

# Massenbewegungen und Grundstücksgrenzen aus der Sicht eines Geophysikers

Ewald BRÜCKL

TU Wien, Department für Geodäsie und Geophysik, Wien · ewald.brueckl@geo.tuwien.ac.at

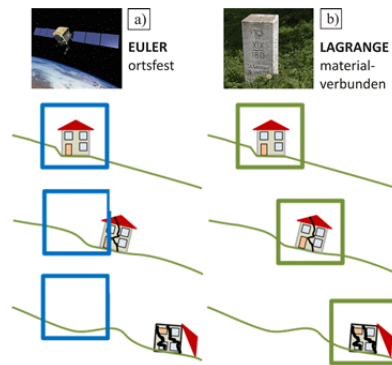
## 1 Euler oder Lagrange

Grundstücksgrenzen werden durch Koordinaten in einem geodätischen Bezugssystem und klar erkennbare Markierungen (z.B. Grenzsteine) im Boden rechtlich verbindlich festgelegt. Werden diese Markierungen durch äußere Einwirkung verschoben, oder gehen sie verloren, können sie durch geodätische Methoden am „richtigen Ort“ wiederhergestellt werden. Solange horizontale Bewegungen des Bodens im gewählten Bezugssystem aus praktischen, rechtlichen, oder sonstigen Gründen vernachlässigbar sind, ist die Wiederherstellung einer Grundstücksgrenze eine eindeutig lösbare, geodätische Aufgabe. Sobald sich jedoch der geologische Untergrund und mit ihm Grenzsteine bewegen, haben wir zwei Optionen. Wir können den Begriff „richtiger Ort“ im Sinne von Euler als ortsfest mit gleichbleibenden Koordinaten im entsprechenden Bezugssystem definieren, oder nach Lagrange als materiell fixiert und den, mit dem Untergrund fest verbundenen Markierungen folgend verstehen. Beide Betrachtungsweisen von bewegter Materie sind in der Mechanik wohl bekannt (z.B.: Prager, 1961).

Abb. 1 veranschaulicht die Konsequenzen der beiden Betrachtungsweisen auf die Erhaltung oder Wiederherstellung von Grundstücksgrenzen auf einer Massenbewegung. Nach Euler (Abb. 1a) können Grundstücksgrenzen, z.B. durch GPS, entsprechend ihren Koordinaten in einem regionalen Bezugssystem während oder nach einer Massenbewegung exakt (im Hinblick auf die erforderliche Genauigkeit) wiederhergestellt werden. Grund und Boden, sowie darauf und darin installierte Infrastruktur verschieben sich jedoch relativ zu den solcherart definierten Grundstücksgrenzen. Ein ursprünglich dem Grundstück zugehöriges Gebäude kann sich schließlich aus diesen Grenzen herausbewegen und nicht mehr auf eigenem Grund und Boden im Euler'schen Sinn zu liegen kommen.

Abb. 1b zeigt die Konsequenzen der Lagrange'schen Betrachtungsweise im Falle einer Massenbewegung. Die Grundstücksgrenzen sind über Markierungen mit dem bewegten Untergrund fest verbunden. Die Nachführung oder Wiederherstellung der Grundstücksgrenzen im Lagrange'schen Sinn geht von diesen Markierungen aus. Infrastruktur, wie ein dem Grundstück zugehöriges Gebäude bleibt innerhalb der Grundgrenzen auf eigenem Grund und Boden. Mit der Bewegung einhergehende Zerstörungen an Gebäuden, sowie die Unterbrechung von Straßen und Versorgungsleitungen relativieren allerdings diesen Vorteil.

Aus der Betrachtung von Abb. 1 geht hervor, dass bei der Wiederherstellung oder Nachführung von Grundstücksgrenzen auf Massenbewegungen mit einer Entscheidung zu Gunsten der Euler'schen oder der Lagrange'schen Betrachtungsweise der Begriff „richtiger Ort“ definiert werden muss. In der vorliegenden Abhandlung versuche ich, durch einen Blick auf prinzipiell vergleichbare, aber in einem wesentlich großräumigeren Maßstab stattfindende geologisch-geophysikalische Prozesse Entscheidungshilfen zu finden.



**Abb. 1:** Konsequenzen der Euler'schen (a) und der Lagrange'schen (b) Betrachtungsweisen auf die Erhaltung oder Wiederherstellung von Grundstücksgrenzen auf einer Massenbewegung

