Kasang, D. & J. L. Lozán (2020): Gletscher und Schnee in Hochgebirgen Nordamerikas. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl et al. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel. S. 152-159. Online: www.warnsignal-klima.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.hochgebirge-im-wandel.23.

3.7 Gletscher und Schnee in Hochgebirgen Nordamerikas

Dieter Kasang & José L. Lozán

Die rund 105.000 km² große Gletscherfläche in den Hochgebirgen des nordamerikanischen Kontinents (ohne die Kanadische Arktis) befindet sich zu fast 90% in Alaska. Aufgrund ihrer großen Eismasse besitzen die Gletscher Alaskas durch den möglichen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von ca. 5,5 cm eine globale Bedeutung. Der starke Temperaturanstieg verursacht bereits heute einen deutlichen Rückgang der Gletscher. In den Hochgebirgen im westlichen Kanada spielen die Gletscher vor allem als Schmelzwasserlieferanten für die umliegenden Regionen eine Rolle. Auch sie zeigen durch den Klimawandel deutliche Verluste, vor allem in den weiter im Binnenland gelegenen Rocky Mountains. Die Gletscher des zusammenhängenden Staatsgebiets der USA machen weniger als 1% der gesamten Fläche der Hochgebirgsgletscher in Nordamerika aus. Sie besitzen jedoch trotz ihrer geringen Ausdehnung erhebliche Bedeutung für die Hydrologie der jeweiligen Region. Der starke Temperaturanstieg und teilweise abnehmende Niederschläge haben bereits heute die Gletscherflächen, aber auch die Schneebedeckung, deutlich zusammenschmelzen lassen und werden bis 2100 zahlreiche Gletscher zum Verschwinden bringen - mit erheblichen Auswirkungen für die Wasserversorgung vor allem in Kalifornien.

Glaciers and snow in high mountains in North America: *Almost 90% of the approximately 105,000 km² glacier area (without the Canadian Arctis) in the high mountains of the North American continent is in Alaska. Due to their large ice masses, the Alaska glaciers are of global importance for their possible contribution to the sea level rise of approx. 5.5 cm. The sharp rise in temperature is already causing a significant decline in glaciers. In the high mountains in western Canada, the glaciers primarily play a role as melt water suppliers for the surrounding regions. They too are showing significant losses due to climate change, especially in the inland Rocky Mountains. The glaciers in the contiguous U.S. territory account for less than 1% of the total area of high mountain glaciers in North America. Despite their small size, however, they are of considerable importance for the hydrology of the respective region. The sharp rise in temperature and, in some cases, decreasing rainfall have already caused the glacier surfaces, but also the snow cover, to melt together significantly and will cause numerous glaciers to disappear by 2100 - with considerable effects on water supply, especially in California.*

Die Hochgebirge auf dem Nordamerikanischen Kontinent erstrecken sich wie in Südamerika am Westrand des Kontinents. Von Alaska im Nordwesten des Kontinents bis zur Sierra Nevada in Kalifornien sind die nordamerikanischen Gebirgsketten mit Gletschern und Schnee bedeckt.

Nordamerika ist mit etwa 250.000 km² der Kontinent mit der mit Abstand größten Gletscherfläche außerhalb von Grönland und der Antarktis, die sich allerdings zu mehr als der Hälfte in der Kanadischen Arktis befindet. Immerhin bedecken knapp 90.000 km² vergletscherte Fläche die Bergregionen Alaskas. 14.500 km² finden sich in den Küstengebirgen, den Rocky Mountains und anderen Gebirgszügen im Westen Kanadas und der zusammenhängenden Vereinigten Staaten (ohne Alaska). Davon wiederum liegen 90% in den Bergen des westlichen Kanada. Auch die Schneebedeckung ist in Alaska mit Abstand am größten, spielt aber vor allem in den westlichen USA und dort besonders in Kalifornien eine wichtige Rolle für das hydrologische System. In allen Gletschergebieten ist seit dem Ende der Kleinen Eiszeit ein Rückgang der Gletscherfläche und -masse zu beobachten, zumeist mit einer Beschleunigung in den letzten Jahrzehnten.

Alaska

Die Gletscher Alaskas bedecken eine Fläche von rund 87.000 km² und nehmen damit 3,5% der Fläche des US-Staates Alaska und 12% der global von Eis bedeckten Fläche außerhalb der Eisschilde ein (Kienholz et al. 2015). Die Gletscher und Eiskappen in den bis über 6.000 m hohen Gebirgszügen, die den Golf von Alaska säumen, bilden die größte Eismasse außerhalb der Polargebiete. Die Anzahl der Gletscher in Alaska wird vom mit 23.112 angegeben, ihr Volumen entspricht einem Meeresspiegelanstieg von 5,5 cm (IPCC 2013, *Table 4.2*). Die mit 30.000 km² größte zusammenhängende Eisfläche erstreckt sich über Teile der St. Elias und der östlichen Chugach Mountains, die den Golf von Alaska säumen, und umfasst die größten Gletscher des Landes, den Seward, Bering und Hubbard Gletscher (Kienholz et al. 2015). Die Gletscherbildung wird begünstigt durch die extrem hohen Niederschläge von bis zu 8.000 mm/Jahr durch Tiefdruckgebiete vom Golf von Alaska, die im Winter primär als Schnee fallen (Beamer et al. 2016).

