

KLIMASTATUSBERICHT ÖSTERREICH 2022



© Gerhard Karl Lieb

Autor:innen:**Climate Change Centre Austria – CCCA**

Mag.^a Martha Stangl
Philipp Wilfinger, M.A.
Dr.ⁱⁿ Angelika Wolf

Universität für Bodenkultur Wien – BOKU

Dr. Herbert Formayer

GeoSphere Austria – Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie

Dr. Johann Hiebl
Alexander Orlik
David Hinger, MSc
Clemens Bauer, BSc

Der Klimastatusbericht 2022 wurde durch finanzielle Unterstützung des Klima- und Energiefonds sowie der Bundesländer Burgenland, Kärnten, Niederösterreich, Oberösterreich, Salzburg, Steiermark, Tirol, Vorarlberg und Wien realisiert.

Wir bedanken uns bei allen Personen und Institutionen, die uns mit Auskünften für diesen Bericht weitergeholfen haben: Florian Borgwardt (Universität für Bodenkultur Wien), Andrea Fischer (Österreichische Akademie der Wissenschaften), Ingo Hartmeyer und Markus Keuschnig (Georesearch), Christoph Hauer (Universität für Bodenkultur Wien), Gerhard Karl Lieb (Karl-Franzens-Universität Graz), Fabien Maussion (Universität Innsbruck), Klaus Reingruber (Blue Sky Wetteranalysen)

Der Bericht wurde durch das Climate Change Centre Austria (CCCA) koordiniert.

Wissenschaftliche Leitung: Dr. Herbert Formayer

Redaktion: Mag.^a Martha Stangl

Layout: Mag.^a Heide Spitzer

Impressum und offizieller Kontakt:

CCCA Geschäftsstelle
Dänenstraße 4, 1190 Wien
ZVR: 664173679
www.ccca.ac.at

Zitiervorschlag: CCCA (2023): Klimastatusbericht Österreich 2022. Stangl M., Formayer H., Hiebl J., Orlik A., Hinger D., Bauer C., Wilfinger P., Wolf A., Wien: CCCA

© *Klimastatusbericht Österreich 2022, Hrsg. CCCA 2023*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.	5
1 Klimarückblick Österreich 2022.	6
1.1 Das Jahr 2022 im Überblick	6
1.2 Klima- und Wetterstatistik	7
1.3 Witterungsverlauf	8
1.4 Räumliche Verteilung	10
1.5 Langfristige Einordnung	15
1.6 Klimaindizes	18
1.7 Bedeutende Wetterereignisse	21
2 Massiver Gletscherrückgang prägte das Jahr 2022	26
2.1 Der Rückgang der Gletscher im Jahr 2022	26
2.2 Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf den Wasserkreislauf und nachgelagerte Nutzungen	29
2.3 Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf die Sicherheit im alpinen Raum	35
2.4 Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf den Tourismus.	37
3 Anpassung an den Gletscherrückgang	38
3.1 Anpassungsmaßnahmen im Bereich Wasserwirtschaft	38
3.2 Anpassungsmaßnahmen im Bereich Naturgefahren und Katastrophenschutz	41
3.3 Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Tourismus	41
4 Zusammenschau	45
Glossar und Referenzen.	46

Vorwort

Im Sommer 2022 verloren die österreichischen Gletscher etwa doppelt so viel Masse wie im Schnitt der letzten 30 Jahre. Laut Klimabilanz der GeoSphere Austria war das Jahr 2022 auf den Bergen das wärmste Jahr der Messgeschichte. Darüber hinaus war 2022 eines der sechzehn trockensten und acht sonnigsten Jahre seit Messbeginn. Für unsere Gletscher eine denkbar ungünstige Kombination. Die Gletscher starteten bereits mit einer geringen Schneedecke in den heißen Sommer. Außergewöhnlich hohe Mengen an Saharastaub führten im März zu einer dunklen Staubschicht, die das Abschmelzen zusätzlich beschleunigte. Niederschläge fielen in diesem Sommer fast immer in Form von Regen. Daher konnte selbst im Hochgebirge keine Schneedecke entstehen, die die Gletscher vor der Eisschmelze schützen hätte können. Im Jahr 2022 gab es bereits Ende Juni einen Ausaperungsstand wie wir ihn normalerweise für August erwarten. Beim Sonnblick-Observatorium wurde die früheste Ausaperung seit Schneemessbeginn im Jahr 1938 beobachtet. Diese ungewöhnlich lange Schmelzperiode im Sommer führte dazu, dass die österreichischen Gletscher im Mittel drei Meter Eisschicht verloren.

Der diesjährige Klimastatusbericht 2022 zeigt auf, mit welchen Auswirkungen die Gletscherschmelze für Österreich verbunden ist. Es geht hier nicht nur um eine Veränderung des Landschaftsbildes und Folgen für den (Ski-)Tourismus. Auswirkungen sind auch fernab der Hochgebirge spürbar. Gletscher und Permafrost stabilisieren den Untergrund im alpinen Raum. Abschmelzendes Eis und auftauende Permafrostböden können zu Felsstürzen und Muren führen, die nicht nur alpine Infrastruktur, sondern auch den Dauersiedlungsraum gefährden. Darüber hinaus spielen Gebirgslandschaften durch die Schnee- und Gletscherschmelze eine bedeutende Rolle im Wasserkreislauf und damit für die Wasser- und Energiewirtschaft. Schwinden die Gletscher, wird es zu deutlichen Änderungen der Schmelzwassermengen, aber auch der Wasserqualität und der Fließgewässerökologie in den Gebirgsbächen und nachgelagerten Flüssen kommen. Der Klimastatusbericht geht darauf ein, welche Anpassungsmöglichkeiten und Handlungsoptionen zur Verfügung stehen, um negative Folgen in den am stärksten betroffenen Bereichen zu verhindern oder abzumildern.

Martha Stangl, Herbert Formayer, Johann Hiebl

1 Klimarückblick Österreich 2022

1.1 Das Jahr 2022 im Überblick

- 2022 war im Mittel über Österreich hinter 2018 das zweitwärmste Jahr seit Messbeginn 1767. Besonders im Westen und Süden war es teilweise sogar das wärmste Jahr.
- Sommer und Herbst waren die viertwärmsten Jahreszeiten der jeweiligen Vergleichsreihe. Der Oktober bilanzierte als wärmster der Messgeschichte.
- Der März zeichnete sich als trockenster und zugleich sonnenscheinreichster Märzmonat seit zumindest 1961 aus.
- Die große Wärme fiel besonders im Süden und Osten mit einem hohen Niederschlagsdefizit zusammen. Österreichweit war 2022 unter den 16 niederschlagsärmsten Jahren seit Messbeginn 1813.
- Auf dem Sonnblick in den Hohen Tauern wurde der bisher früheste Termin der Ausaperung registriert. Zum ersten Mal wurde in Österreich eine Tropennacht im Oktober aufgezeichnet.

2022 war mit einer österreichweiten Mitteltemperatur von 8,1 °C – das entspricht einer Abweichung zur Norm des Bezugszeitraumes 1961–1990 von +2,3 °C – außerordentlich warm. Im Bundesmittel fielen etwa 940 mm Niederschlag, womit bei großen regionalen Unterschieden 12 % auf den

langjährigen Mittelwert fehlen. Damit war 2022 durch eine ungewöhnliche Kombination aus Wärme und Niederschlagsarmut gekennzeichnet. Zugleich schien die Sonne extrem lange. Etwa 1750 Sonnenstunden im Mittel über Österreich machen einen markanten Überschuss von 14 % aus.

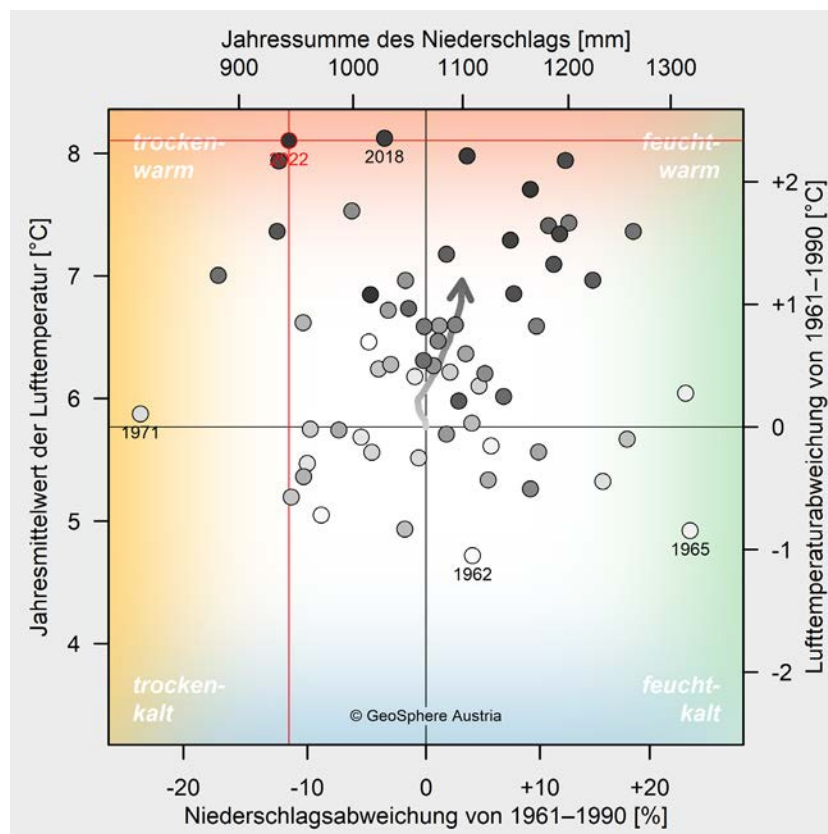
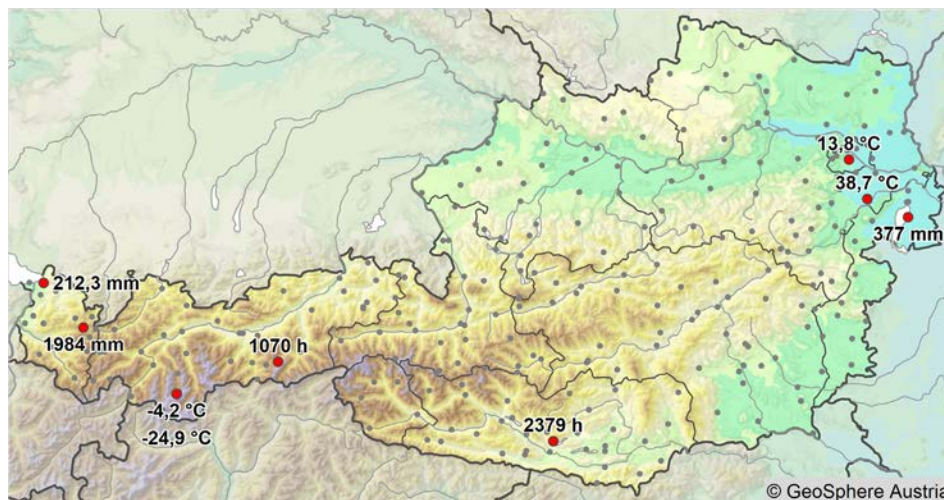


Abbildung 1: Das kombinierte Lufttemperatur-Niederschlag-Diagramm platziert die einzelnen Jahre von 1961 bis 2022 (helle bis dunkle Punkte) ihrer Klimacharakteristik entsprechend zwischen relativ kalt (unten) und warm (oben) sowie relativ trocken (links) und feucht (rechts). Angegeben sind Flächenmittelwerte über Österreich als Absolutwerte und als Abweichungen vom Mittelwert des Bezugszeitraumes 1961–1990. Das Berichtsjahr ist rot hervorgehoben. Der Pfeil verfolgt die Verlagerung der laufenden 30-jährigen Mittelwerte von 1961–1990 bis 1993–2022.

1.2 Klima- und Wetterstatistik

		Jän	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Lufttemperatur	abs. [°C]	-0,9	0,6	2,3	5,4	12,8	17,1	17,7	17,2	10,8	10,6	3,5	-0,5	8,1
	Abw. [°C]	<u>+3,0</u>	<u>+3,0</u>	+1,3	+0,2	<u>+3,0</u>	<u>+4,2</u>	<u>+2,9</u>	<u>+2,8</u>	-0,6	<u>+3,8</u>	<u>+2,3</u>	<u>+2,1</u>	<u>+2,3</u>
Niederschlag	abs. [mm]	42	56	18	69	100	150	105	110	115	57	68	54	943
	Abw. [%]	-36	-7	<u>-73</u>	-10	-4	+17	-23	-14	+31	-14	-12	-23	<u>-12</u>
Sonnenschein	abs. [h]	76	106	214	155	192	229	234	193	115	131	64	42	1750
	Abw. [%]	<u>+39</u>	<u>+33</u>	<u>+78</u>	+6	+9	<u>+28</u>	+14	+1	<u>-26</u>	+6	+5	-7	<u>+14</u>

Tabelle 1: Monatliche und jährliche Mittelwerte der Lufttemperatur sowie Summen von Niederschlag und Sonnenscheindauer. Angegeben sind Flächenmittelwerte über Österreich als Absolutwerte und als Abweichungen vom Mittelwert des Bezugszeitraumes 1961–1990. Abweichungen unter bzw. über der (doppelten) Standardabweichung sind (doppelt) unterstrichen.



	Messwert	Datum	Klimastation	Seehöhe
Lufttemperatur				
niedrigster Jahresmittelwert	-4,2 °C		Brunnenkogel (T)	3437 m
niedrigste Einzelmessung	-24,9 °C	12.12.	Brunnenkogel (T)	3437 m
höchster Jahresmittelwert	13,8 °C		Wien-Innenstadt (W)	177 m
höchste Einzelmessung	38,7 °C	05.08.	Seibersdorf (N)	185 m
Niederschlag				
niedrigste Jahressumme	377 mm		Podersdorf (B)	116 m
höchste Jahressumme	1984 mm		Schröcken (V)	1244 m
höchste Tagessumme	212,3 mm	19.08.	Bregenz (V)	424 m
Sonnenschein				
niedrigste Jahressumme	1070 h		Hintertux (T)	1505 m
höchste Jahressumme	2379 h		Kanzelhöhe (K)	1520 m

Abbildung 2: Räumlicher Überblick der an Klimastationen beobachteten Wetterextreme im Jahr 2022 in Österreich.

1.3 Witterungsverlauf

Die ersten Tage des Jahres verliefen ungewöhnlich warm. Vor allem im Osten und Südosten des Landes stieg die Lufttemperatur auf extrem hohe Werte zwischen 16 und 19 °C. Das Temperaturniveau normalisierte sich ab dem zweiten Jännerdrittel etwas, lag aber auch im Februar konstant über dem vieljährigen Mittel. Die relative Trockenheit, die im Jänner im gesamten Land vorherrschte, wurde zumindest von Vorarlberg bis zum Schneeberggebiet unterbrochen. Im Osten und Süden gab es hingegen keine Entspannung. Im Gegenzug gab es mit Abweichungen von +39 bzw. +33 % in den beiden Wintermonaten einen deutlichen Überschuss an Sonnenstunden.

Relativ normal temperiert verliefen die ersten beiden Frühlingsmonate, wobei aber der März außergewöhnlich niederschlagsarm und extrem sonnig verlief. Das Niederschlagsdefizit des März und der damit verbundene Schneemangel im Hochgebirge führten dann in weiterer Folge zu einer rekordfrühen Ausaperung und Gletscherschmelze. So wurde auf dem Sonnblick (Salzburg, 3109 m) in den Hohen Tauern am 6. Juli der früheste Termin der Ausaperung seit Beginn der Schneehöhenmessungen 1938 registriert.

Die hohen Schmelzraten sind aber nicht nur durch den mangelnden Niederschlag im Frühjahr zu erklären. Nach dem ersten Maidrittelt kletterte die Temperatur auf ein sommerliches Niveau, das schließlich bis Anfang September Bestand hatte. Es gab von Mai bis Mitte September praktisch keine Kaltlufteinbrüche, die mit Schneeniederschlägen das ausgeaperte Gletschereis schützen hätten können. So waren die Monate Mai bis August mit Temperaturanomalien von +2,8 bis 4,2 °C extrem warm und erlangten jeweils eine Platzierung unter den Top zehn in den Messreihen der vergangenen zweieinhalb Jahrhunderte. Während im Mai nur ein geringes Niederschlagsdefizit von 4 % zu beobachten war und im Juni um 17 % mehr Niederschlag fiel, blieb es in den beiden Hochsommer-

monaten deutlich zu trocken (Juli -23 %, August -14 %). Im Rheintal trat hingegen Mitte August ein extremes Starkregenereignis ein. So kam am 19. August in Bregenz (Vorarlberg) innerhalb von 24 h die immense Niederschlagsmenge von 212 mm vom Himmel. Das ist nicht nur neuer Vorarlbergrekord, sondern die vierthöchste jemals von einer regulären österreichischen Klimastation aufgezeichnete Tagesniederschlagssumme.

Erst im September, der auch der einzige Monat im Jahr war, der eine geringfügig negative Temperaturabweichung aufzuweisen hatte, fielen im gesamten Bundesgebiet wieder ausgeglichene bis überdurchschnittliche Regenmengen. Nachdem stellenweise der erste Frost unterhalb von 800 m Seehöhe um den 23. September relativ früh im zweiten Halbjahr auftrat, bestimmten im Oktober wieder sehr milde Luftmassen das Wettergeschehen. Zum ersten Mal wurde in Österreich eine Tropennacht im Oktober aufgezeichnet, nämlich in der Nacht auf den 30. auf dem Kolomansberg (Salzburg, 1113 m). So entwickelte sich der Oktober 2022 mit einer Abweichung von +3,8 °C zum wärmsten Oktober der Messgeschichte. In Kombination mit herbstlichem Hochdruckwetter war es stellenweise trocken und im Süden sehr sonnig. Diese Witterung setzte sich bis in den November hinein fort und somit schloss auch der letzte Herbstmonat mit einer deutlich zu warmen (Abw. +2,3 °C) und niederschlagsarmen (-12 %) Klimabilanz ab.

Ab der zweiten Novemberhälfte normalisierten sich die Temperaturverhältnisse und Mitte Dezember stellte sich eine kurze Phase mit Dauerfrost ein. Im letzten Drittel des Dezembers setzte teils starkes Tauwetter ein, das bis zum Jahreswechsel und darüber hinaus anhielt. Und schließlich war der Dezember auch im Flächenmittel deutlich zu trocken und damit der zehnte Monat des Jahres 2022, der eine negative Niederschlagsbilanz aufzuweisen hatte.

KLIMASTATUSBERICHT ÖSTERREICH 2022

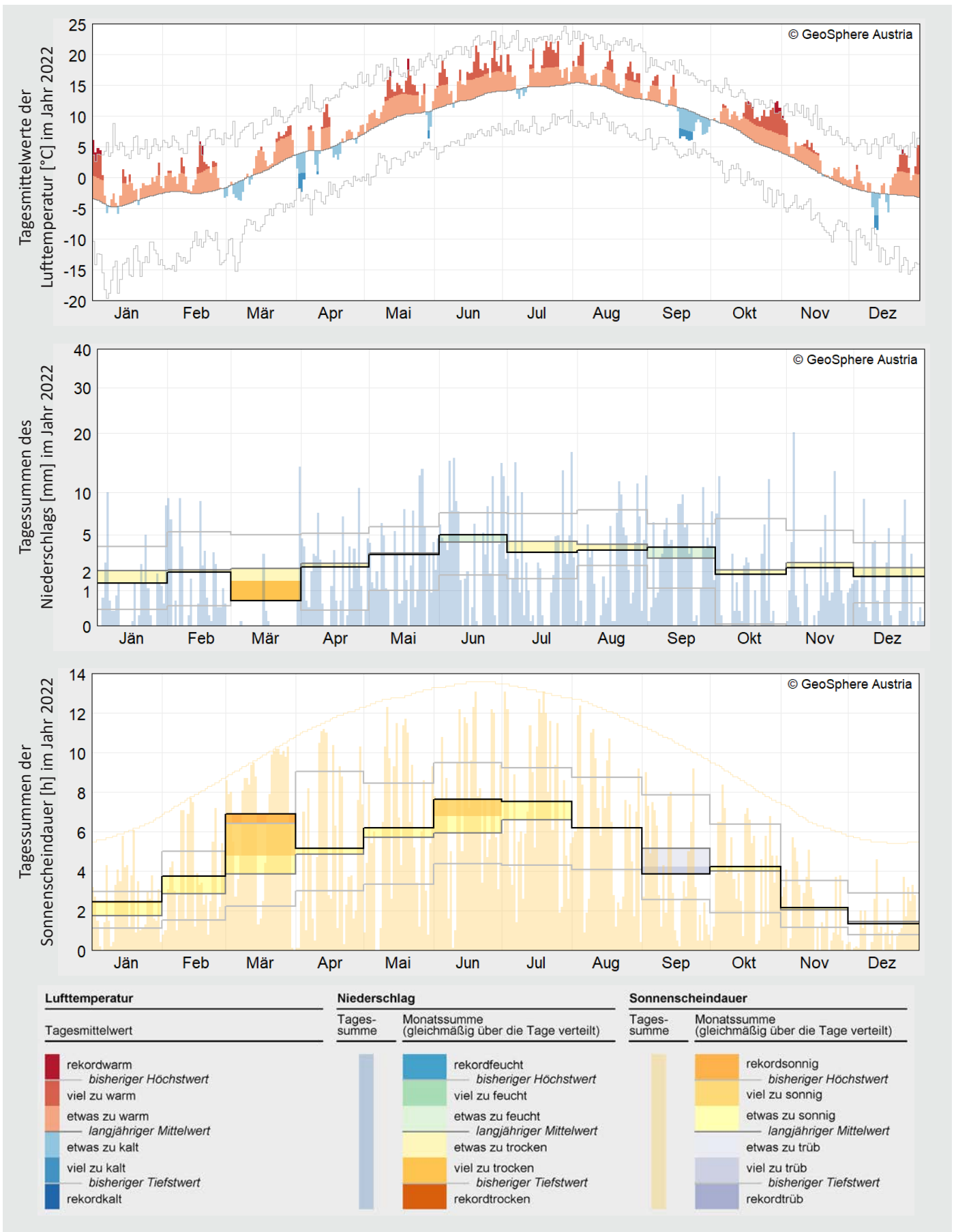


Abbildung 3: Verläufe von täglicher Lufttemperatur, Niederschlagssumme und Sonnenscheindauer im Jahr 2022 in Bezug auf die Mittelwerte des Zeitraumes 1961–1990. Angegeben sind Flächenmittelwerte über Österreich.

