern werden aktuell ca. 60 Milliarden km³ Wasser gespeichert. Das entspricht ungefähr der Menge des Jahresniederschlags auf dem gesamten Staatsgebiet. Vor allem in den hochgelegenen Regionen stellen Schneedecke und Gletschereis die wichtigsten hydrologischen Einflussgrößen dar. Durch die Klimaerwärmung verringert sich aber die Dauer der winterlichen Schneedecke ab einer Höhe von 1200m mit jedem Grad, das die Durchschnittstemperatur steigt, um

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

25 Tage, da dadurch sowohl die Form des Niederschlags, als auch der Umstand, wie viel abschmilzt abhängig sind. Somit werden sich einerseits die zurzeit durchschnittlich 20 Milliarden km³ Schnee, die jeden Winter fallen und dann während des Sommers Teil des Abflussregimes sind, stark reduzieren und andererseits werden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Gletscher zu einem großen Teil abgeschmolzen sein und demnach ebenfalls nicht mehr als Wasserspeicher zur Verfügung stehen. (vgl. Job et al. 2011:9)

Untersuchungen rund um den Göscheneralpsee im Schweizer Kanton Uri haben zu dem Ergebnis geführt, dass sich der Winter bis ins Jahr 2085 in allen Höhenlagen um mindestens fünf Wochen verkürzen wird. Der Zeitpunkt der maximalen Schneereserven wird um ca. drei Wochen näher an den Jahresanfang rücken und deren Ausmaß wird sich um 50-70% verringern. Niederschlag fällt also immer öfter und bis in größere Höhen hinauf in Form von Regen, wodurch das Wasser nicht zwischengespeichert wird, sondern direkt ins Abflusssystem fließt. (vgl. Job et al. 2011:10)

Weiters ist in der Folge auch die schützende Schneedecke auf den Gletschern geringer, diese schmilzt im Sommer schneller ab, die Eismassen schrumpfen und tragen mit ihrem Schmelzwasser zusätzlich zum Abfluss bei. (vgl. Job et al. 2011:11)

Mit Hilfe der Tabelle 3 soll dargestellt werden, wie stark das Einzugsgebiet von einzelnen untersuchten Kraftwerken in der Schweiz vergletschert ist und welche Veränderungen diesbezüglich zwischen 1985 und 2085 prognostiziert werden.

Tabelle 3: Veränderung der Gletscherflächen im Einzugsgebiet von Kraftwerken – Quelle: Job et al. 2011:12

Kraftwerk	Einzugsgebietsgröße (km ²)	Gletscherfläche in %		
		1985	2035	2085
Mattmark	86	35	19	9
Gougra	253	19	15	10
Gornera	81	68	58	30
Oberhasli	450	23	15	8
Göscheneralp	96	25	14	6
Prättigau	283	3	3	-
Löntschi	83	3	2	-

Bei der Betrachtung zeigt sich, dass sich 1985 die Gletscherfläche noch auf bis zu 68% erstreckte und somit eine wichtige Einflussgröße bildete. Seitdem nimmt die vergletscherte Fläche aber überall

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

stark ab und in jenen Fällen, wo 1985 schon nur ein kleiner Prozentsatz vergletschert war, wird sie bis 2085 ganz verschwinden. Insgesamt wird ein durchschnittlicher Rückgang von 21,4 Prozentpunkten erwartet (die Kraftwerke Prättigau und Löntsch nicht eingerechnet, da hier schon vorher von einem kompletten Verschwinden der Gletscherfläche ausgegangen wird) und dementsprechend auch deutliche Veränderungen der Abflussregime.

Um Wasserkraftwerke effizient errichten und betreiben zu können, ist es notwendig, stets über die aktuell vorhandenen Wasserressourcen Bescheid zu wissen, sowie über mögliche mittel- und langfristige Veränderungen in Bezug auf die Verfügbarkeit. Untersuchungen des Abflussregimes von Flüssen sind deshalb von großer Bedeutung, weil dadurch Informationen erhalten werden, wie diese zur Stromproduktion, zur Wasserversorgung oder für die Flussschifffahrt genutzt werden können. Mit dem Abflussregime wird der mittlere Verlauf des Abflusses für jedes Monat über ein Jahr hinweg bezeichnet. (vgl. Job et al. 2011:14-15)

In Basel werden am Rhein bereits seit 1808 hydrologische Messungen durchgeführt. Aus diesen Daten können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, da es sich einerseits um die längste derartige Messreihe in Mitteleuropa handelt und andererseits 67% des Schweizer Staatsgebietes – darunter der gesamte nördliche Alpenraum – im Einzugsgebiet des Rheins liegen. Anzumerken ist allerdings, dass Veränderungen, die im Oberlauf des Rheins passieren, nicht immer 1 zu 1 in Basel gemessen werden können, da dazwischen der Bodensee liegt, welcher als eine Art Puffer fungiert. Nach Auswertung der hydrologischen Messdaten konnte, was die Jahresabflussmengen betrifft, keine statistische relevante Veränderung festgestellt werden. Allerdings ist eine jahreszeitliche Verschiebung ersichtlich (siehe Abbildung 12). Während seit dem frühen 20. Jahrhundert die mittleren Abflüsse im Sommer (Juni - August) zurückgehen, steigen jene im Winter (Dezember - Februar). Gründe dafür werden

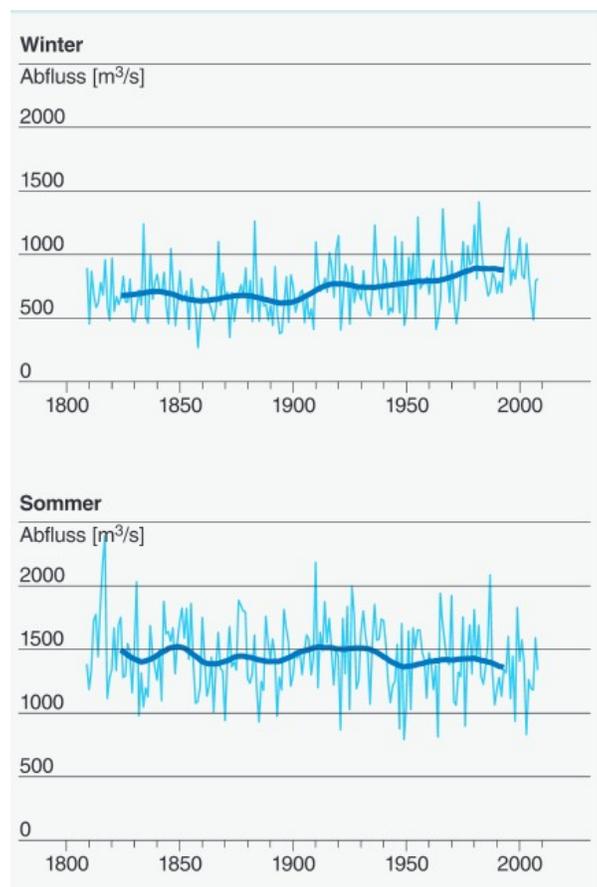


Abbildung 12: Saisonale Abflussmengen des Rheins bei Basel – Quelle: Job et al. 2011:15

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

mehrere angeführt. Der Niederschlag im Winter fällt häufiger in Form von Regen, fließt somit direkt ab und führt gleichzeitig zu reduzierten Schneemengen, die ansonsten erst später im Jahresverlauf schmelzen würden. Zudem hat sich die Kapazität der Speicherseen kontinuierlich erhöht, sodass im Sommer mehr Wasser aufgefangen, um es im Winter zur Stromproduktion zu nutzen. Seit Beginn der Messungen ist außerdem ersichtlich, dass in stark vergletscherten Einzugsgebieten die Abflussmengen neben den Wintermonaten auch im Frühling und Sommer durch die steigende Gletscherschmelze zugenommen haben. (vgl. Job et al. 2011:14-15)

Weingartner et al. (2013:243) zufolge kann demnach insgesamt eine Verbesserung der hydrologischen Parameter zur Energieerzeugung im Laufe des letzten Jahrhunderts festgehalten werden. Insbesondere in Laufkraftwerken wurde durch die größeren Abflussmengen im Winter die Stromproduktion erhöht.

Anhand dieser Erkenntnisse kann zukünftig allerdings von noch weitergehenden Veränderungen ausgegangen werden. Neben steigenden Temperaturen und damit verbunden auch einer stärkeren Verdunstung, sowie sich ändernden Niederschlagsregimen werden die Abflussmengen auch von Veränderungen der Schmelzwassermengen betroffen sein. (vgl. Job et al. 2011:16-17)

Für die Oberläufe der westösterreichischen Flüsse mit vergletschertem Einzugsgebiet wie Inn, Salzach oder Drau zeigt sich folgendes Bild: In den Sommermonaten wird der Anteil des Gletscherabflusses im Inn am Pegel Oberaudorf nahe Kufstein mittelfristig bis ca. 2075 auf 24% ansteigen. Zurückzuführen ist das auf die geringeren Abflussmengen insgesamt infolge von weniger Niederschlag und höherer Verdunstung und andererseits auf die zunehmende Eisschmelze. Der erwartete Abflussrückgang von 42% (zum Vergleichszeitraum 1961-1990) reduziert sich durch zusätzliches Gletscherschmelzwasser auf 31%. (vgl. Stanzl/Nachtnebel 2010:183)

In erster Linie sind davon natürlich glaziale Abflussregime betroffen, bei denen nicht nur eine saisonale Verschiebung festgestellt wurde, sondern auch Änderungen in den Gesamtjahresabflussmengen. Im stark vergletscherten Einzugsgebiet des Vernagtbachs haben sich die Jahressummen seit Beginn der Messungen im Jahr 1974 beispielsweise mehr als verdoppelt. (vgl. Escher-Vetter 2011:77)

Aktuell wird hier, wie in der nachfolgenden Tabelle 4 erkennbar ist, durch vermehrtes Schmelzwasser aus Gletschern in allen Jahresteilern eine Zunahme verzeichnet. Diese Entwicklung wird sich jedoch umkehren, sobald der Zeitpunkt der maximalen Schmelzwassermenge, abhängig von der Größe der jeweiligen vergletscherten Fläche, erreicht ist. Im Durchschnitt sollen sich die

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Abflussvolumina ab 2050 wieder an das Niveau des frühen 20. Jahrhunderts annähern und ab 2100 werden glazial geprägte Regime in den Alpen wie in vielen anderen Teilen der Erde so gut wie verschwunden sein. (vgl. Weingartner et al. 2013:243-244)

Tabelle 4: Veränderung der mittlere saisonalen Abflüsse 2021-2050 verglichen mit 1980-2009 –
Quelle: Weingartner et al. 2013:244

Regime	Winter (Oktober - März)	Sommer (April September)	Jahr (Oktober - September)
Glaziale Regime	+20 bis +30%	+1 bis +15%	+5 bis +15%
Nivale Regime	+6 bis +17%	-15 bis -4%	-3 bis +4%
Pluviale Regime (Alpennordseite)	+2 bis +5%	-8 bis -2%	0 bis +5%
Südalpine Regime	-5 bis +16%	-11 bis -2%	-4 bis +6%

Anhand der abgebildeten Tabelle zeigen sich außerdem je nach Regimetyp große Unterschiede. Während in den glazialen Regimen im Zeitraum 2021-2050 ein Anstieg der mittleren saisonalen Abflüsse verglichen mit der Periode zwischen 1980 und 2009 sowohl im Sommer als auch im Winter prognostiziert wird, bewegen sich in nivalen, pluvialen und südalpinen Regimen die gesamtjährlichen Veränderungsrate rund um 0%. Größere Abflussmengen im Winter gleichen sich in der Regel durch geringere im Sommer aus.

