

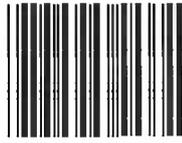


Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI  
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN  
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN  
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

5232 Villigen-ENSI  
Tel.: 056 / 310 38 11  
Fax: 056 / 310 39 07

RES



AN-Nummer

**ENSI 33/019**  
**Rev. 1**

Datum

7. April 2009

Aktenzeichen

33KGX.SGTE1

Typ/Charakter

Bericht

Klassifikation

öffentlich

Bearbeiter

J. Kuhlemann / VOB

Visum

Sachbearbeiter: KUJ *KUJ*

Vorgesetzter: RAM *RAM*

Projekt, Thema, Gegenstand (Schlagwörter)

Sachplan geologische Tiefenlager, glaziale Tiefenerosion

Seiten

5

Beilagen

4

Zeichnungen

## Kolloquium von KNE und ENSI zum Thema glaziale Tiefenerosion, ETH Zürich, 21. Januar 2009

**Datum, Zeit:**

21. Januar 2009, 9:00 – 17:10 Uhr,

**Ort:**

ETH Zürich, CAB, Hörsaal G11

**Teilnehmende:**

ca. 120 Fachkolleginnen und -kollegen aus Geologie und nahe verwandten Disziplinen, Pressevertreter

KNE:

S. Löw, A. Isler, R. Kipfer

ENSI:

F. Altorfer, E. Frank, M. Herfort, M. Hugli, J. Kuhlemann, A.-K. Leuz, M. Rahn, M. Sentis

**Beilagen:**

- Programm der Veranstaltung
- Abstracts der Vortragenden
- Liste aufgeschalteter Vorträge bzw. Dokumente
- Email-Liste beteiligter und kooperierender Wissenschaftler

**Anlass:** Im Rahmen der Überprüfung der Vorschläge der Nagra für geeignete Standortgebiete geologischer Tiefenlager befassen sich das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) und die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) mit Fragen der Ursachen und den möglichen Auswirkungen glazialer Tiefenerosion auf die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers.

**Fragestellung:** Wie, wo und warum leistet ein Gletscher Tiefenerosion? Wann entstanden die übertieften Talrinnen im Molassefels? Geht die Vorstossweite der Vorlandgletscher systematisch zurück? Wie wurden die übertieften Täler wieder gefüllt? Welche Informationen liefert uns das Archiv „Talfüllungen“, welche Szenarien lassen sich daraus für die Zukunft ableiten? Wie belastbar sind Modelle von Kohlenstoffzyklen, die eine verlängerte künstliche Warmzeit postulieren?

**Ziel:** Das Kolloquium sollte einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zur quartären Entwicklungsgeschichte glazial übertiefter Felsrinnen im Alpenvorland geben, das Prozessverständnis beleuchten und den Forschungsbedarf mit Blick auf geologische und klimatische Langzeitprognosen diskutieren.

Der nachfolgende Bericht umfasst eine thematische Einführung, einen Abriss der Vorträge und eine Zusammenfassung der anschliessenden Plenumsdiskussion.

Verteiler:

KNE: S. Löw, A. Isler, R. Kipfer

KNS: O. Fischer

BFE: M. Jost

ENSI: WAH, THS, STM, MAO, MAR, GEL, Sekretariat ENSI, Archiv



## 1 Einführung

Die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz ist seit der Präsentation möglicher Standortgebiete Ende 2008 ein in Öffentlichkeit und Fachwelt viel diskutiertes Thema. In den zahlreichen öffentlichen Info-Veranstaltungen wurde wiederholt die Frage aufgeworfen, ob Sicherheits-Prognosen für eine Million Jahre überhaupt möglich sind. Dazu relevante Aspekte betreffen die zukünftige Klimaentwicklung und die Gefährdungen für einen Lagerstandort durch "glaziale Tiefenerosion". Letztgenannter Fachbegriff zielt auf die Bildung tiefer Rinnen unter dem Eis von Vorlandgletschern, die in den letzten 2.5 Millionen Jahren (d.h. in der geologischen Zeitperiode des Quartärs) ca. 20-mal das Schweizer Mittelland teilweise oder weitgehend unter viele hundert Meter dickem Gletschereis begraben haben. Unter dem Bodensee liegt beispielsweise heute der feste Felsgrund als Folge der Ausschürfung durch Gletscher tiefer als der Meeresspiegel. Die Frage, wann, wie oft und wo zukünftige Gletscher solche tiefen Rinnen ausschürfen könnten, ist daher für die sichere Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle von grosser Bedeutung.

Zur Darstellung des heutigen Kenntnisstandes und der Klärung offener Fragen wurde am 21. Januar 2009 auf Einladung der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) und des neu gegründeten Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI (als Nachfolgeorganisation der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK) an der ETH Zürich ein öffentliches Kolloquium zum Thema "Glaziale Tiefenerosion" abgehalten. Die führenden Experten der Schweiz und ein Modellier-Spezialist vom Geoforschungszentrum Potsdam präsentierten den aktuellen Stand des Wissens. Der folgende Abriss der Beiträge und der Diskussionen fasst die aus Sicht des ENSI wichtigen Aspekte und Erkenntnisse zusammen.

## 2 Thematischer Abriss

Heute sind die Eiszeit-auslösenden Mechanismen grundsätzlich bekannt. Vorausberechenbare Schwankungen der Erdbahn führen zu einer periodisch wiederkehrenden Veränderung der Sonneneinstrahlung. Weniger klar ist die Steuerung der Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre, die offenbar das globale Eisvolumen steuert. Durch komplexe Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, den Eisansammlungen an Land und dem Weltozean werden kritische Schwellenwerte über- oder unterschritten und das Klima kippt in einen anderen Zustand wie zum Beispiel eine Eis- bzw. Kaltzeit. Weniger bekannt ist die Instabilität der Kaltzeiten, die durch veränderte Meeresströmungen in der quartären Vergangenheit ein Umspringen zwischen mässig kühlem und extrem kaltem Klima zeigten, das sich innerhalb weniger Zehner Jahre vollzog. Längere, etliche tausend Jahre anhaltende eiskalte Klimaphasen wurden in Europa durch den Ausstrom von Schmelzwasser aus Nordamerika ausgelöst, die den Golfstrom unterdrückten bzw. überschichteten.

Die Langzeitstabilität der Nordschweiz wird u.a. durch Hebung und Erosion bestimmt. Die Hebungsraten waren über die letzten 10 Millionen Jahre recht stabil zwischen 0,1 und 0,2 mm pro Jahr (Müller et al. 2002) und damit ähnlich oder etwas geringer als die Hebungsraten, die sich aus Feinnivellements ergeben (Nagra 2008). Eine Bewertung glazialer Tiefenerosion basiert zunächst auf einer räumlichen Rekonstruktion der übertiefen Rinnen. Die Rinnenbildung im Alpenvorland wird zumeist durch unter starkem Druck stehendes Schmelzwasser und darin transportiertem Geröll erklärt. Diskussionen gibt es weiterhin über die genauen Faktoren, die das Ausmass der Erosionsgeschwindigkeit in den Rinnen steuern bzw. potentiell zukünftig steuern könnten. Deren Form bzw. Querschnitt ist stark von der Erosionsbeständigkeit des Gesteinsuntergrundes abhängig. Bei hohem Druck des Schmelzwassers unter mächtigem Eis können besonders tiefe Rinnen ausgespült werden, die um so schmaler sein können, je härter und zäher das Gestein im Untergrund ist (z.B. schmale Rinnen in Kalk). Je näher die Rinnen an den Alpen liegen, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie wiederholt ausgeschürft und weiter ver-



tieft worden sind. Das gilt besonders für die Rinnen mit Seen am Alpenrand, wo Gletscher mit erheblicher Eisdicke auf weiche Permafrost-freie Ablagerungen treffen und diese ausschürfen. Übertiefte Rinnen in grösserem Abstand zu den Alpen weisen in der Regel eine mächtige Sedimentverfüllung kaum bekannten Alters auf.