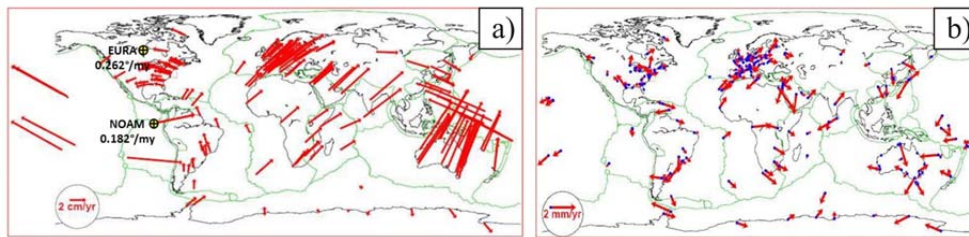
## 2 Exkurs zur Plattentektonik

Noch während meines Studiums der Geophysik galt für die globale Tektonik und die Gebirgsbildung der Grundsatz: „Die Kontinentaltafeln und die Tiefseebecken haben sich in der ganzen geologischen Vergangenheit nicht wesentlich verändert, sie sind die beharrenden Gebiete, zwischen denen sich die viel beweglicheren Zonen erstrecken, die die eigentlichen Schauplätze der großen geologischen Veränderungen sind“ (TOPERCZER 1960, Seite 126). Diese, dem Fixismus verhaftete Lehrmeinung gründete auf der Kontraktionstheorie und bestimmte das Denken in den Geowissenschaften. Die Hypothese der Kontinentalverschiebungen (WEGENER 1915) war zwar bekannt, konnte sich aber gegen die Kontraktionstheorie nicht durchsetzen. Zu einer völlig neuen Vorstellung über die Entstehung und Entwicklung der Ozeane führten die Ergebnisse magnetischer Messungen über die mittelatlantische Schwelle (VINE & MATTHEWS 1963). Es wurde klar, dass einzelne Ozeane, bezogen auf das Alter der Erde transiente Erscheinungen sind. Spätestens um 1970 zwangen diese neuen Erkenntnisse zur Aufgabe des Fixismus und bildeten die Grundlage für die Entwicklung der Plattentektonik.

### 2.1 Bezugssysteme

Geodätische Weltraumverfahren erlauben heute die Erfassung der aktuellen Bewegung tektonischer Platten in einem globalen, terrestrischen Referenzsystem (z.B. ITRF2008) mit sehr hoher Genauigkeit. Abb. 2a zeigt derartige Bewegungsvektoren über einem Modell der Plattengrenzen (ALTAMIMI et al. 2011). Die maximalen Bewegungsraten liegen bei etwa 0.1 m/Jahr. Die Modellierung dieses Geschwindigkeitsfeldes durch Rotationen von 15 starren Platten um die zugehörigen Eulerpole reduziert die Residuen um mehr als eine Größenordnung gegenüber den Eingangswerten (Abb. 2b). Die Eulerpole für Eurasien und Nordamerika, sowie die entsprechenden Rotationsgeschwindigkeiten sind in Abb. 2a eingetragen.

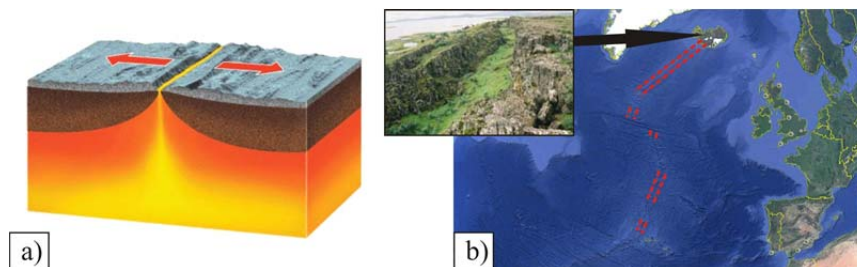
Es liegt auf der Hand, dass wir Grundstücksgrenzen (oder Staatsgrenzen) im Sinne von Lagrange materiell an die einzelnen tektonischen Platten gebunden festlegen. In der Geodäsie wird die Euler'sche Betrachtungsweise jedoch mit der Lagrange'schen zusammengeführt, indem wir „ortsfest“ in einem, mit der Plattenbewegung mitgeführten Referenzsystem definieren. Exakt gilt dies nur, wenn beide Bezugssysteme Inertialsysteme sind.



**Abb. 2:** Bewegungsvektoren der Erdkruste; a) gesamt im internationalen Referenzrahmen ITRF 2008; b) Residuen nach Abzug der Rotationen von 15 tektonischen um ihre Eulerpole (ALTAMIMI et al. 2011)

## 2.2 Prozesse an Plattengrenzen

Entsprechend den Theoremen der Plattentektonik (z.B. MOORES & TWISS 1995) können die Prozesse an Plattengrenzen durch drei Arten der Verformung beschrieben werden. Diese drei Prozesse unterscheiden sich grundsätzlich im Hinblick auf den Erhalt der bestehenden Plattengrenzen.

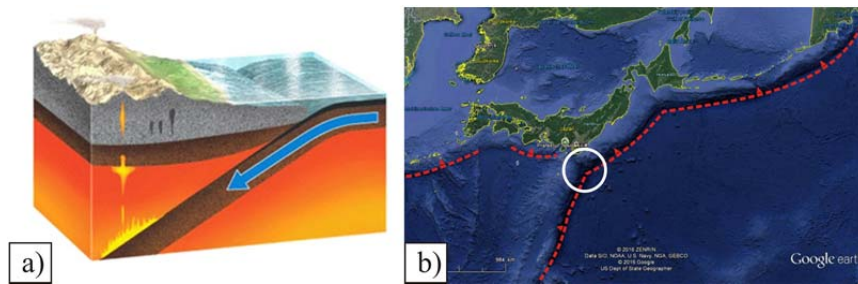


**Abb. 3:** Seafloor-Spreading; a) Prinzip (PRESS et al. 2004); b) Seafloor-Spreading im nördlichen Atlantischen Ozean; die mittel-atlantische Schwelle ist im Google Earth Bild markiert; das kleine Bild zeigt die Fortsetzung des Seafloor-Spreadings über Island im Almannagjá Grabenbruch (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rift.jpg?uselang=de>)

