

# Grundvorlesung Hydrologie

## Die Kryosphäre im Klimawandel und ihre Bedeutung für den globalen Wasserhaushalt



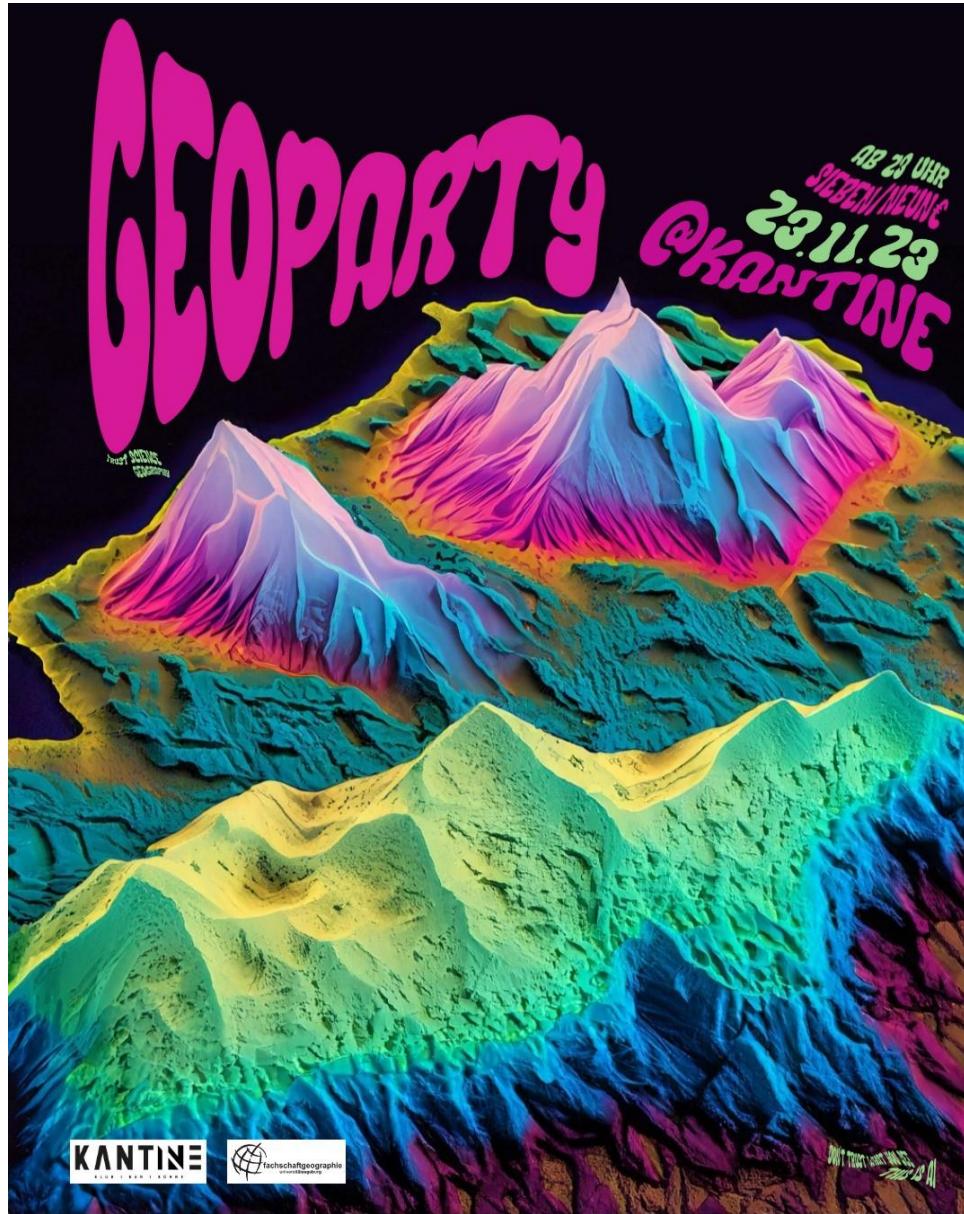
Lewis Pugh crossing the Antarctic Ocean. „I swim to remind people what we need to protect“.

Dr. Jan Bliefernicht  
Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie  
Institut für Geographie  
Universität Augsburg



**UNA**  
Universität  
Augsburg  
University

# Außeruniversitäre Veranstaltung: Geoparty



Heute Abend!

# Grundvorlesung Hydrologie

## Die Kryosphäre im Klimawandel und deren Bedeutung für den globalen Wasserhaushalt



Lewis Pugh crossing the Antarctic Ocean. „I swim to remind people what we need to protect“.

Dr. Jan Bliefernicht  
Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie  
Institut für Geographie  
Universität Augsburg



**UNA**  
Universität  
Augsburg  
University

# Public Climate School (PCS)



Schule ▾ Hochschule ▾ Lokales NEU: 5 Minuten fürs Klima Über Uns ▾ Rückblick ▾

- ➔ seit 2019 deutschlandweite Initiative zur Klimabildung in Schulen und Hochschulen
- ➔ <https://publicclimateschool.de/>

# Deutschlandweite PCS-Veranstaltungen

	Zeit	20.11.23	21.11.23	22.11.23	23.11.23	Zum YouTube-Livestream
Schulprogramm	08:30 – 09:15 Uhr	Klimabasics Aufzeichnung mit Sebastian Seiffert	Nachhaltig Reisen Live-Schulstunde mit Jeroen und Vivian Trzaska	Klimakommunikation Aufgezeichnet mit Johanna Dreyer	Nachhaltigkeits-siegel und Greenwashing Live-Schulstunde mit der Verbraucherzentrale	Postwachstums-ökonomie Aufzeichnung mit Ulrich Brand
	09:45 – 10:30 Uhr	Biodiversitäts-krise Live-Schulstunde mit Gregor Hagedorn	Klimagefühle Live-Schulstunde mit Lea Dohm	Zeit für Projektarbeit!	Zeit für Projektarbeit!	Klima, Mobilität, Demokratie Live-Schulstunde mit Katja Diehl
	11:00 – 11:45 Uhr	Klimacheck Live-Einführung mit Greenpeace	Good Practice Live von Schulen vor Ort mit Greenpeace	Good Practice Live von Schulen vor Ort mit Greenpeace	Good Practice Live von Schulen vor Ort mit Greenpeace	Let's act! Live-Ergebnisvorstellung mit Greenpeace
	12:15 – 13:00 Uhr	Klimakrise und Flucht Live-Schulstunde mit der Seebrücke	MAPA Aufzeichnung mit Farzana Faruk Jhumu und Yolima Vargas Garzón	Zeit für Projektarbeit!	Sauber unterwegs Live-Schulstunde mit dem Kinderbüro der Uni Wien	Klima & Sport Live-Schulstunde mit Julia Anna Wlasak
Uniprogramm	Nachmittags/ Abends		Der Beitrag von Städten zum Klimaschutz live aus der TU Berlin	Transformation & institutioneller Wandel live aus der Hochschule für Gesellschaftsgestaltung	Arktis-Klimapolitik live aus der Hochschule München	Ausblick auf die UN-Klimakonferenz COP28 in Dubai live aus der Uni Augsburg
	Nachmittags/ Abends		Die Klimakatastrophe und individuelle Handlungsoptionen live aus der Uni Mainz	Klimagerechtigkeit & eine gerechte Energiewende live aus der Uni Hamburg	Klimaangst Aufzeichnung mit Hannah Klenk	Psychologie der Nachhaltigkeit Aufzeichnung mit Marcel Hunecke
	Nachmittags/ Abends		Quo vadis, bayerische Klimapolitik? live aus der Uni Augsburg	Klimakommunikation Aufzeichnung mit Carel Mohn	Ein Überblick zur Klimakrise Aufzeichnung mit Harald Lesch	Moorschutz ist Klimaschutz Aufzeichnung mit Susanne Abel
						Mobilitäts-transformation Aufzeichnung mit Paul Papendieck



# PCS-Veranstaltungen der Universität Augsburg



## PROGRAMM AM 23. NOVEMBER

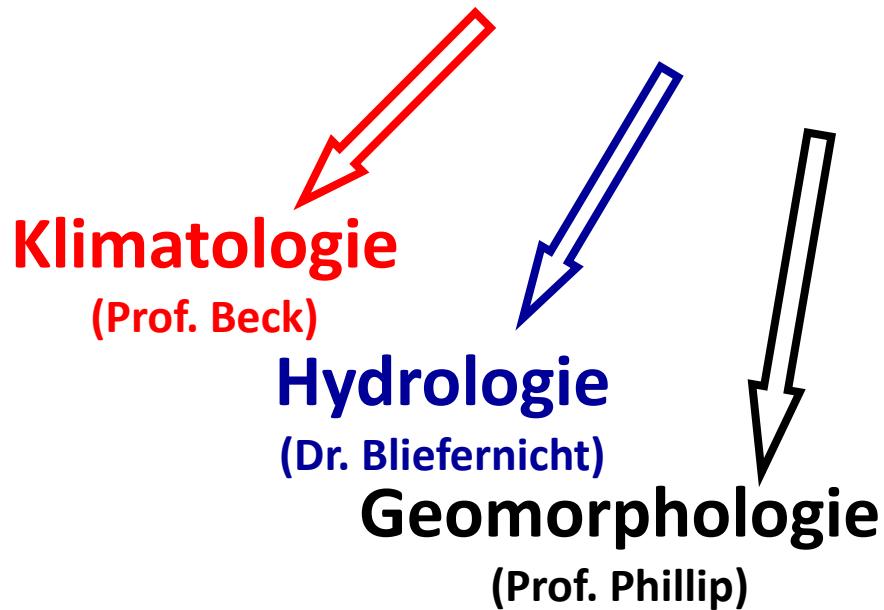
08.15 Uhr: Philosophy for future? Reflexionslogische und geistphilosophische Aspekte der Klimakrise	+
10.00 Uhr: Förderung des Ausbaus von Windenergieanlagen im Umwelt- und Planungsrecht	+
10.00 Uhr: Nachhaltige digitale Kommunikation	+
10.00 Uhr: Die Kryosphäre und ihre Bedeutung im globalen Wasserhaushalt	+
10.00 Uhr: Das Klimasystem der Erde: Energiebilanz & Treibhauseffekt	+
11.45 Uhr: Nachhaltigkeit und Umweltschutz im Unterricht – „Nicht mein Business!“	+
11.45 Uhr: Methoden einer ökologisch orientierten Erlebnispädagogik	+
12.00 Uhr: Climate Crisis & Environmental Storytelling	+
14.00 Uhr: Mechanische Abfallbehandlung	+
14.00 Uhr: Psychologie des klimaschützenden Verhaltens	+
14.00 Uhr: Potenziale von Ridepooling-Systemen im Rahmen der Verkehrswende	+
14.00 Uhr: Widersprüche des marktbasierteren Klimaschutzes am Bsp. REDD+	+
15:30 Uhr: Workshop zu Dekolonialen Reflexionstools in der Bildungs- und Selbstreflexionsarbeit	+
15.45 Uhr: Vortrag und Diskussionsrunde: Wirkstatt Nachhaltigkeit - Bildungspakt Bayern	+
15.45 Uhr: Welche ökologischen Auswirkungen hat mein Produkt? Life Cycle Assessment Basics am Beispiel des "Augsburger Bechers"	+
18.00 Uhr: Abschlussdiskussion zur anstehenden UN-Klimakonferenz in Dubai (COP28)	+



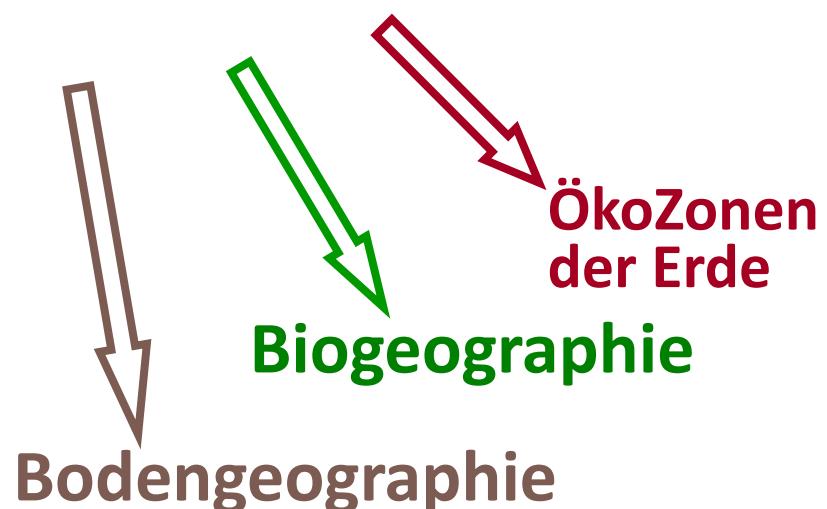
# Überblick Grundkurs

## Physische Geographie

### Teil I: Wintersemester



### Teil II: Sommersemester



# Überblick zur Hydrologie-Vorlesung

---

1. Einführung in die Wasserforschung
2. Wasser als Stoff
3. Das Wasser auf der Erde und seine Verteilung
4. Die Ozeane
- 5. Die Kryosphäre und ihre Bedeutung im globalen Wasserhaushalt**
6. Das Wasser im Untergrund
7. Das Wasser der Atmosphäre
8. Fließgewässer und Seen im Wasserkreislauf
9. Einzugsgebietshydrologie
10. Prozesse der Abflussbildung

# Gliederung der heutigen Veranstaltung

---

1. Die Kryosphäre, ihre Komponenten und Bedeutung
2. Dynamik der Kryosphäre: Gletscher und Inlandeismasse
3. Status Quo der Kryosphäre im Klimawandel
4. Zusammenfassung

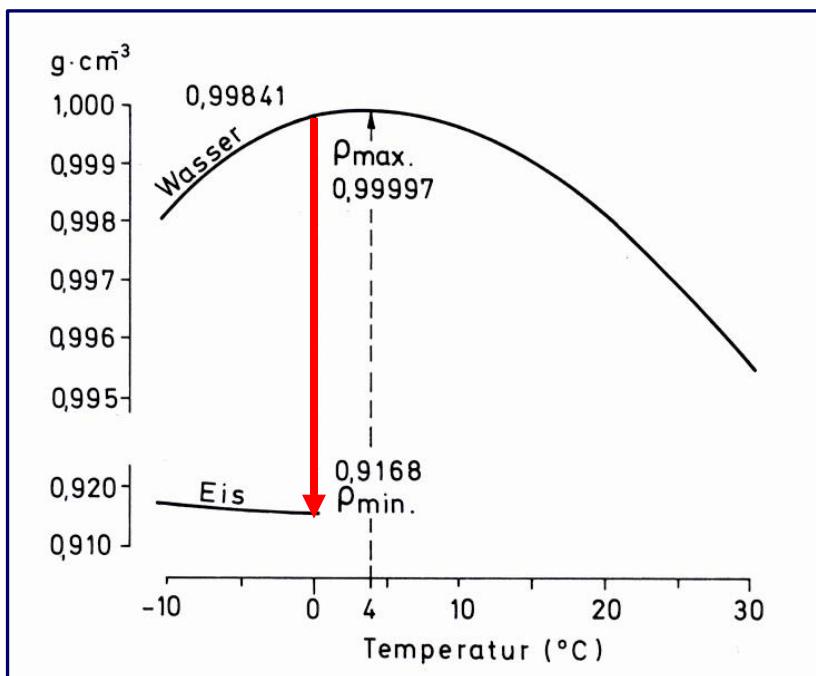
# 1. Die Kryosphäre, ihre Komponenten und Bedeutung

# **Was ist die Kryosphäre?**

---

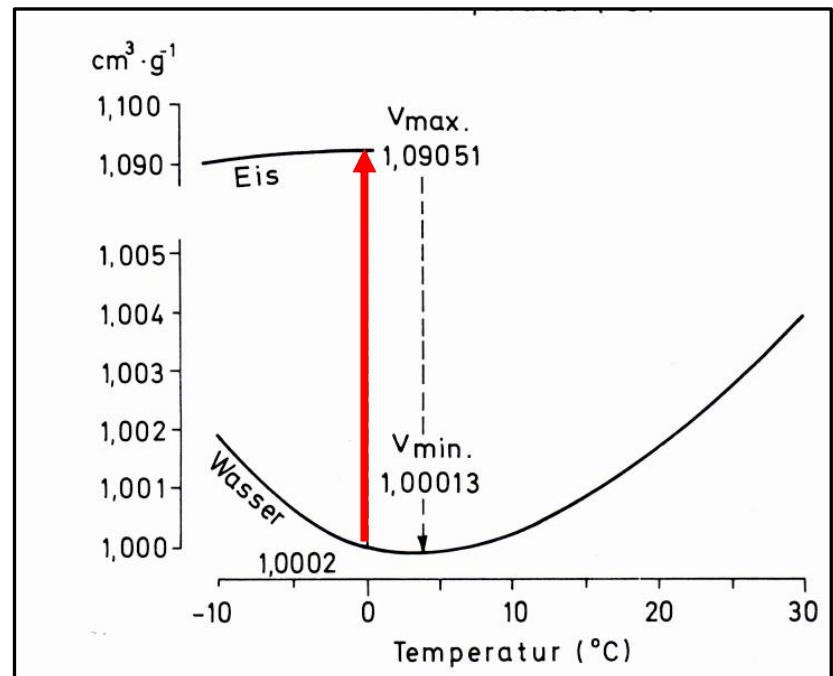
# Dichtheanomalie des Wassers

Dichte vs. Temperatur



Baumgartner & Liebscher (1996, S.59)

