

# Klimawandel und Seismizität

Warum das Abschmelzen von Eis Erdbeben begünstigt

Durch den Klimawandel und die dadurch erfolgende Eisschmelze kann es in bisher stabilen Gebieten zu Erdbeben kommen. Prof. Dr. Andrea Hampel vom Institut für Geologie zeigt anhand von Modellierungen und Beispielen aus der geologischen Vergangenheit der Erde, wie Massenänderungen auf der Erdoberfläche die Spannungsverteilung beeinflussen können.

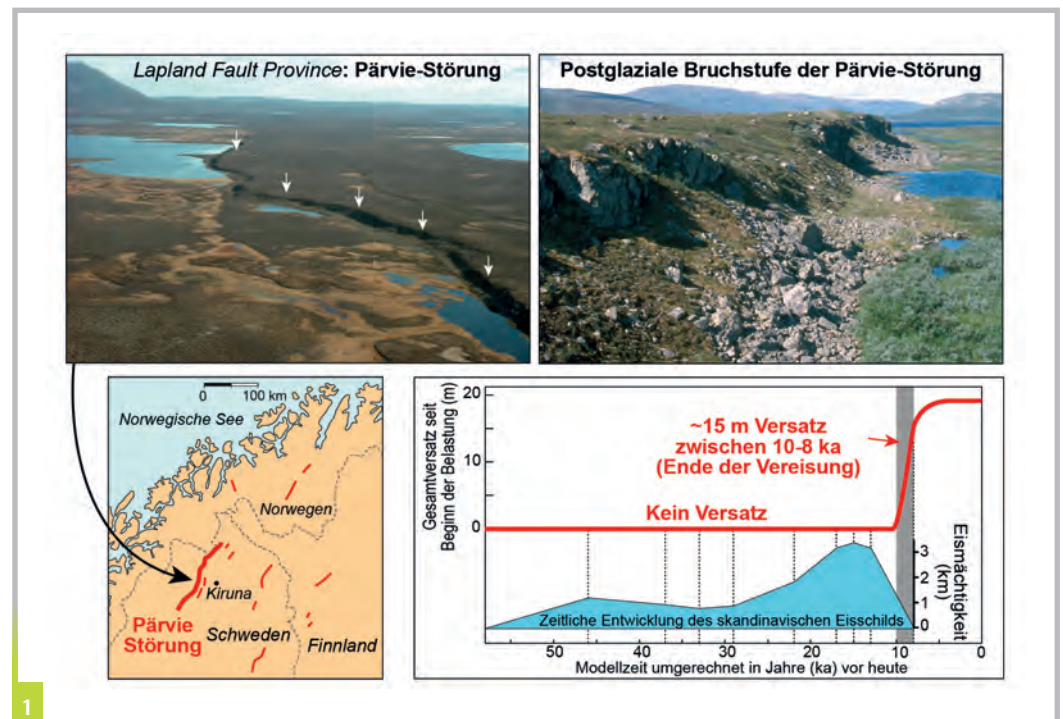


Abbildung 1  
Die Pärvie-Störung in Nordskandinavien. Die etwa 10 bis 15 Meter hohe Bruchstufe ist bei Erdbeben nach der letzten Eiszeit entstanden.  
Quellen: Hampel et al.: Response of faults to climate-driven changes in ice and water volumes on Earth's surface. In: W. McGuire (ed.), *Climate forcing of geological and geomorphological hazards*, Philosophical Transactions (A) of the Royal Society 2010, 368, 2501-2517

Erdbeben entstehen, wenn der Aufbau von Spannungen in der Erdkruste zu einem Bruch entlang tektonischer Störungsflächen führt. Der Bruchprozess geht einher mit plötzlichem Versatz auf der Störung, wobei sich angrenzende Krustenblöcke relativ zueinander bewegen. In der Regel werden Erdbeben durch tektonische Spannungen ausgelöst, die durch die großskaligen Bewegungen der Erdplatten relativ zueinander entstehen. Da die Erdkruste in vielen Regionen der Erde bereits ein hohes Grundniveau an Spannungen aufweist, können schon geringe Span-

nungsänderungen Erdbeben auslösen. Dies zeigte sich in der jüngsten Vergangenheit unter anderem auch daran, dass menschliche Aktivitäten wie Geothermie-Projekte oder Erdgasförderung seismische Ereignisse auslösen können.