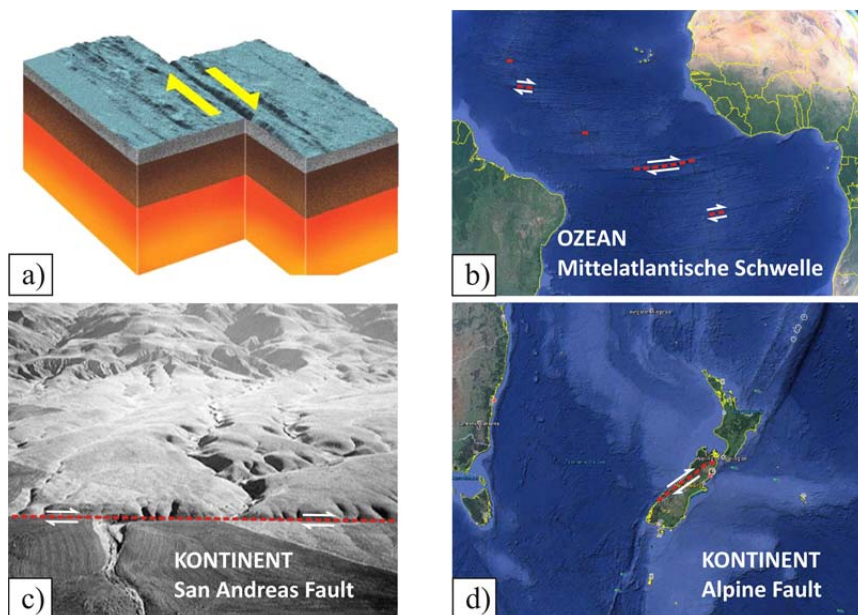
Abb. 3a zeigt das Prinzip des Seafloor-Spreadings. Es findet seinen morphologischen Ausdruck in den mittel-ozeanischen Schwellen. Die divergente Bewegung ist normal auf die Achse der Schwelle gerichtet. Nach dem entsprechenden Theorem der Plattentektonik erfolgt der Prozess des Seafloor-Spreadings symmetrisch zur Achse der Schwelle. Die neu entstehende Lithosphäre vergrößert im gleichen Ausmaß die beiden, divergierenden Platten.

Im zeitlichen Maßstab plattentektonischer Prozesse kann die Erdoberfläche in ihrer gesamten Ausdehnung als konstant angesehen werden. Dem konstruktiven Seafloor-Spreading muss daher ein destruktiver, die Erdoberfläche an Plattengrenzen verringernder Vorgang gegenüberstehen. Der entsprechende Prozess ist die Subduktion. Hierbei taucht die ozeanische Lithosphäre einer Platte unter eine andere Platte ab und verschwindet damit von der Erdoberfläche (Abb. 4). Morphologisch ist Subduktion mit der Bildung von Tiefseegräben verbunden. Die Richtung der Subduktion relativ zur Achse des Tiefseegrabens und der Abtauchwinkel sind für die einzelnen Subduktionszonen sehr unterschiedlich. Nach dem

für die Kinematik einer Subduktionszone gültigen Theorem der Plattentektonik verbleibt die Plattengrenze im Lagrange'schen Sinn materiell an der Front der überschiebenden Platte fixiert. Der subduzierten, ozeanischen Platte wird Fläche weggenommen.



**Abb. 4:** Subduktion; a) Prinzip (PRESS et al. 2004); b) Subduktion der Pazifischen Platte unter Japan, die Kurilen und Kamtschatka (Google Earth); bei der Boso Triple Junction (weißer Kreis) teilt sich der Japan Graben in zwei, die Philippinische Platte umfassende Gräben



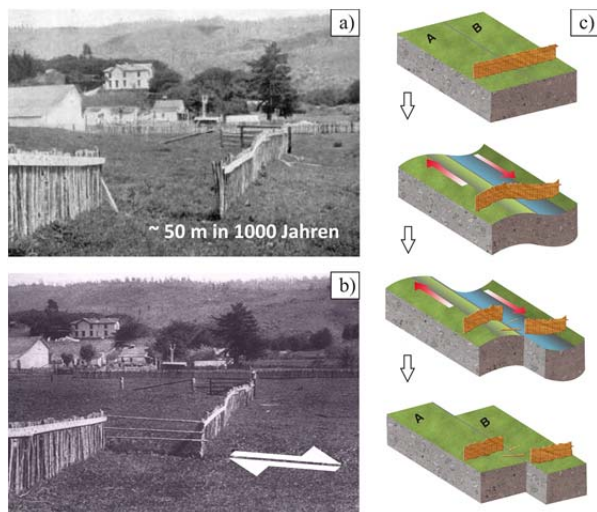
**Abb. 5:** Transform Fault; a) Prinzip (PRESS et al. 2004); b) ozeanische Transform Faults (Google Earth); c) kontinentale Transform Fault: San Andreas Störung (<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/surface.html>); d) kontinentale Transform Fault: Alpine Fault in New Zealand (Google Earth)

Fortgesetzte Subduktion ozeanischer unter kontinentale Lithosphäre führt irgendwann zur Kollision zweier kontinentaler Lithosphären und zur Bildung von Gebirgen im Stile der Alpen oder des Himalaya. Da kontinentale Kruste nicht oder nur geringfügig subduziert

werden kann, bedingt die Konvergenz der beiden Platten Überschiebungen tektonischer Einheiten im Ausmaß von 100 km und mehr. Folgt man dem entsprechenden Theorem der Plattentektonik über die Kinematik destruktiver Plattengrenzen, so wären Grundstücksgrenzen im Lagrange'schen Sinn auf der überschiebenden tektonischen Einheit materiell fixiert. Nach meinem Wissen haben jedoch weder Seafloor-Spreading und Grabenbildung, noch Subduktion oder tektonische Überschiebung bislang Anlass zur Nachführung von Grundstücksgrenzen gegeben.