Durch Messungen am Gornergletscher und am Stausee Mattmark im südlichen Wallis von Farinotti et al. (2011:273) konnten deutliche langfristige Abweichungen dieser glazialen Abflussregime festgestellt werden. Das Einzugsgebiet der Gornera ist zu 63% vergletschert und nur 4% sind von Vegetation bedeckt. Als Vergleichsperiode für die Prognosen wurde der Zeitraum 1980-2009 gewählt. In dieser Zeit wurde ein durchschnittlicher Jahresniederschlag von 1320mm mit Spitzen in den Monaten Mai und Oktober verzeichnet. Die mittlere Lufttemperatur betrug -4,7°C. Ähnliche Ausgangsdaten treffen auf das Einzugsgebiet Mattmark zu. Die vergletscherte Fläche macht ca. 30% aus, der Jahresniederschlag ist mit 1610mm, wie auch die durchschnittlichen Lufttemperaturen mit -2,3°C, leicht höher. Der Tagesniederschlag sowie die Tagesmitteltemperaturen wurden in der Folge auch als Haupteinflussgrößen für die Prognose zu Rate gezogen, indem mit Hilfe vergangener Zeitreihen Szenarien für die Zukunft entwickelt wurden. (vgl. Farinotti et al. 2011:273-275)

Wie bereits in Tabelle 3 angeführt kommen auch Farinotti et al. (2011:276) zu dem Ergebnis, dass sich die vergletscherte Fläche in beiden Gebieten bis zum Ende des Jahrhunderts auf weniger als ein Drittel des heutigen Standes reduzieren wird. Infolgedessen hat die Zunahme an Schmelzwasser

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

bereits im Laufe des letzten Jahrhunderts zu einem kontinuierlichen Anstieg der mittleren Tagesabflussmengen der Gornera in den Sommermonaten geführt. Diese Entwicklung wird sich auch noch einige Zeit bis ungefähr Mitte des 21. Jahrhunderts fortsetzen. Im Jahr 2030 wird mit einer mittleren Jahresabflussmenge von ca. 160 ± 20 Mio m^3 gerechnet. Das entspricht einer Zunahme um 20% gegenüber der Vergleichsperiode. Langfristig werden sich die kleiner werdenden Eismassen aber gegenteilig auf die Abflussmengen auswirken, da der Anteil des Schmelzwassers immer geringer wird. (vgl. Farinotti et al. 2011:276)

Während Job et al. (2011:16-17) diese Trendumkehr spätestens für die 2070er Jahre prognostizieren, rechnen Farinotti et al. (2011:276) bereits ab 2030 im Untersuchungsgebiet mit sinkenden Abflussmengen aus dem Schmelzwasser des Gornergletschers. Für 2090 wird insgesamt ein Minus von 13% und für die Sommermonate Juli und August sogar von 30% verglichen mit der Referenzperiode erwartet.

Im Untersuchungsgebiet Mattmark führt die weniger starke Vergletscherung verglichen mit dem Einzugsgebiet der Gornera dazu, dass die Folgen des Gletscherrückzugs früher erkennbar sind. Das Maximum der jährlichen Abflussmengen wird bereits für die 2020er Jahren mit einem Plus von 5% gegenüber dem Zeitraum 1980-2009 prognostiziert. Danach geht man auch hier von einem Rückgang aufgrund des weniger werdenden Schmelzwasser aus, der im Jahr 2090 ca. 15% betragen soll. Besonders stark sind die Auswirkungen wiederum im Sommer, wo mit einer durchschnittlichen Abnahme von mehr als 50% gerechnet wird. (vgl. Farinotti et al. 2011:277)

Die Entwicklung der Abflussregime für die beiden Einzugsgebiete Gornera und Mattmark im Zeitraum von 1940 bis 2099 ist in der untenstehenden Abbildung 13 zur Veranschaulichung der Abflussveränderungen nochmals dargestellt.

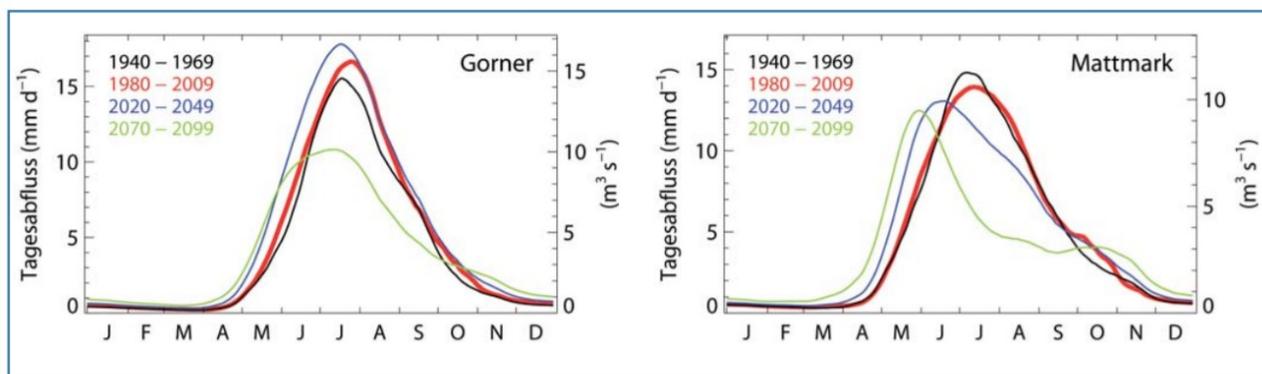


Abbildung 13: Zeitliche Veränderung des mittleren Tagesabflusses in den Einzugsgebieten von Gornera und Mattmark – Quelle: Farinotti et al. 2011:277

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Farinotti et al. (2011:27) führen weiters aus, dass sich die prognostizierten Rückgänge der Jahresabflussmengen in beiden Fällen so gut wie ausschließlich auf das Verschwinden des Gletschereises zurückführen lassen und nicht auf Veränderungen der Jahresniederschläge.

Obwohl die Einzugsgebiete der Kraftwerke Gornera und Mattmark in unmittelbarer Nähe zueinander liegen, brachten die Untersuchungen dennoch gewisse Unterschiede zu Tage. Zum Einen ist das Gornera Gebiet doppelt so stark vergletschert wie das Mattmark Gebiet und zum anderen befinden sich die Eismassen in letzterem in deutlich höheren Lagen über 2800m über dem Meer. Die Folgen der Gletscherschmelze treten hier deshalb gedämpfter auf, während im Gorneragebiet durch das große Gletschervolumen insgesamt und die tiefere Lage des Gletschers zwischen 2300 und 2600m Seehöhe ein stärkerer und zeitlich geballter Einfluss auf das Abflussregime entsteht. (vgl. Farinotti et al. 2011:277)

Den Prognosen von Job et al. (2011:16) zufolge wird sich die sommerliche Abflussspitze von glazialen Regimen außerdem generell immer weiter in den Frühsommer hinein verschieben, während die Abflüsse im Winter leicht anwachsen. Wie deutlich die jahreszeitlichen Verschiebungen ausfallen werden ist abhängig vom Grad der ursprünglichen Vergletscherung im jeweiligen Einzugsgebiet. Job et al. (2011:16) rechnen in Gegenüberstellung zur Vergleichsperiode 1980-2009 im südlichen Wallis mit einem durchschnittlichen Rückgang von 6-9% im Jahr 2035 und 10-12% im Jahr 2085. Für die Region der Kraftwerke Oberhasli im Süden des Kantons Bern wird eine Abnahme von 3% bis 2035 und 7% bis 2085 erwartet. In niedriger gelegenen Teilen der Alpen mit geringen Anteilen an Vergletscherung im Einzugsgebiet konnten keine statistisch relevanten Veränderungen der Gesamtabflussmenge prognostiziert werden.

Je nach verwendeten Klimaszenarien können sich allerdings größere Diskrepanzen bei den Ergebnissen ergeben, wodurch sich zwar ein allgemeiner Trend ablesen lässt, nicht jedoch exakte Voraussagen für einzelne Regionen. Weingartner et al. (2013:239) führen beispielsweise ein Szenario an, bei dem ein klimabedingter Rückgang der Stromproduktion bei Kraftwerken mit alpinen Einzugsgebieten von 7% bis 2035 und von 17% bis 2085 erwartet wird.

Den zahlreichen Studien und Untersuchungen, die diesbezüglich durchgeführt wurden, ist jedoch eines gemeinsam: Es soll dargestellt werden, wie sich Veränderungen im Abflussregime letztendlich auf die Stromerzeugung sowohl kleinräumig für einzelne Kraftwerke, als auch gesamtstaatlich auswirken. (vgl. Weingartner et al. 2013:239-240)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Aktuell führen die stark schmelzenden Gletscher in den Alpen zu erhöhten Energieproduktionsraten verglichen mit dem langjährigen Mittel. Aufgrund der endlichen Eismassen ist diese Entwicklung jedoch nicht von Dauer. Hydrologische Modellierungen in Verbindung mit der Energieproduktion einzelner Pumpspeicherkraftwerke sollen Aufschluss geben über die zukünftige Wasserverfügbarkeit. Genaue langfristige Prognosen für das Ende des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus sind immer noch schwer zu erstellen und deshalb mit gewissen Schwankungsbreiten behaftet. Die Zunahme von Starkregenereignissen einerseits und Trockenperioden andererseits trägt zusätzlich zur Erschwerung der Vorhersagen bei. (vgl. Finger/Sarbach 2012:107)

Zudem stellen Weingartner et al. (2013:245) klar, dass nicht zwangsläufig von einer linearen Verbindung zwischen der Menge des Abflusses und jener des erzeugten Stroms ausgegangen werden darf. Der jeweilige Typ des Kraftwerks sowie dessen individuelle Auslegung sind hierbei zu beachten, wie mit Hilfe von zahlreichen Fallstudien ermittelt wurde. Das Kraftwerk Prättigau im Kanton Graubünden gehört zu einem Anlagentyp, mit dem in der Schweiz ca. 9% des gesamten Stroms aus Wasserkraft produziert werden. Die Ergebnisse der hier angeführten Prognosen sind also, zumindest teilweise, durchaus übertragbar für andere Kraftwerke.

Die Wasserkraftanlage Prättigau im Kanton Graubünden besteht aus drei Staustufen in denen jährlich insgesamt 230GWh Strom erzeugt werden. Saisonal verteilt werden davon ca. ein Drittel im Winter (Oktober bis April) und zwei Drittel im Sommer (Mai bis September) produziert. Wie in Tabelle 3 angeführt ist, erstreckt sich das Einzugsgebiet über ungefähr 283km², die allerdings nur zu einem sehr kleinen Teil von ca. 3% vergletschert sind. Die Auswirkungen des Gletscherrückgangs für dieses Beispiel sind deshalb nur gering. (vgl. Hänggi et al. 2011:292)

Nichtsdestotrotz können signifikante Veränderungen im Abflussregime erwartet werden. Die Temperatur und Niederschlagsprognosen gehen für den Zeitraum 2021-2050 von einer deutlichen Erwärmung der mittleren Lufttemperaturen aus, sowie einem leichten Anstieg der Niederschlagsmengen im Frühling, Herbst und Winter, der jedoch in den meisten Fällen innerhalb der natürlichen Variabilität liegt und somit statistisch nicht signifikant ist. Für die Jahresabflussmengen wird von einer Zunahme zwischen 1 und 8% ausgegangen. (vgl. Hänggi et al. 2011:295-296)

Für die Stromproduktion bedeuten diese Veränderungen gemäß Weingartner et al. (2013:246) nun folgendes: Die geringeren Wassermengen im Sommer liegen noch immer über dem Fassungsvermögen von Prättigau und wirken sich demnach zumindest vorerst noch nicht aus. Durch

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

erhöhte Abflüsse im Winter kann in dieser Zeit aber die Produktion gesteigert werden, wodurch insgesamt im Zeitraum 2021-2050 mit einer Steigerung der Stromproduktion von 9% gerechnet wird (Vergleichszeitraum 1976-2004). Dieses Ergebnis lässt sich nicht nur auf Kraftwerksanlagen mit ähnlichen hydrologischen Einzugsgebieten übertragen, sondern weist auch auf das insgesamt leichte Plus von ca. 1% hochgerechnet auf die gesamte Schweiz hin. (vgl. Weingartner et al. 2013:246) Eine generelle Verallgemeinerung ist jedoch nicht zutreffend, da stets die lokalen Effekte in Bezug auf die jeweiligen Kraftwerke berücksichtigt werden müssen. (vgl. Hänggi et al. 2011:298)

Inwiefern diese Prognosen auch für die fernere Zukunft zutreffend sind, ist allerdings unsicher und bedarf einer genaueren Differenzierung in Bezug auf die jeweiligen Einzugsgebiete. Speziell für hoch gelegene glaziale Regime im südlichen Wallis werden stark negative Entwicklungen erwartet, sodass sich auch für die gesamte Schweiz im Zeitraum 2070-2099 Rückgänge in der Stromproduktion infolge der geringeren Abflussmengen ergeben werden. (vgl. Weingartner et al. 2013:239-246-247)

Im Vergleich zum Kraftwerk Prattigau sind glaziale Abflussregime in hohem Maße von den Schmelzprozessen von Schnee und Eis beeinflusst. Veränderungen in diesen Vorgängen wirken sich in der Folge auf alle damit in Verbindung stehenden Systeme aus wie beispielsweise die Energieerzeugung durch Wasserkraft. Da Stauseen vielerorts neben ihrer primären Funktion der Stromerzeugung auch zur Bewässerung, als regionale Arbeitsplätze oder zum Schutz vor Überschwemmungen dienen, reicht es nicht nur, die kurzfristige Produktionssteigerung infolge höherer Abflussraten im Auge zu haben. Vielmehr ist es notwendig, ein langfristiges Konzept zu erarbeiten um diese Systeme zu erhalten. (vgl. Schaepli et al. 2007:1191)

Schaepli et al. (2007:1193) beschreiben die Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf die Stromproduktion am Mauvoisin Staudamm im südlichen Wallis näher. Dieser kann 204 Mio m³ Wasser speichern und erzeugt ungefähr 1000GWh pro Jahr, was ca. 2,5% der gesamten Schweizer Wasserkraftproduktion entspricht. Als stark glazial geprägtes Abflussregime mit einer vergletscherten Fläche von 41,4% ist der Abfluss im Juli mehr als 100 Mal höher als im Februar. Bei einer mittleren Temperatur von -3,6°C beläuft sich der Jahresniederschlag auf 1530 mm.

