

Quantifizierung der Landschafts- entwicklung während des Quartärs:

Stand der Kenntnisse und konzept- tuelle Überlegungen für weitere Fortschritte

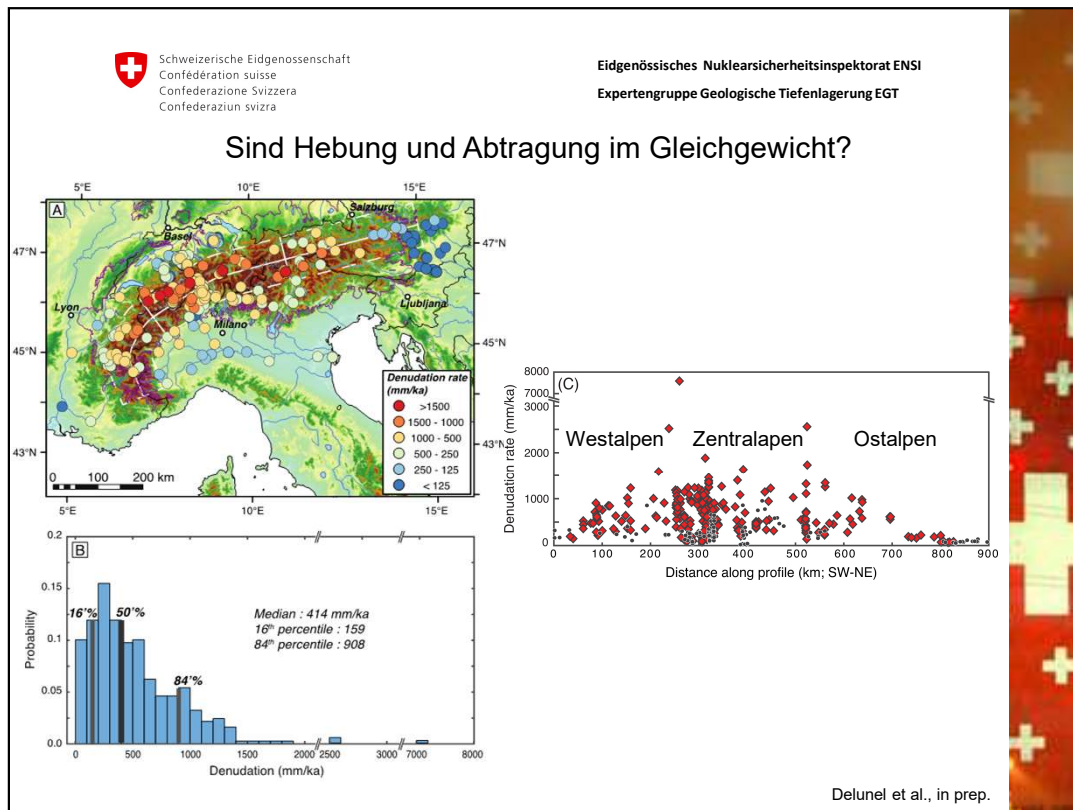
Fritz Schlunegger





Ungelöste Fragen:

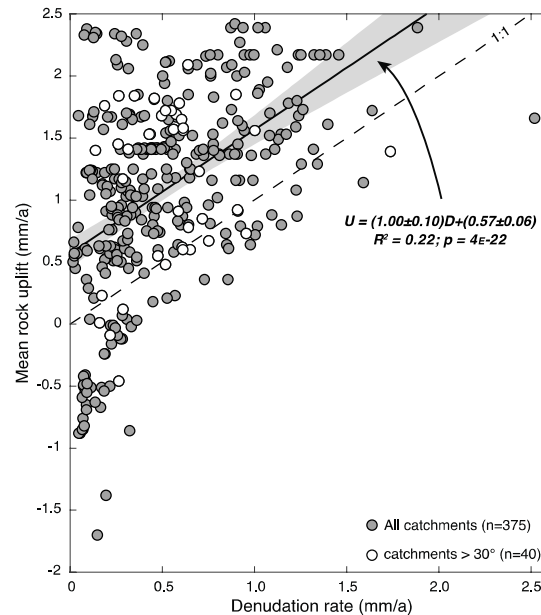
1. Heben sich die Alpen weiter, oder sind Hebung und Abtragung im Gleichgewicht?
2. Welches sind die wichtigsten landschaftsbildenden Prozesse in den Zentralalpen und im angrenzenden Vorland?
3. Welches sind die Dokumente für diese Prozesse, und können wir diese datieren?
4. Wo liegen die glazialen Übertiefungen, wie wurden sie gebildet und in welchen Kontext können wir die Archive stellen?
5. Was sind die Implikationen für die Bestimmung der minimalen Tiefe für ein SMA- und ein HAA-Lager?



Eine erste Frage, ob Hebung und Abtragung in den Alpen im Gleichgewicht sind, konnte dank einer Kompilation von Daten über Abtragungs- und Hebungsraten quer über die gesamten Alpen beantwortet werden. Dazu trug Romain Delunel alle gemessenen Konzentrationen von kosmogen gebildetem ^{10}Be zusammen, welche in den letzten 15 Jahren in Flusssanden gemessen und anschliessend publiziert worden sind. Die ^{10}Be -Konzentrationen lassen sich in Denudationsraten umrechnen, welche in den letzten Tausenden von Jahren wirksam waren. Wird der gesamte Datensatz betrachtet, dann werden die Alpen im Durchschnitt um etwa 410 Millimeter pro Jahr abgetragen (Abbildung A). Die Streuung der Daten ist allerdings sehr hoch (Abbildung B). Die Abtragungsraten sind in den Zentralalpen generell am höchsten (Abbildung C).



Sind Hebung und Abtragung im Gleichgewicht?

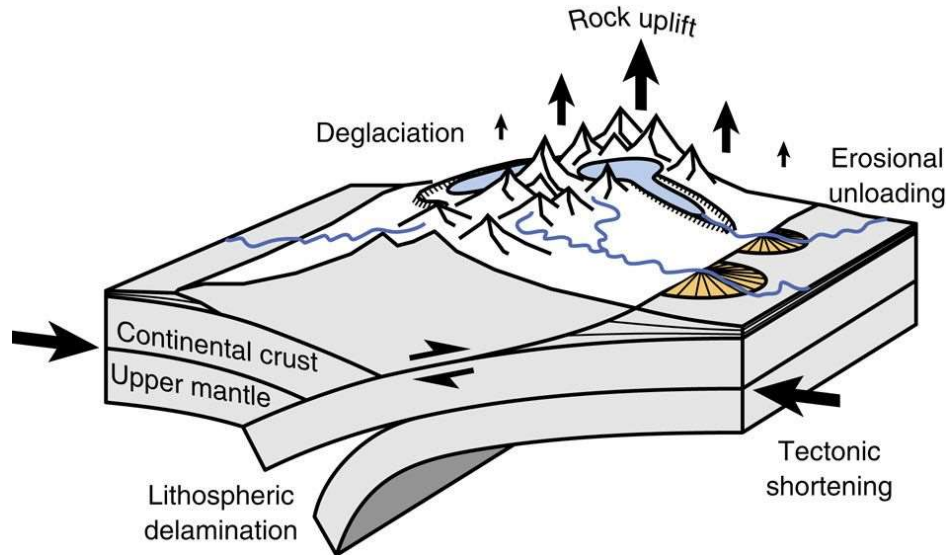


Delunel et al., in prep.

Werden nun Denudationsraten und Hebungsraten miteinander verglichen, dann zeigt sich deutlich, dass die Alpen schneller gehoben als abgetragen werden, und zwar etwa um 50%. Bis jetzt wurde davon ausgegangen, dass Hebung und Abtragung sich im Gleichgewicht befinden, oder dass die Abtragung sogar schneller erfolgt als die Hebung. Dem ist aber nicht so, und dies zeigt deutlich, dass in den Alpen eine aktive tektonische Komponente wirksam sein muss.