spez. Volumen vs. Temperatur



Beim Gefrieren nimmt Dichte  
sprungartig ab

Volumen nimmt  
sprungartig zu

# Eis schwimmt oben

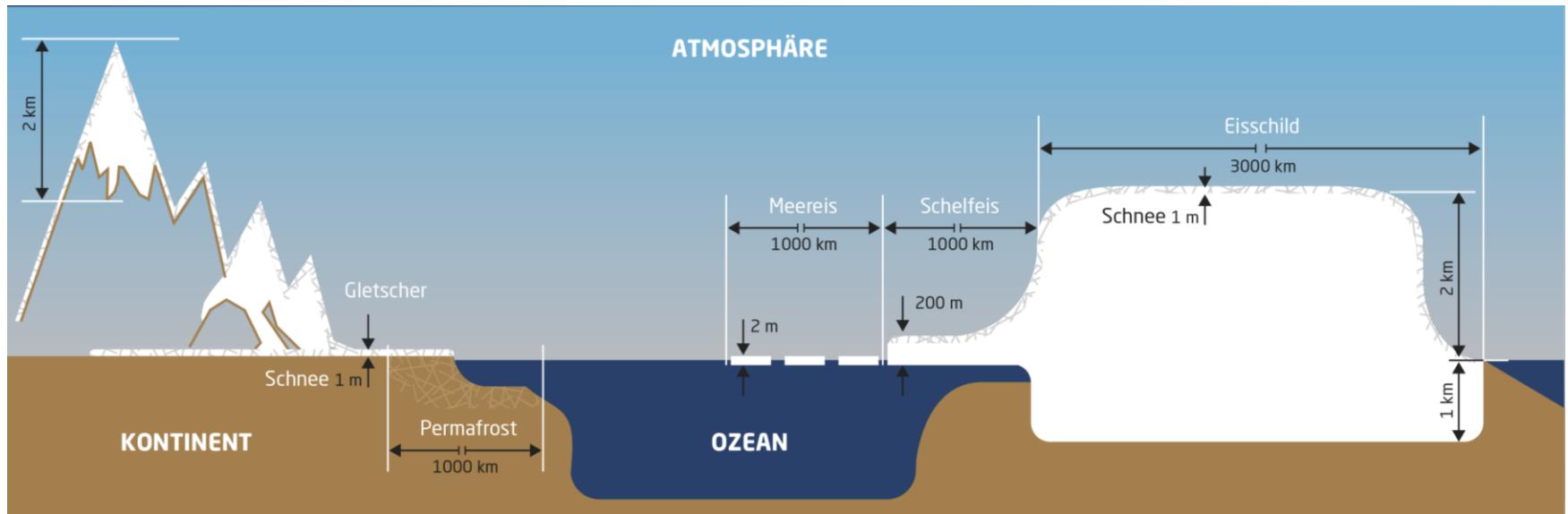
---



# Welche Komponenten zählen zur Kryosphäre?

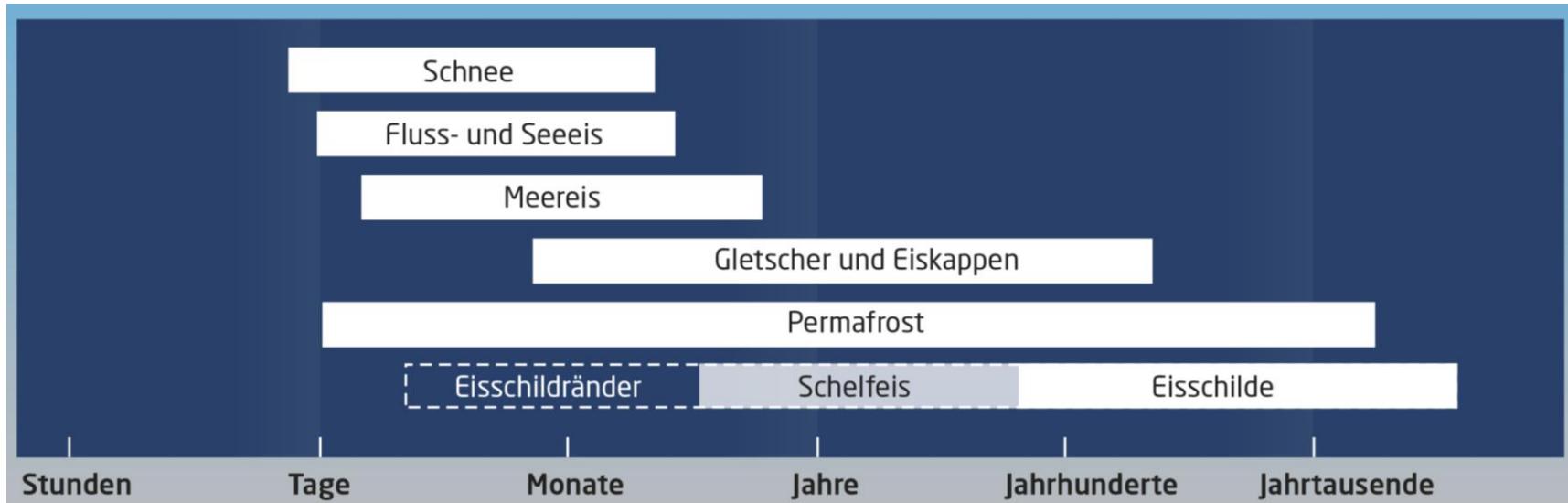
---

# Komponenten der Kryosphäre



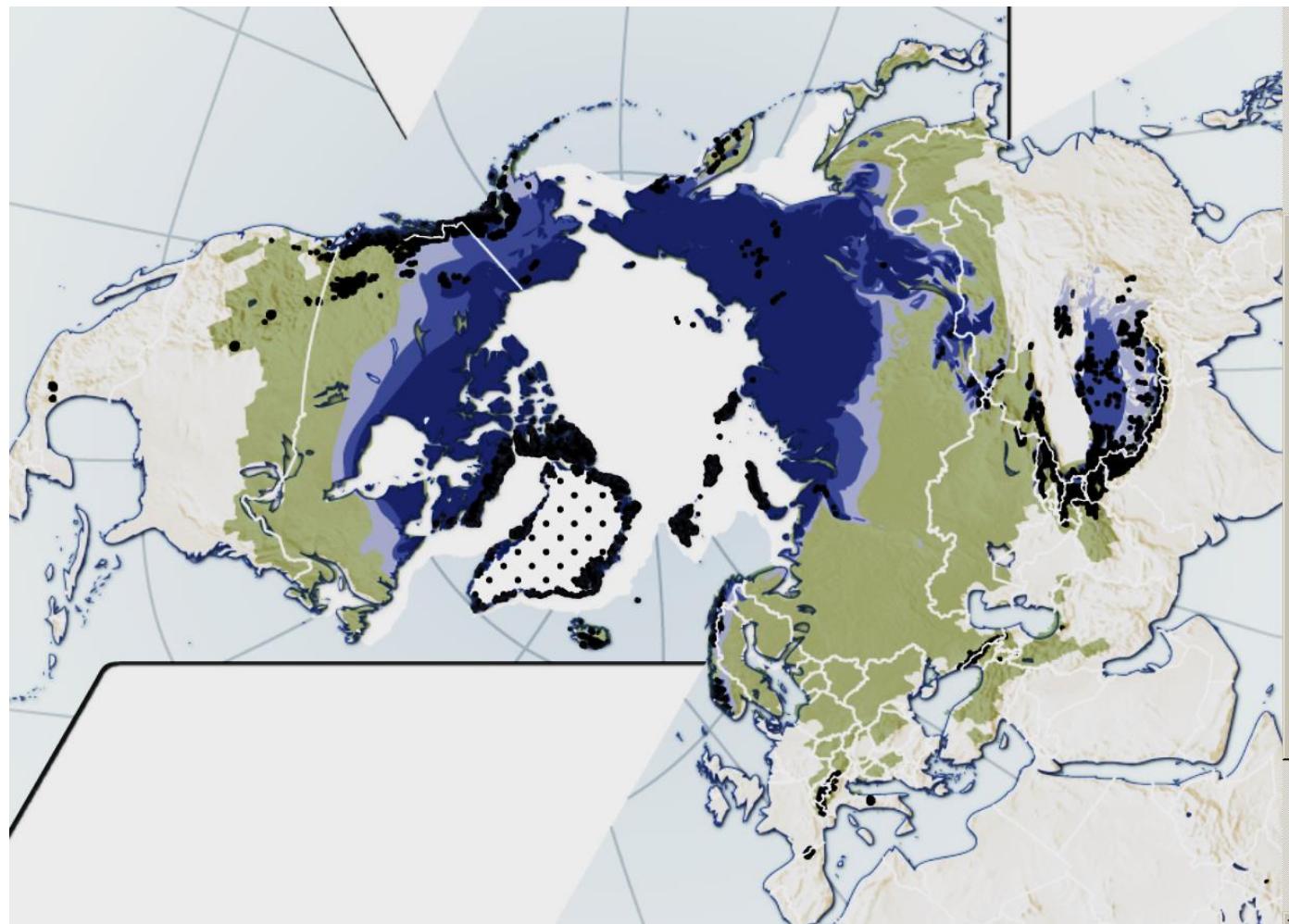
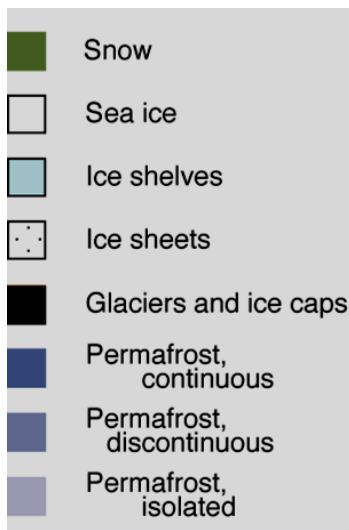
- Komponenten haben ganz unterschiedliche Mächtigkeiten
- Einige Komponenten, wie das Meereis, sind extrem dünn (fragil)!
- Komponenten weisen sehr unterschiedliche Reaktionszeiten auf Klimaveränderungen auf

# Komponenten der Kryosphäre und ihre Zeitskalen



- Schneedecke und Meereis reagieren innerhalb weniger Tage, Monate (hohe jahreszeitliche Variabilität)
- Gletscher, Schelfeis und Eisschilde reagieren erst über Jahre bis Jahrtausende aufgrund ihrer Masse (Trägheit)
- Spanne der Reaktionszeiten ist sehr variabel; Klimawandel wird Reaktionszeit beschleunigen

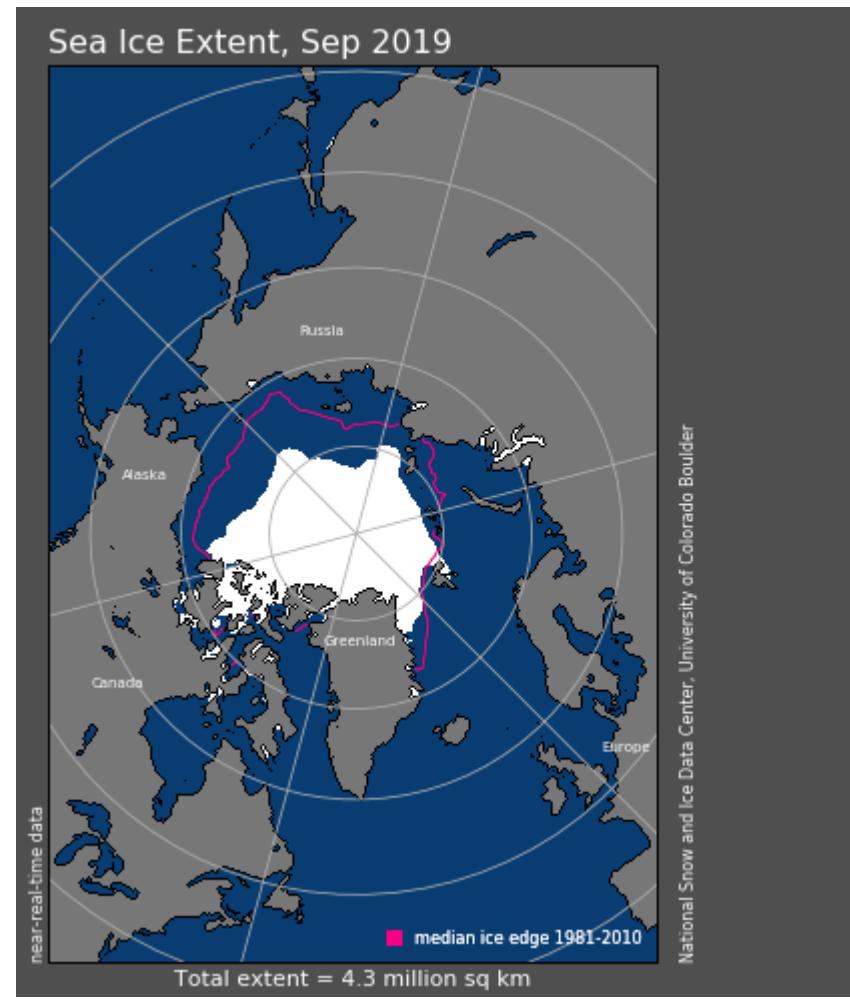
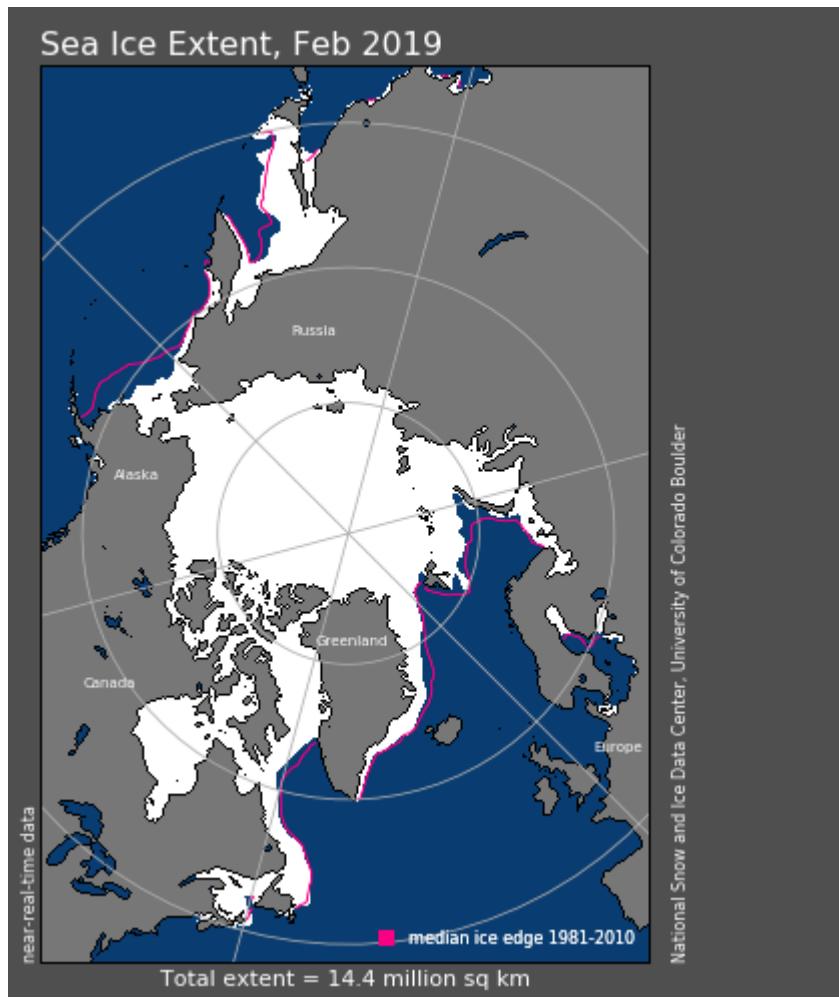
# Verteilung der Kryosphäre auf der NH-Kugel



<https://web.archive.org/web/20070826211613/http://maps.grida.no/go/graphic/cryosphere>

inklusive der Schneegebiete (1966–2005, Februar);  
Meereis (1979–2003, März)

# Jahreszeitliche Variabilität von Meereis

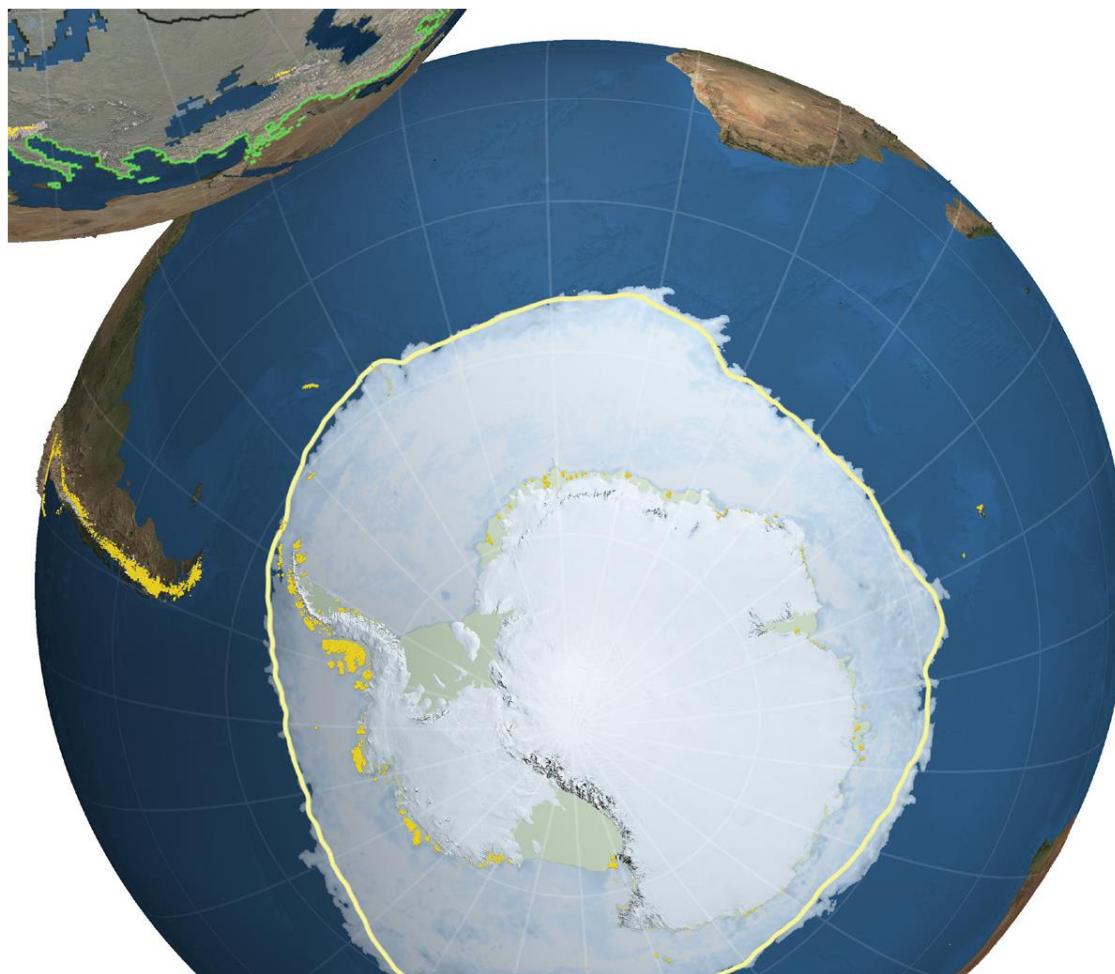


[https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/G02135-V3.0\\_0.pdf#page=12](https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/G02135-V3.0_0.pdf#page=12)

[https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/G02135-V3.0\\_0.pdf#page=12](https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/G02135-V3.0_0.pdf#page=12)

NSIDC = National Snow Ice and Data Centre

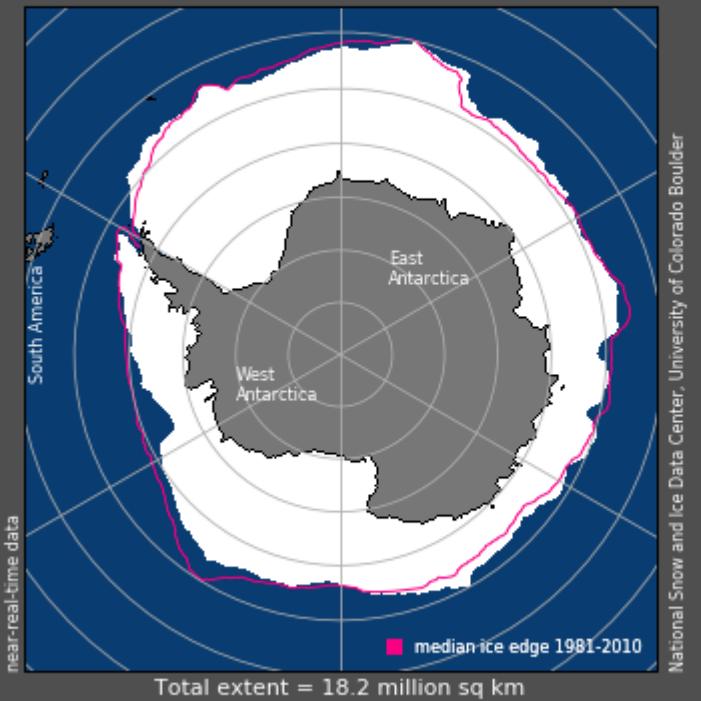
# Verteilung der Kryosphäre auf der SH-Kugel



- Meereis, Inlandeismassen, Schelfeis und Gletscher sind die wichtigsten Komponenten auf der SH-Kugel
- deutlich anderes Bild wegen der unterschiedlichen Land-Meer-Verteilung

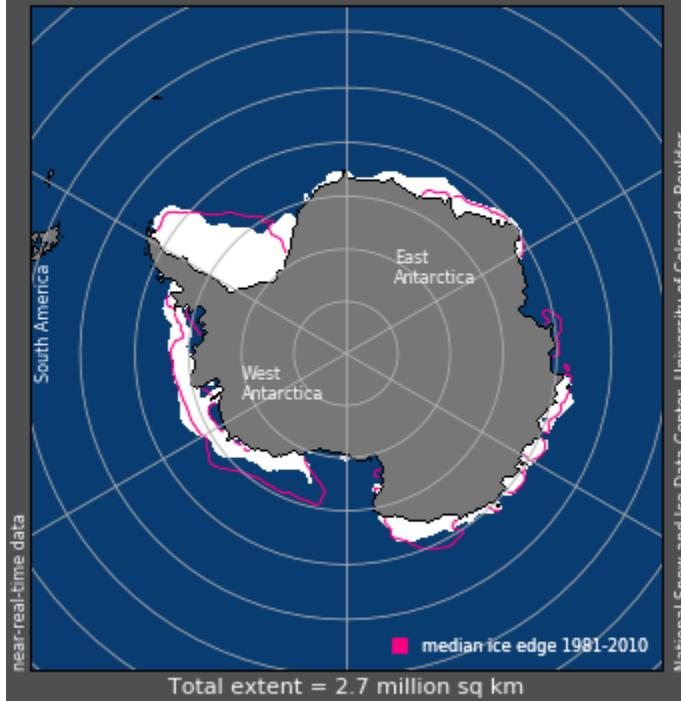
# Jahreszeitliche Variabilität von Meereis