Die dritte Art einer Plattengrenze ist die Transform-Fault (Abb. 5a). Sie entspricht einer, die gesamte Lithosphäre erfassenden Seitenverschiebung. Im Gegensatz zum konstruktiven Seafloor-Spreading und der destruktiven Subduktion kann diese Plattengrenze als konservativ bezeichnet werden, da beide Platten weder Fläche gewinnen noch verlieren. Transform-Faults sind in der Topographie des Ozeanbodens klar zu erkennen und stellen häufig, wenn auch nicht ausschließlich Verbindungen zwischen Segmenten mittel-ozeanischer Schwellen, bzw. des Seafloor-Spreadings dar (Abb. 5b). Transform Faults durchschneiden auch die kontinentale Lithosphäre. Beispiele hierfür sind die San Andreas Störung (Abb. 5c) und die Alpine Fault, die durch Neuseeland läuft (Abb. 5d). Das folgende Unterkapitel zeigt, dass Relativbewegungen entlang kontinentaler Transform-Faults durchaus relevant für die Nachführung von Grundstücksgrenzen werden können.

### 2.3 Erdbeben und Grundstücksgrenzen



**Abb. 6:**

Erdbeben von San Francisco, 18. April 1906;

a) Versatz eines Zaunes durch das Erdbeben entlang der San Andreas Verwerfung

(<https://www.exploratorium.edu/faultline/great/science2.html>)

b) Wiederherstellung der Grundstücksgrenze im Lagrange'schen Sinn

(<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/along2.html>);

c) Erdbebenzyklus nach REID (1910)

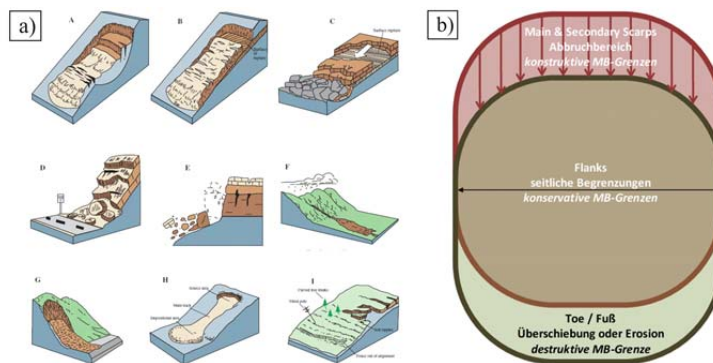
Obwohl die Gesamtbewegung tektonischer Platten als gleichförmig angesehen wird, finden die Relativverschiebungen an den meisten Plattengrenzen ruckartig statt und erzeugen Erdbeben mit einer Wiederkehr, die bei 100 Jahren liegen kann. Beim großen Erdbeben von San Francisco, 18. April 1906, erreichten die lateralen Verschiebungen entlang der San Andreas Störung nahezu 6 m. Abb. 6a zeigt den Blick von einer, der pazifischen Platte zuzuordnenden Wiese auf den nordamerikanischen Teil. Der Versatz des Zaunes markiert die (rechtsdrehende) San Andreas Störung und damit die Plattengrenze. Man beachte die

Lösung des Grenzproblems im Lagrange'schen Sinn. Das Festhalten am Zaun als Grenze in den kontinuierlich deformierten Bereichen östlich und westlich der Störung und die Montage der drei Stangen über den neu entstandenen Versatz hinweg (Abb. 6b) folgte aber sicherlich nicht aus grundlegenden, auf Theoremen der Plattentektonik beruhenden Überlegungen heraus, sondern aus Gründen der praktischen Nutzung.

Abb. 6c zeigt in einer Abfolge von 4 Bildern einen Erdbebenzyklus entsprechend dem Modell des elastischen Rückschlags (REID 1910), ausgehend von einem spannungs- und deformationsfreien Zustand, danach den Aufbau von Scherdeformationen und zugehörigen Spannungen, den Bruchvorgang und schließlich wieder den entspannten Zustand nach dem Erdbeben. Der Verlauf des Zaunes im ersten und letzten Bild entspricht auch der Euler'schen Betrachtung von Grenzen, sofern für die beiden Platten das jeweilige, die kontinuierliche Plattenbewegung berücksichtigende Bezugssystem gewählt wird.

### 3 Können wir Massenbewegungen mit tektonischen Platten vergleichen?

#### 3.1 Klassifikation von Massenbewegungen



**Abb. 7:**  
Massenbewegungen;  
a) Klassifikation  
b) Generalisierung

Unter Massenbewegungen verstehen wir gravitativ bedingte Verformungen von Gesteinsmassen an Abhängen und Talflanken, die zu einer irreversiblen Verschiebung sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung führen. Der Deformationsstil von Massenbewegungen kann mit Kriechen, Gleiten, Fließen oder Stürzen beschrieben werden. Die Geschwindigkeiten reichen von 1 – 10 mm/Jahr bis zu 100 – 200 km/h. Das bewegte Material kann Fels oder Lockergestein sein und das Volumen bis zu mehreren Kubikkilometern betragen. Abb. 7a zeigt eine Klassifikation nach den zuvor genannten Kriterien (VARNES 1978; <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>). Allen Typen gemeinsam ist die Ausbildung einer oder mehrerer Abrissflächen im obersten Bereich (main & secondary scarps), einer basalen Gleitfläche oder Gleitzone (basal shearing zone), seitlicher Begrenzungen (flanks) und eines mehr oder weniger weit reichenden Überschiebungsbereiches am Fuß (toe) der Massenbewegung.