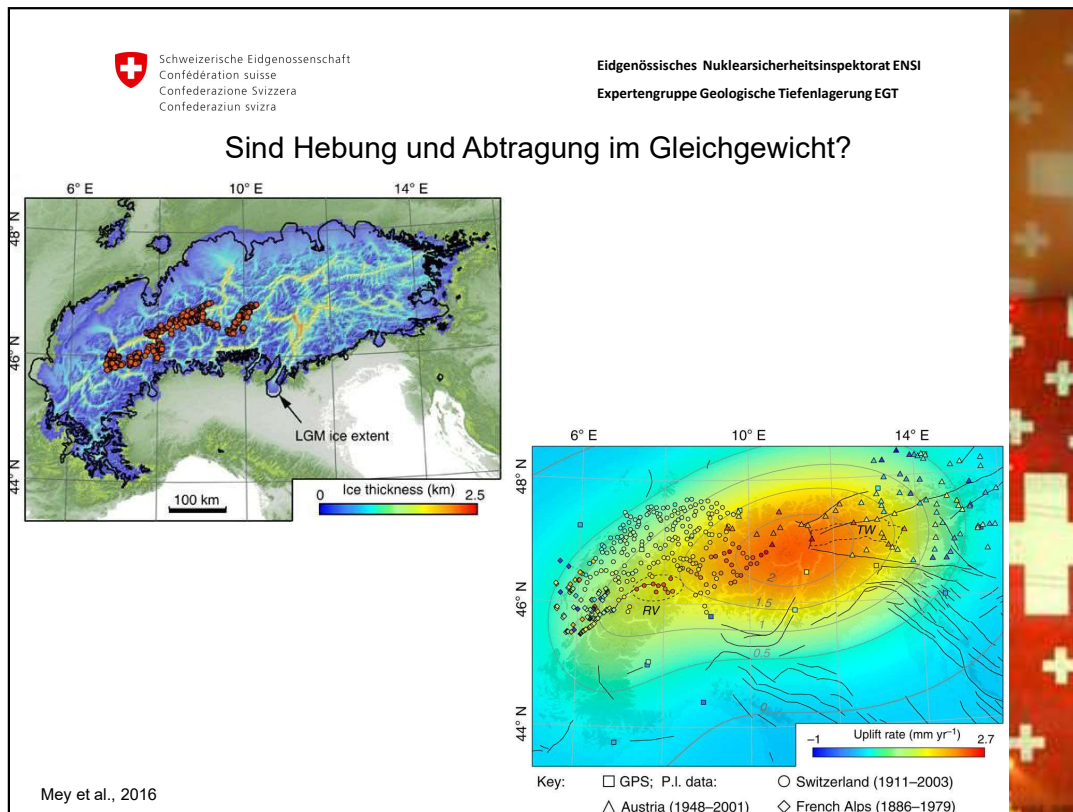


Sind Hebung und Abtragung im Gleichgewicht?



Mey et al., 2016

Über die Ursachen dieser Hebung gehen aber die Ansichten weit auseinander. Einige Autoren schliessen aus ihren Analysen, dass die Hebung auf die Entlastung der Alpen nach dem Abschmelzen der letzteiszeitlichen Eismassen vor 20'000 Jahren vor heute zurückzuführen ist (Mey et al., 2016). Andere Autoren weisen auf aktive tektonische Bewegung zwischen Adria und Europa hin, und schliesslich postulieren Sternai et al. (2016), dass geodynamische Prozesse (Mantelfluss, Delamination der Lithosphäre) ebenfalls in Betracht gezogen werden müssten.



Der Grund für die unterschiedlichen Interpretationen liegt hauptsächlich darin, dass grössere Lücken im Datensatz insbesondere für die West- und Ostalpen bestehen. So postulieren Mey et al. (2016), dass die letzteiszeitlichen Eismassen in den Ostalpen am grössten waren. Diese Aussage basiert aber auf Daten über die Höhenlage des letzteiszeitlichen Gletscherschliffs, die in den Zentralalpen erhoben wurden. Die Aussage, dass der Kern rund um die Ostalpen die höchsten Hebungsraten aufweisen, basiert ebenfalls auf einer Interpolation von geodätischen Daten, die randlich davon erhoben wurden. Deshalb basiert die Interpretation, dass das Abschmelzen der letzteiszeitlichen Eiskuppe die heutige Hebung kontrollieren sollte, weitgehend auf interpolierten Daten.



Heben sich die Alpen weiter, oder sind Hebung und Abtragung im Gleichgewicht?

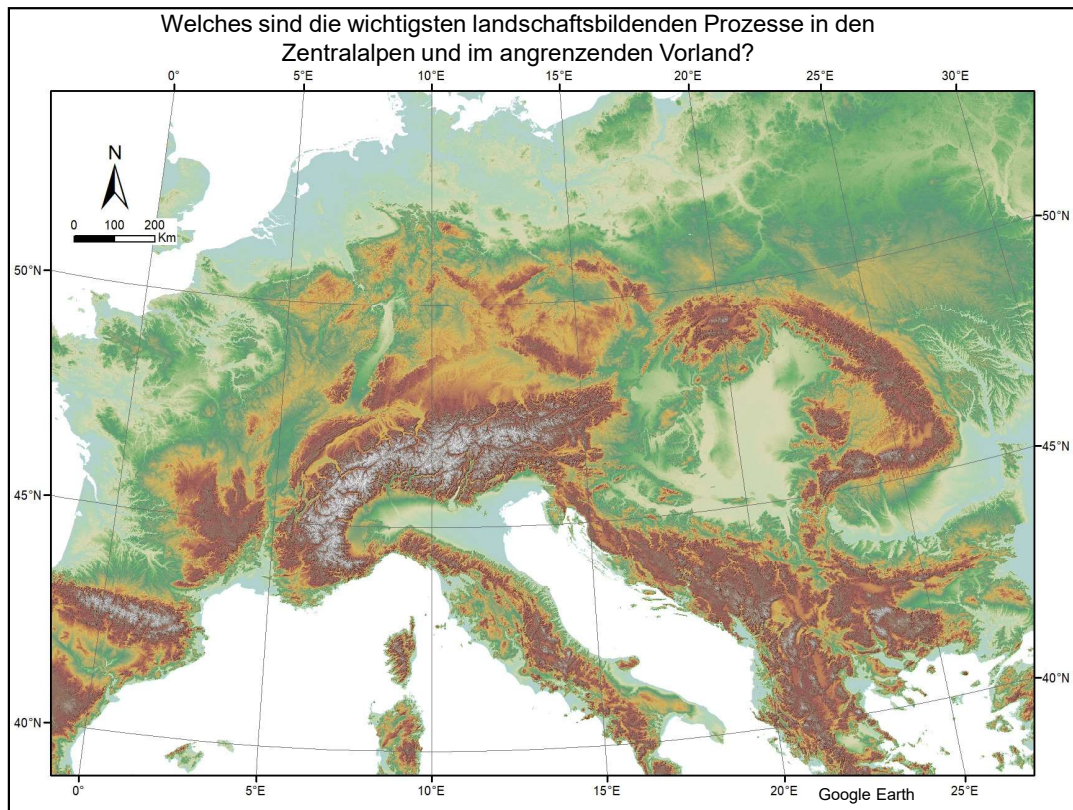
Die Alpen werden zur Zeit schneller gehoben, als dass sie abgetragen werden; die Raten (Hebung und Abtragung) sind sehr hoch für ein Gebirge

Die Ursache dieser Hebung ist nicht geklärt, und die Frage nach der Ursache wird auch in den nächsten Jahren voraussichtlich ungeklärt bleiben

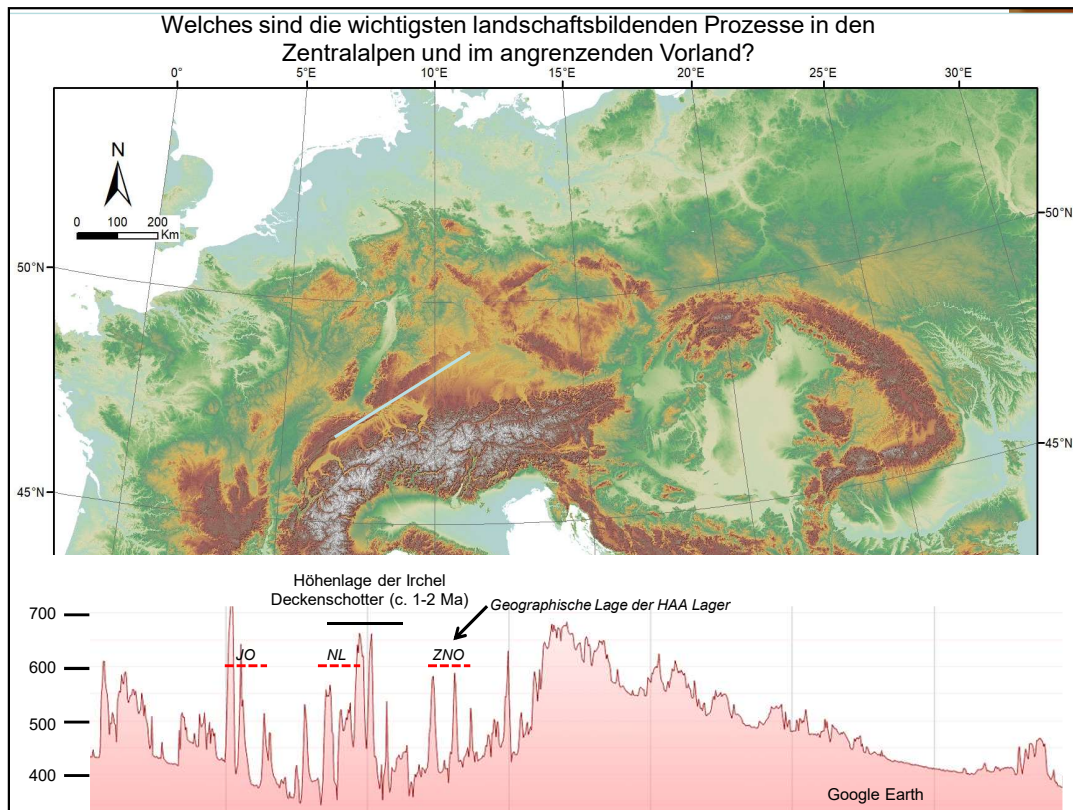
Die in der Diskussion behandelten Prozesse und Daten passen von den Skalen her nicht zusammen