Alaska gehörte in den letzten Jahrzehnten zu den sich am stärksten erwärmenden Regionen der Erde. Die Temperaturzunahme ist mehr als doppelt so hoch wie in den restlichen USA und höher als in jedem anderen US-

Staat. Die mittlere Jahrestemperatur stieg in den letzten 60 Jahren um 1,7°C, die mittlere Wintertemperatur sogar um 3,4°C (Chapin et al. 2014). Die Folge war ein deutlicher Schwund der Eismasse der meisten Gletscher in Alaska. Schon seit der Kleinen Eiszeit zogen sich viele Gletscher mehr und mehr zurück, ein Trend, der sich in jüngster Zeit beschleunigt hat. Zwischen 1961 und 2016 haben die Gletscher in Alaska, abgesehen von den Eisschilden auf Grönland und der Antarktis, mit 8 mm den höchsten Anteil zum Meeresspiegelanstieg beigetragen. Im Zeitraum 2002-2016 belief sich der Eisverlust auf 53 Gt/Jahr (Wouters et al. 2019 und *Abb. 3.7-3*), 2006-2016 waren es 73 Gt/Jahr, was einem Viertel des globalen Eisverlustes von Gletschern entspricht (Zemp et al. 2019). Einige Gebirgszüge und einzelne große Gletscher sind besonders stark betroffen.

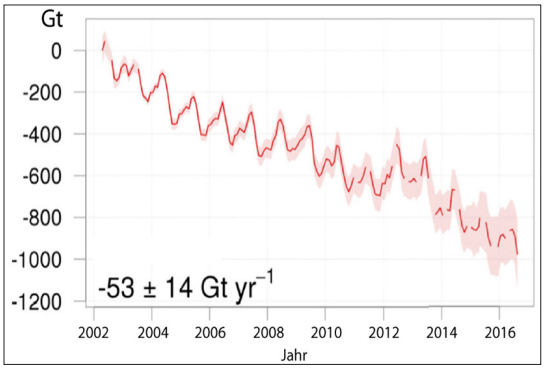

Abb. 3.7-1: *Kumulativer Eisverlust der Gletscher Alaskas in Mrd. Tonnen 2002-2017 (Woutors et al. 2019, CC BY).*

So wurde ein deutlicher Rückgang der Vergletscherung in den Chugach Mountains beobachtet. Vor allem der 944 km² große und besonders gut untersuchte Columbia Gezeitengletscher befindet sich gegenwärtig in einem katastrophalen Rückzug (*Abb. 3.7-2*). Der aus einer Höhe von fast 3.000 m direkt in die Columbia Bay im Prinz-William-Sund an der Südküste Alaskas fließende Gletscher ist einer der sich am schnellsten ändernden Gletscher der Welt. Um die Mitte des 20. Jahrhunderts hatte er eine Länge von ca. 66 km, büßte dann seit 1980 bis 2012 etwa 20 km an Länge ein und verlor seit 1957 etwa die Hälfte seines Volumens. Der Rückzug des Gletschers wird in der Forschung primär auf die globale Erwärmung zurückgeführt (Mcnabb & Hock 2014). 2030 wird der Gletscher wahrscheinlich vor der Küstenlinie enden und seinen Status als Gezeitengletscher verloren haben (Nasa Earth Observatory o.J.).

Auch der größte und längste Gletscher auf dem kontinentalen Nordamerika, der Bering Gletscher, dessen Eismasse auf 15-20% des gesamten Gletschereises von Alaska geschätzt wird (Josberger et al. 2014), zeigt deutliche Rückzugstendenzen. Der Eisverlust zwischen 1972 und 2003 wurde auf 2,7 km³ Wasseräquivalent pro Jahr berechnet und der Höhenverlust zwischen 1951 und 2011 auf 39 m geschätzt (Tangborn et al. 2013). Bis 2050 könnte die Schmelzwassermenge durch das Abschmelzen des Gletschers infolge des Klimawandels von z.Z. 40 km³/Jahr auf 60 km³/Jahr steigen und danach wegen der geringer werdenden Eismasse abnehmen (Josberger et al. 2014).

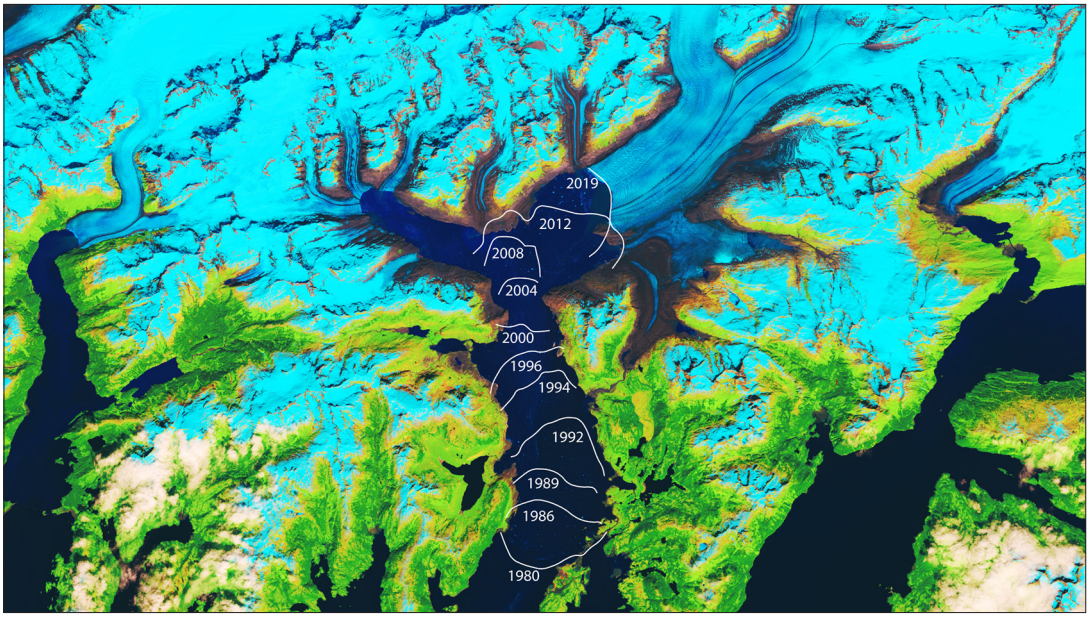

Abb. 3.7-2: *Der Columbia Gletscher 2019 (NASA o.J., public domain, ergänzt nach Carlson et al. 2017).*