### 3.2 Generalisierung

In dieser Abhandlung betrachten wir ausschließlich Massenbewegungen die als Naturereignis zu sehen sind und deren Auslösung oder Beschleunigung in keiner Verbindung zu menschlichen Aktivitäten steht. Massenbewegungen, für die der Klimawandel als Ursache in Betracht kommen könnte, sehe ich im Rahmen dieser Abhandlung ebenfalls als rein natürlich an.

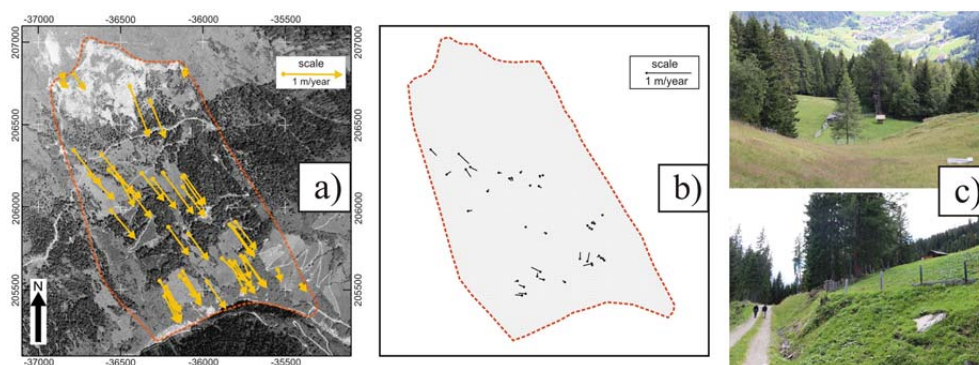
Zunächst wollen wir uns auf jene Massenbewegungen konzentrieren, die in einer ersten Näherung als Blockbewegungen beschrieben werden können. Von den in Abb. 7a gezeigten Typen kommen hier Hangkriechen (I: creep) und die verschiedenen Arten der Gleitung (A, B, C:slide) in Frage. Abb. 7b stellt eine Generalisierung dieser Massenbewegungen dar. Sie ermöglicht die Übertragung des Konzeptes der Plattentektonik. Die abwärts gerichtete Blockbewegung bedingt die Entstehung des oberen Abbruchbereiches, welcher eine konstruktive MB-Grenze, bei der Fläche entsteht, darstellt. Hier und im Weiteren steht MB für Massenbewegung. Die seitlichen Flanken der MB bilden konservative MB-Grenzen, an denen Fläche innerhalb und außerhalb der MB weder dazu noch weg kommt. Der Fuß der Massenbewegung schiebt sich über das Vorland oder wird erodiert. In beiden Fällen geht Fläche verloren, entweder zu Lasten des unbewegten Vorlandes oder der MB selbst. Der Fuß einer Massenbewegung stellt somit eine destruktive MB-Grenze dar.

## 4 Nachführung von Grundstücksgrenzen auf Massenbewegungen im Sinne der Plattentektonik

Die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Generalisierung und der damit hergestellte Bezug zur Plattentektonik setzen voraus, dass die betrachtete MB in erster Näherung als Blockbewegung beschrieben werden kann. Wir wollen diese Möglichkeit am Beispiel der MB Gradenbach überprüfen. Abb. 8a zeigt Geschwindigkeitsvektoren (Horizontalkomponente), die photogrammetrisch für das Zeitintervall 1962–1996 bestimmt wurden (BRÜCKL et al. 2006). Mit Ausnahme weniger, am MB Rand gelegener Vektoren können diese sinnvoll durch eine Blockbewegung angenähert werden. Die Residuen (Abb. 8b) sind nahezu um eine Größenordnung kleiner als die Vektoren im regionalen Referenzsystem. Die Transformation von Koordinaten in ein mitbewegtes, der MB zugeordnetes Referenzsystem könnte bei Bedarf die Wiederherstellung von Grundstücksgrenzen im Lagrange'schen Sinn unterstützen.

Blicke auf den zentralen Teil der MB Gradenbach (Abb. 8c) versichern uns, dass die Grundstücke in der traditionellen Weise nutzbar sind und das Güterwegenetz ohne schwerwiegende Schäden erhalten ist. Ein auf der MB gelegenes Wohngebäude wurde allerdings aus Sicherheitsgründen aufgegeben und andere Häuser sind nur mehr temporär bewohnt. Wir wollen im Rahmen dieser Abhandlung die MB Gradenbach als ein Beispiel vor Augen haben, bei dem die Analogie zur Plattentektonik und die damit verbundene Lagrange'sche Betrachtungsweise von Grundstücksgrenzen Sinn machen könnte.

Bei der Generalisierung (Abschnitt 3.2) haben wir 3 Arten von Begrenzungen der Massenbewegung eingeführt. Im Folgenden wollen wir untersuchen, welche Konsequenzen sich aus der plattentektonischen Betrachtungsweise auf die Nachführung von Grundstücksgrenzen auf Massenbewegungen ergeben.