Die Alpen waren und bleiben ein geomorphologisch wie auch tektonisch sehr dynamisches System

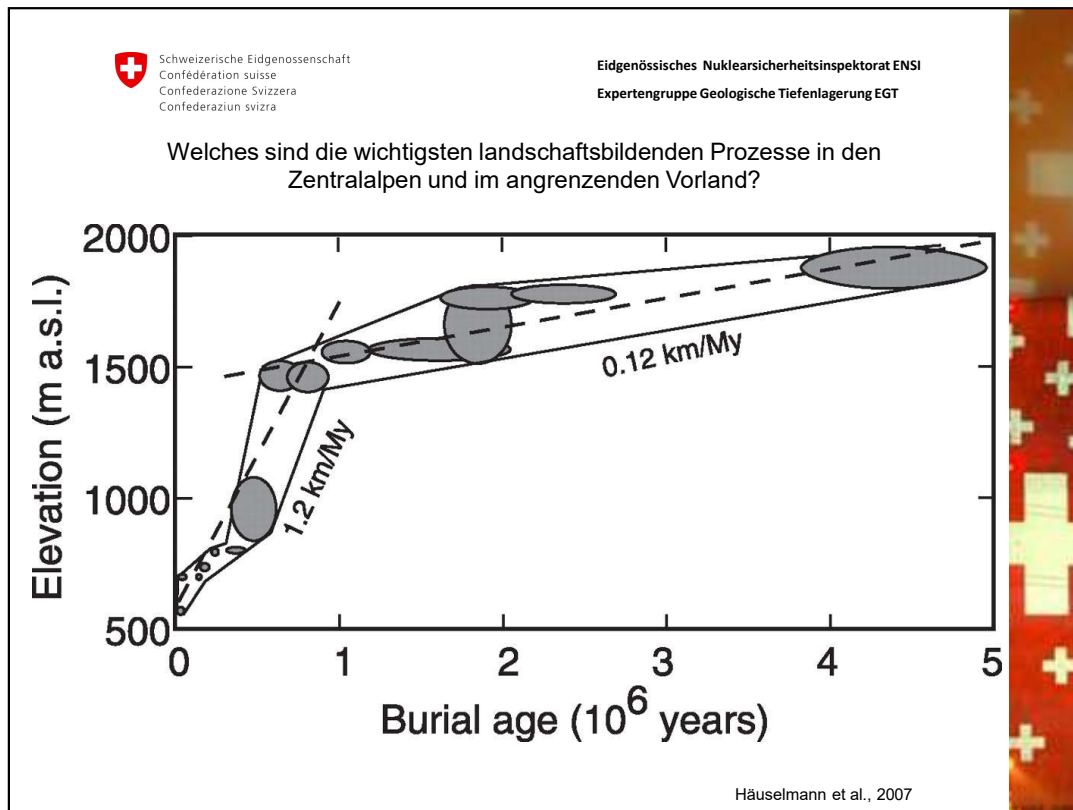




Betrachten wir das Vorland aus der Perspektive des Satelliten, dann fällt auf, dass sich das Schweizerische Mittelland und das Bayerische Alpenvorland von der Entwässerungs- und Landschaftsstruktur her deutlich unterscheiden. Die Entwässerung Bayerns erfolgt durch die Donau nach Osten in Richtung Schwarzes Meer; der zentrale Teil des Schweizerischen Mittellandes dagegen wird in die Nordsee durch den Rhein entwässert. Das Schweizerische Mittelland ist stark zerfurcht und zeigt NW orientierte Talverläufe. Die Landschaft des Bayerischen Alpenvorlands wirkt viel sanfter, und die Entwässerung erfolgt nach NE. In beiden Landschaftstypen liegt die Entwässerungsachse auf einer Linie, welche SW-NE orientiert ist. Diese Linie wird durch den Durchbruch der Aare und des Rheins bei Koblenz unterbrochen.



Betrachten wir die Landschaft entlang der Entwässerungsachse zwischen Mittelland und Alpenvorland, dann bestätigt sich der vorherige Eindruck: Das Mittelland ist morphologisch stark gegliedert, das Alpenvorland in Bayern dagegen wirkt relativ glatt. Im Mittelland befindet sich der topographisch tiefste Bereich bei Koblenz, wo Aare und Rhein die SW-NE-orientierte Entwässerungsachse durchbrechen. Die Entwässerungsachse im Alpenvorland (Bayern) dagegen zeigt immer noch den Verlauf des normalgradierten Flusslängsprofils der Donau. Interessanterweise liegt die heutige Wasserscheide zwischen Donau und Rhein auf der Höhenlage der Deckenschotter beim Irchel. Vorläufige Altersbestimmungen zeigten, dass diese Flusschotter zwischen c. 2 und 1 Millionen Jahre alt sind (Claude et al., 2019). Die Schotter scheinen ebenfalls zu dokumentieren, dass der Rhein um 2 Millionen Jahre vor heute in Richtung Donau entwässerte, dass aber seit 1 Million Jahre die Entwässerung in die Nordsee erfolgt. Was wir also als Relief sehen, ist das Resultat einer Reorganisation der Landschaft vor c. 1 Million Jahre vor heute (Claude et al., 2019).



In den Berner Alpen wurde die Entwicklung der Erosionsbasis, welche in Karstsystemen (Beatenberg) aufgezeichnet ist, mit Hilfe kosmogener Nuklide datiert. Dabei zeigt sich, dass die Abnahme der Erosionsbasis zwischen 5 und 1 Millionen Jahre vor heute ziemlich kontinuierlich verlief (c. 120 Meter pro Million Jahre), dass seit 1 Million Jahre aber die Absenkung der Erosionsbasis sehr schnell erfolgte (c. 1200 Meter pro Million Jahre). Dieser Absenkung liegt sehr wahrscheinlich eine klimatische Kontrolle zu Grunde. So wechselten die hauptklimatischen Zyklen von einer Frequenz von 40 zu 100 Tausend Jahren. Gekoppelte Eiswachstums- und Erosionsmodelle zeigen, dass als Folge davon die Talgletscher während einer Eiszeit stark in ihrer Dicke wuchsen und ihr Erosionspotential deshalb rapide zunahm (Perderson und Egholm, 2013). Valla und Koatuoren kamen bei der Bestimmung der Abkühlungsgeschichte von Gesteinen, die im Wallis aufgeschlossen sind, zum gleichen Schluss (Valla et al., 2011).