Die tiefen Rinnen im nördlichen Schweizer Mittelland wurden vermutlich im Mittel-Pleistozän (ab 0,78 Ma), vor der letzten Vereisung gebildet. Intensiv diskutiert wurde und wird aber die Frage, welche der grossen Gletschervorstösse die Rinnen weiter vertieft haben und welches Ausmass die Eintiefung in das Festgestein des Untergrundes jeweils hatte. Für eine Mehrphasigkeit spricht, dass in einzelnen Gebieten scheinbar ältere Rinnen quer zum vorherrschenden Muster verlaufen. Andererseits beobachtet man in flachem Gelände gelegentlich eine Aufspaltung von Gletschern in zwei Äste (Bifurkation), die es bei Flüssen kaum gibt. Generell halten sich vorstossende Gletscher aber meist an die vorgeprägten Täler und die Auslasspforten aus den Alpen sind generell ortsfest. Hat sich die Übertiefung im Felsuntergrund mehrfach wiederholt, könnte das prinzipiell auch in der Zukunft passieren. Hätte eine frühe Haupteintiefung das Rinnenmuster entscheidend geprägt, dann müssten die Rinnen mit jüngeren Ablagerungen aus etlichen jüngeren Eiszeitzyklen verfüllt sein. Etliche Rinnen enthalten, nachgewiesen durch Schnittverhältnisse, randlich und in geringer Tiefe ältere Sedimente derzeit unbekanntes Alters. Diese unbekanntes Zeitverhältnisse sollen durch Altersdatierungen geklärt werden, nachdem bereits Ablagerungen von vor 220'000 Jahren datiert sind und solche von 320'000 oder 400'000 Jahren vor heute aufgrund von Pflanzenresten zeitlich ungefähr eingegrenzt werden können. Wenn die Rinnenbildung im schweizerischen Molassebecken ein einmaliges Ereignis war, was derzeit nicht beurteilt werden kann, dann könnte das mit zunehmender Trockenheit zu tun haben (speziell im Mittelland oder überregional), oder auch mit veränderten Zirkulationsmustern in der Atmosphäre. Solche grundlegenden Fragen können nur längerfristig unter anderem mit dem Einsatz von Klimamodellierungen gelöst werden.

Es existieren verschiedene Typen von Klimamodellen, die entsprechend der Fragestellung in Betracht kommen. Globale Klimamodelle mit hoher regionaler Auflösung sind geeignet, um einen mit Daten gut belegten kurzen Zeitabschnitt zu simulieren. Falls ein solches Modell die heutige Zeit und zum Beispiel den Höhepunkt der letzten Eiszeit gut darstellen kann, dann steigt die Chance für eine brauchbare Prognose des zukünftigen Klimas. Recht unzuverlässig sind derartige Modelle in Bezug auf Niederschlag. Das grundsätzliche Problem dieser Modelle ist, dass sie durchschnittliche Klimawerte abbilden, die wenig über die Funktionsweise des Klimas verraten. Gerade bei Gletscherbildung spielen seltene, aber extreme Wetterereignisse eine wichtige Rolle, die im Durchschnitt etlicher Modell-Jahre nicht sichtbar werden. Die Funktionsweise des Klimas kann man für die letzten 130 Jahre gut nachvollziehen, da hinreichend viele meteorologische Messpunkte vorliegen. Leider ist dieser Zeitraum bereits stark von anthropogenen Prozessen beeinflusst. Anhand von diversen historischen Archiven kann das wechselhafte Klima der letzten 500 Jahre in Europa recht gut rekonstruiert werden, am besten in Mitteleuropa. Damit kann z.B. die Funktionsweise des Klimas in der „Kleinen Eiszeit“ (14.-19. Jahrhundert) gut verstanden werden.

Mit Hilfe dieser Erkenntnisse lassen sich Klimaänderungen und Prozesse der letzten 2.5 Millionen Jahre besser eingrenzen. Derzeit umstritten ist der Grund für die unterschiedliche Höhenlage kaltzeitlicher Schotter- und Moränenkomplexe im Mittelland und am Hochrhein, die aus 3 Gruppen mit jeweils etwa 100 m Höhenunterschied bestehen. Eine Hypothese interpretiert die Geometrie als Ablagerung neben dem Gletschereis, die andere als grossflächige Ablagerung, unterbrochen durch Phasen der Erosion oder ein „morphotektonisches Ereignis“. Die „Höheren Deckenschotter“ liegen rund 200 m über dem heutigen Flussnetz bzw. dem Hoch- und Niederterrassen-Komplex, die „Tieferen Deckenschotter“ dazwischen. Möglicherweise liegt zwischen der Ablagerungszeit der „Höheren“ und „Tieferen“ Deckenschotter eine grosse zeitliche Lücke, in der



sich der Hochrhein um ca. 100 m einschneiden konnte. Die Eintiefung nach der Ablagerung der „Tieferen Deckenschotter“ steht möglicherweise im Zusammenhang mit der Rinneneintiefung in der „Grössten Eiszeit“, während der auch die grösste Eismächtigkeit im distalen Vorland existierte. Dadurch bewirkte der potentiell höchste Schmelzwasserdruck auch die effektivste Einschneidung. Danach hielten sich Sedimentablagerung und Einschneidung von Flüssen in einem Alpen-parallelen Streifen zwischen Hochrhein und Zürich grob die Waage. In lang anhaltenden Warmzeiten konnte der Hochrhein allerdings durch die Schotter der letzten Eiszeit bis in das Felsbett herunter einschneiden. Die Einschneidungsrate der grossen Flüsse ist in dieser Zone um eine Grössenordnung geringer als in den Alpen. Die Abtragung konzentriert sich generell auf die Täler mit der Folge, dass die auf dem schweren Erdmantel „schwimmende“, verdickte und leichtere Erdkruste der Alpen gehoben wird, wie ein Eisberg im Wasser das durch Abtragung verlorene Gewicht teilweise ausgleicht. Da die Abtragung der Berggipfel und Grate geringer ist, werden diese absolut gesehen höher und das Relief wird steiler, was wiederum Bergstürze nach sich zieht. Die aktuellen Hebungsraten in den Alpen werden derzeit durch den Ausgleich des verschwundenen Gewichts des geschmolzenen Eises erhöht. Es ist umstritten, zu welchen Teilen sich dieser Abschmelzeffekt auf die „Kleine Eiszeit“ und das Letzte Glaziale Maximum“ vor 20.000 Jahren bezieht.

Die Veränderung der Grundwasserströme in Kaltzeiten könnte die Sicherheit eines Tiefenlagers für radioaktive Abfälle beeinflussen, weil unter Druck in den Felsuntergrund eingepresstes und schnell fliessendes Grundwasser Sauerstoff enthält, der das geochemische Milieu im Lagerbereich verändern und z.B. die Lagerbehälter korrosiv angreifen würde. Ein Grundwassermodell für das Grundgebirge Kanadas zeigt, dass in wenigen hundert Metern Tiefe die Strömungsgeschwindigkeiten hundertfach erhöht sein können, wobei die Geschwindigkeit in der Tiefe schnell abnimmt. Das gilt aber nur für Gesteine erhöhter Durchlässigkeit, die auch im Schweizer Mittelland mit Eiszeitwasser geflutet wurden, während wenig durchlässige Gesteine nur randlich (Ober- und Unterkante) beeinflusst werden. Die Lage und Dicke des Permafrostgürtels, der jeden Eisschild in Kaltzeiten umgeben hat, spielt für die Grundwasserströme neben der Eisdicke und der hydraulischen Durchlässigkeit der Unterlage eine zentrale Rolle.

Eine weitgehend unbekanntes Klimamodellierung hat vor 3 Jahren erstmals den Hinweis geliefert, dass der von der Menschheit erzeugte Treibhaus-Effekt den natürlichen Eiszeitzyklus für viele hunderttausend Jahre unterbrechen bzw. sehr stark abmildern könnte, wenn die Menschheit die Emission der Treibhausgase nicht schnell und nachhaltig reduziert. Allgemein herrscht die Ansicht vor, dass das Erdsystem das Treibhausgas Kohlendioxid binnen einiger zehntausend Jahre auf natürliche Weise verarbeiten und in den Ozeanen binden kann. Nach dieser Lehrmeinung hätten wir in etwa 60'000 Jahren den Höhepunkt einer sehr moderaten und in etwa 100'000 Jahren den Höhepunkt einer mittelgrossen Kaltzeit zu erwarten. Das Mittelland würde dann teilweise von Eis bedeckt. Es ist aber unklar, ob dieser Gletschervorstoss unter natürlichen Umständen den Maximalstand der letzten Eiszeit erreichen würde.

### **3 Plenumsdiskussion**

Die abschliessende Plenumsdiskussion hob nach der Nennung der Kernfragen mit zukünftig zu erwartenden methodischen Fortschritten bei Datierungen an. Ablagerungen mit einem Alter bis 350'000 Jahre sind derzeit datierbar, aber mit wenigen Jahren methodischer Forschung wären mit der Methode optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) möglicherweise Alter bis 1 Million Jahre und mit kosmogenen Nukliden (burial dating) von einigen Millionen Jahre datierbar.

