

**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern  
**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft in Bern  
**Band:** 74 (2017)

**Artikel:** Der Geothermie auf der Spur  
**Autor:** Herwegh, Marco / Gischig, Valentin / Spillmann, Thomas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-738059>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

MARCO HERWEGH<sup>1</sup>, VALENTIN GISCHIG<sup>2</sup> UND THOMAS SPILLMANN<sup>3</sup>

## Der Geothermie auf der Spur

### Exkursion zum Hydrothermal-Feld und Felslabor Grimsel vom 27.08.2016

*Die Stromgewinnung mittels Tiefengeothermie stellt ein wichtiger Stützpfeiler der Energiewende 2050 des Bundes dar. Aufgrund der fehlgeschlagenen Geothermieprojekte von Basel und St. Gallen laufen im Moment verschiedene Forschungsprojekte zur Tiefengeothermie und ihrer erfolgreichen Nutzung zur Stromgewinnungen. Um aus Wärme Strom zu erzeugen, müssen Gesteinsbereiche in Tiefen von 4–5 Kilometern mit Temperaturen von mindestens 120°C angezapft werden. Damit ein Wärmetausch zwischen dem heissen Gestein und einem mobilen Wärmeträger (z.B. Wasser) erfolgen kann, muss das Gestein einerseits eine genügend hohe Wasserdurchlässigkeit besitzen und andererseits die längerfristige Zirkulation einer ausreichend grossen Wassermenge pro Zeiteinheit gewährleisten sein.*

*Um diese Voraussetzungen zu erreichen, gibt es zwei generelle Ansätze: Zum einen kann versucht werden, natürliche Fließwege in der Tiefe anzuzapfen (St. Gallen), um direkt die heissen Wässer zur Stromgewinnung zu nutzen. Diese Art der Energieförderung nennt man hydrothermale Systeme. Zum anderen können Gesteine mechanisch in der Tiefe mittels hoher Wasserdrücke aufgebrochen werden, um eine künstliche Wegsamkeit für die Wasserzirkulation zu erzeugen. Dies nennt man dann petrothermale Systeme. Man kann auch beide Systeme miteinander verknüpfen, um ein natürlich bestehendes Fließsystem mittels Stimulierung zu erweitern.*

### Einleitung

Vorhersagen über das Vorhandensein von geeigneten Tiefenbereichen sind für hydrothermale Systeme von der Oberfläche aus sehr schwierig. Man weiss zwar, dass die Tiefenzirkulation heisser Wässer tatsächlich existiert, wo und wieviel Wasser jedoch zirkuliert, ist weitgehend unbekannt. Als Analogbeispiel mag die Entnahme einer Blutprobe gelten, bei welcher der Betroffene nicht Willens ist, den Arm freizulegen, sondern die Spritze ihren Weg durch den Pullover in die Vene finden muss. Es versteht sich, dass es ohne weitere technische Hilfsmittel

