



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-AN-6988

Datum 29. Juni 2009	Aktenzeichen 33KGX.SGTE1
Typ/Charakter Bericht	Klassifikation öffentlich
Bearbeiter J. Kuhlemann / GUJ	Visum Sachbearbeiter: <i>KUJ</i> Vorgesetzter: <i>RAM</i>
Projekt, Thema, Gegenstand (Schlagwörter) Sachplan geologische Tiefenlager, glaziale Tiefenerosion	Seiten 6 Beilagen 12 Zeichnungen

Symposium von KNE und ENSI zum Thema Neotektonik und Erdbeben, ETH Zürich, 5. Mai 2009

- Datum, Zeit:** 5. Mai 2009, 9:00 – 18:00 Uhr
- Ort:** ETH Zürich, CAB, Hörsaal G11
- Teilnehmende:** ca. 80 Fachkolleginnen und -kollegen aus Geologie, Geophysik; Geodäsie und nahe verwandten Disziplinen, Pressevertreter
- KNE:** S. Löw, A. Isler, A. Wetzel
- ENSI:** S. Brosi, E. Frank, M. Hugli, J. Kuhlemann, R. Mailänder, M. Rahn
- Beilagen:**
- Programm der Veranstaltung
 - Abstracts der Vortragenden
 - Liste aufgeschalteter Vorträge

Anlass: Im Rahmen der Überprüfung der Vorschläge der Nagra für potentielle Standortgebiete geologischer Tiefenlager befassen sich die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) und das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) mit der geodynamischen Entwicklungsgeschichte der Nordschweiz, insbesondere mit Fragen zur Seismizität und Neotektonik und den entsprechenden Szenarien zur Langzeitentwicklung, die im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen einzubeziehen sind. Um künftige mögliche geologische Entwicklungen über Zeiträume von bis zu einer Million Jahre evaluieren zu können ist es auch notwendig, nicht nur die rezente, sondern auch die quartäre seismische und tektonische Aktivität zu entschlüsseln. Nur mit einem vertieften Verständnis dieser Prozesse ist es möglich, das Spektrum möglicher Entwicklungen für die Zukunft hinreichend zuverlässig erkennen zu können.

Fragestellung: Welche Informationen liegen heute über die quartäre und rezente seismische und neotektonische Aktivität der Alpen und ihres Vorlandes vor? Welche Informationen können wir aus seismischen und geodätischen Messungen über das rezente Spannungsfeld ableiten? Welchen Veränderungen unterliegt die seismische Aktivität in Zeit und Raum? Wie lassen sich seismisch aktive Zonen der Schweiz in realitätsnahen Modellen seismischer Quellen darstellen? Welche Bedeutung haben quartäre und rezente Hebungs- und Verschiebungsraten für die grossräumigen Deformationen und Bewegungen entlang von Störungen in der Zukunft? Wie wirken sich seismische Aktivität und Neotektonik auf Endlagerbauwerke und die Radionuklidausbreitung aus?

Verteiler:

- KNE:** S. Löw, A. Isler, A. Wetzel
KNS: O. Fischer, B. Hollenstein
BFE: M. Jost
ENSI: WAH, THS, STM, MAR, GEOL, TISA, Archiv



1 Einführung

Die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz ist seit der im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager erfolgten Präsentation möglicher Standortgebiete Ende 2008 ein in der Öffentlichkeit viel diskutiertes Thema. An zahlreichen öffentlichen Info-Veranstaltungen wurde wiederholt die Frage aufgeworfen, ob Sicherheitsbeurteilungen über so grosse Zeiträume (hunderttausend bis eine Million Jahre), wie bei der geologischen Tiefenlagerung notwendig, überhaupt möglich sind. Relevante Aspekte dazu betreffen zukünftige Hebungen und Erosionsvorgänge, geodynamische Prozesse wie Erdbeben und Neotektonik, die die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers beeinflussen oder in Frage stellen könnten.

Zur Darstellung des heutigen Kenntnisstandes und der Klärung offener Fragen wurde am 5. Mai 2009 auf Einladung der Kommission Nukleare Entsorgung KNE und des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI an der ETH Zürich ein öffentliches Symposium zum Thema "Neotektonik und Erdbeben" abgehalten. Führende Experten aus der Schweiz und ein Experte aus Karlsruhe präsentierten den aktuellen Stand des Wissens. Der folgende Abriss der Beiträge und der Diskussionen fasst die aus Sicht des ENSI wichtigen Aspekte zusammen.

2 Thematischer Abriss

Mögliche Auswirkungen von Neotektonik und Erdbeben auf ein geologisches Tiefenlager betreffen folgende Themenkreise: (1) die mögliche erosive Freilegung eines geologischen Tiefenlagers nach langer Zeit, (2) die Möglichkeit der Schaffung neuer Wasserwegsamkeiten durch differentielle Bewegungen im Lagerbereich und (3) die Auswirkungen seismischer Aktivität. Der erosive Freilegung wird durch die Wahl eines Grossraums mit geringen Hebungs- und Erosionsraten sowie durch eine genügend grosse Tiefenlage des Lagers begegnet. Um differentielle Bewegungen zu vermeiden, wird bei der Platzierung des Lagerbereichs ein stabiler Gesteinsblock gewählt und den durch Seismik, Bohrungen und während des Baus identifizierten grösseren Störungen wird mit den Lagerkammern ausgewichen. Ausserdem wird ein Wirtgestein mit Selbstabdichtungspotential gewählt. Oberflächenanlagen und nicht verfüllte untertägige Anlagen werden – wie andere wichtige Anlagen – auf die zu erwartenden Beschleunigungen und Wiederkehrzeiten ausgelegt. Lagerkammern werden während der Betriebszeit jeweils nur für kurze Zeit offen gehalten. Der Zusammenfassung der Bedeutung von Neotektonik und Erdbeben für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers folgte eine kurze Übersicht der bisherigen sowie ein Ausblick auf geplante (neo-)tektonischen Arbeiten der Nagra (Geodätische Messungen mit GPS und Präzisionsnivellement-Messungen, Erweiterung des Netzes für Mikroseismizität, LIDAR-Auswertung, etc.).

GPS-Daten, vor allem aus dem AGNES-Netz, zeigen in der Nordschweiz sehr geringe Horizontalbewegungen (praktisch innerhalb des Messfehlers), deren Signifikanz heute wegen der noch sehr kurzen Zeitdauer des GPS-Messsystems nicht gesichert ist. Probleme bestehen offenbar für einige für neotektonischen Untersuchungen nicht optimal platzierte GPS-Stationen mit fehlender Ankoppelung an den Fels oder es treten Widersprüche zwischen den periodischen Messungen und Permanentmessstationen auf. Bei der Permanentmessstation Gütsch ob Andermatt wurden saisonale Periodizitäten festgestellt, die möglicherweise mit der jahreszeitlichen Schwankung des Bergwasserspiegels in Zusammenhang stehen.

Anders sehen Ergebnisse von GPS-Messungen im Mittelmeerraum aus (Griechenland-Türkei), wo Horizontalverschiebungen im Bereich von cm pro Jahr gemessen wurden. Die grössten Verschiebungsraten von >3 cm pro Jahr beobachtet man im West-Hellenischen-Inselbogen, wo klare Zusammenhänge zwischen Horizontalbewegungen und Seismizität zu erkennen sind. Aus den



Bewegungen können Versatzbeträge an bekannten Störungen errechnet werden, aus denen sich jeweils maximale Bebenstärken abschätzen lassen.

Die dargelegten Verschiebungen stehen im Zusammenhang mit den relativen Bewegungen zwischen der Eurasischen und Afrikanischen Platte und der komplexen Aufgliederung des Mitteleerraumes in verschiedene Mikroplatten. Für die Schweiz ist wichtig, dass die Adriatische Mikroplatte weiterhin im Gegenuhrzeigersinn um einen Punkt zwischen Turin und Genua rotiert, woraus auf die Schweizer Alpen ein Zusammenschub von 1-2 mm pro Jahr resultiert. Weil die Horizontalbewegungen in der Schweiz so gering sind und nahe an der Nachweisgrenze liegen, wird die Messung von zahlreichen anderen natürlichen Prozessen überlagert, die erkannt und berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören z. B. regionale Niederschlagsraten und Grundwasserstände (Beispiel Gütisch, siehe oben). Eine Modellierung der aktuellen Deformationen in der Schweiz über eine Millionen Jahre zeigt als Zentren das Wallis und den Alpennordrand, während die Nordostschweiz kaum deformiert wird. Dabei ist allerdings zu beachten, dass einerseits die Signifikanz der Messdaten noch nicht gesichert ist und dass andererseits auch die Extrapolierbarkeit der Messperiode kontrovers diskutiert wird.

Präzisionsnivelements der Landesvermessungen geben Rückschlüsse über vertikale Krustenbewegungen in der Schweiz (Hebung, Senkung). Die ersten Vermessungen liegen über 100 Jahre zurück, periodische Nachmessungen gibt es ab 1943. Die Messergebnisse zeigen, dass sich die Alpen gegenüber dem Mittelland um bis zu 1.5 mm pro Jahr heben. Vom Alpenkamm bis in die Nordschweiz nehmen die Hebungsraten kontinuierlich ab und liegen im Untersuchungsgebiet der Nagra (Gebiet Aargauer Tafeljura- Zürcher Weinland – Südliches Schaffhausen) bei 0.0 – 0.3 mm pro Jahr (d. h. praktisch an der Signifikanzgrenze). Präzisionsnivelements von deutscher Seite ergeben entlang der D-CH Grenze ähnliche Ergebnisse, zeigen aber nördlich des Bodensees unerwartete lokale Hebungszentren mit bis zu 0,6 mm pro Jahr bei Ravensburg und bei Pfullendorf. Ob es sich dabei um, in diesem Ausmass, reale tektonisch bedingte Bewegungen handelt, ist nicht gesichert, da in diesem Gebiet keine systematische Begehung mit geologischer Beurteilung der Messpunkte durchgeführt wurde. Diskutiert werden lokale seismische Aktivitäten (nur nördlich Pfullendorf, etwa Nord-Süd verlaufende Zone), isostatische Kompensation nach der wärmzeitlichen Eisentlastung (geometrisch wenig überzeugend und zeitlich nach regionalen Krusten- und Manteleigenschaften abwegig), und Neotektonik (derzeit spekulativ, Nordwestgerichtete Bewegung der westlichen Ostalpen und mögliche flache Faltung des Deckgebirges im Württembergischen Allgäu). Starke Senkungen längs der Wutach sind wegen des quartären Untergrundes (Setzung) und Gipslösung möglicherweise lokaler, nicht tektonischer Natur, obwohl ein tektonischer Beitrag zu der Bewegung nicht völlig ausgeschlossen scheint. Die Verfügbarkeit und Qualität der Messwerte und ihre Anbindung an das übrige Messnetz in der Wutach-Region ist jedoch zurzeit ungenügend, um definitive Schlüsse zuzulassen. Der Schwarzwald stagniert allgemein gegenüber Laufenburg, zeigt eine lokale Hebungsanomalie am Feldberg und eine signifikante Absenkung der Dinkelberg-Scholle. Methodische Grenzen und variable Qualität der Stabilität der Fixpunkte wurden ausführlich diskutiert.