1.4 Räumliche Verteilung

Im Berichtsjahr wurde über ganz Österreich gemittelt eine Lufttemperatur von 8,1 °C verzeichnet. Absolut betrachtet war es dabei auf den höchsten Gipfeln der Hohen Tauern und Ötztaler Alpen mit etwa -6 °C am kältesten und in der Wiener Innenstadt mit über 13 °C am wärmsten. Somit wich die Lufttemperatur überall massiv von der Norm der Jahre 1961–1990 ab, im Schnitt um +2,3 °C. Noch am wenigsten stark fiel die Abweichung mit +2,0 °C in Hochtälern Salzburgs aus, während es im Rheintal und im Innviertel bis zu +2,8 °C relativ am wärmsten war.

Die Jahressumme des gemessenen Niederschlags wird im österreichischen Flächenmittel auf rund 940 mm geschätzt. Am wenigsten regnete und schneite es am Neusiedler See und im Marchfeld, wo sich über das Jahr nur etwa 380 mm summiereten. Am anderen Ende des Landes, nämlich für Hochlagen des Bregenzerwaldes, werden hingegen bis zu rund 2400 mm Niederschlag angenommen.

In der Hälfte der Bundesfläche lagen die Niederschlagsabweichungen zwischen -10 und +10 %; die Niederschläge entsprachen hier also in etwa dem Erwartungswert. Bis zu 15 % mehr Niederschlag als üblich fiel im nördlichen Mühlviertel. In Süd- und Ostösterreich fehlte allerdings rund ein Viertel des Niederschlages auf die normale Jahressumme, in der Weststeiermark teilweise sogar ein Drittel. Insgesamt beträgt die Niederschlagsabweichung über Österreich immerhin -12 %.

Gemittelt über Österreich kamen 2022 rund 1750 Sonnenstunden zusammen, was einem deutlichen Überschuss von 14 % entspricht. Nur in Nordstaulagen von den Hohen Tauern bis zu den Müritzsteiger Alpen wurden durchschnittliche Werte erreicht. Auf Anhöhen Mittelkärntens schien die Sonne mit bis zu 2400 h am häufigsten. Relativ gesehen war die Abweichung mit rund +35 % am Ufer des Bodensees am größten.



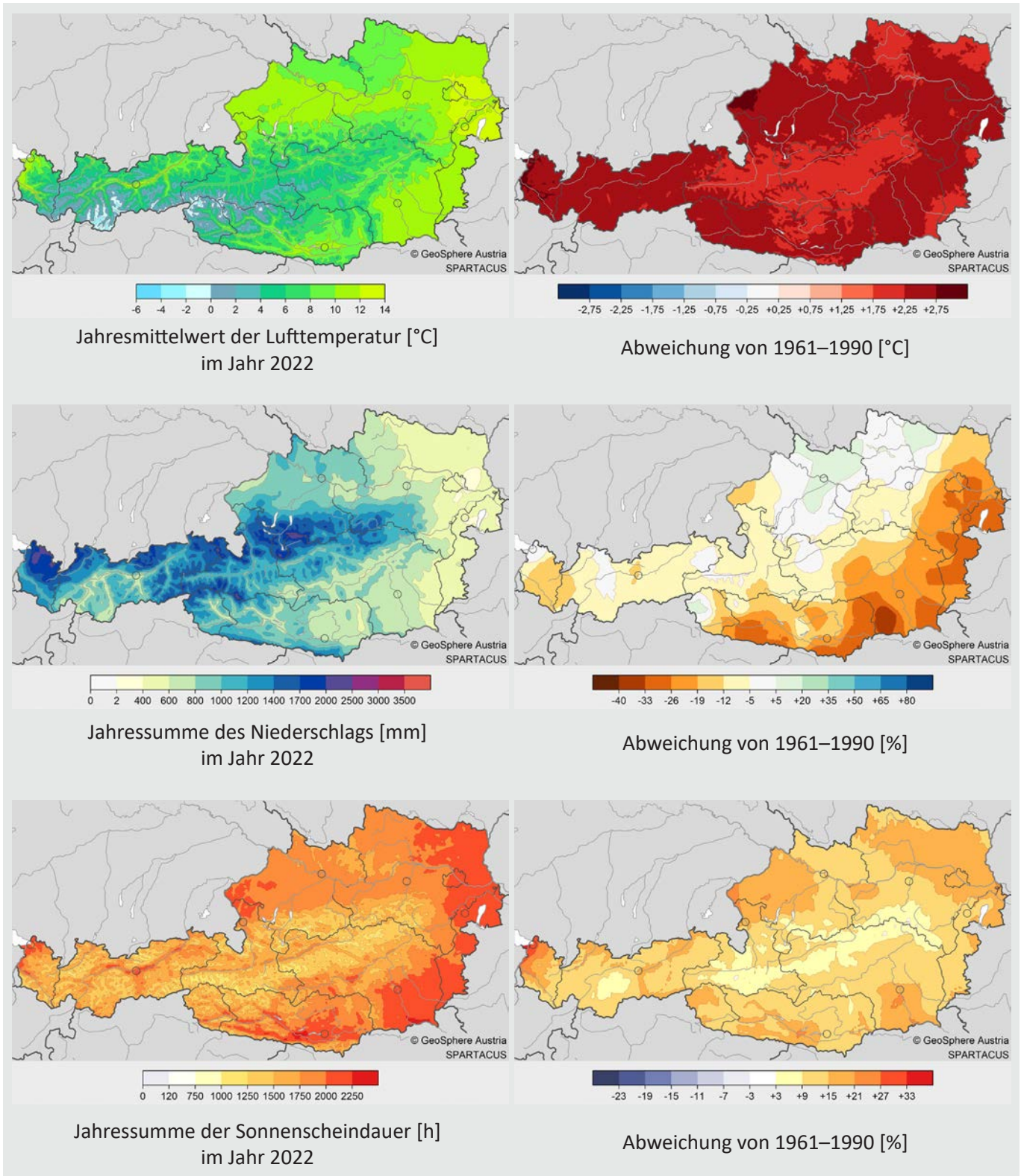


Abbildung 4: Räumliche Verteilung der Jahreswerte 2022 von Lufttemperatur (oben), Niederschlagssumme (Mitte) und Sonnenscheindauer (unten) in Österreich als Absolutwerte (links) und als Abweichungen vom Mittelwert des Bezugszeitraumes 1961–1990 (rechts).

KLIMASTATUSBERICHT ÖSTERREICH 2022

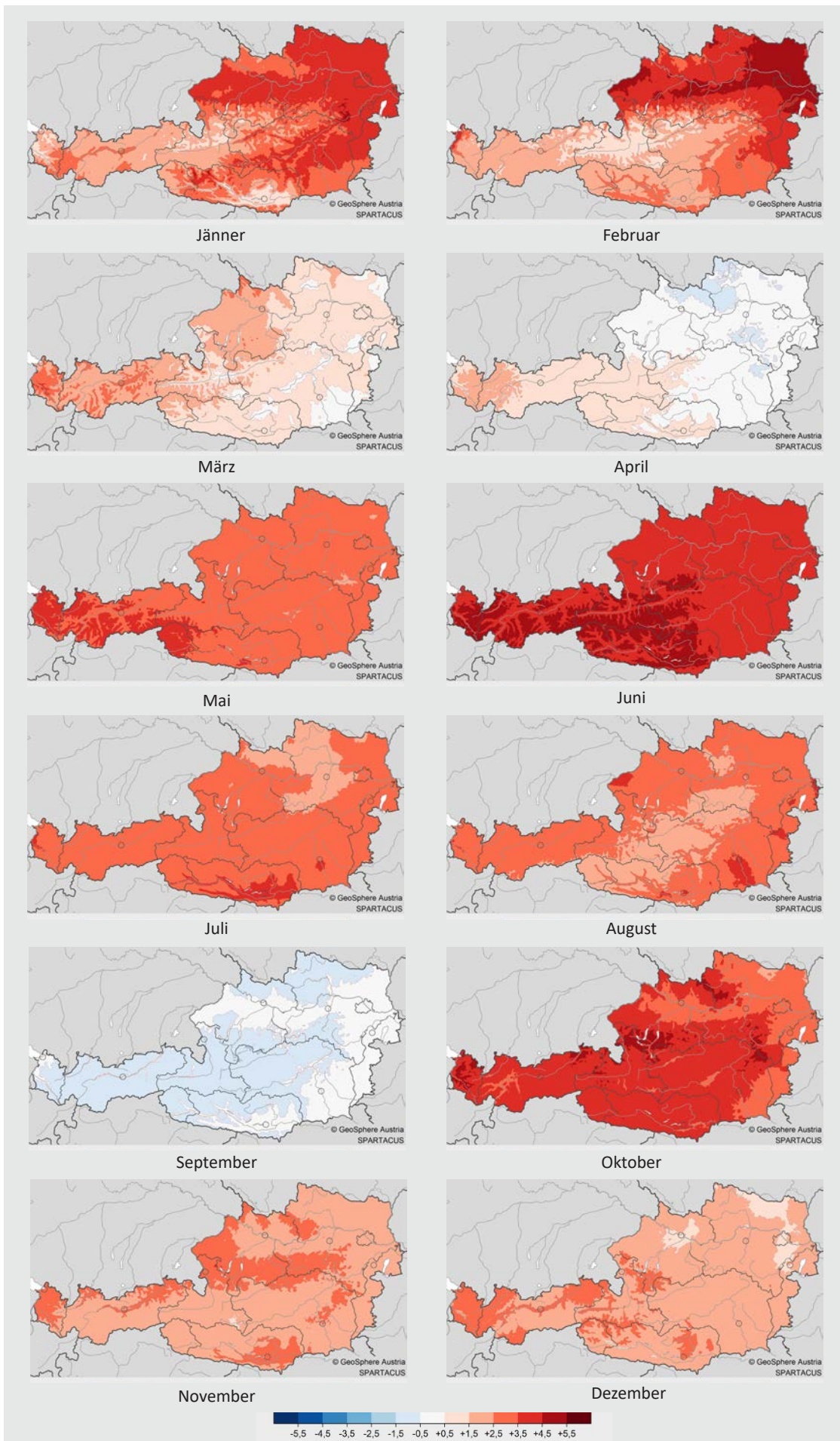


Abbildung 5: Räumliche Verteilung der Abweichungen der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Jahr 2022 vom Mittelwert des Bezugszeitraumes 1961–1990 in Österreich.

KLIMASTATUSBERICHT ÖSTERREICH 2022

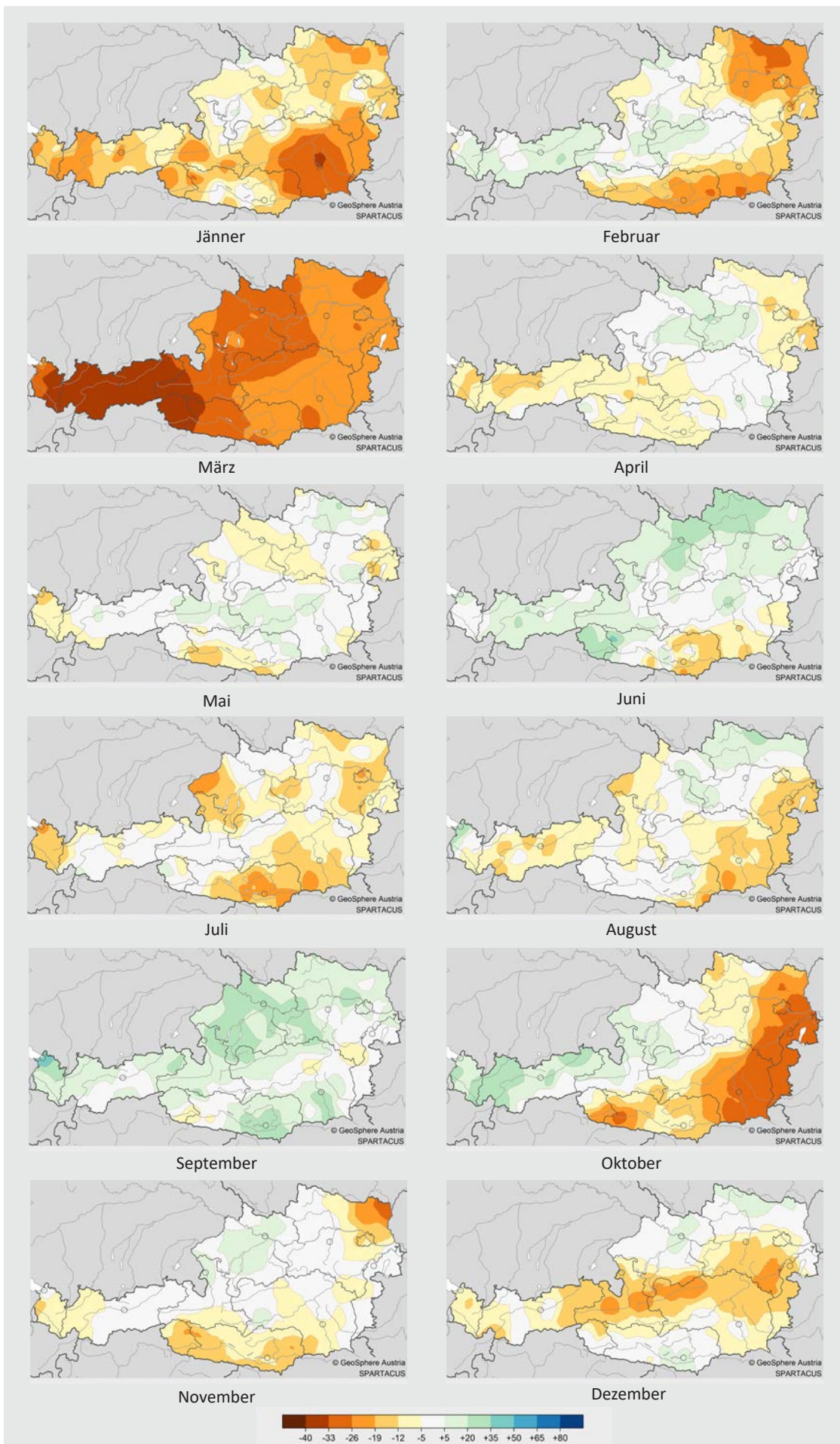


Abbildung 6: Räumliche Verteilung der Abweichungen der Monatssummen des Niederschlags im Jahr 2022 vom Mittelwert des Bezugszeitraumes 1961–1990 in Österreich.

KLIMASTATUSBERICHT ÖSTERREICH 2022

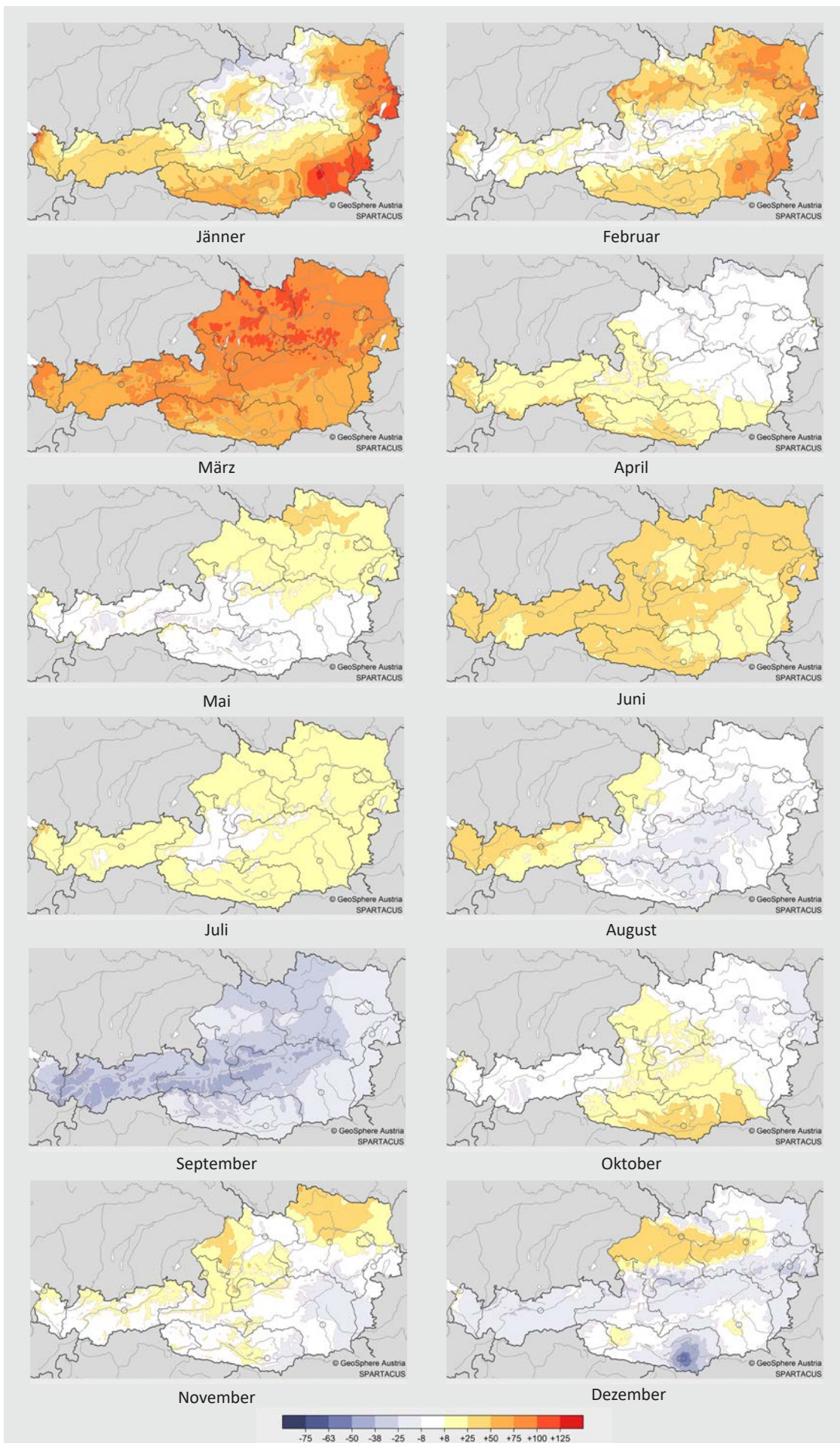


Abbildung 7: Räumliche Verteilung der Abweichungen der Monatssummen der Sonnenscheindauer im Jahr 2022 vom Mittelwert des Bezugszeitraumes 1961–1990 in Österreich.

1.5 Langfristige Einordnung

Die langfristige Klimaentwicklung in Österreich über die letzten 255 Jahre wird anhand der Mittelwerte über homogenisierte Zeitreihen von besonders lange betriebenen Klimastationen nachvollzogen. Abgesehen von geringfügigen Abweichungen besteht eine hohe Übereinstimmung mit den zuvor besprochenen Flächenmittelwerten, die das Klima nach 1961 in größerer Genauigkeit beschreiben.

Der Trend der Lufttemperatur bewegte sich in Österreich vom Spätbarock ausgehend in einem aus heutiger Sicht niedrigen Bereich und ging bis etwa 1890 langfristig sogar leicht zurück. Ende des 19. Jahrhunderts setzte eine zunächst schwache Erwärmung ein, die sich um 1980 verstärkte und seither ungebrochen anhält. Bereits etwa 1990 verließ das Temperaturniveau den bis dahin aus Messungen bekannten Bereich. Das Jahr 2022 bestätigt mit einer Abweichung von +2,4 °C, dass die Erwärmung rasant fortschreitet. Es reiht sich im Österreichmittel hinter 2018 an die zweite Stelle der wärmsten Jahre. In etwa einem Viertel der Bundesfläche, vor allem in den höheren Lagen West- und Südöstereichs, aber auch den östlichen Randgebirgen, führt 2022 sogar die Liste der wärmsten Jahre an.

Beim über Österreich gemittelten Jahresniederschlag sind hingegen keine langfristigen Änderungen auszumachen. Die auffälligsten niederschlagsreichen und -armen Phasen finden sich im 19. Jahrhundert. Bei hoher Variabilität von Jahr zu Jahr liegt 2022 spürbar unter dem geringfügig erhöhten Niveau der Jahresniederschläge der letzten drei Jahrzehnte. Im Vergleich zum Mittelwert des klassischen Bezugszeitraumes fehlen 12 %. Es kommt auf Platz 16 der trockensten Jahre seit 1813 zu liegen. Allerdings gibt das Österreichmittel der Jahressumme keine Auskunft über regionale und jahreszeitliche Unterschiede der Niederschlagsverteilung. Die Verteilung kleinräumiger und kurzfristiger Ereignisse ist daraus naturgemäß nicht abzulesen.

Ebenfalls um 1980 nahm eine Erhöhung der Sonnenscheindauer ihren Ausgang. In den letzten etwa 20 Jahren liegt die Jahressumme der Sonnenscheindauer in einem hohen Bereich, wie er nur aus Messungen des späten 19. Jahrhunderts bekannt ist. 2022 hält mit einer Abweichung von +16 % das hohe Niveau. Es reiht sich unter den 142 Jahren der Zeitreihe auf Platz zehn der sonnigsten Jahre ein.