<sup>1</sup> Prof. Dr. Marco Herwegh, Institut für Geologie, Universität Bern

<sup>2</sup> Dr. Valentin Gischig, SCCER-SoE, ETH Zürich

<sup>3</sup> Dr. Thomas Spillmann, Nagra, Wettingen

hier viele Versuche benötigt, bis man erfolgreich ist. Im Falle der Tiefengeothermie kostet jedoch jeder durch die Geologen geplante «Nadelstich» mehrere Zehnermillionen Franken. Misserfolge sind somit schlichtweg zu teuer, um mehrere Versuche zu erlauben. Ein weiteres Problem hydrothermalen Systeme sind induzierte Erdbeben. Erhöhte Wasserwegsamkeiten treten häufig in Bruchsystemen der oberen Erdkruste auf. Als Folge der Alpenbildung sind diese Bruchsysteme auch heute noch mechanisch gespannt, was die geringe aber immerhin vorhandene seismische Aktivität in der Schweiz anzeigt. Mit dem Hineinpumpen von Wässern in hydrothermal aktive Fließwege kann eine zusätzliche künstliche Seismizität ausgelöst werden. Solange nur schwache Beben ohne Schäden auftreten, ist dies unproblematisch. Werden die Erdbeben aber deutlich wahrgenommen, steigt die subjektive Wahrnehmung des Gefahrenpotentials und die Anwendung dieser Technologie wird stark hinterfragt. Im Falle petrothermalen Systeme werden beim künstlichen Aufbrechen des Gesteins ebenfalls Beben induziert. Hier wird die grosse Kunst sein, die Energiefreisetzung dieser Beben so zu kontrollieren, dass sie an der Erdoberfläche nicht spürbar sind und keine Schäden an Infrastrukturen auslösen.

Im Rahmen des Swiss Competence Centers for Research of Energy Supply (SCCER-SoE) und des Nationalen Forschungsprogramms (NFP70) arbeiten schweizweit unterschiedliche Forschungsgruppen intensiv an dieser Thematik. Der Zufall will es, dass zwei grössere Forschungsvorhaben momentan im Bereich des Grimselgebietes durchgeführt werden. Zum einen untersucht ein Konsortium, bestehend aus Forschungsteams der Universitäten Bern und Lausanne sowie der ETHZ, natürliche Fließwege im Hydrothermal-Feld Grimselpass. Zum anderen finden im Nagra Felslabor Grimsel Experimente der ETHZ zur künstlich induzierten Erhöhung der Wasserfließwege statt.

Unsere Exkursion hatte zum Ziel, diese beiden Projekte näher kennen zu lernen. Zu diesem Zweck fanden sich 23 interessierte Teilnehmer und Teilnehmerinnen um 7.35h am Institut für Geologie in Bern ein, um von Herrn Kaspar von Dysli Reisen ins Exkursionsgebiet im Grimselgebiet chauffiert zu werden. Bei phantastischem Exkursionswetter führte uns die Reise von der Mittelländischen Molasse, über die Subalpine Molasse und die Helvetischen Decken schliesslich in die Gneise und Granitkörper des Grimselgebietes. Der Exkursionsleiter, Marco Herwegh, vermittelte hierzu während der Fahrt geologische Hintergrundinformation. Nach einem kurzen Kaffee/WC Stopp am Grimselpass, ging es mit dem grossen Reise-car über die äusserst schmale Einspurfahrstrecke Richtung Oberaarsee. Die Millimeterarbeit, vor allem in den engen Kurven, verlangte Herrn Kaspar sein ganzes Fahrkönnen ab, welches er eindrücklich unter Beweis stellte (*Abb. 1*).

Am Trübtensee angekommen, machten sich die Teilnehmer bei stahlblauem Himmel und warmen Temperaturen auf zur Wanderung ins Hydrothermal-Feld Grimsel.



Abb. 1: Absolute Konzentration und Präzisionsarbeit im Millimeterbereich waren von unserem Chauffeur, Herrn Kaspar, auf der engen und seitlich sehr steil abfallenden Oberaar Bergstrasse gefragt (Blick auf Grimselsee und Grimselospiz).