Auch der anthropogen induzierte Klimawandel kann durch Massenänderungen auf der Erdoberfläche (wie zum Beispiel durch den Meeresspiegelanstieg oder das Abschmelzen von Gletschern) die Spannungsverteilung in der Erdkruste beeinflussen und dadurch Erdbeben auf tektonischen Störungsflächen

triggern. Wie aus der geologischen Vergangenheit bekannt ist, sind solche Erdbeben nach der letzten Eiszeit auch in ansonsten seismisch wenig aktiven Gebieten wie Skandinavien aufgetreten und haben Magnituden von 8 bis 9 erreicht. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Pärvie-Störung in Skandinavien (Abb. 1). Mit dem Abschmelzen des skandinavischen Eisschildes vor ungefähr 10.000 Jahren wurde die etwa 150 Kilometer lange Störung seismisch aktiv. Dabei bildete sich eine 10 bis 15 Meter hohe Bruchstufe, die noch heute in der Landschaft zu sehen ist (Abb. 1).

Die Zusammenhänge zwischen klima-induzierten Auflaständerungen, Spannungsänderungen in der Erdkruste und der Seismizität von Störungen lassen sich mit Hilfe numerischer Modellierungen untersuchen. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Reaktion von Störungen auf Massenänderungen an der Erdoberfläche nicht nur durch die zeitlich-räumlichen Änderungen der Auflast selbst bestimmt wird, wie lange angenommen wurde. Weitere maßgebliche Faktoren sind die durch die Auflast induzierte Deformation der festen Erde und das vorherrschende tektonische Regime (Dehnung oder Verkürzung). Auch die Position der Störung relativ zur Auflast spielt eine wichtige Rolle. Abhängig vom daraus resultierenden Gesamtspannungszustand können Erdbeben auf Störungen ausgelöst oder auch verhindert werden. Wichtig ist, dass das Verhalten der Störungen durch die Entwicklung der Spannungsdifferenz zwischen vertikaler und horizontaler Spannung, nicht durch die absolute Größe der vertikalen und horizontalen Spannungen kontrolliert wird.

Die Blockbilder in *Abbildung 2* fassen schematisch die Ergebnisse der Modellierungen zusammen. In den Modellen wurden zwei unterschiedliche tektonische Regime und damit assoziierten Störungsarten berücksichtigt. Bei Dehnung der Erdkruste wird die Verformung an Abschiebungen aufgenommen, bei Verkürzung an Überschiebungen. Während der Belastung führt die Auflast zu einer Erhöhung der vertikalen Spannung. Gleichzeitig biegt sich die Erdkruste jedoch unter dem Eis- oder Wasserkörper durch (Flexur), was zu einer Erhöhung der horizontalen Spannungen führt. In der Summe ändern sich unter der Auflast (Bereich A) die Spannungen so, dass der Versatz auf Ab- und Überschie-

bungen reduziert wird. Dies bedeutet, dass Erdbeben seltener stattfinden oder ganz unterdrückt werden. Dieser Fall trifft zum Beispiel auf die heutige Antarktis zu, die durch die Anwesenheit des antarktischen Eisschilds eine geringe Seismizität zeigt. Wie das obere Blockbild weiter zeigt, erfährt die Erdkruste als Gegenbewegung zur Flexur eine Aufwölbung um die Auflast herum (Bereich B). Störungen, die im Bereich B liegen, ten-

unter der ehemals vorhandenen Auflast liegen eine Beschleunigung im Versatz und erhöhte Seismizität. Der Grund hierfür ist, dass zwar die vertikalen und horizontalen Spannungen abnehmen, die Spannungsdifferenz jedoch größer wird im Vergleich zur Phase der Belastung. Diese Erhöhung der Spannungsdifferenz führt zu einer verstärkten seismischen Aktivität auf Störungen im Bereich unter dem ehemaligen Eis- oder