Davon ausgehend rechnen Schaepli et al. (2007:1203) für das Ende des 21. Jahrhundert mit einem massiven Rückgang der Energieproduktion. Diese soll den vorgenommenen Modellrechnungen zufolge im Zeitraum 2070-2099 durchschnittlich pro Jahr um 36% geringer sein, als zur Kontrollperiode zwischen 1961-1990. Da die Effizienz der Stromproduktion annähernd gleich

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

bleibt, werden die Veränderungen ausschließlich auf die in geringerem Ausmaß zur Verfügung stehenden Wassermengen, bedingt durch abgeschmolzene Eismassen, weniger Niederschlag und eine höhere Evapotranspiration, zurückgeführt. Weiters wird festgehalten, dass trotz des Rückgangs der Produktion das Speicherkraftwerk an sich mit den derzeit erwartbaren klimatischen Veränderungen zurechtkommt und seine Rolle als Schutz vor Hochwasser weiter erfüllen wird können, wenngleich ein steigendes Risiko für Überflutungen angeführt wird.

Um noch genauere Daten zu erhalten, erstellten Finger/Sarbach (2012:107-110) eine integrative Modellierung des Vispertals im südlichen Wallis. Dabei wurden Klimamodelle, Gletschermodelle, hydrologische Modelle, sowie die Art der betroffenen Wasserkraftwerke zu einer Modellkette verknüpft, wodurch eine ganzheitliche Modellierung der Wasserverfügbarkeit im Tal inklusive der Herkunft des Wassers möglich war und die Auswirkungen der Klimaerwärmung besser berechnet werden können.

Folgende Ergebnisse können daraus festgehalten werden: Der Zufluss zum Mattmarkstausee wird sich bereits mittelfristig im Mai leicht erhöhen und im Zeitraum Juli bis September stark verringern. Die Zielwerte der Stauseefüllung können infolgedessen nur erfüllt werden, indem im Sommer deutlich weniger Strom erzeugt wird. Zusätzlich ergeben sich daraus auch geringere Abflussmengen unterhalb des Kraftwerks, was wiederum ökologische Einschränkungen mit sich bringen kann. Im Herbst (Oktober-November) werden häufiger auftretende Starkregenereignisse erwartet, deren Wassermengen jedoch das Fassungsvermögen des Stausees übersteigen und somit nicht vollständig zur Energieproduktion genutzt werden können. Das Minus im Sommer kann dadurch also nur bedingt ausgeglichen werden. Insgesamt wird durch die prognostizierten klimatischen Veränderungen und das Abschmelzen der Gletscher ein Rückgang der Stromproduktion bis 2100 um ca. 33% erwartet. (vgl. Finger/Sarbach 2012:109-110)

Die Ergebnisse von Finger/Sarbach (2012:107-110) lassen sich also durchaus mit jenen von Schaeffli et al. (2007:1191-1203) vergleichen. Diese Erkenntnisse können nun dafür verwendet werden, um zu beurteilen, inwiefern Anpassungsmöglichkeiten ergriffen werden sollen. Da Infrastrukturmaßnahmen meist hohe Kosten bedeuten, ist eine Analyse von Vorteil, um festzustellen, ob gegebenenfalls die Kapazitäten der Wasserfassung erhöht werden sollten, um vor dem Hintergrund prognostizierter Veränderungen eine Effizienzsteigerung zu erreichen. (vgl. Finger/Sarbach 2012:108-110)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Durch das großflächige oder gänzliche Verschwinden der Gletscher ergeben sich aber auch neue Möglichkeiten für die Energieerzeugung. Mit Hilfe von neuen und detaillierteren Geländemodellen können heute genauere Aussagen über die tatsächliche Eisdicke und über die darunter liegenden Reliefformen getroffen werden als noch vor einigen Jahrzehnten, auch wenn noch immer mit Unsicherheiten von 20-30% in Bezug auf die Eisdicke gerechnet werden muss. (vgl. Haeberli et al. 2012:94) In jedem Fall wird das Entstehen von neuen Seen als wesentlicher Teil des Erbes der Gletscher erwartet, die einen Wasserspeicher, ein Auffangbecken für Sedimente, aber ebenso ein gewisses Potential für Naturgefahren darstellen. Zwar werden diese Entwicklungen intensiv beobachtet, längerfristige Perspektiven fehlen wegen des Mangels an geeigneten Daten jedoch noch weitgehend. Im Laufe der Zeit haben sich die Raten der Neuentstehung von Gletscherseen kontinuierlich beschleunigt. Im Grunde versteht man unter einem Gletschersee das Schmelzwasser, das hinter einer Barriere aufgestaut wird und sich in einer vom Gletscher geschaffenen Vertiefung befindet. Die Barrieren bilden dabei Ablagerungen durch Moränen, Erdrutsche und das Gletschereis selbst. (vgl. Buckel et al. 2018:39)

Diese Seen haben einen bedeutenden Einfluss auf den Wasserkreislauf. Sie bewirken eine Speicherung und Retention von Sedimenten, sodass diese nur in reduzierter Menge in die Flusssysteme gelangen. Zur besseren Übersicht von deren Verteilung, Entstehung und Eigenschaften wurde deshalb von Buckel et al. (2018:39-40) ein Inventar der österreichischen Gletscherseen erstellt, das helfen soll, deren Auswirkungen auf hochalpine Landschaften beurteilen zu können.

Folgende Ergebnisse lassen sich daraus ableiten. In Österreich gibt es derzeit 1410 Seen mit einer Gesamtfläche von 17,1 km² auf einer Seehöhe von über 1700m. 164 davon werden auch tatsächlich vom Gletscherschmelzwasser gespeist. Hochalpine Gletscherseen entstehen entweder als Ergebnis langfristiger Erosionsprozesse, die Übertiefungen verursachen und durch Sedimentablagerungen beim Gletschervorstoß oder -rückzug eine Art natürliche Staumauer bilden. (vgl. Buckel et al. 2018:44-47) Die Zuwachsrate der Bildung neuer Seen steigt dabei immer stärker an. Die durchschnittliche Anzahl neuer Seen pro Jahr hat sich seit dem ältesten analysierten Zeitraum (1850-1920) bis zum jüngsten (2006-2015) um den Faktor acht erhöht. Auch die Fläche der neuen Seen hat sich seit 2006 von 37.470m²/Jahr auf 78.534m²/Jahr mehr als verdoppelt. Ein Zusammenhang zu den schrumpfenden Eismassen und sich verändernden klimatischen Bedingungen ist hierbei beobachtbar. (vgl. Buckel et al. 2018:44-46)

Einen genaueren Blick auf das energiewirtschaftliche Potential dieser neu entstehenden Gletscherseen liefern Untersuchungen in den Schweizer Alpen. Job et al. (2011:12-13) gehen davon

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

aus, dass nach dem Abschmelzen der Gletscher in den Übertiefungen auf der ehemals von Eis bedeckten Fläche alleine in der Schweiz um die 500 neuen Seen mit einem Gesamtvolumen von 2km^3 entstehen. Die größten davon werden unter dem heutigen Großen Aletschgletscher oder dem Gornergletscher im Wallis erwartet. Insgesamt könnte sich so das Stauseevolumen verglichen mit dem heutigen Stand um die Hälfte erhöhen. Aufgrund der großen Menge an gespeichertem Wasser und dem damit verbundenen Potential für die Energieerzeugung werden die neu entstehenden Seen mit großem Interesse beobachtet.

Haeberli et al. (2012:94) erwarten, dass die meisten dieser Seen weniger als 50m tief sein werden und nur ein Drittel mehr als 1 Mio m^3 Wasser fassen könnte. Bei etwa 40 wird ein Volumen von über 10 Mio m^3 erwartet, wobei die größten unter ihnen auf über 50 Mio m^3 kommen können. Insgesamt ergibt sich so eine gespeicherte Wassermenge, die der jährlichen Abflussmenge aus den Gletschern unter den gegenwärtigen negativen Massenbilanzentwicklungen entspricht.

Um das tatsächliche Potential dieser Seen zur Energieerzeugung zu erfassen, müssen allerdings auch andere Faktoren berücksichtigt werden, über die aktuell noch viel Unsicherheit herrscht. Flache Seen könnten etwas durch den Sedimenttransport schnell versanden, oder das Wasser könnte in kleinen Rinnen und Schluchten versickern. Außerdem erschweren natürliche Klimaschwankungen und die Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen eine langfristige Planung. Je nach Lage der neu gebildeten Seen wird auch eine dadurch bedingte zusätzliche Beschleunigung des Schmelzprozesses der Gletscher beobachtet. Aufgrund der niedrigen Albedo erwärmt sich das Wasser stärker und der Kalbungsvorgang wird begünstigt. Diese Entwicklungen müssen aber von Fall zu Fall analysiert werden, um genaue Aussagen treffen zu können, wann das Entstehen von Gletscherseen erwartet werden kann. Generell wird es in den meisten Fällen für den Zeitraum um die Mitte des 21. Jahrhunderts prognostiziert. (vgl. Haeberli et al. 2012:94-96)

In jedem Fall gilt es, das Entstehen dieser Seen genau zu beobachten, da Haeberli et al. (2012:96-98) auch mit einer erhöhten Gefährdung durch Flutwellen und Murenabgängen infolge von Seeausbrüchen rechnen. Zwar wird dieses Risiko zurzeit noch als sehr gering eingeschätzt, es steigt jedoch mit der Anzahl an Gletscherseen und wird über viele Jahrzehnte hinweg andauern. Das Ausmaß solcher Flutwellen würde jenes von Niederschlagsereignissen weit übersteigen und somit eine große Gefahr sowohl für die Bevölkerung, als auch für die Infrastruktur in den Alpentälern darstellen. Eine kontrollierte Nutzung dieser neu entstehenden Seen ist somit in zweierlei Hinsicht von Vorteil. Einerseits könnten sie als Hochwasserschutzmaßnahmen fungieren und andererseits dazu beitragen, das Minus in der Wasserkraft auszugleichen. Dafür wäre es notwendig, neue

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Talsperren zu errichten, um das Volumen der natürlich entstandenen Seen zu vergrößern. Diese könnten dann als Pumpspeicherkraftwerke zur Erzeugung von Spitzenenergie genutzt werden. Zusätzlich zu beachten gilt es dabei, dass die Anlagen mit den erwarteten höheren Sedimentmengen aus dem Schmelzwasser der Gletscher zurecht kommen.

Zur besseren Veranschaulichung wo und auf welche Art sich diese Möglichkeiten ergeben würden, nennen Haerberli et al. (2012:98) hierzu zwei konkrete Beispiele, deren energiewirtschaftliches Potential, in Anbetracht von bereits bestehenden Kraftwerken, Gletscherentwicklungen und Abflussveränderungen für verschiedene Klimaszenarien untersucht wurde. Auf dem Gebiet des heutigen Glacier de Corbassière unweit des Mauvoisin Stausees könnte mit einer verhältnismäßig kleinen Talsperre ein Speichersee mit einem Fassungsvermögen von ungefähr 50 Mio m³ geschaffen werden. Durch eine unterirdische Verbindung zwischen Corbassière und Mauvoisin könnte ein kombiniertes Pumpspeicherkraftwerk eine Energieproduktion von 500MW erzielen. Die Wirtschaftlichkeit wäre nach heutigem Stand der Strompreise bereits gegeben.