### Einblicke in das Hydrothermal-Feld Grimsel

Vor 22–20 Millionen Jahren, in Mitten der Phase der Alpenbildung, waren die Gesteine des Aar Massivs noch in einer beträchtlichen Tiefe von rund 20 Kilometern bei Temperaturen von 450°C versenkt (CHALLENGES ET AL., 2008; ROLLAND ET AL., 2009). Unter diesen Bedingungen sind Minerale wie Quarz oder Glimmer in den granitischen Gesteinen fließfähig, sprich plastisch verformbar, und es haben sich mehrere 10er Kilometer lange Störungszonen ausgebildet (STECK, 1968; WEHRENS ET AL., HERWEGH ET AL., 2017), welche die ganze Erdkruste durchdrangen (Abb. 2 und 3). In dieser ersten Phase der Deformation (ROLLAND ET AL., 2009; WEHRENS ET AL., 2017) entstanden aus den 300 Millionen Jahren alten granitischen Gesteinen (LABHART, 1977; ABRECHT, 1994; SCHALTEGGER, 1994) in den Störungszonen (Aufschiebungen) feinkörnige, gneissartige Strukturen, sogenannte Mylonite. Während der Hebungsgeschichte wurden die Gesteine vor ca. 14–12 Millionen Jahren nochmals plastisch durch Blattverschiebungen (seitliche horizontale Verschiebung) überprägt (ROLLAND ET AL., 2009; WEHRENS ET AL., 2017; WEHRENS ET AL., 2016), bevor dann die hebungsbedingte Abkühlung der Gesteine zu einer Änderung im Deforma-



Abb. 2: Marco Herwegh erläutert den Zusammenhang zwischen der Hebung des Aar Massivs und den damit assoziierten Störungszonen.



Abb. 3: Die Störungszonen lassen sich an der Oberfläche über mehrere Kilometer verfolgen. Eine der Störungszonen wird von den Exkursions-Teilnehmern näher untersucht.

tionsmechanismus führte. Bei den nun tieferen Temperaturen wurden die Gesteine spröde deformiert, sprich sie zerbrachen. Es ist dieses spröde Aufbrechen, welches Platz und Hohlräume in den Gesteinen schaffte (*Abb. 4*) und somit das Eindringen von Wasser erlaubte. Hier wurden in einer ersten Phase die wunderbaren Kluftminerale des Grimselgebiets wie Quarz, Albit, Adular oder Fluorit auskristallisiert (MULLIS, 1996; BERGEMANN ET AL., 2014). Bei weiterer Abkühlung beschränken sich diese Ausfällungen vor allem auf mikrokristallines und amorphes  $\text{SiO}_2$  (HOFMANN ET AL., 2004; BELGRANO ET AL., 2016).

Es sind die Prozesse der Zirkulation heisser Wässer und ihrer Ausfällungsprodukte die wir heute an der Oberfläche finden. Dieselben Prozesse gehen noch heute im Hydrothermal-Feld Grimsel vonstatten, allerdings in Tiefen von mehreren Kilometern. Sie manifestieren sich unter anderem im Austritt von warmen Wässern bei Gletsch oder im Transitgasstollen, in 250 m Tiefe unterhalb des Grimselpasses (PFEIFER ET AL., 1992; HOFMANN ET AL., 2004; BELGRANO ET AL., 2016). Unsere Untersuchungen belegen deshalb eindrücklich, dass ab dem Zeitpunkt, wenn eine mechanische Schwächezone in der Erdkruste gebildet wird, diese immer wieder im Verlaufe der geologischen Geschichte aufgebrochen und reaktiviert wird. Quantitative Kenntnisse über den dreidimensionalen Verlauf dieser grossräumigen Störungssysteme stellen somit den ersten wichtigen Schritt in der Erkundung von Fliesssystemen bei der Tiefengeothermie dar.



*Abb. 4:* Grimselbreccie aus der Grimselscherzone, bestehend aus ehemaligem Granit, welcher in grosser Tiefe plastisch zu einem Gneis (konkret Mylonit) deformiert wurde, bevor kalte Deformation in seichteren Krustenpositionen zu einem Zerbrechen des Gesteins führte. Man beachte, dass die offenen Poren entlang der Risse als Fliesswege für die hydrothermalen Wässer dienten, wie das Ausfällen von mikrokristallinem Quarz eindrücklich beweist.