Nach regionalen Modellprojektionen werden sich die Temperaturen in den Gletschergebieten Alaskas bis Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Zeitraum 2006-2015 um 2,1°C nach dem Szenario RCP4.5 bzw. um 4,6 °C nach dem Szenario RCP8.5 erhöhen, am stärksten im Winter und Frühjahr und bei deutlichen regionalen Unterschieden. Eine Folge ist die Anhebung der Gleichgewichtslinie der Gletscher um 105 bis 225 m bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, wodurch das Akkumulationsgebiet stark reduziert wird und bei tiefer gelegenen Gletschern sogar ganz verschwinden kann. Nach dem Szenario RCP8.5 wird die Masse von über 1.000 Gletschern Alaskas um 50% abnehmen. Einige Gletscher in den Wrangell Mountains werden aber auch um 5-10% an Masse gewinnen, weil sie so hoch und so weit im Norden liegen, dass die zunehmenden Niederschläge immer noch weitgehend als Schnee fallen (McGrath et al. 2017).

Auch die Schneebedeckung ist in den letzten 20 Jahren in Alaska zurückgegangen. Eine 50prozentige Schneebedeckung wurde Ende der 2010er Jahre im Oktober eine Woche später erreicht als in den 1990er Jahren und endete im Frühjahr nahezu zwei Wochen früher, wodurch sich die Schneesaison um fast drei Wochen verkürzt hat (Thoman & Walsh 2019). Nach Modellberechnungen wird sich in den Küstengebirgen je nach Szenario der Schneefall um 17 bis 58% bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verringern, am Nordhang der Gebirge im Landesinnern um 21% erhöhen. Allgemein wird sich die Länge der Schneesaison weiter verkürzen (Littell et al. 2018).

Mit dem zunehmenden Verlust von Gletschereis und Schneemasse erhöhen sich die Temperaturen der aus diesen Ressourcen gespeisten Flüsse besonders im Frühjahr und Sommer. Das ist vor allem ein Problem für den die Flüsse hinauf wandernden Lachs. Das wärmere Wasser kann weniger Sauerstoff aufnehmen und begünstigt Parasiten und Pilze, die den Lachs schwächen, was nach örtlichen Beobachtungen auch zum Fischsterben führen kann (Thoman & Walsh 2019).

Kanada

Die Gletscher in den Rocky Mountains, den Coast Mountains, Cascades u.a. Gebirgszügen in den Provinzen British Columbia und Alberta im westlichen Teil von Kanada bedecken eine Fläche von 12.658

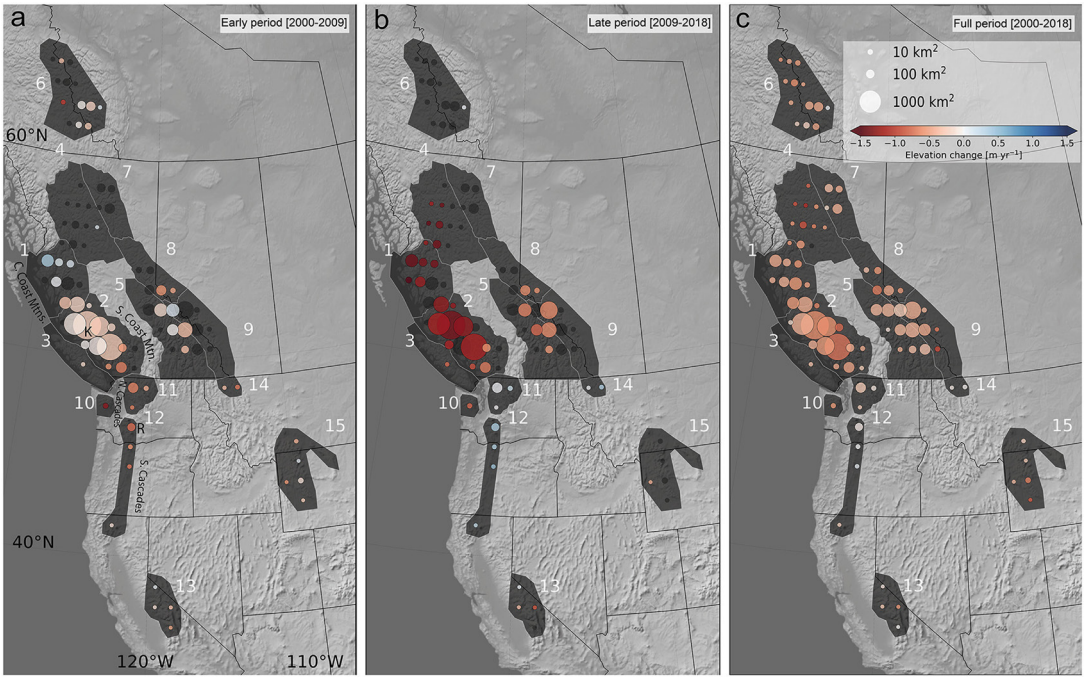

Abb. 3.7-3: Änderung der Oberflächenhöhe der Gletscher in m/Jahr im westlichen Nordamerika (ohne Alaska) 2000-2018, (a) in der frühen Periode 2000-2009 und (b) in 2009-2018. (c) gibt die Differenz zwischen beiden Perioden an. Die Größe der Kreise zeigt die Flächengröße der Gletschergebiete in km². Die Ziffern geben Gebirgszüge an: 1+2: Coast Mountains, 3: Vancouver Island, 4+5: Interior Range, 6: Mackenzie Mountains, 7-9: Rocky Mountains, 10 Olympics, 11+12: Cascades, 13 Sierra Nevada, 14: Glacier National Park, 15: Wind River Range (Menounos et al. 2019, CC BY-ND-NC).

km². Hinzu kommen 649 km² in Yukon und den Nordwest-Territorien, z.B. in den Mackenzie Mountains (*Abb. 3.7-3*). Zweidrittel dieser Gletscherfläche (8.760 km²) befinden sich in den Küstengebirgen (Menounos et al. 2019). Die Gletscher im kanadischen Westen machen flächenmäßig jedoch nur ein Siebentel der Gletscher in Alaska aus und spielen für den globalen Meeresspiegel kaum eine Rolle. Sie sind jedoch in vielen Regionen ein wichtiges Süßwasserreservoir, das vor allem im Spätsommer, wenn die Schneebedeckung weitgehend abgeschmolzen ist, als Schmelzwasserlieferant von Bedeutung ist.

Die vorherrschenden Westwinde sorgen aufgrund der von Norden nach Süden verlaufenden Gebirgszüge für starke Niederschlagsunterschiede von West nach Ost. Die höchsten Niederschläge fallen im Winter in den Coast Mountains (Bolch et al. 2010). Auch in den weiter landeinwärts gelegenen Cariboo Mountains, der nördlichsten Kette der Columbia Mountains, zeigt sich noch die Exponiertheit nach Westen. Rund 1000 mm Niederschläge fallen hier auf der Luv- und nur 680 mm auf der Leeseite (Beedle et al. 2015).

Von den ursprünglich ca. 14.300 Gletschern lösten sich zwischen den 1980ern und den 2000er Jahren ungefähr 2.000 in kleinere Einheiten auf, so dass sich die Anzahl der Gletscher um etwa 3.000 erhöhte. 300 Gletscher verschwanden in derselben Periode aber auch ganz. Den geringsten relativen Verlust hatte mit 7% das nördliche Küstengebirge, den größten mit 25% die nördlichen Rocky Mountains (Bolch et al. 2010). Im nördlichen Teil der westlich von den Rocky Mountains liegenden Columbia Mountains, den Cariboo Mountains, bedeckten die Gletscher 1952 noch eine Fläche von 824 km², 2005 nur noch 731 km². Die Volumenveränderungen zwischen 1952 und 2005 werden auf rund 11 km³ geschätzt (Beedle et al. 2015). Einen deutlich größeren Verlust an Eismasse zeigten mit 7,4 Gt/Jahr allein zwischen 2009 und 2018 die südlichen Coast Mountains, die fast die Hälfte der westkanadischen Eisbedeckung beherbergen (Menounos et al. 2019 und *Abb. 3.7-3*). Neben anthropogen bedingten Klimaänderungen werden von Menounos et al. (2019) auch natürliche Schwankungen der Westwindzirkulation als Ursache angenommen.

Nach Simulationen mit einem hochaufgelösten regionalen Eis-Modell nach verschiedenen Szenarien bis 2100 zeigen die etwas landeinwärts gelegenen Gletscher der Küstenregion den stärksten Widerstand gegenüber dem Klimawandel, vor allem die massereichen Gletscher im Norden und Süden des Küstengebirges. Die küstennahen Gletscher werden dagegen gegenüber dem Zustand von 2005 bis 2100 durch die zu erwartende Erwärmung und Veränderung der Niederschläge 75% ihrer Fläche und 70% ihres Volumens verlieren. In den Columbia Mountains und den Rocky Mountains werden Fläche und Volumen nach diesen Modellberechnungen sogar um 90% zurückgehen. Dabei zeigt die Entwicklung zwischen niedrigem (RCP2.6) und hohem (RCP8.5) Szenario bis 2050 kaum einen Unterschied, differiert aber bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich (Clarke et al. 2015).

Die Folgen der Gletscherschmelze für die Hydrologie der Region sind schon heute gravierend. Der fast 2.000 km lange und in den Columbia Mountains entspringende Columbia River ist der wasserreichste pazifische Zufluss Nordamerikas. Der kanadische Anteil an dem Flusseinzugsgebiet beträgt nur 15%, da der Columbia River hauptsächlich durch die nordwestlichen Vereinigten Staaten fließt. Er liefert jedoch aufgrund der hohen Niederschläge und Gletscherschmelze 30-40% des gesamten Abflusses des Columbia Rivers (Pelto et al. 2019). Die Wasserkraftwerke seiner Staudämme produzieren so viel Strom wie an keinem anderen Fluss in Nordamerika. In British Columbia sind sie stark vom Schmelzwasserzufluss der umliegenden Gletscher abhängig, die in den Sommermonaten auch die Flusstemperaturen regulieren, was für den Fischreichtum der Region von großer Bedeutung ist (Clarke et al. 2015).

USA

Gletscher

Die Gletscher des zusammenhängenden Staatsgebiets der USA (ohne Alaska) nehmen lediglich eine Fläche von 533 km² ein (Menounos et al. 2019), was nur 4% der Gletscherfläche im westlichen Kanada sind. Sie spielen noch viel weniger als die westkanadischen Gletscher eine Rolle für den globalen Meeresspiegelanstieg. Ihre Bedeutung für den regionalen Wasserhaushalt ist jedoch erheblich und nimmt trotz ihrer rapide abnehmenden Größe an Bedeutung zu, je weiter südlich und damit in je trockeneren Gebieten sich die Gletscher befinden. Zugleich werden zusätzlich Schneefall und dauerhafte Schneelagen für die Wasserversorgung von Kommunen, Landwirtschaft und Industrie immer wichtiger.

Die mit deutlichem Abstand größten Gletscherflächen befinden sich mit den Olympic Mountains und den Cascades in den Bundesstaaten Washington und Oregon im Nordwesten der USA (*Abb. 3.7-3*). Die 858 Gletscher der Region umfassen eine Fläche von 466 km² und stellen damit 87% der Gletscherfläche der zusammenhängenden Vereinigten Staaten (ohne Alaska) dar. Die Vergletscherung nimmt vom nördlichen Washington nach Süden hin ab, wo in Oregon die Gletscher auf die höheren Lagen der Schichtvulkane begrenzt

sind (Frans et al. 2018). Die Nordsüd-Ausrichtung der Cascades teilt das Gebiet in einen maritimen und feuchten Westen und trockenen Osten. Im Westen herrschen milde Temperaturen und hohe Niederschläge. Das kontinentalere Klima im Osten ist deutlich trockener sowie kälter im Winter und wärmer im Sommer. Das Winterklima wird durch Schwankungen der Meeresoberflächentemperaturen beeinflusst, die mit ENSO im Zusammenhang stehen (Frans et al. 2018). Weitere nennenswerte Gletschergebiete befinden sich in der kalifornischen Sierra Nevada (11 km²) sowie in den Rocky Mountains im Glacier National Park nahe der kanadischen Grenze (29 km²) und in der Wind River Range (60 km²) südlich davon (Menounos et al. 2019).

In den letzten 100 Jahren hat die vergletscherte Fläche in der nördlichen Cascade Range um 50%, am Mount Rainier, dem höchsten Berg der Kaskadenkette, trotz der Höhenlage sogar noch um 22% und in den Olympic Mountains in der nordwestlichen Ecke des Bundesstaates Washington um 52% abgenommen (*Abb. 3.7-4*). Seit den 1980er Jahren folgt die Abnahme der Gletscherfläche der Temperaturzunahme, wird aber auch durch eine positive Phase der Pazifischen Dekaden-Oszillation (PDO), einer Schwankung der Temperatur des Oberflächenwassers im Nordpazifik vor der nordamerikanischen Westküste, beeinflusst. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird es laut Frans et al. (2018) im pazifischen Nordwesten der USA um 6 °C wärmer, besonders in den inneren Flussbecken. Außerdem wird eine allgemeine Zunahme der Niederschläge von bis zu 10% erwartet. Einige Modelle zeigen eine deutliche Niederschlagszunahme bis zur Mitte des Jahrhunderts, was zu einer Abschwächung des Massenverlusts der Gletscher führen kann, da der Temperaturanstieg noch unter 3°C liegen wird. Dagegen werden höhere Niederschläge später im Jahrhundert kaum noch einen Einfluss auf die Massenbilanz der Gletscher haben, da sie aufgrund der höheren Temperaturen zunehmend als Regen fallen werden. Da zugleich die Schneeschmelze im Jahresverlauf deutlich früher einsetzt, werden Ende des 21. Jahrhunderts im August bis zu 80% weniger Abfluss von den Gletschern der Region erwartet (Frans et al. 2018).

Auch die Gletscher der Sierra Nevada zeigen starke Rückzugstendenzen, wobei der absolute Eisverlust wegen der geringen Gletschermasse eher klein ist. Die Sierra Nevada erstreckt sich im Osten Kaliforniens über 640 km von Norden nach Süden mit Gipfelhöhen bis über 4.000 m. Die Niederschläge werden durch das Pazifische Hochdruck-System kontrolliert, das im Sommer auf der geographischen Breite der Sierra liegt und Tiefdruckgebiete vom Golf von Mexiko nach Norden lenkt. Im Winter bewegt sich das Hoch nach Süden und ermöglicht feuchten Westwinden, die Sierra Nevada zu erreichen. Die in Höhen zwischen 2.700 und 4.200 m

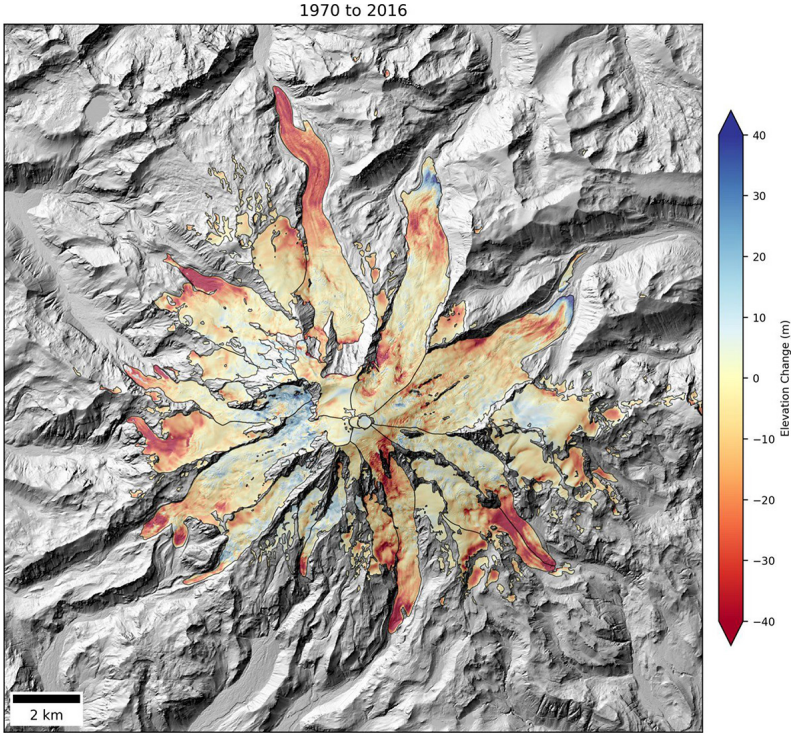

Abb. 3.7-4: *Höhenänderung der Gletscheroberfläche am Mount Rainier 1970 bis 2016. Die Höhenabnahmen betragen stellenweise bis zu 40 m (Flickr 2017): Mount Rainier Elevation, https://www.flickr.com/photos/uwnews/37582942530/in/album-72157687359007331, CC BY).*

liegenden 122 Gletscher der Sierra Nevada bedecken eine Fläche von rund 15 km² (Stand 2004), wobei 90% Minigletscher von unter 0,05 km² sind. Der Rückgang der Fläche betrug seit 1903 55% und ist primär durch höhere Winter- und Sommertemperaturen bedingt. Bei Beibehaltung der gegenwärtigen Verlustrate werden die meisten Gletscher ab 2070 und in den Jahrzehnten danach ganz verschwinden (Basagic & Fountain 2011).