Die postulierte Möglichkeit einer singulären Rinnenübertiefung in alpenfernen Bereichen wurde kontrovers diskutiert. Für die „grösste Eiszeit“ wurde ein schneller Vorstoss von temperiertem Eis erwogen, der von ozeanographischen Bedingungen mitgesteuert durch spezielle Niederschlags-



bedingungen und besonders grosse Schmelzwassermengen charakterisiert war. Das präsentierte Modell wachsender und schrumpfender Eisschilde und deren Geometrie, häufig in Europa und Nordamerika ausser Phase, wird derzeit mit variablen ozeanischen Feuchtequellen erklärt. Variable atmosphärische Zirkulationsmuster spielen vermutlich ebenfalls eine Rolle, da in der Kleinen Eiszeit typische Zusammenhänge mit Kalk- und Warmphasen beobachtet wurden.

Die möglichen Faktoren der Rinnenübertiefung und ihrer zeitlich-räumlichen Komponenten, wie Morphologie, Klima, Vorgeschichte, Geologie, Höhenlage, wurden diskutiert, ohne dass über etabliertes Wissen hinausgehende Ansätze sichtbar wurden. Dieses Wissen besteht in Grundzügen schon seit 50 Jahren. Die Grundprinzipien sind die Bevorzugung von Flussläufen (geringster Permafrost), Vermeidung von Höhenzügen und die Bildung stärkerer Übertiefungen in weicherem Gestein. Die mögliche Existenz bislang unbekannter Schmelzwasserrinnen wurde mit dem Hinweis auf laufende Erdwärmesondierungen, Forschungsbohrungen und geplanter 3D-Seismik kommentiert. Die Anwendbarkeit der Seismik wurde unter dem Hinweis auf eine verlässliche Mindestbreite der Rinnen in Molassesedimenten akzeptiert. Eine gezielte Platzierung von Forschungsbohrungen wurde für wichtig erachtet.

Phasen der Rinnenbildung wurden nochmals nach geomorphologischen Kriterien diskutiert. Mindestens 3 verschiedene Rinnengenerationen können auseinander gehalten werden. Eine Rinne quer zum Rhein-Thurthal stammt möglicherweise aus einer ältesten Phase. Eine weitere soll nach den Seeablagerungen bei Andelfingen angelegt worden sein. Als jüngste Rinnengeneration wurde eine im Singener Raum angesprochen. Daher könnten nicht alle zur Zeit der grössten Vereisung entstanden sein. Die Querrinne im Bereich Zug-Sihlbrugg sollte neu analysiert werden. Eine Klärung lässt sich offensichtlich nur durch Datierungen erreichen. Grundsatzfragen zur räumlichen Ausformung und zu den steuernden Faktoren, z.B. vorprägender Linien wurden erneut aufgeworfen. Im Fall des schwedischen Grundgebirges wurde auf die fehlende Evidenz einer Korrelation von Rinnen und Schwächezonen im Untergrund hingewiesen.

Abschliessend wurde festgehalten, dass bereichsweise quer verlaufende Rinnen die Notwendigkeit von Datierungen verdeutlichen. Gerade Datierungsprojekte versprechen innerhalb einiger Jahre einen starken Erkenntniszuwachs. Geplante 3D-Seismik-Kampagnen werden verbesserte Erkenntnisse über die Geometrien unerkannter Rinnenfüllungen bringen. Ein hinreichend verbessertes Prozessverständnis des Klimas der Eiszeiten, z.B. der Prozesse im Kohlenstoffzyklus, wird in absehbarer Zeit kaum erreichbar sein. Bei Erosionsraten stabilisieren sich die ermittelten regionalen Werte für die Alpen zwischen 0,2 und 1 mm/Jahr, je nach Region und Zeitraum. Eine kaltzeitliche Grundwasserinfiltration stellt in Kristallingestein ein Problem dar, aber vermutlich kaum in tonigen Gesteinen.



**Beilage 1: Programm des Kolloquiums:**

**09:30 – 09:35 Uhr Begrüssung (Prof. S. Löw, Präsident KNE)**

**09:35 – 12:30 Uhr (Chairman Prof. F. Schlunegger)**

- Dr. M. Schnellmann: Grundlagen und bisherige Forschungsarbeiten der Nagra zur Verbesserung des Verständnisses der glazialen Tiefenerosion im Alpenvorland.
- Dr. H.R. Graf : Quartärstratigraphie des Mittellandes und die Ursache der Höhenunterschiede der Sedimentkomplexe.
- Dr. F. Preusser: Datierung mittelpleistozäner Verfüllungen übertiefer Talrinnen im Schweizer Mittelland: Aktueller Stand, laufende Arbeiten und zukünftige Projekte.

**10:50 – 11:10 Uhr Kaffee Pause**

- Dr. P. Haldimann: Zur Entstehungsgeschichte übertiefer Felsrinnen im Alpenvorland: Fakten, Interpretationen und Thesen.
- Prof. W. Haeblerli: Eiszeitliche Tiefenwirkung im Untergrund des nördlichen Alpenvorlandes: Gletscher, Permafrost, Grundwasser, Tiefenerosion.
- Dr. J.M. Lemieux: Simulating the impact of glaciations on continental groundwaterflow systems: Model application to the Wisconsinian glaciation over the Canadian landscape.

**12:30 – 14:00 Uhr Mittagspause**

**14:00 – 15:40 Uhr (Chairman PD Dr. M. Rahn)**

- Prof. F. Schlunegger: Wechselbeziehung zwischen Hebung und Denudation in den Alpen während des Holozäns.
- Dr. Ch. Raible: Möglichkeiten der Klimamodellierung für Treibhaus- und Eishaus-Szenarien.
- Prof. Jürg Luterbacher: Wie funktioniert das europäische Klima? Unterschiede zwischen Warm- und Kaltphasen des Spätholozäns.
- Dr. A. Ganopolski: Will anthropogenic CO<sub>2</sub> release suppress future natural cyclic glaciations?

**15:40 – 16: 00 Uhr Kaffee Pause**

**16:00 – 17: 00 (Chairman Prof. J. Kuhlemann)**

- Diskussion, Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.



**Beilage 2: Abstracts der Vortragenden (soweit vorhanden)**

**Grundlagen und bisherige Forschungsarbeiten der Nagra zur Verbesserung des Verständnisses der glazialen Tiefenerosion im Alpenvorland**

**Michael Schnellmann, Nagra**

In Anbetracht des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahre ist die Erosion ein wichtiger Parameter bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für hochaktive Abfälle. Entsprechend ist die Erosion eines von 13 Kriterien, welches im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) bei der Ableitung von Standortvorschlägen für geologische Tiefenlager berücksichtigt werden musste.

Aus Präzisionsnivelements abgeleitete Hebungsdaten zeigen für die Alpen grossräumige Hebungen von bis 1.5 mm/a relativ zu einem Referenzpunkt bei Laufenburg. Im Alpenvorland liegen die Werte durchwegs unter 0.4 mm/a. Methoden, welche grossräumige Erosionsraten über längere Betrachtungszeiträume ( $10^2$ a bis  $10^7$ a) ermitteln, ergeben für die Alpen Werte, welche in einem ähnlichen Bereich oder etwas tiefer als die rezent gemessenen Hebungen liegen. Geomorphologische Studien an verschiedenen Schotterniveaus in der Nordschweiz ergeben lineare Erosionsraten von maximal 0.1 - 0.2 mm/a über die letzten ca. 2 Millionen Jahre. Für die räumliche und zeitliche Verteilung von Hebungs- und Erosionsraten gibt es variierende Erklärungsansätze, welche u.a. auf unterschiedlichen Modellvorstellungen zur Geodynamik beruhen (siehe z.B. Nagra 2008 und dort referenzierte Literatur).

Im Laufe der letzten Jahre wurde im Auftrag der Nagra, unter anderem basierend auf existierenden Felsisohypsenkarten und mehreren tausend Bohrungen, ein digitales Höhenmodell der Felsoberfläche mit Maschenweite 25 m erstellt, welches die Nordschweiz sowie das zentrale und östliche Mittelland abdeckt (Jordan 2007, Nagra 2008). Das Modell zeigt verschiedene glaziale Übertiefungen von bis mehr als 200 m unter Terrain an, welche vor allem (1) ausserhalb des Napfs und der nördlich anschliessenden Gebiete, (2) unter den heutigen morphologischen Haupttälern und (3) südlich des Faltenjuras bzw. des Ausbisses der Malmkalke im Tafeljura auftreten.

Bei der Erarbeitung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete für hochaktive Abfälle wurden die Alpen unter anderem aufgrund der erhöhten Erosionsraten als ganzer Grossraum ausgeschlossen. Auf lokalerem Massstab wurde im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion ein Abstand von mindestens 400 m zur Oberkante Fels gefordert, im Bereich von existierenden Felsrinnen 500 m. Noch grössere Wirtgesteinsüberdeckungen sowie eine Lage ausserhalb der morphologischen Haupttäler wurden bei der durchgeführten vergleichenden Bewertung von Gebieten positiv berücksichtigt.

Im Hinblick auf ein besseres Verständnis der glazialen Tiefenerosion sind verschiedene Projekte im Gang bzw. in naher Zukunft geplant. Eine laufende Verbesserung des Modells der Felsoberflächen soll zeigen, wo übertiefte Felsrinnen vorkommen und wie diese geometrisch ausgebildet sind. Durch die Unterstützung von Forschungsbohrungen und Arbeiten zur Verbesserung und Anwendung von Datierungsmethoden sollen verbesserte Aussagen über die linearen Erosionsraten und das Alter der Entstehung und der Füllung einzelner Rinnen gewonnen werden. Weiter ist eine Literaturstudie zum Prozessverständnis der glazialen Tiefenerosion im Gang und darauf basierend sind auch entsprechende Modellrechnungen geplant.



**Referenzen:**

Jordan, P. (2007):

Digitales Höhenmodell Basis Quartär (DHM B\_QU, "Felsmodell") - Grundlagen, Erarbeitung, Ergebnisse - Stand Juni 2007. Nagra Arb. Ber. NAB 07-12.

Müller, W.H., Naef, H. & Graf, H.R.(2002):

Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Züricher Weinland. Nagra Technischer Bericht NTB 99-04.

Nagra (2008):

Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager. Geologische Grundlagen (Bericht zur Geologie). Nagra Technischer Bericht NTB 08-04.



## **Quartärstratigrafie des Mittellandes und die Ursachen der Höhenunterschiede der Sedimentkomplexe**

**Dr. Hans Rudolf Graf**, Matousek, Baumann & Niggli AG, Baden

### ***Ziele des Vortrags***

Der Vortrag hat zwei Ziele. Einerseits sollen diejenigen Aspekte des nördlichen Schweizerischen Alpenvorlandes demonstriert werden, die im Titel angesprochen sind. Andererseits soll der geologisch-stratigraphische Kontext aufgezeigt werden, in welchem die grossen glazialen Becken der Nordschweiz stehen.

### ***Quartärstratigrafie des Mittellandes***

Im Hinblick auf die Diskussion der Ursache der Höhenunterschiede der Sedimentkomplexe werden die stratigraphischen Verhältnisse für die verschiedenen alten glazifluvialen Schotter der Nordschweiz aufgezeigt. Diese stehen in einer klaren hydraulischen Beziehung zu den während der jeweiligen Zeitabschnitte existierenden Entwässerungsverhältnisse im Mittelland (Position der Rinnen, Höhenlage der Erosionsbasis etc.).

Eine wesentliche Aussage, die sich aus der Untersuchung dieser Schotter ergibt, ist, dass die herkömmliche Ansicht, topografisch höher gelegene Schotterkomplexe seien älter als tiefer gelegene, im Wesentlichen gültig ist. Die seit über hundert Jahren unterschiedenen morphostratigraphischen Einheiten *Höhere Deckenschotter*, *Tiefere Deckenschotter*, *Hochterrasse* und *Niederterrasse* haben als grober Rahmen für die altersmässige Einstufung der Sedimente weiterhin Bedeutung. Es hat sich aber gezeigt, dass diese Einheiten intern weiter gegliedert werden können. So enthalten die Höheren Deckenschotter Ablagerungen aus mindestens vier Phasen, ebenso die Tieferen Deckenschotter. Die einzelnen Phasen sind zum grössten Teil nachgewiesener Weise durch Warmzeiten voneinander getrennt gewesen. Dies gilt auch für die Ablagerungen der Hoch- und Niederterrasse, wobei allerdings eine klare morphologische Abgrenzung von – eben – Hoch- und Niederterrasse heute nicht mehr nachvollzogen werden kann. Es ist viel mehr von einem Schotterkomplex zu sprechen.

In der Übersicht ergibt sich folgendes Bild: Es kann von drei Zeitabschnitten ausgegangen werden, während denen das Entwässerungsniveau (Erosionsbasis) im Vorfeld der Gletscher auf einem mehr oder weniger konstanten Niveau lag. Im Übergang zwischen diesen drei Zeitabschnitten wurde das Entwässerungssystem der Nordschweiz zweimal markant abgesenkt. Insgesamt kann für das Eiszeitalter von mindestens 12 Akkumulationsphasen ausgegangen werden, welche jeweils mit einer Vergletscherung in Zusammenhang standen.

### ***Ursache der Höhenunterschiede der Sedimentkomplexe***

Grundsätzlich werden heute zwei mögliche Ursachen für die Höhenunterschiede der Sedimentkomplexe diskutiert. Auf der einen Seite die phasenweise Absenkung des Entwässerungsnetzes im betrachteten Gebiet, welche eine Folge von tektonischen Vertikalbewegungen im Oberstrombereich der jeweiligen Flusssysteme und/oder im Bereich der regionalen Erosionsbasis ist. Auf der anderen Seite die Ablagerung der höher gelegenen Schotter als randglaziale Sedimente auf an den Gletscher angrenzende Hochgebiete.

### ***Vertikalbewegungen***

Vertikalbewegungen finden im Gebiet der Schweiz heute vor allem im Alpenkörper statt. Sie sind durch Präzisionsnivelements nachgewiesen. Ebenso ist nachgewiesen, dass sich der Schwarzwald und der Faltenjura heben – immer relativ zum Fixpunkt bei Laufenburg im Rheintal gesehen. Demgegenüber befindet sich unterhalb von Basel ein grosses Absenkungsgebiet, der Oberrheingraben. Eine Absenkung ist hier seit dem Paläogen nachgewiesen; auch für das Pleistozän.



Dies äussert sich in einer „normalstratigraphischen“ Abfolge der eiszeitlichen Sedimente in der Grabenfüllung, in dem hier Jüngerer generell auf Älterem auflagert. Dieser Gegensatz zum Schweizerischen Alpenvorland, wo eben Älteres höher liegt als Jüngerer, legt die Vermutung nahe, dass im südöstlichen Randbereich des Oberrheingrabens, d.h. nordwestlich von Basel, ein Scharnierbereich zu suchen ist, wo diese Umkehr stattfand.

Die Steuerung der Höhenlage des Nordschweizerischen Entwässerungsnetzes wird im Wesentlichen durch Hebungen im Alpenkörper und Absenkungen im Bereich des Oberrheingrabens bewerkstelligt. Wo und in welcher zeitlichen Abfolge diese Steuerung – also das Wechselspiel der verschiedenen Vertikalbewegungen – jeweils konkret stattfand, kann im Einzelnen bisher nicht angegeben werden.

### ***Randglaziale Entstehung der Deckenschotter***

Die Theorie der randglazialen Entstehung der Deckenschotter beruht auf der Annahme von „Urstromtälern“, die während des ganzen Eiszeitalters aktiv waren, und der damit verbundenen Existenz von angrenzenden Hügeln, bzw. Hochzonen. Diese wären während der Vergletscherungsphasen mit Sediment beliefert worden, als seitliche Abspülungen der jeweils präsenten Gletscher. Von diesem Konzept ausgehend, muss für diese Hochzonen für die Phasen ohne Gletscherpräsenz von erosiven Verhältnissen ausgegangen werden. Jedoch kommen an verschiedenen Stellen innerhalb der Höheren, wie auch der Tieferen Deckenschotterkomplexe fluviatile Sedimente vor, welche nicht glazialen Ursprungs sind, aber offenbar innerhalb von warmzeitlich existierenden Flusstälern abgelagert wurden. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass die Gebiete mit erhaltenen Deckenschottern sich auch während der warmen Zeitabschnitte in Talsituationen befanden. Demzufolge tritt die randglaziale Entstehung der Deckenschotter als Ursache für die Höhenunterschiede gegenüber einer tektonischen Steuerung klar in den Hintergrund.

### ***Morphologischer und lithostratigraphischer Rahmen der glazialen Becken***

Ein geografischer Überblick über die Lage von glazialen Becken in der Nordschweiz und der Verbreitung von Deckenschottervorkommen zeigt, dass diese beiden Elemente des quartären Inventars der Nordschweiz räumlich klar voneinander getrennt vorliegen. Zwar kommen auch innerhalb der Deckenschotterkomplexe an mehreren Stellen Reste von glazialen Becken vor (Uetliberg, Stammheimer Berg, Schiener Berg). Diese stehen jedoch in keinem morphologischen wie lithostratigraphischen Zusammenhang mit den in den nordschweizerischen Tälern bzw. Talrandgebieten existierenden mehrere hundert Meter tiefen Becken. Vielmehr liegen zahlreiche lithostratigraphische Befunde vor, welche Letztere in einen genetischen Kontext mit den Ablagerungen von Hoch- und Niederterrasse stellen. Dies ist aber auch zunehmend mit Altersdatierungen belegt.



## Datierung mittelpleistozäner Verfüllungen übertiefer Talrinnen im Schweizer Mittelland

**Frank Preusser**, Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstrasse 1+3, 3012 Bern

Übertiefte Becken und Täler sind im gesamten Alpenvorland verbreitet, bisher ist aber kaum bekannt wie und wann diese Formen entstanden sind. Letztere Frage liesse sich durch die Datierung der in den erosiven Formen vorgefundenen Ablagerungen näher eingrenzen. Datierungen sind prinzipiell mit einer Reihe von Methoden durchführbar. Eine grundlegende Möglichkeit bietet die Lithostratigraphie, die jedoch nur eine relative zeitliche Zuordnung von Sedimenten erlaubt. Palynostratigraphie und Paläomagnetik bieten eine zusätzliche Möglichkeit der Alterszuordnung, sind jedoch nur in Ausnahmefällen anwendbar und eine „absolute“ zeitliche Einordnung kann nur durch Korrelation mit unabhängig datierten Abfolgen erfolgen. Numerische Alter der Sedimentfüllungen sind potentiell direkt mit Optisch Stimulierter Lumineszenz (OSL) (derzeit bis ca. 200 ka), U/Th (Karbonate, Torf bis ca. 350 ka) und „Burial dating“ mit kosmogenen Nukliden ( $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ , theoretisch bis 5 Ma, experimentell) bestimmbar. Bisher wurden diese Methoden in diesem Zusammenhang aber nur exemplarisch eingesetzt.

Auch aus anderen Gebieten, z.B. der nordischen Vereisung, sind übertiefte Täler bekannt (Tunneltäler des nördlichen Mitteleuropas). Auch hier sind bedeutende Übertiefungen von bis zu mehreren hundert Metern belegt. Warmzeitliche Ablagerungen, die anhand ihrer Pollenführung (*Fagus*, *Pterocarya*) ins Holstein Interglazial gestellt werden, implizieren, dass zumindest ein Teil der Übertiefung in der Elstereiszeit erfolgte, für die in dieser Region ein Alter von ca. 350 ka erwartet wird. Es stellt sich die Frage, ob diese Befunde ins Alpenvorland übertragen werden dürfen.

Die bisher vorliegenden spärlichen Altersdaten weisen möglicherweise auf eine polygenetische Herkunft der übertiefen Formen hin. Eine Absicherung dieser Hinweise wird nur durch weitere Datierungen und einer Kombination verschiedener Methoden möglich sein. Neben Lithostratigraphie und Palynostratigraphie bieten OSL und kosmogene Nuklide hier ein bedeutendes Potential.



## **Entstehungsgeschichte übertiefter Felsrinnen im Alpenvorland** **Fakten, Interpretationen und Thesen**

**Peter Haldimann**, Dr. Heinrich Jäckli AG, Zürich

### **Einleitung**

Wie entwickelte sich die Landschaft des Mittellandes nach dem Ende der Molassesedimentation bis zum Beginn des Eiszeitalters? In was für eine Landschaft stiessen die ersten Gletscher vor rund 2.6 Mio. Jahren vor? Wie, wann und warum leistet ein Gletscher Tiefenerosion? Entstanden die übertieften Täler in derselben Eiszeit? Welche mag es gewesen sein? Wie wurden die übertieften Täler gefüllt? Welche Prozesse spielten während den jüngeren Gletschervorstössen? Wie hat der würmzeitliche Gletschervorstoss die Landschaft überprägt? Und wie geht es weiter?

Diese und andere Fragen werden aus unterschiedlichen Blickwinkeln beleuchtet und zu beantworten versucht. Aus quartärgeologischen Beobachtungen, Fakten, Interpretationen und Arbeitshypothesen wird ein möglichst plausibles Puzzle zusammengefügt. Die aufgestellten Thesen und die Schlussfolgerungen dürfen durchaus kontrovers diskutiert werden. Der Vortrag will Denkanstösse vermitteln, das Verständnis für die erosiven und akkumulativen Prozesse im Quartär fördern, und er will zeigen, wie die Landschaft mit neuen Augen erlebt werden kann.

Nachfolgend werden die aufgestellten Thesen zusammengefasst.

### **Miozän**

Zur Zeit der Oberen Süsswassermolasse herrschten dank der Glimmersandrinne konstante und relativ ruhige Vorflutverhältnisse. Wichtigstes tektonisches Element war eine mit der Sedimentation schritthaltende Absenkung. Vor rund 12-10 Mio. Jahren ging die lang dauernde Phase der synsedimentären Absenkung in eine Phase der Hebung über. Gleichzeitig wurde die Molassesedimentation gestoppt. Wegen der Jurafaltung wurde die Entwässerung in der Glimmersandrinne gegen W unterbunden. Als die Absenkung in Hebung überging, nahm die Reliefenergie im Molasseland zu. Das Wasser suchte sich eine neue Vorflut und fand sie in der Donau. Mit dem ersten Fluss, der den Weg zur Donau fand, begann lineare fluviatile Erosion. Mit dem ersten eingeschnittenen Flusstal wurde jede weitere flächenförmige Sedimentation endgültig verunmöglicht.

### **Pliozän**

Das Molasseland wurde zur Peneplain, zum Transitgebiet, durch welches die Flüsse den Schutt aus den Alpen abtransportierten. In Laufe des Pliozäns hat sich das Molasseland im Raum Zürich um mindestens 750 m gehoben. In derselben Zeit entwickelte sich ein reifes Entwässerungssystem mit relativ tief eingekerbten Urstromtälern. Die Urströme verliessen die Alpen an heute noch wirksamen „Pforten“ und mussten den sich hebenden Jura in „Klusen“ durchbrechen. Die alpinen Pforten und die Juradurchbrüche der Urstromtäler sind bis heute in etwa dieselben geblieben. Das Entwässerungsmuster des Mittellandes hat seit dem Pliozän seine groben Züge beibehalten.

### **Erosionsprozesse**

Zeiten intensiver *fluviatiler Erosion* sind die Endphasen von Eiszeiten, wenn grosse Schmelzwassermengen zur Verfügung stehen. In einer warmzeitlichen Landschaft leistet ein Fluss praktisch keine Erosion, sondern er landet auf, vor allem wenn Seen vorhanden sind.

Ein Gletscher leistet *glaziale Erosion*:

- Wenn der hydraulische Gradient und die Fließgeschwindigkeit des subglazialen Schmelzwassers hoch ist (HÄBERLI 2004).
- Wenn das erodierte Material auch abgeführt werden kann, d.h. nahe der Gletscherstirn.



- Wenn an der Basis viel Schmelzwasser unter hohem Druck verfügbar ist (v.a. bei „temperiertem Gletscher“) (HÄBERLI 2004).
- Wenn ein temperierter Gletscher längere Zeit in einer gegebenen Position oszilliert, erfolgt Tiefenerosion unmittelbar hinter der Gletscherstirn der gegebenen Position (HABBE 1996).

Zeiten starker glazialer Erosion sind Vorstoss- und Rückzugsphasen eines temperierten Gletschers bei feuchtem Klima. Orte starker glazialer Erosion sind Talsohlen, wo ein temperierter Gletscherrand längere Zeit oszilliert.

Verstärkend wirken:

- schlecht durchlässiger Untergrund (Druckaufbau),
- leicht erodierbarer Untergrund,
- ein See oder Seesedimente.

### **Altpleistozän**

Zu Beginn des Pleistozäns war im Molasseland ein reifes fluviatiles Entwässerungsnetz mit deutlich eingeschnittenen Urstromtälern vorhanden. Die ersten Gletscher stiessen in eine Landschaft mit akzentuiertem fluviatil geprägtem Relief vor.

Es gibt 2 Typen von höheren Deckenschottern:

- Typ 1 ist in Höhenlagen jeweils zwischen zwei Talgletschern abgelagert worden (Typus abgeschwemmte Mittelmoränen).
- Typ 2 sind Relikte einer einst grösseren Sanderebene, welche im Vorfeld eines Plategletschers geschüttet und später durch fluviatile Erosion zergliedert wurde.

Die Vorkommen der tieferen Deckenschotter folgen in grossen Zügen dem Verlauf der jüngeren pleistozänen Täler, d.h. vor Ablagerung der tieferen Deckenschotter hatte sich das heutige Talssystem bereits weitgehend etabliert. Die tieferen Deckenschotter waren Sanderbildungen in einem fluviatil geprägten Talsystem auf Koten 450 - 550 m ü.M. Zwischen 2 Mio. und 1 Mio. Jahre vor heute gab es zahlreiche Eiszeiten mit Gletschervorstössen, oft bis über Zürich hinaus. Bei jedem Gletschervorstoss wurden die Täler schrittweise vertieft und verbreitert. Die Landschaft und die Erosionsbasis wurden sukzessive tiefer gelegt. Jeder Gletscher hinterliess im Vorfeld auf jeweils tieferem Niveau neue Schotterablagerungen (Typus „Hochterrassen-Schotter“). Die Schmelzwässer beim Eisabbau schufen in diesen Schotterablagerungen tiefer liegende Erosionsterrassen.

In den jeweiligen Warmzeiten herrschten ruhige Verhältnisse mit Fluss- und Seenlandschaften ohne nennenswerte Erosion. Bei jedem Gletscherrückzug wurde die Landschaft für den nächsten Vorstoss vorbereitet. Der neue Gletscher fand die Landschaft so, wie der alte sie verlassen hatte. Jeder neu vorstossende Gletscher nahm den Weg (Talweg) des geringsten Widerstandes und folgte den vorgeprägten Tälern.

### **Übertiefte Rinnen**

Irgendwann zwischen 1 Mio. und 450'000 Jahre vor heute herrschte die „Eiszeit mit der grössten Tiefenerosion“. Dabei wurde in allen grossen Tälern in einer vergleichbaren Position eine übertiefte Mulde aus der Molasse ausgehobelt. Die entstandenen Mulden wurden in den anschliessenden Warmzeiten vorwiegend mit Seesedimenten gefüllt.

Wo, wann und warum entstanden übertiefte Rinnen?

- Die Bildung übertiefer Rinnen hat etwas mit der Eisausdehnung zu tun.



- Es waren temperierte Gletscher, welche längere Zeit in der gegebenen Position verharrten.
- Es stand viel Wasser unter hohem hydraulischen Gradient zur Verfügung.
- Die Gletscherstirn lag nahe.
- Die Transportkapazität des Wassers war hoch.
- Der Untergrund war leicht erodierbar.
- Der Gletscher fuhr in der gegebenen Position in einen See oder auf Seesedimente auf.

### ***Jungpleistozän***

In allen jüngeren Eiszeiten seit der grössten Tiefenerosion hat letztlich Akkumulation über Erosion überwogen. Die Ereignisse dieser langen Periode sind unter anderem in den Sedimenten der Rinnenfüllungen dokumentiert. Diese Rinnenfüllungen sind noch viel zu wenig erforscht. In den Niederterrassen-Schottern ist mancherorts in geringer Tiefe ein Bodenhorizont entwickelt. Die Niederterrassen-Schotter s.str. sind nur eine Überguss-Schicht über einer heterogenen und heterochronen Abfolge älterer Schotter. Die Talauen in der letzten Warmzeit, d.h. zu Beginn der Würm-Vorstösse, lagen im Aargau rund 5 - 15 m tiefer als heute. Auch im Würm hat Akkumulation über Erosion überwogen.

### ***Zusammenfassung***

Die Täler der Nordschweiz sind das Produkt einer langdauernden Wechselfolge von Erosions- und Akkumulationsprozessen. Die Talanlagen wurden im Pliozän geschaffen. Im Altpleistozän erfolgte die Vertiefung und Verbreiterung der Täler, und im Jungpleistozän setzte die heute noch andauernde Verfüllung ein. Die quartäre Füllung unserer Täler ist wesentlich heterogener, heterochroner und wahrscheinlich älter, als wir uns dies gemeinhin vorstellen. Die übertieften Felsrinnen entstanden mit grosser Wahrscheinlichkeit vor mehr als 500'000 Jahren. In den jüngeren Eiszeiten hat letztlich Akkumulation über Erosion überwogen. In den Warmzeiten wird die Landschaft wenig verändert. Ein neuer Gletscher findet die Landschaft so, wie der frühere Gletscher sie verlassen hat. Jeder neue Gletschervorstoss folgt dem aktuellen Talweg (Weg des geringsten Widerstandes). Einmal verfüllte tiefe Felsrinnen werden nicht wieder aktiviert. Der Gletscher hat kein Erinnerungsvermögen an seine alten Rinnen.

Zukünftige glaziale Tiefenerosion wird dort stattfinden, wo von der Geomorphologie her die Disposition dafür gegeben ist, namentlich im Bereich existierender Seen und Seebecken. In den pleistozänen Talfüllungen steckt der Schlüssel für die Prognose zukünftiger Erosionsszenarien. Die jungpleistozäne Füllung der übertieften Täler muss an ausgewählten Orten durch Bohrungen noch besser analysiert werden. Hier öffnet sich ein weites Feld für zukünftige quartärgeologische Arbeiten.



## **Simulating the impact of glaciations on continental groundwater flow systems: Model application to the Wisconsinian glaciation over the Canadian landscape**

**Jean-Michel Lemieux**, ETH Zurich

A 3-D groundwater flow and brine transport numerical model of the entire Canadian landscape up to a depth of 10 km is constructed in order to capture the impacts of the Wisconsinian glaciation on the continental groundwater flow system. Although the scale of the model prevents the use of a detailed geological model, commonly occurring geological materials that exhibit relatively consistent hydrogeological properties over the continent justify the simplifications while still allowing the capture of large-scale flow system trends. The model includes key processes pertaining to coupled groundwater flow and glaciation modeling, such as density-dependent (i.e., brine) flow, hydromechanical loading, subglacial infiltration, isostasy, and permafrost development.

The surface boundary conditions are specified with the results of a glacial system model. The significant impact of the ice sheet on groundwater flow is evident by increases in the hydraulic head values below the ice sheet by as much as 3000 m down to a depth of 1.5 km into the subsurface. Results also indicate that the groundwater flow system after glaciation did not fully revert to its initial condition and that it is still recovering from the glaciation perturbation. This suggests that the current groundwater flow system cannot be interpreted solely on the basis of present-day boundary conditions and it is likely that several thousands of years of additional equilibration time will be necessary for the system to reach a new quasi-steady state. Finally, we find permafrost to have a large impact on the rate of dissipation of high hydraulic heads that build at depth and capturing its accurate distribution is important to explain the current hydraulic head distribution across the Canadian landscape.



## Möglichkeiten der Klimamodellierung für Treibhaus- und Eiszeitszenarien

**Christoph Raible**, Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern

Neben Beobachtungsdaten und proxy-basierten Abschätzungen stellen Klimamodelle eine weitere Möglichkeit dar, Klimavariabilität und klimarelevante Prozesse zu untersuchen. Ziel des Vortrags war es daher, erste Einblicke in die heutigen Möglichkeiten, aber auch Grenzen der Klimamodellierung zu geben. Als Beispiel wurden drei Zeitphasen herausgegriffen: das „Last Glacial Maximum“ (LGM, PMIP Project: <http://pmip2.lsce.ipsl.fr/>), die „kleine Eiszeit“ und das kommende 21. Jahrhundert (IPPC 2007).

In einem ersten Schritt wurde generell die bestehende Hierarchie von Klimamodellen vorgestellt, die zur Ableitung der Klimavariabilität von Treibhaus- und Eiszeitszenarien eingesetzt wird. Allgemein basieren Klimamodelle auf physikalischen Gesetzen, die auf einem die Erde umspannenden Gitter gelöst werden. Alle Prozesse, die als relevant erachtet werden, aber nicht aufgelöst werden können, weil sie z.B. auf einer kleineren Skala, als die gewählte Modellauflösung arbeiten, müssen parametrisiert werden. Dies stellt für alle Klimamodelle eine Quelle von Unsicherheit dar. Um diese Unsicherheit abzuschätzen, werden verschiedene Modelle in einem „multi-model“ Ansatz zusammengeführt.

Der letzte IPCC Bericht zeigt auf, dass wir unter der Annahme von verschiedenen Szenarien eine Erwärmung der globalen mittlere Temperatur von 2° bis 4.5°C am Ende des 21. Jahrhunderts erwarten. Die Erwärmung ist nicht uniform, sondern zeigt ein deutlich regionales Muster mit einer sehr starken Erwärmung der polaren Gebiete. Auch der hydrologische Kreislauf verändert sich drastisch, wobei nicht nur die Mittelwerte sich verändern (Abnahme von Niederschlag in den Subtropen und eine Zunahme in den nördlichen mittleren Breiten), sondern auf die Extreme (Trockenheit/Starkniederschläge) in vielen Gebieten zunehmen. Ein entscheidender Schritt für das Thema Glaziale Tiefenerosion stellt die Kopplung von Eisschildmodellen zu den bisherigen Klimamodellkomponenten dar. Erste Studien zeigen ein Abschmelzen von Grönland auf 20% seines jetzigen Eisvolumens in 1780 Jahren unter der Annahme von einer vierfachen vorindustriellen CO<sub>2</sub> Konzentration. Dies wird ein Fokus des nächsten IPCC in den kommenden fünf Jahren sein.

Für einen Blick in die Vergangenheit wurden zwei Perioden gewählt. Das Maunder Minimum, eine Phase mit reduzierter solarer Aktivität in der „kleinen Eiszeit“, zeichnet sich durch deutlich kältere Temperaturen insbesondere über Europa aus. Eine Modellstudie gibt Einblick in die synoptische Variabilität und zeigt, dass sich die Sturmhäufigkeiten über Europa nach Süden verlagert haben und in allen Gebieten sich die Sturmintensität verstärkt hat (Raible et al. 2007). Dies wird durch Proxy Daten bestätigt (De Jong et al. 2006). Diese Veränderung der Sturmcharakteristika führt zu einer südwärts Verlagerung des Niederschlages über Europa. Beides, Niederschlag- und Temperaturänderungen sind wichtig für die Massenbilanz von Gletschern.

Die zweite Phase in der Vergangenheit ist das LGM. Der Vortrag nahm Bezug auf das „Paleo Modeling Intercomparison Project (PMIP II)“. Eine Vielzahl von Klimamodellen wurde mit gegebenen Randbedingungen von 21,000 BP angetrieben. Insbesondere wurden Eisschilde in Nordamerika und Europa vorgeschrieben. Wie zu erwarten, zeigen alle Modelle eine Abnahme der Temperatur und des Niederschlags. Allerdings unterschätzen fast alle Simulationen die Temperaturabnahme über dem Mittelmeerraum, wie ein Vergleich mit Proxydaten nahe legt. Ein möglicher Grund könnte in der Unterschätzung der meridionalen atmosphärischen Zirkulationsmuster liegen, welches allen Klimamodellen gemein ist.

Abschliessend kann gesagt werden, dass Klimamodelle einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der glazialen Tiefenerosion liefern können, da mit Hilfe von Modellen Klimavariabilität für verschiedene Klimazustände abgeschätzt und wichtige Prozesse identifiziert werden können.



nen. Allerdings sind sie durch die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten limitiert, sodass immer eine Wahl der Auflösung und der einzubeziehenden Klimakomponenten getroffen werden muss.



## Wie funktioniert das europäische Klima? Unterschiede zwischen Warm- und Kaltphasen des Spätholozäns

**Jürg Luterbacher**, Oeschger Centre for Climate Change Research (OCCR) und Geografisches Institut, Klimatologie und Meteorologie, Universität Bern, Bern

Das Referat behandelte zuerst die Faktoren die das Klima beeinflussen. Diese beinhalten die natürlichen internen Faktoren (ENSO, NAO, Meereis, Ozeandynamik, Vegetation), die natürlichen externen Faktoren (Änderung im solaren Input, tropische Vulkane), und die menschlichen Aktivitäten (fossile Brenn- und Treibstoffe, Zementherstellung, Abholzung, Viehzucht, Reisanbau, Aerosole, etc). Währenddem die Sonne vor allem auf den langen Zeitskalen auf das irdische Klima wirkt, führen starke tropische Vulkane zu einem kurzen (1-3 Jahre) aber starkem Klimasignal mit globaler Abkühlung aber regionalen und jahreszeitlichen Unterschieden. In Europa beispielsweise zeigen Analysen, dass Winter nach tropischen Eruptionen deutlich wärmer sind als Winter zuvor und danach. Im Sommer dagegen beobachtet man deutlich kühlere Bedingungen. Im 4. Wissensstandsbericht des IPCC von 2007 wird belegt, dass der Grossteil der Klimaerwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts – mit grösster Wahrscheinlichkeit, das heisst mit mehr als 90%iger Sicherheit – durch den menschengemachten Treibhausgasanstieg bedingt ist. Die menschlichen Aktivitäten, an erster Stelle die Verbrennung der fossilen Brennstoffe, tragen somit ausschlaggebend zur Erderwärmung bei. Der Vortrag ging dann auf die Möglichkeit ein, das Klima Europas in der vorinstrumentellen Periode zu rekonstruieren. Klimainformationen für die letzten Jahrhunderte stehen in Europa zum Teil reichlich zur Verfügung. Seit dem letzten Teil der sogenannten ‚Kleinen Eiszeit‘ sind es vornehmlich instrumentelle Messungen (die längste aus Zentralengland reicht bis ins Jahr 1659 zurück). Je weiter wir zeitlich zurückblicken, umso weniger gemessene Informationen liegen vor. Zwei verschiedene Typen indirekter Klimainformationen, sogenannte Proxies, können unterschieden werden: einerseits Informationen aus natürlichen Archiven (zum Beispiel Eisbohrkerne aus Grönland, Gletschervariationen im Alpenraum, Baumringdaten aus verschiedenen Regionen Europas, inklusive der Alpen, Tropfsteine, Korallen, etc.) sowie Anhaltspunkte aus verschiedenen schriftlichen Überlieferungen. Klimahistoriker wie beispielsweise Christian Pfister von der Universität Bern haben in akribischer Kleinarbeit über Jahrzehnte die unterschiedlichen historischen Quellen analysiert, ausgewertet und in sogenannte Niederschlags- und Temperaturindizes für verschiedene Regionen Europas umgesetzt. Mit geeigneten statistischen Methoden können all diese Klimazeugen aus historischen und natürlichen Archiven kombiniert werden. Dabei werden die Proxyinformationen im 20. Jahrhundert an instrumentellen Daten geeicht. Die erhaltenen statistischen Beziehungen werden dann für die Rekonstruktion der vorinstrumentellen Periode verwendet. Dies erlaubt schliesslich Klimarekonstruktionen in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Neueste Resultate der europäischen Klimageschichte werden gezeigt und die aktuelle Wärme in den historischen Kontext gesetzt sowie die Rolle verschiedener Einflussfaktoren wie Sonne, Vulkane und Mensch besprochen. Es zeigt sich, dass die kälteste Winterperiode am Ende des 17. Jahrhunderts (sogenanntes Maunder Minimum) stattfand. Die mittleren Wintertemperaturen Europas von 1669-1698 waren ein gutes Grad C kälter als die rezenten 30 Winter. Die Kälteanomalie zeigte sich vor allem von West- und Zentraleuropa östlich sowie in Skandinavien. Diese Periode wurde auch gekennzeichnet durch häufige Blockinglagen mit der Zufuhr von kontinentaler Luft aus dem Nordosten und Osten. Im Gegensatz dazu waren die letzten 30 Winter die wärmsten. Die Wärmeanomalie ist auch hier im Nordosten Europas am stärksten ausgeprägt. Am Schluss wurde noch die Möglichkeit eines solaren Einflusses auf den starken Temperaturanstieg am Ende des Maunder Minimums diskutiert. Dabei hat sich gezeigt, dass die Rekonstruktionen ein ähnliches Bild ergeben wie Klimasimulationen. So könnte die Zunahme des solaren Forcings unter komplexen Interaktionen zwischen Troposphäre und Stratosphäre zu einer verstärkten zonalen Zirkulation im Nordatlantik, und somit ein Trend zu einem positiven Nordatlantischen Oszillationsindex geführt ha-



ben. Dies könnte den Trend zur kontinentalen Wintererwärmung erklären, einhergehend mit eher feuchten Bedingungen im Norden und Trockenheit im Mittelmeerraum. Die westskandinavischen Gletscher zeigen gerade in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts den Höchststand in der Kleinen Eiszeit, im Gegensatz zu den Alpengletschern.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass

- Europa ein idealer Raum darstellt, um Klimageschichte zu studieren;
- Multiproxy Klimarekonstruktionen Einblick in jahreszeitliche und räumliche Veränderungen vergangener Zeiten erlauben;
- die letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts die wärmsten waren;
- das Maximum der ‚Kleinen Eiszeit‘ am Ende des 17. Jahrhunderts beobachtet wurde;
- auf multidekadaler Skala die grössten (kleinsten) Unterschiede zw. Warm und Kaltzeiten im Nordosten (Mittelmeer) zu finden sind;
- der Beitrag der externen Faktoren an europäischen multidekadalen Temperaturänderungen der letzten Jahrhunderte rund einen Drittel ausmacht;
- dass der menschengemachte Treibhauseffekt der wichtigste Faktor ist um die starke europäische Erwärmung zu erklären.



## **Will anthropogenic CO<sub>2</sub> release suppress future natural cyclic glaciations?**

**Andrey Ganopolski**, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany

In accordance with the classical Milankovitch theory and results of model simulations, the onset of large-scale glaciation of the Northern Hemisphere following interglacial period occurs when summer insolation (incoming solar radiation) drops below some critical threshold value. Usually, interglacial periods lasted only half of one precessional cycle, i.e. about 10,000 years, but the interglacial period which occurred about 400,000 years ago, known in paleoclimatology as the marine isotope stage 11 (MIS 11), was three times longer. The current interglacial, Holocene, has a certain similarity with MIS11 in respect of the Earth's orbital parameters but it is by far not a perfect copy of MIS11 and it is believed that the current interglacial may last even longer, namely, more than 50,000 years. The reason is an extremely low current eccentricity of the Earth's orbit which results from the alignment of three dominant eccentricity cycles: 100, 400 and 2000 kyr cycles. As a result, the current minimum in summer insolation as well as the next minimum, expected in 20,000 yrs from now, are not deep enough to lead to a wide spread glaciation of the Northern Hemisphere. Only the second precessional minimum which will occur around 50,000 years from now may be sufficiently deep to trigger the onset of a new glacial age. This, however, is only true for the natural course of events. The growing anthropogenic interference with the natural dynamics of the Earth system makes it likely that the onset of the next glaciation may be considerably postponed by rising CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. Although the fossil fuel resources are limited and, in any case, will be exhausted within several centuries, contrary to the general belief, the consequences of a rather short era of fossil energy can dramatically affect the climate dynamics even on geological time scales. The reason is that a considerably portion of anthropogenic CO<sub>2</sub> will remain in the atmosphere over hundreds of thousand years which will prevent the return of the Earth's climate to its pre-industrial state for a very long time. It was shown for the first time by Archer and Ganopolski (2005) that the combustion of a large portion of available fossil fuel will prevent the onset of the next Northern Hemisphere glaciation for at least half of million years and, even a much more modest CO<sub>2</sub> emission, will still considerably affect the timing of the next glacial inception. These results, however, were obtained with a very simplistic conceptual model of glacial cycles by D. Paillard. More recently, using a comprehensive Earth system model which includes 3-D thermo-mechanical ice sheet model, these surprising finding was confirmed. Therefore, we have serious reasons to believe that the timing of the next glacial inception will be determined by the path of economic development in the 21<sup>st</sup> century.



### Beilage 3: Liste aufgeschalteter Vorträge bzw. Dokumente

<http://www.kne-schweiz.ch/index.php?id=238>

**Michael Schnellmann:** Grundlagen und bisherige Forschungsarbeiten der Nagra zur Verbesserung des Verständnisses der glazialen Tiefenerosion im Alpenvorland (5,8 MB)

**Hansruedi Graf:** Quartärstratigraphie des Mittellandes und die Ursachen der Höhenunterschiede der Sedimentkomplexe (0,7 MB)

**Wilfried Haerberli:** Eishaus + 10<sup>6</sup>a: Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre (7,6 MB)

**Jean-Michel Lemieux:** Simulating the impact of glaciations on continental groundwater flow systems: Model application to the Wisconsinian glaciation over the Canadian landscape (14 MB)

**Christoph Raible:** Möglichkeiten der Klimamodellierung für Treibhaus- und Eiszeitszenarien (2,9 MB)

**Jürg Luterbacher:** Wie funktioniert das europäische Klima? Unterschiede zwischen Warm- und Kaltphasen des Spätholozäns (2,9 MB)



#### Beilage 4: Email-Liste beteiligter und kooperierender Wissenschaftler

Frank, Erik	<a href="mailto:Erik.Frank@ensi.ch">Erik.Frank@ensi.ch</a>	Würenlingen	ENSI
Ganopolski, Andrey	<a href="mailto:andrey@pik-potsdam.de">andrey@pik-potsdam.de</a>	Potsdam	PIK
Gautschi, Andreas	<a href="mailto:Andreas.Gautschi@nagra.ch">Andreas.Gautschi@nagra.ch</a>	Wettingen	Nagra
Graf, Hansruedi	<a href="mailto:h.graf@mbn.ch">h.graf@mbn.ch</a>	Baden	Matousek, Baumann & Niggli AG
Haeberli, Wilfried	<a href="mailto:haeberli@geo.unizh.ch">haeberli@geo.unizh.ch</a>	Zürich	Geograph. Inst., Univ. Zürich
Haldimann, Peter	<a href="mailto:haldimann@jaeckli.ch">haldimann@jaeckli.ch</a>	Zürich	Dr. Heinrich Jäckli AG
Ivy-Ochs, Susan	<a href="mailto:ivy@phys.ethz.ch">ivy@phys.ethz.ch</a>	Zürich	Institute of Particle Physics, ETH
Kuhlemann, Joachim	<a href="mailto:KUJ@ensi.ch">KUJ@ensi.ch</a>	Würenlingen	ENSI
Lemieux, Jean-Michel	<a href="mailto:lemieuxj@erdw.ethz.ch">lemieuxj@erdw.ethz.ch</a>	Zürich	Geol. Inst., ETH
Löw, Simon	<a href="mailto:simon.loew@erdw.ethz.ch">simon.loew@erdw.ethz.ch</a>	Zürich	Geol. Inst., ETH
Luterbacher, Jürg	<a href="mailto:juerg.luterbacher@giub.unibe.ch">juerg.luterbacher@giub.unibe.ch</a>	Bern/Giessen	OCCR/ Geogr. Inst. Univ. Bern/ Giessen
Maisch, Max	<a href="mailto:max.maisch@geo.uzh.ch">max.maisch@geo.uzh.ch</a>	Zürich	Geograph. Inst., Univ. Zürich
Nyffenegger, Kurt	<a href="mailto:Kurt.Nyffenegger@bd.zh.ch">Kurt.Nyffenegger@bd.zh.ch</a>	Zürich	Kanton Zürich, AWEL
Preusser, Frank	<a href="mailto:preusser@geo.unibe.ch">preusser@geo.unibe.ch</a>	Bern	Inst. für Geologie, Univ. Bern
Rahn, Meinert	<a href="mailto:Meinert.Rahn@ensi.ch">Meinert.Rahn@ensi.ch</a>	Würenlingen	ENSI
Raible, Christoph	<a href="mailto:raible@climate.unibe.ch">raible@climate.unibe.ch</a>	Bern	Physikalisches Inst., Univ. Bern
Reinecker, John	<a href="mailto:john.reinecker@uni-tuebingen.de">john.reinecker@uni-tuebingen.de</a>	Tübingen	Inst. für Geowiss, Univ. Tübingen
Schaer, Christoph	<a href="mailto:schaer@env.ethz.ch">schaer@env.ethz.ch</a>	Zürich	Inst. for Atmos. and Clim. Science
Schlüchter, Christian	<a href="mailto:schluechter@geo.unibe.ch">schluechter@geo.unibe.ch</a>	Bern	Inst. für Geologie, Univ. Bern
Schlunegger, Fritz	<a href="mailto:Fritz.Schlunegger@geo.unibe.ch">Fritz.Schlunegger@geo.unibe.ch</a>	Bern	Inst. für Geologie, Univ. Bern
Schnellmann, Michael	<a href="mailto:Michael.Schnellmann@nagra.ch">Michael.Schnellmann@nagra.ch</a>	Wettingen	Nagra
Stocker, Thomas	<a href="mailto:stocker@climate.unibe.ch">stocker@climate.unibe.ch</a>	Bern	Physikalisches Inst., Univ. Bern
Veit, Heinz	<a href="mailto:veit@giub.unibe.ch">veit@giub.unibe.ch</a>	Bern	Geogr. Inst. Univ. Bern