© Gerhard Karl Lieb

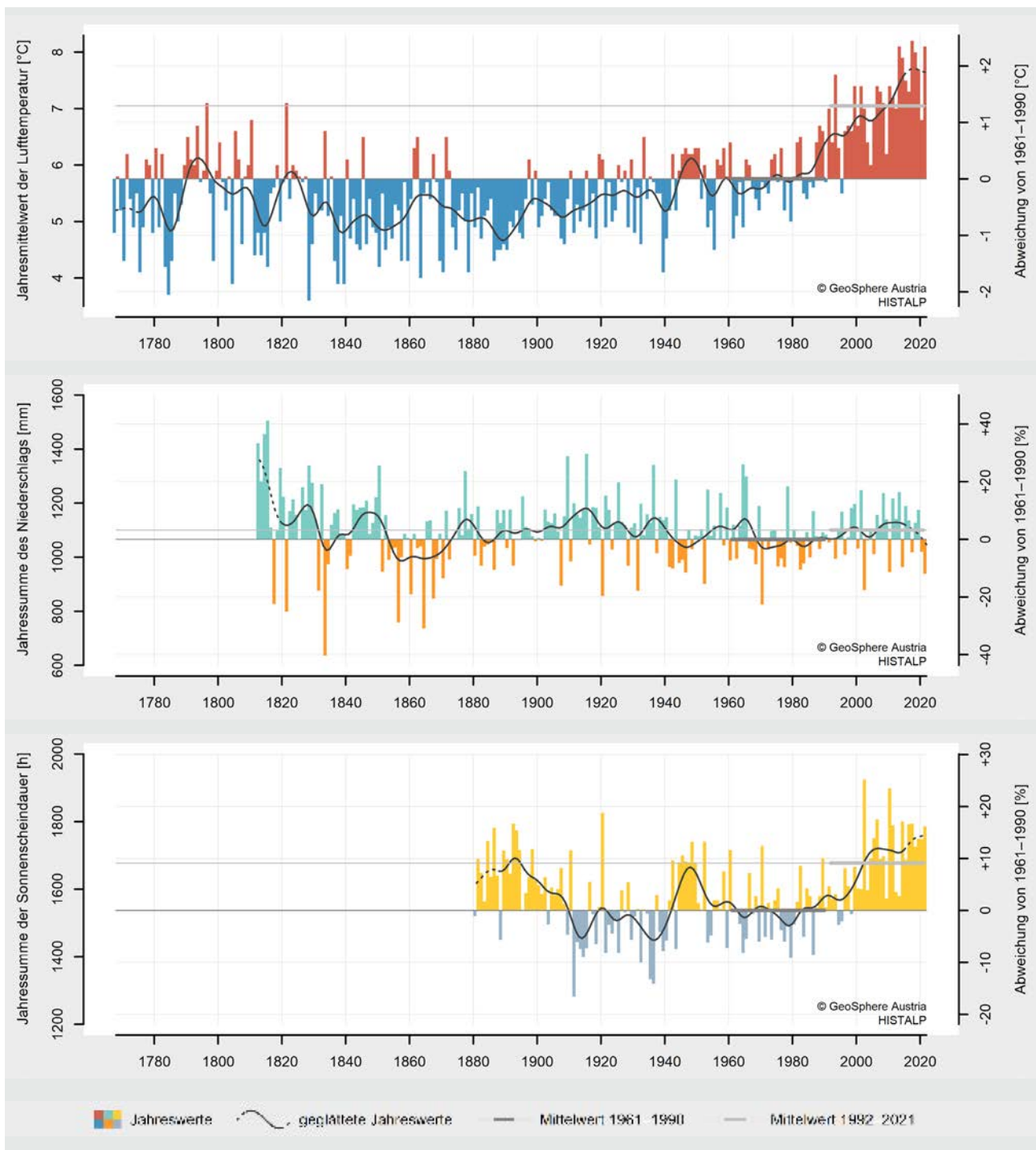


Abbildung 8: Langfristige Entwicklung der Jahreswerte von Lufttemperatur (oben), Niederschlagssumme (Mitte) und Sonnenscheindauer (unten) in Österreich vom Beginn instrumenteller Messungen bis 2022. Die Niveaus der Mittelwerte des Bezugszeitraumes 1961–1990 bzw. der letzten 30 Jahre 1992–2021 sind als dunkelgraue bzw. hellgraue Linien eingetragen.

Global wurde 2022 mit einer Abweichung von $+0,80\text{ °C}$ gegenüber dem Zeitraum 1961–1990 das sechstwärmste Jahr seit 1850 verzeichnet. [1] In der Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung in Österreich und weltweit fällt zunächst die stark unterschiedliche Jahr-zu-Jahr-Variabilität auf. Der Mittelwert über die gesamte Erdoberfläche ist regionalen Schwankungen gegenüber wesentlich unempfindlicher als die nur punktuell gültigen Messungen einzelner Stationen. [2]

daran, dass sich die Luft inmitten eines Kontinents rascher erwärmt als über den thermisch trägen Ozeanen, die 71 % der Erdoberfläche bedecken. Zusätzlich könnte eine gleichzeitige Zunahme der bodennahen Sonneneinstrahlung in Mitteleuropa Einfluss genommen haben. Als Ursachen hierfür werden abnehmende atmosphärische Aerosolkonzentration sowie abnehmende Wolkenbedeckung infolge geänderter atmosphärischer Zirkulation diskutiert. [3,4]

Weiters ist der Temperaturanstieg der letzten vier Jahrzehnte in Österreich etwa doppelt so stark ausgeprägt wie global. Das liegt hauptsächlich

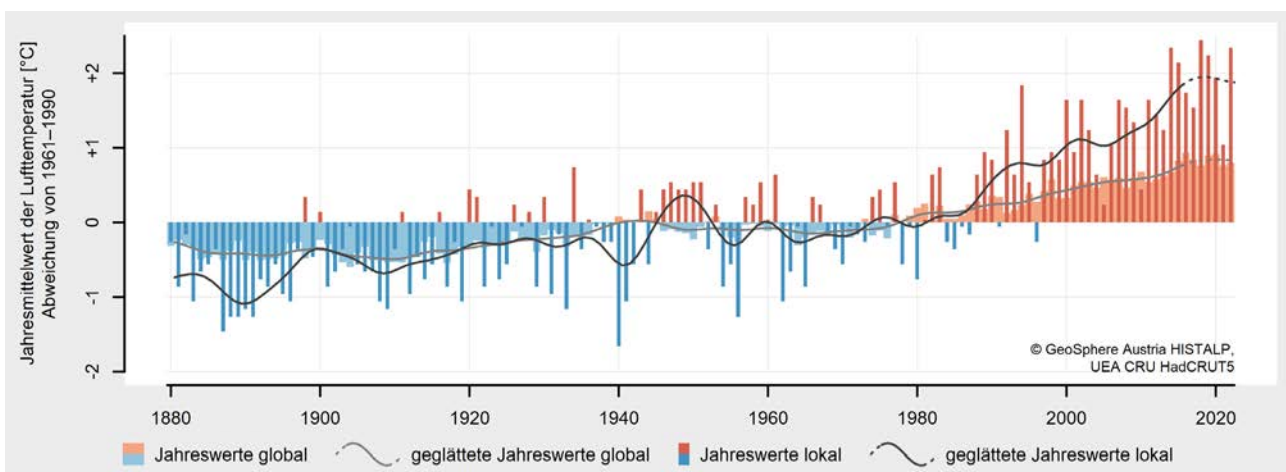


Abbildung 9: Langfristige Entwicklung der Jahreswerte der Lufttemperatur global und in Österreich von 1880 bis 2022. Dargestellt sind Abweichungen von den jeweiligen Mittelwerten des Bezugszeitraumes 1961–1990.

1.6 Klimaindizes

Die klimatischen Kennzahlen über verschiedene Höhenstufen Österreichs im Jahr 2022 sind von den ausgedehnten Wärmephasen und dem ruhigen Niederschlagsgeschehen geprägt.

Über alle Höhenstufen verzeichneten all jene Indizes, die Wärme ausdrücken, deutliche Überschüsse gegenüber den Mittelwerten des Bezugszeitraumes 1961–1990. Beispielsweise wurden im Berichtsjahr über die unter 500 m Seehöhe gelegenen Flächen gemittelt 81 statt erwartungsgemäß 45 Sommertage verzeichnet. Das ist seit zumindest 1961 hinter 2018 und 2003 der dritthöchste Wert dieses Index, der seit etwa 1980 einen fortlaufend ansteigenden Trend aufweist. Des Weiteren waren im Tiefland im Vorjahr 22 Tage Teil von Hitzeperioden. Der Erwartungswert hierfür liegt bei vier Tagen. Im alpinen Bereich über 2000 m dauerte die Vegetationsperiode 15 statt sieben Wochen.

Umgekehrt waren kalte Bedingungen ausdrückende Klimaindizes stark unterdurchschnittlich. Sowohl bei den Frosttagen als auch bei der Heizgradtagzahl fehlt rund ein Fünftel auf die jeweiligen

Erwartungswerte des Zeitraumes 1961–1990. In den Höhenstufen über 1500 m war der Heizbedarf im Jahr 2022 sogar so niedrig wie noch nie seit 1961.

Bei den Niederschlagsindizes sind ausnahmslos negative Abweichungen vorhanden. Die Anzahl der Niederschlagstage ist zwar nur leicht unterdurchschnittlich. Jene der Starkniederschlagstage erreichte aber je nach Höhenstufe ihren zweit- oder drittniedrigsten Wert seit 1961. Nach einer Episode erhöhter Jahreswerte an Starkniederschlagstagen um 2010 zeichnet sich in den letzten Jahren ein neuerlicher Abfall ab. Ähnliches gilt für die durchschnittliche Niederschlagsintensität. Sie lag gemittelt über Lagen unter 500 m nur 1978 noch niedriger als 2022.

In allen Höhenstufen umspannte die längste Trockenperiode des Jahres im Februar und März im Mittel 25 bis 28 Tage, was aber nur für die oberste Höhenstufe ein ungewöhnlich hoher Wert ist.

KLIMASTATUSBERICHT ÖSTERREICH 2022

Höhenstufe		unter 500 m			500-1000 m			1000-1500 m			1500-2000 m			über 2000 m		
Klimaindex		2022	1961-1990	Abweichung	2022	1961-1990	Abweichung	2022	1961-1990	Abweichung	2022	1961-1990	Abweichung	2022	1961-1990	Abweichung
Wärme	Sommertage (25 °C) [d]	81	45	+36	50	25	+25	20	7	+13	3	1	+2	0	0	±0
	Hitzetage (30 °C) [d]	23	6	+17	9	2	+7	1	0	+1	0	0	±0	0	0	±0
	Tropennächte (20 °C) [d]	3	0	+3	0	0	±0	0	0	±0	0	0	±0	0	0	±0
	Hitzeperiode [d]	22	4	+18	3	0	+3	0	0	±0	0	0	±0	0	0	±0
	Kühlgradtagzahl [°C]	152	43	+109	52	9	+43	8	1	+7	0	0	±0	0	0	±0
	Vegetationsperiode (5 °C) [d]	242	224	+18	219	196	+23	196	166	+30	180	123	+57	108	52	+56
Kälte	Frosttage (0 °C) [d]	81	104	-23	113	134	-21	139	163	-24	160	191	-31	198	245	-47
	Heizgradtagzahl [°C]	3002	3662	-660	3589	4384	-795	4301	5232	-931	5154	6196	-1042	6670	7647	-977
	Normaußentemperatur* [°C]	-10,7	-13,2	+2,5	-12,7	-15,1	+2,4	-14,4	-16	+1,6	-16,4	-17,7	+1,3	-19,7	-21,2	+1,5
Niederschlag	Niederschlags-tage (1 mm) [d]	108	112	-4	133	135	-2	137	143	-6	142	149	-7	144	150	-6
	Starkniederschlags-tage (20 mm) [d]	4	6	-2	8	10	-2	11	15	-4	13	17	-4	14	17	-3
	Niederschlags-intensität [mm]	5,6	6,4	-0,8	6,9	7,6	-0,7	7,8	8,7	-0,9	8,3	9,1	-0,8	8,4	8,9	-0,5
	max. Fünf-Tages-Niederschlag [mm]	58	70	-12	71	91	-20	80	108	-28	88	116	-28	91	115	-24
Trocken-heit	längste Trockenepisode [d]	27	24	+3	25	21	+4	26	20	+6	26	20	+6	28	19	+9

Tabelle 2: Wichtige Klimaindizes im Jahr 2022 in Bezug auf die Mittelwerte des Zeitraumes 1961–1990. Angegeben sind Flächenmittelwerte über verschiedene Höhenstufen in Österreich. Die Indizes sind im Glossar am Ende des Berichts definiert. (Für den Index Normaußentemperatur gelten abweichende zeitliche Bezüge.)*

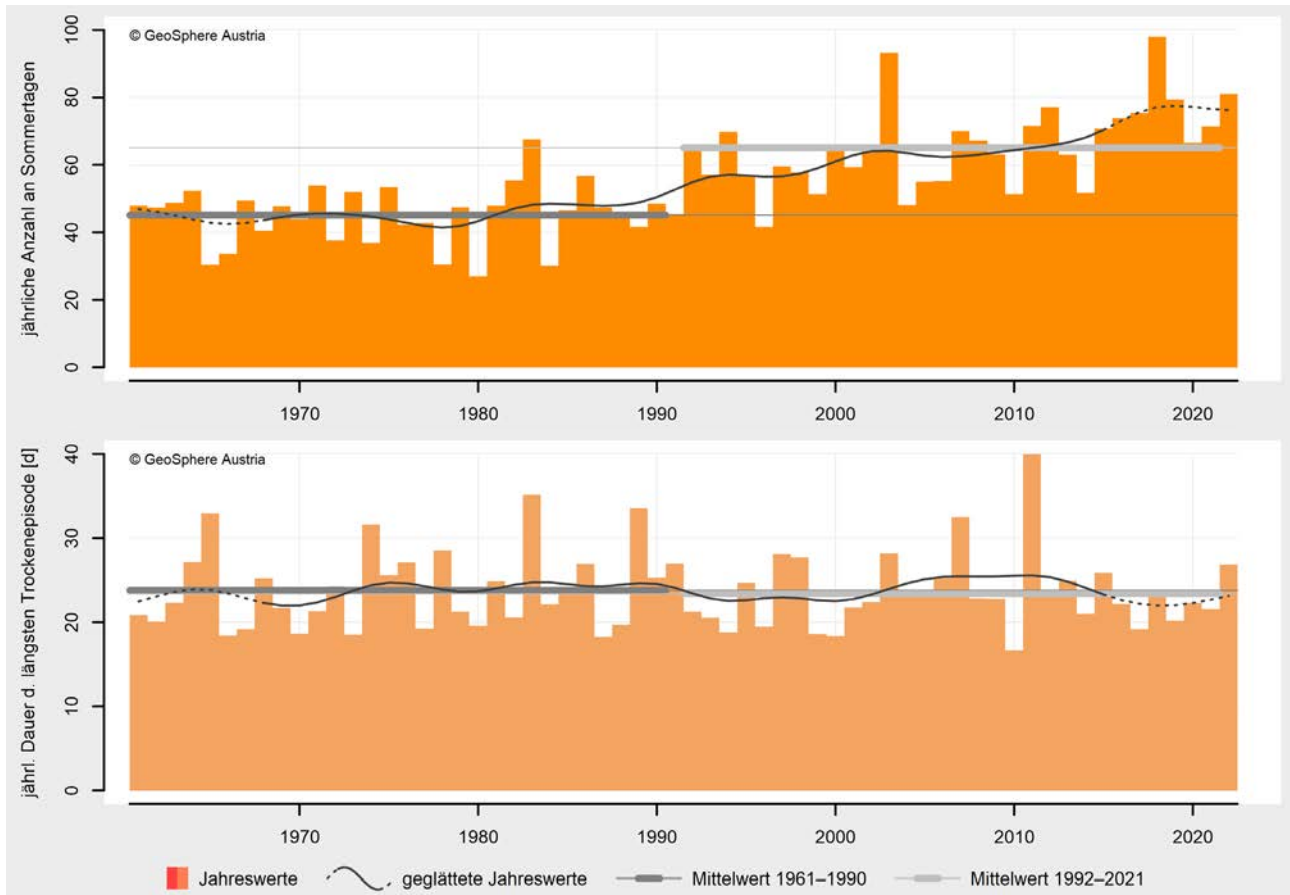


Abbildung 10: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Sommertagen (oben) und der Dauer der längsten Trockenperiode (unten) in Österreich von 1961 bis 2022. Angegeben sind Mittelwerte der unter 500 m Seehöhe gelegenen Flächen. Die Niveaus der Mittelwerte des Bezugszeitraumes 1961–1990 bzw. der letzten 30 Jahre 1992–2021 sind als dunkelgraue bzw. hellgraue Linien eingetragen.

1.7 Bedeutende Wetterereignisse

Jänner: Schneefall in Kärnten und zwei Stürme

Am 5. schaufelte ein Tief über dem westlichen Mittelmeer gemeinsam mit einer Störungszone von Tschechien bis in die Schweiz feuchte Luftmassen nach Österreich. Besonders in Kärnten sorgte starker Schneefall für große Verkehrsprobleme. Auf der Gerlitzen (Kärnten) fiel bis zu einem halben Meter Neuschnee innerhalb von 24 h. Aufgrund der großen Schneelast knickten zahlreiche Bäume um und verlegten Straßen und Schienen. Es dauerte mehrere Tage, bis der Zugverkehr wieder komplett hergestellt werden konnte. Schneefahrbahnen führten zu mehreren Autounfällen. Neben den Problemen im Verkehrsbereich kam es durch beschädigte Leitungen zu Stromausfällen in rund 20 000 Haushalten.

Am 17. sorgte ein Sturmereignis für hunderte Feuerwehreinsätze im Osten Österreichs. Besonders betroffen waren die Bundesländer Ober- und Niederösterreich, Wien, das Burgenland und die Steiermark. Windspitzen bis zu 132 km/h in den Niederungen (Buchberg, Niederösterreich) führten zu zahlreichen umgestürzten Bäumen sowie in Siedlungsgebieten auch anderen herumwirbelnden und umstürzenden Gegenständen. Zahlreiche Straßen und Schienenstrecken mussten gesperrt und von Bäumen befreit werden. So musste zum Beispiel auf der Südbahnstrecke ein Schienenersatzverkehr eingeführt werden. Insgesamt kam es zu Stromausfällen in rund 4500 Haushalten.

Ende Jänner (29.–30.) zog Sturmtief „Nadia“ über Österreich und führte vor allem im Osten und Südosten zu vielen Feuerwehreinsätzen. Der Fokus der Einsätze lag auf umgestürzten Bäumen, die Straßen verlegten und Gebäude sowie Stromleitungen beschädigten. Alleine in der Steiermark waren rund 25 000 Haushalte vorübergehend ohne Strom. Zudem wurden zahlreiche Dächer abgedeckt und es kam zu mehreren Verkehrsunfällen. In den Niederungen wurden Windspitzen bis zu 127 km/h (Leiser Berge, Niederösterreich) gemessen, auf den Bergen waren es bis zu 149 km/h (Kölnbreinsperre, Kärnten), weshalb der Liftbetrieb in den meisten Skigebieten eingestellt werden musste.

Februar: Sturmtief „Ylenia“ sorgt im Norden für Schäden

Für große Schäden und zahlreiche Einsätze sorgte vom 16. bis 18. das Sturmtief „Ylenia“, dessen Kern in dieser Zeit vom Europäischen Eismeer bis Westrussland wanderte und einen markanten Druckgradienten an der Alpennordseite verursachte, im Norden Salzburgs, in Oberösterreich und Niederösterreich. In tiefen Lagen wurden dabei Windspitzen bis zu 146 km/h (Buchberg, Niederösterreich) gemessen, auf den Bergen waren es sogar bis zu 167 km/h (Feuerkogel, Oberösterreich) und damit Orkanstärke. Diese Windstärke entspricht an der Messstation Feuerkogel rund einem zweijährlichen Ereignis. Hauptproblem waren durch den Wind umgestürzte Bäume, die auf Gebäude, Straßen und Stromleitungen fielen, aber auch Dächer wurden stellenweise abgedeckt oder beschädigt. In Salzburg waren vor allem der Flach- und Tennengau betroffen. In der Stadt Salzburg mussten Parks, Friedhöfe und die Stadtberge für Besucher:innen gesperrt werden. In Oberösterreich führten durch Bäume beschädigte Leitungen zu Stromausfällen in rund 20 000 Haushalten. In Niederösterreich kollidierte ein Zug der Kamptalbahn mit einem Baum, der auf den Schienen lag. Auch in den Bezirken Gmünd, St. Pölten-Land und Scheibbs war der Bahnverkehr von Sperren betroffen.

In allen genannten Bundesländern kam es zudem zu Verkehrsunfällen aufgrund mit umgewehten Bäumen kollidierender Fahrzeuge, ebenso waren zahlreiche Straßen zeitweise gesperrt.



© Land OÖ

März: Trockenheit führt zu Waldbränden

Langanhaltende Hochdrucklagen sorgten für Trockenheit, die zu zahlreichen, meist kleinräumigen Wald- und Flurbränden führte. Alleine in Oberösterreich musste die Feuerwehr deswegen 55 Mal ausrücken. Der größte Brand ereignete sich am Truppenübungsplatz in Allentsteig (Niederösterreich). Durch Schießübungen am 26. entzündete sich ein Feuer, das sich über eine Fläche von rund 20 ha Wald und Wiese ausbreitete. Die Löscharbeiten dauerten zwei Tage bis zum 28. an, daran beteiligt waren 249 Personen von 21 Feuerwehren sowie das Bundesheer. Auch Landwirt:innen aus der Umgebung halfen mit, indem sie mit Güllefasern Löschwasser herbeischafften. Die Nachlöscharbeiten dauerten weitere drei Tage bis zum 31. an.