Doch wie sehen nun die eigentlichen Fliesspfade in der Tiefe aus und was ist ihre räumliche Ausdehnung? Reicht es aus, wenn wir von der Oberfläche aus die Störungssysteme anbohren, um an heisse Wässer in genügender Menge zu gelangen? Um diese Fragen zu beantworten, wurde durch die Berner Forschungsgruppe von Marco Herwegh die Ausdehnung der Paleofliesssysteme in der Grimselscherzone kartiert und quantitativ erfasst (BELGRANO ET AL., 2016). Als Markersystem wurden hierfür die zuvor erwähnten Tieftemperaturausfällungen auf Kluft- und Bruchflächen verwendet. Dank dieser flächendeckenden Aufnahme kann sehr schön aufgezeigt werden, dass die heissen Wässer räumlich sehr eingeschränkt, entlang von röhrenartigen Fliesspfaden aus mehreren Kilometern Tiefe an die Oberfläche gelangen. Neue geochemische Untersuchungen zeigen, dass diese Wässer ehemalige Oberflächenregenwässer darstellen, welche vor der letzten Eiszeit (ca. 30 000 Jahre) ausgerechnet wurden, langsam in die Tiefe infiltrierten und heute entlang der Förderkanäle wieder an die Oberfläche gelangen (SCHNEEBERGER ET AL., 2017; WABER ET AL., 2017). Eine immer noch bestehende seismische Aktivität in der Erdkruste bricht hierbei kontinuierlich immer wieder die durch Mineralausfällungen verengten oder gar verschlossenen Fliesswege auf, was den Fluss dieser Wässer über geologische Zeiträume hinweg aufrechterhält.

Diese geballte Ladung Wissenschaft wurde bei einem Picknick mit eifrigen Diskussionen verarbeitet und verdaut, bevor es dann zurück zum Bus und mit diesem ins Nagra Grimsel Felslabor ging. Auf dieser Fahrt hat Dr. Valentin Gischtig Hintergrundinformation zur Geothermie in der Schweiz und den Zielen hinsichtlich der Energiewende 2050 vorgestellt. Es gab noch einen Stopp mit Informationen zur Forschungsbohrung Grimsel, deren Resultate aber im Rahmen eines Vortrages im Dezember 2017 den Mitgliedern der NGB und der Mineralien- und Fossilienfreunde Berns vorgestellt werden.

## **Experimente zur induzierten Geothermie im Felslabor Grimsel**

An der Gerstenegg haben Dr. Thomas Spillmann und Ann-Sophie Dorrer (beide Nagra) die Exkursionstruppe in Empfang genommen und mittels Kleinbussen ins Felslabor Grimsel unter dem Juchlistock chauffiert. Thomas Spillmann präsentierte einen umfassenden Überblick über die Forschungsziele des von der Nagra betriebenen Felslabors, hinsichtlich der sicheren Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle. Die mittlerweile über dreissigjährige Erfolgsgeschichte des Felslabors begann zu einem Zeitpunkt, als man noch eine Tiefenlagerung in den Kristallingesteinen der Nordschweiz in Betracht gezogen hatte. Dieses Ziel verlor in den späten 1980'er Jahren an Bedeutung, als man die starke Durchsetzung des Wirtgesteins durch Störungszonen (ähnlich den am Morgen am Grimselpass besuchten Systeme) mittels Bohrungen feststellen musste. Opalinuston, mit seinen natürlichen Selbstheilungsprozessen und seiner äusserst geringen Wasserdurchlässigkeit, trat in der Folge als erfolgversprechendes Wirtgestein in den Vordergrund der Forschung.

Letztlich sind sichere Lagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtgesteinen möglich, was verschiedene bewilligte Projekte oder bereits in Betrieb befindliche Tiefenlager im Ausland bezeugen (z.B. Finnland). Basis für diese Arbeiten bildete nicht zuletzt die internationale Forschung, wie sie auch im Felslabor Grimsel in den letzten rund 30 Jahre ununterbrochen auf Spitzenniveau betrieben wurde.