Das Thema Seismizität war aufgrund eines nächtlichen Bebens der Stärke 4.3 am Dinkelberg nahe Basel topaktuell (05.05.09, 03:39 Uhr). Die Herdflächenlösung legte eine dextrale Blattverschiebung an einer grob W-E-streichenden Störung nahe. Die aktuelle Karte der Bebenverteilung in der Schweiz wurde kurz diskutiert. Ein vertikaler Nord-Süd-Schnitt zeigt für die Nordschweiz mindestens zwei Cluster in Tiefen von 10 und 20 km, während im Alpenraum nur Beben oberhalb 15 km registriert wurden. Es ist unklar, warum in der Nordschweiz in einem duktilen Krustenniveau unterhalb von 15 km überhaupt Beben vorkommen. Mit verschiedenen Methoden, u. a. Modellierung der Wellenform, kann seit wenigen Jahren für etliche ältere und stärkere Beben nachträglich eine verbesserte Herdtiefe errechnet werden. Im Fall der Bebenserie von Fribourg zeigen diese Untersuchungen neu Epizentren im Deck- und nicht wie ursprünglich vermutet im Grundgebirge an. Weitere Beben mit Anzeichen für flache Herdtiefen gab es u. a. am Walensee,



sowie bei Eglisau und St. Ursanne. Direkt nachweisbar ist dies bei einem engen Netz von Seismometern, wie es idealerweise bei induzierten Beben gezielt aufgebaut worden ist. Als prominentes Beispiel zeigt die Bebenserie von Basel als Folge einer Hochdruckinjektion zur Risserweiterung einer geothermalen Tiefbohrung bei Basel einen komplexen zeitlichen Verlauf mit genauen Herdflächenlösungen.

Für das Mittelland ergeben sich fast horizontale Dehnung und eine vertikal stark streuende Hauptspannung Richtung SE bis SSE (ca. 150° C) mit Horizontal scherender Bewegung oder Abschiebung. Kompression beschränkt sich auf den Alpenrand bzw. die subalpine Molasse. Zum Teil lässt sich zeigen, dass Grund- und Deckgebirge spannungsmässig entkoppelt sind.

Aus den probabilistischen Analysen der Seismizität auf der Basis paläoseismischer Studien (letzten 15'000 Jahren), historischer (letzte 1000 Jahre) und gemessener Beben (ab 1975) ergibt sich eine potentielle Wiederkehrrate von einigen Hundert bis Tausend Jahren für schwere Beben in den aktivsten Gebieten. In 10'000 Jahren muss nach Ansicht von Prof. Giardini in allen Regionen und nicht vorhersehbar mit dem Eintreten eines Bebens der Magnitude 6.5 bis 7.0 (nach Richter) gerechnet werden. Bei diesen Erdbebenstärken ist grundsätzlich mit einem Versatz bis an die Oberfläche (surface faulting) zu rechnen. Zur Verbesserung des Kenntnisstandes betreffend Seismizität wird eine Verdichtung des Mikrobebennetzes gefordert.

Wiederkehrraten von Beben wurden in der Region Basel, u. a. mit geomorphologischen Untersuchungen sowie mit Seeablagerungen in der Zentral- und Nordschweiz rekonstruiert. Für die Region Basel wird durch eine Abfolge von Versätzen des Basel-Reinach-Bruches eine Wiederkehrrate von ca. 2'000 Jahren für schwere Beben abgeleitet, die durch Seesedimente teilweise bestätigt wird (verlandeter Seewener See und Bergsee bei Bad Säckingen). Das letzte dieser Beben ist das 1356 Ereignis ($M_w=6.9$), welches auch zu zahlreichen Bergstürzen im Jura führte. In der Zentralschweiz wurden in den letzten 15'000 Jahren sechs Starkbeben nachgewiesen, wobei das letzte 1601 stattfand ($M_w=6.2$). Diese schweren Beben haben in den Seen massive subaquatische Abbrüche und Rutschungen von Sedimenten, dem Abgang von Schneebrettern vergleichbar, ausgelöst. Drei dieser fünf zentralschweizer Beben lösten gleichzeitig Rutschungen im Vierwaldstättersee und im Zürichsee aus, was laut Modellierungen auf eine Magnitude von 6.5 bis 7 schliessen lässt. Die Wiederkehrraten von Beben sind nahe dem Alpenrand weniger systematisch als in der Region Basel. Im mittleren Holozän zeigt sich sogar eine längere Pause, dafür ist eine höhere Intensität im Spätglazial bis Früh-Holozän festzustellen. Ein kausaler Zusammenhang der unterschiedlichen Wiederkehrrate mit einem durch Eisentlastung geförderten Spannungsabbau am Ende der Eiszeit liegt nahe, ist aber derzeit hypothetisch. Weitere paläoseismologische Arbeiten an Schweizer Seen sind für die Westschweiz geplant oder im Gang. Entsprechende Arbeiten im Bodensee werden vorbereitet.

Zum Verständnis der Geodynamik des Alpenvorlandes bedarf es auch einer Bewertung der geologischen Prozesse in den Alpen. Langfristige Exhumationsraten decken sich nur teilweise mit den aktuellen Hebungsraten. Exhumationsmaxima befinden sich in den Alpen am Mt. Blanc, im Brig-Simplon-Gebiet (bis Domodossola) und östlich des Aar-Massivs im Raum Chur. Die Exhumation der Gesteine, d. h. die Annäherung eines Gesteinspakets aus der Tiefe an die Oberfläche, wird mittels Spaltspurdatering an Apatit (60° - 120° C) und Zirkon (180° - 320° C) oder anhand von Abkühlalter an Muskovit (K/Ar 350 - 400° C, Rb/Sr 500° C) datiert. Die Rekonstruktion der tiefkrustalen Stapelung helvetischer Kristallindecken unter den Externmassiven (NFP20) impliziert, dass sich die Zentren der Exhumation und Hebung im Alpenbogen über Millionen von Jahren nach aussen bewegt haben. Die Rücküberschiebung bei Domodossola war vermutlich bis 5-10 Millionen Jahre vor heute tektonisch aktiv. Sehr junge Apatit-Abkühlalter zwischen 1,5 und 3 Ma zeigen fortschreitende Exhumation in diesem Gebiet an. In der jüngeren Literatur findet sich häufig die Ansicht, die Schweizer Alpen seien seit (weit) mehr als 5 Millionen Jahren tektonisch nicht mehr aktiv (keine Krustenverkürzung). In gewissem Widerspruch dazu zeigen mehrere Beispiele, dass eine Reaktivierung alter Brüche stattgefunden hat. Viele hangparallele anti- und



synthetische Brüche sind als postglaziale gravitative Bewegungen zu deuten, die durch isostatische Hebung nach der Eisentlastung und durch oberflächennahe Dehnung infolge erhöhter Exhumationsraten in der Achse der Alpen angelegt worden sind. Es gibt aber auch eine Reihe neotektonisch aktiver Oberflächenbrüche, die jüngst untersucht wurden, sowie Mischungen zwischen gravitativen und echten tektonischen Brüchen. Ein spektakuläres Beispiel zeigte eine auf das Jahr 1875 korrelierte/datierte Seitenmoräne, die quer zum Talverlauf um 4-5 m sinistral versetzt worden ist, interessanterweise ohne das eine Fortsetzung auf der anderen Talseite identifizierbar ist. Ein anderes Beispiel zeigte einen 8000 Jahre alten, versetzten bzw. deformierten Lösshorizont. Eine Modellierung der nacheiszeitlichen Eisentlastung (Persaud & Pfiffner 2004, Tectonophysics) ergab einen kurzzeitig erfolgten isostatischen Ausgleich mit einer maximalen Gesteinshebung von 167 m im Gebiet der mächtigsten Eisdome mit einer Wellenlänge von 270 bzw. 250 km in Norden bzw. Süden für ein Querprofil der östlichen Schweizer Alpen. Auf der Raumskala eines typischen, vormals eisgefüllten inneralpinen Tals ergab die Modellierung der isostatischen Ausgleichsbewegung für eine typische Zahl hangparalleler Brüche einen Versatz mit talseitiger Hebung von 1 bis 2,5 m, passend zum Geländebefund. Die für die Thematik der Tiefenlagerung wichtigste Botschaft geht dahin, die Alpen als weiterhin schwach tektonisch aktives und von Erdbeben betroffenes Gebirge anzusehen, das weiterhin gegen das Vorland andrückt und, schwer vorhersehbar, die Strukturen am Übergang von subalpiner zu unverfalteter Molasse sowie des Faltenjura aktivieren könnte.

Der Faltenjura liegt in einem Bereich, in dem das Spannungsfeld der Alpen mit dem des Europäischen Riftsystems, also Rhône-Bresse- und Oberrheingraben interferiert. Vermutlich als Folge tektonischer Prozesse wurde die Aare, die ab ca. 10 Ma der Donau tributär war, zum Bresse-Graben abgelenkt (Sundgau-Schotter, 4,2 bis 2,9 Ma), um dann dauerhaft vom Rhein angezapft zu werden. Zwischen den bekannten Vorkommen im Sundgau und im Bresse-Graben konnten durch Schwermineralanalysen Restvorkommen der Schotter in Jura-Karstfüllungen im Gebiet des Doubs nachgewiesen werden. Die Vorkommen bei Besançon belegen, dass das Aare-Rhône System nicht entlang der Front des Faltenjura verlief, sondern diesen im Verlauf des heutigen Doubs abschnitt. Fossile Mäanderschlingen des Doubs in einer Antiklinale, datiert auf das letzte Glazial, deuten auf eine geringe differenzielle Hebung (Gesamthebung ca. 0,2 mm pro Jahr), also vermutlich anhaltende schwache Kompression der Antiklinale hin.