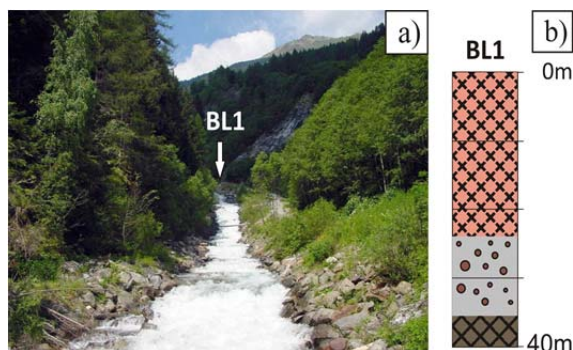


**Abb. 8:** Modellierung einer Massenbewegung durch eine Blockbewegung am Beispiel Gradenbach; a) mittlere Geschwindigkeiten für die Periode 1962–1996 (BRÜCKL et al. 2006); b) Residuen nach Modellierung durch eine Blockbewegung; c) Blicke auf den zentralen Teil der Massenbewegung

#### 4.1 Konservative MB-Grenze

An den seitlichen Flanken der MB haben wir es mit dem Analog einer konservativen Plattengrenze zu tun. Im Maßstab der Plattentektonik sprechen wir von einer Transform-Fault, im Maßstab der MB besser von einer Seitenverschiebung. Die in Abb. 6a und 6b abgebildete Verschiebung und nachfolgende Reparatur eines über die San Andreas Störung laufenden Grenzzaunes nach dem Erdbeben von San Francisco 1906 zeichnet den Weg für die Lösung dieses Grenzproblems vor. Die Wiederherstellung von Straßen und Versorgungsleitungen, die durch die Seitenverschiebungen an den Flanken von MBs versetzt wurden, gestaltet sich zumeist aufwendiger und erfordert ein praxisorientiertes Vorgehen.

#### 4.2 Destruktive MB-Grenze



**Abb. 9:** Destruktive Grenze einer Massenbewegung;  
 a) Blick in das Gradental und auf den Fuß der von rechts kommenden Massenbewegung;  
 b) Profil des Bohrloches BL1: das aufgelockerte Gestein der Rutschmasse überschob den mit Moräne überdeckten Talboden in 24 m Tiefe; fester Fels in 35 m Tiefe

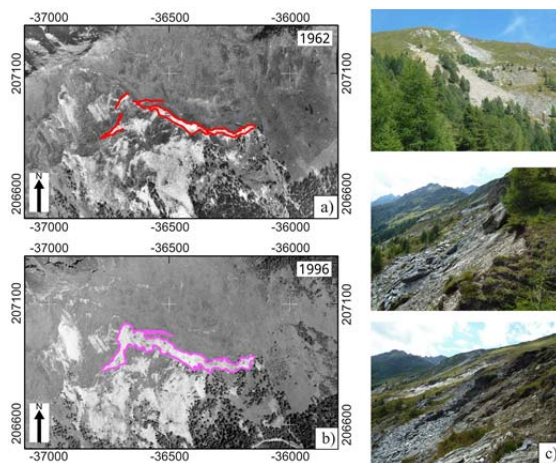
Der Fuß einer MB überschobt zumeist das unbewegte Vorland, sofern er nicht durch einen Bach oder andere Akteure erodiert wird. Während die Fläche der Massenbewegung im Falle einer Blockbewegung erhalten bleibt, verschwindet Fläche des unbewegten Vor-



landes. Wir haben es also mit einer destruktiven MB-Grenze zu tun. Die analoge Grenze in der Terminologie der Plattentektonik ist die Subduktion. Die subduzierte Platte verliert hierbei an Fläche, die überschiebende Platte behält ihre Fläche im Lagrange'schen Sinn. Wir wollen diese Rangordnung auch auf die destruktive Front einer MB übertragen. Mit der MB solcherart in das Vorland getragene Grundgrenzen behalten demnach ihre Gültigkeit. Ein ehemals im Vorland liegendes und durch die MB überschobenes Grundstück wird kleiner oder verschwindet. Die materiell, im Lagrange'schen Sinn auf der MB definierten Grundstücksgrenzen heben die im Euler'schen Sinn festgelegte Grundstücksgrenze des Vorlandes auf. Allerdings kann die Analogie zur Plattentektonik am Fuß der MB wegen Erosion und starker, sekundärer Verformungen auch ihren Sinn verlieren (Abb. 9).

### 4.3 Konstruktive MB-Grenze

Der Abbruch- oder Abrissbereich einer MB stellt eine konstruktive Grenze dar. Durch die Bewegung wird der oberste Teil der basalen Gleitfläche freigelegt und zwischen der unbewegten, obersten Abrisskante und dem Gesteinskörper der MB entsteht neue Fläche, da sich die Grundstücksgrenzen auf der MB im Lagrange'schen Sinn nach unten bewegen. Der Vergleich von Orthophotos aus den Jahren 1962 und 1996 zeigt, wie sich die Abrissfläche der MB Gradenbach in diesem Zeitraum etwa verdoppelt hat (Abb. 10a und 10b). Auch wenn die neu entstehende Fläche im Abrissbereich wenig attraktiv erscheint (Abb. 10c), sollte geklärt werden, ob und wie sich dabei Grundgrenzen ändern.