April: Keine bedeutenden Wetterereignisse

In einem typischen April gab es keine außergewöhnlichen Unwetterereignisse.

Mai: Erste Gewitter und Hagelschäden

Zur Mitte des Monats startete die eigentliche Gewittersaison. In der zweiten Monatshälfte kam es im Westen und Süden Österreichs zu mehreren Unwettern. Vor allem in Kärnten, der Südoststeiermark und dem südlichen Burgenland sorgten an mehreren Tagen (23., 25. und 27.) Gewitter für Überflutungen von Straßen und Kellern. Auch in Tirol und Vorarlberg kam es zu einigen Gewittern. Der oft miteinhergehende starke Wind führte zu umgestürzten Bäumen, die Straßen verlegten. Vereinzelt sorgten auch Blitzschläge für Schäden.

So kam es etwa zu einem Gebäudebrand in Albeck (Kärnten) und einem Waldbrand in Kirchberg in Tirol. In Stans und im Sellraintal (Tirol) wurden Straßen von durch Starkregen ausgelösten Muren verlegt. Hagelschauer führten zu Schäden in der Landwirtschaft. Betroffen waren Bezirke in Vorarlberg (Feldkirch und Dornbirn), im östlichen Kärnten (Klagenfurt und Feldkirchen), dem Burgenland (Güssing, Mattersburg und Oberwart) und der Steiermark (Bruck-Mürzzuschlag, Hartberg-Fürstfeld und Deutschlandsberg). Die geschätzte Schadenssumme beläuft sich auf 2,5 Millionen Euro.

Aufgrund starken Windes gerieten sowohl am Bodensee (20.), am Neusiedler See (21.) als auch am Traunsee (26.) Wassersportler:innen in Seenot. Sie konnten allesamt unversehrt von den jeweiligen Einsatzkräften gerettet werden.

Juni: Heftige Gewitter verwüsten Treffen und Arriach

Im Juni kam es zu zwei markanten Unwetterereignissen. Am 5. zog ein bereits okkludiertes Frontensystem über Österreich, löste Gewitter aus und verursachte Schäden und Einsätze in Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Oberösterreich und dem Burgenland. In nur 1 h fielen dabei flächendeckend zwischen 20 und 35 mm Regen. Die Folge waren Überflutungen von Straßen und Gebäuden. Eine Ausnahme stellt hierbei die Region von Unterkärnten bis ins Mostviertel dar, wo zwar ebenfalls Blitze registriert wurden, die Niederschlagsmenge jedoch zumeist unter 10 mm blieb. Noch mehr Schäden verursachte der starke Wind mit Böen bis zu 143 km/h (Innsbruck-Flughafen, Tirol). Diese sorgten für viele beschädigte Dächer und entwurzelte Bäume, die in weiterer Folge Sperrungen mehrerer Straßen und Bahnlinien verursachten. In Oberösterreich waren aufgrund beschädigter Leitungen und Trafostationen rund 30 000 Haushalte vorübergehend ohne Strom. In Vorarlberg wurden rund 85 % der Gemüse- und Obsterte des Junis durch Hagel zerstört.

In der Nacht auf den 29. kam es in den Kärntner Gemeinden Arriach und Treffen am Ossiacher See zu den wohl verheerendsten Unwettern des Jahres. Es kam dabei zu extremen Niederschlägen mit bis zu 61 mm Regen in einer Stunde (Arriach, Kärnten, dies entspricht an dieser Station rund einem 100-jährlichen Ereignis) und 145 mm in 24 h (Kanzelhöhe, Kärnten).



Dies verursachte das größte Hochwasser der letzten 30 Jahre in diesem Gebiet. Die enormen Wassermengen und Schlammlawinen zerstörten und beschädigten zahlreiche Straßen und Gebäude. In beiden Gemeinden wurde Zivilschutzalarm ausgelöst. Viele Menschen mussten aus vermuteten Gebäuden und abgeschnittenen Dörfern evakuiert werden. Rund 2900 Haushalte waren ohne Strom. Eine Person und mehrere Nutztiere kamen durch das Hochwasser ums Leben. In der Landwirtschaft wurden rund 180 000 m² Nutzfläche vollkommen zerstört. Der Gesamtschaden beläuft sich auf rund 100 Millionen Euro, davon entstanden rund 20 Millionen Euro nur durch die Zerstörung von Straßen.

Neben den beiden genannten Ereignissen gab es Anfang (2. und 5.) und Ende (vor allem am 28.) des Monats sowie um den 16. und 20. weitere Gewitter. Betroffen waren vor allem der Westen und Süden Österreichs. In Vorarlberg, Teilen Oberösterreichs, Unterkärnten und der Südsteiermark sorgte Hagel in der Landwirtschaft für stellenweise große Schäden.

Juli: Hitzewelle und viele Gewitter

Mitte Juli kam es zu einer Hitzewelle mit Temperaturwerten von bis zu 38 °C (Seibersdorf, Niederösterreich). Sie dauerte etwa zehn Tage an und wurde nur kurz durch einen Kaltfrontdurchgang unterbrochen. In Wien verursachte die Hitze etwa 300 Rettungseinsätze mehr pro Tag als üblich.

Wiederholte Hochdrucklagen sorgten für niederschlagsarme Verhältnisse. Die daraus resultierende Trockenheit verursachte in Kombination mit den hohen Temperaturen vor allem im Osten Österreichs mehrere kleine Wald- und Flurbrände. Zu einem großflächigeren Brand kam es am 13. auf dem Militärgelände in Ebenfurth (Niederösterreich). Insgesamt waren etwa 1400 Einsatzkräfte fünf Tage lang mit den Löscharbeiten beschäftigt.

In der energiereichen Luft bildeten sich im letzten Monatsdrittel mehrere Unwetter. Am 21. zog ein starkes Gewitter über die Kärntner Gemeinden Reichenau, Bad Kleinkirchheim, Krems in Kärnten und Radentheim. In den beiden letztgenannten Orten wurde Zivilschutzalarm ausgelöst. Starke Regenfälle führten zur Überflutung von Straßen und Gebäuden. Mehrere Häuser waren von der Außenwelt abgeschnitten und es kam zu Stromausfällen.

Am 28. kam es im Salzburger Oberpinzgau, in den Gemeinden Hollersbach und Neukirchen am Groß-

venediger, zu heftigen Unwettern. Starke Regenfälle verursachten mehrere Murenabgänge und Überschwemmungen, welche Straßen blockierten und stellenweise auch komplett zerstörten. Sechs Gebäude in der Nähe des über die Ufer getretenen Grubingbaches mussten aus Sicherheitsgründen evakuiert werden und viele andere Siedlungen waren zwischenzeitlich von der Außenwelt abgeschnitten.

In Wien kam es am 1. und 26. zu zwei Sturmereignissen mit Böen bis zu 113 km/h (Wien-Jubiläumswarte). Sie verursachten rund 210 Einsätze für die Feuerwehr. Hauptsächlich mussten umgestürzte Bäume und Äste sowie lose Gegenstände wie Dachziegel und Werbetafeln gesichert und entfernt werden.

Abgesehen von den angeführten Starkniederschlägen, ausgelöst durch Gewitter und Unwetter, führte die Trockenheit in Kombination mit den Hitzewellen zu Negativrekorden der Pegelstände von Seen und dem Grundwasser. Der Neusiedler See erreichte seinen tiefsten Wasserstand seit 1965. An ausgewiesenen Wasserstraßen in Ufernähe wurde extra Schlamm abgesaugt, um so die Wassertiefe künstlich zu erhöhen und Schifffahrt weiterhin zu ermöglichen.

August: Todesopfer durch Böenfront und Rekordniederschläge in Vorarlberg

Hohe Temperaturen zusammen mit gradient-schwachen Wetterlagen bildeten die Grundlage für mehrere starke Gewitterereignisse.

Am 5. führten Gewitter zu mehreren Murenabgängen im Oberpinzgau und Gasteinertal (Salzburg). Rund 230 Personen saßen deswegen auf Berghütten fest und mussten zum Teil mit Hubschraubern ausgeflogen werden. Durch den Regen wurden auch einige Keller überflutet.

Am 18. zog eine vor einer Gewitterlinie auftretende Böenfront über Unterkärnten, die Steiermark und Teile des Most- und Waldviertels. Windspitzen von bis zu 170 km/h (Lackenhof, Niederösterreich) sorgten für verheerende Schäden und forderten fünf Todesopfer. In der Gemeinde St. Andrä (Kärnten) wurden bei einem Badesee zwei Kinder von umstürzenden Bäumen erschlagen, weitere 16 vom Wind überraschte Badegäste wurden verletzt. In Gaming (Niederösterreich) kamen drei Personen am Rückweg von der Herrenalm ums Leben, auch sie wurden von umstürzenden Bäumen getötet.

Neben den Personenschäden kam es zu immensen Sachschäden. Besonders stark betroffen war hier die Steiermark. Vor allem umgestürzte Bäume sorgten für beschädigte Gebäude und verlegte Straßen. Der Bahnverkehr musste vorübergehend in der gesamten Steiermark eingestellt werden und auch zahlreiche Straßen waren gesperrt. Rund ein Viertel aller Trafostationen fiel aus, was zu Stromausfällen in rund 85 000 Haushalten führte. Auch in Kärnten waren vorübergehend 20 000 Haushalte ohne Strom. In der Forstwirtschaft fielen rund 400 000 Festmeter Schadholz an, was einen finanziellen Schaden von etwa 20 Millionen Euro bedeutete. Der Gesamtschaden beläuft sich auf rund 50 Millionen Euro. Insgesamt kam es in allen drei Bundesländern zu rund 2000 Feuerwehreinsätzen, an denen etwa 6500 Personen beteiligt waren.

Ein Höhentief verursachte extreme Regenfälle vom 19. bis zum Morgen des 20. in Vorarlberg und war in weiterer Folge für zahlreiche Überschwemmungen und Hochwasser verantwortlich. In Bregenz (Länge der Messreihe 86 Jahre) fielen dabei in 24 h 212 mm Regen, was in Bregenz einer Wiederkehrzeit von deutlich über 100 Jahren entspricht. Dieser neue Bundeslandrekord entspricht mehr als der gesamten Niederschlagsmenge, die in einem durchschnittlichen August fällt. Auch in Fraxern (192 mm, 43 Jahre) und Feldkirch (167 mm, 121 Jahre) wurden neue Stationsrekorde aufgestellt. Folge der Wassermassen waren zahlreiche überflutete Gebäude und Straßen, was zu einem Verkehrschaos führte, da Tunnel und Unterführungen gesperrt werden mussten, unter anderem die Rheintal-Autobahn A14. Auch im Bus- und Bahnverkehr kam es zu Einschränkungen. Der Gesamtschaden beläuft sich auf drei bis vier Millionen Euro.

Auch die anhaltende Trockenheit sorgte weiterhin für Probleme. So lieferten in mehreren Bundesländern Wasserkraftwerke aufgrund niedrigerer Pegelstände weniger Strom als üblich oder mussten sogar ganz vom Netz genommen werden. In manchen Gemeinden wurde die Wasserversorgung knapp, sodass es zu Sparmaßnahmen kam. Wie schon in den vorangegangenen Monaten kam es auch im August zu mehreren kleinen Waldbränden. Auch bei den Seen machte sich die weiterhin fortdauernde Trockenheit bemerkbar und so trocknete der Zicksee (Burgenland) zur Gänze aus. Dadurch kam es zu großem Fischsterben.

September: Keine bedeutenden Wetterereignisse

Die für einen September typischen Witterungsverhältnisse sorgten bis auf ein paar durch Regen ausgelöste Verkehrsbehinderungen und ein Starkregenereignis Mitte des Monats in Vorarlberg für keine außergewöhnlichen Wetterereignisse.

Oktober: Ernteauffälle durch Dürre werden sichtbar

Stabiles Hochdruckwetter, vor allem ab Mitte des Monats, sorgte kaum für wetterbedingte Schädereignisse. Im Oktober offenbarten sich jedoch die durch die ganzjährige Trockenheit im Osten und Süden Österreichs entstandenen Schäden in der Landwirtschaft. Besonders betroffen war Mais mit Ernteeinbußen von rund 20 %. Aber auch andere Pflanzen wie Soja und Zuckerrüben erlitten in Kärnten erhebliche Dürreschäden. In der Steiermark und in Kärnten zusammen belief sich der Schaden auf eine Höhe von rund 47 Millionen Euro. Ein gutes Erntejahr war es hingegen für Steinobst sowie Äpfel und Birnen.



November: Erste Schneefälle sorgen für Verkehrsbehinderungen

In einem größtenteils sehr mild verlaufenden November sorgten nur erste stärkere Schneefälle Anfang des Monats auf der Katschberg-Straße und der Tauern-Autobahn A10 bei St. Michael im Lungau (Salzburg) für Verkehrsbehinderung aufgrund hängengebliebener Lkw.

Dezember: Schneemangel in Skigebieten

Ein Kälteeinbruch Mitte des Monats sorgte mit Schneefällen, gefrierendem Regen und niedrigen Temperaturen für zahlreiche Verkehrsbehinderungen und Unfälle. Vom 12. bis 14. sorgten Temperaturen bis etwa -20 °C für rund dreimal so viele Pannenhilfeeinsätze wie an normalen Tagen. Hauptgrund waren Starthilfen für Autos, aber auch komplett von gefrierendem Regen überzogene Autos mussten vom Eis befreit werden. Meist wurde den Fahrzeugen Schneeglätte bzw. Glatteis zum Verhängnis. In Graz wurden am 15. zehn Schulbuslinien eingestellt, da aufgrund von Glatteis die Sicherheit der Schüler:innen nicht gewährleistet

war. Am 15. führte wahrscheinlich Frostsprengung zu einem Felssturz auf die Guntschacher Straße in Maria Rain (Kärnten). Dadurch wurden rund 30 Haushalte von der Außenwelt abgeschnitten. Sie waren nur noch mit einer Fähre über die Drau oder aus der Luft erreichbar. Der Bau eines Ersatzweges dauerte rund drei Wochen.

Auf die kalten Temperaturen folgte im letzten Monatsdrittel außergewöhnliches Tauwetter. Um Weihnachten kam es in Vorarlberg und Oberösterreich zu Starkregenergebnissen, die mehrere Keller überfluteten. Am 25. löste sich im Skigebiet Lech-Zürs eine Lawine, die eine Skipiste auf rund 500 m Breite verlegte. Insgesamt wurden zehn Personen getroffen und teilweise verschüttet. Zum Glück wurden nur vier Personen leicht verletzt. Die hohen Temperaturen sorgten für erheblichen Schneemangel in vielen Skigebieten. In manchen Gebieten öffnete man touristische Angebote des Sommerbetriebes wie Sommerrodelbahnen oder Liftfahrten für Wanderer und Wanderinnen.

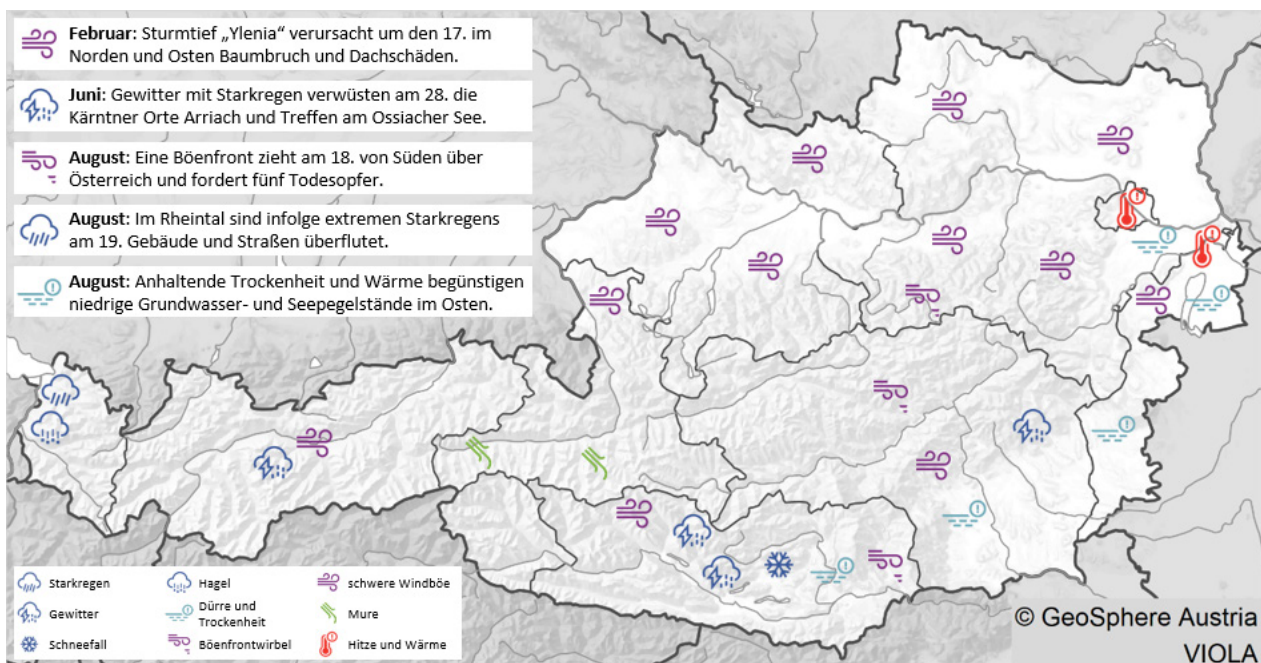


Abbildung 11: Räumlicher Überblick der bedeutenden Wetterereignisse im Jahr 2022 in Österreich.

2 Massiver Gletscherrückgang prägte das Jahr 2022

2.1 Der Rückgang der Gletscher im Jahr 2022

Die Witterungsverhältnisse im Jahr 2022 waren in vielerlei Hinsicht außergewöhnlich. Die stärkste Abweichung aus klimatologischer Sicht zeigte sich aber bei den österreichischen Gletschern. Die extremen Abschmelzbedingungen auf den Gletschern im Sommer 2022 haben ihren Ursprung in der Überlagerung mehrerer Prozesse. Der wesentliche Faktor für die Gletscherschmelze in den Alpen sind die Sommertemperaturen. Hier war der Sommer 2022 im Gebirge der viertheiße seit es Messungen gibt (HISTALP, 1851). Anders als in den letzten

heißen Sommern, 2017 oder 2019, war 2022 die Winterschneedecke im Hochgebirge geringmächtiger. Großteils lag sie 20 %, teilweise sogar 30 %, unter dem langjährigen Mittel. Dies führte dazu, dass die tiefgelegenen Gletscherbereiche bereits im Mai auszuapern begannen (schneefrei zu sein). Verstärkt wurde dieser Prozess noch durch mehrere Saharastaub-Ereignisse im März und April, welche die Schneeoberfläche rot anfärbten (siehe Abb. 12).



Abbildung 12: Durch Saharastaub gefärbte Gletscherflächen Mitte März am Hohen Sonnblick.

Diese Absenkung der Albedo (Reflexion der Sonnenstrahlung) führte zu erhöhter Energieaufnahme aus der Sonneneinstrahlung und damit zu einem rascheren Abschmelzen der Schneedecke. Bereits am 6. Juli war daher am Hohen Sonnblick auf 3100 m Seehöhe die gesamte Winterschneedecke abgeschmolzen, mehr als ein Monat früher als im bisherigen Rekordjahr 2003. In einem durchschnittlichen Jahr beträgt die Höhe der Schneedecke zu diesem Zeitpunkt noch rund 300 cm. Weiters wurde das rasche Schmelzen durch das Fehlen von Kaltlufteinbrüchen im Sommer verstärkt. Während sommerlicher Kaltlufteinbrüche kommt es im Hochgebirge regelmäßig zu Schneefällen bis hinunter auf etwa 2500 m Seehöhe. Diese dünne, frische Schneedecke auf den Gletschern ist sehr hell und reflektiert die Sonneneinstrahlung zu etwa 90 %. Dadurch wird die Gletscherschmelze für mehrere Tage unterbrochen. Im Sommer 2022 gab es lediglich ein solches Ereignis, um den 10. Juli mit Schneefall bis etwa 2800 m Seehöhe.

Faktisch sind die österreichischen Gletscher im Sommer 2022 vollständig ausgeapert (schneefrei). Damit erfolgte die Gletscherschmelze am gesamten Gletscher und der Gletscherrückgang betraf nicht nur die Gletscherzungen, sondern den ganzen Rand. Darüber hinaus sind viele Felsnadeln und Grate ausgeapert, wodurch die Länge der Grenzflächen zwischen Eis und Felsen verlängert wurde, was wiederum das Abschmelzen beschleunigte.

Der Eisverlust der Gletscher im Sommer 2022 beträgt in Österreich etwa 3 Meter Dicke und war in etwa doppelt so stark wie in mittleren Jahren der letzten Jahrzehnte. Eine Auswertung der Massenbilanzen für den Hintereisferner in Tirol (Abb. 13) zeigt anschaulich wie außergewöhnlich 2022 gewesen ist.

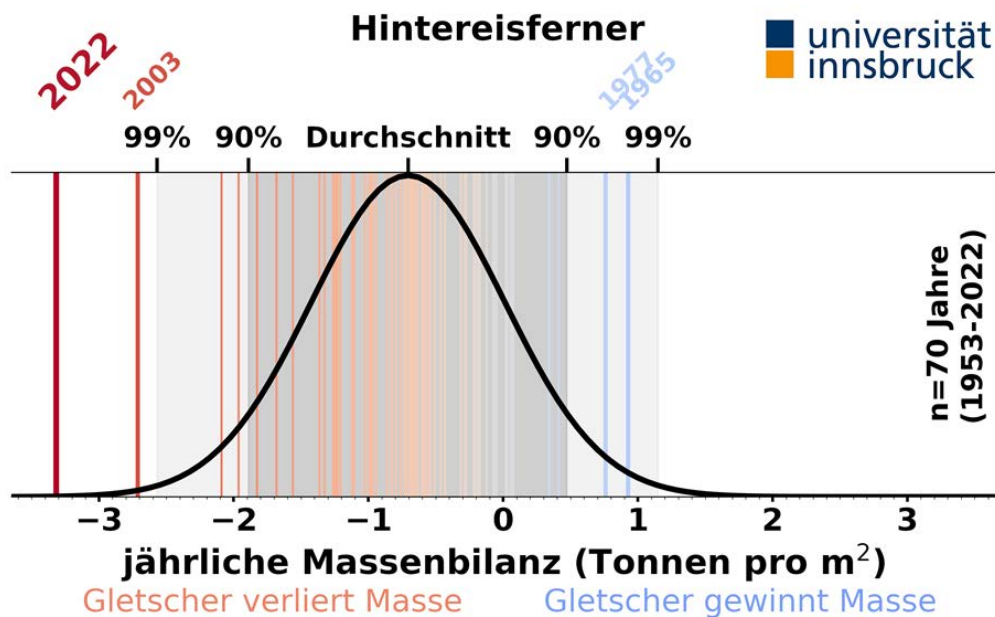


Abbildung 13: Massenbilanz des Hintereisferners von 1953 bis 2022. Das Jahr 2022 weicht mehr als 3 Standardabweichungen vom Mittelwert dieser Periode ab. Quelle: Schuster L., zur Verfügung gestellt von Fabien Maussion, Universität Innsbruck, 2023

Die Gletscherschmelze hat im Sommer 2022 wesentlich zur Stabilisierung der Abflüsse bei hochalpinen Flüssen beigetragen. Während etwa im Oberlauf der Sill, einem nicht vergletscherten Einzugsgebiet in Tirol, im Juli 2022 nur rund 73 % des Normalabflusses erreicht wurde, betrug dieser im Oberlauf der Ötz, einem sehr stark vergletscherten Nachbartal, sogar um 4 Prozent mehr als im langjährigen Durchschnitt. Dieses unterschiedliche Abflussverhalten wirkte sich auch auf die Wassertemperaturen aus. So waren die Wassertemperaturen im Unterlauf der Ötz im Juli zwar auch zu warm, jedoch traten keine neuen Rekorde auf und die maximale Abweichung vom langjährigen Mittel an Einzeltagen betrug rund 2 °C. Im Unterlauf der Sill hingegen wurden im Juli neue Tagestemperaturrekorde erreicht und die maximale Abweichung vom langjährigen Mittel an Einzeltagen betrug rund 5 °C.

In den letzten Jahrzehnten wurde der massive Gletscherrückgang in den Alpen erlebbar und speziell in Österreich ist er nicht mehr aufzuhalten, hierfür ist der anthropogene Klimawandel schon zu weit fortgeschritten. Betrug die österreichische

Gletscherfläche bei der ersten Gletscherinventur 1969 noch 545,6 km², so schrumpfte sie bis zur zweiten Gletscherinventur 1997 auf 470,7 km² und bis zur dritten, welche hauptsächlich zwischen 2006 und 2009 erfolgte, auf 414,1 km². [5] Die aktuellste Gletscherinventur stammt aus dem Jahr 2015 [6] mit einer Gletscherfläche von 329 km². Die teilweise sehr heißen und trockenen Sommer seit 2015 haben der österreichischen Gletscherfläche sicherlich sehr stark zugesetzt, sodass die aktuelle Gletscherfläche bereits wesentlich kleiner ist.

Klimaprojektionen für die Gletscher im Alpenraum zeigen ein düsteres Bild (Abb.14). Innerhalb der nächsten 20 Jahre wird sich das Gletschervolumen der Alpen halbieren und dies unabhängig vom unterstellten Klimaszenario. Das bedeutet, diese Entwicklung können wir nicht mehr verhindern. Lediglich wenn die Pariser Klimaziele erreicht werden und die globale Erwärmung unter +2 °C bzw. +1.5 °C gehalten wird, bleiben knapp 20 Prozent der derzeitigen Eismassen erhalten. Dies aber überwiegend in den Westalpen in Seehöhen um und über 4000 m.

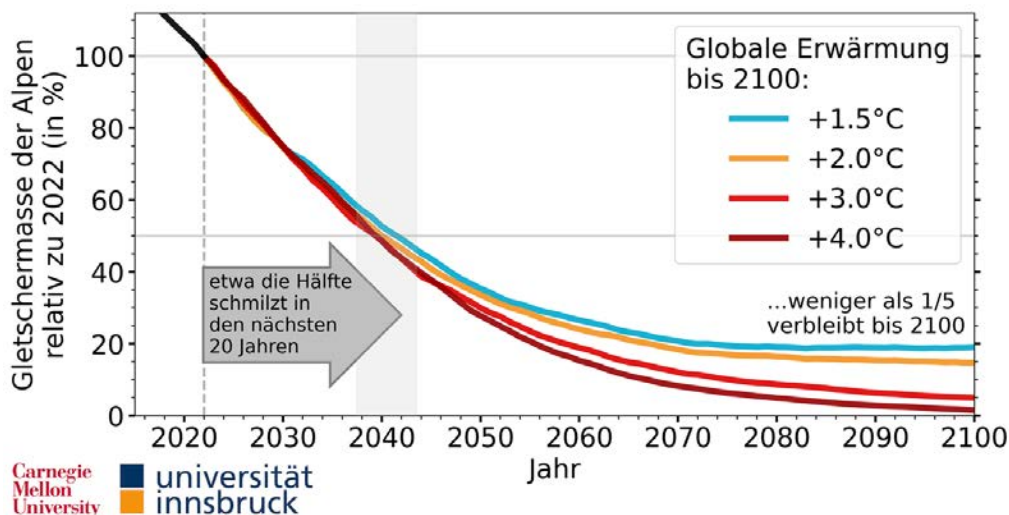


Abbildung 14: Klimaszenarien für das Eisvolumen der alpinen Gletscher. Innerhalb der nächsten 20 Jahre halbiert sich das Gletschervolumen unabhängig vom verwendeten Klimaszenario. Quelle: Schuster L., zur Verfügung gestellt von Fabien Maussion, Universität Innsbruck, 2023

Extremjahre wie 2022 beschleunigen den Prozess des Gletscherrückganges jedoch enorm und es ist daher nicht auszuschließen, dass die Entwicklung sogar noch rascher voranschreitet. Wir müssen uns daher bereits heute intensiv mit den Folgen

nicht nur des Rückganges, sondern auch des totalen Verlustes der Gletscher auf natürliche Prozesse, Ökosysteme und menschliche Aktivitäten, auseinandersetzen, um die Auswirkungen möglichst gering zu halten.

2.2 Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf den Wasserkreislauf und nachgelagerte Nutzungen

Auswirkungen auf den Wasserkreislauf

Gebirgslandschaften spielen durch die Schnee- und Gletscherschmelze eine bedeutende Rolle im Wasserkreislauf, da sie während der kalten Jahreszeit Wasser in Form von Schnee und Eis speichern und dieses in der warmen Jahreszeit als Schmelzwasser wieder abgeben. Während die Schneedecke einen jährlichen Zwischenspeicher darstellt, der über den Winter aufgebaut und im Frühsommer geschmolzen wird, ist im Gletschereis der Niederschlag über Jahrzehnte bis Jahrhunderte gespeichert. Befindet sich ein Gletscher im Gleichgewicht, so schmilzt im Zehrgebiet des Gletschers während sommerlichen Hitzewellen genauso viel Eis, wie Schnee im Nährgebiet des Gletschers während des ganzen Jahres akkumuliert wird. Die **Eisschmelze an den Gletscherzungen** stellt sicher, dass der ganze Jahresniederschlag, der auf den Gletscher fällt, im selben Jahr abfließt und beeinflusst damit die Wasserqualität und Fließgewässerökologie in den Gebirgsbächen und nachgelagerten Flüssen. Der Begriff „**Gletscherspende**“ bezeichnet meist nur den Abfluss, der durch den Gletscherrückgang entsteht. Schwinden die Gletscher, wird der Gesamtabfluss des Einzugsgebietes um diesen Beitrag erhöht. Diese Gletscherspende ist jedoch im Vergleich zum Gesamtabfluss der Gletscher gering.

Aktuell gibt es in Österreich knapp 900 Gletscher mit einer Gesamtfläche von rund 330 km² (Stand 2015) und einem gespeicherten Eisvolumen von 11 km³. [7] Umgerechnet entspricht dies etwa **10 % der in Österreich gespeicherten Wasserreserven**. [8] Die meisten Gletscher finden sich in den Zentralalpen, wobei ihre Zahl von Osten nach Westen ansteigt. Am stärksten vergletschert sind die Öztaleralpen. Der größte Gletscher – die Pasterze mit einer Fläche von rund 15 km² (Stand 2015) – liegt in der Glocknergruppe in Kärnten.

Betrachtet man das **Gletschereis als Wasserressource** auf nationaler Ebene, so spielt es auf den ersten Blick keine große Rolle. Wenn man das Eisvolumen in Flüssigwasser umrechnet und auf das gesamte Staatsgebiet verteilen würde, entspricht es knapp einem **Fünftel des mittleren Jahresniederschlages Österreichs**. Diese Zahl ist jedoch räumlich und zeitlich zu relativieren.

Zeitlich ist die Eisschmelze auf die Sommermonate konzentriert, weshalb sie – gerade unter der Annahme zukünftig größerer Häufigkeit und Intensität von Trockenperioden – eine relativ größere Bedeutung für die Wasserführung der Flüsse bekommen wird als jetzt. Der Abfluss eines Einzugsgebietes im Gebirge ist typischerweise nival geprägt – also vom Auf- und Abbau der Schneedecke.



© Gerhard Karl Lieb

In den Hochsommermonaten Juli und August, wenn die Schneedecke geschmolzen ist und große Bereiche der Eisflächen schneefrei sind und immer noch ein hohes solares Strahlungsangebot verfügbar ist, ist der Abfluss von den Gletschern am größten. **Gegenwärtig sind die Abflüsse aus dem Hochgebirge überdurchschnittlich hoch.** Die Gletscher können in heißen, trockenen Sommern durch die Eisschmelze im Zehrgebiet und zusätzlich durch das Aufbrauchen ihrer Eisreserven ein gravierendes Trockenfallen der Gebirgsflüsse verhindern. Der Einfluss der Eis- und Schneeschmelze im Gebirge reicht über die Zubringer weit in das umliegende Tiefland und die Hauptflüsse. Unsere größten und längsten Ströme, die Donau, die Drau, der Inn, die Mur, die Enns, die Salzach, die Gurk und die Traun, werden allesamt vom Wasser der Alpengletscher gespeist.

Die Schnee- und Eisschmelze sorgt im Sommer in niederschlagsarmen Zeiträumen für einen zuverlässigen und ausgeglichenen Abfluss im Gewässernetz. Durch das Verschwinden der Gletscher wird die Bezuschussung der Fließgewässer in Trockenzeiten im Hochsommer weitgehend ausbleiben. Die Wasserführung der Flüsse hängt dann allein vom stark veränderlichen Niederschlagsangebot ab. [9]

Welche Rolle das allmähliche Ausbleiben des Eiswassers in einzelnen Bereichen des Gewässernetzes spielen wird, hängt von der Entfernung von den Gletschern ab. Die Eisschmelze hat eine umso größere Bedeutung für Fließgewässer, je größer der Flächenanteil der Vergletscherung im Einzugsgebiet der Gewässer ist. Besonders groß ist der Gletscherwasser-Anteil im hinteren Ötz-, Stubai-, Zillertal und den Tauern. Aus diesen Einzugsgebieten wird der Inn – insbesondere im Abschnitt zwischen Landeck und Innsbruck – und in bescheidenerem Maße auch die Salzach gespeist. (siehe Tab. 3).

Betrachtet man das **Einzugsgebiet der oberen Donau**, so nimmt das Gebirge mit 29 % der Fläche einen erheblichen Anteil an diesem ein. Etwa 550 Gletscher liegen im Einzugsgebiet der Donau. Forscher:innen haben mithilfe von Simulationen errechnet, dass die Abnahme der Gletscherabflüsse an allen Pegelstellen an Inn und Salzach (die in die Donau münden) sowohl einen Rückgang der Jahressumme der Abflüsse als auch der maximalen Abflüsse zur Folge haben wird. Die Abnahme der jährlichen Fracht beträgt ca. 15-20 % in Einzugsgebieten wie Vent oder Huben, ca. 10 % inneralpin am Inn oder der Salzach und weniger als 5 % außerhalb der Alpen. [9]

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	davon Gletscher [%]	Mittlerer hydrolog. Gebietsabfluss [mm]*)	Gebietsabfluss 1991-2000 modelliert [mm]	Modellierte Eisschmelze [mm]	Anteil [%] am Abfluss
Vent/Rofenache	98	35	1438	1367	505	36,9
Huben/Öztaler Ache	517	17	1220	1149	305	26,5
Innsbruck/Inn	5792	4	893	939	79	8,4
Oberaudorf/Inn	9715	3	993	1026	67	6,5
Wasserburg/Inn	11980	2,4	942	998	54	5,4
Achleiten/Donau	76660	0,5	584	639	10	1,6

**) Mittelwerte unterschiedlich langer Zeiträume. Quellen: Hochwassernachrichtendienst Bayern bzw. Hydrographischer Dienst des Landes Tirol*

Tabelle 3: Charakteristiken der untersuchten Einzugsgebiete und Anteil der Eisschmelze am Jahresabfluss, Quelle [9]

Auch der **Rhein** wird stark durch das Schmelzwasser von Schnee und Gletschern aus den Alpen geprägt. Untersuchungen dazu liegen aus unseren Nachbarländern der Schweiz und Deutschland vor. Während extremer Niedrigwasserereignisse können die **hohen Tagesbeiträge der Gletschereisschmelze bis zu einem Drittel des Abflusses in Basel** ausmachen [10]. Im extrem heißen Sommer im Jahr 2003 stammten 55,0 % des am Pegel Bern gemessenen Augustabflusses aus der Gletscherschmelze, 700 km flussabwärts, in der niederländischen Stadt Lobith, betrug der Gletscheranteil am Abfluss noch 14,3 %. [11]

Die Bedeutung der Blockgletscher

Neben den Gletschern hat auch der **Permafrost** im Gebirge – hier vor allem die sog. Blockgletscher – Einfluss auf den Wasserkreislauf. Unter Permafrost versteht man den Untergrund, dessen Temperatur über mindestens 2 Jahre unter 0 °C bleibt. Permafrost tritt in den Alpen in unterschiedlicher Form auf, u. a. als Blockgletscher, das sind lappen- bis zungenförmige Körper aus gefrorenem Lockermaterial (Hangschutt, Moränen) und Eislinen oder Eiskörpern, die sich deutlich von ihrer Umgebung abheben und sich langsam hangabwärts bewegen. [12] In ihnen ist der weitaus größte Anteil des Permafrost-Eises vorhanden, was sie zu einem bedeutenden hydrologischen Faktor im Hochgebirge macht. Man schätzt das Eisvolumen intakter Blockgletscher, die etwa 123 km² Fläche (Stand 2021) bedecken, auf 0,93 Gigatonnen. Dies entspricht 8,3 % des für die Gletscherinventur der österreichischen Alpen geschätzten Eisvolumens. [13] Während das Gletscherschmelzwasser aufgrund von Trübung und im Wasser gelösten Schwebstoffen nicht direkt für die Trinkwasserversorgung nutzbar ist, ist bei Blockgletscherquellen auch eine direkte Nutzung denkbar, wenn eine gewisse hydrochemische Belastung ausgeschlossen werden kann. **Blockgletscher fungieren zudem als Grundwasserspeicher von alpinen Quellgebieten.** Als Zwischenspeicher von Regen-, sowie Schmelzwasser, Eis und Schnee haben sie eine bedeutende Pufferwirkung und können einerseits die Ausbreitung von Hochwasser nach Starkniederschlagsereignissen verzögern und andererseits die Grundströmung während Trockenperioden und Winterperioden aufrechterhalten.

Blockgletscher sind aufgrund ihrer groben Schuttdecke etwas widerstandsfähiger gegen die Klimaerwärmung als Gletscher – sie schmelzen langsamer. Man geht daher davon aus, dass sie den Verlust der Wasserspende durch die Gletscher etwas abpuffern können. Jedenfalls verdienen sie künftig wohl mehr Aufmerksamkeit im Wassermanagement. [7]

Entstehung von Gletscherseen

Der starke Massenverlust und Rückgang der Alpengletscher hat eine weitere Folge – die Entstehung von Gletscherseen. 95 % der mehr als 1.400 Hochgebirgsseen in Österreich sind durch Gletscher entstanden. In den letzten zehn Jahren hat sich auch an Österreichs größtem Gletscher – der Pasterze – ein etwa 35 Hektar großer Gletschersee gebildet. **Die Geschwindigkeit, mit der neue Gletscherseen entstehen, hat in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen.** Ergebnisse des Forschungsprojektes FutureLakes [14] der Universität Salzburg zeigen, dass im Bereich der heutigen Gletscher 40 – 70 weitere Seen entstehen könnten. [15,16] Wie viele dieser Gewässer bestehen bleiben, hängt unter anderem von ihrer Größe und Form ab. Da das Schmelzwasser auch Gestein und Sedimente in den Seen ablagert, können kleine neue Gewässer schon innerhalb weniger Jahre damit aufgefüllt werden und wieder verschwinden.



© Gerhard Karl Lieb

Den neuen Hochgebirgsseen kann in Zukunft vielerlei Bedeutung zukommen und sie bergen – wie auch schon bestehende Gletscherseen – damit auch einiges an Konfliktpotenzial. Einerseits kommt ihnen als schönes Landschaftselement und Wanderziel eine ästhetische bzw. touristische Bedeutung zu. Als Wasserspeicher und Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen sind sie auch ökologisch wichtig. Andererseits können sie als Stauseen für die Energieproduktion durch Wasserkraft relevant sein. Zusätzlich könnten die neu entstandenen Seen eine weitere wichtige Funktion als Wasserspeicher bzw. für die Wasserversorgung erfüllen, um einen Wassermangel der Flüsse auszugleichen. Auf ihre Bedeutung für die Entstehung von Naturgefahren wird weiter unten noch eingegangen.

Bedeutung des Gletscherrückgangs für Ökologie und Biodiversität

Langfristig muss man davon ausgehen, dass der Rückgang der Gletscher zu einem **Verlust der Biodiversität** führen wird. Das Schwinden der Gletscher schafft zunächst zwar neuen Lebensraum für hochspezialisierte Pflanzenarten, die die neuen Flächen besiedeln und auf diese Weise Lebensraum für andere Pflanzen schaffen. Die spezialisierten Gebirgspflanzen sind jedoch darauf angewiesen, dass die Gletscher immer wieder neue Felsformationen freigeben. Denn sobald sie günstige Bedingungen für weniger spezialisierte Arten geschaffen haben, werden sie von diesen, meist konkurrenzstärkeren Arten, verdrängt. In einem Forschungsprojekt, in dem vier Gletscher in den italienischen Alpen untersucht wurden, wurde festgestellt, dass die Pflanzenvielfalt durch den Rückzug der Gletscher in den Hochalpen zunächst größer werden wird, durch das vollständige Abschmelzen letztlich allerdings mehr als ein Fünftel der Pflanzenarten verschwinden wird. [17]

Der Gletscherschwund verändert auch die **Ökologie von Gebirgsbächen**. Durch den ständigen Zustrom kalten Wassers und das Verhindern besonders niedriger Wasserstände, werden die Temperaturen der Gebirgsbäche und -flüsse gesenkt. Dadurch wird die Gefahr eines übermäßigen Algenwachstums und damit von Überdüngung und Sauerstoffarmut der Gewässer im Sommer gesenkt. Gleichzeitig sind die Gewässerlebewesen an bestimmte Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse angepasst. Aus langfristiger Perspektive werden durch den Wegfall des kühlen Schmelzwassers

kälteliebende Arten zurückgedrängt, während sich wärmeliebende Arten stärker ausbreiten können. **Steigende Temperaturen** können zudem die **Ausbreitung von Parasiten, neu eingewanderten Arten und Infektionskrankheiten** erhöhen. [18]

Bedeutung des Gletscherrückgangs für die nachgelagerte Nutzung der Flüsse

Führen die Flüsse in Zukunft weniger Wasser, so hat das Auswirkungen auf alle nachgelagerten Nutzungen, von der Energieerzeugung aus Wasserkraft, über die Kühlwassernutzung großer Unternehmen, die Trinkwasserversorgung bis hin zu Entnahmen für die Landwirtschaft. Punktuell und temporär kann es bei ausbleibenden Sommerniederschlägen künftig zu Engpässen und Nutzungskonflikten kommen. Einen weiteren Faktor stellt ein reduzierter Verdünnungseffekt für den Eintrag von Abwässern aus Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft dar. Dies kann durch Wechselwirkungen mit hohen Temperaturen zu ökologischen Problemen führen, wie das Fischsterben in der Oder im Sommer 2022 anschaulich gezeigt hat.

Energiewirtschaft

Mittelfristig (2021-2050) ist für Österreich mit keiner signifikanten Veränderung des Wasserkraftpotentials durch den Rückgang der Gletscher zu rechnen, da einerseits die Wasserspende aus der Gletscherschmelze in den kommenden Jahrzehnten aufgrund der zunehmenden Temperaturen noch zunehmen kann (die höheren Temperaturen führen zu höheren Schmelzwasserraten, obwohl die Fläche der Gletscher abnimmt) und sie andererseits gegenüber dem Niederschlag (Schnee und Regen) nur eine untergeordnete Rolle spielt. [19] Die momentan vorherrschenden Bedingungen sind also für die Wasserkraftnutzung eher günstig, die Kraftwerke profitieren von der starken Gletscherschmelze. **Sind die Gletscher vollständig abgeschmolzen, fällt diese Gletscherspende jedoch weg. Zusätzlich prognostizieren Klimawandelszenarien in ganz Österreich mit Ausnahme des äußersten Nordostens eine Abnahme der Abflüsse im Sommerhalbjahr**, mit den größten Abnahmen für Westösterreich mit 30 – 50 %. [20] Die verminderten Sommerabflüsse resultieren unter anderem aus einer erhöhten Verdunstung und der verfrühten und niedrigeren Schneeschmelze im Vergleich zu heute. Dem gegenüber steht eine Zunahme der Abflüsse im Winter, d. h. es kommt zu einer Vergleichmäßigung des Jahresganges.