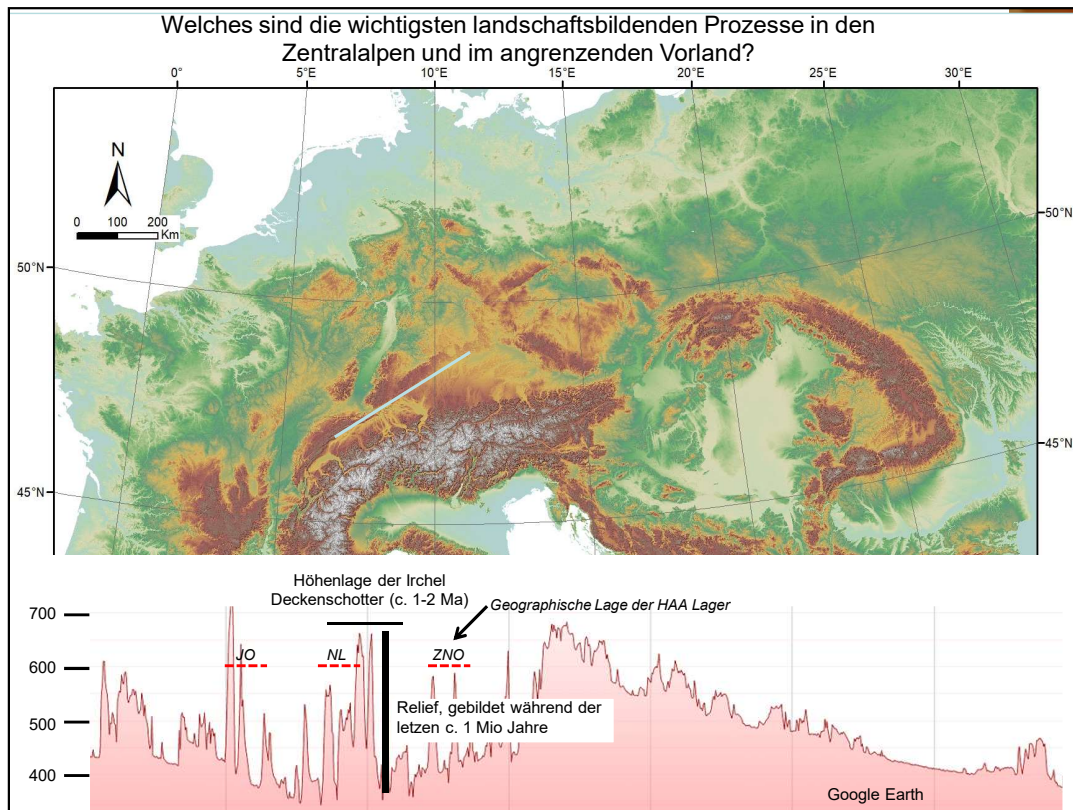
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung EGT

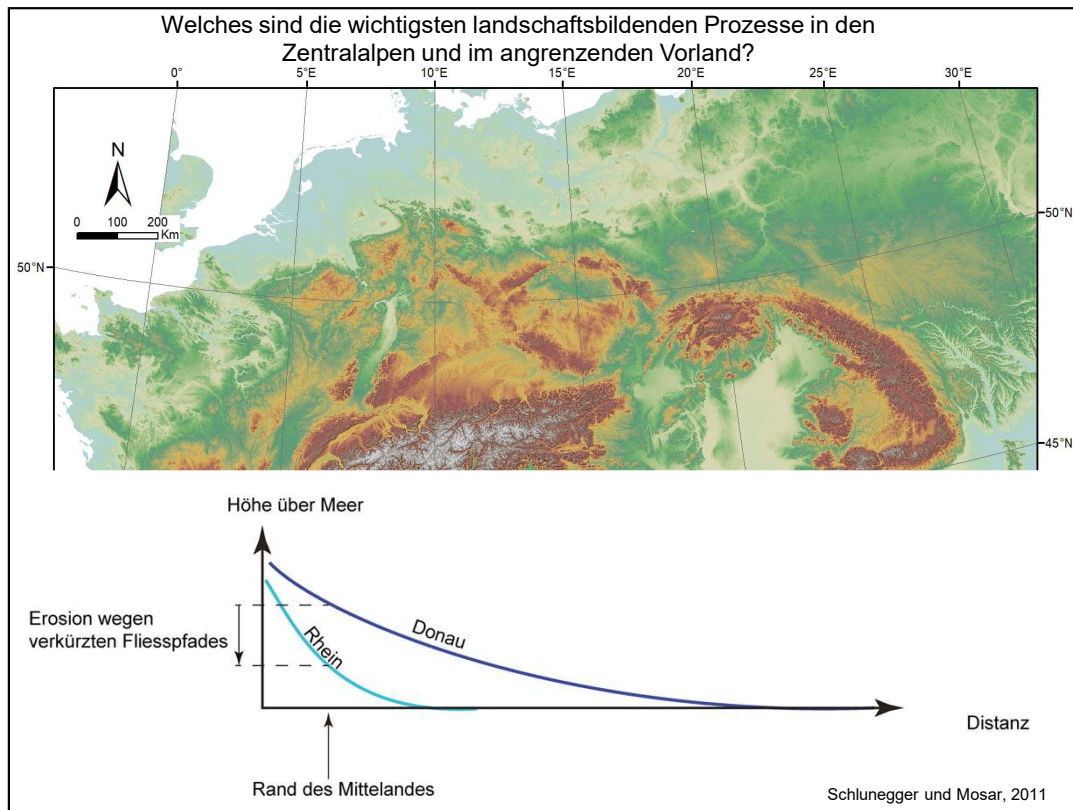


Jungfrau.ch

Die Ausbildung der markanten U-förmigen Schlifftäler mit weit in die Zentralalpen hineinreichenden flachen Talböden ist sehr wahrscheinlich auf den Wechsel der Erosionsmechanismen der Talgletscher vor c. 1 Million Jahre vor heute zurückzuführen. Diese Änderung in den Erosionsmechanismen hat vermutlich klimatische Ursachen.



Die Reliefbildung in der NW Schweiz ist vermutlich ebenfalls auf diese Reorganisation des Klimas – die sogenannten Mittelpleistozäne Reorganisation des Klimas – zurückzuführen. Dies könnte die Umlenkung des Rheins und eine Tieferlegung der Erosionsbasis verursacht haben – als Folge des grösseren Wasserabflusses und der relativ kurzen Distanz zur Nordsee.



Die Ablenkung des Rheins in die Nordsee führte zu einer starken Verkürzung des Fließpfades – der Länge des Flusses bis zum Meer. Damit erhöht sich auch die Krümmung und das Gefälle des Vorfluters und als Folge davon dessen Erosionsleistung. Im Fall der Umlenkung des Rheins kann die daraus resultierende Absenkung der Erosionsbasis bei Koblenz (Rand des Mittellandes) mindestens 200 Meter betragen haben (Schlunegger und Mosar, 2001). Die Umlenkung des Rheins in Richtung Nordsee vor einer Million Jahr vor heute war wahrscheinlich die grösste Veränderung des Mittellandes. Weitere grössere Wasserumlenkungen in Richtung Nordsee sind nicht in Sicht.



Wichtigste landschaftsgestaltenden Prozesse

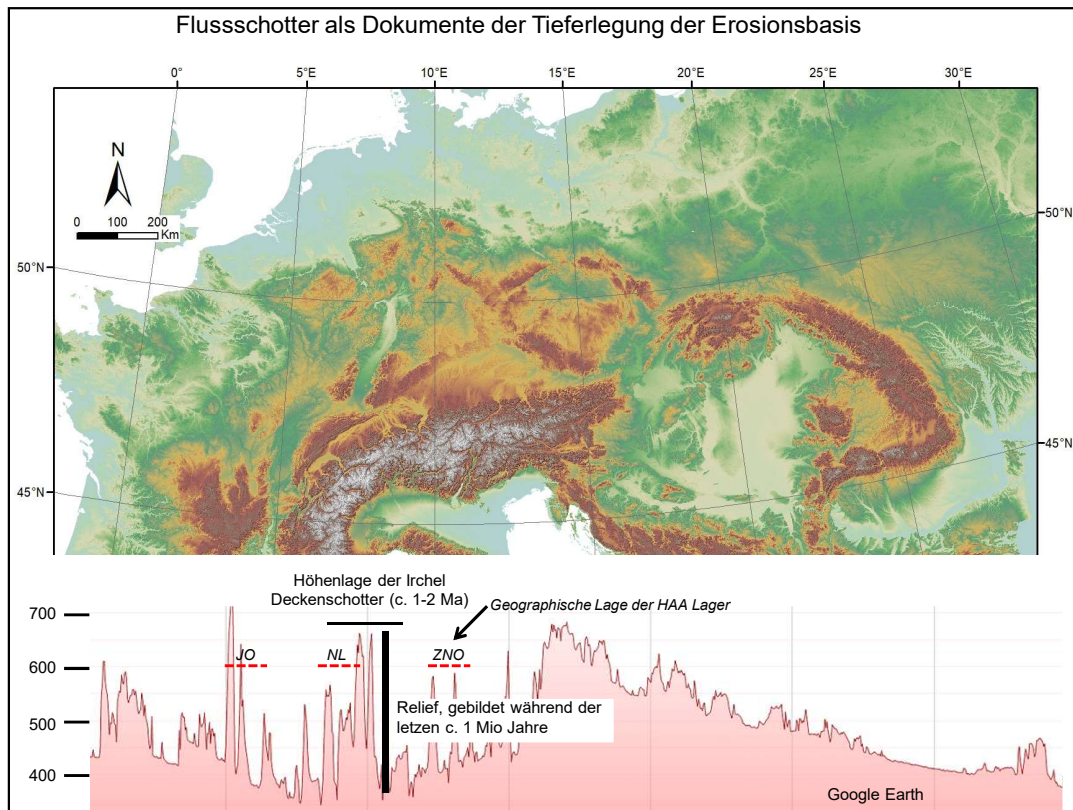
Die Entwicklung der alpinen Landschaft ist weitgehend von der erosiven Tätigkeit der Gletscher geprägt.