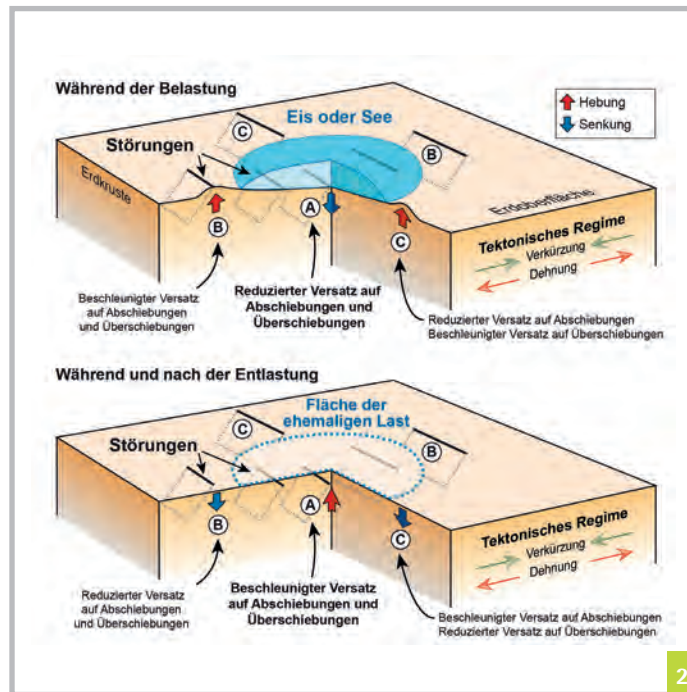


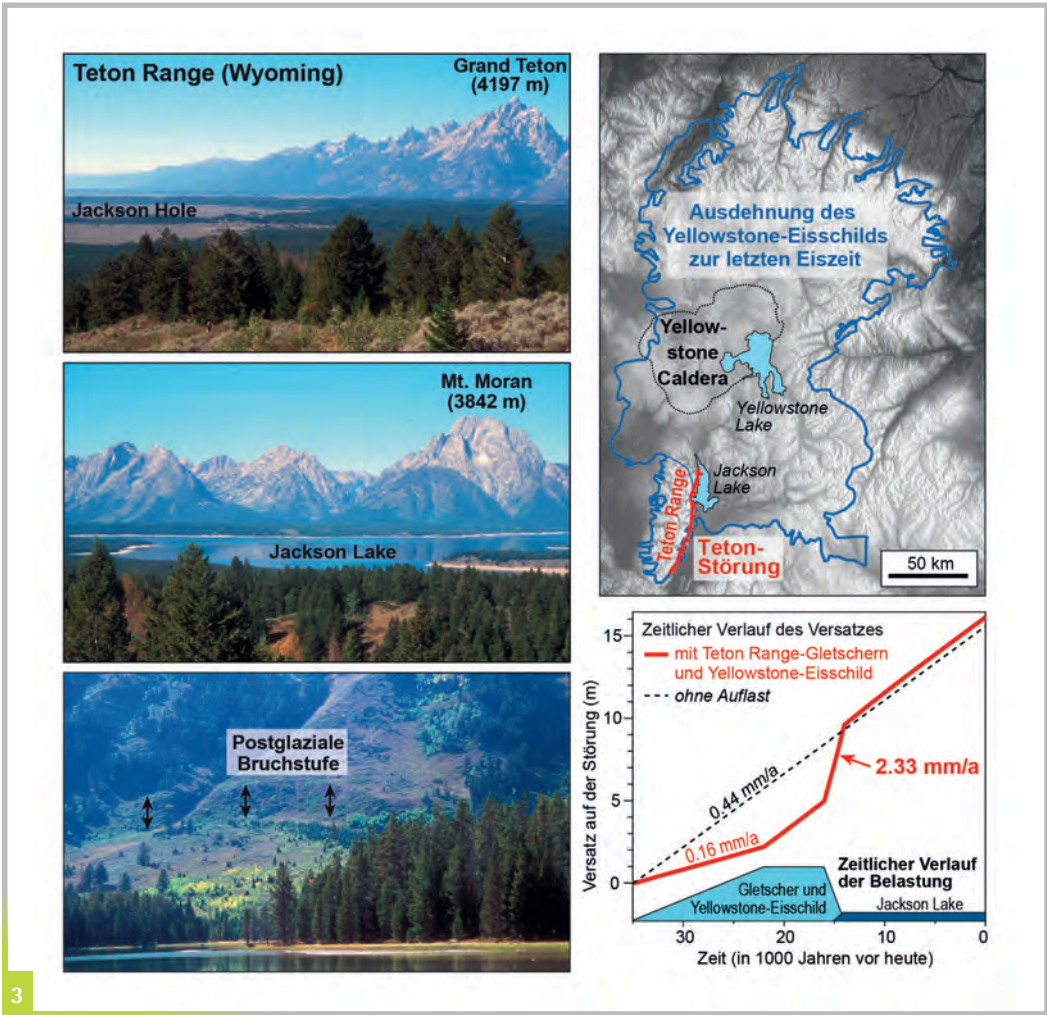
Abbildung 2  
Blockdiagramme der Erdkruste zum Verhalten von Störungen bei glazial-interglazialen Massenänderungen an der Erdoberfläche.  
Quelle: Hampel, Response of faults to climate-induced changes of ice sheets, glaciers and lakes. *Geology Today* 2017, 33, 12-18