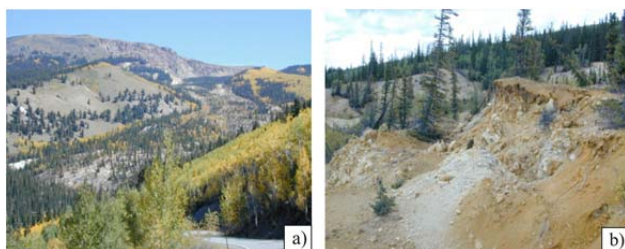


**Abb. 10:**  
Konstruktive Grenze einer Massenbewegung (BRÜCKL et al. 2013);  
a) Ausdehnung der obersten Abrissfläche 1962;  
b) Ausdehnung der obersten Abrissfläche 1996;  
c) Blicke auf den obersten Abrissbereich

Solange die Abrissfläche innerhalb eines Grundstückes liegt, vergrößert sich lediglich dieses Grundstück um die neu entstehende Fläche. Wir wollen aber auch den Fall betrachten, dass eine bestehende Grundgrenze exakt mit der Abbruchkante einer sich später entwickelnden MB zusammenfällt. Seafloor-Spreading ist jedoch ein schlechtes plattentektonisches Analogon zum Abrissbereich einer MB, da diesem kein Spreading-Zentrum zugeordnet werden kann. Wir greifen daher auf eine andere Form der divergenten Tektonik zurück, der Abschiebung. Diese Analogie legt nahe, dass die neu entstehende Fläche dem oberen, nicht bewegten Grundstück zugeschlagen wird, da der Untergrund mit diesem fest verbunden ist.

## 5 Wo macht der Bezug zur Plattentektonik keinen Sinn?

Die Klassifikation von Massenbewegungen (Abb. 7a) weist Typen auf, die sich zwar noch in die getroffenen Generalisierung (Abb. 7b) einfügen, wo aber der Bezug zur Plattentektonik keinen Sinn mehr macht. Es sind dies u.a. „rockfall“, „debris flow“, oder „debris avalanche“ (D, F und G in Abb. 7a). All diesen Typen ist gemeinsam, dass mit der MB verbundene Markierungen ihre Bedeutung für die Grenzziehung verloren haben und die Lagrange'sche Betrachtungsweise und der Bezug zur Plattentektonik keinen Sinn mehr machen. Die folgenden Beispiele sollen dies veranschaulichen.



**Abb. 11:**  
Slumgullion Landslide  
(SCHULZ et al. 2007);  
a) Blick auf den zentralen,  
aktiven Teil;  
b) Detail aus diesem

Abb. 11a bietet einen Blick auf den derzeit aktiven Teil der Slumgullion Massenbewegung in Colorado, USA. Eine sehr schöne Beschreibung dieser, als „landslide“ oder „debris-flow“ bezeichneten Massenbewegung findet sich in SCHULZ et al. (2007). Die aktuelle Bewegung liegt bei 6 m/Jahr und sie kann in einem großen Abschnitt durch eine Blockbewegung angenähert werden. Die hohe Bewegungsrate und große interne Deformation der bewegten Masse (Abb. 11b) machen die Instandhaltung von Verkehrswegen und Versorgungsleitungen, sowie der Erhalt der Infrastruktur auf der MB unmöglich gemacht.



**Abb. 12:**  
Vermurung von Putschall,  
1965 mit Blick auf den Fuß  
der Massenbewegung Gra-  
denbach; das Original des  
Bildes hängt im Gastraum  
des Gradenwirtes, Putschall,  
am Eingang in das Gradental

Das zweite Beispiel (Abb. 12) zeigt die Vermurung von Putschall aus dem Jahr 1965 mit dem unteren Teil der MB Gradenbach. Starkregen führten zu einer hohen Wasserführung des Gradenbaches und einer ruckartigen Beschleunigung der MB. Der Murgang war die Folge der Erosion des Hangfußes und des dadurch verursachten, temporären Aufstaus des

Gradenbachs. Es bedarf sicher keiner besonderen Begründung, dass weder die Prozesse im Quellgebiet der Mure noch im Bereich ihrer Ablagerung zu einer Veränderung von Grundstücksgrenzen führen sollten. Somit gilt in diesen Bereichen die Euler'sche Betrachtungsweise.

## 6 Lösungsansatz aus der Sicht eines Geophysikers

Wir haben uns mit zwei Betrachtungsweisen von Grundstücksgrenzen auf Massenbewegungen befasst, der ortsfesten oder Euler'schen und der materiefesten oder Lagrange'schen. Ich möchte die Lagrange'sche Betrachtungsweise als die naheliegende bezeichnen. Denn solange Grenzmarkierungen fest mit dem Untergrund verbunden erscheinen, werden wir eine solcherart mit unserem Nachbarn festgelegte Grenze als die richtige empfinden. Obwohl wir auf einer bewegten Erde leben (Erdrotation, Gezeiten, Drift der tektonischen Platten, etc.) ist es der Geodäsie gelungen, an tektonische Platten gebundene Bezugssysteme so zu definieren, dass geodätisch eingemessene und damit als ortsfest bezeichnete Punkte mit materiefesten Markierungen innerhalb tolerierbarer Abweichungen zusammenfallen. Verlorengegangene oder verschobene Grenzsteine und Markierungen können daher auch unserem Empfinden nach am „richtigen Ort“ wiederhergestellt werden. Wie schon in 2.1 dargestellt wurde, können wir die Euler'sche Betrachtungsweise mit der Lagrange'schen zusammenführen, indem wir ortsfeste Koordinaten in einem mit dem geologischen Untergrund mitbewegten Referenzsystem festlegen.