Die klimatische Zyklizität änderte sich vor c. 1 Million Jahr vor heute; dies führte zu erosiven Talgletschern

Die morphologischen Änderungen im schweizerischen Mittelland waren voraussichtlich um c. 1 Million Jahre vor heute am grössten, und ihre Ursachen können auf die mittelpleistozäne Reorganisation des Klimas zurückgeführt werden.

Die letzten bedeutenden Veränderungen in der Landschaftsgeschichte der NW Schweiz fanden wahrscheinlich vor c. 1 Million Jahre vor heute statt und hatten eine klimatische Ursache





Die Geschichte der Absenkung der Erosionsbasis als Folge eines verkürzten Fliesspfades kann rekonstruiert werden, falls Informationen über die Höhenlage des Rheins während der letzten Million Jahre vorliegen. Idealerweise verwendet man dazu Flussschotter, bestimmt deren Herkunft und das Alter und kann so die Absenkung der Flusssohle des Rheins rekonstruieren.



Flussschotter als Dokumente der Tieferlegung der Erosionsbasis



Die grossen Flüsse wie zum Beispiel die Aare, die Thur oder auch der Rhein führen cm-grosse Gerölle unterschiedlicher Herkunft aus den Alpen. Diese Sedimentfracht lagert sich in Form von Kiesbänken ab und hinterlässt geologische Archive. Diese Kiesbänke zeichnen damit auch die Höhenlage der Erosionsbasis auf. Verbacken nun diese Kiesbänke, dann werden sie zum Gestein und damit zu Schotterablagerungen, wie wir sie in vielen Kiesgruben beobachten können.



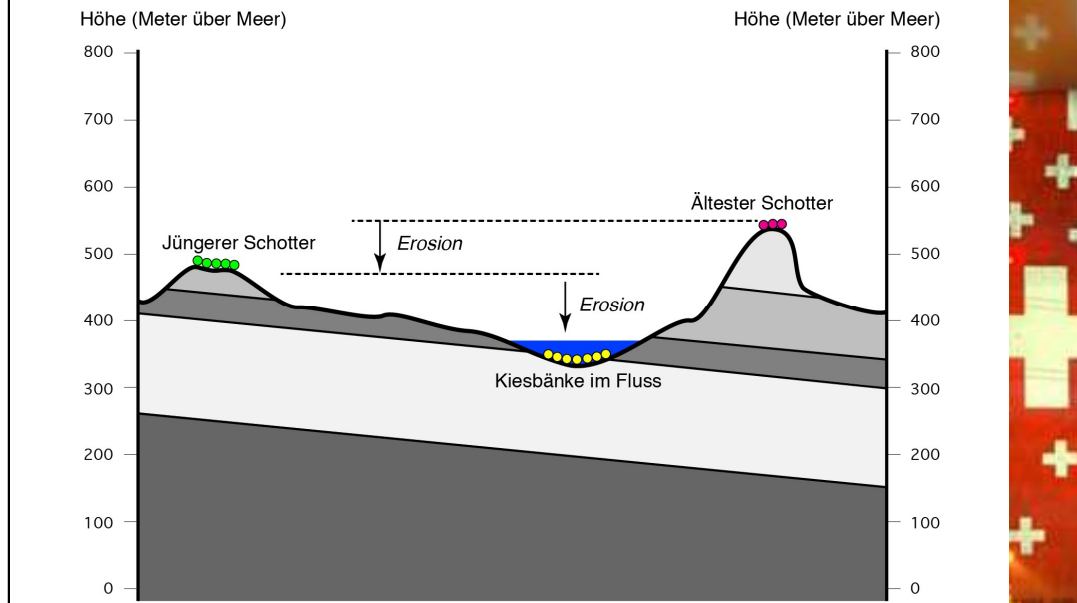
Flussschotter als Dokumente der Tieferlegung der Erosionsbasis



Etwa in dieser Form präsentieren sich die Flussschotter. Es handelt sich um Kiesablagerungen auf unterschiedlichen Höhen. Schotter, die durch den Rhein in die NW Schweiz transportiert wurden, sollten Leitgerölle aufweisen, welche für die Geologie Graubündens charakteristisch sind. Dabei handelt es sich insbesondere um Ophiolitgerölle, welche aus der Platte Decke stammen.



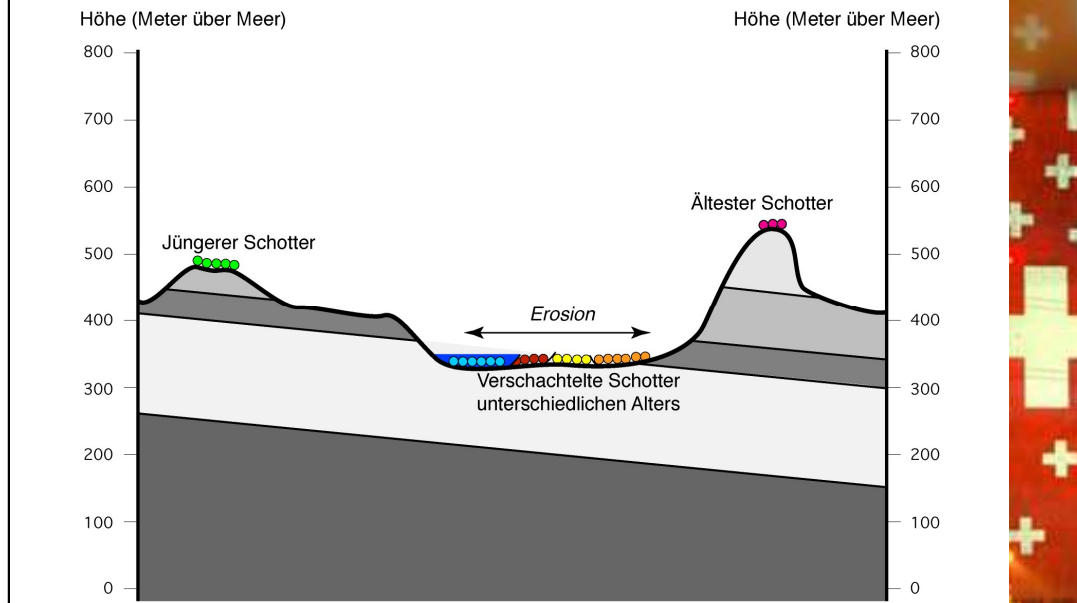
Flussschotter als Dokumente der Tieferlegung der Erosionsbasis



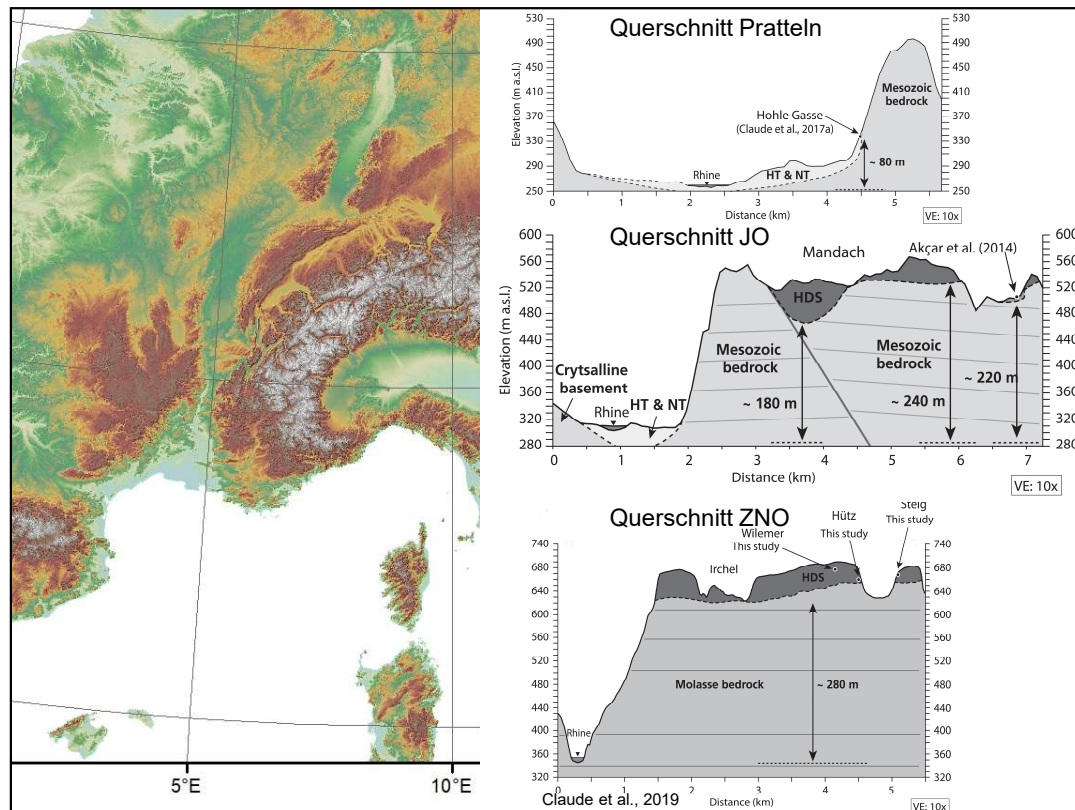
Tieft ein Fluss sich in den Untergrund ein, dann hinterlässt er eine V-förmige Landschaft und Spuren in Form von Schotterablagerungen. Diese dokumentieren damit die Lage der Erosionsbasis, also die Lage des Flusses in der geologischen Vergangenheit. Dabei sind die höchsten Schotterablagerungen in der Regel am ältesten, und jüngere Schotterkörper liegen in sukzessiv tieferen Lagen. Kennen wir nun die Alter von solchen Schotterablagerungen, dann kann die Vertiefung der Erosionsbasis in der geologischen Vergangenheit bestimmt werden.



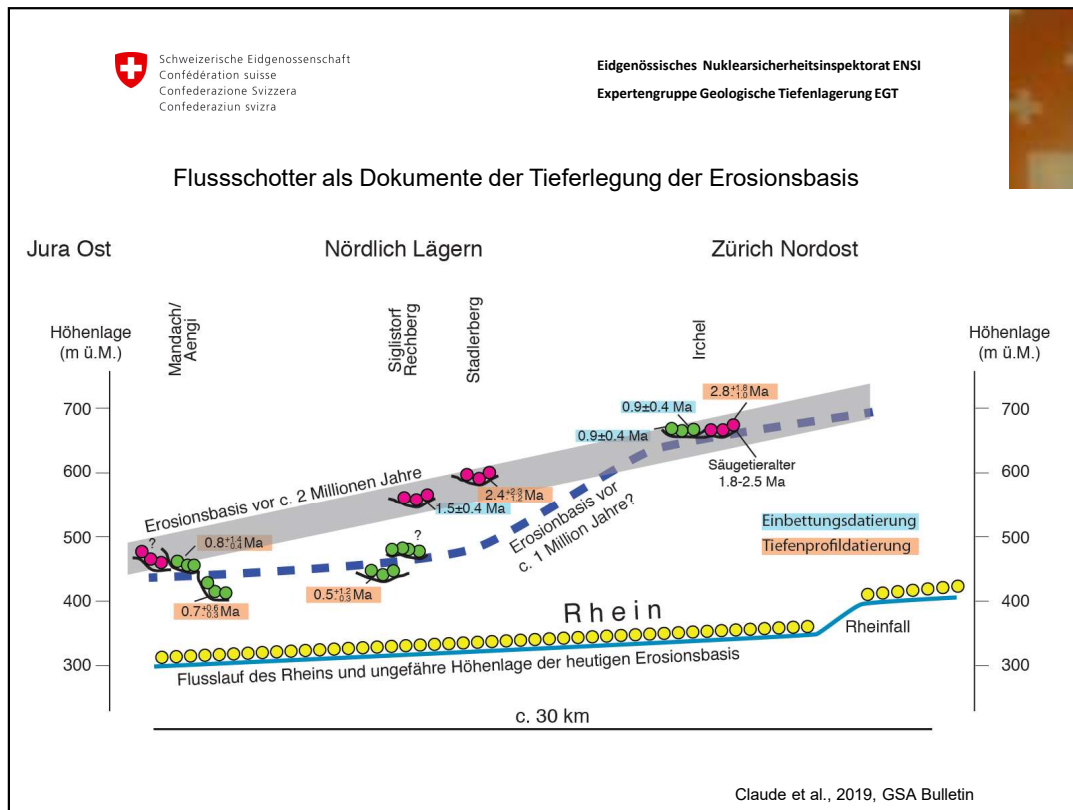
Flussschotter als Dokumente der Tieferlegung der Erosionsbasis



Ist die Eintiefung weitgehend abgeschlossen, dann überträgt der Fluss seine Energie, wir nennen sie auch 'Stream Power', in Seitenerosion. Die Talsohle verbreitert sich, und es entsteht eine Talebene. Diese ist deutlich breiter als der Rinnengürtel des Flusses. Bei der seitlichen Verlagerung entstehen verschachtelte Flussschotter; diese haben die gleichen Höhenlage, aber unterschiedliche Alter.

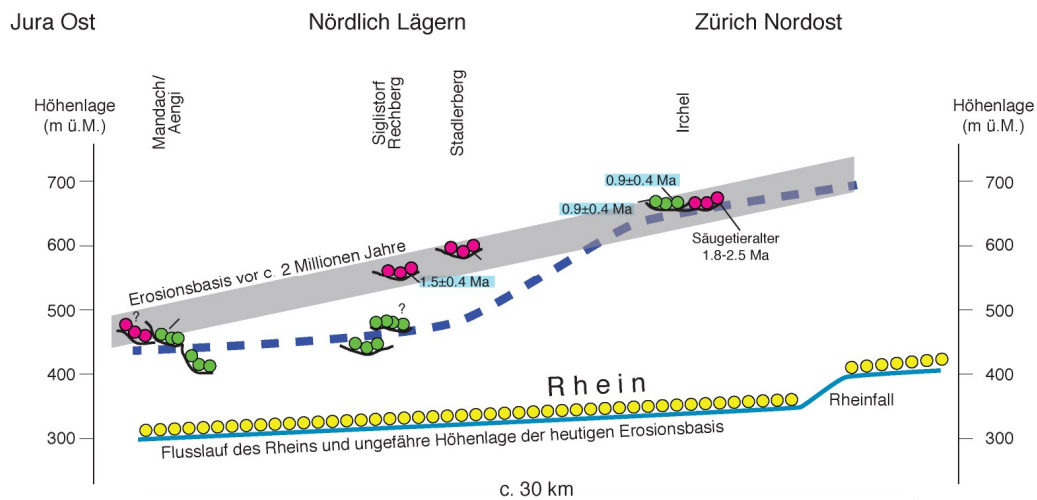


Die Abbildung zeigt drei topographische Querschnitte durch das Rheintal. Bei Pratteln ist das Rheintal sehr breit ausgebildet. Im natürlichen Zustand hätte der Rhein genügend Platz, um sich seitlich frei bewegen zu können. Dort scheint die laterale Verbreiterung der Talsole wichtiger zu sein als eine weitere Vertiefung der Erosionsbasis. Flussaufwärts gegen die HAA-Standortgebiete JO, NL und ZNO und insbesondere auch gegen den Rheinflall wird die Talsole immer schmäler. In diesen Abschnitten und insbesondere flussaufwärts von Koblenz scheint also die Tieferlegung der Erosionsbasis noch voranzuschreiten.



Im Rahmen einer Pilotstudie an unserem Institut, welche freundlicherweise vom ENSI finanziert wurde, versuchten wir, die Höhenlage derartiger Schotterarchive zu bestimmen (bezogen auf den Verlauf des Rheins), und wir führten auch erste Datierungen mit Hilfe kosmogener Nuklide durch. Dabei testeten wir die Methode der Tiefenprofilatierung und der Einbettungsdatierung. Bei der Einbettungsdatierung bestand die technische Herausforderung darin, die sehr geringen ^{26}Al Konzentrationen messen zu können. Bei der Tiefenprofilatierung war die Auswertung der ^{10}Be Konzentrationen mit grossen Unsicherheiten behaftet. Die Resultate zeigen nun, dass die Einbettungsdatierung akzeptable Resultate ergeben, dass aber die Altersangaben aus der Tiefenprofilatierung nicht brauchbar sind.

Flussschotter als Dokumente der Tieferlegung der Erosionsbasis



Claude et al., 2019, GSA Bulletin

Somit haben wir erst drei Alter, welche brauchbar sind. Nehmen wir die Säugetierdatierung noch dazu, dann ergeben sich insgesamt vier Alter und weitere Schotterarchive, die noch zu datieren sind. Zur Zeit scheint die Einbettungsdatierung mit Hilfe der kosmogenen Nuklide ^{26}Al und ^{10}Be die einzige Möglichkeit zu sein, um die verschiedenen Schotterarchive altersmässig zu erfassen. Die Untersuchungen sind noch am Laufen, und in einem Jahr sollten wir mehr wissen. Ich bin sehr zuversichtlich, dass wir die Absenkungsgeschichte der Erosionsbasis für die NW Schweiz werden rekonstruieren können und basierend darauf eine verlässliche Aussage über die Entwicklung für die nächste Million Jahre werden machen können.