Durch die verminderten Sommerabflüsse ist im Sommer in Zukunft mit einer häufigeren Unterschreitung der für die Energiewasserwirtschaft kritischen Pflichtwassermenge zu rechnen. [21]

Im Oberlauf des Inn, der Salzach und der Drau, kann der Abfluss aus der zunehmenden Eisschmelze im Sommer mittelfristig diese prognostizierten Abnahmen reduzieren. So kann beispielsweise für den Inn bis Oberaudorf der prognostizierte Abflussrückgang im Sommer für die Periode um 2075 durch den Beitrag der Eisschmelze von -42 % auf -31 % korrigiert werden. Die Erhöhung der Gesamterzeugung aus Wasserkraft in Österreich durch den Beitrag der Gletscherschmelze erreicht ihr Maximum, je nach simuliertem Szenario, zwischen 2050 und 2070 und beträgt zwischen 0,6 % und 1,1 % der Gesamterzeugung. [19]

Langfristig geht dieser Beitrag durch den Verlust der Gletscher verloren. Die Abb. 15 verdeutlicht den Rückgang der Gletscherfläche im Einzugsgebiet der vier großen alpinen Flüsse Rhône, Rhein, Donau und Po (unter zwei verschiedenen Klimawandel-Szenarien).

Besonders die Rhône und der Po werden unter dem Wegfall der Gletscherschmelze leiden. Denn ihr Abflussregime ist mediterran geprägt, also durch niedrigere Sommerniederschläge. In beiden Flüssen ist der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss höher als bei Donau oder Rhein (an der Rhône liegt der Anteil der Gletscherschmelze am Jahresabfluss bei 15 %). [22] Ihr Gesamtabfluss wird also am stärksten abnehmen. [7]

Die verschiedenen Wasserkraftwerkstypen reagieren unterschiedlich sensibel auf dieses Zukunftsszenario. Speicherkraftwerke nutzen große Speicherseen, für die vor allem die jährliche Wasserbilanz ausschlaggebend ist. Ein niederschlagsreicher Winter, der die Becken entsprechend auffüllt, kann sommerliche Dürrephasen ausgleichen. Auch Pumpspeicherkraftwerke sind weniger sensibel, da sie das Wasser für die Nutzung hin- und her pumpen können. Laufkraftwerke an den Flüssen sind jedoch davon abhängig, wie viel Wasser in ihrem Einzugsgebiet abfließt. Aber auch Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke in hochgelegenen Einzugsgebieten stehen vor Herausforderungen.

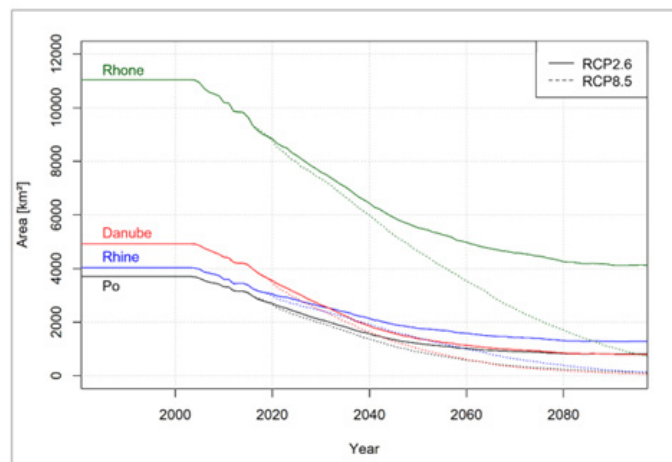


Abbildung 15: Entwicklung der kumulierten Gletscherfläche im Einzugsgebiet von vier großen alpinen Flüssen, Quelle: [7]

Zum einen führt der Rückgang der Gletscher zu einer Wasserknappheit. Zum anderen wird durch den Rückzug der Gletscher viel lockeres Gesteinsmaterial frei, das teilweise Abflussbehinderungen verursachen kann und teilweise in die Stauseen transportiert wird, was zu deren Verlandung führen kann.

Im Einzugsgebiet der oberen Donau befinden sich 140 große Wasserkraftwerke (mit mehr als 5 MW Leistung), 118 davon sind Laufkraftwerke. Die größten Speicherkraftwerke befinden sich in den Alpen, die großen Laufkraftwerksanlagen mit einer Leistung von mehr als 60 MW hauptsächlich entlang des Inns bzw. entlang der Donau nach der Einmündung des Inns in Passau. Diese Zahlen unterstreichen die Bedeutung des aus den Bergregionen stammenden Abflusses für die Wasserkraft-Produktion entlang der Donau. [7]

Trinkwasser, Kühlwasser und Schifffahrt

Trinkwasserquellen sind mit Ausnahme einiger Blockgletscherquellen nicht vom Gletschereis abhängig. Das Gletscherschmelzwasser ist aufgrund von Trübung und Schwebstofffracht nicht direkt für die Trinkwasserversorgung nutzbar, kann aber für die Grundwasserneubildung in Alpentälern und deren Vorland relevant sein. Lokal und temporär kann es durch den Wegfall der Gletscherschmelze zu Engpässen kommen; im Hochgebirge vor allem bei einzelnen Hütten, deren Wasserbedarf aktuell vom Schmelzwasser der Gletscher gedeckt wird, in den Alpentälern vor allem durch zunehmende Nutzungsansprüche (zum Beispiel Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft). Durch eine Zunahme der Temperaturen in den Oberflächengewässern sowie im Grundwasser ist zudem mit einer Zunahme von Qualitätsproblemen zu rechnen. [19]

Geringere Abflüsse der Fließgewässer, verbunden mit erhöhten Wassertemperaturen, führen außerdem auch zu einer **verminderten Kühlleistung von Fließgewässern**. Für Unternehmen im Bereich der Energieversorgung, Metallherzeugung und -bearbeitung oder der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, die große Mengen an Wasser für die Kühlung ihrer Anlagen benötigen, erhöht sich dadurch der Kühlwasserbedarf, um die gleiche Kühlleistung zu erzielen, deutlich.

Für die Ansiedlung von Industriebetrieben und -unternehmen ist die Verfügbarkeit von ausreichend Wasser in guter Qualität ein Standortfaktor. Große Kühlwassermengen werden in der Regel durch direkte Entnahmen aus Oberflächengewässern gedeckt und ortsnah in diese rückengeleitet. Die Hauptwirtschaftsräume des produzierenden Bereichs liegen im Rheintal, Unterinntal, um Salzburg-Hallein, in Linz, in der Traun-Ager-Furche, bei St. Pölten-Traisental, in Wien und im Wiener Umland sowie im südlichen Wiener Becken, außerdem in der Mur-Mürz-Furche, im Klagenfurter Becken, um Eisenwurzen, im Grazer Becken sowie in kleinerem Ausmaß im oberen Waldviertel. Bei den gemeldeten Oberflächengewässerentnahmen entfallen auf 26 Betriebe 1643 Mio m³ Wasser pro Jahr. Bei der Rückleitung des entnommenen Wassers, das meist nahe der Entnahmestelle in annähernd derselben Menge in den Wasserkörper erfolgt, ist der behördlichen Auflage Folge zu leisten, dass die Rücklaufftemperatur unter einem bestimmten Grenzwert einzuhalten ist. Die Autor:innen der Studie **Wasserschatz Österreich** aus dem Jahr 2021 gehen davon aus, dass bei einem Anstieg der Nutzungen und einem Sinken der Wassermengen künftig eventuell nicht alle Nutzungsbedürfnisse für den produzierenden Bereich bedient werden können. Sie empfehlen, weiterführende Untersuchungen zum Themenbereich Kühlwasserentnahmen und Wassertemperaturen durchzuführen. [23]

Eine Abnahme der Abflüsse in den Fließgewässern kann sich auch nachteilig auf die **Schifffahrt** auswirken. Niedrigwasser-Ereignisse im Sommer 2022, die üblicherweise vor allem in den Herbst- und Wintermonaten auftreten, führten zu erheblichen Beeinträchtigungen der Schifffahrt. Auch wenn die Lage in Österreich verglichen mit anderen Ländern noch eher entspannt war, führten die Niedrigwasserstände auch bei uns dazu, dass Frachtschiffe temporär nicht die volle Ladung transportieren konnten. Die Ausflugsschifffahrt war in Österreich nicht betroffen – Probleme gab es aber bei unseren Nachbarländern, in Bayern, Ungarn und vor allem Rumänien.

2.3 Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf die Sicherheit im alpinen Raum

Der drastische Rückgang der Gletscher sowie der Rückgang des Permafrostes führen zu einer Zunahme der Häufigkeit und Größe von gravitativen Naturprozessen, allen voran Steinschläge, Fels- und Bergstürze, Eisbrüche sowie Murenabgänge, die zur Gefahr für Personen und Infrastruktur werden können. Siedlungen, Verkehrswege und touristisch intensiv genutzte Flächen (z. B. Skipisten) sind durch Schutzmaßnahmen bestmöglich abgesichert. Durch die Zunahme dieser Prozesse werden jedoch die Kosten für Schutzmaßnahmen und Absicherung der Infrastruktur steigen. Für Personen, die sich auf Bergwegen und Routen abseits der gesicherten Areale bewegen, nimmt das Sicherheitsrisiko zu. ^[24]

Zunahme von Naturgefahren zu erwarten

Sowohl der Gletscher- als auch der Permafrost-Rückgang resultieren darin, dass für gravitative Prozesse mehr Material zur Verfügung steht. Dort, wo sich die Gletscher zurückziehen, kommen meist große Schuttfelder und Moränenhänge¹ zu Tage. In diesen Gebieten ist mit einer erhöhten **Steinschlag- und Felssturzgefahr** zu rechnen. Dies konnte bereits durch Untersuchungen am Kitzsteinhorn untermauert werden. Seit 2011 werden hier detaillierte Aufzeichnungen geführt, insgesamt wurden rund 270 Steinschlagereignisse festgestellt. Durch den aktuellen Gletscherrückgang freigelegte Felswandbereiche zeigten dabei eine rund acht Mal höhere Aktivität als Felswandbereiche, die vom aktuellen Gletscherrückgang nicht beeinflusst wurden. ^[25]

Das Naturgefahrenpotential im Umfeld der schmelzenden Gletscher ist relativ gut vorher-sagbar. Anders gestaltet sich dies jedoch im Permafrost, der in der Regel nicht direkt sichtbar ist. Hier muss im Bedarfsfall mit aufwändigen

Untersuchungsmethoden geprüft werden, ob der Untergrund unter Permafrost-Bedingungen steht oder nicht. Taut das Eis im Untergrund auf, ist ein Einsinken der Oberfläche die Folge. Gleichzeitig lockert sich das Gesteinsmaterial, das im Eis gebunden war. Hänge und Grate, die durch das Eis gefestigt waren, werden instabil. Bei entsprechender Steilheit des Geländes können Steinschläge und Felsstürze vermehrt auftreten. Diese Massenbewegungen, genauso wie das Einsinken des Geländes, können für Schutzhütten und touristische Infrastruktur (z. B. Seilbahnen) zum Problem werden. Betroffen sind vor allem die Höhenstufen über 2500 m.

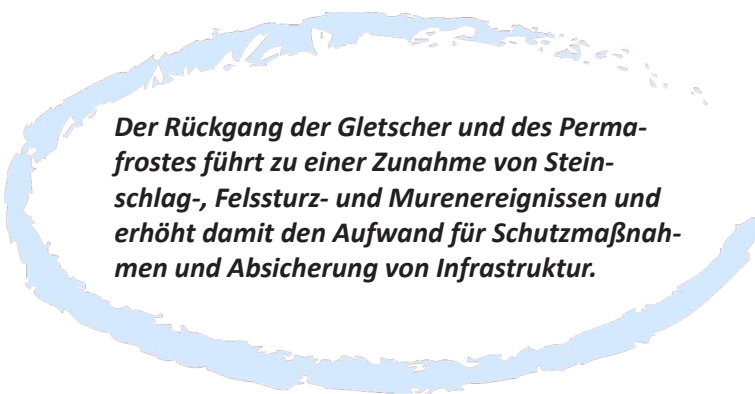
Gleichzeitig nimmt durch die Zunahme des zur Verfügung stehenden Lockergesteins auch die **Geschiebefracht in den alpinen Bächen und Flüssen** zu. In Zusammenhang mit starken Niederschlägen können dadurch vermehrt **Muren** ausgelöst werden, wodurch auch tiefergelegene Regionen betroffen sind.

Zusätzlich hat die Gletscherschmelze auch Auswirkungen auf die Naturgefahr Hochwasser. Auch wenn die Gletscher eine **Hochwassersituation** nicht auslösen, können sie diese **verschärfen**. Dies zeigt sich etwa am Beispiel der Rofenache bei Vent: im Hochsommer, bei maximaler Gletscherschmelze, werden dort infolge der relativ starken Vergletscherung etwa ein- bis fünfjährige Hochwasserspitzen erreicht. ^[26] Verschärft wird die Situation vor allem bei sommerlichen Gewittern, wenn der Niederschlag auf einen nahezu schneefreien Gletscher fällt und dadurch sehr rasch in den Abfluss gelangt. ^[20] Durch die kleiner werdenden Gletscherflächen wird diese Gefahr in Zukunft jedoch abnehmen.

¹ Moränen sind die Gesamtheit des von einem Gletscher transportierten Materials, also ein Gemisch aus Sand, Kies, Steinen und Ton.

Dass auch die Gletscher selbst zur Gefahr werden können, zeigt ein **Gletschersturz am 3. Juli 2022 in den Dolomiten** in Norditalien, bei dem elf Personen ums Leben kamen. Durch das Abschmelzen und Ausdünnen der Eisschicht können wassergefüllte Hohlräume im Gletscher entstehen, die dazu führen, dass sich spontan größere Teile des Gletschers vom Untergrund lösen. Auch in Österreich wurde im Herbst 2021 erstmals eine Unterhöhlung der Gletscher festgestellt [27]. Da diese Situation für Österreich neu ist, gibt es noch keine wissenschaftlichen Studien, die das Gefahrenpotential durch Gletscherabbrüche einschätzen. Auch diese Gefahr wird jedoch mit dem raschen Abschmelzen der Gletscher an Relevanz verlieren.

Auch Gletschertseen können potentielle Gefahrenquellen darstellen. Durch große Niederschlags- oder Felssturzereignisse kann es zu Ausbrüchen der Seen kommen. Diese Ausbrüche können als Flutwelle oder Mure großes Zerstörungspotential mit sich bringen. In Österreich gibt es einige historische Beispiele für **Gletschertseeausbrüche** im 16. und 17. Jahrhundert, wo es mehrmals zu Überschwemmungen durch den Gletschertsee am Vernagtferner im Ötztal kam. Selbst in Innsbruck waren die Ausbrüche noch durch höhere Wasserstände des Inns spürbar. Aktuell ist die Wahrscheinlichkeit solcher Ausbrüche eher gering, sie könnte jedoch im Hinblick auf die vorausgesagten Veränderungen durch den Klimawandel zunehmen. [28,29]



**Der Rückgang der Gletscher und des Permafrostes führt zu einer Zunahme von Stein-
schlag-, Felssturz- und Mureneignissen und
erhöht damit den Aufwand für Schutzmaßnahmen
und Absicherung von Infrastruktur.**

2.4 Auswirkungen des Gletscherrückgangs auf den Tourismus

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Tourismus im Allgemeinen und speziell auf den Alpentourismus sind beträchtlich. Gerade bei den Gletschern manifestieren sich diese Auswirkungen ganz augenfällig. Als attraktive Landschaftselemente bilden sie einen wesentlichen Bestandteil des natürlichen touristischen Angebotes im Hochgebirge. Vor allem in Tiroler Alpentälern stellen Gletscher eine bedeutende Ressource für die Tourismusindustrie und insbesondere den Skitourismus dar. [30]

Allen voran sind durch den Gletscherrückgang natürlich die **Gletscherskigebiete mit zunehmenden Herausforderungen konfrontiert**. Das Ausapern von Felsen führt dazu, dass bestehende Skipisten verschmälert oder unterbrochen werden. Vor allem der Herbstbetrieb auf den Gletschern ist mit höherem Aufwand verbunden. Der Gletscherschwund bedeutet für Gletscherskigebiete einen erhöhten laufenden technischen Anpassungsaufwand zum Schutz der am Gletscher errichteten Infrastruktur. [31,32] Am **Dachsteingletscher** wurde der **Alpin-Skibetrieb nach dem Sommer 2022**

eingestellt. Der Rückzug des Gletschereises führte dazu, dass große Gletscherspalten und Klüfte entstanden und die Stützen der Schlepplifte nicht mehr ausreichend gesichert waren. Um den Skibetrieb aufrecht erhalten zu können, hätten diese versetzt werden sowie einige Felsen, die vom Eis auf den Pisten freigelegt wurden, weggesprengt werden müssen.

Sommerskifahren auf den Gletschern spielt touristisch nur eine untergeordnete Rolle. In Österreich bieten derzeit nur der Hintertuxer und der Mölltaler Gletscher über den Sommer hinweg Skibetrieb an. In der Wintersaison stellen die Gletscherskigebiete jedoch durch ihre hohe Schneesicherheit und die Möglichkeit zur Saisonverlängerung einen wichtigen Teil des Angebotes dar. Die Nachfrage in schneearmen Wintern verlagert sich zunehmend in Richtung Gletscher und hoch gelegene Skigebiete. In sechs von acht österreichischen Gletscherskigebieten wurde festgestellt, dass die Anzahl der Übernachtungen in schneereichen Wintern unter-, in schneearmen Wintern jedoch überdurchschnittlich ist. [31]

Der Gletscherschwund bedroht einerseits die Tourismusindustrie in bestimmten Tälern, die von den Gletschern und ihrem ästhetischen Wert abhängen. Andererseits kann er die touristische Attraktivität der „letzten“ alpinen Gletscher erhöhen. [30]

Neben dem Skitourismus sind auch Aktivitäten wie **Wandern, Bergtourengehen und Mountainbiken**, sowie die damit zusammenhängenden Infrastrukturen, wie **Kletterrouten, Schutzhütten, Seilbahnanlagen, Wege und Steige** durch den Gletscherrückgang negativ betroffen. Zunehmende Ausaperung erhöht die Gefahr von Steinschlag und Felssturz, das Abschmelzen der Gletscherzungen führt häufig zu einer Zunahme der Steilheit des Geländes, das Absenken von Gletscheroberflächen kann zur Ausbildung von Felsstufen führen und auch die Laufverlagerungen von Gletscherbächen kann eine Verlegung bestehender Routen notwendig machen.

Der Gletscherrückgang wird sich auch auf die Befahrbarkeit alpiner Flüsse mit Kajaks und Raftingbooten auswirken, da während sommerlicher Schönwetterphasen Niedrigwasserstände auftreten werden.

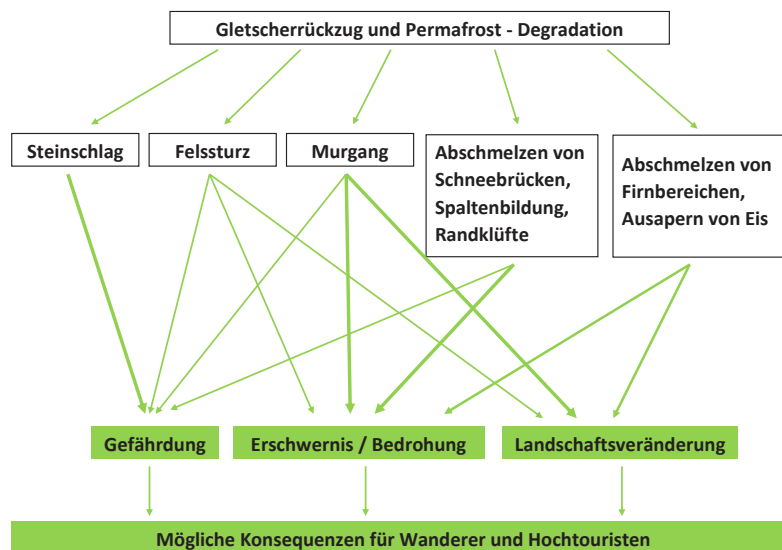
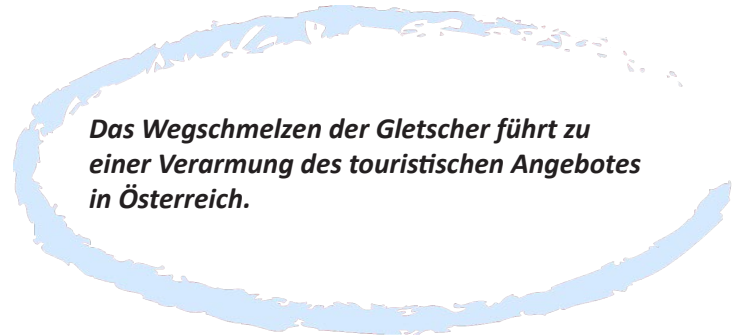


Abbildung 16: Potenzielle Auswirkungen von Gletscherabschmelzen und Permafrostdegradation auf den Bergtourismus. Die Strichstärke verdeutlicht die relative Häufigkeit der Effekte, Quelle: [31]

3 Anpassung an den Gletscherrückgang

Der rasante Rückgang der Gletscher in Österreich wird sich fortsetzen. Während die Auswirkungen im Bereich Naturgefahren und Tourismus bereits heute stark zu spüren sind, sind die größten Herausforderungen im Zusammenhang mit der Wassernutzung voraussichtlich erst ab dem Jahr 2040 zu erwarten. In den bisherigen Untersuchungen wird die Gletscherschmelze als Folge der Klimaerwärmung kaum isoliert, sondern meist in Verbin-

dung mit weiteren Klimawandelfolgen betrachtet. Daraus ergibt sich, dass bisher keine expliziten Anpassungsstrategien für den Gletscherrückgang als Teilphänomen des Klimawandels vorliegen. Es finden sich jedoch zahlreiche Empfehlungen für Anpassungsmaßnahmen in den Anpassungsstrategien von Bund und Ländern, die auch die Auswirkungen des Gletscherrückgangs abmildern können.

3.1 Anpassungsmaßnahmen im Bereich Wasserwirtschaft

Spätestens ab dem Jahr 2050 ist damit zu rechnen, dass Wasserknappheit, insbesondere bei längeren Trockenperioden im Sommer, regional ein zunehmendes Problem darstellen kann. Auch wenn mit keiner großräumigen Wasserknappheit für die Wasserversorgung zu rechnen ist, können sich kleinräumig Engpässe in Gebieten mit ungünstigem Wasserdargebot verstärken. Weitere Herausforderungen entstehen durch eine Erhöhung

der Wassertemperaturen und die Zunahme der Geschiebefracht in Fließgewässern. Die gesamten Auswirkungen des Klimawandels bzw. Handlungsfelder im Bereich Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft sind in Abb. 17 aus dem Bericht der Klimaschutzkoordination zur Anpassung an den Klimawandel des Landes Salzburg übersichtlich dargestellt.

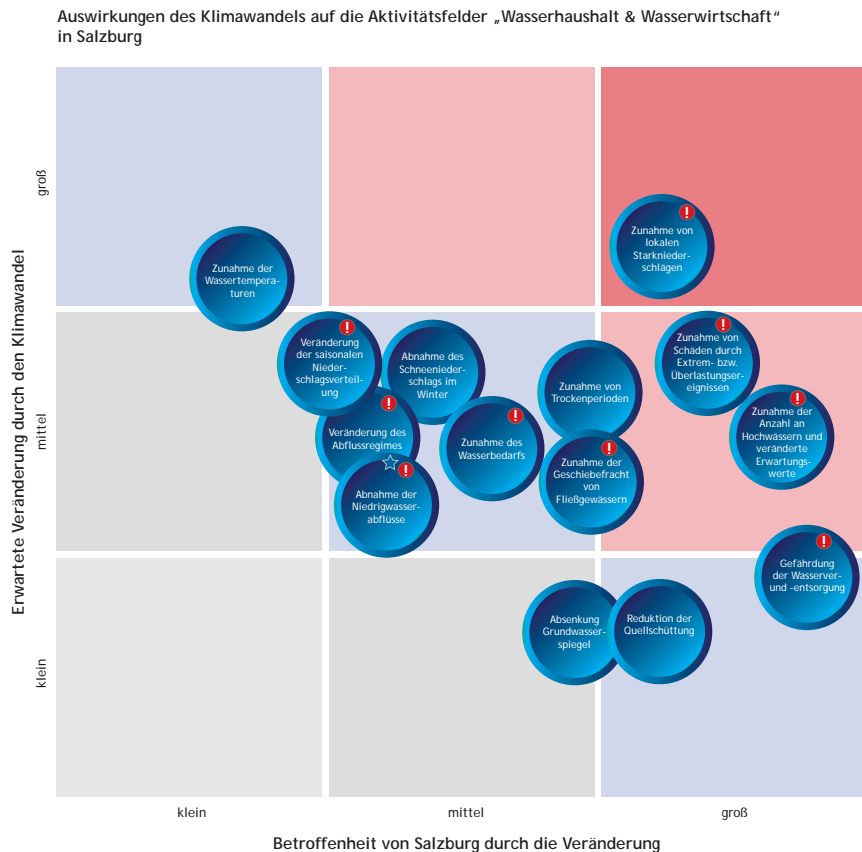


Abbildung 17: Handlungsfeldmatrix des Sektors „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft“ in Salzburg, Quelle: [33]

Folgende **Maßnahmenempfehlungen im Bereich der Wassernutzung** aus den Anpassungsstrategien von Bund ^[34,35] und Ländern können die Auswirkungen der Gletscherschmelze abmildern:

- Eine **vorsorgliche Priorisierung der Wassernutzung** für den Fall von Nutzungskonflikten in Zeiten von Engpässen
- Eine **Optimierung der Datenerhebung und Koordination des Wasserverbrauchs**

Auch wenn Wasserversorgungsunternehmen über gute Aufzeichnungen über ihre Entnahmemengen verfügen, gibt es kaum Daten über den Wasserverbrauch einzelner Nutzungsgruppen, wie z. B. der Landwirtschaft, der Elektrizitätswirtschaft, der Industrie oder des Tourismus. Es fehlen jährlich erhobene Daten über den tatsächlichen Wasserverbrauch unterschiedlicher Nutzungsgruppen – bezogen auf Anlagen und auf Planungsräume – sowohl auf nationaler als auch auf regionaler bzw. kommunaler Ebene, die es ermöglichen, Diskrepanzen zwischen den genehmigten Wassermengen und den tatsächlich verbrauchten Mengen abzuschätzen. Für wasserwirtschaftliche Entscheidungen ist eine solide Datenbasis erforderlich. Das wasserwirtschaftliche Monitoring sollte in Hinblick auf die Dokumentation der Auswirkungen klimatischer Veränderungen bzw. die Beantwortung quantitativer und qualitativer Fragestellungen überprüft und gegebenenfalls adaptiert werden. Bei der Vergabe von Wasserbenutzungsrechten für die relevanten Sektoren sollte jedenfalls auf das möglicherweise geringe Wasserdargebot Rücksicht genommen werden.

Wasserversorgungsanlagen, die in Regionen mit ungünstigen Bedingungen für das Wasserdargebot liegen, sollten sich um ein zweites Standbein oder Vernetzung bemühen.

- Eine verstärkte **Berücksichtigung von Niederwasser² in der Bewirtschaftung der Wasserressourcen**, Umsetzung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen zur Aufhöhung bei Niederwassersituationen (z. B. Speicherbewirtschaftung) sowie die **Einrichtung von Niederwasserprognosen** (Frühwarnung).

Niederwassersituationen sind vor allem für den

Schutz der Oberflächenwässer, für die wasserwirtschaftliche Nutzung und die Gewässerökologie von Bedeutung. Vor allem im Zusammenhang mit der Einleitung von Abwässern sind geringe Abflussmengen relevant, da eine weniger starke Verdünnung erfolgt und die zulässigen Höchstkonzentrationen der eingeleiteten Stoffe überschritten werden können.

Derzeit treten Niederwässer bei (hoch-)alpinen Flüssen ausschließlich im Winter auf. Diese werden durch den Klimawandel künftig abnehmen, weil im Winter mehr Niederschlag in Form von Regen anstelle von Schnee fallen wird. Hier wirkt sich der Klimawandel also positiv aus. Es gibt in diesen Gewässern jedoch noch keine empirischen Erfahrungen, welche Probleme bei **Niederwasser bei hohen Temperaturen während sommerlicher Hitzewellen** auftreten, mit welchen wir durch den Gletscherschwund rechnen müssen. Insbesondere in Regionen mit Sommerniederwasserregime sollten die Auswirkung von Niederwassersituationen und deren wasserwirtschaftliche Konsequenzen untersucht und, wo nötig, Notfallpläne ausgearbeitet werden.

- Eine **Berücksichtigung der steigenden Wassertemperaturen bei der Nutzung von Oberflächenwasser als Kühlwasser**

Bis 2050 ist eine weitere Zunahme der Temperaturen von Oberflächengewässern um ca. 0,8°C zu erwarten. Dies hat Auswirkungen auf die Möglichkeiten der Wassernutzung. Bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen (z. B. von Anlagen, die Flusswasser als Kühlwasser verwenden) sowie bei der Neubewilligung für Wärmeabgaben an Grund- und Oberflächengewässer ist diese Temperaturerhöhung zu berücksichtigen. Betroffen sind hier derzeit vor allem die Regionen nördliches und östliches Weinviertel, Burgenland, südliche und östliche Steiermark, Kärnten und Osttirol. Die Betroffenheit wird sich künftig auf jene Gebiete ausweiten, wo derzeit die Eisschmelze sommerliche Niederwasserstände verhindert. Erkenntnisse aus bereits betroffenen Gebieten sollten für den Umgang mit den Herausforderungen künftig betroffene Gebiete herangezogen werden.

Für kritische Gewässer sollten detaillierte Wärmepläne erstellt werden, um die Lenkung der

² Wasserstand von Gewässern, der deutlich unter einem als normal definierten Zustand liegt.

Wärmeströme vorsorglich so zu regeln, dass klare Handlungsanweisungen für alle Betroffenen vorliegen. Wo schon heute die zulässige Aufwärmung der Gewässer weitgehend oder zur Gänze ausgeschöpft ist, wird es zu (weiteren) Einschränkungen kommen. Daher sollten gleichzeitig auch Überlegungen zu alternativen Verfahren für die Kühlung vorgenommen werden. Industrie und Gewerbe sollten jedenfalls in die Anpassungsmaßnahmen mit eingebunden werden, sodass sie in der Lage sind, über ihre eigenen Handlungsoptionen rechtzeitig Vorsorge zu treffen.

- **Eine Mehrfachnutzung von bestehenden und ggf. neuen Speichern**

Mehrzweckspeicher können abnehmende Wasserressourcen aufgrund einer verringerten Schnee- und Eisschmelze bis zu einem gewissen Ausmaß kompensieren. Nutzungen von Mehrzweckspeichern reichen von Energieerzeugung, Sedimentrückhalt, Hochwasserschutz, Beschneigung, Bewässerung, Trinkwasser, Löschwasser und thermischer Nutzung bis hin zur Speisung von Oberflächengewässern in lang andauernden Trockenperioden. Ob ein Mehrzweckspeicher für eine Region die richtige Lösung ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

- **Eine Anpassung an erhöhte Sedimentfracht durch die verstärkte Geschiebeführung hochalpiner Fließgewässer**

Dass die Menge an Sedimentgesteinen in Bächen und Flüssen zunimmt ist bereits jetzt beobachtbar. Um rechtzeitig auf Veränderungen der Geschiebefracht reagieren zu können und Schäden von

Menschen und ökonomischen Werten vorzubeugen, sollten diese Prozesse zunächst systematisch beobachtet und erfasst werden. Eine Erweiterung des Gletschermonitorings in Hinblick auf die Sedimentführung wird in der Anpassungsstrategie Wasserwirtschaft des Ministeriums empfohlen. Im Zusammenhang mit Wasserkraftanlagen kommt der weiteren Entwicklung eines praktikablen und **wirksamen Geschiebe- und Sedimentmanagements** eine hohe Bedeutung zu, um das zukünftig noch wichtigere Speicherpotential durch Sedimentierung nicht zu verringern (Maßnahmen zur Prävention von Sohlbruchbrüchen sowie technischer Abrasion von Bauteilen, Verlandung, Materialforschung etc.).

- **Eine Förderung der Forschung zu offenen Fragen im Bereich der Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft**

Laut Nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan 2021 [36] betreffen diese offenen Fragen unter anderem die Auswirkungen der Temperaturerhöhungen auf die Ökologie der Fließgewässer und Seen, die Auswirkungen der Grundwassertemperaturerhöhung auf die Qualität des Trinkwassers, die Bedeutung von Blockgletschern für die künftige Wasserversorgung im alpinen Raum und Änderungen des Feststoffhaushalts in Flüssen durch die Verschiebung der Permafrostgrenze.

3.2 Anpassungsmaßnahmen im Bereich Naturgefahren und Katastrophenschutz

Der Schutz vor Naturgefahren hat in Österreich eine lange Tradition und funktioniert seit Jahrzehnten gut [37]. Wie das vorige Kapitel gezeigt hat, bringen jedoch der Rückgang der Gletscher und die Degradation des Permafrosts eine Zunahme des Naturgefahrenpotentials (Steinschlag, Felssturz, Muren) mit sich. Diese können zur Gefahr für Menschen werden sowie Bauwerke, Infrastruktur und Wirtschaftsgüter beschädigen oder sogar zerstören. Die Anpassung durch **Maßnahmen zur Vorbeugung und Vorsorge** wird daher wichtiger denn je. Diese umfassen [34,38,39]:

- die **Prävention**: diese beinhaltet technische aber auch nicht bauliche, raumplanerische und bewussteinbildende Maßnahmen. Bewusste Eigenvorsorge und Vorbereitung kann Schäden von vornherein vermeiden oder zumindest abmildern. Der Eigenverantwortung und Selbstschutzmaßnahmen der Bevölkerung kommen in präventiver Hinsicht aber auch im Ereignisfall besondere Bedeutung zu.
- die **Optimierung des Einsatzablaufes** (Einsatzkräfte, Material und Abläufe)

- die **Risikokommunikation** zwischen allen Akteur:innen: eine Verlinkung etablierter Informationsportale von Behörden und Organisationen des Bundes und der Länder bzw. Schnittstellenmanagement verschiedener im Bereich des Katastrophenschutzes tätiger Organisationen kann einen regelmäßigen Informationsaustausch und eine konsistente Risikoeinschätzung gewährleisten
- den **Auf- und Ausbau effektiver Warn- und Frühwarnsysteme** und Informationsbereitstellung zur effektiven Nutzung dieser Systeme sowie Ausweisen von Gefahrenbereichen
- die **Schaffung von Datengrundlagen und Vertiefung des Kenntnisstandes** der Eintrittswahrscheinlichkeit der Naturgefahren: Erhebung des Potentials gefährlicher Gletscherseen in Österreich insb. in Hinblick auf Seeausbrüche, Fortführung und Erweiterung des Gletschermonitorings nach hydrologischen Gesichtspunkten (Sedimentführung), Erstellung von Permafrostkarten

3.3 Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Tourismus

Tourismusdestinationen im Gebirge haben oftmals eine starke Abhängigkeit vom Wintertourismus und sind damit sehr vulnerabel gegenüber den Folgen der Klimakrise. [39] Wie in Kap. 2.4 beschrieben, sind neben den Gletscherskigebieten vor allem touristische Aktivitäten wie Wandern, Bergtourengehen und Mountainbiken vom Rückgang der Gletscher betroffen. Als übergeordnetes Ziel zur Anpassung im Bereich Tourismus wird in der nationalen Anpassungsstrategie die **Sicherung Österreichs als attraktiver und nachhaltiger Tourismusstandort** definiert. Durch eine **Diversifizierung** des Angebots im Tourismus (bezogen auf Zielgruppen, Saisonen, Attraktionen) und die **Schaffung von nachhaltigen Angeboten** kann die Widerstandsfähigkeit dieser Regionen gesteigert werden. [35]

Maßnahmen zur Erhöhung der Schneesicherheit, die aktuell in den Gletscherskigebieten bereits umgesetzt werden, wie das Aufstellen von Windzäunen, das Anlegen von Windfängern, die den

Schnee auffangen, das tägliche Präparieren der Pisten, das Aufbringen von Gletscherschutzvlies an neuralgischen Stellen und das Anlegen von Schneedepots um Gletscherränder zu schützen, können nur kurzfristig Abhilfe schaffen.

Folgende Maßnahmen im Bereich Tourismus werden im Aktionsplan der Nationalen Anpassungsstrategie empfohlen:

- die **Berücksichtigung von Klimawandel in Tourismusstrategien**: zukünftige Stressfaktoren wie der Rückgang der Gletscher und die damit verbundenen Auswirkungen müssen in den Tourismusstrategien und -konzepten der Länder proaktiv thematisiert werden. Bereits jetzt sind viele anpassungsrelevante Aspekte dort angeführt, auch wenn sie nicht immer explizit als Anpassung an den Klimawandel angesprochen werden (z. B. Ausbau des Ganzjahrestourismus, Entwicklung von wetter- und saisonunabhängigen Angeboten).

- die **Entwicklung von klimaschonenden Anpassungsmaßnahmen** vor allem in betroffenen Wintersport-Regionen:

viele herkömmliche Anpassungsmaßnahmen im Tourismus wie zum Beispiel verstärkte Beschneigung, Wellness-Einrichtungen oder Freizeitparks können einen erheblichen Ressourcenbedarf hinsichtlich Energie, Wasserverbrauch und Fläche sowie negative Effekte auf den Klimaschutz haben. Entscheidungsträger:innen in Tourismusdestinationen sind daher gefordert, Maßnahmen zu fördern, die keine negativen Effekte auf den Klimaschutz haben und im optimalen Fall sogar zur Senkung der Treibhausgase beitragen können. Es sollten vor allem jene Anpassungsmaßnahmen forciert werden, die auf die Nutzung bestehender Infrastrukturen zurückgreifen. Durch ihr positives Image können klimaschonende Anpassungsmaßnahmen die Attraktivität der Urlaubsdestination und die Urlaubsqualität, aber auch die Lebensqualität der heimischen Bevölkerung steigern. Darüber hinaus kann eine klima- und umweltfreundliche Ausrichtung der Tourismusförderung auch zur Reduktion der Kosten und der Energieabhängigkeit von Betrieben beitragen. Eine besondere Bedeutung kommt hier **Maßnahmen zur Steigerung des Bewusstseins** von Tourismusverantwortlichen, aber auch der Bevölkerung und der Gäste, zu.

Zu den **Maßnahmen, um die Sicherheit im Bereich Wandern, Bergtourengehen und Mountainbiken zu erhöhen**, zählen vor allen solche, die die Verhaltensweisen der Gäste betreffen. Darunter

fällt die sorgfältige Planung einer Tour, ein früher Aufbruch, um erhöhter Steinschlaggefahr im Laufe des Tages auszuweichen, die Verwendung von aktuellem Karten- und Informationsmaterial sowie die Kommunikation mit der Hüttenbewirtschaftung oder entgegenkommenden Wander:innen. [31] Im Rahmen des StartClim-Projekts „**AlpinRiskGP**“ [40] wurde ein Werkzeug entwickelt, um Gefahrenstellen für sturz- und flächenhafte Abtragungsprozesse durch Gletscherschwund und auftauenden Permafrost auf markierten und unmarkierten Bergwegen und Routen für das Großglockner-Pasterzen-Gebiet zu identifizieren. Die entwickelte Methodik ist auf andere Gebiete übertragbar und bietet eine gute Basis für die Implementierung gezielter Maßnahmen wie das Auflassen oder die Neuanlage von Wegen oder die Einrichtung eines Wegeinformationssystems.

Der Aufwand, um den Auswirkungen auf die alpine Infrastruktur zu entgegnen (Sanierung und Erhaltung von Wegen, Gebäudesanierung, Beschilderung, Anbringen schützender Netze etc.), wird stark ansteigen. Aktuell wird diese Arbeit überwiegend von den alpinen Vereinen geleistet, sie könnte jedoch künftig deren Möglichkeiten überschreiten. Um diese Leistungen auch in Zukunft abzusichern, müssen Überlegungen über alternative Finanzierungsmöglichkeiten und Verantwortlichkeiten (Länder, Gemeinden, Tourismuswirtschaft) angestellt werden.