Schneebedeckung

Die Schneebedeckung in den Gebirgsregionen der westlichen USA speichert einen großen Teil des Wassers, das für die landwirtschaftliche Bewässerung, die kommunale Wasserversorgung und die industrielle Nutzung gebraucht wird. In den Gebirgsregionen fällt über die Hälfte der jährlichen Niederschläge als Schnee, aus dessen Schmelzwasser 75-85% der jährlichen Abflussmengen stammt. Davon sind im US-amerikanischen Westen über 70 Mio. Menschen abhängig (Sultana & Vhoi 2018).

90% der Beobachtungsdaten zeigen in den westlichen USA eine Abnahme der Schneebedeckung (*Abb. 3.7-5*). Die Abnahmen sind am stärksten im Frühjahr, in den pazifischen Staaten und an Orten mit einem milden Winter-Klima. Der Schneeverlust betrug seit der Mitte des 20. Jahrhunderts, bezogen auf den 1. April, 15-30% bzw. 25-50 km³ Wasseräquivalent. Das ist vergleichbar mit dem Wasservolumen des größten künstlichen Stausees in den westlichen USA, dem Lake Mead (Mote et al. 2018).

Besonders kritisch ist die Abhängigkeit der Wasserversorgung von der Schneeschmelze im trockenen Kalifornien, dessen Wasserreservoire wesentlich aus der Sierra Nevada gespeist werden. 70 % des Abflusses aus der Sierra Nevada entstammen der Schneeschmelze (Margulis et al. 2016). Die Niederschläge fallen hier primär zwischen Oktober und April, hauptsächlich als

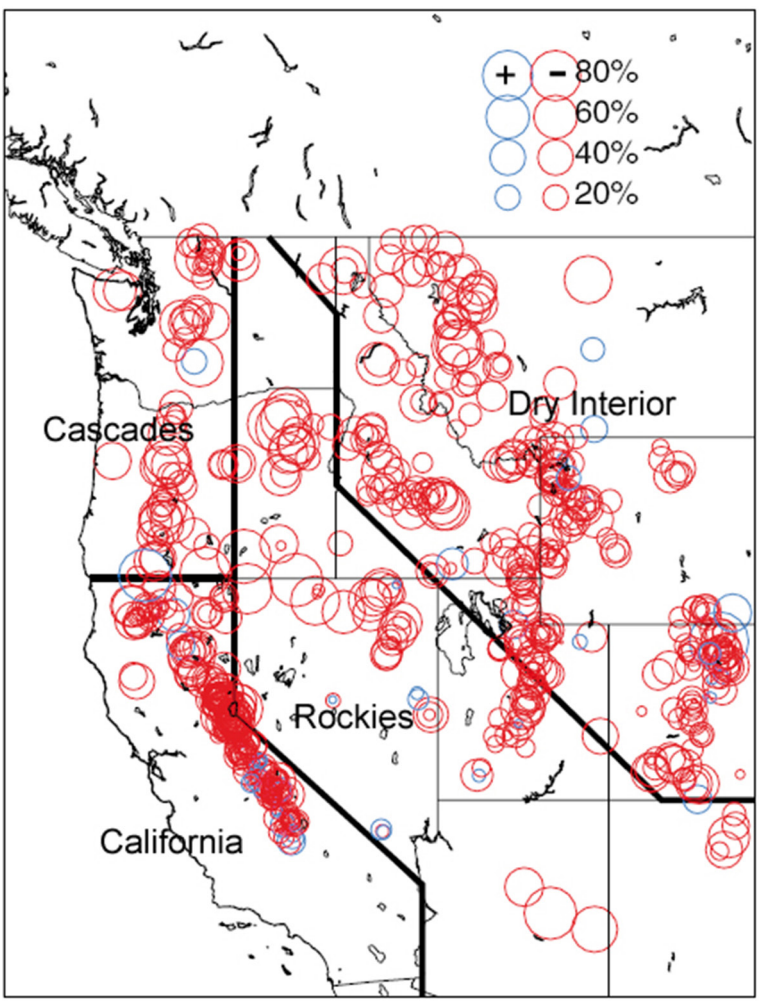

Abb. 3.7-5: *Lineare Trends der Volumina der Schneebedeckung bis 2016 relativ zu 1955 (Mote et al. 2018, CC BY).*

Schnee, während der Sommer sehr trocken ist. In normalen Jahren zeigt die Sierra Nevada im Frühjahr eine ausgedehnte Schneebedeckung, die jedoch in Dürrejahren stark zusammenschrumpft (*Abb. 3.7-6*). Außerdem bewirken höhere Temperaturen eine stärkere Verdunstung und damit weitere Austrocknung und im Winter und beginnenden Frühjahr statt Schneefall eher Regenniederschlag, der unmittelbar abfließt und im Sommer nicht mehr zur Verfügung steht. Als Folge fiel z.B. während der extremen Dürre von 2012 bis 2016 der Wasserspiegel des Folsom Lake, der die Wasserversorgung von ca. 500.000 Menschen und die Erzeugung von elektrischer Energie sicherstellt, auf 17% seiner normalen Kapazität. Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird ein Temperaturanstieg von 1°C und mehr projiziert. Die Abflussmengen werden nach Modellberechnungen bis dahin im Frühling um über 20% und im Sommer um über 30% abnehmen, im Winter dagegen wegen der früheren Schneeschmelze um bis zu 30% zunehmen (Sultana & Vhoi 2018). Damit fehlt das Wasser gerade in jener Jahreszeit, in der der Bedarf durch Ökosysteme und menschliche Nutzung am höchsten ist.

Schlussbetrachtung

Die Reduktion von Gletscher- und Schneeflächen in den Hochgebirgen Nordamerikas hat zum einen unmittelbare Auswirkungen in den Hochgebirgen selbst. Eis und Schnee prägen das Gesicht vieler Bergzüge von Alaska bis zur Sierra Nevada und ziehen zahlreiche Touristen und Wintersportler an. Zum anderen kommt es zu globalen und regionalen Fernwirkungen. Einen nennenswerten Einfluss auf den globalen Meeresspiegel haben allerdings nur die großen Gletscher in Alaska. Ein vollständiges Abschmelzen der Gletscher in Alaska würde den globalen Meeresspiegel um 5,5 cm steigen lassen, ein Abschmelzen in den Gebirgszügen Kanadas und der USA um nur 3 mm (IPCC 2013).

Gletscher und Schneelagen prägen jedoch vor allem in den westlichen Vereinigten Staaten und im westlichen Kanada in unterschiedlichem Ausmaß die Hydrologie der jeweiligen Region. Der Gletscherabfluss wird sich bei weiterer Erwärmung zunächst steigern, dann aber je nach Gletschergröße und -lage abnehmen und schließlich ganz versiegen. Das bedeutet vor allem in trockenen Sommermonaten eine Erwärmung in Flüs-

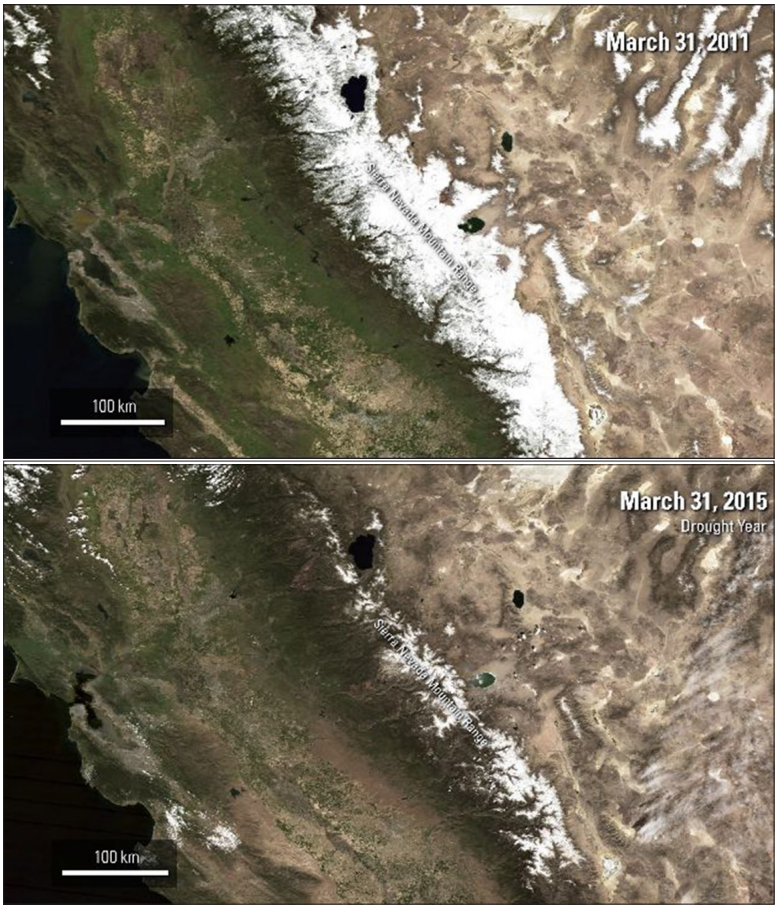

Abb. 3.7-6: *Schneebedeckung in der Sierra Nevada.* ***oben:*** *in einem normalen Jahr;* ***unten:*** *in einem trockenen Jahr, jeweils am 31. März (USGS 2017, public domain).*

sen und Bächen mit Folgen für die Ökosysteme sowie eine Verringerung der Wasserführung gerade in der Jahreszeit, in der das Gletscherwasser als Ausgleich für die fehlenden Niederschläge besonders intensiv gebraucht wird. Unmittelbarer noch wirkt sich die Schneeschmelze aus. Die Schneesaison hat sich bereits deutlich verkürzt, und der Schneefall wird in vielen Hochgebirgsregionen zunehmend durch Regen ersetzt, der im Vergleich zum Schnee nur sehr begrenzt im Boden gespeichert wird und zu einem großen Teil direkt abfließt. Die Folgen sind eine Austrocknung des Bodens, eine Schädigung der Hochgebirgswälder, die Begünstigung von Waldbränden sowie erhebliche Probleme für die Bewässerung in der Landwirtschaft, die Trinkwasserversorgung und die Erzeugung von elektrischer Energie.

Literatur

BASAGIC, H. C. & A.G. FOUNTAIN (2011): Quantifying 20th Century Glacier Change in the Sierra Nevada, California, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 43:3, 317-330, DOI: 10.1657/1938-4246-43.3.317.

BEAMER, J. P., D. F. HILL, A. ARENDT & G. E. LISTON (2016): High-resolution modeling of coastal freshwater discharge and glacier mass balance in the Gulf of Alaska watershed, Water Resour. Res., 52, 3888-3909, doi:10.1002/2015WR018457.

BEEDLE, M. J., B. MENOUNOS & R. WHEATE (2015): Glacier change in the Cariboo Mountains, British Columbia, Canada (1952-2005), The Cryosphere, 9, 65-80.

BOLCH, T., B. MENOUNOS & R. WHEATE (2010): Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005, Remote Sensing of Environment 114, 127-137.

CARLSON, A. E., Z. KILMER, L. B. ZIEGLER et al. (2017): Recent retreat of Columbia Glacier, Alaska: Millennial context. Geology ; 45 (6): 547-550. doi: *https://doi.org/10.1130/G38479.1.*

CHAPIN, F. S., III, S. F. TRAINOR, P. COCHRAN et al. (2014): Ch. 22: Alaska. In: Melillo, J. M., T. C. Richmond & G. W. Yohe (eds.). Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment, U.S. Global Change Research Program, 514-536. doi:10.7930/J00Z7150.

CLARKE, G. K. C., A. H. JAROSCH, F. S. ANSLOW, V. RADIC & B. MENOUNOS (2015): Projected deglaciation of western Canada in the twenty-first century, Nature Geoscience, doi:10.1038/ngeo2407.

FRANS, C., ISTANBULLUOGLU, E., LETTENMAIER, D. P., FOUNTAIN, A. G., & J. RIEDEL (2018): Glacier recession and the response of summer streamflow in the Pacific Northwest United States, 1960-2099. Water Resources Research, 54, 772. *https://doi.org/10.1029/2017WR021764.*

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Chapter 4: Observations: Cryosphere, 4.3.

JOSBERGER, E. G., R. A. SHUCHMAN, L. K. JENKINS, K.A. ENDSLEY (2014): Melt water input from the Bering Glacier watershed into the Gulf of Alaska, Geophysical Research Letters, 41, doi:10.1002/2013GL058734.

KIENHOLZ, CH., S. HERREID, J.L. RICH, A.A. ARENDT, R. HOCK, E.W. BURGESS (2015): Derivation and analysis of a complete modern-date glacier inventory for Alaska and northwest Canada , Journal of Glaciology 61, 227, 403-420 , *https://doi.org/10.3189/2015JoG14J230.*

LITTELL, J. S., S. A. MCAFEE & G. D. HAYWARD (2018): Alaska Snowpack Response to Climate Change: Statewide Snowfall Equivalent and Snowpack Water Scenarios, Water 10, 5, doi:10.3390/w10050668.

MARGULIS, S. A., G. CORTÉS, M. GIROTTO, L. S. HUNING, D. LI & M. DURAND (2016): Characterizing the extreme 2015 snowpack deficit in the Sierra Nevada (USA) and the implications for drought recovery, Geophys. Res. Lett., 43, 6341–6349, doi:10.1002/2016GL068520.

MCGRATH, D., L. SASS, S. O'NEEL, A. ARENDT & C. KIENHOLZ (2017): Hypsometric control on glacier mass balance sensitivity in Alaska and northwest Canada, Earth`s Future, *https://doi.org/10.1002/2016EF000479.*

MCNABB, R. W. & R. HOCK (2014), Alaska tidewater glacier terminus positions, 1948-2012, J. Geophys. Res. Earth Surf., 119, 153-167, doi:10.1002/2013JF002915.

MENOUNOS, B., R. HUGONNET, D. SHEAN et al. (2019): Heterogeneous changes in western North American glaciers linked to decadal variability in zonal wind strength. Geophysical Research Letters, 46, 200-209. *https://doi.org/10.1029/2018GL080942.*

MOTE, P. W., S. LI, D. P. LETTENMAIER, M. XIAO & R. ENGEL (2018): Dramatic declines in snowpack in the western US. npj Clim Atmos Sci 1, 2, doi:10.1038/s41612-018-0012-1.

PELTO, B. M., B. MENOUNOS & S. J. MARSHALL (2019): Multi-year evaluation of airborne geodetic surveys to estimate seasonal mass balance, Columbia and Rocky Mountains, Canada, The Cryosphere, 13, 1709-1727. *https://doi.org/10.5194/tc-13-1709-2019.*

SULTANA, S. & M. VHOI (2018): Sensitivity of Streamflow Response in the Snow-Dominated Sierra Nevada Watershed Using Projected CMIP5 Data, Journal of Hydrologic Engineering 23, 8, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001640.

TANGBORN, W. (2013): Mass balance, runoff and surges of Bering Glacier, Alaska, The Cryosphere, 7, 867-875. *https://doi.org/10.5194/tc-7-867-2013.*

THOMAN, R. & J. E. WALSH (2019): Alaska's Changing Environment: documenting Alaska's physical and biological changes through observations. McFarland, H. R. (ed.). International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks.

USGS (2017): MODIS Observes Snowpack in the Sierra Nevada Mountain Range. *https://www.usgs.gov/media/videos/modis-observes-snowpack-sierra-nevada-mountain-range.*

WOUTERS, B., A. S. GARDNER & G. MOHOLDT (2019): Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016). Front. Earth Sci. 7:96. doi: 10.3389/feart.2019.00096.

ZEMP, M., M. HUSS, E. THIBERT et al. (2019): Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016, Nature 568 (7752), 382-386 doi:10.1038/s41586-019-1071-0.

Kontakt:

Dr. Dieter Kasang (kasang@dkrz.de)
Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)
Dr. José L. Lozán
Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

Kasang, D. & J. L. Lozán (2020): Gletscher und Schnee in Hochgebirgen Nordamerikas. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl et al. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel. S. 152-159. Online: www.warnsignal-klima.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.hochgebirge-im-wandel.23.