Entwicklung der Erosionsbasis

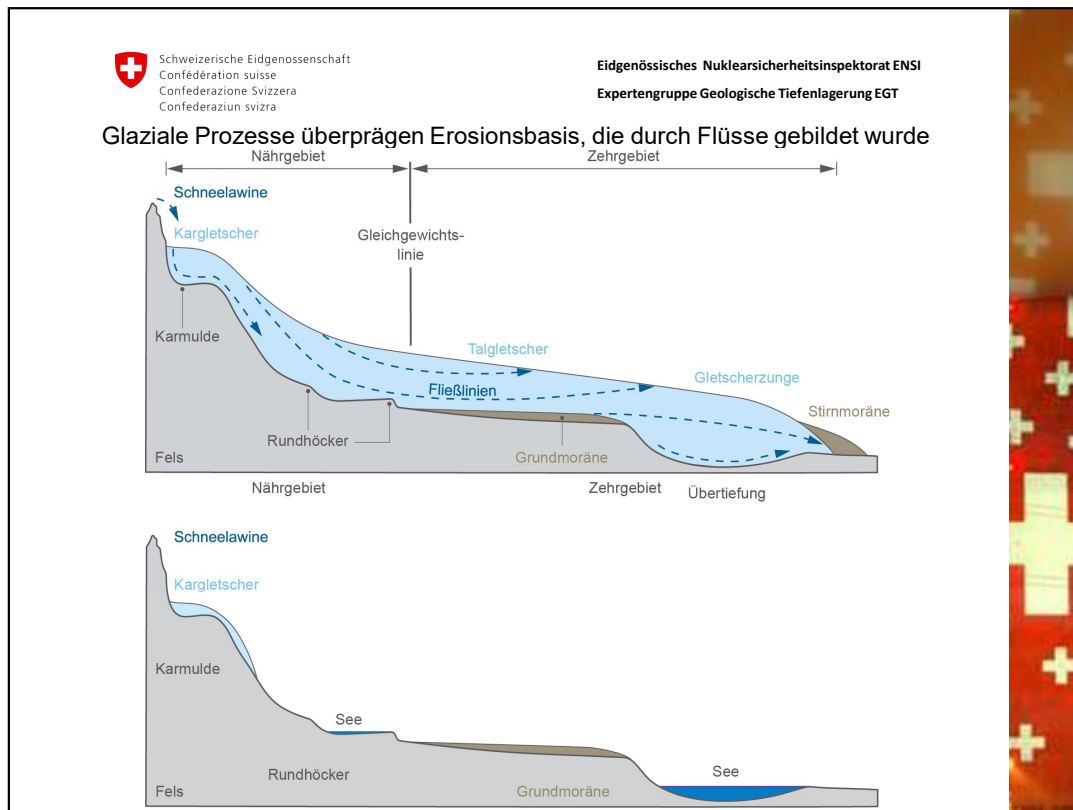
Schotterarchive dokumentieren die Entwicklung der Erosionsbasis.

In der NW Schweiz liegen zahlreiche Schotterarchive vor; mit Hilfe kosmogener Nuklide (Einbettungsdatierung) lassen sich diese datieren.

Im Bereich des HAA-Lagers JO scheint die **Hauptphase** der Tieferlegung der Erosionsbasis weitgehend abgeschlossen zu sein; im Bereich des HAA-Lagers ZNO schreitet die Erosion weiter in die Tiefe.

Für den Zeitraum von einer Million Jahr ist eine verlässliche Prognose über die Tieferlegung der Erosionsbasis möglich; die zahlreichen Schotterarchive müssen noch datiert werden.





Modellierungen, bei denen Gletscherwachstum und Gletschererosion gekoppelt sind, deuten darauf hin, dass die Eismassen nach der Mittelpleistozänen Reorganisation der Klimazyklizität erosiver und dicker wurden und offenbar die Talsohlen weiter abteuften. Damit verbunden ist eine Versteilung des Talwegs gegen das Nährgebiet hin (starke rückschreitende Erosion), eine Verflachung des Talwegs im Zehrgebiet und die Bildung von Übertiefungen. Die Ursachen, wieso es zu diesen Übertiefungen kommt, ist ungeklärt, ebenso fehlen verlässliche und präzise Angaben über die Alter dieser Übertiefungen.

Weitgehend unbestritten ist aber das Modell, wonach Vergletscherungen zur Erosion und Tieferlegung der Erosionsbasis insbesondere im Nährgebiet führen, dass aber im Zehrgebiet und damit im Flachland das erodierte Material in Form von Moränen und Schotter abgelagert wird. Damit wird während einer Vergletscherung die Wahrscheinlichkeit gering, dass im Vorland die Erosionsbasis weiter vertieft wird. Talgletscher scheinen offenbar das Vorland vor Erosion zu schützen (mit Ausnahme der Bildung von Übertiefungen). Während Warmzeiten erfolgt dann die weitere Absenkung der Erosionsbasis.



Glaziale Prozesse überprägen durch Flüsse gebildete Erosionsbasis

On the morphological characteristics of overdeepenings in high-mountain glacier beds

Wilfried Haeberli,^{1*} Andreas Linsbauer,^{1,2} Alejo Cochachin,³ Cesar Salazar³ and Urs H. Fischer⁴

¹ Geography Department, University of Zurich, Zurich, Switzerland

² Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

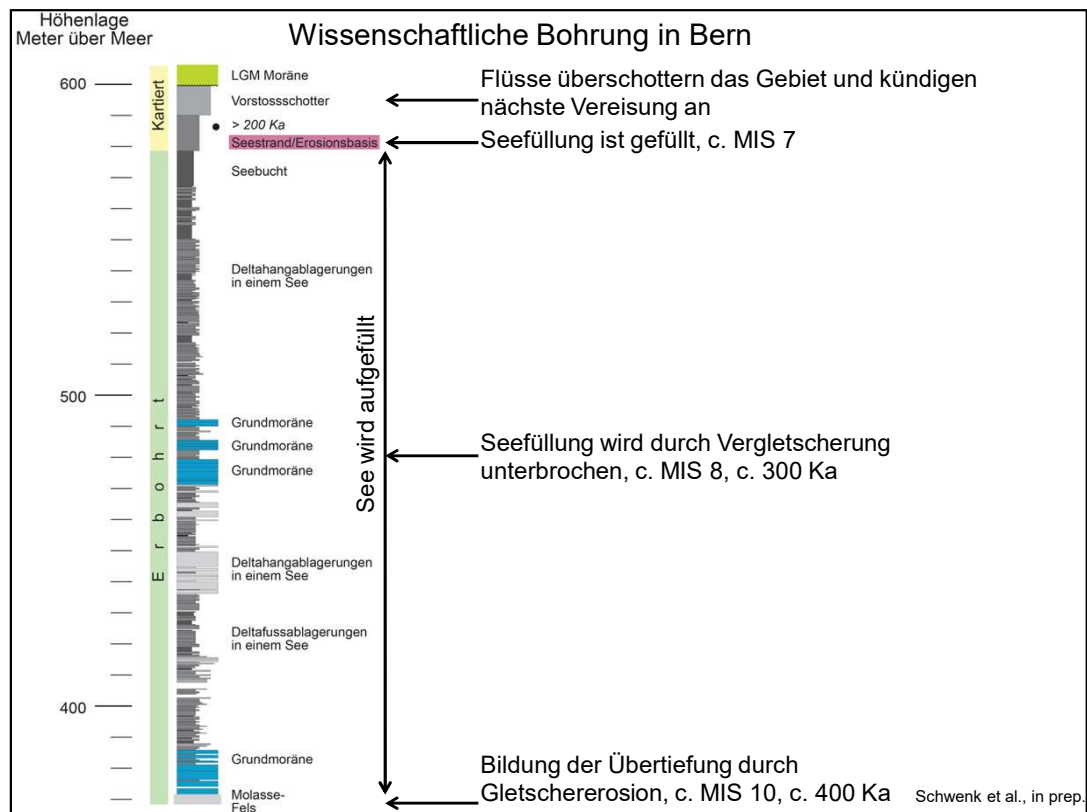
³ Glaciology and Water Resources Unit, Huaraz, Peru

⁴ National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Nagra, Wettingen, Switzerland

ABSTRACT: Overdeepenings, i.e. closed topographic depressions with adverse slopes in the direction of flow, are characteristic for glacier beds and glacially sculpted landscapes. Quantitative information about their morphological characteristics, however, has so far hardly been available. The present study provides such information by combining the analysis of (a) numerous bed overdeepenings below still existing glaciers of the Swiss Alps and the Himalaya-Karakoram region modelled with a robust shear stress approximation and (b) detailed bathymetries from recently exposed lakes in the Peruvian Andes. The investigated overdeepenings exist where glacier surface slopes are low ($< 5^{\circ}$ – 10°), occur in bedrock or morainic material and are most commonly a fraction of a kilometre squared in surface area, hundreds of metres long, about half the length in width and tens of metres deep. They form under conditions of low to high basal shear stresses, at cirque, confluence, trunk valley and terminus positions. The most striking phenomenon, however, is the high variability of their geometries: Depths, surface areas, lengths and widths of the overdeepenings vary over orders of magnitude and are only weakly – if at all – interrelated. Inclinations of adverse slopes do not differ significantly from those of forward slopes and are in many cases higher than so far assumed theoretical limits for supercooling of ascending water and corresponding closure of sub-glacial channels. Such steep adverse slopes are a robust observation and in support of recently developed new concepts concerning the question about where supercooling of sub-glacial water and closure of ice channels can or must occur. However, the question of when and under what climatic, topographic and ice conditions the overdeepenings had formed remains unanswered. This open question constitutes a key problem concerning the interpretation of observed overdeepenings, the understanding of the involved glacio-hydraulic processes and the possibility of realistic predictive modelling of overdeepening formation. Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Ltd.

Häberli et al., 2016

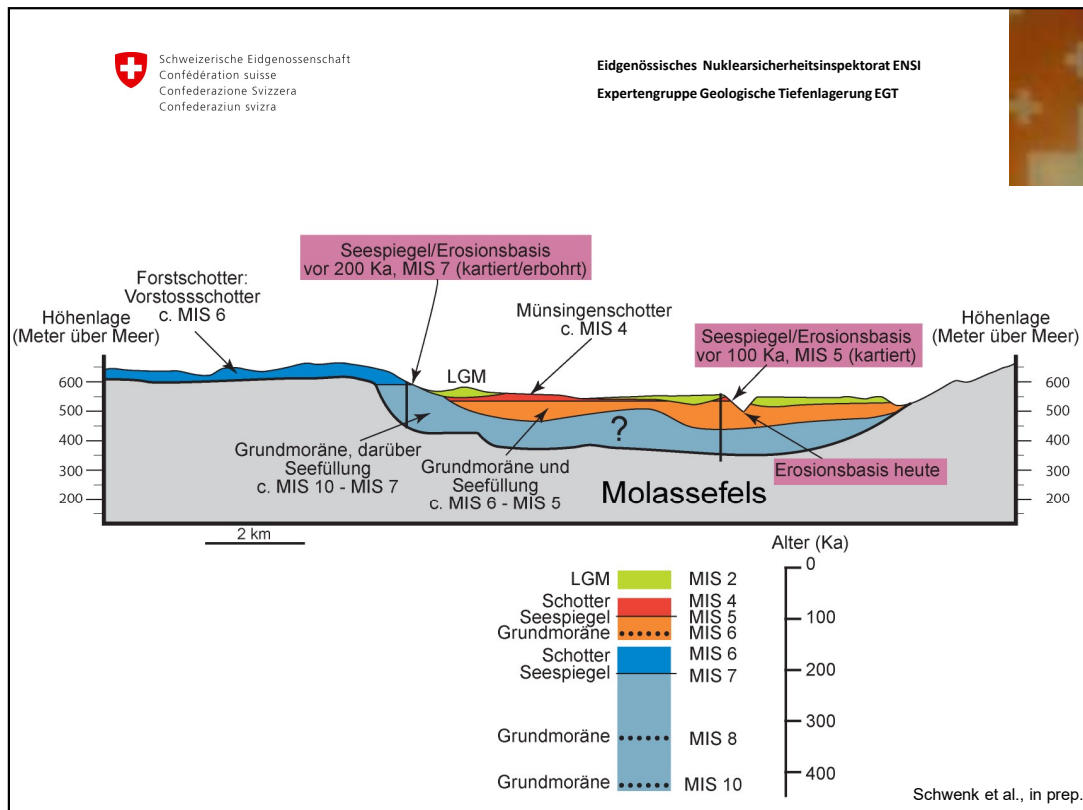
In einer umfangreichen Studie kamen Häberli und Mitarbeiter zum Schluss, dass eine generelle Aussage über die Ursachen und Mechanismen, die zur Bildung von Übertiefungen führen, nicht gemacht werden kann.



Die wissenschaftliche Bohrung, die wir im Raum Bern abgeteufelt haben, erfasste die geologischen Dokumente von 2 Vereisungen. Die Sedimente im Dach der Bohrung konnte mit Aufschlüssen korreliert werden.

Als Herausforderung erweist sich die Datierung: Das OSL Signal in Quarz ist bereits gesättigt, und damit kann lediglich ein Minimalalter für die jüngsten Sedimente abgeleitet werden. Dieses liess sich aber durch Korrelation mit einer analogen Abfolge weiter nördlich (Bohrung Meikirch) bestätigen. Die darunterliegenden Sedimente weisen viele quarzhaltige Sande auf, aber die zu erwartenden ^{10}Be und insbesondere ^{26}Al Konzentrationen werden sehr klein sein, so dass ein mögliches Alter mit grossen Fehlern behaftet sein wird.

Interessanterweise schliesst die erbohrte Sequenz eine Füllung eines durch Übertiefung gebildeten Sees auf. Die kontinuierlich nach oben flacher werdende See-Sequenz wird lediglich durch eine Grundmoräne – Zeuge einer weiteren Vergletscherung – unterbrochen. Über den Seestrand-Sedimenten folgen mächtige fluviatile Schotter – die Forstschotter – welche bereits das Vorrücken der alpinen Gletscher und damit die nächste Vereisung ankündigen. Diese Strandsedimente können folglich benützt werden, um die Lage der Erosionsbasis für diese Zeit, d.h. c. 200'000 Jahre vor heute, zu bestimmen.



Vorläufige Resultate aus der Region Bern zeigen, dass die Füllung der Übertiefungen aus mindestens 2 solcher Seesequenzen besteht. Diese beginnen jeweils mit einer Moräne, darüber folgen Seesedimente und schliesslich eine Seestrandablagerung. Diese werden schliesslich mit Schotter überdeckt. Wir haben also Sequenzen vorliegen, die ein Ausräumen und ein Auffüllen dokumentieren.

Betrachten wir nun die Strandsedimente als Erosionsbasis während einer Warmzeit (MIS 7, MIS 5), und ordnen wir die Sedimente nach diesen Warmzeitaufzeichnungen ein, dann lässt sich einigermaßen eine Struktur in der komplexen Architektur erkennen, in diesem Falle mindestens zwei Zyklen von Ausräumen, Füllen, Nivellieren auf Seestrandniveau und Überfüllen/Abdecken mit Flussablagerungen. Mit einem derartigen Konzept sollte es möglich sein, die sedimentäre Füllung der Übertiefungen einigermaßen einordnen zu können.



Glaziale Übertiefungen

Die quartären Übertiefungen wurden wahrscheinlich durch Gletschererosion gebildet (Grundmoräne als basale Schicht).

Konzepte und Modelle, wie Gletscher solche Übertiefungen bilden können, gibt es noch nicht. Fortschritte im Erkenntnisgewinn sind keine in Sicht.

Die sedimentologische Füllung der Übertiefungen ist schwierig zu datieren, da die zu erwartenden Alter in einem Bereich liegen, in welchem die Anwendung der Methoden an Grenzen stösst.

Im lokalen Massstab können die Sedimente rund um die Übertiefungen lediglich qualitativ miteinander korreliert werden.

Eine quantitative Prognose über weitere Vertiefungen scheint nicht möglich.





Implikationen für die Bestimmung der minimalen Tiefenlage für ein SMA- und ein HAA-Lager

Eine Prognose über die minimale Tiefenlage der HAA- und SMA-Lager hinsichtlich weiterer Vertiefung der Erosionsbasis scheint realistisch.

Eine Prognose über eine weitere Fels-Übertiefung im Mittelland durch Gletscher scheint mir zur Zeit nicht möglich – Lösungen zu besserem Prozessverständnis sind nicht in Sicht.

Hinsichtlich Prognostizierbarkeit über zukünftige Erosion scheint mir der Standort JO unter Berücksichtigung des jetzigen Kenntnisstandes am günstigsten zu sein.