© Gerhard Karl Lieb

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Die **Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel** gibt einen umfassenden Überblick über die Problemlage und Maßnahmenvorschläge zur Anpassung. https://www.bmnt.gv.at/umwelt/klimaschutz/klima_politik_national/anpassungsstrategie/strategie-kontext.html

Die **Anpassungsstrategie an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft** definiert Bereiche für Österreichs Wasserwirtschaft, in denen sich ein Handlungsbedarf abzeichnet und erarbeitet auf Basis dieser Bedarfe Anpassungsstrategien und Maßnahmenempfehlungen <https://www.tuwien.at/cee/iwr/wasser/projekte/abgeschlossene-projekte/klimawandel-und-wasserwirtschaft>

Der **„Bericht der Klimaschutzkoordination. Anpassung an den Klimawandel. Herausforderungen und Chancen“** des Landes Tirol enthält zahlreiche Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in allen betroffenen Sektoren und spricht gezielt auch Anpassungen an die Auswirkungen des Gletscherrückganges an https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/klima/Klimastrategie/Teil_III_Anpassung_an_den_Klimawandel_20150319.pdf

Die **Anpassungsstrategien an den Klimawandel der Bundesländer** stehen gesammelt auf der Plattform www.klimawandelanpassung.at zur Verfügung

Die **Broschüre „Leben mit Naturgefahren-Ratgeber für die Eigenvorsorge bei Hochwasser, Muren, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen“** beschreibt die relevanten Naturgefahren für Österreich und wie man sich daran anpassen kann https://info.bml.gv.at/dam/jcr:08832d46-b9d1-4763-b794-7cf264852dbf/B%20+%20Barrierefrei%20-%20Leben%20mit%20Naturgefahren_Stand_150409_BF.pdf

Das **Forschungsprojekt ClimAlpTour** hat ein online-verfügbares Werkzeug entwickelt, das anhand von Evaluierungskriterien bei der Auswahl von Anpassungsmaßnahmen im Bereich Tourismus unterstützt https://w3-mediapo-ol.hm.edu/mediapool/media/fk14/fk14_lokal/forschungundprojekte/climalptour/ClimAlpTour_Abschlussbericht.pdf

Im Rahmen von StartClim wurde eine **Studie zu witterungsunabhängigen Tourismusangeboten** erstellt, die auf Naturerlebnisangeboten basieren und als Basis für die Entwicklung neuer Angebote in diesem Bereich dienen soll. https://startclim.at/fileadmin/user_upload/StartClim2014/StCl2014E_lang.pdf

Im Rahmen des **Forschungsprojektes AlpinRiskGP** wurde ein Werkzeug entwickelt, um Gefahrenstellen für sturz- und flächenhafte Abtragungsprozesse durch Gletscherschwund und auftauenden Permafrost auf markierten und unmarkierten Bergwegen und Routen im Großglockner-Pasterzen-Gebiet zu identifizieren https://startclim.at/fileadmin/user_upload/StartClim2009/StCl09F.pdf

Im **Freiluftlabor Open Air Lab Kitzsteinhorn** (OpAL) sollen mit Hilfe von systematischer, langfristiger Forschung Verständnislücken rund um das System Hochgebirge verkleinert werden, um Prognosen über zukünftige Entwicklungen zu verbessern und als Entscheidungsunterstützung für nachhaltige Strategien, Planungen und Projekte zu dienen. <http://www.georesearch.ac.at/de/bereiche/labors-und-methoden/opal-kitzsteinhorn>

Das **Forschungsprojekt SedAlp** untersuchte den Sedimenttransport in alpinen Flusseinzugsgebieten. Es zielte darauf ab, das sedimentbedingte Risiko wirksam zu verringern und gleichzeitig die Verbesserung von Flussökosystemen zu fördern und die Auswirkungen von Wasserkraftwerken zu verringern. <http://www.sedalp.eu/>

Das **Forschungsprojekt Permalp** verfolgte das Ziel, Permafrost zu quantifizieren und dessen Verbreitung auf einer Karte darzustellen, um damit Gefahrenpotentiale zu erfassen und ein Hilfsmittel zur Risikobewertung für bestehende und zukünftige Infrastruktur und Tourismusanlagen bereitzustellen https://www.parcs.at/npht/pdf_public/2020/40358_20200915_135643_Abschlussbericht-Permalp-Final_verkleinert.pdf

Das **Forschungsprojekte PermaNET** untersuchte Permafrost im Alpenraum und seine Veränderungen durch den Klimawandel. Im Rahmen des Projekts wurde ein internationales Beobachtungsnetzwerk eingerichtet und erstmals ein konsistenter Datensatz über die Permafrostverbreitung im Alpenraum erarbeitet sowie bereits laufende Monitoringaktivitäten systematisch zusammengeführt. <https://www.permanet-alpinespace.eu/home.html>

Eine **Übersicht über die Gletschergebiete in Österreich** bietet das Kartenmaterial auf <https://www.gletscherwandel.net/>

4 Zusammenschau

Extrem hohe Temperaturen, wenig Schneefall und starke Strahlung führten zu massivem Gletscherschwund

Das Jahr 2022 war im Mittel über Österreich hinter 2018 das zweitwärmste Jahr seit Messbeginn 1767, auf den Bergen West- und Südösterreichs sogar das wärmste Jahr. Zum ersten Mal wurde im Oktober eine Tropennacht aufgezeichnet. Über das Jahr gerechnet wich die Lufttemperatur um +2,3 °C vom langjährigen Mittel ab. Beim Niederschlag fehlten im Bundesmittel 12 % auf den langjährigen Mittelwert, allerdings mit großen regionalen Unterschieden. Besonders im Osten und Süden fielen verbreitet nur rund drei Viertel der normalen Niederschlagsmenge. Gleichzeitig war 2022 das zehntsonnigste Jahr der Aufzeichnungen. Der März war der trockenste und sonnenscheinreichste seit zumindest 1961.

Die Hitze und Trockenheit machten der Landwirtschaft durch Dürre und Ernteaufschläge, der Forstwirtschaft durch Waldbrände, der Wasserwirtschaft durch niedrige Pegelstände an Bächen, Flüssen, Seen und im Grundwasser sowie dem Tourismus durch Schneemangel in Skigebieten zu schaffen. Während vor allem der Osten des Landes unter langen Trockenperioden litt, hatten andere Regionen, v. a. in Kärnten und im äußersten Westen des Landes, unter heftigen Unwettern und Überschwemmungen zu leiden.

Gleichzeitig war im Sommer 2022 eine beispiellose Gletscherschmelze zu beobachten. Aufgrund der hohen Sommertemperaturen sowie einer geringen Schneedecke und damit sehr frühen Ausaperung verloren die österreichischen Gletscher doppelt so viel Masse wie im Schnitt der letzten 30 Jahre. Klimaprojektionen zeichnen für die Gletscher im Alpenraum ein düsteres Bild. Innerhalb der nächsten 20 Jahre wird sich das Gletschervolumen der Alpen halbieren. Lediglich wenn die Pariser Klimaziele erreicht und die globale Erwärmung unter 2 bzw. 1,5 °C gehalten werden kann, bleiben knapp 20 % der derzeitigen Eismassen erhalten. Wir müssen uns daher bereits heute intensiv mit den Folgen nicht nur des Rückganges, sondern auch des vollständigen Verlustes der Gletscher auseinandersetzen.

Gravierende Folgen des Gletscherrückganges

Die massive Gletscherschmelze hat nicht nur Folgen für den **(Ski-)Tourismus Österreichs**, sondern auch für **alpine Infrastruktur** und die **Sicherheit im alpinen Raum**. Der Rückgang der Gletscher und des Permafrostes führen zu einer Zunahme von Steinschlag-, Felssturz- und Murenereignissen und erhöhen damit den Aufwand für Schutzmaßnahmen und Absicherung von Infrastruktur. Gleichzeitig führt das Wegschmelzen der Gletscher zu einer Verarmung des touristischen Angebotes.

Auch die **Wasser- und Energiewirtschaft** des Landes sind betroffen. Betrachtet man das Gletschereis als Wasserressource, so entspricht das aktuelle Eisvolumen (Stand 2015) etwa 10 % der in Österreich gespeicherten Wasserreserven. Die Schnee- und Eisschmelze sorgt im Sommer in niederschlagsarmen Zeiträumen für einen zuverlässigen und ausgeglichenen Abfluss in den Gebirgsbächen und nachgelagerten Flüssen. Durch das Verschwinden der Gletscher wird die Bezuschussung der Fließgewässer in Trockenzeiten im Hochsommer jedoch weitgehend ausbleiben. Die Wasserführung der Flüsse hängt dann allein vom stark veränderlichen Niederschlagsangebot ab. Nach dem Jahr 2040 ist damit zu rechnen, dass Wasserknappheit insbesondere bei längeren Trockenperioden im Sommer regional ein zunehmendes Problem darstellen wird.

Rasche Anpassung ist in vielen Bereichen nötig

Insgesamt hat der Gletscherschwund in Österreich weitreichende Folgen für zahlreiche Bereiche wie Ökologie, Biodiversität, Sicherheit im alpinen Raum, Tourismus, Schifffahrt bis hin zur Energiewirtschaft. Rasche Anpassungsmaßnahmen sind daher insbesondere in den Bereichen Wasserwirtschaft, Katastrophenschutz und Tourismus ratsam. Stellschrauben in der Wasserwirtschaft sind unter anderem die Priorisierung der Wassernutzung, die Optimierung der Datenerhebung, die Koordination des Wasserverbrauchs, die Berücksichtigung von Niederwasser und steigenden Wassertemperaturen in der Bewirtschaftung von Wasserressourcen sowie die Mehrfachnutzung und Speicherung von Wasser.

Glossar und Referenzen

Wetter – Witterung – Klima

Das Wetter ist der physikalische Zustand der Atmosphäre *zu einem bestimmten Zeitpunkt* an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet, wie er durch das Zusammenwirken der meteorologischen Elemente (Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Bewölkung, Niederschlag, Wind usw.) gekennzeichnet ist.

Als Witterung wird der allgemeine Charakter des Wetterablaufs *von einigen Tagen bis zu ganzen Jahreszeiten*, der durch die jeweils vorherrschende Wetterlage bestimmt ist, bezeichnet (z. B. Altweibersommer).

Das Klima wird als der mittlere Zustand der Atmosphäre definiert. Es wird durch statistische Eigenschaften (Mittelwerte, Streuungsmaße, Extremwerte, Häufigkeiten usw.) über einen ausreichend langen Zeitraum, üblicherweise *mindestens 30 Jahre*, dargestellt.

Klimanormalperiode (Bezugszeitraum)

Um das Klima international standardisiert vergleichen zu können, werden von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) nicht-überlappende 30-jährige Zeiträume (z. B. 1961–1990, 1991–2020) vorgegeben. Sie werden fachsprachlich Klimanormalperioden genannt. In dieser Berichtsreihe wird, sofern nicht anders angegeben, die Klimanormalperiode 1961–1990 herangezogen und meist der verständlichere Begriff Bezugszeitraum verwendet.

Der Vergleich mit dem Bezugszeitraum 1961–1990 ermöglicht die Einordnung gegenüber einem vorwiegend natürlichen Klimazustand vor dem vollen Einsetzen des menschlich verstärkten Treibhauseffekts in den 1980er-Jahren. Der Vergleich mit dem Bezugszeitraum 1992–2021 erlaubt hingegen die Einordnung gegenüber der letzten 30 Jahre. Das entspricht der Erinnerung vieler Menschen besser.

Klimaindizes

Sommertage: Jährliche Anzahl an Tagen, an denen das Maximum der Lufttemperatur 25 °C erreicht oder überschreitet.

Hitzetage: Teilmenge der Sommertage, an denen das Maximum der Lufttemperatur 30 °C erreicht oder überschreitet.

Tropennächte: Jährliche Anzahl an Tagen, an denen das Minimum der Lufttemperatur 20 °C nicht unterschreitet.

Hitzeperiode: Jährliche Anzahl an Tagen, die innerhalb einer Hitzeperiode liegen. Nach der Definition des tschechischen Meteorologen Jan Kyselý liegt eine Hitzeperiode vor, sobald das Maximum der Lufttemperatur an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen 30 °C überschreitet, und dauert an, solange das Tagesmaximum der Lufttemperatur gemittelt über die gesamte Periode über 30 °C bleibt und an keinem Tag 25 °C unterschreitet.

Kühlgradtagzahl: Jährliche Summe der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen der mittleren Lufttemperatur und der Normraumlufttemperatur von 20 °C, an Tagen mit einer mittleren Lufttemperatur von mehr als 20 °C.

Vegetationsperiode: Die Dauer der Vegetationsperiode entspricht der jährlichen Anzahl der Tage zwischen Beginn und Ende der Vegetationsperiode. Ausgangspunkt ist die Bestimmung von Vegetationstagen mit einer mittleren Lufttemperatur von mindestens 5 °C. Die längste durchgehende Folge an Vegetationstagen ist die Kernperiode, davor und danach können unterbrochene Teilperioden auftreten. Der Beginn der Vege-

tationsperiode wird vom ersten Tag der Kernperiode auf den ersten Tag einer Teilperiode vorverlegt, falls diese Teilperiode mehr Tage als die Summe aller Nicht-Vegetationstage vor der Kernperiode beinhaltet. Das Ende der Vegetationsperiode wird mit umgekehrten Kriterien bestimmt.

Frosttage: Jährliche Anzahl an Tagen, an denen das Minimum der Lufttemperatur 0 °C unterschreitet.
Heizgradtagzahl: Jährliche Summe der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen der Normraumlufitemperatur von 20 °C und der mittleren Lufttemperatur, an Tagen mit einer mittleren Lufttemperatur von weniger als 12 °C.

Normaußentemperatur: Tiefster Zwei-Tages-Mittelwert der Lufttemperatur, der zehn Mal in 20 Jahren erreicht oder unterschritten wird. Aufgrund dieser 20-jährlichen Indexdefinition gilt z. B. der Jahreswert 2022 für den Zeitraum 2003–2022. Als Klimareferenzwert wird statt einem Mittelwert des Zeitraumes 1961–1990 der Jahreswert 1980 (1961–1980) herangezogen.

Niederschlagstage: Jährliche Anzahl an Tagen, an denen die Niederschlagssumme mindestens 1 mm beträgt.

Starkniederschlagstage: Teilmenge der Niederschlagstage, an denen die Niederschlagssumme mindestens 20 mm beträgt.

Niederschlagsintensität: Jährliche durchschnittliche Niederschlagssumme an Niederschlagstagen.
Maximum der Fünf-Tages-Niederschlagssumme: Jährliches Maximum der Gesamtniederschlagssumme von fünf aufeinanderfolgenden Tagen.

Trockenepisoden: Dauer der längsten jährlichen Folge an Tagen, an denen die Niederschlagssumme weniger als 1 mm beträgt.

Verwendete Daten

Die Auswertungen in dieser Berichtsreihe beruhen größtenteils auf Messdaten aus dem Klimastationsnetz der GeoSphere Austria. Der *gemessene* Niederschlag ist gegenüber dem angenommenen *tatsächlichen* Niederschlag erfahrungsgemäß meist systematisch herabgesetzt. Diese Diskrepanz ist bei starkem Wind und Schneefall besonders hoch. Aufgrund großer Unsicherheiten bei der Korrektur kann diese Art des Messfehlers nicht verlässlich berücksichtigt werden. Um eine hohe Datenqualität zu gewährleisten, werden alle Messdaten qualitätsgeprüft und nach Möglichkeit homogenisiert. Daher kann es auch nachträglich zu geringfügigen Wertänderungen kommen. Aus den Stationsdaten wurden die Datensätze SPARTACUS und HISTALP entwickelt.

Der Datensatz SPARTACUS besteht aus räumlichen Gitterfeldern über Österreich in Tagesauflösung ab 1961. Er ermöglicht die Beurteilung der räumlichen Verteilung von Klimaparametern und die flächengetreue Auswertung der Klimaentwicklung. (Anmerkung: Ab dem diesjährigen Bericht beruhen die monatlichen und jährlichen Mittelwerte der Lufttemperatur nicht wie bisher auf täglichen Mittelwerten, die mit der einfachen Formel $(t_{min} + t_{max}) / 2$ berechnet wurden, sondern auf „wahren“ täglichen Mittelwerten, die dem arithmetischen Mittelwert der 24 Stundenwerte entsprechen. Die so erhaltenen, genaueren Monats- und Jahresmitteltemperaturen liegen gegenüber der bisher verwendeten Mittelungsmethode um rund 0,4 °C tiefer. Die Unterschiede hinsichtlich relativer Temperaturabweichungen sind vernachlässigbar.)

www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/klimatografien/spartacus

Hiebl J., Frei C., 2016: *Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability*. *Theoretical and Applied Climatology* 124, 161–178, [doi:10.1007/s00704-015-1411-4](https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4)

Hiebl J., Frei C., 2018: *Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydro-climatic monitoring and modelling*. *Theoretical and Applied Climatology* 132, 327–345, [doi:10.1007/s00704-017-2093-x](https://doi.org/10.1007/s00704-017-2093-x)

Der Datensatz HISTALP enthält punktbezogene Stationsreihen verteilt über den gesamten Alpenraum in Monatsauflösung. Die Daten wurden zusätzlich homogenisiert und erlauben die verlässliche langfristige Einordnung des Klimas, je nach Parameter teilweise bis ins 18. Jahrhundert zurück.

www.zamg.ac.at/histalp

Auer I. et al., 2007: HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *International Journal of Climatology* 27, 17–46, [doi:10.1002/joc.1377](https://doi.org/10.1002/joc.1377)

Der Datensatz VIOLA ist das digitale Unwetterarchiv und reicht bis ins Jahr 1961 zurück.

www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/datensaetze/viola

Zwischen den Datensätzen herrscht eine hohe Übereinstimmung. In den Abschnitten *Das Jahr im Überblick*, *Klima- und Wetterstatistik*, *Witterungsverlauf*, *Räumliche Verteilung* und *Klimaindizes* wird SPARTACUS, im Abschnitt *Langfristige Einordnung* HISTALP und im Abschnitt *Bedeutende Wetterereignisse* VIOLA verwendet.

Referenzen

[1] Morice C.P. et al., 2021: An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the Had-CRUT5 data set. *Journal of Geophysical Research* 126, e2019JD032361, [doi:10.1029/2019JD032361](https://doi.org/10.1029/2019JD032361)

[2] von Schuckmann K. et al., 2020: Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth System Science Data* 12, 2013–2041, [doi:10.5194/essd-12-2013-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020)

[3] Wild M., 2009: Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research* 114, D00D16, [doi:10.1029/2008JD011470](https://doi.org/10.1029/2008JD011470)

[4] Scherrer S.C., Begert M., 2019: Effects of large-scale atmospheric flow and sunshine duration on the evolution of minimum and maximum temperature in Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology* 138, 227–235, [doi:10.1007/s00704-019-02823-x](https://doi.org/10.1007/s00704-019-02823-x)

[5] Fischer, A., et al., 2015: The Austrian Glacier Inventories GI 1 (1969), GI 2 (1998), GI 3 (2006), and GI LIA in ArcGIS (shapefile) Format. Innsbruck. PANGAEA: Institute for Interdisciplinary Mountain Research Austrian Academy of Sciences.

[6] Buckel, J., Otto, J.-C., 2018: The Austrian glacier inventory GI 4 (2015) in ArcGis (shapefile)format. PANGAEA. <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.887415>. PANGAEA supplement to Buckel, J.; Otto, J.C.; Prasicek, G.; Keuschnig, M., 2018. Glacial lakes in Austria - distribution and formation since the Little Ice Age. *Glob. Planet. Chang.*

164, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.003>.

[7] Wallner M., 2022: Future effects of glacier retreat on downstream runoff and hydropower generation in Alpine regions of different catchment sizes, Master Thesis at the Department of Geography and Regional Science, University of Graz, Graz

[8] <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/zahlen/wasserwirtschaft-zahlen-und-fakten-2021.html>, zuletzt aufgerufen: 20.12.2022

- [9] Weber M. et al., 2009: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft, in: Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 86, Wien
- [10] Stahl K. et al., 2016: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels, Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)
- [11] Huss, M., 2011: Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. In: Water Resour. Res. 47. DOI: [10.1029/2010WR010299](https://doi.org/10.1029/2010WR010299)
- [12] Krainer K., Ribis M., 2009: Blockgletscher und ihre hydrologische Bedeutung im Hochgebirge, in: Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 86, Wien
- [13] Wagner T. et al., 2021: Assessment of liquid and solid water storage in rock glaciers versus glacier ice in the Austrian Alps, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149593>
- [14] <https://www.georesearch.ac.at/de/bereiche/forschungsbereiche/geo/projekt-futurelakes/>, zuletzt aufgerufen am 22.02.2023
- [15] Otto et al., 2019: Formation and future evolution of glacier lakes in Austria (FUTURELAKES) – Final Report, ISBN-Online: 978-3-7001-8423-2 DOI: [10.1553/ESS-Future_Lakes](https://doi.org/10.1553/ESS-Future_Lakes)
- [16] https://www.alpenverein.at/portal/news/aktuelle_news/2020/2020_04_08_gletscherseen.php, zuletzt aufgerufen am 14.02.2023
- [17] Losapio G. et al., 2021: The Consequences of Glacier Retreat Are Uneven Between Plant Species <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2020.616562/full>
- [18] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2022: Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021, Wien
- [19] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011: Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft, Wien
- [20] Stanzel P., Nachtnebel H. P., 2010: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00506-010-0234-x.pdf>
- [21] Frey S. et al., 2013: Die Auswirkung möglicher Klimawandelszenarien auf das Erzeugungspotenzial von Wasserkraftwerken, https://www.researchgate.net/publication/275966035_Die_Auswirkung_moglicher_Klimawandelszenarien_auf_das_Erzeugungspotenzial_von_Wasserkraftwerken
- [22] Haeberli W., Weingartner R., 2020: In full transition: Key impacts of vanishing mountain ice on water-security at local to global scales, <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100074>
- [23] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2021: Wasserschatz Österreichs Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers, Hintergrunddokument, Wien
- [24] Lieb, G.K. et al., 2010: AlpinRiskGP - Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpentouristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich). Endbericht von StartClim2009.F in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF
- [25] Hartmeyer I. et al, 2022: Freiluftlabor Kitzsteinhorn – Jahresbericht 2021, Puch bei Hallein

- [26] Gattermayr W., 2013: Das hydrographische Regime der Ötztaler Ache. In Klima, Wetter, Gletscher im Wandel. Universität Innsbruck. ISBN 978-3-902811-89-9
- [27] <https://www.oeaw.ac.at/news/gletscherbruch-gefahr-auch-fuer-oesterreichische-alpen>, zuletzt aufgerufen am 16.02.2023
- [28] https://www.alpenverein.at/portal/news/aktuelle_news/2020/2020_04_08_gletscherseen.php, zuletzt aufgerufen am 16.02.2023
- [29] Nicolussi K., Zur Geschichte des Vernagtferners – Gletschervorstöße und Seeausbrüche im vergangenen Jahrtausend, In Klima, Wetter, Gletscher im Wandel. Universität Innsbruck. ISBN 978-3-902811-89-9
- [30] Beck A., 2020: Auf dünnem Eis. Die Wahrnehmung des lokalen Gletscherrückgangs als sichtbare Auswirkung der globalen Klimaerwärmung in Neustift im Stubaital. Master Thesis, Wien
- [31] Pröbstl-Haider U. et al., 2021: Tourismus und Klimawandel, Wien. <https://doi.org/10.1007/10.1007/978-3-662-61522-5>
- [32] https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/natur-umwelt/aktuell/3_Alpine-Raumordnung/Gletscherschutz/ARO-27.pdf, zuletzt aufgerufen am 20.12.2022
- [33] Land Salzburg, 2022: Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Salzburg. Erster Fortschrittsbericht der Arbeitsgruppe „Klimawandelanpassung“
- [34] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011: Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft, Wien
- [35] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2017: Die Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 2 – Aktionsplan, Wien
- [36] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2022: Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021, Wien
- [37] Stangl M. et al., 2022: Klimastatusbericht Österreich 2021, Graz
- [38] Sperka G. et al., 2017: Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Salzburg, Salzburg
- [39] Hohenwallner et al., 2015: Bericht der Klimaschutzkoordination. Anpassung an den Klimawandel. Herausforderungen und Chancen, Innsbruck https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/klima/Klimastrategie/Teil_III_Anpassung_an_den_Klimawandel_20150319.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [40] https://startclim.at/fileadmin/user_upload/StartClim2009/StCl09F.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.02.2023