Zu Beginn lagen die Forschungsschwerpunkte stark auf der Exploration vom kristallinen Wirtgesteinen, den Strukturen und den zugehörigen hydrogeologischen Eigenschaften. Nach und nach verlagerte sich der Schwerpunkt auf die Untersuchung realistischer Lagersysteme und ihrer Auswirkungen im Nahfeld von Lagerstollen.

Mit dem Aufkommen der Tiefengeothermie sind die Kristallingesteine in der Schweiz wieder massiv ins Interesse der Forschung gerückt, werden doch in der Schweiz in 4–5 Kilometer Tiefe vor allem kristalline Gesteine angetroffen. Aus diesem Grund finden durch die ETHZ seit 2015 auch Experimente zum künstlichen Aufbrechen dieser Gesteine zur Erhöhung der Fließspfade statt. Nach einem Aufteilen in zwei Gruppen, wurde jeweils eine Gruppe durch Valentin Gischig in diese Experimente und den Stand der Erkenntnisse eingeführt, während dem die andere Gruppe die Deformationsstrukturen in den Tunnelsystemen des Felslabors (MARCO HERWEGH) und die Konzepte der Endlagerung (THOMAS SPILLMANN) näher betrachten. Bei Halbzeit wechselten die Gruppen die jeweiligen Themenbereiche. Das eigentliche Forschungsobjekt im ETHZ Experiment ist eine Schwächezone im Gestein, welche aus einem stark deformierten basischen Ganggestein besteht und das Felslabor im südlichen Teil durchsetzt. Ziel ist es, diese Störzone zu stimulieren,



Abb. 5: Umfassende und kompetente Einführung ins Felslabor Grimsel durch Thomas Spillmann.

d.h. mit hohem Druck Wasser zu verpressen, bis es zu einem kleinen Gleiten/ Versatz entlang der Störzone kommt, oder das umliegende Gestein zerbricht. Wir wollen damit im Kleinen abbilden, was bei einer grossen Stimulation, wie z.B. in Basel, passiert. Im Gegensatz zu solchen tiefen Stimulationen sind wir im Felslabor aber ganz nahe am Geschehen. Wir kommen mit weniger als 50 m langen Bohrlöchern nahe an die Störzone, wo die Prozesse ablaufen. Dort können wir dann mit zahlreichen hoch-sensitiven Instrumenten Felsdeformation, Wasserdruck, kleine Erdbeben, Rissbildung etc. registrieren. So erhoffen wir uns die Prozesse, die während der Stimulation in einem tiefen Geothermie-Reservoir ablaufen würden, im Detail nachzubilden und verstehen zu können. Denn nur durch dieses fundamentale Verständnis und die Möglichkeit der Prozessquantifizierung können wir Strategien finden, wie die Wasserwegsamkeit von Gesteinen in grosser Tiefe optimiert und das Erdbebenrisiko bei Stimulationen minimiert werden können. Das Experiment beschäftigt zurzeit 15–20 Leute der ETHZ und deren Partner und wird voraussichtlich im Februar 2017 stattfinden. Im Rahmen der Exkursion konnten wir das Experiment-Design, Teile der Instrumentierung und die Störzone betrachten und diskutieren.

Pünktlich um 16 h ging es dann wieder mit dem Bus auf den Heimweg nach Bern, wo die Gruppe um 18 h in den sommerlichen Samstagabend entlassen wurde.

## Verdankungen

MH und VS verdanken die finanzielle Unterstützung ihrer Forschungsarbeiten zur Geothermie durch das Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE) und des Schweizerischen Nationalfonds.



Abb. 6: Experiment zum stimulierten Aufbrechen des Kristallingesteins.

## Referenzen

- ABRECHT, J., 1994: Geologic units of the Aar Massif and their pre-Alpine rock associations: a critical review. The pre-Alpine crustal evolution of the Aar, Gotthard and Tavetsch massifs: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, v. 74, p. 5–27.
- BELGRANO, T. M., HERWEGH, M., AND BERGER, A., 2016: Inherited structural controls on fault geometry, architecture and hydrothermal activity: an example from Grimsel Pass, Switzerland: *Swiss Journal of Geosciences*, v. 109, p. 345–364.
- BERGEMANN, C., GNOS, E., BERGER, A., WHITEHOUSE, M., PETTKE, T., AND JANOTS, E., 2014: Shear zone activity of the Grimsel area (Aar-massif): Th–Pb data in hydrothermal cleft monazite, *in* Proceedings Swiss Geoscience Meeting 2014.
- CHALLENGES, N., MARQUER, D., AND VILLA, I., 2008: P-T-t modelling, fluid circulation, and <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar and Rb-Sr mica ages in the Aar Massif shear zones (Swiss Alps): *Swiss Journal of Geosciences*, v. 101, p. 269–288.
- HERWEGH, M., BERGER, A., BAUMBERGER, R., WEHRENS, P., KISSLING, E., 2017: Large-scale crustal block extrusion during late Alpine collision. *Nature Scientific Reports*, 7:413, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5428471/>.
- HOFMANN, B. A., HELFER, M., DIAMOND LARRY, W., VILLA IGOR, M., FREI, R., AND EIKENBERG, J., 2004: Topography-driven hydrothermal breccia mineralization of Pliocene age at Grimsel Pass, Aar Massif, Central Swiss Alps: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, v. 84, no. 3, p. 271–302.
- LABHART, T. P., 1977: Aarmassiv und Gotthardmassiv, Berlin, Stuttgart, Gebrüder Bornträger, Sammlung geologischer Führer, 173 p.
- MULLIS, J., 1996: PTt path of quartz formation in extensional veins of the Central Alps: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, v. 76, no. 2, p. 159–164.
- PFEIFER, H.-R., SANCHEZ, A., AND DEGUELDRE, C., 1992: Thermal springs in granitic rocks from the Grimsel Pass (Swiss Alps): The late stage of a hydrothermal system related to Alpine Orogeny, *in* Kharaja, and Maest, eds., *Water-Rock Interaction*: Rotterdam, Balkema.
- ROLLAND, Y., COX, S. F., AND CORSINI, M., 2009: Constraining deformation stages in brittle–ductile shear zones from combined field mapping and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating: The structural evolution of the Grimsel Pass area (Aar Massif, Swiss Alps): *Journal of Structural Geology*, v. 31, p. 1377–1394.
- SCHALTEGGER, U., 1994: Unraveling the premesozoic history of aar and gotthard massifs (central alps) by isotopic dating – a review: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, v. 74, no. 1, p. 41–51.
- SCHNEEBERGER, R., MAEDER, U. K., AND WABER, H. N., 2017: Hydrochemical and isotopic ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ) characterization of fracture water in crystalline rock (Grimsel, Switzerland): *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 17, p. 738–741.
- STECK, A., 1968: Die alpidischen Strukturen in den zentralen Aargraniten des westlichen Aarmassivs: *Elogae Geologicae Helvetiae*, v. 61, p. 19–48.
- WABER, H. N., SCHNEEBERGER, R., MAEDER, U. K., AND WANNER, C., 2017: Constraints on evolution and residence time of geothermal water in granitic rocks at Grimsel (Switzerland): *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 17, p. 774–777.
- WEHRENS, P., BERGER, A., PETERS, M., SPILLMANN, T., AND HERWEGH, M., 2016: Deformation at the frictional-viscous transition: Evidence for cycles of fluid-assisted embrittlement and ductile deformation in the granitoid crust: *Tectonophysics*, v. 693, p. 66–84.
- WEHRENS, P. C., BAUMBERGER, R., BERGER, A., AND HERWEGH, M., 2017: How is strain localized in a meta-granitoid, mid-crustal basement section? Spatial distribution of deformation in the central Aar massif (Switzerland): *Journal of Structural Geology*, v. 94, p. 47–67.