Sea Ice Extent, Sep 2019



[https://nsidc.org/data/seacie\\_index](https://nsidc.org/data/seacie_index)

Sea Ice Extent, Feb 2019



[https://nsidc.org/data/seacie\\_index](https://nsidc.org/data/seacie_index)

NSIDC = National Snow Ice and Data Centre

# Flächen – und Volumenanteile der Kryosphäre

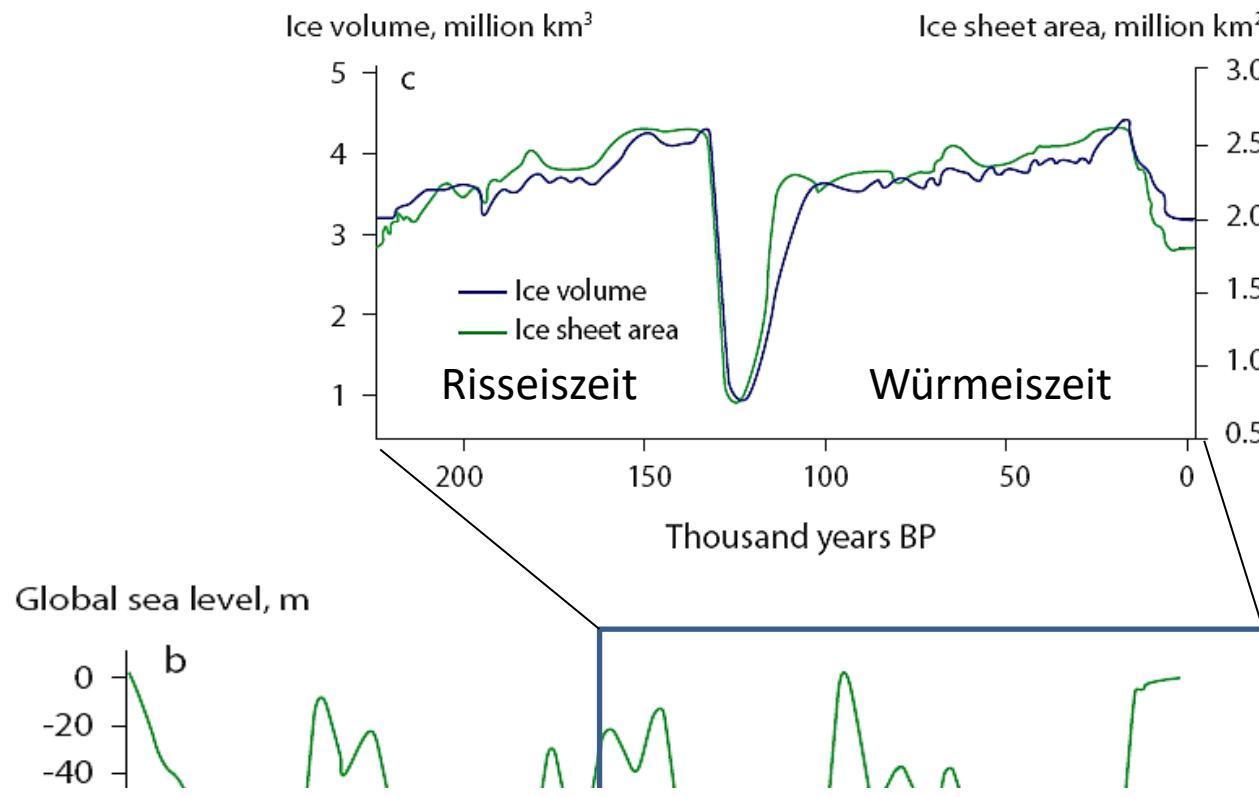
## Schnee- und Meereisausdehnung

	Minimum	Ausdehnung ( $10^6 \text{ km}^2$ )	Mittelwert
<b>MEEREIS</b>			
Nordhalbkugel	6,6	15,5	11,8
Südhalbkugel	3,0	18,8	12,0
<b>SCHNEE</b>			
Nordhalbkugel	3,1	46,7	24,9
Südhalbkugel	13,9	15,1	14,3

## dauerhaftes Eis

	Fläche ( $10^6 \text{ km}^2$ )	Volumen ( $10^6 \text{ km}^3$ )	Meeresspiegeläquivalent (m)
Grönländischer Eisschild	1,7	2,9	7,1
Antarktischer Eisschild	13,3	25,4	56,2
Gebirgsgletscher	1,1	0,22 - 0,38	0,56 - 0,97
Permafrost	22,8	0,01 - 0,04	0,03 - 0,10
Eisschelfe	1,5	0,66	

# Eisvolumen Grönlands & Änderung des Meeresspiegels

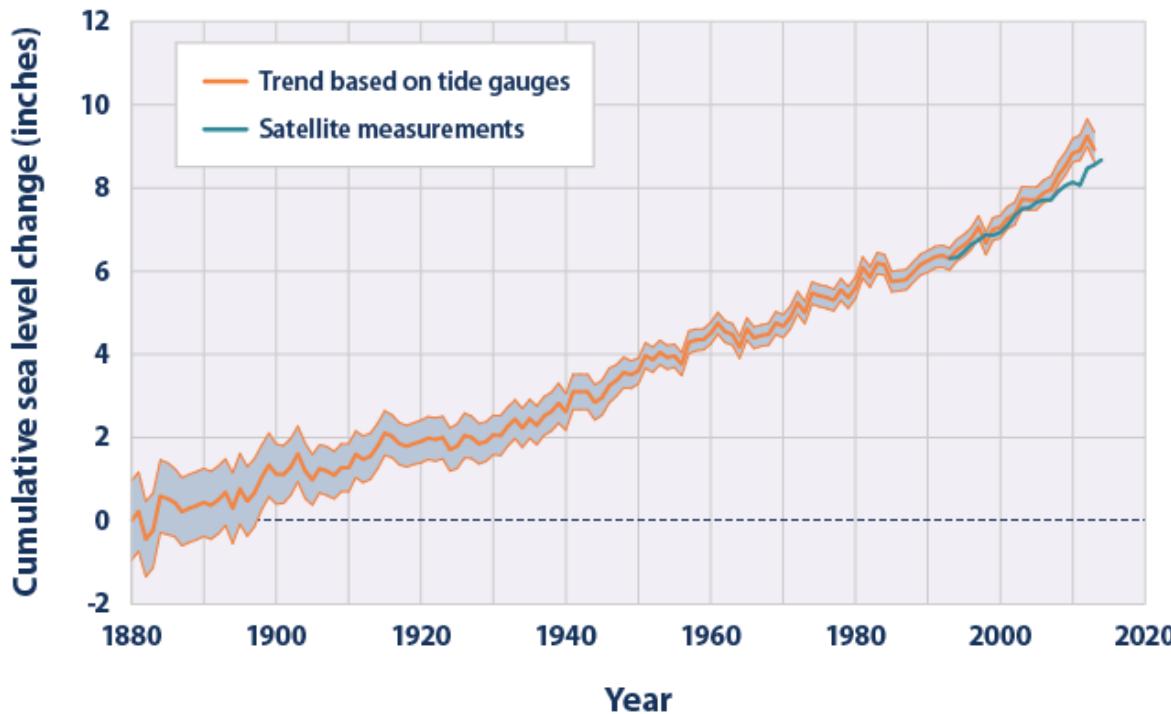


- Inlandeismassen und Gletscher fungieren als langfristige Speicher
- Starke Auswirkungen auf Meeresspiegel (bis zum 70 Meter)
- Immense Auswirkungen auf den globalen Wasserhaushalt & Wasserkreislauf

# Gletscher - Inlandeis

## Konsequenzen abschmelzender Inlandeismassen?

- Veränderung des **globalen Wasserhaushalts**
- Steigende **Meerespiegel** durch Massenverlust von Festlandseismassen



### Data sources:

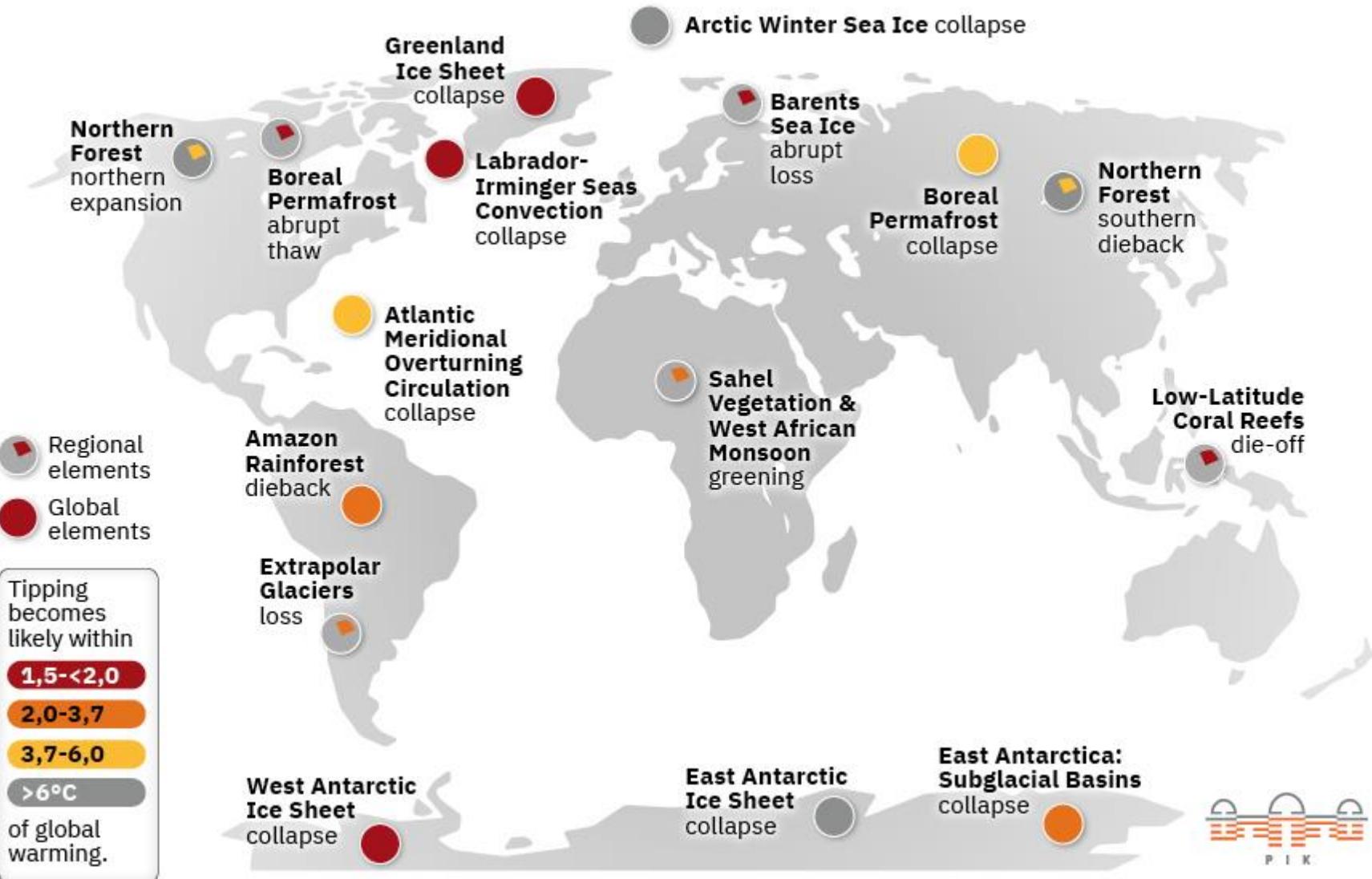
- CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). 2015 update to data originally published in: Church, J.A., and N.J. White. 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv. Geophys.* 32:585–602. [www.cmar.csiro.au/sealevel/sl\\_data\\_cmar.html](http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html).
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2015. Laboratory for Satellite Altimetry: Sea level rise. Accessed June 2015. [http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_global.php](http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php).

For more information, visit U.S. EPA's "Climate Change Indicators in the United States" at [www.epa.gov/climatechange/indicators](http://www.epa.gov/climatechange/indicators).

# Bedeutung der Kryosphäre im Erdsystem

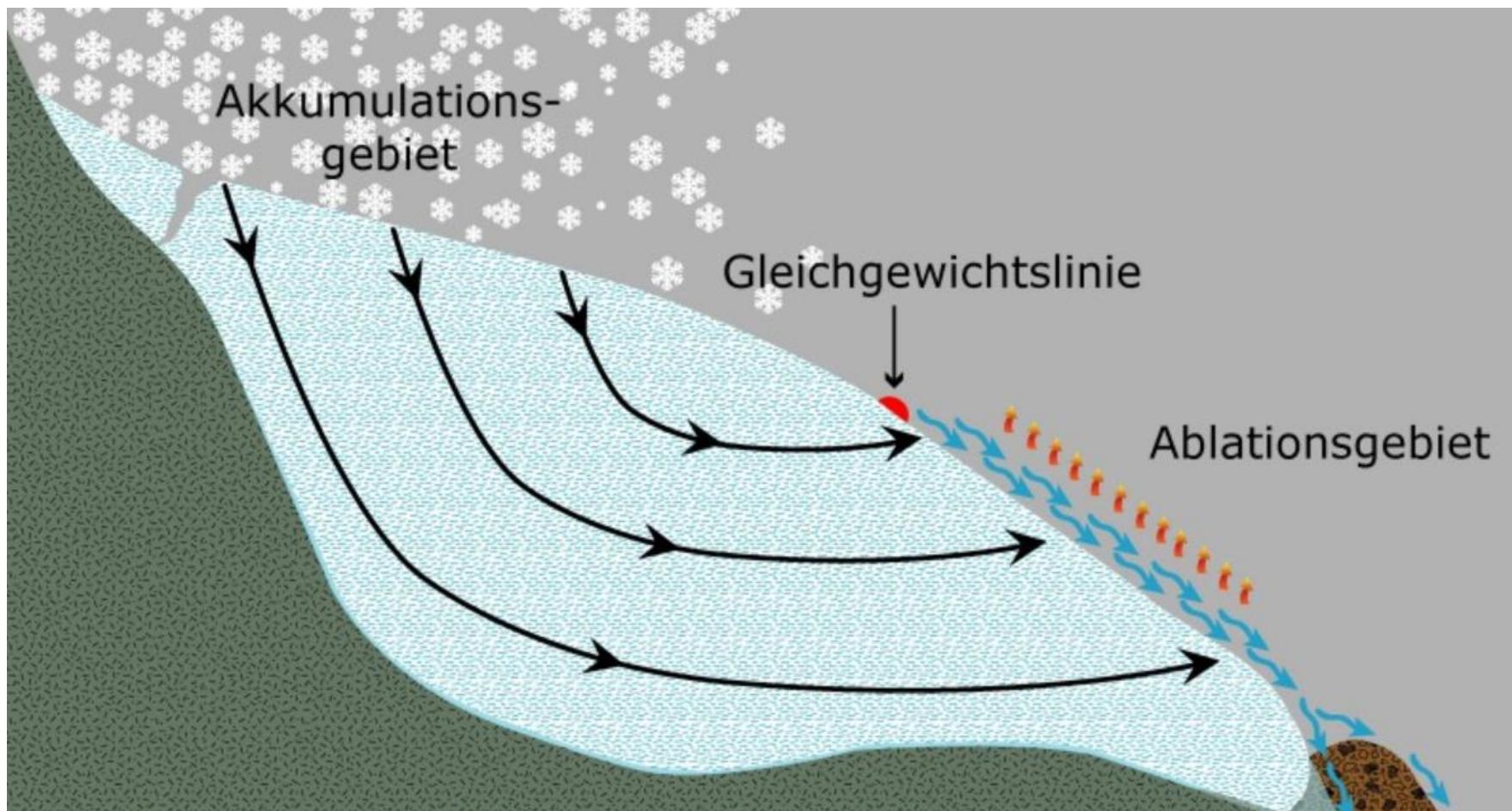
---

# Mögliche Kippelemente des Klimasystems



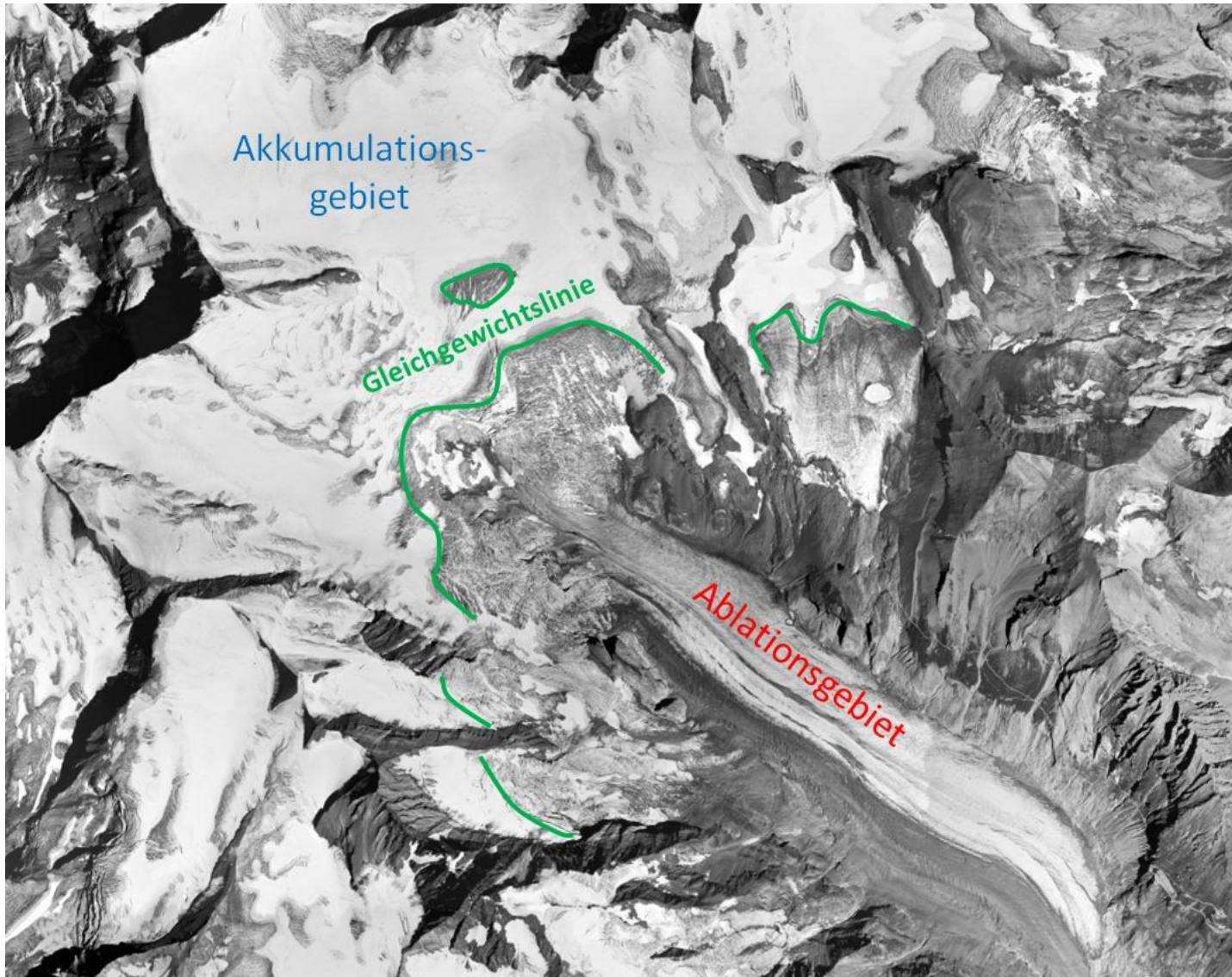
## 2. Die Dynamik der Eisschilde und Gletscher