dieren zu einem beschleunigten Versatz und damit zu einer erhöhten seismischen Aktivität während der Belastung. Interessant ist der Fall C: Hier zeigen Abschiebungen einem verlangsamten Versatz, während Überschiebungen beschleunigten Versatz erfahren.

Während der Entlastung, das heißt bei Abschmelzen des Eises oder Verschwinden des Sees, nimmt die vertikale Spannung ab. Auch die Flexur der Erdkruste wird rückgängig gemacht, wodurch sich die horizontalen Spannungen reduzieren. Dennoch zeigen die Störungen, die im Bereich A

Wasserkörper. Im Bereich B, das heißt in der Zone der ehemaligen Aufwölbung, hingegen nimmt die seismische Aktivität ab. Im Bereich C ist beschleunigter Versatz auf Abschiebungen und reduzierter Versatz auf Überschiebungen zu beobachten.

In weiterführenden Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Größe der Spannungsdifferenz, die für eine erhöhte oder verringerte Störungsaktivität verantwortlich ist, hauptsächlich von der Größe der Auflast sowie von der Viskositätsstruktur der Erdkruste und des darunterliegenden



3

Abbildung 3 Die Teton Range in den westlichen USA, die sich an der aktiven Teton-Abschiebung gebildet hat. Aufgrund des Abschmelzens des Yellowstone-Eisschildes kam es nach der letzten Eiszeit vermehrt zu Erdbeben und der Bildung von postglazialen Bruchstufen.

Quellen: Hampel, Response of faults to climate-induced changes of ice sheets, glaciers and lakes. *Geology Today* 2017, 33, 12-18; Hampel et al.: Postglacial slip distribution along the Teton normal fault (Wyoming, USA), derived from tectonically offset geomorphological features, *Geosphere* 2021, 17,1517-1533

Erdmantels abhängt. Hingegen spielen die Rate der Massenänderungen auf der Erdoberfläche, der Reibungskoeffizient der Störung sowie die Mächtigkeit der Erdkruste eine untergeordnete Rolle.

Die Ergebnisse der numerischen Modelle erklären, warum es am Ende der letzten Eiszeit weltweit in Regionen mit unterschiedlichen tektonischen Regimen zu einer verstärkten Erdbebenaktivität gekommen ist. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die 70 km lange Teton-Abschiebung, die südlich des Yellowstone-Nationalparks in den westlichen USA gelegen ist (Abb. 3). Über Millionen von Jahren hat sich durch den Versatz auf der Teton-Störung die über 4.000 m hohe Bergkette der Teton Ran-

ge gebildet, die durch eine spektakuläre, glazial geprägte Geomorphologie mit tiefen, U-förmigen Tälern charakterisiert ist. Während der letzten Eiszeit hat die Teton-Abschiebung – zusätzlich zu den Gletschern in der Teton Range – eine Belastung durch das bis zu einen Kilometer mächtige Yellowstone-Eisschild erfahren. Die Position der Teton-Störung relativ zur Auflast entsprach daher Bereich C im Blockbild aus Abbildung 2. Nach dem Ende der letzten Eiszeit in dieser Region vor etwa 15.000 Jahren hat die Teton-Störung eine Phase mit verstärkter Seismizität erfahren. Durch die Erdbeben haben sich entlang der gesamten Länge der Störung Bruchstufen gebildet, die hervorragend erhalten sind und postglaziale