Als zweites Beispiel wurden die Kraftwerke Oberhasli untersucht. Auch hier ist eine Leistungssteigerung von ca. 500MW zu erwarten. Die baulichen Maßnahmen wären jedoch etwas umfangreicher. Zum einen könnte das Wasser unterhalb des Gauligletschers aufgestaut werden und von da direkt in den bereits bestehenden Grimselstausee gleitet werden und zum anderen müsste am Triftsee eine 110m hohe Staumauer mit einem Speichervolumen von 105 Mio m³ errichtet werden. Durch eine Verbindung zum angrenzenden Steingletscher könnte eine zusätzliche Erhöhung der Zuflussmenge erreicht werden. (vgl. Haerberli et al. 2012:98-99)

Diese genannten und ähnliche Projekte werden wohl in den kommenden Jahrzehnten realisiert werden, um den steigenden Energiebedarf zu decken. Sinnvoll dabei ist sicherlich eine ganzheitliche Betrachtung, die neben einer möglichst effizienten Stromproduktion auch die Bereiche Hochwasserschutz, Wasserversorgung oder Tourismus im Blick hat. Die Sicherung von sich neu bildenden Seen wird im Sinne des Hochwasserschutzes in vielen Fällen ohnehin notwendig sein, sodass eine gleichzeitige Nutzung als Speicherkraftwerk durchaus ratsam wäre. Es werden sich allerdings einerseits auch rechtliche Fragen stellen, wenn etwa das Wasser von einem Abflussregime in ein anderes umgeleitet werden soll, vor allem in Gebieten des UNESCO Welterbes oder anderen geschützten Regionen, und andererseits Fragen logistischer Natur, wenn es gilt wie am Gornergletscher, potentiell riesige Stauseen mit 350 Mio m³ zu füllen. (vgl. Haerberli et al. 2012:100)

6.2. Trinkwasserversorgung

Veränderungen in den Abflussmengen von glazialen Regimen beeinflussen nun aber nicht nur die Energieproduktion der alpinen Wasserkraftwerke, es ergeben sich dadurch ebenso mögliche Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung. Die Frage ob, und in welchen Gebieten der gegen Ende des 21. Jahrhunderts erwartete Rückgang der Schmelzwassermengen hier negative Folgen mit sich bringt, soll in diesem Kapitel behandelt werden.

Anlass für diese Überlegung gibt der Umstand, dass knapp 85% der weltweiten Süßwasserreserven in Form von Eis und Schnee gespeichert sind. (vgl. Willmes et al. 2015:26) Der Großteil davon befindet sich an den Polen, während die übrigen Gebirgsgletscher in den Alpen, Nordeuropa, Zentralasien, Nord- und Südamerika sowie Neuseeland nur 0,1% des Gesamtvolumens ausmachen. (vgl. Escher-Vetter 2011:72)

Dennoch nehmen die Gletscher eine wichtige Rolle im Wasserkreislauf ein und erfüllen im Abflussregime eine ausgleichende Funktion. Ohne das Schmelzwasser würde vielerorts das Abflussminimum im Sommer noch extremer ausfallen. (vgl. Wiesenegger 2019:71) Mehr als 15% der Weltbevölkerung ist auf das Wasser aus den Gebirgsregionen angewiesen. Der Wasserüberfluss in diesen Gebieten liegt zum einen an erhöhten Niederschlagsmengen und zum anderen an der Speicherfunktion von Schnee und Eis, die dazu führt, dass die Niederschläge erst in wärmeren Perioden abgegeben werden. (vgl. Schmieder et al. 2018:507)

Durch schmelzende Gletscher besteht nun die Gefahr, dass diese natürliche Speicherfunktion in Zukunft verloren geht und niederschlagsarme Perioden nicht mehr ausgeglichen werden können. Hochalpine Bäche könnten zeitweise austrocknen, wodurch die Versorgung von Almen und Schutzhütten stark erschwert wird. Aber auch die Oberläufe von größeren Flüssen sind betroffen. An der Salzach am Pegel Mittersill gehen an einzelnen trockenen Tagen in den Sommermonaten bis zu 60% des Abflusses auf das Schmelzwasser der Gletscher der Venedigergruppe zurück. (vgl. Wiesenegger 2019:71-72)

Noch deutlicher zeigt sich die große Bedeutung von saisonal verzögerten Abflüssen in Folge des Abschmelzens von Schnee und Eis in den ariden Gebieten der Erde, wo während der Sommermonate nur wenig Niederschlag verzeichnet wird, wie beispielsweise in Zentralasien oder entlang des Colorado im Westen der USA. (vgl. Escher-Vetter 2011:76)

Langfristige Abflussmessreihen von Gletschern existieren bisher nur in wenigen Fällen. Grundsätzlich kann aber festgestellt werden, dass je stärker das Einzugsgebiet vergletschert ist,

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

desto höher ist auch der Anteil des vom Gletscher stammenden Abflusses. Beim zu 70% vergletscherten Einzugsgebiet der Massa unterhalb des Großen Aletschgletscher sind es zum Beispiel 85%. Je weiter flussabwärts die Messungen vorgenommen werden, umso geringer wird dieser Anteil, wie folgender Vergleich zeigen soll. Das Einzugsgebiet der Donau am Pegel Passau/Achleiten ist etwa 77.000km² groß. Während sich im Zeitraum 1991-2000 im Kopfeinzugsgebiet am Pegel Vent im Ötztal der Abfluss noch gleichmäßig auf Schneeschmelze, Eisschmelze und Regen verteilt, die also ca. je ein Drittel ausmachen, sinkt der Anteil des Gletscherschmelzwassers bei Achleiten auf 2 %. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts werden sich die Anteile weiter reduzieren auf 17 bzw. 0,3%. (vgl. Escher-Vetter 2011:77-78)

Eine genauere Untersuchung zur Zusammensetzung des Wasserabflusses wurde von Schmieder et al. (2018:508-513) im Rofental im hinteren Ötztal vorgenommen. Das 98 km² große Einzugsgebiet der Rofenache ist zu ungefähr einem Drittel von Gletschern bedeckt und weist eindeutig die Charakteristika eines glazialen Regimes auf. Mit Hilfe tracerhydrologischer Methoden wurde der Anteil des Gletscherwassers an sechs ausgewählten Tagen während der Ablationsperiode quantifiziert. Die maximalen Gletscherabflussanteile beliefen sich bei dieser Analyse auf 75% des Gesamtabflusses zum Zeitpunkt Ende Juli. Die anhand dieser Stichproben gewonnenen Daten weisen darauf hin, dass der Schmelzwasserabfluss der Gletscher im Rofental einen bedeutenden Anteil ausmacht und bestätigen somit die Ergebnisse von Escher-Vetter aus dem Jahr 2011 an gleicher Stelle. Ein Ausbau dieser Analysen auf eine mehrjährige Zeitreihe für detaillierte Ergebnisse und eine bessere Vergleichbarkeit zu anderen Untersuchungsgebieten wird aktuell durchgeführt. (vgl. Schmieder et al. 2018:508-513)

Trotz des Gletscherrückgangs in den Alpen und der damit verbundenen Verschiebung der saisonalen Abflussmengen rechnet Escher-Vetter (2011:78) nicht damit, dass sich größere Probleme für die Trinkwasserversorgung im Alpenraum ergeben werden, da der Anteil des Schmelzwassers aus den Gletschern an den unteren Flussläufen im Vergleich zu den Niederschlägen in Form von Regen sehr gering ist. Wiesenegger (2019:72) zufolge wird das österreichische Eisvolumen mit Stand 2016 auf ca. 12,9km³ geschätzt. Das entspricht nur ungefähr 12% des jährlichen Niederschlags. Diese Größenordnung ist gesamtstaatlich gesehen zu gering, als dass abgesehen von kleinräumigen Ausnahmen ein relevanter Einfluss der Gletscher auf die Trinkwasserversorgung besteht.

Anders sieht die Situation jedoch in extrem ariden Regionen aus, in denen der Großteil des Trinkwassers aus den Gletschern stammt wie etwa in Zentralchina. Die schmelzenden Eismassen im

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Tianshan Gebirge sind beispielsweise hauptsächlich verantwortlich für die Wasserversorgung der Millionenstadt Urumchi. (vgl. Escher-Vetter 2011:78)

Als ein weiteres Beispiel können die tropischen Anden genannt werden. Ähnlich wie in den Alpen befinden sich auch hier die allermeisten Gletscher auf dem Rückzug. In einigen Ländern wie Bolivien, Peru oder Ecuador sind die Menschen allerdings auf deren Schmelzwasser angewiesen um die Wasserversorgung für die Landwirtschaft aber auch als Trinkwasser aufrecht zu erhalten. Die Gletscher nehmen in erster Linie eine Ausgleichsfunktion wahr, indem sie die Niederschläge während der Regenzeiten speichern und erst nach und nach wieder abgeben. Während der Trockenzeit stammen etwa 50% des Wassers des Rio Santa in Peru von den abschmelzenden Gletschern. Als besonders stark betroffene Gebiete werden die Millionenstädte Quito, Lima und La Paz genannt, da hier zusätzlich zu geringeren Abflussmengen steigende Bevölkerungszahlen verzeichnet werden. Letztendlich hängen die tatsächlichen Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf die Wasserversorgung von natürlichen und von sozio-ökonomischen Faktoren ab. Hauptkriterium ist jedoch nicht die Masse der Gletscher oder deren jährliche Schmelzraten, sondern der Umstand wie stark ein Gebiet vom Gletscherabfluss im Vergleich zu anderen Wasserquellen abhängig ist. (vgl. Kasang/Linsenmeier 2015:279-287)

Trotz teilweise sehr genauer Beobachtungen der Abflüsse aus stark vergletscherten Gebieten weisen Kaser et al. (2010:20223) auf die Problematik von unzureichenden Datensätzen für eine exakte Modellierung zukünftiger Veränderungen hin. Zwar lässt sich durch sinkende Schmelzwassermengen eine geringere Menge an verfügbarem Wasser weiter flussabwärts erwarten, das tatsächliche Ausmaß ist allerdings oft schwer zu prognostizieren. Grund dafür ist der Vergleich zweier Variablen, die von unterschiedlicher Natur sind. Das Gletscherschmelzwasser kann als Rohvolumeneintrag in das Abflusssystem angesehen werden, das Abflussvolumen weiter flussabwärts wurde jedoch stark beeinträchtigt von Verdunstung, Bewässerung, Niederschlag, oder den Austausch mit anderen unterirdischen Flusssystemen. Je größer die Entfernung zum Gletscher also wird, desto bedeutender werden all diese Einflussgrößen und der Anteil des Schmelzwassers nimmt ab. Bei einem Vergleich zwischen Gletscherschmelzwasser und dem Abflussvolumen weiter flussabwärts wird daher der Volumenbeitrag der Gletscher mit zunehmender Entfernung von den Gletschern standardmäßig überschätzt, während in der Regel gleichzeitig die Zahl der betroffenen Bevölkerung zunimmt.

Klar ist außerdem, dass der Schmelzwasserabfluss immer dann von größerer Bedeutung ist, wenn es warm und gleichzeitig trocken ist. Das betrifft etwa Regionen wie die Westseite der tropischen

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Anden oder innerkontinentale Gebiete in Asien. Sporadisch kann dies auch auf Europa zutreffen wie im extrem heißen Sommer im Jahr 2003. Grundsätzlich zeigte sich, dass der Beitrag der Gletscher zur Wasserverfügbarkeit in den Einzugsgebieten der mittleren Breiten mäßig ist, in Monsunklimazonen gering und in ariden Gebieten mitunter sehr groß. Größere Bedeutung wird in vielen Fällen den Abflüssen aus den saisonalen Schneedecken zugeschrieben, auf diese wird hier allerdings nicht näher eingegangen. Da für einige Teile der Welt kein vollständiges Gletscherinventar vorliegt sind zuverlässige Schätzungen außerdem nicht überall möglich. Für den Alpenraum wird infolge des Abschmelzens der Gletscher nur mit einem kleinen Rückgang der Menge des verfügbaren Wassers gerechnet, wobei die ökologischen Auswirkungen in der Natur aufgrund der veränderten saisonalen Abflüsse dennoch nicht zu vernachlässigen sind. (vgl. Kaser et al. 2010:20223-20226)

Eine Analyse der Abflussregime von Lebedzinski/Fürst (2018:483) hat zudem gezeigt, dass die pluvialen Einflüsse im Zeitraum 1961-2010 kontinuierlich zugenommen haben, auch in glazialen und nivalen Regimen. Daraus folgt eine Niederschlagszunahme in Form von Regen im Herbst und Winter, sowie ein Rückgang der Sommerabflüsse an der Alpensüdseite. Der Großteil der glazialen Regime wird sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in nivale umgewandelt haben. Die Abflussmaxima werden sich dadurch zwar um einige Wochen näher an den Jahresanfang schieben, die Speicherfunktion bleibt aber noch in gewisser Weise erhalten. Bedingt durch die klimatischen Veränderungen wird damit gerechnet, dass sich diese Entwicklungen weiter fortsetzen werden und durch einen stetigen Anstieg der Schneefallgrenze die Speicherfunktion der Niederschläge immer geringer ausfallen wird.