# Schema und Massenhaushalt eines Gletschers

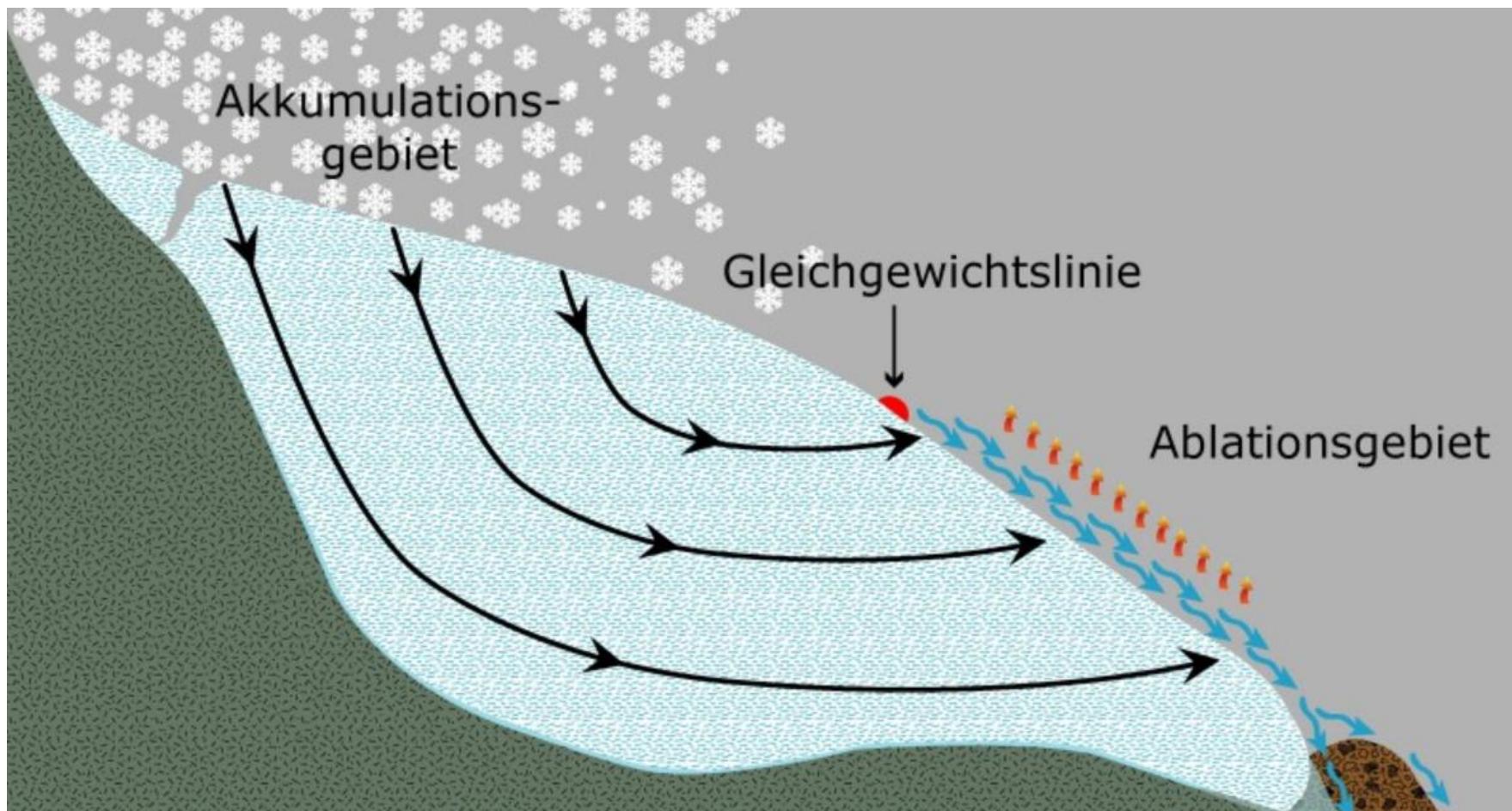


Schema eines Gletschers mit Geschwindigkeitsprofil

# Akkumulations- und Ablationsgebiet der Pasterze

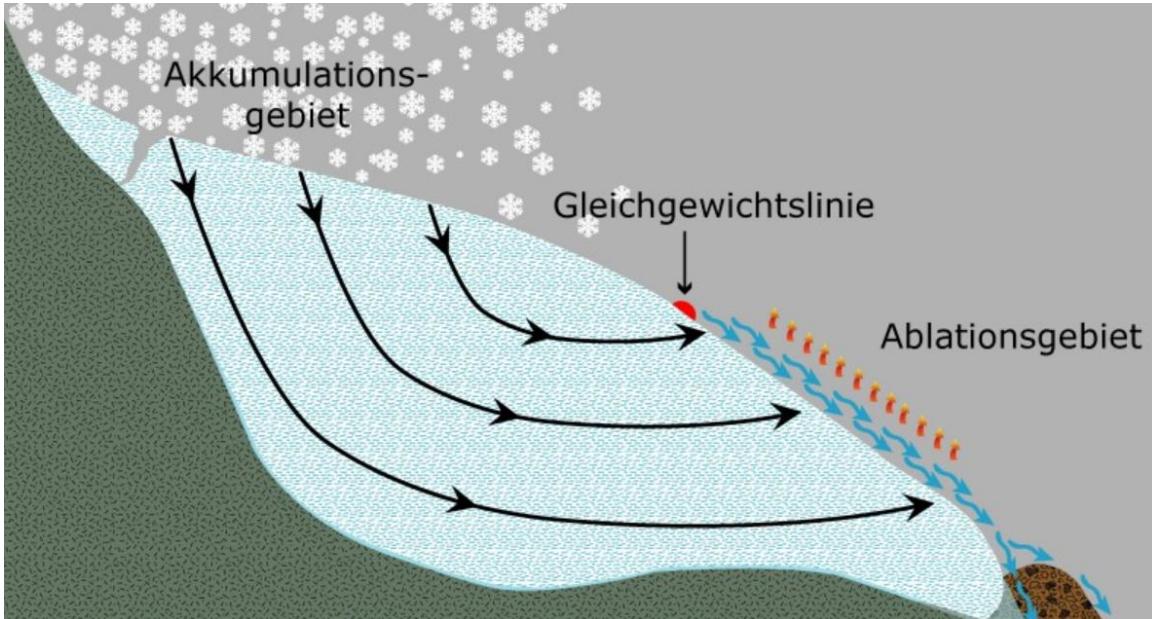


# Schema und Massenhaushalt eines Gletschers



Schema eines Gletschers mit Geschwindigkeitsprofil

# Dynamik von Gletschern



## Einflussfaktoren

- Gewicht der Eismasse
- Hangneigung
- Oberflächenneigung der Eismasse
- Temperatur
- Beschaffenheit des Untergrundes

## Typen von Gletscherbewegungen

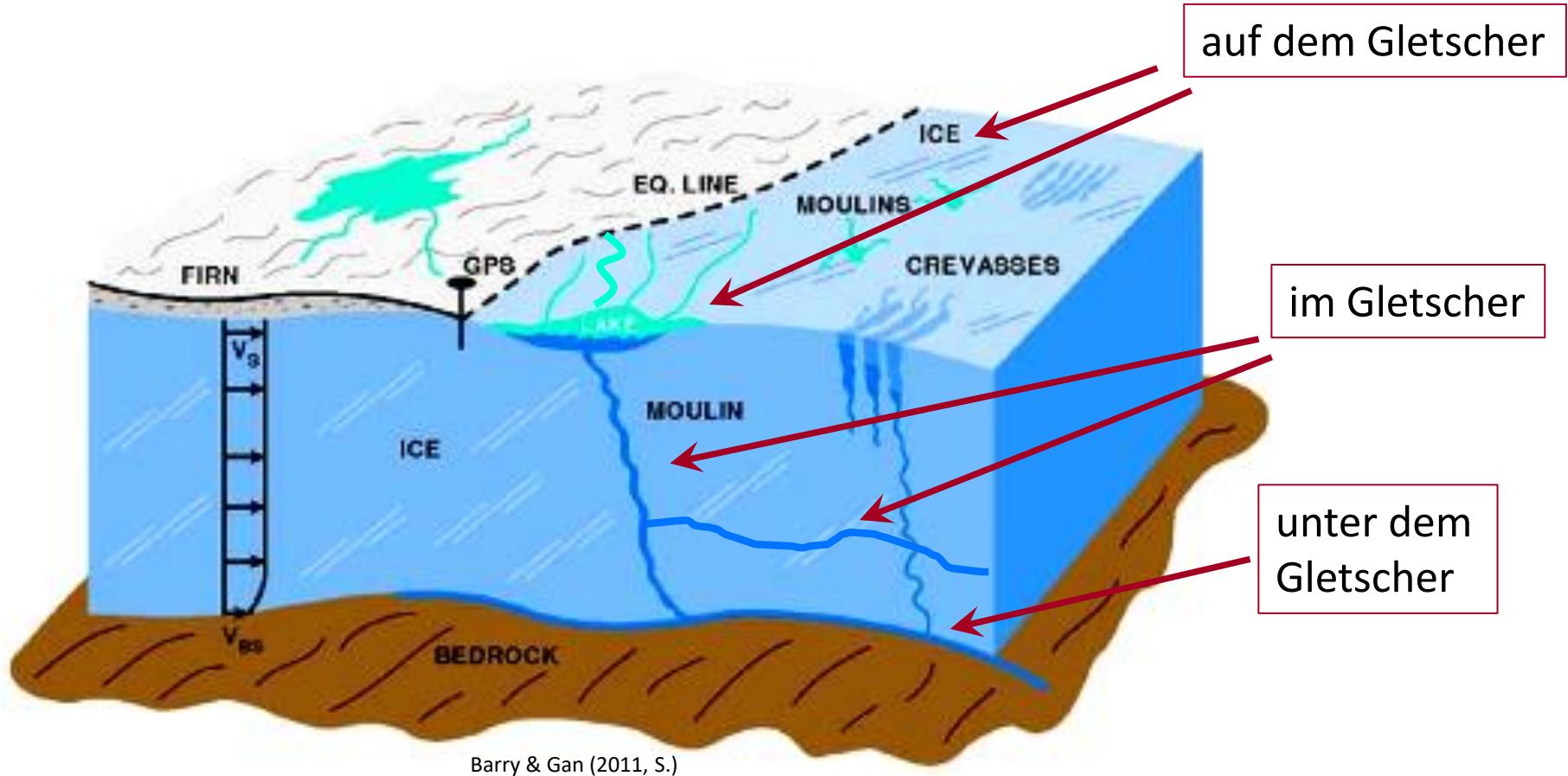
- Deformationsfließen
- Basales Gleiten
- Gletscherfluten

# Basales Gleiten eines Gletschers

---

- Bildung von **Schmelzwasser am Boden**
  - Gleitbewegung des Gletschers erfolgt auf **Wasserfilm (basales Gleiten)**

# Entwässerung von Gletschern



Modell der Entwässerung von Gletschern

# Abflusskanäle auf dem Gletscher

---

- Wasser stammt von  
**Niederschlägen und Schmelzprozessen**
- Abfluss in  
**supraglazialen Kanälen**



[https://www.swisseduc.ch/glaciers/earth\\_icy\\_planet/icons-07/06-thompson-glacier-axel-heiberg.jpg](https://www.swisseduc.ch/glaciers/earth_icy_planet/icons-07/06-thompson-glacier-axel-heiberg.jpg)

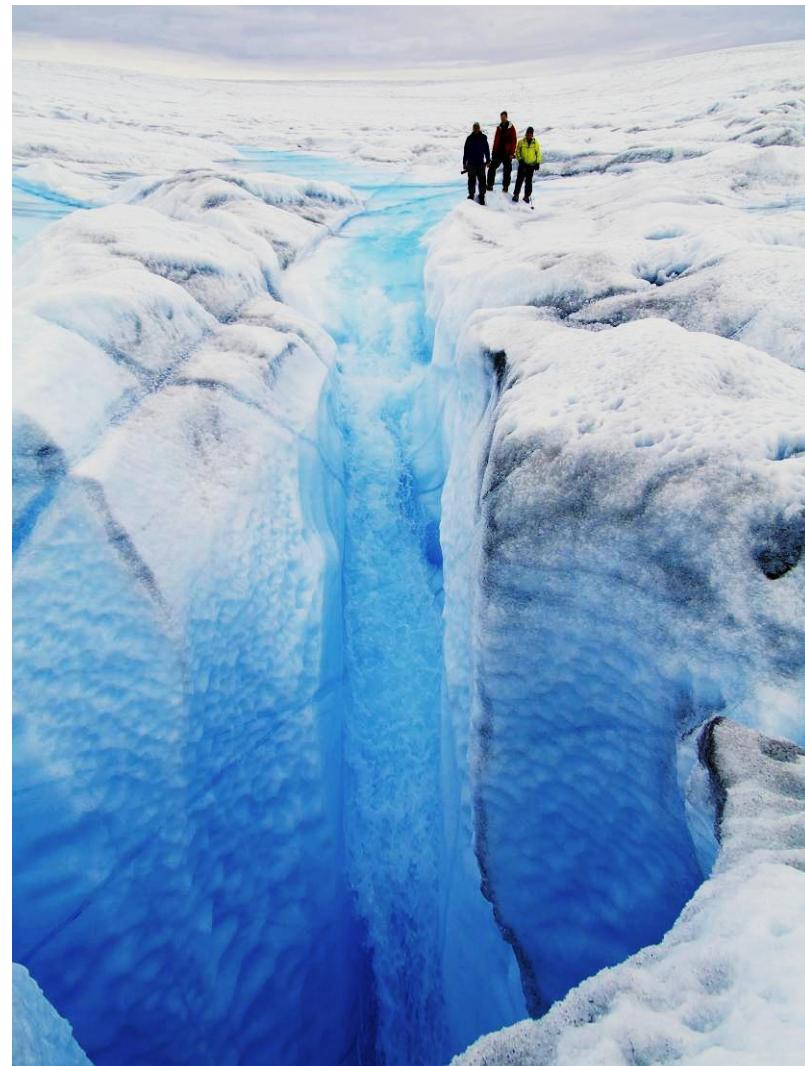
Schmelzwasser auf dem Thompson-Glacier

## Bildung von supraglazialen Kanälen



# Entwässerung über Gletschermühlen

- Schmelzwasser an der Oberfläche stürzt in Schächten bis zur Gletschersohle  
**(Gletschermühlen)**



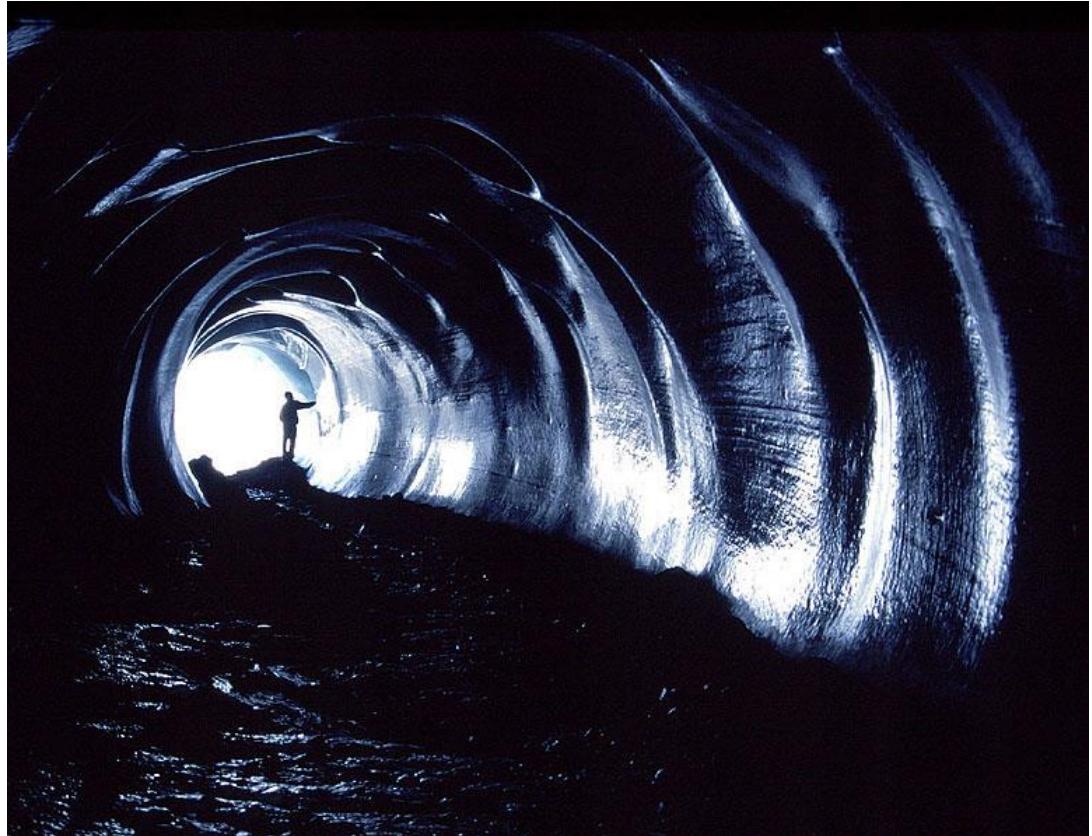
<http://www.amap.no/swipa/>

Gletschermühle auf dem Inlandeis

# Schmelzwassertunnel im Gletscher

---

- Schmelzwasser sammelt sich an der Sohle und bilden Schmelzwassertunnel
- Im Gestein unter dem Eis = Nye channels
- Abfluss auch im Gletscher = Röthlisberger channels



[https://www.swisseduc.ch/glaciers/earth\\_icy\\_planet/glaciers07-en.html?id=1](https://www.swisseduc.ch/glaciers/earth_icy_planet/glaciers07-en.html?id=1)

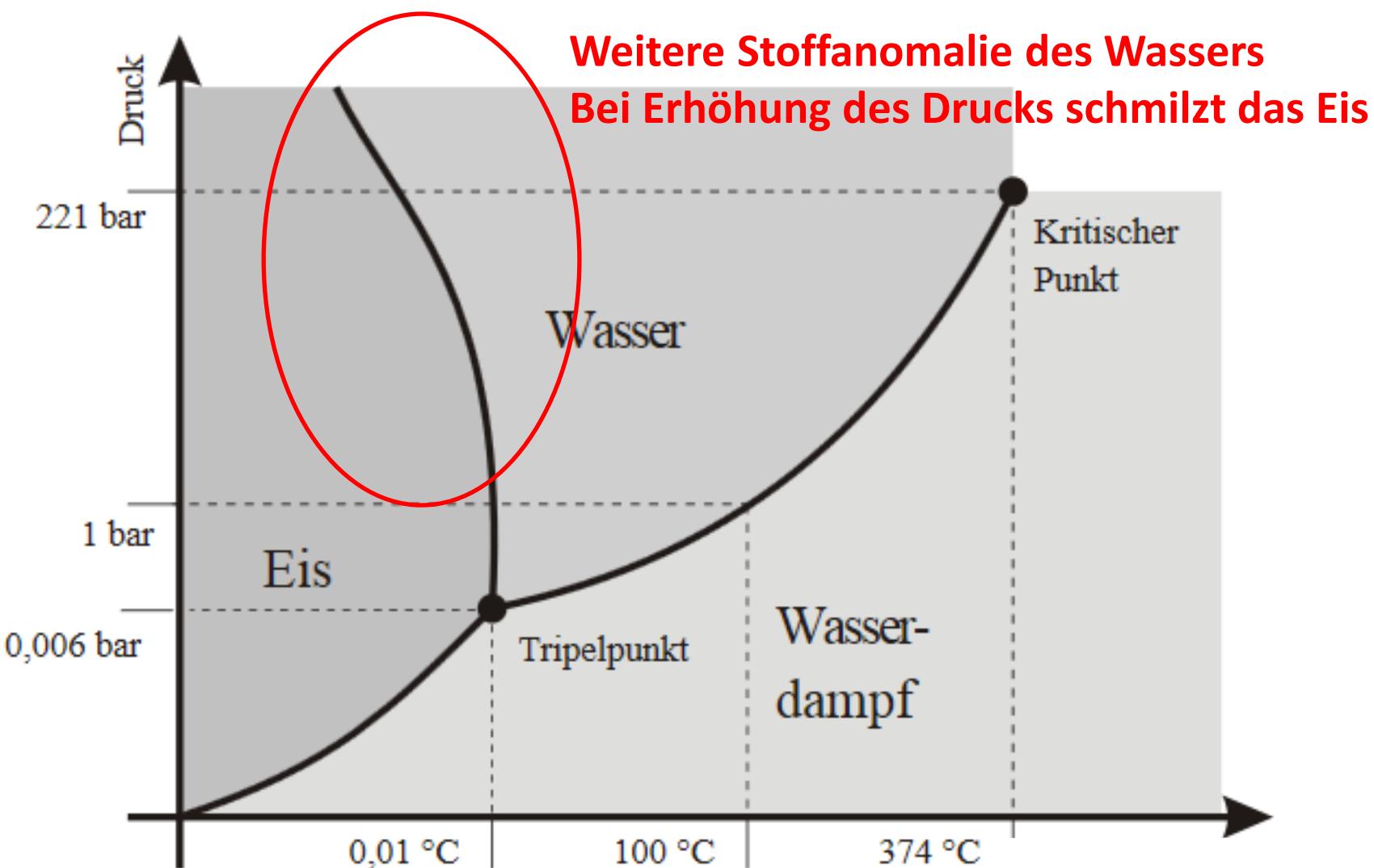
Schmelzwassertunnel im Eis

# Basales Gleiten eines Gletschers

---

- Bildung von **Schmelzwasser am Boden**
  - ➡ Gleitbewegung des Gletschers erfolgt auf **Wasserfilm (basales Gleiten)**
- Schmelzwasser am Boden kann auch **bei hohen Spannungen** vor und nach Hindernissen auftreten
  - ➡ **Regelation** tritt an kleinen Hindernissen auf
  - ➡ **Regelation** = Eis schmilzt aufgrund sehr hohen Druckes und gefriert dann wieder

# Phasendiagramm des Wassers



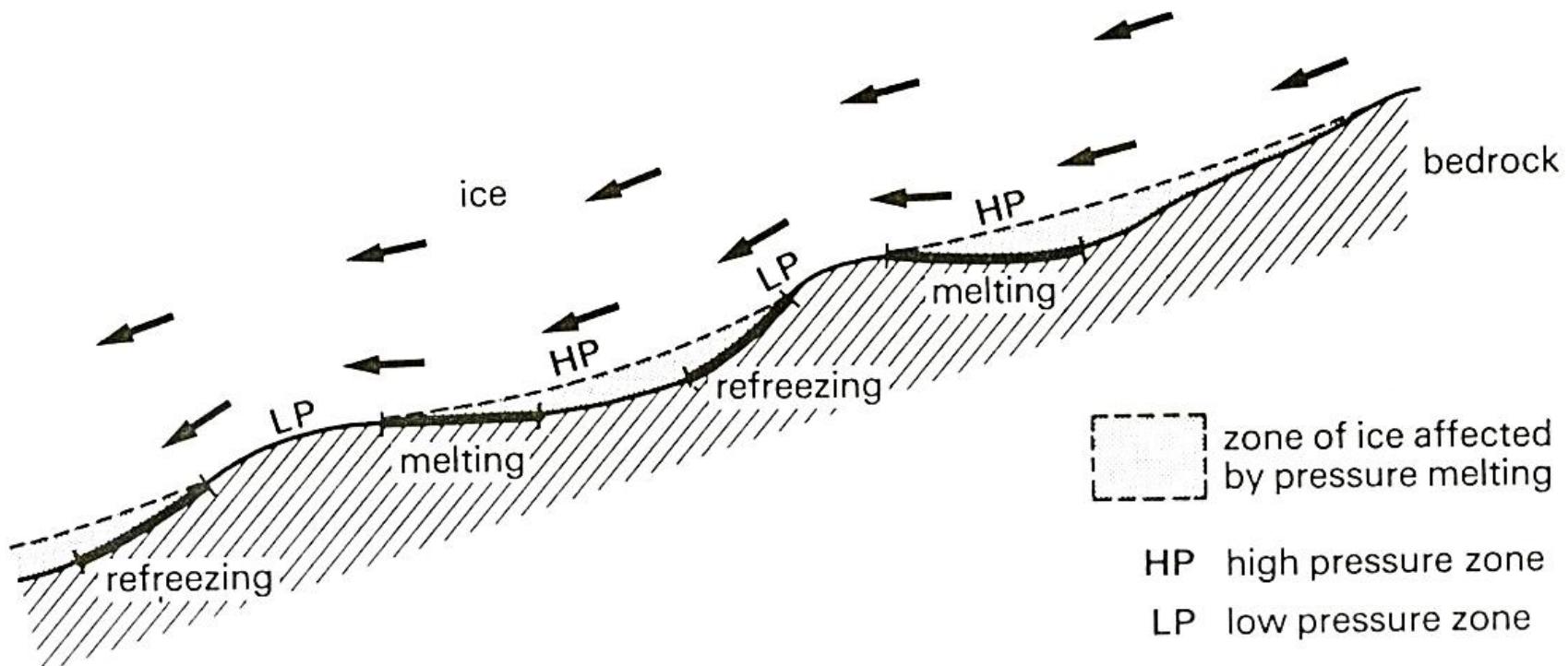
# Regelation – Schmilzt Eis durch Druck?

---



<https://www.youtube.com/watch?v=gM3zP72-rJE>

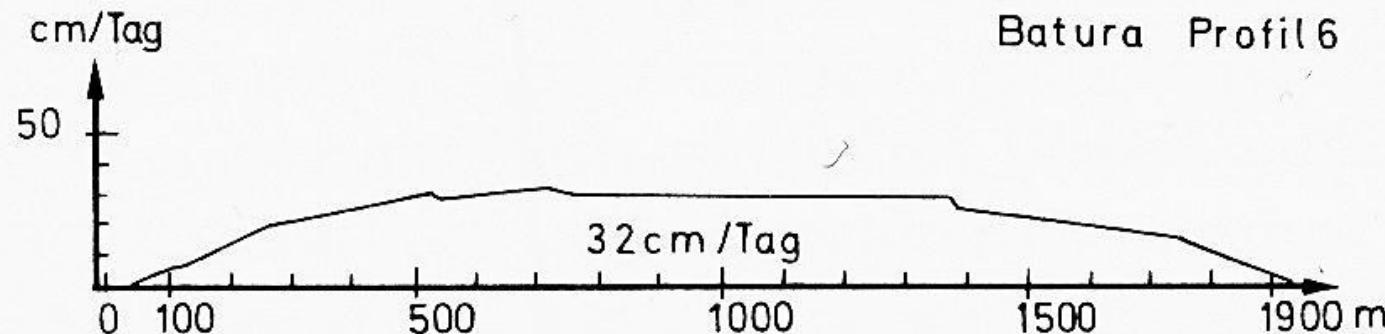
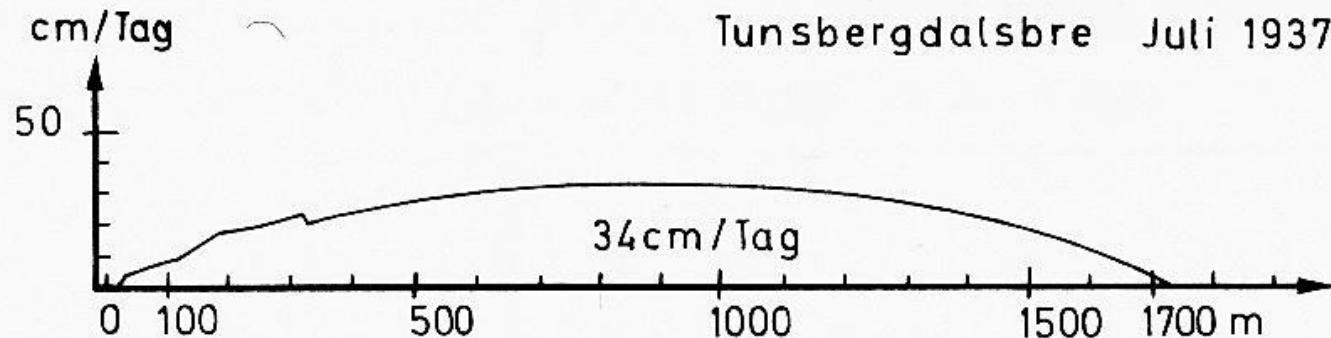
# Gletscher – basales Gleiten



- Eis schmilzt aufgrund des hohen Druckes, der den Gletscher auf die Gesteinssohle vor Hindernisse ausübt
- weiterer Grund: Reibungsenergie erzeugt Wärme

# Bewegungsprofil eines Gletschers

(A) Strömende Bewegung



# Laminare Fließbewegungen eines Gletschers

---



Laminare Fließbewegungen eines Gletschers

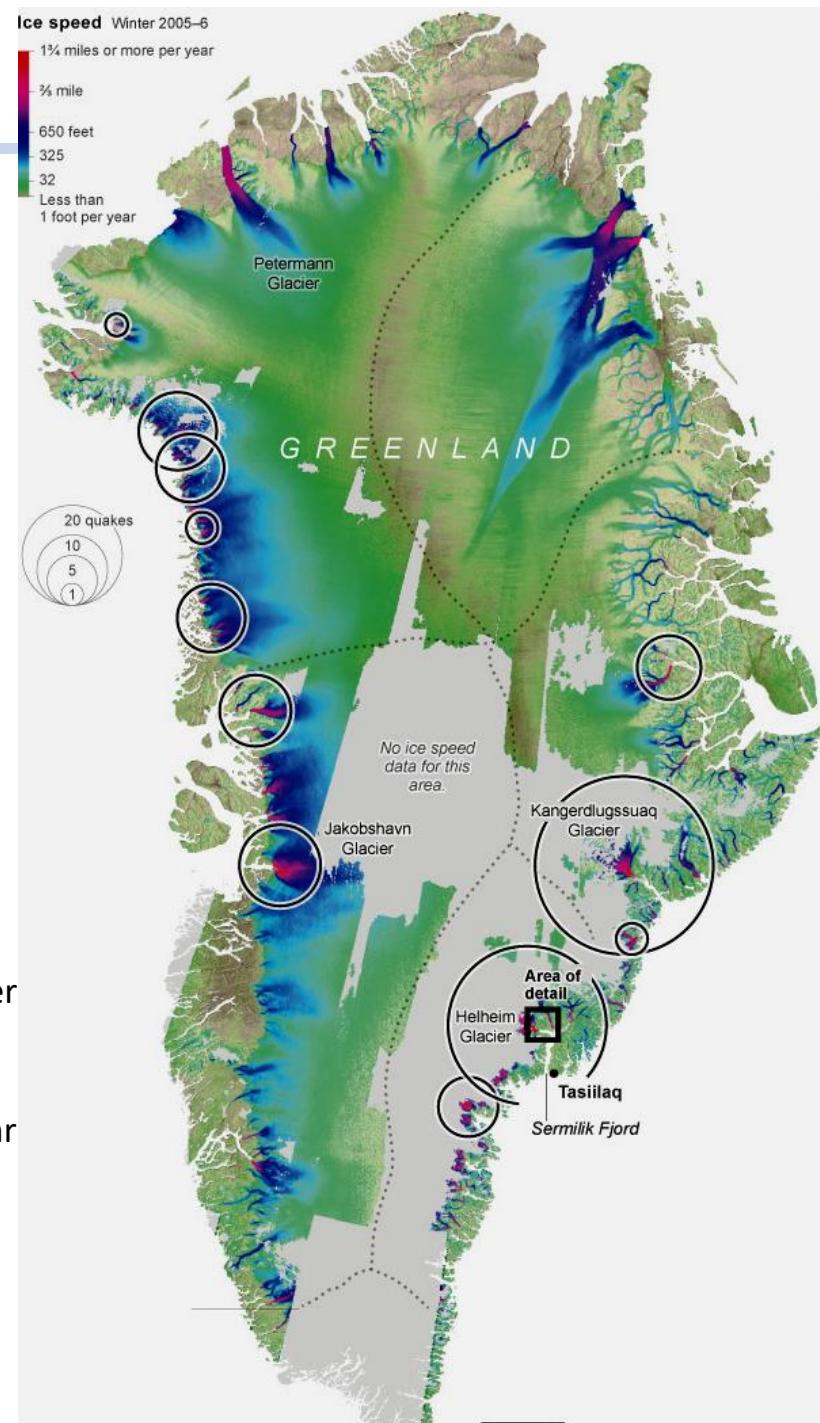
# Grönlands Auslassgletscher

- aktuell alle **mit hohen Fließgeschwindigkeiten** (bis > 10 km/a)

## Jakobshavn (oder Ilulissat- Gletscher)

- Produktivster Gletscher der Nordhemisphäre
- Fließgeschwindigkeit 38 m/Tag
- doppelt so hoch wie vor 10 Jahren!
- drainiert 6 % der Inlandeismasse

Eisbewegung Winter  
2005-06



# Blockförmige Bewegungen des Ilulissat-Gletschers



Ilulissat Glacier, June 2007 - June 2009

<https://climate.nasa.gov/interactives/global-ice-viewer/#/2/22>

# Fließbewegungen des Eisschildes in Antarktis

---



<https://svs.gsfc.nasa.gov/3849/>

### 3. Status Quo der Kryosphäre im Klimawandel

# Komponenten der Kryosphäre

---

- **Gletscher**
- Inlandeismassen
- Meereis
- Permafrost-Böden
- Schneedecken
- Schelfeis

# Muir Gletscher in Alaska

1941

**now you see it**

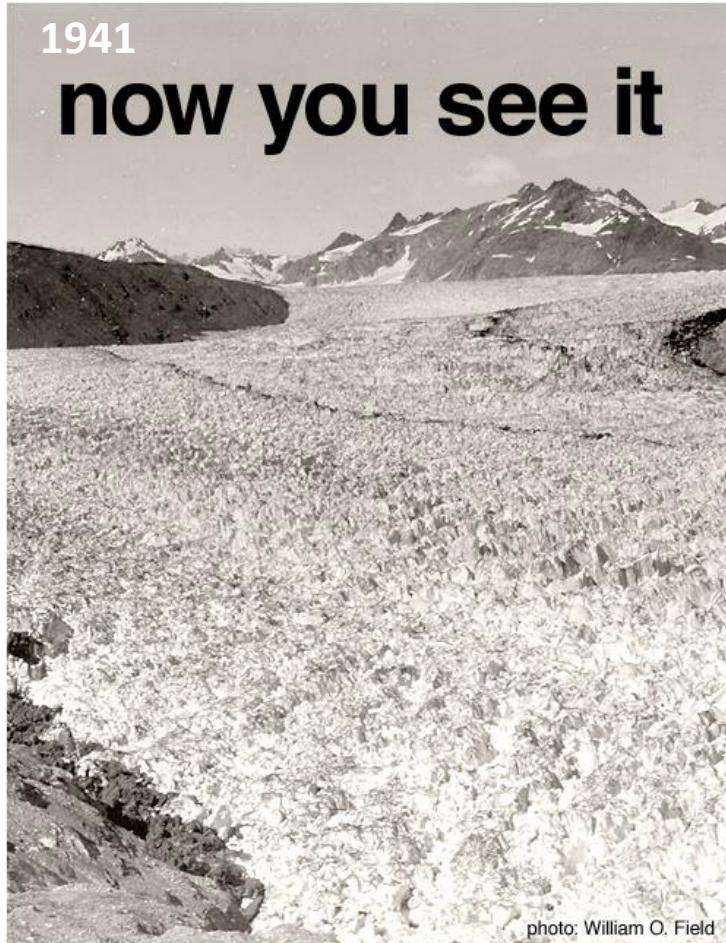


photo: William O. Field

2004

**now you don't**

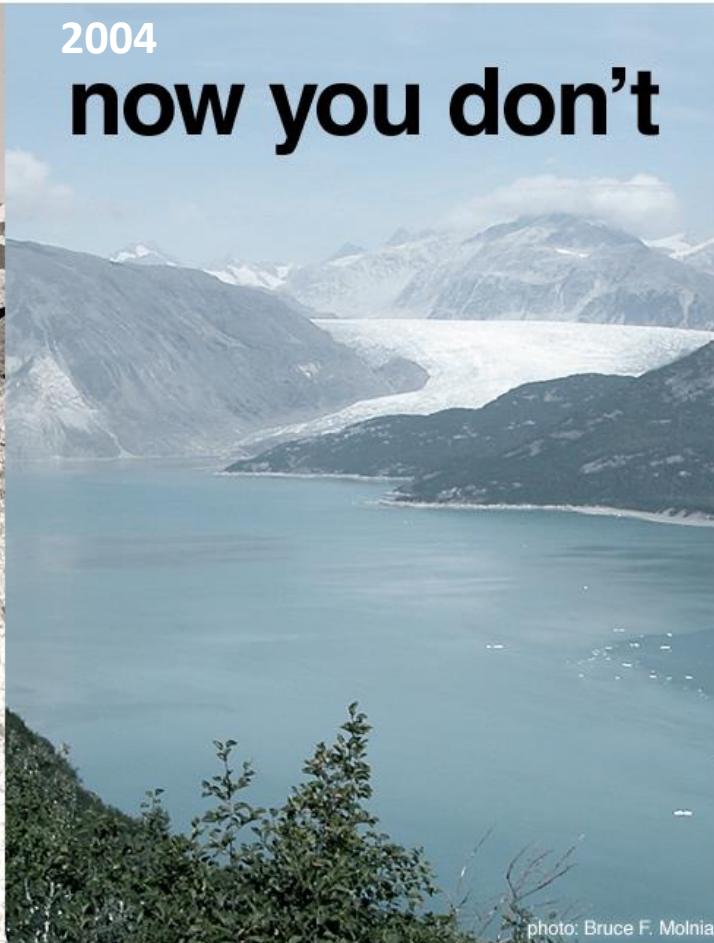


photo: Bruce F. Molnia

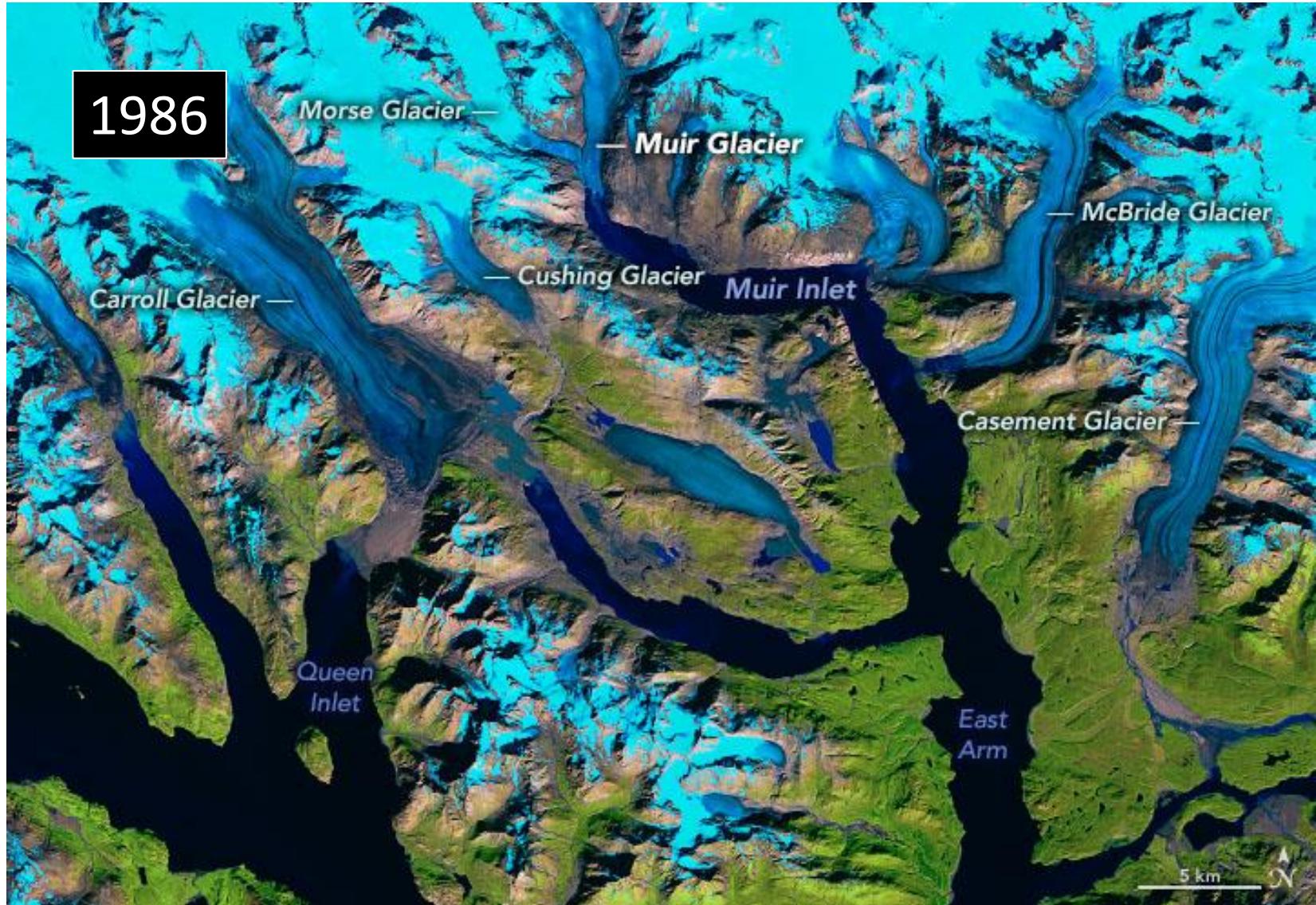
Muir Glacier, Alaska: August 13, 1941 and August 31, 2004