Versätze von bis zu 27 Metern anzeigen. Wie aus geologischen Geländeuntersuchungen bekannt ist, sind dabei etwa 20 Meter dieses Gesamtversatzes auf mehrere Erdbeben im Zeitraum von 15.000 bis 8.000 Jahren vor heute zurückzuführen. Die Bewegungsrate der Teton-Abschiebung nach der letzten Eiszeit war damit ungefähr dreimal höher als von 8.000 Jahren bis heute. Wie numerische Modellierungen zeigen konnten, lässt sich die erhöhte seismische Aktivität der Teton-Abschiebung auf das Abschmelzen des Yellowstone-Eisschildes und der Gletscher in der Teton Range zurückführen.

Das Auftreten von postglazialen Versätzen entlang tektonischer Schwächezonen ist auch aus den europäischen Alpen bekannt. Während der letzten Eiszeit waren die Alpen von Eisdomen und bis zu zwei Kilometern mächtigen Talgletschern bedeckt (Abb. 4). Heute findet man in der Schweiz entlang der Flanken mancher Alpentäler Bruchstufen mit einer Länge von bis zu mehreren Kilometern. Diese Bruchstufen sind parallel zum Talverlauf orientiert und zeigen hangaufwärts und zeigen hangaufwärts (Abb. 4). Stellenweise versetzen die Bruchstufen glaziale Ablagerungen wie Moränen, was auf ein postglaziales Entstehungsalter hinweist. Die Entstehung dieser hangaufwärts gerichteten Bruchstufen wurde lange Zeit allein auf Hanginstabilitäten („Sackungen“) zurückgeführt. Eine kombinierte Studie aus Geländeuntersuchungen und numerischen Modellierungen konnte jedoch zeigen, dass die Bruchstufen dadurch entstanden sind, dass die Talböden durch das Abschmelzen der Gletscher entlastet wurden und sich relativ zu den Bergkämmen gehoben haben. Lokal wurde der Versatz später durch Sackungserscheinungen vergrößert. Die Modellierungen konnten auch erklä-