6.3. Gefahr durch Felsstürze

Neben sich verändernden Abflussmengen infolge des Abschmelzens der Gletscher stellt sich auch die Frage, ob ebenso eine gewisse Destabilisierung der Alpen durch deren Rückzug erwartet werden kann und welche Gefahren sich daraus ergeben. Um diesbezüglich eine Antwort zu finden, wurde folgende Forschungshypothese (H5) aufgestellt: *Durch den Gletscherrückzug werden Felsstürze im Hochgebirge begünstigt.*

Im Zuge eines ARGE Alps Projektes wurden einige Felssturzereignisse in den Schweizer Alpen der letzten Jahre genauer untersucht, um die Gründe für deren Auftreten zu erfahren. Zusätzlich wurde unter Berücksichtigung historischer und aktueller Daten für den Zeitraum 1714-2017 eine

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Felssturzdatenbank für das gesamte Alpengebiet angelegt, mit dessen Hilfe räumliche und zeitliche Muster erkannt werden sollen. Die Auswertung dieser Daten kommt zu dem Ergebnis, dass größere Felssturzereignisse in allen Höhenlagen und über das Jahr verteilt auftreten können. Eine Häufung von kleineren Felssturzereignissen (bis 100.000m³) wurde jedoch in der zweiten Jahreshälfte in einer Höhe von ca. 3000m verzeichnet. Außerdem konnte eine Zunahme in überdurchschnittlich warmen Sommern, sowie generell über die Zeitreihe hinweg beobachtet werden. (vgl. Kenner/Philips 2017:16-29)

Als Haupteinflussfaktoren für das Auftreten von Felsstürzen werden von Kenner/Philips 2017:18-29) neben der strukturellen Prädisposition der Felsmassen, dem kryostatischen Druck, Veränderungen des Permafrostes, Starkniederschlägen, Erdbeben und thermomechanischen Prozessen auch die Vergletscherung genannt. Die Auswirkungen von letzterer sollen nun näher beschrieben werden.

Die Gletschermassen bilden in vielen Fällen gewissermaßen eine schützende und stabilisierende Schicht für das darunterliegende Gestein. Einerseits bewirken sie eine thermische Isolation, die größere saisonale Temperaturschwankungen verhindert. Unterhalb des Gletschers wurden konstante Temperaturen um die 0°C gemessen, sodass sich in einigen Fällen auch Permafrost bilden kann, die Felsoberfläche sozusagen versiegelt wird und Niederschlag und Schmelzwasser kaum bis gar nicht mehr in die Felswand eindringen können. Andererseits ergibt sich durch das enorme Gewicht der Eismassen auch eine stützende Funktion, die die Möglichkeit für Bewegungsprozesse des Gesteins einschränkt. Der daraus resultierende große Druck kann aber auch eine Zermürbung des Felsens bewirken, vor allem dann, wenn ein stetiger Wechsel aus Ver- und Entgletscherung besteht. Verstärkt wird dieser Vorgang noch zusätzlich, wenn der Gletscher in Bewegung und nicht am Felsen angefroren ist, da in diesen Fällen normale glaziale Erosionsprozesse stattfinden und so die Form von Felswänden über einen längeren Zeitraum hinweg stark verändert werden kann. Oftmals führt das dazu, dass der Fuß von Felswänden versteilt und somit dessen Basis geschwächt wird. Kommt es nun zu einem Rückzug oder gänzlichen Verschwinden eines Gletschers, bleiben diese angegriffenen Felswände zurück und sind dementsprechend anfällig für das Auftreten von Felssturzereignissen. Durch das Fehlen der schützenden und gleichzeitig stützenden Funktion der Gletscher kommen nun lange Zeit nicht nur konservierte, sondern auch noch zusätzlich verstärkte Instabilitäten zu Tage, die der Witterung schutzlos ausgesetzt sind. Nach dem Auftauen des Bodens kann das Wasser in das Gestein eindringen und dieses durch die Frostwechselzyklen porös machen. (vgl. Kenner/Philips 2017:21)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Der Einfluss der Vergletscherung auf das Auftreten von Felssturzereignissen zeigt sich Kenner/Philips (2017:25) zufolge auch in den erhobenen Zahlen. Seit 2006 fanden ca. 40% aller erfassten Felsstürze in der Felssturzdatenbank in einer Entfernung von maximal 100m zu Gletschern statt, obwohl die Gletscherfläche nur einen geringen Teil (15%) an der Gesamtfläche (Gebiet über 2500m mit einer Hangneigung von mindestens 40°) ausmacht. Diese markante Häufung erklären sich die Autoren mit dem Rückzug der Gletscher, welche vor einigen Jahrzehnten den Großteil dieser 100m breiten Pufferzonen noch bedeckten.

Kenner/Philips (2017:5-7) weisen allerdings auch darauf hin, dass meist ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren verantwortlich ist für das Auftreten von Felssturzereignissen, wie das Beispiel des Piz Kesch im Kanton Graubünden aus dem Jahr 2014 zeigt. Durch Untersuchungen des Eises konnte ermittelt werden, dass jene Kluft, infolge derer schlussendlich der Felssturz ausgelöst wurde, bereits seit über 6000 Jahren vorhanden ist. Während dieser Zeit gab es sowohl Phasen der Vergletscherung, als auch Phasen der Ausaperung, sodass durch die Belastungen des Gletschereises die Felsbrücken im Kluftsystem geschwächt wurden und immer wieder Wasser in das Gestein eindringen konnte, wodurch Frostprozesse die Kluftfläche kontinuierlich vergrößerten.

Welche Faktoren letztendlich entscheidend sind, hängt aber hauptsächlich von den externen und internen Bedingungen in einem Gebiet ab, das heißt von Klima und Exposition, aber auch von der geologischen Struktur des Gesteins. (vgl. Kenner/Philips 2017:26)

Die potentielle Gefahr von Gletscherseen wurde bereits in Kapitel 6.1. angeführt. In Verbindung mit einer zunehmenden Zahl von Felssturzereignissen könnte sich diese noch weiter erhöhen. Zusätzlich zum Brechen von Barrieren, Gletscherdämmen oder Eistrümmerdämmen werden als wahrscheinlichste Ursache für Ausbrüche vor allem Felsstürze genannt. (vgl. Haeberli et al 2012:96; Job et al. 2011:13)

7. Diskussion

Ziel dieses Kapitels ist es nun, die vorliegenden Ergebnisse zur Entwicklung der Gletscher und zu den Auswirkungen von deren Abschmelzen in Bezug auf die aufgestellten Forschungsfragen und Hypothesen zu diskutieren.

Zunächst soll dabei die Forschungsfrage F1: „*Durch welche Faktoren wird die Entwicklung der Gletscher in den Alpen maßgeblich beeinflusst?*“ beantwortet werden. Seit dem Ende der letzten Kleinen Eiszeit im Jahr 1850 verzeichnen so gut wie alle Alpengletscher starke Massenverluste, unterbrochen nur von zwei kurzen Vorstoßperioden zwischen 1915 und 1925 und zwischen 1971 und 1985. Auffallend ist, dass während dieser kurzen Phasen die Sommertemperaturen (Mai-September) im Alpenraum (Mittel aus den Messtationen Sonnblick, Zugspitze und Säntis) unter dem langjährigen Durchschnitt (1901-2000) lagen, sodass bis zu 75 % der in Österreich vermessenen Gletscher eine positive Massenbilanz aufwiesen. (vgl. Patzelt 2018:9-13) Ansonsten wurde im gleichen Zeitraum hingegen ein mittlerer Temperaturanstieg von 2°C gemessen. (vgl. Buckel et al. 2018:49)

Die Sommertemperaturen spielen also eine gewichtige Rolle für die Entwicklung der Gletscher, weil höhere Temperaturen gleichzeitig zu einem Anstieg der Schneefallgrenze führen. Niederschlag in Form von Schnee wird im Sommer also zunehmend seltener und eine schützende weiße Schneedecke mit hohen Albedo Werten bleibt folglich aus. Die zweite wichtige Einflussgröße bilden die Niederschläge im Winter. Diese haben sich jedoch bisher nicht signifikant durch die Klimaerwärmung verändert. Beispielhaft gezeigt wird dieser Umstand auch durch den angeführten Vergleich der Massenbilanzjahre 1977 und 2003 am Vernagtferner. Trotz gleicher Niederschlagswerte kam in der Massenbilanz am Ende des hydrologischen Jahres ein enormer Unterschied infolge von überdurchschnittlich hohen Sommertemperaturen im Jahr 2003 zustande. (vgl. Mayer et al. 2013:228-230)

Zusammenfassend kann deshalb geschlossen werden, dass sich die bisherigen Veränderungen in der Massenbilanz der alpinen Gletscher seit der letzten Kleinen Eiszeit hauptsächlich auf steigende Temperaturen im Sommer zurückführen lassen. Die Hypothese H1: „Steigende Temperaturen sind hauptverantwortlich für das verstärkte Schmelzen der alpinen Gletscher seit der letzten Kleinen Eiszeit.“, kann demzufolge bestätigt werden. Diese Schlussfolgerung wird auch von Buckel et al. (2018:49) und Escher-Vetter (2011:75) gestützt, die ebenfalls zu dem Ergebnis kommen, dass der beobachtete Eisverlust der Alpen hauptsächlich auf die anhaltende und überdurchschnittlich hohe

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Temperaturerwärmung zurückzuführen ist, während in Bezug auf die Niederschlagsänderungen nur eine schwache Korrelation feststellbar war. Es ist allerdings anzunehmen, dass ein bisher noch nicht verzeichneter Niederschlagsrückgang in den Wintermonaten ebenso einen stark negativen Einfluss auf die Entwicklung der Massenbilanz hätte, da in diesem Fall der Schneenachschub während der Akkumulationsperiode sinken würde.

Außerdem stellt sich angesichts der großen Eingriffe, die vom Menschen in der Natur der Berge vorgenommen werden, stets die Frage, inwieweit dadurch gleichsam die Entwicklung der Gletscher beeinflusst wird. Diese soll für die zwei in dieser Arbeit behandelten Bereiche Wasserkraftwerke und Gletscherskigebiete beantwortet werden.

Wie sich gezeigt hat, übt die Errichtung von teils sehr hohen Talsperren und Speicherseen mitsamt der dazugehörigen Infrastruktur zweifellos einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Umwelt in den hochalpinen Gebieten aus. In erster Linie geschieht dies durch Veränderungen der Abflussregime. Während die natürlichen Abflussspitzen in der Ablationsperiode aufgefangen und somit verringert werden, wird die Abflussmenge in den Wintermonaten erhöht. (vgl. Job et al. 2011:14-15) Daraus ergeben sich nicht nur nachteilige Effekte, denn mit Hilfe der großen Speicherseen könnte in Zukunft die Speicherfunktion der Gletscher teilweise kompensiert werden, nicht zuletzt durch das Entstehen von neuen Gletscherseen. (vgl. Haeberli et al 2012:94)

Größere Eingriffe stellen jene Anlagen dar, bei denen die Abflüsse über Wasserscheiden hinweg von einem Tal in ein anderes umgeleitet werden wie vom Margaritzensee in den Mooserboden (vgl. Kobau et al. 2011:24) oder wie es am Rhône-gletscher beim Bau einer Staumauer vorgesehen ist, wo Wasser aus dem Rhônegebiet in das Rheingebiet übergeleitet wird. (vgl. Haeberli 2012:100) Das Beispiel Kaprun zeigt außerdem das Potential von alpinen Talsperren als Anziehungspunkt für TouristInnen, wodurch eine deutlich größere Anzahl an Menschen in diesem Gebiet anzutreffen ist als ohne Staumauer. Auch dieser Umstand lässt Veränderungen für den Lebensraum von Pflanzen und Tieren vermuten, wenngleich im Rahmen dieser Arbeit hierzu keine Untersuchungen angestellt wurden.