Verlaufen Grundgrenzen auf oder über aktive Massenbewegungen, so werden mit dem geologischen Untergrund fest verbundene Grenzsteine, Markierungen, Häuser oder Zäune aus ihrem „richtigen Ort“ im Euler'schen Sinn verschoben. Bleiben Abgrenzungen und traditionelle Nutzung der Grundstücke erhalten und verständigen sich die Grundbesitzer ausdrücklich oder stillschweigend weiterhin darauf, so setzt die Lagrange'sche Betrachtungsweise die Euler'sche außer Kraft. Diese Situation ist nach meinem Wissen derzeit auf der MB Gradenbach gegeben.

Aufwendiger wird es, wenn innerhalb der auf der MB gelegenen Grundstücke Konflikte auftreten, die nach einer objektiven Überprüfung der Grundstücksgrenzen verlangen. Aus Parallelen zwischen Massenbewegungen und Plattentektonik kam ich zum Schluss, dass auf der MB mitgeführte Grenzen die ortsfesten aufheben. Das führt dazu, dass sich Grundstücke vergrößern, wenn sie ausgehend von der MB in die oberste Abrissfläche hineinreichen oder über die oberste Abrisskante hinausgehen. Hingegen verkleinern sich oder verschwinden Grundstücke, die am Fuß der MB von dieser überschoben werden.

Wenn nun auf der MB mitgeführte Grundstücksgrenzen ortsfeste im Vorland aufheben können, so ist die Beantwortung der Frage, welche Massenbewegung oder besser, welche Teilbereiche einer Massenbewegung im Lagrange'schen Sinn behandelt werden sollen von rechtlicher Relevanz. Bei der Entscheidungsfindung sind geodätisch ermittelte Bewegungsraten und Deformationsmuster wesentliche, aber nicht ausreichende Kriterien. Geologische Informationen über die Struktur und den Bewegungsmechanismus der MB, Vorhersagen über deren zukünftiges Verhalten, geotechnische Herausforderungen bei der Erhaltung der Infrastruktur, sowie wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte sollten bei der Entscheidungsfindung mitberücksichtigt werden.

Schließlich haben wir auch den Fall einer, den Zusammenhalt der bewegten Masse auflösenden und die darauf befindliche Infrastruktur zerstörende Massenbewegung betrachtet. Das Gebiet muss entweder verlassen oder nach erfolgter Stabilisierung mit mehr oder weniger aufwendigen Maßnahmen saniert werden. Irgendwo in der Massenbewegung aufgefundene Grenzmarkierungen werden wir nicht mehr als repräsentativ für rechtlich vereinbarte Grundstücksgrenzen halten. Die Übertragung von Modellen und Theoremen der Plattentektonik auf diese Massenbewegungen macht keinen Sinn mehr. Es bietet sich die Wiederherstellung der Grundstücksgrenzen im Euler'schen Sinn an, oder es erfolgt eine Neuordnung der Grundstücke, wobei die Euler'sche Betrachtungsweise die Grundlage bildet.

## Literatur

- ALTAMIMI, Z., MÉTIVIER, L., COLLILIEUX, X. (2011): ITRF20098 Plate Motion Model. European Geosciences Union, General Assembly 2011, Vienna, Austria, 03 – 08 April 2011, Poster EGU2011-4750.
- BRÜCKL, E., BRUNNER, F.K., KRAUS, K. (2006): Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology* (88) 149-159.
- BRÜCKL, E., BRUNNER, F.K., LANG, E., MERTL, S., Müller, M., STARY, U. (2013): The Gradenbach Observatory – monitoring deep-seated gravitational slope deformation by geodetic, hydrological, and seismological methods. *Landslides* (10) 815-829.
- MOORES, E.M. & TWISS, R.J. (1995): *Tectonics*. W.H. Freeman (Ed.), New York, 415.
- PRAGER, W. (1961): *Einführung in die Kontinuumsmechanik*. Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, 228.
- PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T. H. (2004): *Understanding Earth*. Fourth Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 567.
- REID, H.F. (1910): *The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906*. Report of the State Investigation Commission, Vol.2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C.
- SCHULZ, W.H., HIGHLAND, L.M., ELLIS, W.I., GORI, P.L., BAUM, R.L., COE, J.A., SAVAGE, W.Z. (2007): *The Slumgullion Landslide, Hinsdale County, Colorado*. 1st North American Landslide Conference, Vail, Colorado, June 9-10, Field Trip, [http://landslides.usgs.gov/docs/schulz/FieldTrip\\_C.pdf](http://landslides.usgs.gov/docs/schulz/FieldTrip_C.pdf)
- TOPERCZER, M. (1960): *Lehrbuch der allgemeinen Geophysik*. Springer-Verlag, Wien, 384.
- VARNES, D.J. (1978): Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R.L. & KRIZEK, R.J. (eds.): *Landslides - Analysis and control*. National Research Council, Washington. D.C., Transportation Research Board, Special Report 176, 11-33.
- VINE, F.J. & MATTHEWS, D.H. (1963): Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature* (199) 947-949.
- WEGENER, A. (1915): *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 94.