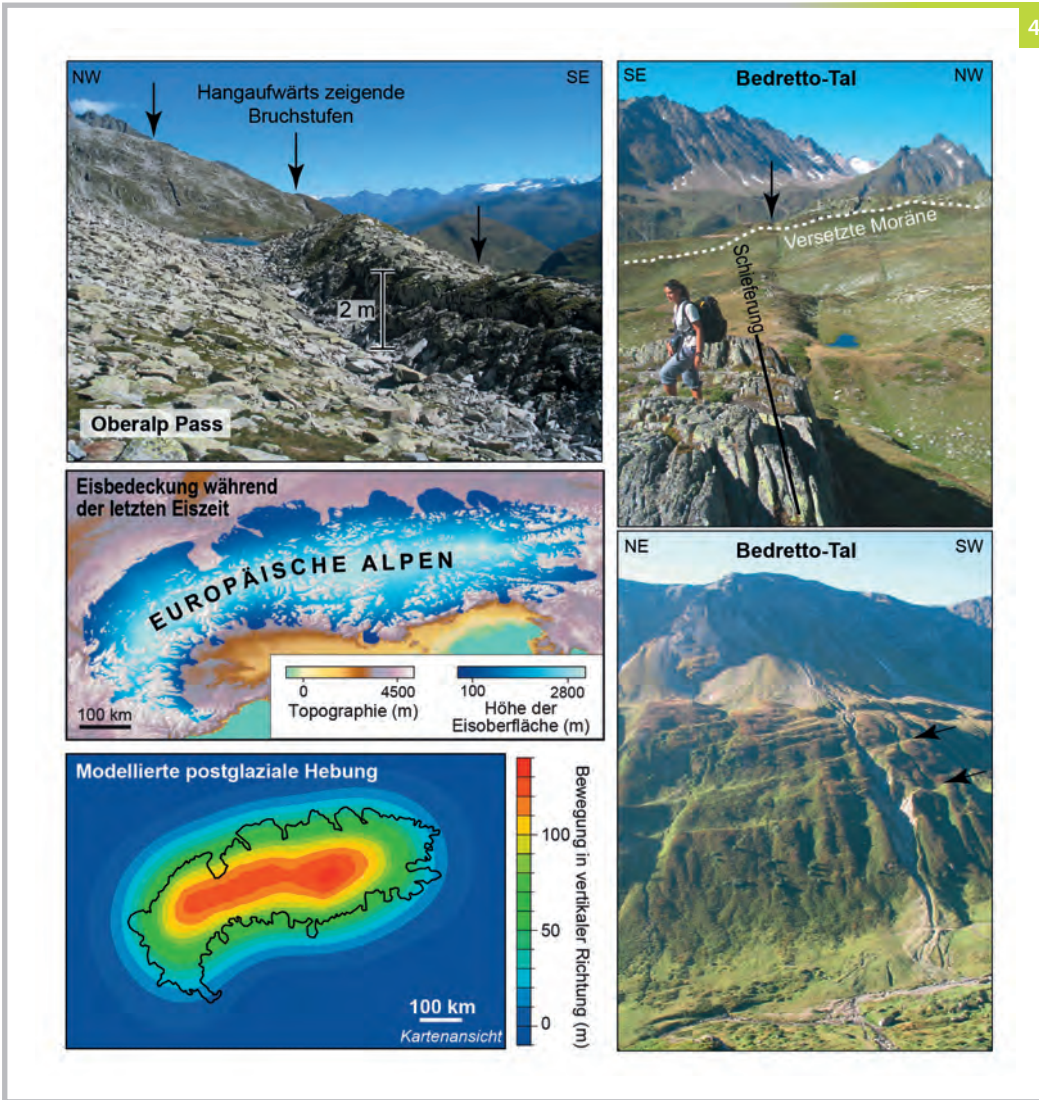


Abbildung 4  
 In den europäischen Alpen hat das Abschmelzen der Gletscher nach Ende der letzten Eiszeit zur Hebung der Talböden relativ zu den Berggipfeln geführt. Hierdurch sind hangaufwärts gerichtete Bruchstufen entstanden. Durch numerische Modellierungen wurde die räumlich-zeitliche Verteilung der postglazialen Bewegungen im Alpenraum ermittelt.  
 Quellen: Ustaszewski et al.: Composite faults in the Swiss Alps formed by the interplay of tectonics, gravitation and postglacial rebound: an integrated field and modelling study. *Swiss Journal of Geosciences* 2008, 101, 223-235; Norton & Hampel: Postglacial rebound promotes glacial re-advances – a case study from the European Alps. *Terra Nova* 2010, 22, 297-302



**Prof. Dr. Andrea Hampel**  
 Jahrgang 1975, ist seit 2009 Professorin für Geologie. Sie leitet das Institut für Geologie und eine Arbeitsgruppe für Tektonik, Strukturgeologie, tektonische Geomorphologie und numerische Modellierung geologischer Prozesse. Ihre Forschungsschwerpunkte sind die numerische Modellierung des Erdbebenzyklus und der Interaktion zwischen Tektonik und Erdoberflächenprozessen sowie die Anwendung kosmogener Nuklide und Thermochronologie auf tektono-geomorphologische Fragestellungen. Kontakt: [hampel@geowi.uni-hannover.de](mailto:hampel@geowi.uni-hannover.de)

ren, warum man nicht in allen Alpentälern solche hangaufwärts gerichteten Bruchstufen findet: Die Voraussetzung für ihre Bildung ist, dass an den Flanken der Täler steil einfallende Schwächezonen wie Schichtgrenzen oder Schieferungsflächen vorhanden sein müssen. Bei flach einfallenden Flächen reichen die Spannungen für eine Aktivierung und Versatzakkumulation nicht aus.

Insgesamt zeigen die obigen Beispiele, dass die Erdkruste auf klimainduzierte Massenänderungen an der Erdoberfläche reagiert und insbesondere die postglaziale Entlastung der Erdoberfläche und die damit einhergehenden Spannungsänderungen Erdbeben auslösen können. Numerische Modellierungen tragen dazu bei, die Zusammenhänge zwischen klimain-

duzierten Massenänderungen auf der Erdoberfläche und der Seismizität der Erdkruste besser zu verstehen. Die erzielten Ergebnisse besitzen nicht nur vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels eine hohe Relevanz, sondern auch im Hinblick auf die Evaluierung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle.