

NACH DEM EIS

WIE SEHEN DIE HOCHGEBIRGE DER ZUKUNFT AUS?

KRYOSPHERE

...überwiegend eis- und schneefrei



Gletscher und Schneefelder zeigen negative Massenbilanzen. Durch die Erwärmung der Lufttemperatur in den Höhenlagen, verschiebt sich die Schneegrenze. Zusätzlich verkürzt sich die klimatische Winterzeit und das Regen- zu Schneeverhältnis nimmt zu. Ausbleibende Winterniederschläge fehlen den Gletschern als Nahrung. Als Resultat werden Eis- und Schneemassen ausschließlich in extremen Höhenlagen zu finden sein.

"By the end of the 21st century, relative losses in ice volume of between 30% (Alaska), around 50% (High Mountain Asia), and 80% (European Alps and low latitudes of the South American Andes) are [...]" (Huss et al., 2017)

Durch die fehlende Schnee- und Eisbedeckung reduziert sich die Albedo in den Hochgebirgen und die steigenden Absorption von Wärmestrahlung sorgt für eine negative Rückkopplung in Bezug auf die Erwärmung der Oberflächen- und Lufttemperatur. Auch der im Boden gebundene Permafrost degradiert zunehmend. In Bereichen wo dieser noch nicht vollends abgetaut ist, weist er einen mächtigen Active-Layer auf.

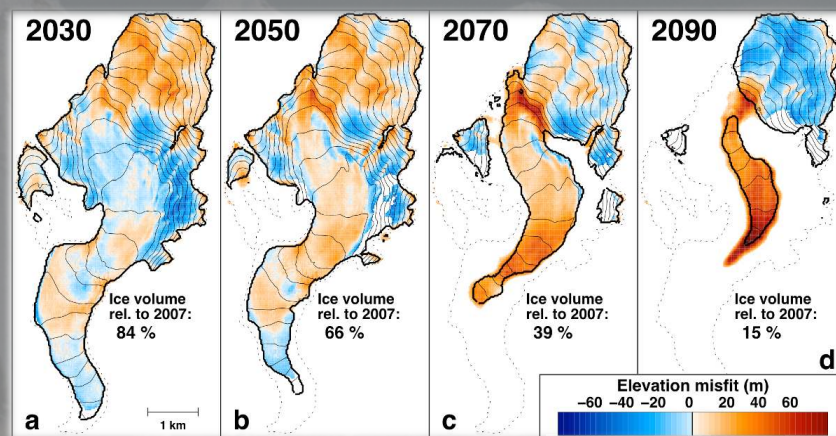
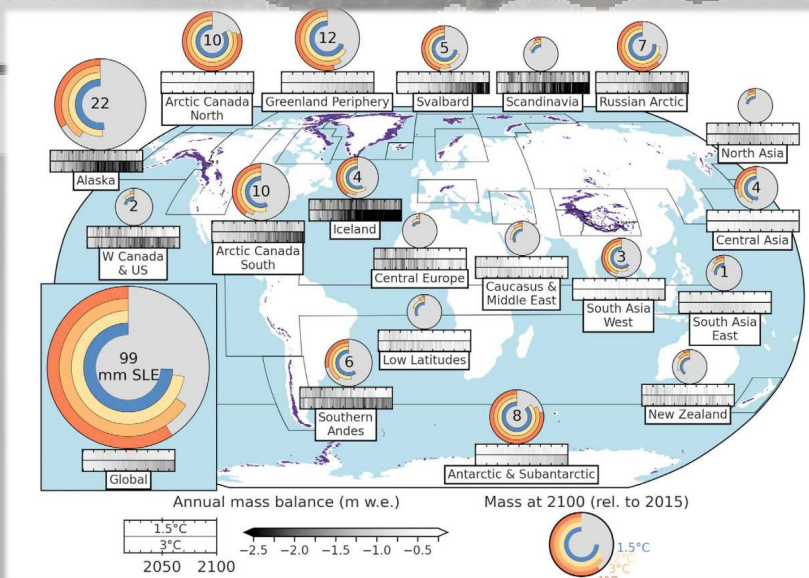


Abb. 1: Prognose der Massenveränderung des Rhone Gletscher, Schweiz, bei mittlerem Erwärmungsszenario (Huss et al., 2010)

Abb. 2: Entwicklung terrestrischer Eismassen bis 2100 relativ zu 2015 (Rounce et al., 2023)



HYDROSPHERE

...reich an kleinen Seen aber niederschlagsarm



In den Gebieten ehemaliger Gletscherzungen verbleiben nach Rückzug der Eismassen zahlreiche Toteisseen. Die Zahl der Extremwetterereignisse nimmt zu. Die gesamte Niederschlagsmenge verringert sich und äußert sich primär in Starkniederschlägen. Als Folge dessen zeigen sich extreme Schwankungen zwischen den minimalen und maximalen Abflussraten von Gebirgsflüssen. Verstärkt wird dies durch das Verschwinden von Schmelzwässern, welche die Haupteintragsquelle der Flüsse bildet. Auswirkungen hat dies auf den Sedimenttransport, die fluviale Erosion und auf das Risiko von Massenbewegungen wie z.B. Murgängen. Zusätzlich zeigen sich negative Konsequenzen für die allgemeine Wasserverfügbarkeit im Gebirge wie auch in den Regionen, welche von Wasserressourcen aus den Einzugsgebieten des Gebirges angewiesen sind.

"This could negatively impact 1.9 billion people living in (0.3 billion) or directly downstream of (1.6 billion) mountainous areas." (Immerzeel et al., 2020)

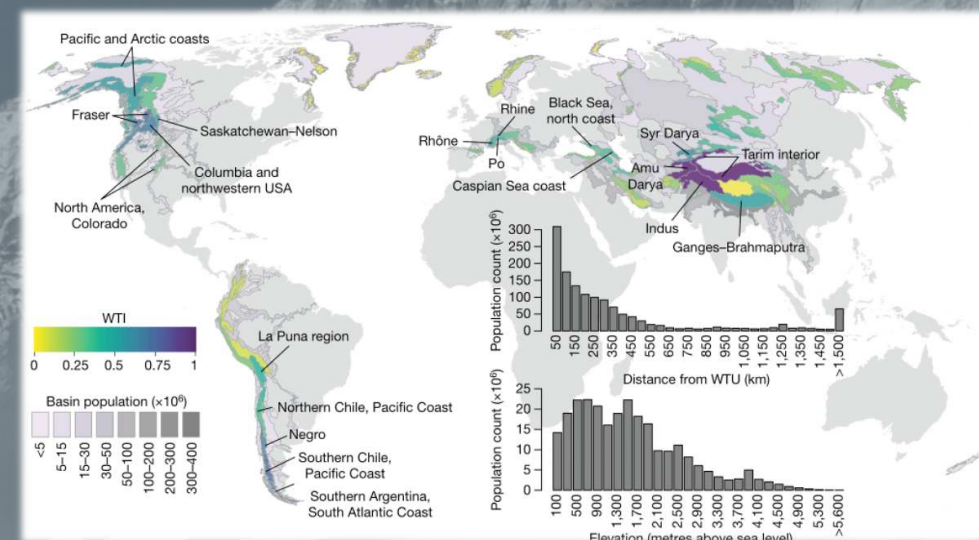


Abb. 3: Bedeutung montaner Wasserressourcen und Abhängigkeit der Bevölkerung (Immerzeel et al., 2020)

LITHOSPHERE

...geprägt durch gravitative Massenbewegungen und Erosion



Die fehlenden Eismassen sorgen besonders in ehemals glazial geprägten Regionen für eine Destabilisierung der Hangflanken durch den Wegfall der Gletscher als Stütze. Zudem fehlt der Permafrost als wichtiger Kit in instabilen Felsflanken und sein Abtauen sorgt für eine hohe Wassersättigung im Untergrund. Die primären gravitativen Massenbewegungen sind Land- und Hangrutschungen, Bergstürze und Steinschläge. Ergänzt wird die Degradation der Orographie durch hohe Erosionsraten und starke physikalische Verwitterung. Bei letzterer stehen thermische Verwitterungsphänomene und die Druckentlastungsverwitterung im Vordergrund. Vergletscherte Gebirgsregionen erfahren großräumiger Hebung durch die Druckentlastung einhergehend mit dem Abtauen des Eises.

Source

To

Sink

- Schmelzwasser
- Niederschlagsmengen
- Niederschlagsverteilung
- Temperaturanstieg
- Strahlungsintensität

- Variabilität in der Abflussraten
- Variabilität der Abflusszeiten
- Erhöhte Evaporation
- Abnahme der Infiltrationsraten der Böden bzw. Oberflächen

- Hydroenergie
- Süßwasserverfügbarkeit
- Irrigation
- Schifffahrt
- Biodiversität
- Erosion
- Sediment Erosion & Ablation

Abb. 4: Wirkungsschema des Einflusses auf und von montanen Wasserressourcen von "Source To Sink" (Eigene Darstellung)

BIOSPHERE

...geprägt durch eine ausgiebige Gebirgsvegetation



Die Hochgebirgsregionen stellen grundsätzlich einen Hotspot der Biodiversität dar. Durch die angestiegene Lufttemperatur in der Höhe verschieben sich die Baum-, Vegetationsgrenzen und die nivale Stufe. Dies sorgt für den Rückgang kälteliebender und ursprünglich montaner Arten und ermöglicht extrazonaler, wärmeliebender Flora & Fauna das Vorrücken in die Höhenlagen. Die allgemeine Alpha-Diversität steigt an, während besonders in den Gebirgsbächen das Makro- und Mikrobiom verarmt.

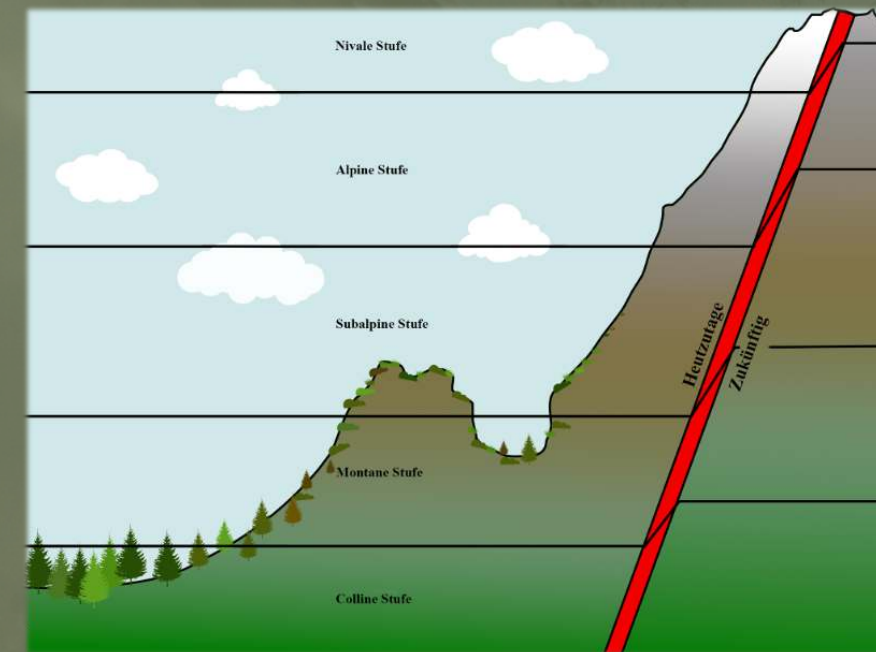


Abb.5: Skizze der Verschiebung der vertikalen Vegetationsgliederung im Vergleich des rezenten zu dem künftigen Klimas (Eigene Darstellung)

Quellen:

Hintergrund: © 2023 Canva ®, Ama Dablam, Nepal, by shulz; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., 2021. Climate change 2021: the physical science basis: summary for policymakers: working group I contribution to the sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. Icons: © 2023 Canva ®

Inhalt: Buckel, J., Mudler, J., Gardeweg, R., Hauck, C., Hilbich, C., Frauenfelder, R., Kneisel, C., Buchelt, S., Blöthe, J.H., Hördt, A., Bücker, M., 2022. Identifying mountain permafrost degradation by repeating historical ERT-measurements (preprint). Frozen ground/Geomorphology. <https://doi.org/10.5194/tc-2022-207>; Clague, J.J., Huggel, C., Korup, O., McGuire, B., 2012. Climate change and hazardous processes in high mountains. <https://doi.org/10.5167/UZH-77920>; Compagno, L., Huss, M., Zekollari, H., Miles, E.S., Farinotti, D., 2022. Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. Commun Earth Environ 3, 191. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00520-8>; Frey, H., 2021. Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren im Hochgebirge. <https://doi.org/10.5167/UZH-206073>; Gómez, J.M., González-Megías, A., Lorite, J., Abdelaziz, M., Perfectti, F., 2015. The silent extinction: climate change and the potential hybridization-mediated extinction of endemic high-mountain plants. Biodivers Conserv 24, 1843–1857. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0909-5>; Huggel, C., Salzmann, N., Allen, S., Caplan-Auerbach, J., Fischer, L., Haeblerli, W., Larsen, C., Schneider, D., Wessels, R., 2010. Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability. Phil. Trans. R. Soc. A. 368, 2435–2459. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0078>; Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R.S., Clague, J.J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayán, D.R., Greenwood, G., Mark, B.G., Milner, A.M., Weingartner, R., Winder, M., 2017. Toward mountains without permanent snow and ice: MOUNTAINS WITHOUT PERMANENT SNOW AND ICE. Earth's Future 5, 418–435. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>; Huss, M., Jouvett, G., Farinotti, D., Bauder, A., 2010. Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. Hydrol. Earth Syst. Sci. 14, 815–829. <https://doi.org/10.5194/hess-14-815-2010>; Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B.J., Elmore, A.C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J.S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P.D.A., Kulkarni, A.V., Mayewski, P.A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T.H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A.B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T., Baillie, J.E.M., 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature 577, 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>; Immerzeel, W.W., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., 2010. Climate Change Will Affect the Asian Water Towers. Science 328, 1382–1385. <https://doi.org/10.1126/science.1183188>; Kaltenborn, B.P., Nellemann, C., Vistnes, I.L., 2010. High mountain glaciers and climate change: challenges to human livelihoods and adaptation. GRID-Arendal: UNEP, Arendal, Norway; Khadka, N., Ghimire, S.K., Sharma, S., Hamal, K., 2022. Rapidly Expanding Glacial Lakes in Nepal Himalaya. Jalawaayu 2, 45–55. <https://doi.org/10.3126/jalawaayu.v2i1.45393>; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., 2021. Climate change 2021: the physical science basis: summary for policymakers: working group I contribution to the sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland; Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nature Clim Change 5, 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>; Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochizky, W., Huss, M., Berthier, E., Brinkerhoff, D., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B., McNabb, R.W., 2023. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. Science 379, 78–83. <https://doi.org/10.1126/science.abl324>; Shugar, D.H., Burr, A., Haritashya, U.K., Kargel, J.S., Watson, C.S., Kennedy, M.C., Bevington, A.R., Betts, R.A., Harrison, S., Strattman, K., 2020. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. Nat. Clim. Chang. 10, 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>; Zou, L., Tian, F., Liang, T., Eklundh, L., Tong, X., Tagesson, T., Dou, Y., He, T., Liang, S., Fensholt, R., 2023. Assessing the upper elevational limits of vegetation growth in global high-mountains. Remote Sensing of Environment 286, 113423. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113423>