In der Diskussion zum abschliessenden Vortrag zur technischen Machbarkeit eines Tiefenlagerbauwerks in Hinblick auf Erdbeben wurde deutlich, dass ein Lager für SMA gemäss den Vorgaben aus dem Pegasos-Projekt auf Erdbeben ausgelegt werden kann. Für ein HAA-Lagerkonzept ist zu beachten, dass in den Einlagerungsstollen Einbauten aus Stahl und Beton auf ein Minimum beschränkt werden. Entsprechende Konzepte für ein sukzessives Auffahren, Befüllen und Verschliessen der Lagerstollen sind heute vorhanden und würden für die Realisierung noch im Detail weiter zu entwickeln sein, wofür genügend Zeit zur Verfügung steht. Der Gefahr eines tektonischen Scherbruchs durch das Lager bzw. einen Lagerbehälter ist sowohl in Schweden in Kristallingestein als auch durch die Nagra im Opalinuston rechnerisch untersucht worden. Gemäss Aussage der Nagra würden im schweizerischen Konzept die vorgesehenen - Endlagerbehälter, umgeben von einem Mantel von 75 cm Bentonit, einen grösseren Versatz als die in Schweden modellierten 20 cm aushalten. Die Schaffung neuer Wegsamkeiten im Gestein durch Erdbeben ist ein weiterer Aspekt, der bei der geologischen Tiefenlagerung sorgfältig zu untersuchen und zu bewerten ist. Da solche Vorgänge technisch nicht zu verhindern sind, müsste ein Tiefenlager möglichst in solchen Gesteinsformationen plaziert werden, wo derartige Prozesse keine langfristigen Auswirkungen auf das Gestein und die Langzeitsicherheit haben (plastische Gesteine mit Selbstabdichtungsvermögen).



3 Plenumsdiskussion

Die kurze Plenumsdiskussion betonte die Dringlichkeit einer Verdichtung der Messnetze für Seismizität (Mikrobebennetz) und GPS. Namentlich die oberflächennahen und schwachen Beben in 1 bis 3 km Tiefe können aus methodischen Gründen nur durch ein dichtes Beobachtungsnetz analysiert werden und die Aussagekraft der Daten steigt mit der Zahl der Beben und damit auch der Länge des Beobachtungszeitraumes. Entsprechend sollte die Verdichtung möglichst bald umgesetzt werden. Das gilt sinngemäss auch für das GPS-Netz.

Von den zukünftig seitens der Nagra geplanten 3D-Seismik in potenziellen Standortgebieten ist im Deckgebirge eine stark verbesserte räumliche Auflösung der Lagerungsverhältnisse der Sedimentschichten und allfälliger Bruchstrukturen zu erwarten. Flankierende Untersuchungen zu potentiell neotektonisch aktiven Störungen mittels eines hochauflösenden LIDAR-Geländemodells sind bereits im Gang. Eine für 2010 geplante Präzisionsnivellement-Wiederholungsmessung in Südbaden wird den bestehenden Datensatz zum Hebungs- und Senkungsmuster weiter verbessern. Weitergehende konkrete Untersuchungsansätze und andere Themen wurden aus Zeitgründen nicht diskutiert.



Beilage 1: Programm des Kolloquiums:

09:00 – 09:05 Uhr Begrüssung (Prof. Dr. S. Löw, Präsident KNE)

09:05 – 11:00 Uhr (Chairman PD Dr. M. Rahn)

- **Dr. M. Schnellmann (25+5):** Neotektonik der Nordschweiz: Bisherige und geplante Arbeiten der Nagra und Bedeutung für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers
- **A. Wiget (15+5):** Geodätische Überwachungsnetze in der Schweiz
- **Prof. Dr. A. Geiger (20+5):** Kinematik der Eurasisch-Afrikanischen Plattengrenzen und das Verhalten des nordschweizerischen Alpenvorlandes: Rückschlüsse aus GPS-Daten und Vergleiche mit Seismizität
- **Dr. K. Zippelt (15+5):** Vertikalbewegungen aus Präzisionsnivellements im Raum Bodensee Südschwarzwald-Nordostschweiz
- **Dr. A. Schlatter (15+5):** Rezente Hebungsraten der Nordschweiz

11:00 – 11:20 Uhr Kaffeepause

11:20 – 12:40 Uhr (Chairman Prof. Dr. J. Kuhlemann)

- **Dr. N. Deichmann (40+10):** Seismotektonik und Spannungsfeld der Nordschweiz
- **Prof. Dr. D. Giardini (20+10):** Beurteilung der Erdbebengefährdung in der Nordschweiz: heutiger Standpunkt und offene Fragen

12:40 – 14:10 Uhr Mittagspause

14:10 – 15:40 Uhr (Chairman Prof. Dr. S. Löw)

- **Prof. Dr. F. Anselmetti (20+10):** Paläoseismologie nördlich der Alpen
- **Prof. Dr. A. Pfiffner (20+10):** Neotektonik der Zentralalpen: Hebungen, Abtrag und Bruchbildung seit dem Pliozän
- **Dr. H. Madritsch (20+10):** Ergebnisse des EUCOR-URGENT-Projekts: Geomorphologische Indizien für Neotektonik an der Schnittstelle Rheingraben-Faltenjura

15:40 – 16:00 Uhr Kaffeepause

16:00 – 17:30 Uhr (Chairman Prof. J. Kuhlemann)

- **P. Zwicky & P. Wörndle (20+10):** Erdbeben und mögliche Auswirkungen auf ein Tiefenlagerbauwerk
- **Plenumsdiskussion, Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

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

- Diskussion, Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.



Beilage 2: Abstracts der Vortragenden (soweit vorhanden)

Neotektonik der Nordschweiz: Bisherige und geplante Arbeiten der Nagra und Bedeutung für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers

Michael Schnellmann, Nagra, e-mail: Michael.Schnellmann@nagra.ch

Die Geologie der Nordschweiz wird seitens der Nagra seit den frühen achtziger Jahren intensiv untersucht. Durch 2D-Seismik-Kampagnen, Tiefbohrungen, Kartierungen und Auswertung Daten Dritter konnte das Verständnis der regionalen tektonischen Situation und Entwicklungsgeschichte deutlich verbessert werden. Im Zürcher Weinland wurden die Schichtgeometrie und das Strukturmuster mit 3D-Seismik im Detail abgebildet. Bezüglich Neotektonik trugen Erdbebenmessnetz, geodätische Messungen, Spannungsmessungen, geomorphologische Studien und Beckenmodellierungen viel zum heutigen Verständnis bei.

Die wichtigsten sich zum Teil überlagernden tektonischen Baueinheiten der Nordschweiz sind der Rheingraben im Westen, der Hegau-Bodenseegraben im Nordosten, das Juragebirge im Südwesten, sowie der WSW-ENE verlaufende Nordschweizer Permokarbondrog. Verschiedene Methoden (Betrachtungszeiträume 102 bis 107a) zeigen für die Nordschweiz Erosionsraten von <0.2 mm/a. Mit GPS (Betrachtungszeitraum letzte 5-20 a) gemessene horizontale Bewegungen betragen über den Schweizer Alpenbogen $<1-2$ mm/a. Blattverschiebungen und Abschiebungen dominieren die Herdflächenlösungen. Die horizontale Hauptspannungsrichtung liegt NW-SE bis N-S, mit Hinweisen auf Entkopplung zwischen Grund- und Deckgebirge.

Durch die Wahl eines geologischen Grossraums mit geringen Hebungs- und Erosionsraten einerseits und einer genügend grossen Tiefenlage andererseits soll sichergestellt werden, dass eine Freilegung des Tiefenlagers frühestens zu einem Zeitpunkt geschieht, zu welchem die Radionuklidtoxizität der eingelagerten Abfälle soweit zerfallen ist, dass die Freilegung des Lagers zu keinen regionalen radiologischen Auswirkungen führt, welche deutlich höher sind als die bestehende natürliche radiologische Belastung (behördliche Vorgabe). Dekompaktion kann bereits vor der Freilegung zu einer erhöhten Durchlässigkeit im Wirtgestein führen. Dieser Effekt ist wirtgesteinsabhängig und im Fall des Opalinustons auf die obersten Dekameter unter der Erdoberfläche limitiert. Die Freilegung und der Einfluss der durch Dekompaktion erhöhten Durchlässigkeit werden mit Modellrechnungen zur Ausbreitung der Radionuklide und unter Berücksichtigung des Zerfalls analysiert. Aus den Modellrechnungen ergibt sich eine Zeitdauer von 100 ka für SMA und für 1 Ma für HAA bis eine Freilegung des Lagers akzeptiert werden kann, der so genannte Betrachtungszeitraum.

Differenzielle Bewegungen (seismisch und aseismisch) im Lagerbereich sind in erster Linie im Hinblick auf die Entstehung neuer Wasserwegsamkeiten (Radionuklid Ausbreitung) relevant. Grössere Bewegungen werden sich im Betrachtungszeitraum bevorzugt an bestehenden grösseren Störungen abspielen. Diese werden bei der Platzierung von Lagerkammern gemieden. Regionalen Störungszonen wurde bereits bei der Auswahl von Vorschlägen für geologische Standortgebiete (SGT Etappe 1) ausgewichen. Zukünftige seismische Untersuchungen, sowie geologische Aufnahmen während des Baus erlauben eine optimale Platzierung der Lagerkammern bezüglich bestehender Störungen. In Bezug auf Bewegungen an kleineren Störungen, welchen nicht ausgewichen werden kann, sowie in Hinblick auf allfällige neue Störungen ist die Wahl eines Wirtgesteins mit Selbstabdichtungsvermögen wichtig. Für den Opalinuston wurde ein solches durch verschiedene Untersuchungen im Felslabor Mont Terri und in Tiefbohrungen, sowie durch Beobachtungen in Strassen- und Eisenbahntunnels aufgezeigt.

Seismische Bewegungen ausserhalb des Lagerbereichs betreffen ein Tiefenlager nur indirekt über die resultierenden Erschütterungen; die Oberflächen- und nicht verfüllten untertägigen Anlagen müssen – wie andere wichtige Anlagen – auf zu erwartende Bodenbeschleunigungen und



Wiederkehrzeiten ausgelegt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Lagerkammern während der Betriebszeit jeweils nur für kurze Zeit offen gehalten und dann verfüllt werden.

In Hinblick auf Neotektonik sind in näherer Zukunft folgende regionale Arbeiten geplant:

Verdichtung Schwachbeben- und GPS-Messnetze Nordschweiz, Auswertung neu gemessener Nivellement-Daten, neo-(tektonische) Analyse verschiedener Fernerkundungsdaten (insbesondere DTM-AV), strukturgeologische Feldaufnahmen, Datierung quartärer Schotter. In Hinblick auf ein Rahmenbewilligungsgesuch sind in Etappe 3 SGT zudem standortspezifische Detailuntersuchungen (u. a. Seismik, Bohrungen) geplant.

Geodätische Überwachungsnetze in der Schweiz

Adrian Wiget, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bereich Geodäsie, 3094 Wabern, e-mail: Adrian.Wiget@swisstopo.ch

Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo ist verantwortlich für den Aufbau und Unterhalt der geodätischen Bezugssysteme und Bezugsrahmen¹ der Schweiz. Diese bilden die geometrische Grundlage für alle raumbezogenen Geobasisdaten des Bundesrechts. Im vergangenen Jahrhundert wurden die Lage- und Höhenbestimmungen auf die Landestriangulation (1.- 3. Ordnung) und das Landesnivellement abgestützt. Ende der 1980er Jahre begann swisstopo mit dem Aufbau der Landesvermessung 1995 (LV95), welche auf satellitengestützten GPS-Messungen beruht. Der neue, dreidimensionale geodätische Bezugsrahmen LV95 wird durch ca. 200 über die ganze Schweiz verteilte Vermessungsfixpunkte materialisiert, deren Lagekoordinaten mit einer Genauigkeit von 1 cm oder besser bestimmt worden sind. Dieses Netz von passiven Referenzpunkten wurde um die Jahrtausendwende durch das Automatische GNSS²-Netz Schweiz (AGNES) ergänzt. Es besteht aus 31 Permanentstationen, welche laufend Messungen zu GPS- und GLONASS-Satelliten durchführen und deren 3D-Koordinaten täglich bestimmt werden. Die GNSS-Permanentstationen dienen auch als Referenzstationen für differentielle Positionierungen und Echtzeitanwendungen mit dem Positionierungsdienst swipos[®].

Die aktuellen Grundlagennetze sind als Referenz für landesweite, genaue Positionierungen in Lage und Höhe (und damit 3D) sowie für die Bestimmung der Schwere genügend. Dank den verbesserten Genauigkeiten nimmt aber das Interesse an den Änderungen der Koordinaten und Höhen der Referenzpunkte zu. Die Bestimmung von Hebungen, Senkungen, horizontalen Verschiebungen oder Schwereänderungen wird zu einer wichtigen Aufgabe der Geodäsie. Während für die nationalen Vermessungsaufgaben statische Bezugsrahmen (Koordinatensysteme) verwendet werden, arbeitet swisstopo im Projekt "Swiss4D" an der Entwicklung eines kinematischen 3D-Modelles für die Schweiz, welches primär für wissenschaftliche Studien von Interesse ist.

Für Höhenänderungen liefern die seit über hundert Jahren durchgeführten Nivellementmessungen im Landesnivellement wertvolle Resultate (vgl. Vortrag von A. Schlatter an diesem Symposium). Dagegen können erst seit dem Einsatz der GPS-Messungen zuverlässige Aussagen über landesweite horizontale Verschiebungen gemacht werden. Nach der Erstellung und Erstmessung des GPS-Landesnetzes LV95 in den Jahren 1989 bis 1994 wurden die 200 Stationen 1998 und 2004 erneut gemessen. Bereits 1988 wurde in der Nordschweiz im Auftrag der Nagra ein Netz von 25 Kontrollpunkten erstellt, geologisch klassifiziert und erstmals gemessen (Netz "Neotektonik Nordschweiz"). Ziel war ein Referenznetz für die Bestimmung von "rezenten Krustenbewegungen" im Raum Basel – Zürich – Schaffhausen. Auch dieses Netz wurde in den Jahren 1995, 1998 und 2004 nachgemessen. Dazu wurden die Kontrollpunkte pro Messkampagne während

¹ Geodätische Bezugsrahmen sind die Realisierungen der Bezugssysteme in der Form von Koordinatensätzen terrestrischer Punkte

² GNSS = Global Navigation Satellite Systems (GPS, GLONASS, Galileo, etc.)



zwei bis drei Nächten stationiert und deren Koordinaten mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt [NAB 06-04].

Durch eine lineare Approximation der gemessenen horizontalen Koordinatendifferenzen über die Zeit werden für alle Punkte horizontale Geschwindigkeiten geschätzt. Die Geschwindigkeitsvektoren sind abhängig von der gewählten Referenzstation. Relativ zur Geostation Zimmerwald sind die Beträge der geschätzten horizontalen Geschwindigkeiten in der Schweiz < 2 mm/Jahr und somit in der gleichen Grössenordnung wie die vertikalen Geschwindigkeiten gegenüber Aarburg. Es gilt aber zu beachten, dass die Geschwindigkeiten meist kleiner sind als ihre Bestimmungsgenauigkeit und damit (noch) nicht als signifikant betrachtet werden können. Insbesondere grossräumige Analysen sind mit Vorsicht zu beurteilen, da die epochenweise Bestimmung der Koordinaten nicht alle systematischen Messfehler aufdecken kann. Die früheren Bestimmungen (Ende der 1980er, anfangs 1990er Jahre) mussten noch mit wenigen Satelliten und relativ kurzen Messzeiten durchgeführt werden und spezifische Einflüsse der Atmosphäre oder der Geometrie der Satellitenbahnen können in den damaligen Messungen nicht ganz ausgeschlossen werden. Für die Verformungsanalyse wird schliesslich durch Differenzieren des Geschwindigkeitsfeldes das entsprechende Gradientenfeld (Strain-Tensorfeld) berechnet, welches unabhängig von der Wahl einer Referenzstation ist.

Der grosse Vorteil der Permanentmessungen im AGNES liegt in der kontinuierlichen Bestimmung der Koordinaten der Stationen und damit in der hohen zeitlichen Dichte der Messungen. Im Gegensatz zu den kampagneweisen Einzelbestimmungen lassen die Zeitserien der Permanentstationen die gesamte Variation der Koordinatenbestimmungen erkennen. Daraus können einerseits Charakteristiken systematischer Messfehler resp. Parameter für deren Elimination bestimmt werden. Andererseits geben die Messreihen wertvolle Hinweise zu möglichen, evtl. periodischen lokalen Schwankungen der Lage und Höhe der Permanentstationen, welche von den tektonischen Bewegungen zu separieren sind. Ein weiterer Vorteil liegt in der Tatsache, dass die schweizerischen Stationen zusammen mit europäischen GNSS-Stationen ausgewertet werden und damit auch die Geschwindigkeiten in Relation zu europaweiten Referenznetzen aufgezeigt werden können. Die (vorläufigen) Nachteile der Bestimmung von horizontalen Geschwindigkeiten in der Schweiz aus dem Permanentnetz AGNES liegen in der reduzierten Anzahl der Stationen (31) und in der noch kurzen Messreihe (seit ca. 1999). Aktuelle Informationen und Daten sind unter <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/topics/survey/permnet/pnac.html> abrufbar.

Referenzen:

Brockmann E., Ineichen D., Wiget A. (2005): Neumessung und Auswertung des GPS-Landesnetzes der Schweiz LV95. Geomatik Schweiz 8/2005, pp. 440 - 444, August 2005.

Egli R., Geiger A., Wiget A. and H.-G. Kahle (2007): A modified least-squares collocation method for the determination of crustal deformations: first results in the Swiss Alps. Geophysical Journal International, Volume 168, Number 1, pp. 1 - 12, January 2007.

Wiget A., Schlatter A., Brockmann E., Ineichen D., Marti U. und Egli R. (2007): Messkampagne im Auftrag der Nagra und Deformationsanalyse 1988 – 1995 – 2004. Nagra Arbeitsbericht NAB 06-04, Revision August 2007.

Weitere Informationen:

<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/topics/survey/sys.html>



Rezente Hebungsraten der Nordschweiz (aus Präzisionsnivellements der Landesvermessung)

Andreas Schlatter, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 3084 Wabern, e-mail: Andreas.Schlatter@swisstopo.ch

Ziele des Vortrags

Der Vortrag hat zwei wesentliche Ziele. Einerseits sollen die Hebungs- und Senkungsraten aufgrund von Landesnivellementmessungen in der Schweiz und im speziellen in der Nordschweiz aufgezeigt werden. Diese Resultate werden oft als Hinweis und Interpretationsgrundlage für rezente tektonische Vertikalbewegungen verwendet. Andererseits soll dargelegt werden, auf welchen Grundlagen diese Resultate basieren, wo die Grenzen der Aussagekraft (Signifikanz) liegen und wo die Ursachen für abweichende Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertungen zu suchen sind.

Landesnivellement: Methode und Punkte

Die Messungen beruhen auf der Methode des Präzisionsnivellements, welches eine sehr hohe Nachbargenauigkeit aufweist ($< 0.6 - 0.8$ mm/km). Das Nivellement erweist sich allerdings bezüglich der Fehlerfortpflanzung und der Kontrolle gegenüber systematischen Fehler (falscher Lattenmassstab, Refraktionseinflüsse) als schlechte Messmethode.

Das Netz der Landesnivellementmessungen (ca. 4'000 km) bildet die Grundlage und Referenz für die Höhenangaben der Schweiz. Die Linien führen entlang den Hauptverkehrsachsen, wie sie anfangs des 20. Jahrhunderts vorlagen. Aktuell liegen ca. 8'000 Punkte vor (ca. 2 Pkt./km). Höhenfixpunkte befinden sich primär an Gebäuden oder anderen festen Bauten und (im Mittelland eher selten) im Fels. Die Stabilität dieser Bauten ist wesentlich vom Untergrund abhängig.

Landesnivellement und Hebungsraten: Voraussetzungen, Resultate und deren Signifikanz

Die Grundvoraussetzung, um aus Nivellements Hebungsraten zu ermitteln, sind wiederholte, zeitlich versetzte Messungen auf identischen Punkten. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts sind die Linien mindestens zwei Mal nivelliert worden. Der Erhalt qualitativ einwandfreier Punkte über diesen Zeitraum wird zunehmend ein Problem resp. man muss sich mit dem begnügen, was noch vorhanden ist und neue Punkte anlegen, welche für künftige Messungen dienen. Mit der ersten Wiederholungsmessung der gesamten Linie zwischen Basel - Gotthard - Chiasso konnte bereits 1973 deutlich der Einfluss der Alpenhebung gezeigt werden. Sie deckte aber auch die Probleme mit älteren Holzlattenmessungen (< 1914) über den Hauenstein auf (sichtbare Korrelation der Hebungen mit der Topografie).

Die aktuellen Studien zeigen maximale positive Höhenänderungen im Alpenraum von bis zu 1.5 mm/a relativ zu einem Referenzpunkt in Aarburg am Jurasüdfuss. Im Alpenvorland insb. in der Nordschweiz liegen die Werte durchwegs unter ± 0.4 mm/a und überschreiten nur in seltenen Fällen die Signifikanzgrenze (doppelte Standardabweichung resp. Signifikanzniveau 95 %). Eine Korrelation mit der Höhenlage der Punkte (bspw. verursacht durch Massstabsprobleme in einzelnen Messepochen) ist zumindest im Alpenraum nicht nachweisbar.

Signifikanzangaben gelten in der Regel immer relativ zum Referenzpunkt, welcher frei wählbar ist. Grundsätzlich können aus Nivellementmessungen auch nur relative Höhenänderungen berechnet werden. Die Signifikanz eines Resultates ist hauptsächlich durch zwei Grössen geprägt: vom Abstand zum Referenzpunkt sowie vom zeitlichen Abstand zwischen den Messepochen. Um bspw. in der Nordschweiz nahezu signifikante Resultate in der zu erwartenden Grössenord-



nung (± 0.5 mm/a) nachzuweisen, nützt es wenig, Messungen bereits nach 5 Jahren zu wiederholen.

Hinweise zur Interpretation

Die langjährigen Erfahrungen bei swisstopo mit Messungen und Auswertungen von Präzisions-Nivellementmessungen führen zu folgenden Hinweisen:

Hebungsraten (wie allgemein die Resultate aus geodätischen Messungen) sollten immer mit Angaben zur Signifikanz publiziert und interpretiert werden. Es ist nur von Vorteil, die Messungen und insbesondere die Punkte zu "kennen", d. h. im Feld zu begehen und bezüglich der geologischen Eignung zu beurteilen. Mit Nivellementmessungen in der Schweiz werden einzelne, diskrete Zustände der Punkte über max. 100 Jahre gemessen. Dies ist bei zeitlichen Extrapolationen zu berücksichtigen. Grundsätzlich geben die Höhenänderungen Hebungen resp. Senkungen wieder und nicht etwa Freilegungen (Exhumation) resp. Versenkungen. Deren Ursachen sind vielfältig und meist nicht in die Einzelkomponenten aufteilbar. Häufigste Gründe sind: Kompaktionen der Quartärgeologie (beschränkt stabiler Baugrund), Grundwasserschwankungen, rezente Tektonik insb. isostatische Ausgleichsbewegungen, postglaziale Ausgleichsbewegungen, Permafrost, Rutschungen etc. und zunehmend auch anthropogene Ursachen (insb. grössere bauliche Änderungen in der Umgebung der Punkte).

Hebungsraten in der Nordschweiz

Bereits seit 1984 werden im Auftrag der Nagra in der Nordschweiz Untersuchungen, gestützt auf Landesnivellementmessungen, durchgeführt. Der grösste Teil der analysierten Höhenfixpunkte wurden im Feld durch Geologen aufgesucht und bezüglich ihrer Eignung taxiert. Die neusten Auswertungen (zusammen mit Messungen im süddeutschen Raum) zeigen auf den als geeignet beurteilten Punkten und gegenüber dem Referenzpunkt in Laufenburg Hebungen und Senkungen, welche den Betrag von 0.5 mm/a nur in ganz seltenen Fällen überschreiten. Statistisch betrachtet wird die Nullhypothese (keine Bewegung gegenüber der Referenz) ebenso selten widerlegt (Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$). Im Unterschied zur grossräumigen Betrachtung können grössere lokale Gradienten in den Hebungsraten durchaus signifikant sein und auf lokale Störungen hinweisen.

Das Einbeziehen der süddeutschen Messungen hat doch zu beachtlichen Änderungen der Hebungsraten von bis 0.25 mm/a entlang der Linie Klettgau - Schaffhausen - Bodensee - St. Margrethen gegenüber älteren Publikationen geführt. Allerdings befinden sich diese Änderungen immer noch innerhalb des Schwankungsbereichs aufgrund der Messunsicherheit. Entlang dem Südufer des Bodensees liegen zudem die ältesten Messungen vor (1910/1943) und unterliegen somit einem starken Einfluss durch neuere, angrenzende Nivellements.

Ausblick

Grundsätzlich lohnen sich Neumessungen nur, wenn sie einen entsprechenden zeitlichen Abstand zu den letzten Messungen aufweisen. Eine Verifikation der jetzigen Resultate ist allenfalls mit den umfangreichen Neumessungen möglich, welche erst seit 2006 im Raum Bodensee und Schaffhausen von swisstopo und dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg durchgeführt wurden. Die Auswertungen der GPS-Permanentstationen an swisstopo liefern eine Bestätigung der Alpenhebungen und zeigen auch, dass die Hebungsraten gegenüber dem europäischen Festland sogar noch leicht höher sind (> 2.0 mm/a). Gesamteuropäische Auswertungen von Permanentnetzen zeigen auch, dass die postglazialen Hebungen in Skandinavien mit bis zu 15 mm/a bedeutend grösser sind. GPS- resp. GNSS-Messungen erlauben, in zeitlich wesentlich kürzeren Abständen adäquate Resultate zu gewinnen. Sie sind daher für die Zukunft eine nützli-



che Ergänzung zu den relativ aufwändigen und kostenintensiven Präzisionsnivellement-Messungen.

Vertikalbewegungen aus Präzisionsnivellements im Raum Bodensee - Südschwarzwald - Nordostschweiz

Karl Zippelt, Geodätisches Institut, Univ. Karlsruhe, e-mail: karl.zippelt@kit.edu

Süddeutschland und die benachbarten Gebiete sind zwar ein tektonisch interessantes und aktives Gebiet, trotzdem werden die vertikalen Bewegungsraten als sehr niedrig/gering eingeschätzt, so dass nur in speziellen Gebieten Werte über 0.5 mm/a bis maximal 1.0 mm/a erwartet werden. Um solch kleine Bewegungsraten nachzuweisen bedarf es möglichst genauer geodätischer Messungen, die zudem über einen möglichst langen Zeitraum mehrfach wiederholt und verteilt sind. Außerdem bedarf es spezieller Auswertelgorithmen. Neben GPS-Messungen, die insbesondere zukünftig hierzu verwendet werden können, bieten derzeit die Präzisionsnivellements der offiziellen Vermessungsverwaltungen das Datenmaterial zur Bestimmung vertikaler Bewegungsraten. Sie liegen über einen langen Zeitraum (in Süddeutschland ab 1922) in mehrfacher Wiederholung (bis zu 5-fach) vor und wurden mit einer hohen Genauigkeit durchgeführt. Aus dem verfügbaren Datenmaterial konnte ein Netz gebildet werden, das entlang den jeweiligen Linien eine hohe Punktdichte aufweist. Nachteilig ist jedoch, dass innerhalb der Schleifen, die durch die Linien gebildet werden, keine Bewegungsraten ableitbar sind. Das analysierte Nivellementnetz, bestehend aus Daten des südlichen Baden-Württemberg, der Nordschweiz und einigen Linien aus Bayern und Österreich, enthält 11823 Einzellinien die 5026 Punkte verbinden. Aufgrund der zeitlichen Verteilung der Messungen über mehrere Jahrzehnte werden zur Analyse kinematische Modelle benutzt, die überwiegend von linearen Bewegungen der Netzpunkte ausgehen.

Der Referenzrahmen zur Festlegung des Bewegungsniveaus wird repräsentiert durch einen Punkt in Laufenburg (CH). Dieser Punkt liegt in einem massiven Gneisblock und wurde in einer geologischen Begutachtung als sehr stabil eingestuft. Dies hat zur Konsequenz, dass alle präsentierten Bewegungsraten auf diesen Punkt und seine Stabilität bezogen sind. Außerdem wird sich die Signifikanzbewertung der Bewegungsraten weitgehend als entfernungsabhängig zu diesem Punkt ergeben.

Die berechneten Bewegungsraten werden in verschiedenen Formen visualisiert und interpretiert. Um einen schnellen Überblick über die erzielten Ergebnisse zu erhalten werden die entlang den Linien berechneten ungleichmäßig verteilten Bewegungsraten, die mathematisch von Ausreißern zu bereinigen sind, über einen vorgegebenen Algorithmus ein äquidistantes digitales Bewegungsraster interpoliert. Die im ausgewerteten Gebiet berechneten Bewegungsraten können nun in flächenhaften Niveauschichten dargestellt werden. Aufgrund der gewählten Visualisierung und Farbcodierung erkennt man sofort, dass die in der Einleitung aufgestellte Annahme von sehr geringen Bewegungsraten weit verbreitet zutrifft. Sowohl in der Molasse als auch in weiten Bereichen des Südschwarzwaldes dominieren geringe Bewegungsraten. Diese Werte sind so gering, dass sie die Signifikanzschwelle nicht erreichen, so dass die Gebiete als stabil gegenüber dem Referenzpunkt gelten. Trotzdem dieser allgemeinen Einstufung sind in dieser Darstellung einige bemerkenswerte Bereiche erkennbar. Hierzu zählt z. B., dass sich südlich von Freiburg der Rheingraben klar vom Grundgebirge des südlichen Schwarzwaldes abgrenzt. Während im Rheingraben Senkungen bis zu -0.6 mm/a vorherrschen, erscheint nach Überschreiten der Ost- randverwerfung das Grundgebirge des südlichen Schwarzwaldes als eine sehr stabile Region. Lediglich im Feldberggebiet wird diese Stabilität durch ein sehr begrenztes Hebegebiet mit bis zu +0.5 mm/a unterbrochen. Wechselt man vom Grundgebirge nach Süden in den Bereich des Dinkelberges, so wird das bisherig ruhige Bewegungsmuster sehr bewegt und erreicht Sen-



kungswerte bis zu 0.5 mm/a. Die Region des Dinkelberges senkt sich also gegenüber dem Grundgebirge, außerdem ist nun keine Abgrenzung zum vorgelagerten Rheingraben erkennbar. Östlich dieser Region fällt ein ausgedehntes Senkungsgebiet auf das weitgehend mit dem Wutachtal zusammenfällt. Da in diesem Netzbereich die Netzgeometrie jedoch einige Schwächen aufweist, wird dieses Senkungsgebiet als unsicher betrachtet. Allerdings gilt zukünftig noch zu untersuchen, ob sich hier Auswirkungen des Wutachgrabens zeigen.

Als weitere bemerkenswerte Region erscheint der Bereich von Oberschwaben, der nördlich des Bodensees liegt. Hier fallen zwei regional begrenzte Gebiete auf, die Hebungen bis zu +0.6 mm/a in einem ansonsten stabilen Umfeld aufweisen. Betrachtet man hier das Bewegungsverhalten von West nach Ost, so ist ein nahezu periodischer Wechsel von Senkung zu Hebung zu Senkung zu Hebung zu Senkung zu erkennen. Ob es sich hierbei um Zufall oder eine tektonische Erscheinung (z. B. eine regionale Faltung) handelt, bedarf weiterer Untersuchungen. Insbesondere muss geklärt werden, inwieweit die mechanischen Voraussetzungen für eine solche Faltung gegeben sind.

Für nahezu den gesamten Raum der Schweizerischen Molasse zeigen sich im Niveauschichtenbild sehr geringe Bewegungsraten ($< \pm 0.2$ mm/a) die zudem auf keine speziellen Strukturen hinweisen.

Während die Darstellung in Niveauschichten einen guten Überblick gibt, kann durch die Darstellung der punktbezogenen Bewegungsrate sowie der dazu gehörenden Standardabweichung eine wesentlich höhere Informationsdichte erreicht werden. Es wird deutlich, wie sich die im Niveaubild diskutierten Bewegungscharakteristika im Detail darstellen und an welchen Stellen Ausreißer vorhanden sind, die wiederum auf aktive Störungsstrukturen hinweisen können. Die Bewegungsraten lassen sich einerseits als Balkengrafik gemeinsam mit den dazugehörigen Standardabweichungen lagegetreu in die Netzkonfiguration eintragen, andererseits können sie auch entfernungstreu entlang der analysierten Nivellementlinien dargestellt und mit den genauen Ortsbeschreibungen ergänzt werden. Ein graphischer Vergleich der Bewegungsraten mit dem Verlauf der Topographie zeigt, ob es zwischen Bewegungsraten und Topographie eine Korrelation gibt, so dass eventuell untersucht werden muss, ob in einer der analysierten Messungen ein Maßstabsfehler vorliegt. Beide Visualisierungsarten werden beispielhaft für den Bereich des südlichen Schwarzwaldes gegenüber gestellt, wobei in der Balkengrafik die zuvor beschriebene Charakteristik der Bewegungsraten nun im Detail erkennbar ist:

- Senkung des Rheingrabens zwischen Freiburg und Müllheim mit einer klaren Abgrenzung des Schwarzwaldes durch die Ostrandverwerfung des Rheingrabens. Im südlichen Rheingraben dominieren zwar weiterhin Senkungen, diese sind jedoch weniger ausgeprägt. Weiterhin können keine tektonischen Strukturen in diesen Senkungen erkannt werden.
- Im Bereich des kristallinen Grundgebirges liegen weit verbreitet geringe Bewegungsraten vor. Es wird nun aber ersichtlich, dass nicht nur in der Feldbergregion sondern auch in anderen Gebieten minimale Hebungsraten auftreten.
- Der Dinkelberg und der vorgelagerte Rheingraben bis in die Region von Basel grenzen sich durch teilweise signifikante Senkungen gegenüber dem Grundgebirge klar ab.
- Der Bereich um Waldshut und das Wutachtal ist geprägt durch Senkungen, die aus statistischer Sicht sicherlich als signifikant zu bewerten sind, die jedoch wegen einer schwachen Netzgeometrie einer weiteren Überprüfung bedürfen.

In der Vergleichsgrafik für die Linie Neustadt/Schwarzwald – Lörrach werden die vorigen Aussagen über den kristallinen Schwarzwald und den Dinkelberg bestätigt. Außerdem zeigt sich nun, dass es keine erkennbare Korrelation ($r < 0.25$) zwischen Topografie und Bewegungsraten gibt. Dies trifft im Übrigen auf alle anderen Linien auch zu. Allerdings weisen mehrere Ausreißer in



den Bewegungsraten darauf hin, dass eventuell aktive Störungen von dieser Linie gekreuzt werden.

Der Bodensee-Hegau-Graben ist gekennzeichnet durch ein sehr unruhiges Bewegungsverhalten mit ständigen Wechseln zwischen Hebung und Senkung, die überwiegend nicht signifikant sind. Eine Klassifizierung und Zuordnung dieser Bewegungsraten zu geologischen/tektonischen Strukturen kann nicht vorgenommen werden. Dagegen zeichnen sich die bereits im Niveauschichtenbild erkannten und diskutierten Hebungsgebiete um Pfullendorf/Sigmaringen und Ravensburg wiederum klar ab. Es wird ersichtlich, dass die Hebungen in beiden Gebieten weit verbreitet signifikante Werte bis zu 0.6 mm/a erreichen. Während die Hebungen im Raum Pfullendorf/Sigmaringen mit dem konzentrierten Auftreten seismischer Ereignisse zwischen Sigmaringen und Bad Saulgau in Verbindung stehen können, gibt es für das Hebungsgebiet Ravensburg derzeit keine tektonische/seismische Erklärung. Auffallend ist jedoch, dass in den Talauen rund um Ravensburg eher Senkungen vorherrschen, womit der Hinweis gegeben wird, dass hier sedimentäre Einflüsse zu beachten wären. Als großräumige Ursache für die Hebungen nördlich des Bodensees sollten weiterhin Einflüsse der Entlastung nach der letzten Eiszeit in Betracht gezogen werden.

Im schweizerischen Netzteil begrenzt sich die Auswertung auf Linienpunkte, die zuvor geologisch auf ihre Repräsentanz untersucht wurden wodurch gegenüber dem deutschen Netzteil eine wesentlich geringe Punktdichte entsteht. Wie bei der Interpretation des Niveauschichtenbildes bereits angedeutet, wird nun erkennbar, dass im Gebiet der Schweizer Molasse keine signifikanten Bewegungen bestimmt werden konnten. Die punktweise berechneten Bewegungsraten lassen jedoch die Interpretation zu, dass eine leichte Hebungstendenz bis maximal 0.2 mm/a dominiert. Auffallend ist allerdings, dass der Südrand des Juras und ein Querprofil durch den Jura bei Olten erhöhte Hebungsraten aufweisen. Damit liegt die Schlussfolgerung nahe, dass sich der Jura gegenwärtig mit +0.2 mm/a aus seiner Umgebung heraushebt.

Fazit:

Die aus Nivellement berechneten Vertikalbewegungen bieten derzeit die zuverlässigste Information über das rezente Verhalten in den letzten 70 – 100 Jahren. Die wiederholten Nivellements müssen mit kinematischen Modellen analysiert werden, wobei es sich in dieser Untersuchung gezeigt hat, dass auch die Messungen der 2. Ordnung zumindest im deutschen Netzteil einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Informationsdichte leisten können. Aufgrund der hohen Wiederholungsrate ergibt sich, dass Bewegungsraten über ± 0.4 mm/a als signifikant betrachtet werden können, ein Signifikanzniveau, das in keiner anderen vorherigen Untersuchung jemals erreicht wurde. Überwiegend führen die Punkte eine lineare Bewegung durch, lediglich etwa 1% der Punkte müssen durch nichtlineare Bewegungsfunktionen modelliert werden. Die dargestellten Bewegungsraten stellen das Ergebnis aus der Analyse aller bis ins Jahr 2007 verfügbaren Nivellements dar. Erst nach Abschluss der derzeit laufenden Wiederholungsmessungen im deutschen Haupthöhennetz ist etwa im Jahr 2010/11 eine erweiterte Datenbasis für neuere Ergebnisse verfügbar.

Seismotektonik und Spannungsfeld der Nordschweiz

Nicolas Deichmann, Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich, Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich, e-mail: deichmann@sed.ethz.ch

Seit etwa 1983 führt der Schweizerische Erdbebendienst in Zusammenarbeit mit der Nagra detaillierte Studien zur Seismotektonik der Nordschweiz durch. Weitere Untersuchungen sind zurzeit auch im Zusammenhang mit der durch ein Geothermie Projekt in Basel induzierten Seismizität im Gange. Die Resultate dieser Arbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Erdbebenherde in der Nordschweiz sind über die gesamte Kruste verteilt.



- Beben können auch in geringen Tiefen auftreten (1-2 km).
- Die Herdmechanismen der induzierten Beben in Basel stehen im Einklang mit den Mechanismen der natürlichen Seismizität und mit den in situ gemessenen Spannungen im Grundgebirge.
- Die Herdmechanismen in der Nordschweiz entsprechen praktisch ausschliesslich Blattverschiebungen und Abschiebungen.
- Herausragendes Merkmal ist die horizontale und stabile ENE-WSW Ausrichtung der T-Achsen und entsprechender NNW-SSE ausgerichteter Kompression.
- Die Spannungen im Deckgebirge scheinen gegenüber dem Grundgebirge leicht im Uhrzeigersinn gedreht zu sein.

4 Referenzen

Deichmann, N. & Ernst, J. 2009: Earthquake focal mechanisms of the induced seismicity in 2006 and 2007 below Basel (Switzerland). *Swiss J. Geoscience* (submitted).

Deichmann, N. & Giardini, D. 2009: Earthquakes induced by the stimulation of an enhanced geothermal system below Basel (Switzerland). *Seismological Res. Lett.* (accepted).

Deichmann, N., Ballarin Dolfin, D., Kastrup, U. 2000: Seismizität der Nord- und Zentralschweiz. Nagra Technischer Bericht, NTB 00-05, Nagra, Wettingen, 93 pp., Dezember 2000.

Kastrup, U., Deichmann, N., Fröhlich, A., Giardini, D.: Evidence for an active fault below the northwestern Alpine foreland of Switzerland. *Geophys. J. Int.*, 169, 1273-1288, 2007, DOI: 10.1111/j.1365-264X.2007.03413.x

Kastrup, U., Zoback M.-L., Deichmann, N., Evans, K., Giardini, D., Michael, A. J.: Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *J. Geophys. Res.*, 109, B1, DOI:10.1029/2003JB002550B01402, 2004.

Valley, B. & Evans, K.F. 2009: Stress orientation to 5 km depth in the basement below Basel (Switzerland) from borehole failure analysis. *Swiss J. Geosciences* (submitted).

Erdbeben-Jahresberichte des Schweizerischen Erdbebendienstes seit 1996, erschienen jährlich in der zweiten oder dritten Nummer des *Swiss Journal of Geoscience* (früher *Eclogae Geologicae Helveticae*) unter dem Titel *Earthquakes in Switzerland and surrounding regions* (erhältlich auch in leicht abgeänderter Fassung auf <http://histserver.ethz.ch/seismotectonics/reports.php>).

Paläoseismologie nördlich der Alpen Auf der Jagd nach prähistorischen Erdbeben

Flavio S. Anselmetti, Eawag, Dübendorf, e-mail: flavio.anselmetti@erdw.ethz.ch

Die Wiederkehrrate starker Erdbeben (> Mw~6) ist in der Schweiz nördlich der Alpen grösser als der Abdeckungsbereich der instrumentellen und der historischen Erdbebenkataloge, so dass diese Archive keine hinreichende Informationen über mögliche Starkbeben ergeben. Deshalb sind paläoseismische Studien anhand der geologischen Archive nötig, die v. a. mittels Bruchflächen, Seesedimenten und Bergsturzereignissen Daten über solche vergangenen Erdbeben liefern können. Die stärksten historischen Erdbeben erlauben eine Kalibrierung dieser Archive, welche dann auf die prähistorische Zeitperiode ausgedehnt werden kann.



Eine umfassende Analyse wurde für die Region Basel und die Zentralschweiz (inkl. Zürich) durchgeführt. In der Region Basel wurde anhand mehrerer gegrabener Freilegungen des Basel-Reinach Bruches fünf Ereignisse in den letzten ~10'000 Jahren interpretiert, die zu einem Bruchversatz mit anschliessender gravitativer Einebnung der Bruchfläche führte. Als jüngste Bewegung des Bruches wurde das AD1356-Beben identifiziert ($M_w=6.9$), welches ebenfalls zu zahlreichen Bergstürzen führte, die mit Radiokarbonmethode an verschüttetem organischem Material datiert werden konnten. In den Sedimenten des Seewener Sees (heute verlandet) und des Bergsees (Südschwarzwald) konnten zudem zahlreiche Deformationsstrukturen dokumentiert werden, die ebenfalls die postulierte ~2'000 jährige Wiederkehrrate für Starkerdeben in der Region Basel unterstützen.

In der Zentralschweiz konnte kein aktiver Bruch identifiziert werden, hingegen erlauben zahlreiche perialpine Seen mit ihrer regelmässigen Sedimentabfolge einen detaillierten Katalog der paläoseismischen Ereignisse. Eine Kalibrierung wurde mittels vier historischer Erdbeben durchgeführt, darunter das stärkste mit $M_w=6.2$ in AD1601. Diese Kalibrierung ermöglicht eine quantitative Evaluierung der minimal-nötigen lokalen Intensität, welche zur Mikrodeformation oder zur Auslösung unterseeischer Rutschungen auftreten muss. Dabei zeigte sich, dass die lakustrinen sedimentären Archive ab einer Intensität von VII ein Erdbeben aufzeichnen können. Dieser Grenzwert konnte ebenfalls mit geotechnischen Modellierungen in sedimentgeladenen Seeabhängen bestätigt werden, welche minimale Bodenbeschleunigungen ergaben, die sich mit Intensität VII vergleichen lassen. Als aussagekräftigstes Kriterium zum Erkennen von prähistorischen Starkbeben dient das simultane Abgleiten von multiplen Rutschpaketen auf unterseeischen Abhängen. Für die letzten 15'000 Jahre konnten in der Region Vierwaldstättersee sechs Starkbeben (inkl. 1601 AD) nachgewiesen werden, allerdings mit variablen Wiederkehrraten. Drei dieser Beben lösten erstaunlicherweise auch im Zürichsee beckenweite multiple Rutschungen aus, so dass auch dort die lokale Intensität von VII erreicht wurde. Für diese Beben gibt es kein historisches Analog, da das AD1601-Beben schwächer war und im Zürichsee nicht aufgezeichnet wurde. Das regionale Paläointensitätsfeld dieser drei Ereignisse kann mittels Modellierungen in potentielle Paläomagnituden umgerechnet werden, welche je nach epizentraler Lage minimale Magnituden von 6.5 - 7 ergeben. Unter Berücksichtigung negativer Evidenzen (Archive, die keine Deformationsstrukturen während dieser drei Ereignisse zeigen) erscheint eine Aktivierung der alpinen Randüberschiebung (Basis Helvetikum oder subalpine Molasse) am plausibelsten.

Während dem die Region Basel eine eher regelmässige Wiederkehrrate der Starkbeben aufweist, könnte die Häufung der Zentralschweizer Beben zwischen 15'000 und 10'000 Jahre BP eventuell auf die postglaziale Entlastungstektonik zurückzuführen sein. Die minimale Magnitude von 6.5 - 7 verlangt hingegen auf alle Fälle eine Länge der Bruchfläche, die sicher im Rahmen grösserer alpiner Tektonik angelegt wurde.

Neotektonik der Zentralalpen: Hebungen, Abtrag und Bruchbildung seit dem Pliozän

O. Adrian Pfiffner, Institut für Geologie, Universität Bern, e-mail: pfiffner@geo.unibe.ch

Das Hebungs- und Senkungsmuster der rezenten Vertikalbewegungen zeigt Hebungsmaxima am West- und Ostende des Aar-Massivs (Zentralalpen) und des Tauern-Massivs (Ostalpen), sowie im Bereiche des Mont Blanc-Massivs (Westalpen). Senkungstendenzen sind in den östlichen Ostalpen und südlich des Rhein-Grabens auszumachen. Die Hebungsmaxima sind kongruent zu den jüngsten Altern der Apatit-Spaltspuren, was darauf hindeutet, dass die heutigen Hebungsmaxima schon seit mehreren Millionen Jahren aktiv sind. In Querprofilen durch die Zentralalpen besitzen die Hebungsraten einen steilen Gradienten auf der Nordabdachung des Aar-Massivs. Die rezente Seismizität längs dieser Querprofile unterstreicht die Aktivität auf dieser Nordabdachung. Dies, kombiniert mit dem Dehnungscharakter der Erdbeben im Penninikum



südlich des Aar-Massivs lassen vermuten, dass die Vertikalbewegungen durchaus mit einer heute noch andauernden Aufwölbung des Aar-Massivs im Hangenden einer noch aktiven Überschiebung zusammen hängen. Diese Überschiebung mündet in der Tiefe in die Plattengrenze zwischen Europa und Adria. Im Norden des Aar-Massivs mündet diese Überschiebung in die basale Abscherung der Subalpinen Molasse, welche ihrerseits auch eine höhere Hebungsrate besitzt als die mittelländische Molasse im Norden. Ein Vergleich der Paläogeographie zur Zeit der OSM-Ablagerungen (vor ca. 15 Mio Jahren) und der Lage der Obergrenze der OMM (Zeitmarke 16 Mio. Jahre) zeigt, dass sich das westliche Mittelland seit dem mittleren Miozän um mehr als 1000 m gehoben hat. Ein wesentlicher Teil dieser Hebung dürfte die Abschertektonik der Jurafaltung zurückzuführen sein.

Auf Luftbildern sind in den Alpen verschiedenen Orts hangparallele Lineamente zu erkennen, bei welchen der talseitige Block gehoben ist (so genannte "uphill-facing scarps"). Eine sorgfältige Überprüfung dieser Lineamente führt zum Schluss, dass hier auch post-glaziale Bewegungen anzunehmen sind. Dies zeigt sich etwa in versetzten Seitenmoränen. Südlich von Oberwald (Goms, VS) ist sogar eine Seitenmoräne des Stadiums von 1875 zerschnitten. Verbreitet sind solche Lineamente am Südrand des Aar- und Gotthard-Massivs. Sie verlaufen hier parallel zur steil stehenden alpinen Schieferung. In den meisten Fällen sind die Bewegungen auch eine gravitative Komponente. Ausgewählte Lineamente, wo Hangbewegungen ausgeschlossen werden können, wurden in Schlitzten näher analysiert. Die in den quartären Lockergesteinen abgebildeten Versätze konnten bis in den anstehenden Fels verfolgt werden, wo sich die bruchhafte Deformation durch die Zerrüttung des Gesteins abzeichnet. In vielen Fällen sind offenbar tektonische Brüche später gravitativ reaktiviert worden. Im Beispiel des näher untersuchten Gemmi-Bruches erfolgte die Anlage bereits während der Deckenbildung, die Bewegungen setzten sich aber bis in die jüngste Vergangenheit (Holozän) fort.

Die Auflast des Eises während der pleistozänen Vergletscherungen dürfte die zentralen Teile der Alpen um etwa 150 m niedergedrückt haben. Die mit der elastischen Reaktion der Lithosphärenplatte verknüpfte Aufwölbung dieser Deformation ist weit im Alpenvorland zu suchen. Insgesamt ist die Wellenlänge dieser Deformation viel grösser als jene der heute andauernden Hebungen und kann diese somit nicht erklären. Immerhin dürfte das mehrmalige Auf-und-Ab der vielen Vereisungen zu Ermüdungserscheinungen in den Gesteinen der oberen Kruste beigetragen haben. Berechnet man den Effekt der variablen Eismächtigkeit quer über Täler auf prä-existente vertikale Brüche in den Gesteinen, so ergeben sich beim Abschmelzen Reaktivierungen der talseitigen Blöcke im Meterbereich, genau so wie im Gelände beobachtet. Schräg einfallende prä-existente Brüche werden durch diese lokalen Eisentlastungen gemäss unseren Modellierungen nicht reaktiviert. Die vertikalen Brüche können durch horizontale Streckung im Verlaufe der Herauspressung der Kristallinblöcke (Aar- und Gotthard-Massiv, penninische Kristallindecken) tektonisch reaktiviert worden sein, durch die lokalen Belastungen der quartären Vereisungen nochmals reaktiviert und heute durch gravitative Bewegungen weiterhin aktiv sein (so genannte „composite faults“).

Das Flussnetz war seit dem Pliozän nicht nur im alpinen Vorland gewaltigen Veränderungen unterworfen, denn auch in den Alpen selbst erfolgte in dieser Zeitspanne eine beträchtliche Eintiefung von mehreren Kilometern. Damit assoziiert dürften auch Umlenkungen von Flüssen stattgefunden haben. Der Talboden in den Alpen, welcher den Deckenschottern am Irchel entsprach, muss relativ zum Irchel mindestens 100 Meter höher gelegen haben. Da sich dieses Gebiet in den Alpen aber in der Zwischenzeit um etwa 2 km hob, sind solche Talböden heute in luftiger Höhe zu erwarten (etwa „wind gaps“ wie die Lenzerheide oder der Grimselpass). Wie rasch die Tiefenerosion war, kann am Trockental des Kunkelspasses abgeleitet werden. Die alte Talsohle auf 1400 müM hebt sich heute mit 1.4 mm/Jahr. Vor einer Million Jahre wäre sie auf Meereshöhe gelegen, was für ein alpines Tal unrealistisch ist. Die Umlenkung dieses Flusses in das heutige Rheintal erfolgte also vor deutlich weniger als einer Million Jahre (möglicherweise vor etwa



500'000 Jahren), und der Einschnitt von 1400 auf die heutigen 600 m.ü.M passierte innerhalb dieser kurzen Zeit. Dies entspricht einer lokalen Eintiefungsrate von etwa 1.5 mm/Jahr (800 m in 500'000 Jahren). Die gleichzeitige Hebung des Gebirges und Eintiefung der Täler durch Flüsse, die durch die Hebung höhere Gradienten erfahren, stellen ein sehr dynamisches System dar, in welchem die Erosionsrate kaum mit einem Durchschnittswert beschrieben werden kann.

Ergebnisse des EUCOR-URGENT Projektes: Geomorphologische Indizien für Neotektonik an der Schnittstelle Rheingraben-Faltenjura

Herfried Madritsch, Geologisches-Paläontologisches Institut Basel, Jetzt: Nagra, Hardstrasse 73, 5430 Wettingen, e-mail: herfried.madritsch@nagra.ch

Das EUCOR-URGENT-Projekt (Upper Rhinegraben Evolution and Neotectonics), getragen von einem Netzwerk aus 25 Universitäten und Behörden aus 4 Nationen, befasste sich über einen Zeitraum von fast 10 Jahren mit der Neotektonik des Oberrheingrabens und angrenzender Gebiete. Hier werden ausgewählte Ergebnisse eines Teilprojektes mit Fokus auf die Rhein-Bresse Transfer Zone im östlichen Frankreich vorgestellt, wobei insbesondere auf das grosse Potential von geomorphologischen Studien zur besseren neotektonischen Charakterisierung von schwach aktiven Regionen eingegangen wird. Die Rhein-Bresse Transfer Zone (RBTZ) weist eine polyphase tektonische Entwicklung auf, die einen komplexen strukturellen Bau zur Folge hat. Eine wichtige Rolle bei dieser Entwicklung spielen spätpaläozoische Bruchsysteme, welche sich im Zusammenhang mit dem Burgund Permokarbondrog – der Westverlängerung des Nordschweizer Permokarbondroges – entwickelten. Bei der Eozänen- Oligozänen Entstehung der RBTZ wurden diese Störungen reaktiviert. Im Zuge der spätmiozänen Jurafaltung kontrollierten die so entstandenen extensionalen Flexuren die Lokalisierung bedeutender Überschiebungsfronten in den mesozoischen Deckschichten. In einer Spätphase der Jurafaltung, vermutlich ab dem frühen Pliozän, wurden die Paläogenen bis Paläozoischen Störungen im Sockel teilweise invertiert was lokal zu komplexen strukturellen Überlagerungen von flach- und tiefgründigen Kompressionsstrukturen führt (Madritsch et al. 2008).

Eine neotektonische Aktivität der RBTZ ist aufgrund der sehr schwachen Seismizität der Region nur sehr schlecht nachweisbar. Geomorphologische Studien basierend auf einer paläotopographischen Rekonstruktion der Mittel-Pliozänen Sundgau Schotter konnten aber zeigen, dass sich das Gebiet der RBTZ seit der Ablagerung der Schotter relativ zu den benachbarten tertiären Gräben (Rhein- und Bresse Graben) regional mit einer Rate von ca. 0.05mm / Jahr hebt. Ausserdem konnte nachgewiesen werden, dass in der RBTZ quartäre Faltung stattfand. Entlang der Citadelle Antiklinale bei Besançon wurden Paläomäander des Doubs Flusses innerhalb des Quartärs um mindestens 10 +/- 2 m differentiell gehoben. Datierung der Sedimente der Paläomäander mittels Optisch Stimulierter Lumineszenz (OSL) lässt auf assoziierte lokale relative Hebungsraten von ca. 0.2mm/Jahr schliessen.

Die geomorphologischen Untersuchungen konnten somit deutlich zeigen, dass im Bereich der RBTZ subrezente krustale Verkürzung, gekennzeichnet durch sehr geringe Deformationsraten, stattfindet, was auch die existierenden seismotektonischen Daten bestätigen. Im Vergleich mit dem benachbarten Rheingraben, dessen rezentes tektonisches Regime durch Blattverschiebung bis Extension charakterisiert ist, ergibt sich der Eindruck eines nichthomogenen Deformationsfeldes im nordwestlichen Alpenvorland. Dieser Umstand weist auf die rezente Bedeutung der Reaktivierung präexistierender Störungen hin. Ausserdem ergab sich aus den geomorphologischen Langzeitrekonstruktionen, dass interpolierte regionale Hebungsraten nicht unbedingt mit lokalen Hebungen entlang diskreter aktiver Strukturen übereinstimmen und vom Betrachtungszeitraum abhängig sind. Geomorphologischen Studien sollte deshalb auch bei zukünftigen Untersuchungen zur Neotektonik des Alpenvorlands ein hoher Stellenwert beikommen. Grundvoraussetzung für stichhaltige Interpretationen sind ein detaillierter Kenntnisstand des regionalen, strukturgeolo-



gischen Baus sowie die Etablierung von chronologisch und genetisch charakterisierbaren geomorphologischen Markerhorizonten.

Referenzen:

Madritsch, H. Schmid, S. M., Fabbri O. (2008): Interferences between thin- and thick-skinned tectonics at the northwestern front of the Jura fold-and-thrust belt (eastern France). *Tectonics* 27, TC5005, doi:10.1029/2008TC002282.

Erdbeben und mögliche Auswirkungen auf ein Tiefenlagerbauwerk

Peter Zwicky und Pierre Wörndle, Basler & Hofmann AG, e-mail: Peter.Zwicky@bhz.ch

Die Auswirkungen der seismischen Erschütterungen und Verschiebungen auf die Tiefenlagerbauwerke werden im Vergleich zu den bisherigen Erfahrungen mit den Bauwerken an der Oberfläche dargestellt und diskutiert. Dazu werden internationale Grundlagen-Berichte und Erdbeben-Erfahrungen aus dem Untertagebau ausgewertet. Im Sinne einer Problemübersicht werden die Auswirkungen auf HAA- und SAA-Lagerbauwerke in der Betriebsphase und in der Nachverschlussphase beurteilt.

Gemäss aktueller Einschätzung können die seismischen Erschütterungen durch die Bemessung und Konstruktion der Bauwerke und der sicherheitsrelevanten Installationen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase beherrscht werden. Die Bemessungsbeben und die Berechnungsmethode für Tiefenlagerbauwerke müssen aber noch festgelegt bzw. entwickelt werden. Sie werden sich in wesentlichen Punkten von den herkömmlichen Erdbebenberechnungen für Bauwerke an der Oberfläche unterscheiden:

- Modellierung der Wellenausbreitungen zwischen Erdbebenherd und Tiefenlager
- felsmechanische Modellierung des Lagerbereichs
- Spezifikation des "Maximalbebens" für die Nachverschlussphase
- Vergleich der seismischen Beanspruchungen mit des ständigen Beanspruchungen aus dem Überlagerungsdruck

Bei einem direkten Einfluss von Verwerfungen mit grossen bleibenden Verschiebungen können Schäden an Stollen und Behältern nur beschränkt verhindert werden. Es sind auch Veränderungen der Wasserführungen zu erwarten. Aktiven oder potentiell aktiven Störzonen muss deshalb mit der Positionierung des Tiefenlagers und mit der Beladung der Stollen ausgewichen werden.

Die Verformbarkeit (Duktilität) der Lagerstollen (Behälter und Verfüllung) sorgt dafür, dass die seismischen Verschiebungen in beschränktem Ausmass aufgenommen werden können. Sie ist von den Werkstoffen, der Konstruktion und der Geometrie abhängig und muss noch vertieft untersucht und quantifiziert werden.



Beilage 3: Liste aufgeschalteter Vorträge bzw. Dokumente

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

Michael Schnellmann: Neotektonik der Nordschweiz: Bisherige und geplante Arbeiten der Nagra und Bedeutung für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers (4.6 MB)

Adrian Wiget: Geodätische Überwachungsnetze in der Schweiz (7.0 MB)

Andreas Schlatter: Rezente Hebungsraten der Nordschweiz (aus Präzisionsnivellements der Landesvermessung) (3.7 MB)

Nicolas Deichmann: Seismotektonik und Spannungsfeld der Nordschweiz (5.3 MB)

Flavio S. Anselmetti: Paläoseismologie nördlich der Alpen - Auf der Jagd nach prähistorischen Erdbeben (8.2 MB)

Adrian Pfiffner: Neotektonik der Zentralalpen: Hebungen, Abtrag und Bruchbildung seit dem Pliozän (4.3 MB)

Herfried Madritsch: Ergebnisse des EUCOR-URGENT-Projekts: Geomorphologische Indizien für Neotektonik an der Schnittstelle Rheingraben-Faltenjura (3.7 MB)

Peter Zwicky & Pierre Wörndle: Erdbeben und mögliche Auswirkungen auf ein Tiefenlagerbauwerk (1.8 MB)