Trotz all dieser teils größeren Beeinflussungen der alpinen Bergwelt durch den Menschen konnten keine Hinweise dafür gefunden werden, dass sich die Nutzung des Schmelzwassers zur Energieerzeugung auf die Entwicklung der Gletscher in irgendeiner Form positiv oder negativ auswirken würde.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Bei der Nutzung als Skigebiet ergibt sich naturgemäß ein deutlich direkterer Kontakt zum Gletscher, weshalb eine dadurch bedingte Einflussnahme auch naheliegender ist, als bei der Wasserkraft. Diese lässt sich allerdings nicht in einem Satz zusammenfassen, denn Schmude/Berghammer (2015:290) zufolge spielen hierbei mehrere Faktoren eine Rolle. Die Erschließung und der Betrieb von Gletscherskigebieten bringen demnach sowohl positive als auch negative Folgen mit sich. In ökonomischer Hinsicht gelingt es durch die hohe Schneesicherheit die Saison im Frühjahr und im Herbst zu verlängern. Dadurch können zusätzliche Übernachtungen erzielt und Arbeitsplätze in ansonsten oft abgeschiedenen Regionen geschaffen werden. Beeinflusst werden zudem auch ökologische Aspekte wie die Entwicklung der Massenbilanz der Gletscher und zwar in zweierlei Hinsicht. Einerseits führt die Verdichtung in Folge der Pistenpräparierung zu einer verbesserten Wärmeableitung und damit zu einer positiven Veränderung des Massenhaushalts, während andererseits die zunehmende Verschmutzung des Gletschereises, verursacht durch Entsorgungsprobleme von Abwässern und Müll oder durch den Eintrag von Öl von den Pistengeräten und damit verbunden eine erhöhte Strahlungsabsorption, eine negative Entwicklung bewirkt. Hinzu kommt, dass es für die Erschließung der Skigebiete oft notwendig ist, neue Straßen bis in große Höhen zu errichten, die die bis dahin unberührte Natur durchschneiden.

Die aufgestellte Hypothese H2: „Eingriffe des Menschen in die Gletscherwelt der Alpen zur wirtschaftlichen Nutzung können sich negativ auf die Massenbilanz auswirken.“, kann somit zwar nicht vollkommen abgelehnt werden, größere und ausgedehnte Folgen haben sich allerdings ebenso nicht gezeigt. Gletscherskigebiete stellen zweifelsohne einen weitreichenden Eingriff in die alpine Bergwelt dar, der wie beschrieben auch zu negativen Massenbilanzentwicklungen beitragen kann.

In Anbetracht der ca. 5000 Alpengletscher wirkt die Anzahl von 29 in Betrieb befindlichen Gletscherskigebieten mit weniger als 50 betroffenen Gletschern relativ gering und dementsprechend kann hier auch maximal von kleinräumigen Auswirkungen gesprochen werden, deren genaues Ausmaß jedoch erst in weiterführenden Untersuchungen zu ermitteln ist. (vgl. Schmude/Berghammer 2015:290)

Anhand dieser Erkenntnisse ergibt sich nun folgende Antwort auf die Forschungsfrage F1. Die Hauptfaktoren für die Entwicklung der Gletscher sind zum einen die jährlichen Niederschlagsverhältnisse und zum anderen die Temperaturen während der Abschmelzperiode. (vgl. Patzelt 2018:14) Da sich erstere seit Beginn der Aufzeichnungen kaum verändert haben, die Temperaturen jedoch stark gestiegen sind, ist der anhaltende Gletscherrückzug auf zweiteres zurückzuführen. Der direkte Einfluss des Menschen auf die Gletscher infolge wirtschaftlicher

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Nutzung ist in vielen Fällen noch nicht ausreichend untersucht und bedarf für eine detailliertere Analyse einer umfassenderen Datenlage. Gerade deshalb aber, weil hierzu noch viele Unsicherheiten bestehen, erschwert dadurch, dass Gletscher oft erst zeitverzögert auf Eingriffe reagieren, ist es umso wichtiger, von vornherein Schutzmaßnahmen wie die Errichtung von Naturschutzgebieten zu ergreifen, damit der direkte Einfluss des Menschen auf die Gletscher, wie es beispielsweise durch Skigebiete geschieht, in einem überschaubaren Rahmen bleibt.

Zum anderen wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen des Gletscherrückgangs beschrieben, um die Forschungsfrage F2: „*Welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen resultieren aus dem zunehmenden und andauernden Abschmelzen der Gletscher in den Alpen?*“ zu beantworten. Wie sich gezeigt hat, ergeben sich durch das Schmelzen der Gletscher Veränderungen in den Abflussregimen und damit verbunden auch für die zur Verfügung stehenden Wasserressourcen. (vgl. Weingartner et al. 2013:239)

In erster Linie handelt es sich dabei um eine Verschiebung vom Sommer in den Winter. Da Niederschlag häufiger in Form von Regen fällt anstatt in Form von Schnee, fließt dieser direkt ab ohne zwischengespeichert zu werden. (vgl. Job et al. 2011:14-15) Bei den glazialen Abflussregimen hingegen wird aufgrund von vermehrtem Gletscherschmelzwasser auch ein Anstieg der Jahresabflussmengen verzeichnet. Dieser Trend wird Haeberli et al. (2012:97) zufolge seit etwa 40 Jahren beobachtet, wobei davon auszugehen ist, dass er abhängig von der kleinräumigen geographischen Situation und vor allem von der Größe der jeweiligen Gletscher noch ca. bis Mitte des 21. Jahrhunderts anhalten wird, bevor die Eismassen weitgehend abgeschmolzen sind und eine starke Abnahme der Abflussmengen aus den glazialen Regimen erwartet wird. Dieser prognostizierte Rückgang wird von Farinotti et al. (2011:27) so gut wie ausschließlich auf das Verschwinden des Gletschereises zurückgeführt und nicht auf Veränderungen der Jahresniederschläge.

Die Ressource Wasser wird nicht nur zum Trinken, im Haushalt oder in der Landwirtschaft gebraucht, gerade im Alpenraum nimmt sie auch einen bedeutenden Platz in der Energieerzeugung ein, wie die 1019 in Betrieb befindlichen Wasserkraftwerke zeigen. Auf die 59% davon, welche als Laufkraftwerke errichtet wurden, hat der Rückgang des Gletscherabflusses keinen signifikanten Einfluss, da sich diese in der Regel weiter flussabwärts befinden und die vergletscherte Fläche in deren Einzugsgebiet somit sehr gering ist. (vgl. Römer et al. 2017:98-107)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Viele der großen (Pump-)Speicherkraftwerke wurden hingegen in inneralpinen Tälern errichtet und befinden sich teilweise sogar in unmittelbarer Nähe zu den Gletscherzungen. Die Zuflüsse aus den Gletschern haben hier demnach eine ungleich höhere Bedeutung. Mittel- und langfristige Veränderungen der verfügbaren Wasserressourcen werden also genau beobachtet, da sie die Voraussetzung für eine effiziente Nutzung sind. (vgl. Job et al. 2011:14-15) Aktuell bewirken die stark schmelzenden Eismassen noch erhöhte Energieproduktionsraten verglichen mit dem langjährigen Mittel. (vgl. Finger/Sarbach 2012:107) In der Schweiz sind gegenwärtig 3,1%-4% der Jahresstromproduktion aus Wasserkraft auf das Gletscherschmelzwasser zurückzuführen. Der Anteil nimmt jedoch stark ab und bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird mit einer Reduktion des heutigen Produktionsniveaus von etwa 1,0 TWh pro Jahr gerechnet. (vgl. Schaepli et al. 2019:626)

Generell lässt sich die Frage, wie sehr sich diese Entwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ins Gegenteil umkehren wird, aber nicht so leicht pauschal beantworten. Der jeweilige Typ des Kraftwerks, dessen individuelle Auslegung und vor allem der Grad der Vergletscherung im Einzugsgebiet sind hierbei zu beachten. (vgl. Weingartner et al. 2013:245) Dass jedoch einige alpine Regionen mitunter stark betroffen sein werden zeigt sich in Abbildung 14.

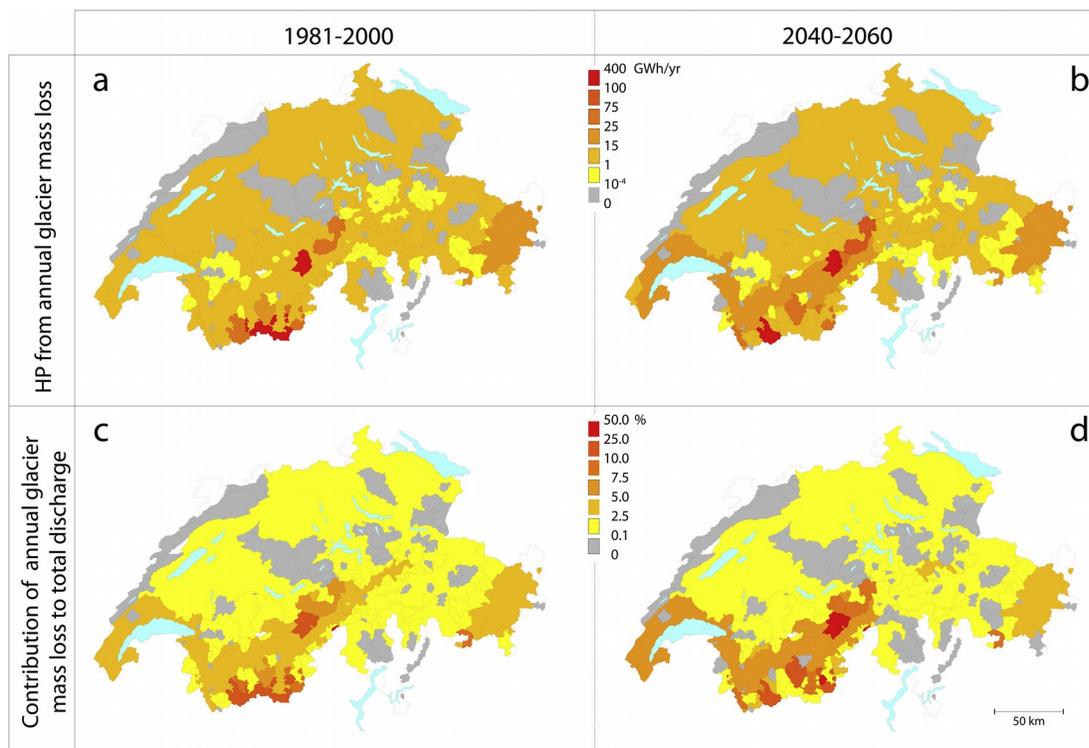


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Wasserkrafterzeugung aus dem Gletschermassenverlust – Quelle: Schaepli et al. 2019:624

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Wie in dieser Darstellung zu sehen ist, haben Schaepli et al. (2019:624) versucht zu berechnen, welchen Anteil der Gletscherabfluss je Region am Gesamtabfluss ausmacht (c und d) und wie viel Strom durch diesen Abfluss erzeugt werden kann (a und b). Da viele Regionen kaum von den Veränderungen betroffen sind, wurde hier eine ungleichmäßige Intervalleinteilung gewählt, um kleine Unterschiede dennoch abzubilden. Es ist ersichtlich, dass hauptsächlich die alpinen Gebiete vom Gletscherschmelzwasser beeinflusst werden. Bei Vergleich der angeführten Zeiträume 1981-2000 zeigt sich, dass während in einigen Teilen der Schweiz bis 2040-2060 bereits Rückgänge in Bezug auf den Abfluss und infolgedessen auch in der Stromproduktion zu erwarten sind, im Einzugsgebiet der Rhône die größten Gletschermassen diese Entwicklung noch etwas länger hinauszögern können.

Für den Zeitraum 2070-2099 wird im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 vor allem in den hoch gelegenen glazialen Regimen wie im südlichen Wallis mit stark negativen Entwicklungen gerechnet. An den Kraftwerken Mauvoisin, Mattmark und Gorner wird beispielsweise ein jährliches Minus der Energieproduktion von 33-36% erwartet. (vgl. Schaepli et al. 2007:1203), (vgl. Finger/Sarbach 2012:109-110) Hochgerechnet auf die gesamte Schweiz ergibt sich ebenfalls ein leichter Rückgang der Stromproduktion, wenngleich Weingartner et al. (2013:239-247) diesbezüglich anmerkten, dass diese Prognosen noch unsicher sind.

Die aufgestellte Hypothese H3: „Je weniger Gletscherschmelzwasser vorhanden ist, desto geringer ist die Energieproduktion durch Wasserkraft im Alpenraum.“ konnte demnach verifiziert werden. Ein totaler Einbruch der Stromproduktion aus Wasserkraft ist dennoch nicht zu erwarten, da sich die Auswirkungen des Verschwindens der Gletscher hauptsächlich auf Veränderungen der Abflussmengen in den glazialen Regimen beschränken. Durch neuartige, verbesserte Technologien und eine energiewirtschaftliche Nutzung der sich neu bildenden Gletscherseen ist anzunehmen, dass die Defizite infolge geringerer Abflüsse in vielen Fällen ausgeglichen werden können. (vgl. Haeberli et al 2012:98)

In jedem Fall wird sich die Bedeutung von Pumpspeicherkraftwerken auch in Zukunft nicht verringern, da es neben der Verlagerung der Niederschlagswässer vom Sommer in den Winter auch immer wichtiger wird, durch die Zunahme von erneuerbaren Energien die Energieüberschüsse aus Wind- und Solarkraftwerken zwischenzeitlich zu speichern, um sie bei Nachfragespitzen wieder abzugeben. (vgl. Kirchlechner 2011:18), (vgl. Römer et al. 2017:109)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Sich verändernde Abflussmengen können sich ebenso auf die Trinkwasserversorgung auswirken. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden sich viele glaziale Regime in nivale oder pluviale umgewandelt haben, mit der Konsequenz, dass der Niederschlag vermehrt in Form von Regen fällt und weniger lang oder gar nicht zwischengespeichert wird. (vgl. Lebedzinski/Fürst 2018:483)

Kaser et al. (2010:20223-20226) gehen für den Alpenraum infolge des Abschmelzens der Gletscher allerdings nur von einem kleinen Rückgang der Menge des verfügbaren Wassers aus. Die damit verbundenen ökologischen Auswirkungen für die Natur sollten zwar nicht vernachlässigt werden, mit Ausnahme von einzelnen hochalpinen Schutzhütten und Almen ist aber nicht mit Problemen in der Trinkwasserversorgung zu rechnen.

Die aufgestellte Forschungshypothese H4: *„Sinkende Gletscherschmelzwassermengen können einen Mangel in der Trinkwasserversorgung im Alpenraum verursachen.“* lässt sich nach aktuellem Stand der Daten deshalb nicht verifizieren. Es ist davon auszugehen, dass der geringe Anteil des Schmelzwassers der Gletscher an den Gesamtabflussmengen einerseits und die ausreichenden Niederschläge in Form von Regen über das ganze Jahr hinweg andererseits dazu führen, dass keine nennenswerte Beeinträchtigung der Wasserversorgung für den Alpenraum zu erwarten ist, auch wenn mit Verschiebungen der Abflussmaxima gerechnet werden muss. Gleichzeitig bleibt allerdings anzumerken, dass hier weitergehende Untersuchungen anzustellen sind in Bezug auf den Einfluss von potentiell geringeren Schneemengen im Laufe der kommenden Jahrzehnte. Nivale Abflussregime sind in den Alpen deutlich weiter verbreitet als glaziale, weshalb die Vermutung naheliegt, dass eine Verschiebung eben dieser hin zu pluvialen Regimen, aufgrund der fehlenden Zwischenspeicherung des Niederschlags, die Abflüsse in den (Früh-)Sommermonaten noch weiter reduzieren könnte.

Abseits des Einflusses auf die Abflussmengen üben die Gletscher in den Hochgebirgen auch eine gewisse stabilisierende Funktion auf das Gestein aus. Infolge des starken Gletscherrückgangs kann diese jedoch vielerorts nicht mehr erfüllt werden, wodurch sich eine potentiell höhere Anfälligkeit für Felssturzereignisse ergibt und andererseits in Kombination mit den sich neu bildenden Gletscherseen auch deren Folgen deutlich dramatischer ausfallen könnten. (vgl. Kenner/Philips 2017:21) Abhängig von der Lage und Nähe der Gletscherseen zu steilen Bergflanken, die wegen des zurückweichenden Eises zunehmend instabiler werden, steigt das Risiko für Felssturzereignisse mit großflächigen Überschwemmungen als Konsequenz. Bisher ist die Wahrscheinlichkeit für derartige Vorfälle noch gering, mit der Bildung von immer neuen Seen infolge der sich zurückziehenden

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Gletscher steigt diese jedoch an und wird über Jahrzehnte hinweg bestehen bleiben. (vgl. Haeberli et al 2012:96; Job et al. 2011:13)

Anhand dieser Erkenntnisse kann die aufgestellte Forschungshypothese H5: „Durch den Gletscherrückzug werden Felsstürze im Hochgebirge begünstigt.“ durchaus bestätigt werden. Zwar sind im Regelfall mehrere Faktoren für das Auftreten von Felsstürzen verantwortlich, die Vergletscherung spielt dabei aber eine entscheidende Rolle. Nicht nur, dass nach dem Abschmelzen die schützende Eisschicht fehlt, diese hat zuvor zusätzlich dazu beigetragen, das Gestein zu schwächen und die Wahrscheinlichkeit für Felsstürze somit erhöht.

In Bezug auf die Forschungsfrage F2 kann nun festgehalten werden, dass das Abschmelzen der Gletscher in allen drei untersuchten Bereichen Veränderungen mit sich bringt. Deren Intensität ist gleichwohl stets abhängig von anderen Faktoren, die auf regionaler Ebene verstärkend oder abschwächend wirken. Während die Trinkwasserversorgung im Alpenraum auch ohne Gletscher gesichert ist, werden einzelne alpine Speicherkraftwerke größere Produktionseinbußen zu erwarten haben. Inwieweit begleitende Entwicklungen wie die Gletscherseen diese ausgleichen können wird sich zeigen. (vgl. Haeberli et al 2012:100) In einigen Fällen werden bauliche Maßnahmen jedenfalls notwendig, da ansonsten die Sicherheit der Bevölkerung durch Felssturzereignisse und deren Folgen gefährdet ist.

8. Résumé

Neben dem Grundwasser und den Seen stellen die Gletscher das größte Wasserreservoir in den Alpen dar. Ebenso bilden die Schmelzwassermengen in vielen Gebieten einen wesentlichen Anteil des Gesamtabflusses, vor allem in den Sommermonaten, wenn dank ihnen in niederschlagsarmen Perioden ein Minimalabfluss bestehen bleibt. (vgl. Ayala et al. 2020:II) Die zu erwartenden Veränderungen, welche mit dem weitgehenden Abschmelzen der Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einhergehen, sollten deshalb in dieser Arbeit aufgezeigt werden.

Die angeführten Beispiele stammen meist aus der Schweiz und aus Österreich, da hier die Alpen einen großen Teil der Landesfläche ausmachen und dementsprechend auch die Datenlage und das Interesse in diesen Staaten zur Erforschung der Auswirkungen des Gletscherrückgangs besonders hoch ist. Die beobachteten Trends lassen sich allerdings, wie der Fachliteratur zu entnehmen ist, auf den gesamten Alpenraum übertragen, selbstverständlich stets vor dem Hintergrund, dass lokale Einflussgrößen miteinbezogen werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich nun sagen, dass sich die Alpengletscher, bedingt durch die globale Klimaerwärmung, seit einigen Jahrzehnten stark zurückziehen. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf Landschaften, Hydrologie und Ökosystem sind mitunter erheblich. Durch den Rückzug der Eismassen geht einerseits deren stabilisierende Funktion für das darunterliegende Gestein verloren und andererseits die Funktion als Wasserspeicher. Das letztendliche Ausmaß dieser Auswirkungen hängt zunächst einmal vom aktuellen Grad der Vergletscherung ab. Je kleiner das vergletscherte Gebiet ist, desto geringer ist auch der Einfluss auf die Abflussmengen. Das zeigt sich ganz klar durch Messungen an verschiedenen Flussabschnitten. Je weiter flussabwärts diese vorgenommen werden, umso geringer ist der Anteil des Gletscherschmelzwassers.

Um die tatsächlichen Auswirkungen zu überblicken, gilt es jedoch, eine Vielzahl an weiteren Faktoren zu beachten, die mildernd oder verstärkend wirken können. Alpine Stauseen haben beispielsweise das Potential, die Speicherfunktion teilweise zu übernehmen und somit die Folgen abzuschwächen. Ebenso entscheidend ist die Entwicklung der Jahresniederschlagsmengen. Ein Minus vor allem in den Sommermonaten könnte die Auswirkungen durch das Fehlen des Gletscherschmelzwassers noch zusätzlich verstärken.

Trotz dieser großflächig übereinstimmenden Trends ist eine detaillierte Prognose für bestimmte Einzugsgebiete noch immer mit vielen Unsicherheiten behaftet. Die Gründe dafür sind vielseitig.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Einerseits bereitet das Verständnis von glaziologischen Prozessen bis heute Schwierigkeiten, sodass es bei Modellrechnungen zwangsläufig zu Ungenauigkeiten kommt. In Hinblick auf Auswirkungen von Gletscherseen, Rückkopplungen zwischen hydrologischen Prozessen und dem Eis oder langfristige Folgen der Schuttbedeckung auf den Gletschern sind etwa noch weitere Untersuchungen notwendig. Außerdem stellt die genaue Quantifizierung des derzeitigen Gletschereisvolumens ein Problem dar, dem nur mit großem Aufwand entgegengetreten werden kann. Andererseits steht die zukünftige Entwicklung der Gletscher in Verbindung mit jener des Klimas. Die Klimaerwärmung tritt nicht überall auf der Welt in gleichem Maße auf. Manche Regionen wie die Alpen sind etwa stärker betroffen als andere und auch das tatsächliche Ausmaß der weltweiten Emissionen ist im Vorhinein noch unbekannt. In all jenen Bereichen, in denen die Gletscher direkt oder indirekt genutzt werden, sollten also die Strategien soweit angepasst werden, dass sie auf die sich verändernden Gegebenheiten abgestimmt sind. (vgl. Ayala et al. 2020:II)

9. Perspektiven

Es ist unbestritten, dass die Alpengletscher unter den aktuellen klimatischen Bedingungen immer weiter abschmelzen werden und auch wenn wie beschrieben noch einige Unklarheiten bestehen, so zeigt sich dennoch ein immer klareres Bild von den Auswirkungen des Gletscherrückzugs. Mehr und mehr Studien widmen ihre Aufmerksamkeit diesem Thema und können so durch eine Vielzahl an Untersuchungen und Modellierungen Prognosen sowohl für die nahe, als auch für die fernere Zukunft abgeben.

Vor allem in Bezug auf die langfristigen Entwicklungen der alpinen Eismassen wird noch von Unsicherheiten zwischen 20 und 30% ausgegangen, hauptsächlich begründet durch die im Detail unbekannt zukünftigen Klimaveränderungen. Die aktuell laufenden Schweizer Projekte CH2018 und SCCER-SoE sollen dabei helfen, hier für weitere Klarheit zu sorgen. (vgl. Ayala et al. 2020:12) Von Vorteil sind außerdem die langen Messreihen in den Schweizer und in den österreichischen Alpen, die durch die detaillierten Aufzeichnungen zum Schließen von Wissenslücken in der Kryosphärenforschung beitragen. (vgl. Ayala et al. 2020:25)

In jedem Fall ist davon auszugehen, dass bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Gletscher so weit abgeschmolzen sein werden, dass Auswirkungen auf die Landschaft, die hydrologischen Regime, die Wasserressourcen und die Infrastruktur die Folge sein werden. Begrenzt werden diese nicht nur auf die alpinen Regionen sein, sondern sich auch auf flussabwärts gelegene Gebiete erstrecken, wodurch das Potential für sozio-ökonomische Probleme gegeben ist. Das Erscheinungsbild der Alpen wird sich verändert haben. In unteren und mittleren Höhenlagen werden die Gletscher ganz verschwunden sein und in größeren Höhen sind enorme Massenverluste zu erwarten. (vgl. Beniston et al. (2018:759-760)

Um ein besseres Verständnis für das Ausmaß und den Zeithorizont dieser Entwicklungen zu bekommen, gilt es in Form von interdisziplinären Projekten die Erkenntnisse aus der Gletscherforschung mit jenen aus anderen Natur- und Sozialwissenschaften zusammenzuführen zur Entwicklung von Strategien, wie das Wasser aus vergletscherten Einzugsgebieten langfristig bewirtschaftet werden kann. Dabei müssen sowohl Veränderungen in Bezug auf die jährliche Gesamtwasserfügbarkeit wie auch auf die saisonalen Abflussmengen beachtet werden. All diese Strategien werden allerdings mit einem gewissen Grad an Unsicherheit klarkommen müssen. (vgl. Ayala et al. 2020:26-28)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Vor diesem Hintergrund scheint es umso wichtiger, Maßnahmen zu ergreifen, die die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Gletscher so gering als möglich halten. Zu oberst steht hier die Ausweitung von Schutzgebieten, damit dieser Prozess durch Eingriffe des Menschen nicht noch zusätzlich beschleunigt wird. (Bütler 2007:24)

Eine andere Möglichkeit stellen aktive Maßnahmen dar, die das Abschmelzen verlangsamen sollen. Zu nennen ist dabei beispielsweise die künstliche Beschneigung mit Hilfe von Schneekanonen, um eine schützende Schneeschicht für den Gletscher während der Ablationsperiode zu schaffen oder das Abdecken der Gletscherzungen mit Planen und riesigen Stoffbahnen wie es etwa am Rhône-gletscher jedes Jahr durchgeführt wird. Ziel dabei ist es, höhere Albedowerte zu erreichen, da die Abdeckung weißer ist als die meist verunreinigte Gletscheroberfläche. Gleichzeitig stellt es aber auch einen enormen Arbeitsaufwand dar, der wohl kaum für mehr als einzelne wenige Gletscher zu bewerkstelligen ist. Zum Ausmaß der Wirksamkeit dieser Maßnahmen gibt es bisher außerdem nur wenige Daten. Die Frage, inwiefern der Nutzen und die damit verbundenen Kosten und der Aufwand in Relation zu einander stehen, bleibt deshalb noch unbeantwortet. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wären also zweifellos notwendig, um hierzu konkrete Aussagen treffen zu können.

10. Bibliographie

Alean, J. (2010): Gletscher der Alpen. Bern: Haupt Verlag.

Ayala, A., Farinotti, D., Stoffel, M., Huss, M. (2020): Glaciers. Hydro-CH 2018 synthesis report chapters: “future changes in hydrology“.

Bässler, R. (2014): Grundlagen für wissenschaftliches Arbeiten. Leitfaden für akademische Abschlussarbeiten mit einer Einführung in die Textanalyse. - Horn: RB Research & Consulting Verlag.

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacona, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J. I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzago, S., Vincent, C. (2018): The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. In: The Cryosphere, 12, S. 759–794.

Buckel, J., Otto, J.C., Prasicek, G., Keuschnig, M. (2018): Glacial lakes in Austria - Distribution and formation since the Little Ice Age. In: Global and Planetary Change 164, S. 39-51. rismus(BMNT) (Hrsg.) (2018): Energie in Österreich 2018. Zahlen Daten Fakten. Wien.

Bütler, M. (2007): Glaciers – Objects of Law and International Treaties. In: Psenner, R., Lackner, R., (Hrsg.): The Water Balance of the Alps. What do we need to protect the water resources of the Alps?. Innsbruck: innsbruck university press S. 19.-31.

Deutscher Alpenverein (DAV) (Hrsg.) (o. J.): Mega-Projekt Zusammenschluss Pitztal Ötztal. Online unter: https://www.alpenverein.de/natur/alpine-raumordnung/aktuelle-erschliessungen/skierschliessungen-mega-projekt-zusammenschluss-pitztal-oetztal_aid_16516.html (4.5.2020)

Escher-Vetter, H. (2011): Gebirgsgletscher und die Wasserversorgung. In: Lozán, J. L.; Graßl, H.; Hupfer, P.; Karbe, L.; Schönwiese, C.-D.(Hrsg.): WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle?.

Farinotti, D., Bauder, A., Funk, M. (2011): Veränderung der Gletscher und ihrer Abflüsse 1900-2100. In: Wasser Energie Luft, 103(4), S.273-278.

Fischer, A., Hartl, L. (2013): Langzeitmonitoring von Gletschermassenbilanzen und Längenänderungen in Tirol. In: Koch, E., Erschbamer, B. (Hrsg.): Klima, Wetter, Gletscher im Wandel. Innsbruck: innsbruck universtiy press S. 31-48.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Fischer, A. (2018): Wie das Klima die Gletscher beeinflusst. In: Fischer, A., Patzelt, G., AchRAINER, M., Groß, G., Lieb, G. K., Kellerer-Pirklbauer, A., Bendler, G. (Hrsg.): Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Berlin: Springer Verlag. S. 1-6.

Finger, D., Sarbach, K. (2012): Weitreichende Auswirkungend des Klimawandels auf die Wasserkraftproduktion in einem Schweizer Alpental. In: Wasser Energie Luft, 104(2), S.107-110.

Goldberger, J. (2013): Bericht zum Ende des Gletschers am Hochkönig. In: Verein Berliner Wetterkarte.V. zur Förderung der meeorologischen Wissenschaft (Hrsg.): Beilage zur Berliner Wetterkarte. Berlin. S. 1-3.

Haeberli, W., Schleiss, A., Linsbauer, A., Künzler, M., Bütler, M. (2012): Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. In: Wasser Energie Luft, 104(2), S.93-102.

Hänggi, P., Angehm, S., Bosshard, T., Helland, E., Job, D., Rietmann, D., Schädler, B., Schneider, R., Weingartner, R. (2011): Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion der Wasserkraftwerke Löntsch und Prättigau. In: Wasser Energie Luft, 103(4), S.292-299.

Job, D., Angehrn, S., Helland, E., Rietmann, D., Schneider, R., Dupraz, C., Mueller, C., Boogen, N., Spreng, D., Widmer, F., Hänggi, P., Weingartner, R., Haeberli, W., Linsbauer, A., Paul, F., Bosshard, T., Ewen, T., Kotlarski, S., Schär, C., Fankhauser, A., Bobierska, F., Jonas, T., Bauder, A., Farinotti, D., Usselman, S., Beer, A., Glassey, T., Ludwig, A., Metraux, V., Ossiaa, M., Raymond Pralong, M., Rickenmann, D., Stähli, M., Turowski, J., Zappa, M. (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung. Synthesebericht. Bern: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL).

Kasang, D., Linsenmeier, M. (2015): Rückgang der Gletscher und die Wasserversorgung in den tropischen Alpen. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Kasang, D., Notz, D., Escher-Vetter, H. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde, S. 279-288.

Kaser G., Grosshauser, M., Marzelon, B. (2010): Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. In: PNAS 23 S. 20223-20227.

Kenner, R., Phillips, M., (2017): Fels- und Bergstürze in Permafrostgebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis. Online unter:

https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Projekte/cengalo/Schlussbericht_ArgeAlp_FelsstuerzePermafrost_2017.pdf (20.5.2020)

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Kirchlechner, P. (2011): Gletscherhydrologie der Pasterze: Die Gletscher schmelzen – verändert sich der Wasserkreislauf im Hochgebirge. In: Lieb, K. G., Slupezky, H.: Die Pasterze. Der Gletscher am Großglockner. Salzburg: Verlag Anton Pustet. S. 16-18.

Kobau, R., Kuchler, A., Penninger, G. (2011): Das Kraftwerk im Berg. Die Baugeschichte des Pumpspeicherwerks Limberg II. St. Pölten: Residenz Verlag.

Lambrecht, A., Mayer, C. (2009): Temporal variability of the non-steady contribution from glaciers to water discharge in western Austria. In: Journal of hydrology 376, S. 353-361.

Läzer, K., Sonntag, M., Drazek, R., Jaeschke, R., Hogreve, C. (2010): Einführung in die systematische Literaturrecherche mit den Datenbanken „PsycINFO“, „Pubmed“ und „PEP – Psychoanalytic Electronic Publishing“ sowie in das Literaturverwaltungsprogramm „Citavi“. Ein Tutorial für Studierende der Fächer Psychologie, Pädagogik, Psychoanalyse und Medizin. Online unter: <https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2010081634029/3/TutorialSystematischeLiteraturrecherche.pdf>

Lebiedzinski, K., Fürst, J. (2018): Entwicklung der alpinen Abflussregime in Österreich im Zeitraum 1961-2010. In: Österr Wasser- und Abfallw 70, S.474-484.

Lieb, G. K., Kellerer-Pirklbauer, A., (2018): Die Pasterze, Österreichs größter Gletscher, und seine lange Messreihe in einer Ära massiven Gletscherschwundes. In: Fischer, A., Patzelt, G., AchRAINER, M., Groß, G., Lieb, G. K., Kellerer-Pirklbauer, A., Bendler, G. (Hrsg.): Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Berlin: Springer Verlag. S. 31-51.

Lieb, K. G., Slupezky, H. (2011): Die Pasterze. Der Gletscher am Großglockner. Salzburg: Verlag Anton Pustet.

Lieb, G., Kellerer-Pirklbauer, A. (2020): Gletscherbericht. 2018/19. - In: Bergauf 145, S. 6-15.

Linsbauer, A., Paul, F., Haeberli, W. (o.J.): Schlussbericht CCHydro. Ergebnisse vom Teilprojekt CCGlinCH: Grossräumige Modellierung von Schwund Szenarien für alle Schweizer Gletscher: Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Grosseinzugsgebiete . Zürich: Geographisches Institut.

Mayer, C. Escher-Vetter, H., Weber, M. (2013): 46 Jahre glaziologische Massenbilanz des Vernagtferners. In: Braun, L. Escher-Vetter, H. (Hrsg.): Gletscherforschung am Vernagtferner. Themenband zum fünfzigjährigen Gründungsjubiläum der Kommission für Glaziologie der

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. Innsbruck Universitätsverlag Wagner. S. 219-234.

Patzelt, G. (2018): Die Längenmessungen des Alpenvereins an Ostalpengletschern. In: Fischer, A., Patzelt, G., AchRAINER, M., Groß, G., Lieb, G. K., Kellerer-Pirklbauer, A., Bendler, G. (Hrsg.): Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Berlin: Springer Verlag. S. 7-15.

Präsenz Schweiz (Hrsg.) (2019): Energie – Fakten und Zahlen. Online unter:

<https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/de/home/wirtschaft/energie/energie---fakten-und-zahlen.html> (11.5.2020)

Römer, N., Harreiter, H., Akpinar, O., Konrad, G. (2017): Wasserkraft im Alpenraum: Daten und Fakten. In: Österr Wasser- und Abfallw 70, S.98–112.

Schaefli, B., Hingray, B., Musy, A. (2007): Climate change and hydroower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. In: Hydrol. Earth Syst. Sci. 11(3), S.1191-1205.

Schaefli, B., Manso, P., Fischer, M., Huss, M., Farinotti, D. (2019): The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. In: Renewable Energie 132, S. 615-627.

Schmieder, J. Marke, M., Strasser, U. (2018): Wo kommt das Wasser her? Tracerbasierte Analysen im Rofental (Ötztaler Alpen, Österreich). In: Österr Wasser- und Abfallw 70, S. 507-514.

Schmude, J., Berghammer, A. (2015): Gletscher und Skitourismus: Eine Beziehung vor dem Aus?. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Kasang, D., Notz, D., Escher-Vetter, H. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. S. 289-293.

Slupezky, H. (2013): Ende der Übergossenen Alm – warum?. In: Verein Berliner Wetterkartee.V zur Förderung der meeorologischen Wissenschaft (Hrsg.): Beilage zur Berliner Wetterkarte. Berlin. S. 4-6.

Stenzl, P., Nachtnebel, H.P. (2010): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62, S. 180-187.

Stern, B. (2020): Auf Eis gelegt. Gletscherverbauung vor dem Aus?. - In: Bergauf 145, S.72-75.

„Alpine Gletscher und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt“

Weingartner, R.; Schädler, B.; Hänggi, P. (2013): Auswirkungen der Klimaänderung auf die schweizerische Wasserkraftnutzung. In: *Geographica Helvetica* 68, S. 239–248.

Wiesenegger, H. (2019): Die Hydrographie und das Ewige Eis: eine (lang) dauernde Beziehung? In: *Österr Wasser- und Abfallw* 71, S.66-80.

Willmes, S., Heinemann, G., Helbig, A. (2015): Kryosphäre. Gegenwart und Zukunft. - In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz, H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. S. 25-30.

Zepp, H. (2017): *Geomorphologie*. Paderborn: Ferdinand Schöningh Verlag.