**CLIMATE 365**

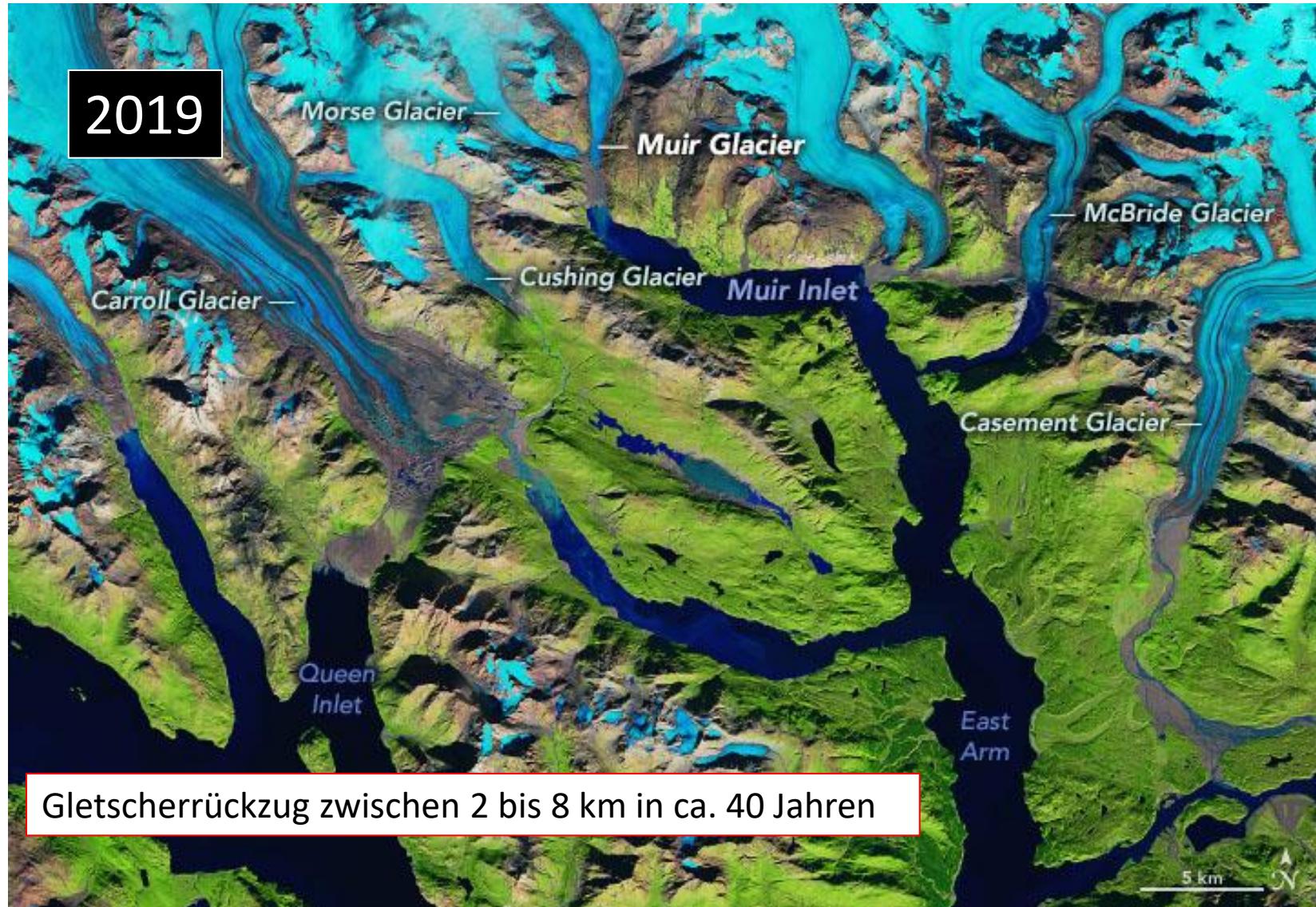
[climate365.tumblr.com | go.nasa.gov/climate365](https://climate.nasa.gov/climate_resources/4/graphic-dramatic-glacier-melt/)

# Eisstromnetz rund um den Muir Gletscher



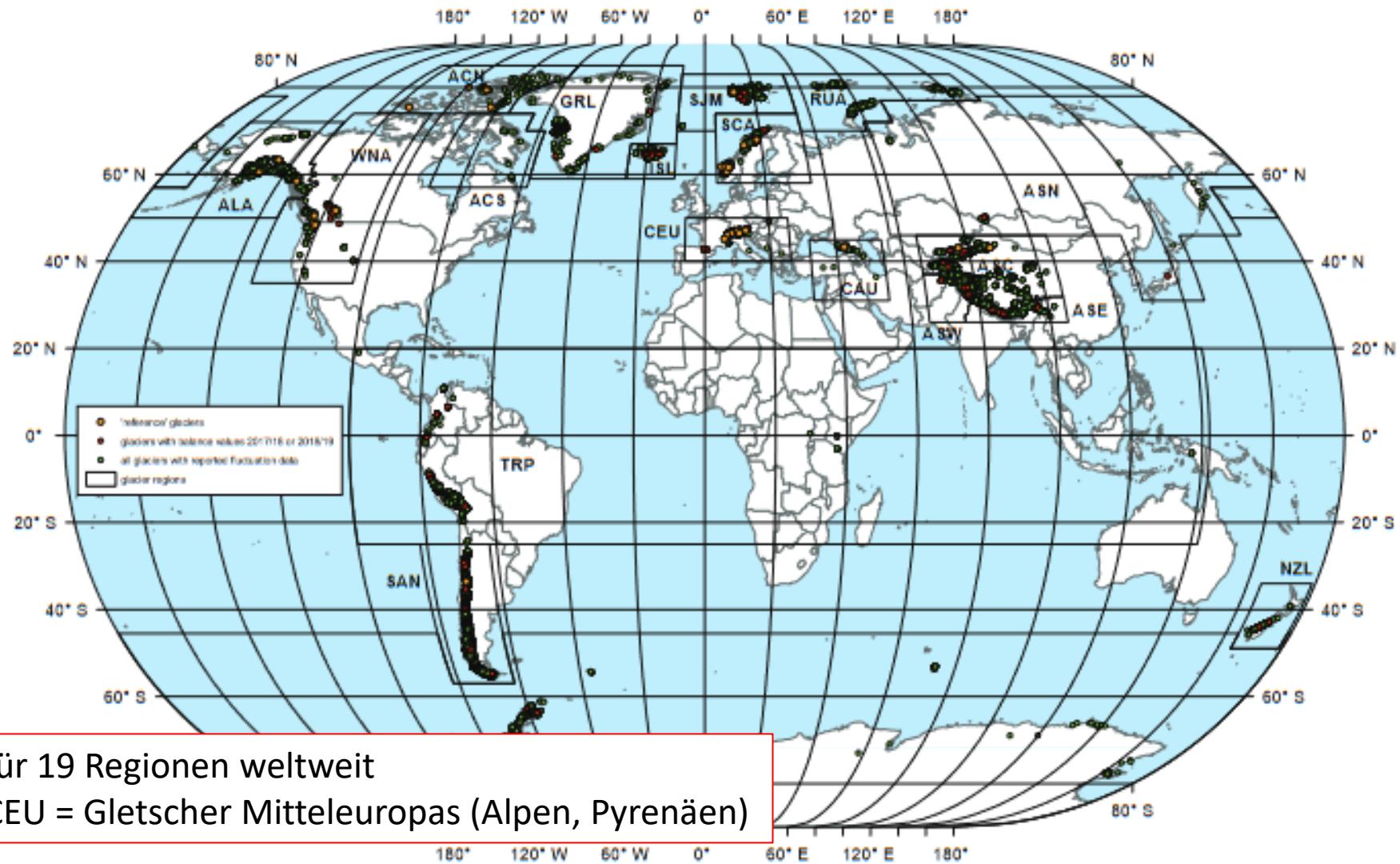
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147171/inlets-iceberg-maker-is-nearly-gone>

# Eisstromnetz rund um den Muir Glacier



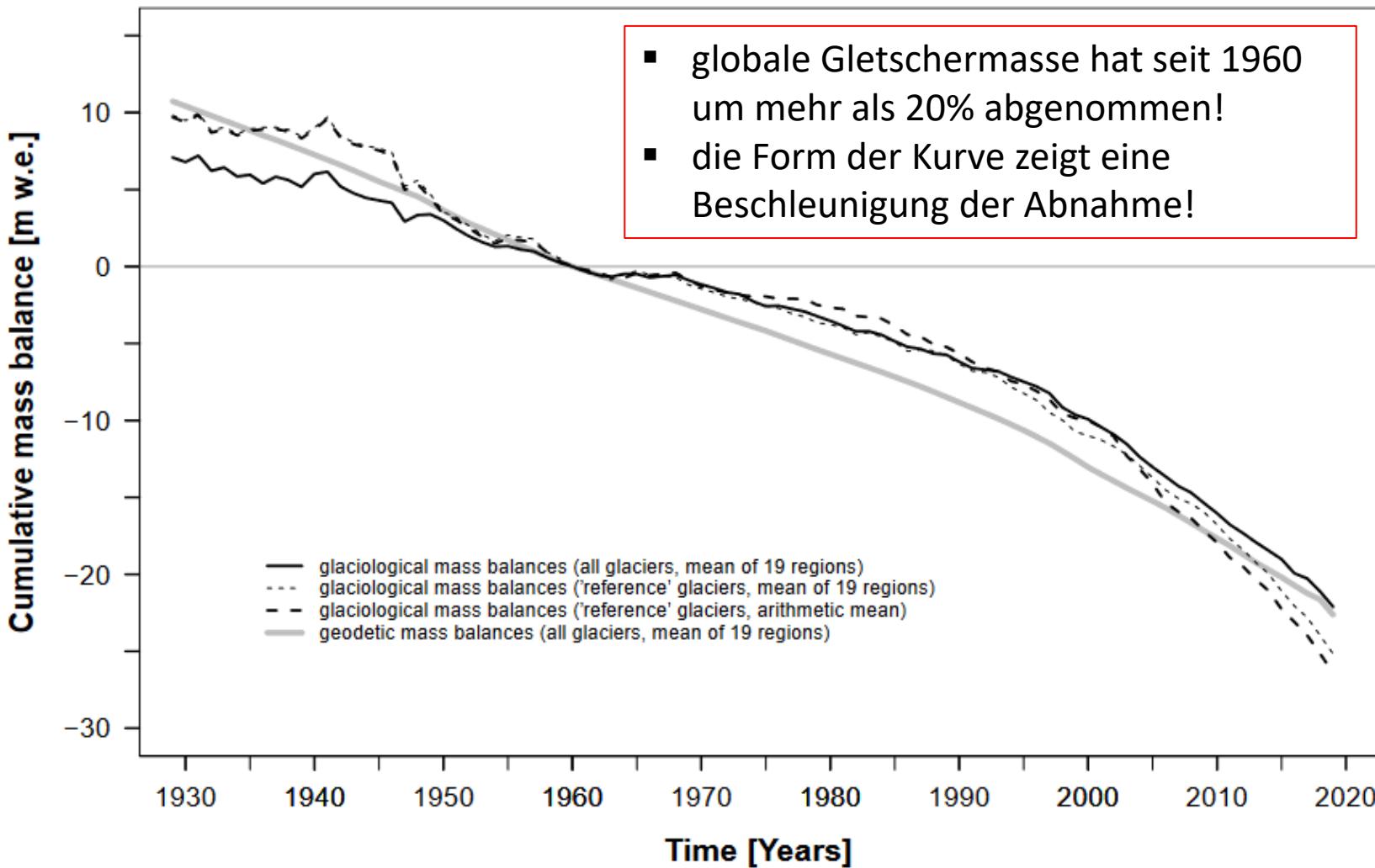
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147171/inlets-iceberg-maker-is-nearly-gone>

# Weltweite Untersuchung des Gletscherrückzugs

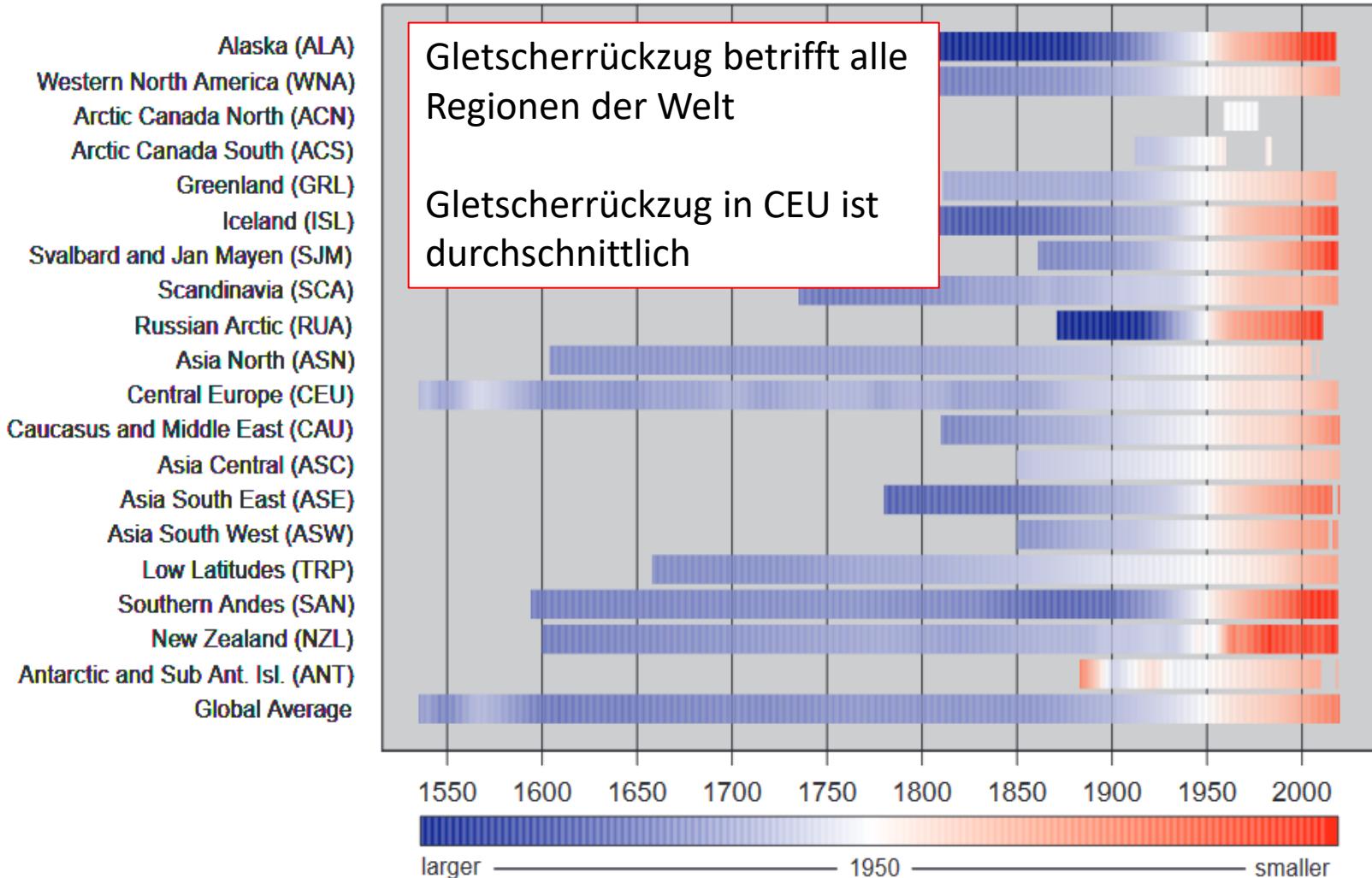


Global Glacier Change Bulletin (2019)

# Globale Abnahme der Gletschermasse



# Regionale Analyse des Gletscherrückzugs

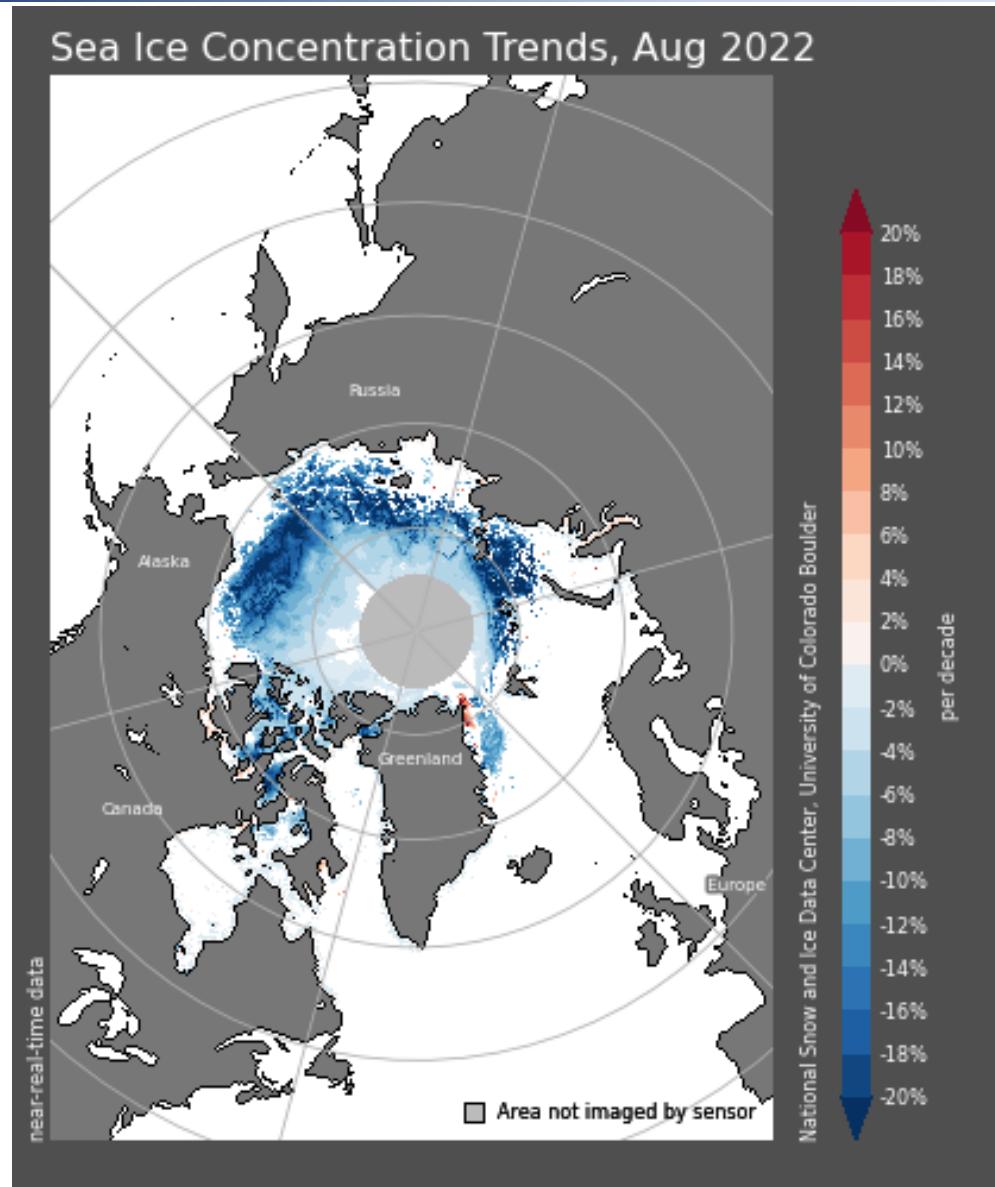


# Komponenten der Kryosphäre

---

- Gletscher
- **Meereis**
- Inlandeismassen
- Schneedecken
- Permafrost-Böden
- Schelfeis

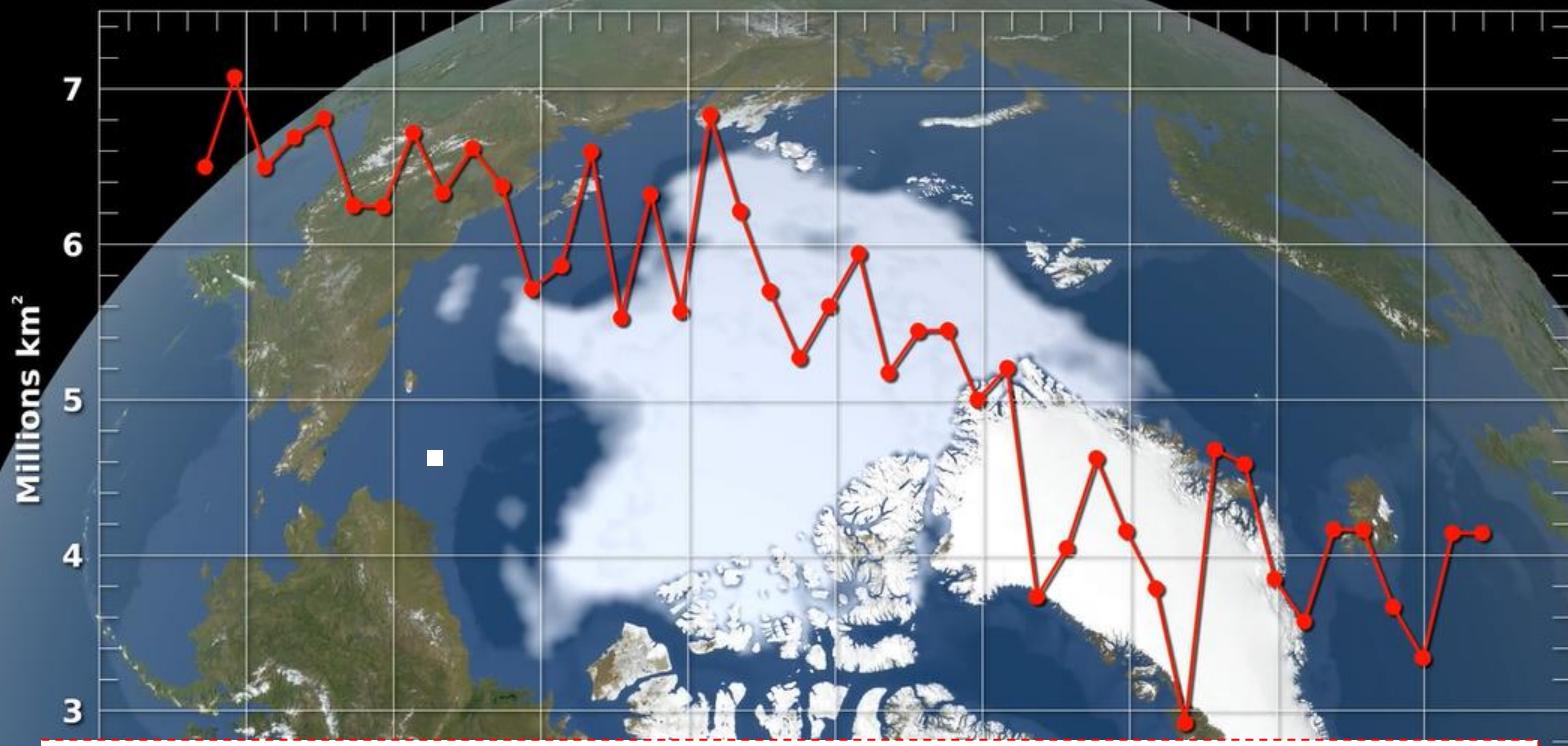
# Änderung der Meereseisfläche in der Arktis



[https://nsidc.org/data/seoice\\_index/compare-animate](https://nsidc.org/data/seoice_index/compare-animate)

# Änderung der Meereisfläche in der Arktis

Annual Arctic Sea Ice Minimum Area

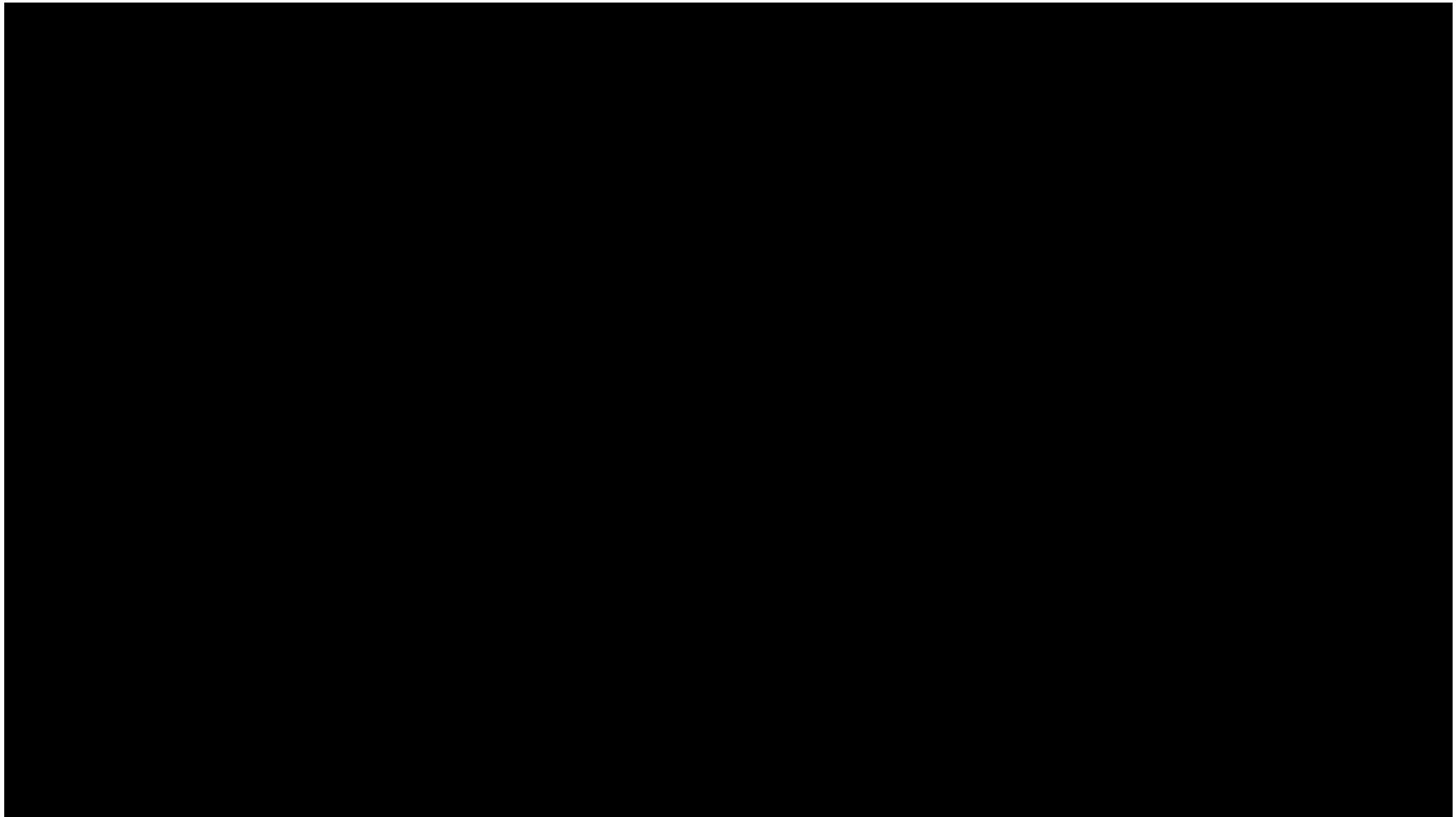


Arktische Meereisfläche im Sommer ist seit Beginn der Satellitenmessungen (1980) um ca. 40% geschrumpft

2025

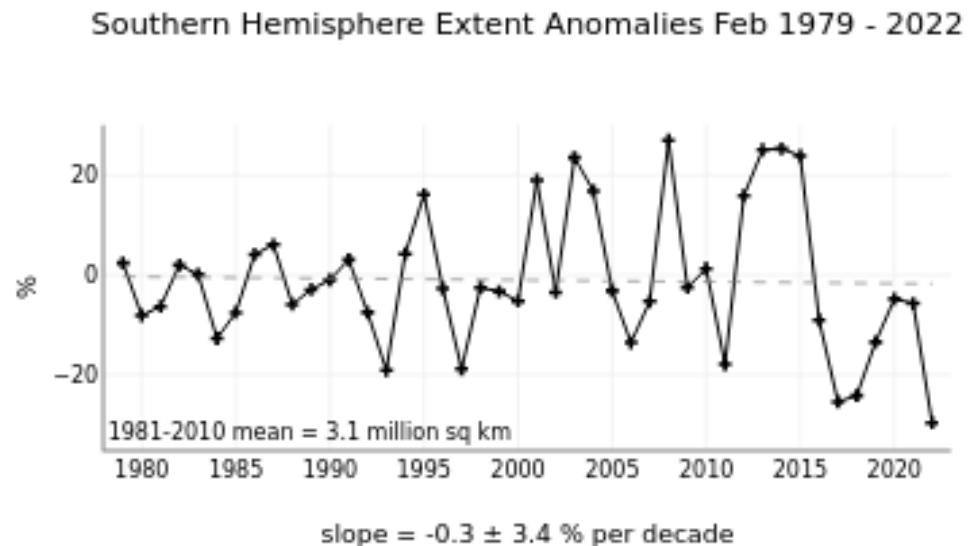
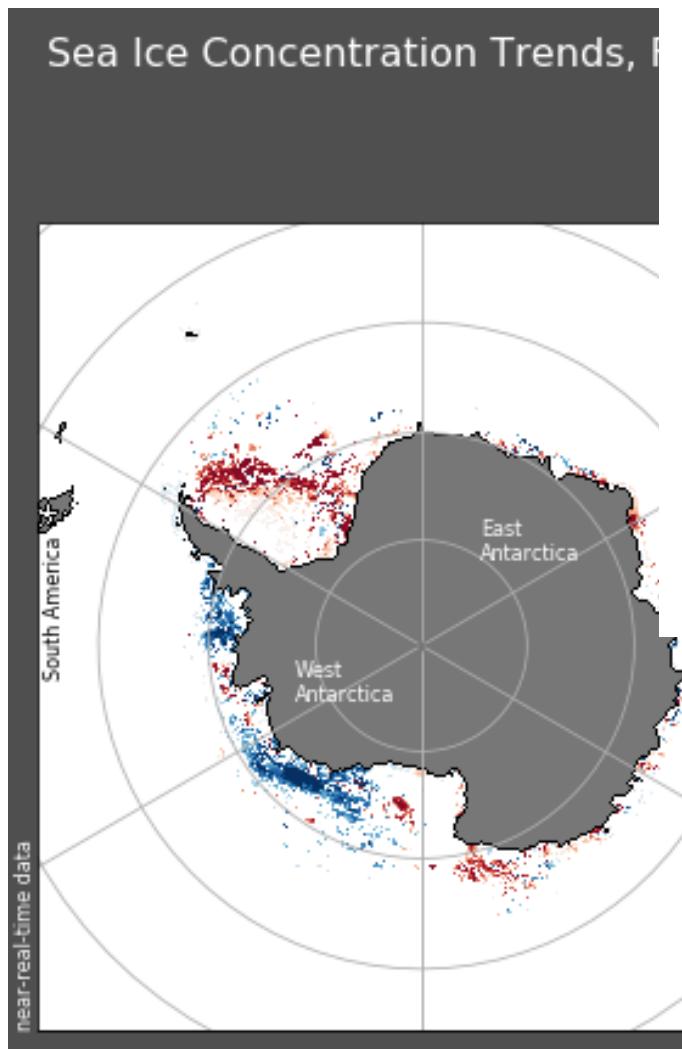
# Prof. Max Rex (Polarforscher) zum Klimawandel

---



<https://www.youtube.com/watch?v=SSkORy5Q-3U>

# Änderung der Meereisfläche in der Antarktis



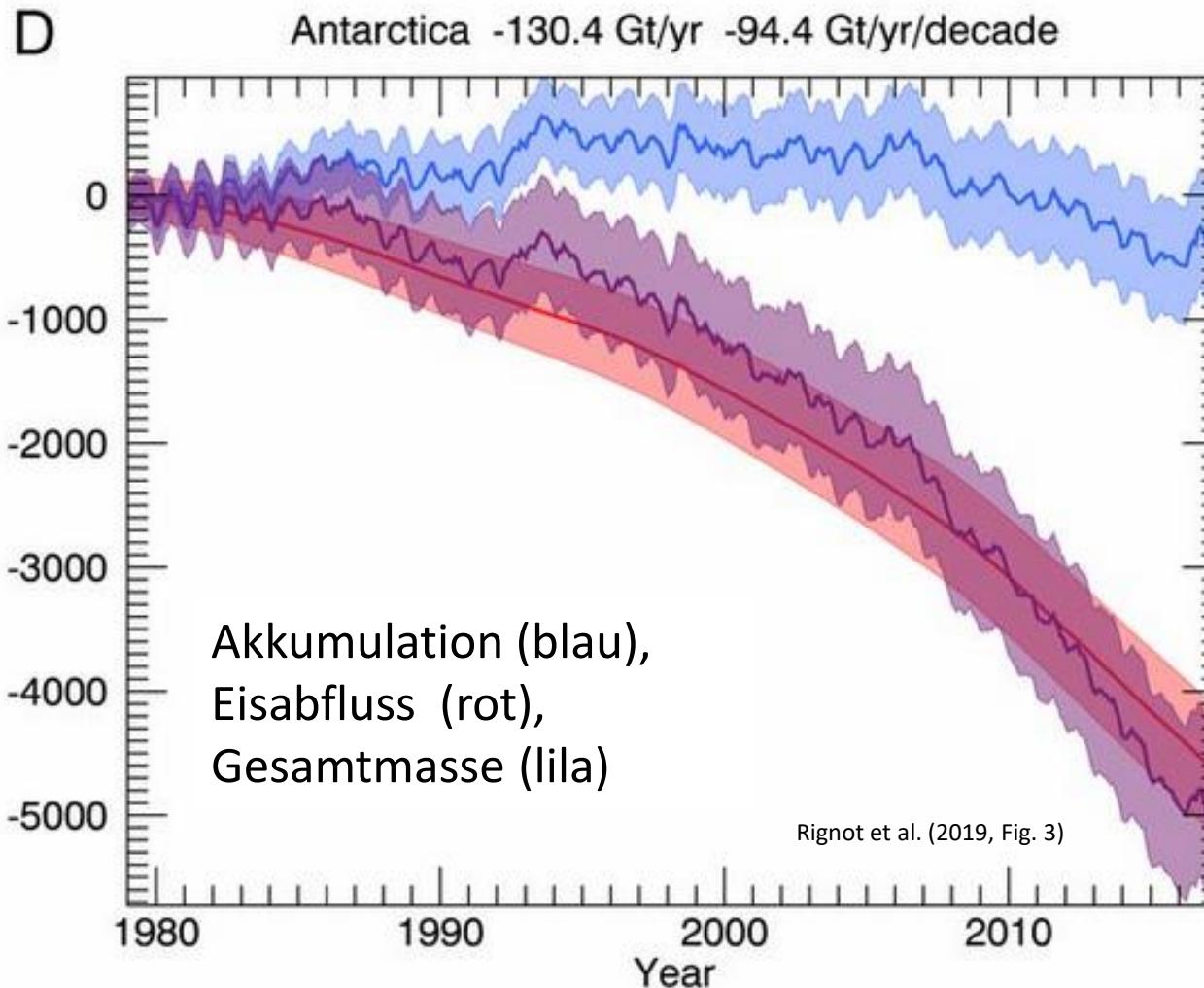
Antarktische Meereisfläche bleibt stabil, aber die letzten 6 Jahren waren unterdurchschnittlich

# Komponenten der Kryosphäre

---

- Gletscher
- Meereis
- **Inlandeismassen**
- Schneedecken
- Permafrost-Böden
- Schelfeis

# Massenbilanz des Inlandeises in der Antarktis



- sehr starker Anstieg der Verluste an Eismasse (aktuell, 252 Gt/a)
- seit 1979: antarktische Anteil des Meeresspiegelanstiegs liegt bei 14 mm

# Komponenten der Kryosphäre

---

- Gletscher
- Meereis
- Inlandeismassen
- **Schneedecken**
- Permafrost-Böden
- Schelfeis

# Nationalpark Berchtesgaden



Königsee

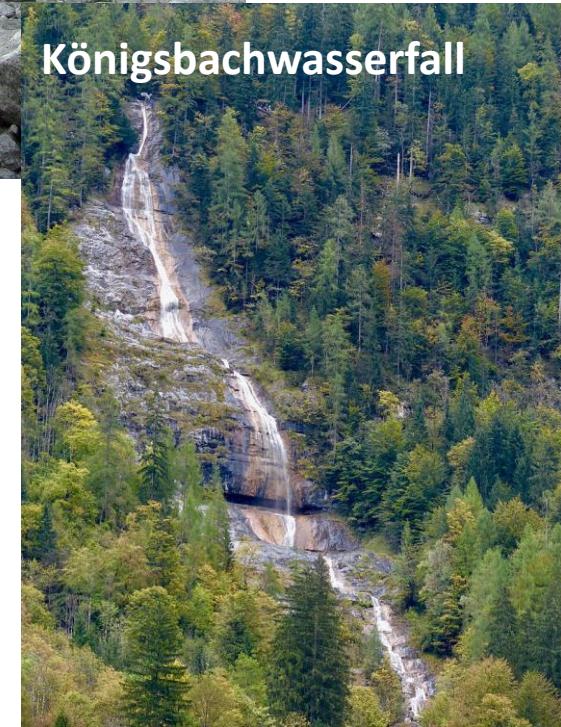


Gletschertor, Watzmann



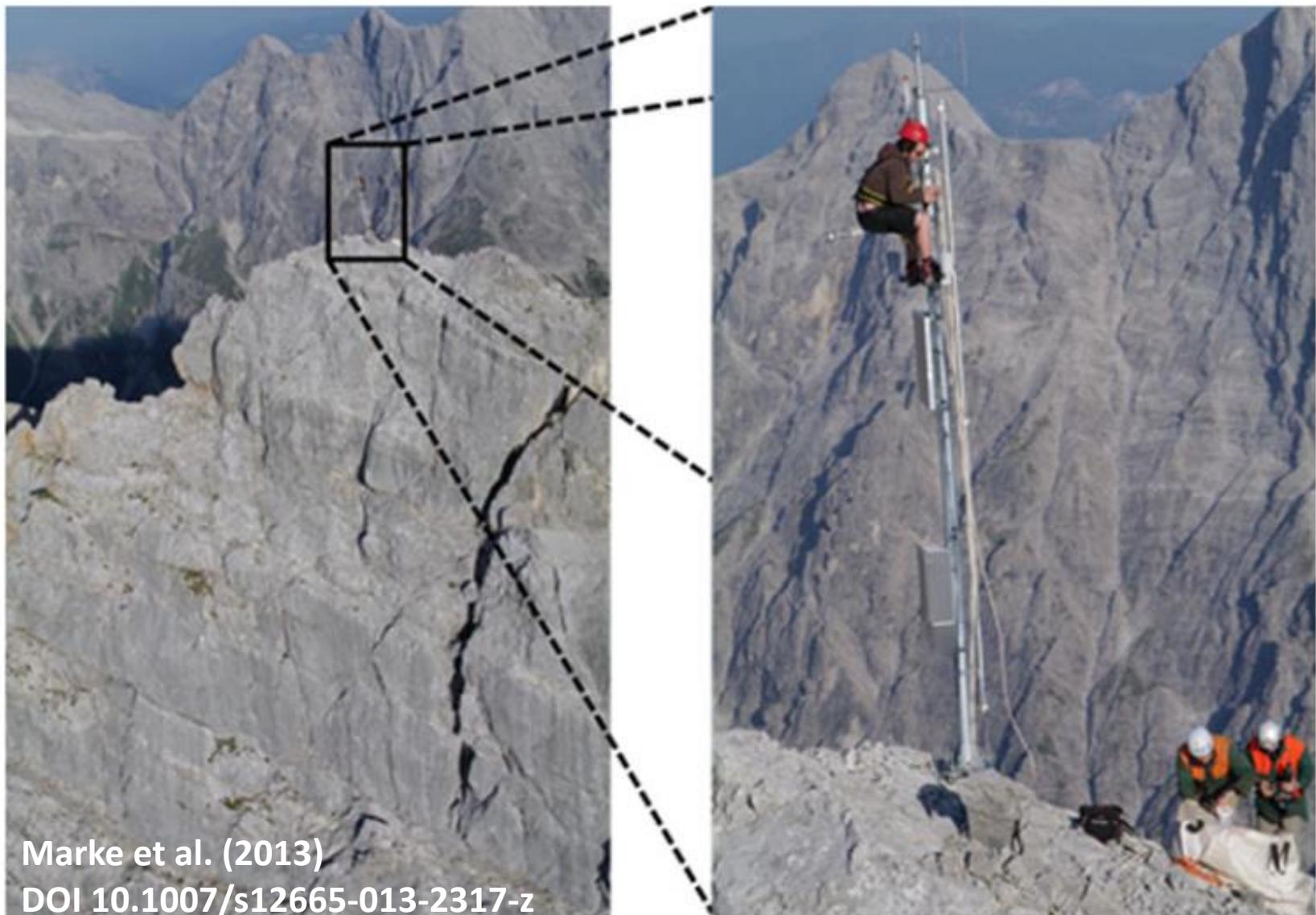
Eiskapelle

Königsbachwasserfall



u.a. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/Watzmann\\_Gletscher\\_01.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/Watzmann_Gletscher_01.JPG)

# Aufbau des Messnetzes im Nationalpark



Marke et al. (2013)

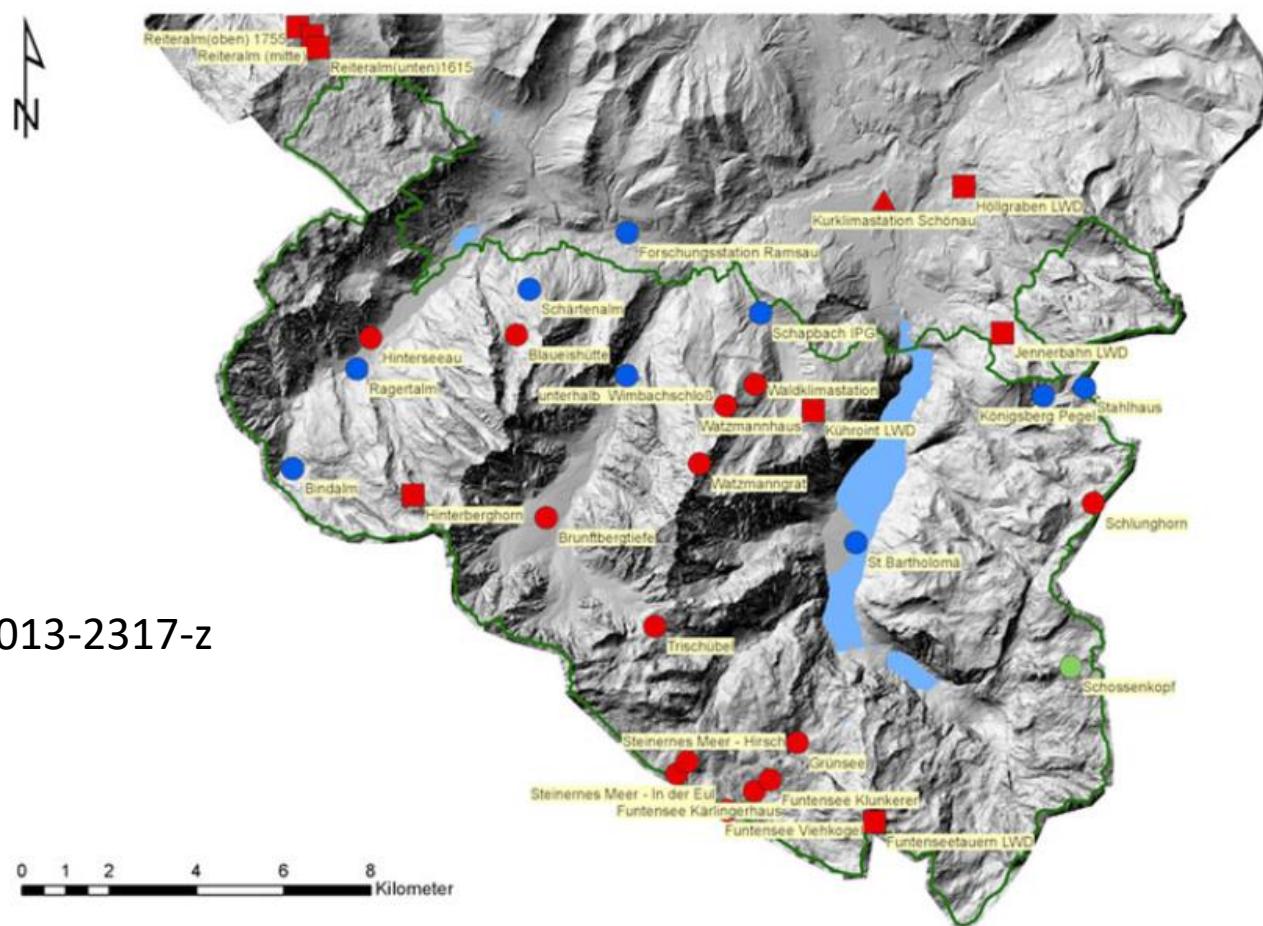
DOI 10.1007/s12665-013-2317-z

# Meteorologisches Messnetz im NP Berchtesgaden

**Fig. 4** The meteorological stations in the Berchtesgaden National Park (BNP 2012 with modifications). The colors indicate different station types (automatic, mechanic, planned), the shape of the symbol indicates the organisation in charge. Station Schönau is jointly managed by the community Schönau, the Berchtesgaden National Park and the Bavarian Avalanche Service

Marke et al. (2013)

DOI 10.1007/s12665-013-2317-z



#### Operator:

National Park Berchtesgaden



Bavarian Avalanche Service (LWD)



Schönau



#### Station type:

automatic



mechanic



planned

#### Other signatures:

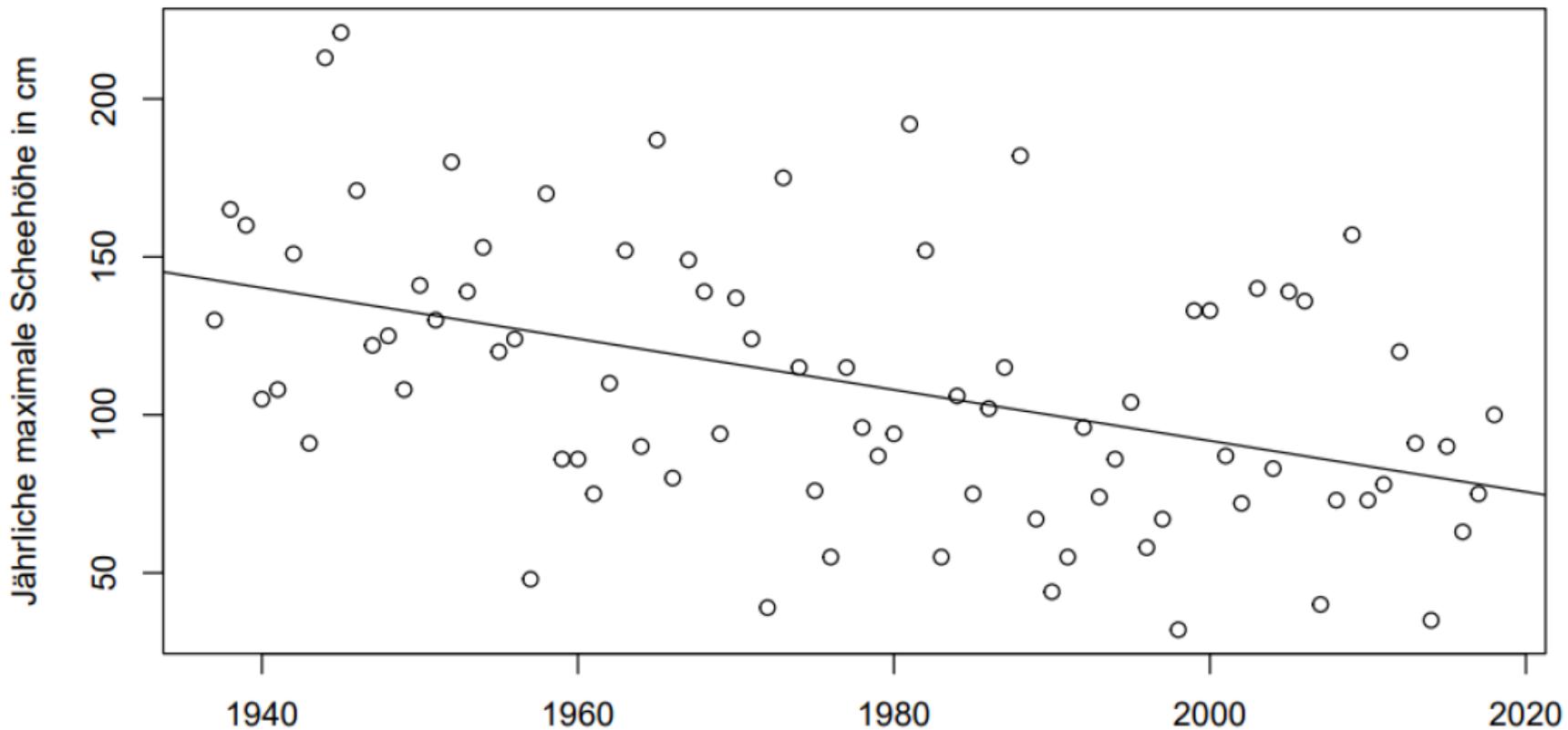
National park border



Lakes



# Änderung der Schneehöhe – Reit im Winkl



Seit 1940 hat die maximale Schneehöhe in Reit im Winkl um mehr als 50 cm (rund 35%) abgenommen

# Komponenten der Kryosphäre

---

- Gletscher
- Meereis
- Inlandeismassen
- Schneedecken
- **Permafrost-Böden**
- Schelfeis

# Umweltforschungsstation - Schneefernerhaus



Umwelt  
Forschungsstation  
**Schneefernerhaus**

Die UFS-Schneefernerhaus an der Zugspitze

# Permafrostmessungen an der Zugspitze



Änderung der Permafrosttemperatur an der Zugspitze betragen  $0.1^{\circ}\text{C}$  pro Jahr

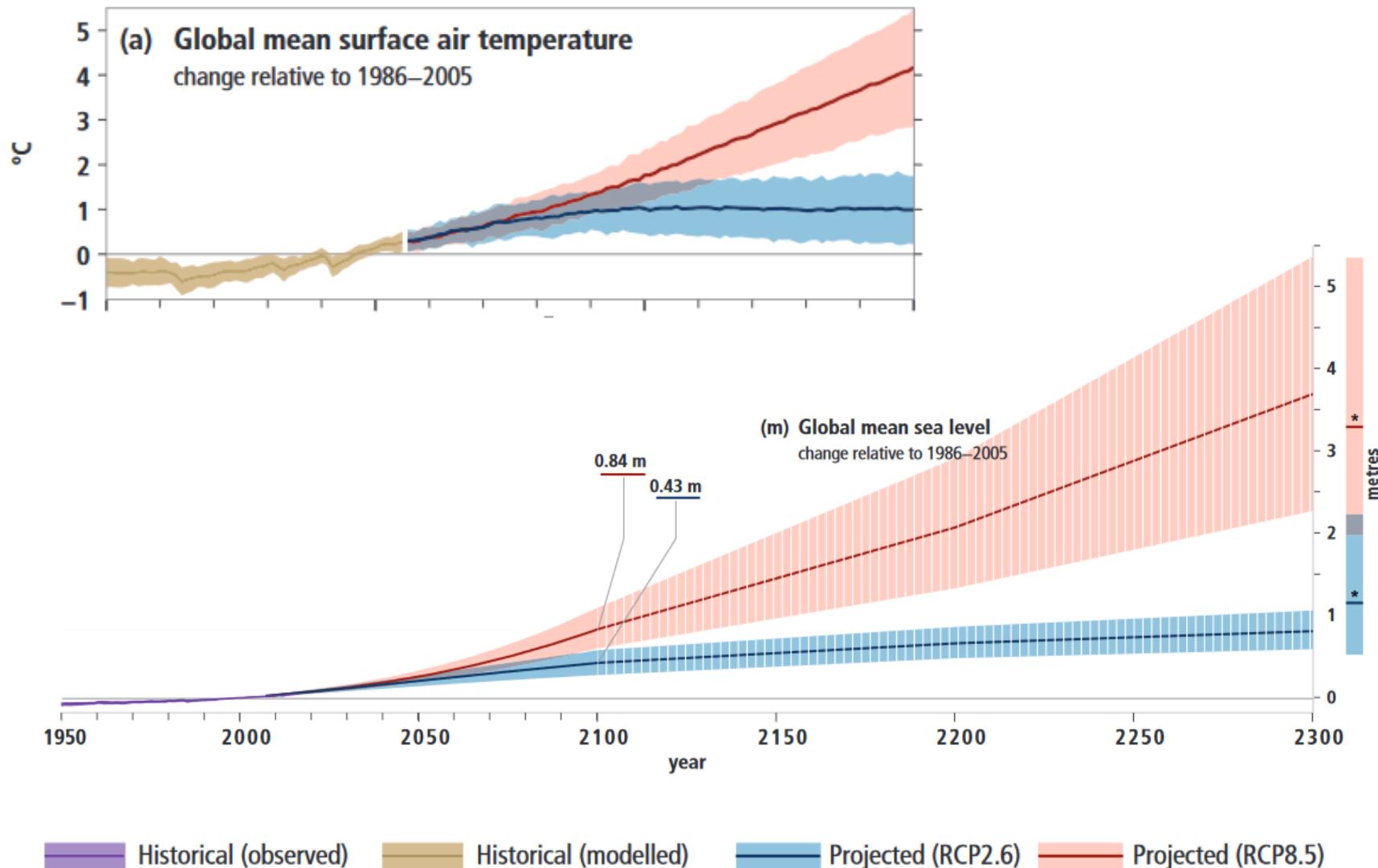
Die Maus (2022): Sachgeschichte: Klima Folge 3: Bauen und Wohnen

# Zusammenfassung

---

- Die Kryosphäre hat in vielfältiger Hinsicht (globaler Wasserhaushalt, Lebensraum, Süßwasserreserve, Klimastabilität, ....) eine enorm hohe Bedeutung für unser Erdsystem und ist ein extrem schützenwertes Gut
- Gletscher aber auch Inlandeismassen sind keine starren Körper, sondern besitzen eine hohe Dynamik und reagieren auf Klimaänderungen
- Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kryosphäre sind deutlich erkennbar und betrifft alle Komponenten der Kryosphäre und Regionen der Welt

# Mögliche zukünftige Auswirkungen - Meeresspiegel



# Literaturverzeichnis

---

- IPCC (Intergovernmental Panel on climate change), 2013,  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)
- Herpertz, 2001, Schneehydrologische Modellierung im Mittelgebirgsraum, Dissertation, Jena
- **Baumgartner & Liebscher, 1996, Lehrbuch der Hydrologie, Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin**
- Frey, 2018, Evaluierung flächendifferenzierter Simulationen der Schneebedeckung in einem alpinen Einzugsgebiet, Bachelorarbeit, Universität Augsburg
- Solomina, Bradley, Jomelli et al., 2016, Glacier fluctuations during the past 2000 years;  
<https://www.uibk.ac.at/geographie/dendro/pdf/2016-solomina-et-al-glaciers-global-2ka-qsr.pdf>
- Rignot, Mouginot, Scheuchl et al., 2019, Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979-2017; <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>
- Rignot, Mouginot, Scheuchl, 2011, Antarctic grounding line mapping from differential satellite radar interferometry; <https://doi.org/10.1029/2011GL047109>
- Ahnert, 1996, Einführung in die Geomorphologie, 4. Auflage, Eugen Ulmer, Stuttgart
- Clowes & Comfort, 1987, Process and landform, 2. Auflage, Oliver & Boyd, Edinburgh

# Literaturverzeichnis

---

- **Wilhelm, 1975, Schnee und Gletscherkunde, Walter de Gruyter, Berlin**
- Wilhelm, 1997, Hydrogeographie. Das Geographische Seminar, Westermann, Braunschweig
- AMAP, 2011, <https://www.apam.no/documents/doc/amap-assessment-2011-mercury-in-the-arctic/90>
- Barry & Gan, 2011, The global cryosphere, 1. Auflage, Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Blümel, 1999, Physische Geographie der Polargebiete, B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig
- Dingman, 1994, Physical hydrology, Macmillan, New York
- Colbeck, 1971, One Dimensional Water Flow through Snow
- La Chapelle, 1969, Field guide to snow crystals, Univ. of Washington Press, Seattle
- Herrmann et al., 1978, Study of snowmelt-runoff using isotope measurements- Proc. Meet. Modeling of Snow Cover Runoff, U.S. Army Regions Res. And Engng. Lab., Hannover
- Gow, 1968, Deep core studies of the accumulation and densification of snow at Byrd Station and Little America V, Antarctica, CRREL Research Report
- Eisner & Ambach, 1981, Strain rate measured in a 20 m deep firn pit in a temperate glacier (Kesselwandferner, Oetztal Alps), Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie