

Komplexe Analyse des Trennflächengefüges mit Differenzierung von natürlichen und induzierten Bohrlochstrukturen

Autor

Dipl.-Geol. Tobias Heyn, BLM-Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Poing bei München

Zusammenfassung

Die Bewertung der räumlichen Lage und Verteilung von Gefügeelementen ergibt eine wesentliche Aussage zur Einordnung und Beschreibung des Untergrundes in der Phase der Erkundung für Bauvorhaben mit größeren Gründungstiefen und strukturgeologischer Relevanz. Neben den als natürlichen Ursprungs anzusprechenden Strukturen, wie Schichtflächen und tektonisch bedingter Klüfte können aber auch, infolge des Bohrprozesses, induzierte Trennflächen auftreten, deren Genese und Ausprägung eng durch die mechanische Wechselwirkung des Bohrwerkzeugs mit dem gespannten Gebirge verbunden sind. Die differenzierte Ansprache dieser künstlichen, für geotechnische/hydraulische Fragestellungen häufig überbewerteten Trennflächen zusammen mit der Bewertung charakteristischer Bohrlochwandausbrüche (Breakout-Analyse) eröffnen dem Geotechniker/Strukturgeologen neue Möglichkeiten bei gleichzeitig präziseren Daten.

1. Einleitung

Das Vordringen eines Bohrwerkzeugs in den gewachsenen Festgesteinsuntergrund stellt immer eine lokale Störung des bohrlochnahen Spannungsfeldes dar. Die Kräfte, die durch das Bohrgerät über das Bohrgestänge und letztlich auf den Meißel/Krone in den Untergrund abgeleitet werden, interagieren mit jenen, die über die Gebirgsspannung auf den zylindrischen Hohlraum der Bohrung wirken. Das eingesetzte Spülgewicht bzw. der angelegte Spülungsdruck wirken dieser entgegen. Neben natürlichen Anisotropien wie beispielsweise sedimentäre Wechsel und bereits auf natürlichem, also tektonischem Wege angelegte Klüftung, entstehen gerade in spröden/elastischen, aber auch in plastischen Gesteinen charakteristische Brüche bzw. Ausbrüche, die allein auf den Bohrvorgang bzw. auf die nachfolgende Verformung des ursprünglich kreisrunden Bohrlochs unmittelbar nach dem Abteufen oder länger wählender Stillstandszeit des Bohrlochs zurückzuführen sind. Nicht nur bei speziellen Anwendungen, wie z.B. in der Reservoirbeurteilung in Öl/Gas und Geothermie, sondern gerade bei geotechnischen Fragestellungen im weiteren Sinne, ist es nach differenzierter Ansprache dieser künstlichen Gefügemerkmale und Separation von natürlichen Strukturen vorstellbar, die Orientierung des aktuell im Untergrund vorhandenen Horizontalspannungsfeldes, quasi als Nebeninformation der allgemeinen Strukturanalyse, abzuleiten. Mit Hilfe effizient einzusetzender und hochauflösender, bildgebender Verfahren der Bohrlochgeophysik ist es

heute möglich, eine aussagekräftige Datenbasis zu erlangen und nach dem Stand der Technik interpretativ auszuwerten. Ziel der Erkundungen, für deren Basis es übrigens keiner aufwändigen Kernbohrung bedarf, sondern mehr und mehr in wirtschaftlichen Vollbohrungen zum Einsatz kommen, ist neben der fachgerechten Trennflächenansprache auch deren Statistik, die ohne Berücksichtigung bohrinduzierter Bohrlochstrukturen (auch *drill induced fractures*, *DIF* genannt) meist zu hoch bewertet wird.

Eine weitere Bedeutung und weiterreichende Interpretationen findet die komplexe Analyse des Trennflächengefüges in hydraulischen und allgemein strukturgeologischen Aufgabenstellungen.

2. Stressregime

Unter der Maßgabe vertikaler bis subvertikaler Bohrungen in einer für die meisten Gebiete der Erde geltenden Stressorientierung,

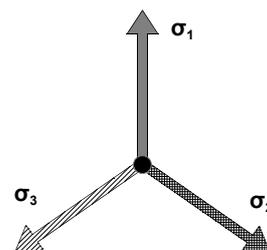


Abb. 1: Senkrecht zueinander stehende Hauptspannungsrichtungen σ_1 , σ_2 , und σ_3

wo die vertikale Überlagerungsspannung (S_V) größer als die beiden senkrecht dazu stehenden Horizontalspannungen (S_{Hmax} und S_{Hmin}) ist, können sich bei einer üblicherweise stets vorhandenen Differenz der Horizontalspannungen ($S_{Hmax} > S_{Hmin}$) charakteristische Bohrlochwand-

ausbrüche- und Lineamente ausbilden, die eben dieses Spannungsfeld skizzieren.

Die Spannung selbst lässt sich als jene Kraft per Flächeneinheit definieren, die auf eine gedachte Fläche im Raum wirkt. Jeder Spannungszustand innerhalb eines festen Körpers kann anhand der Orientierung und der Magnitude dreier, jeweils senkrecht zueinander stehender Hauptspannungsrichtungen beschrieben werden. Für den Fall eines eingebetteten Gesteinskörpers gilt die Voraussetzung, dass $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, wobei σ_1 der Vertikalspannung S_V und σ_2 und σ_3 den Horizontalspannungen S_{Hmin} bzw. S_{Hmax} entsprechen. Alle Spannungen sind prinzipiell kompressiv. In der Regel ist das System der Horizontalspannungen in einem durch anhaltende Orogenese oder durch starke Morphologie geprägten Gebiet nicht ausgeglichen, sodass sich eine Achse der Haupthorizontalspannung (S_{Hmax}) ausbildet. In tektonisch stark aktiven Regionen kann das vertikale Spannungsfeld auch geneigt sein.

2.1. Bohrlochdaten

Nach Abteufen der Bohrung bis zum Zielhorizont kommt geophysikalische Scannermesstechnik zum Einsatz, deren Prinzipien

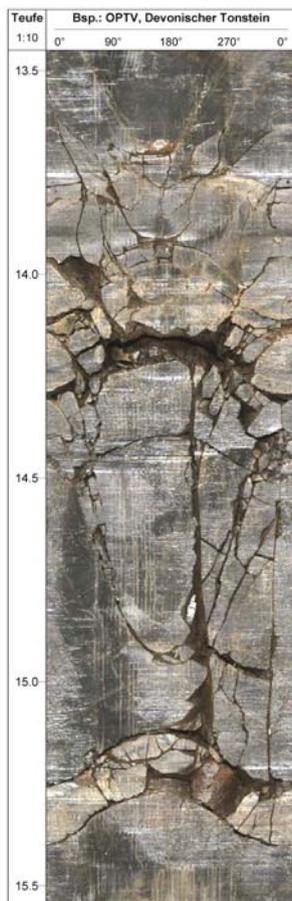


Abb. 3 Messbeispiel OPTV, Devonischer Tonstein, Luxemburg, zeigt Schichtung, natürliche und induzierte Brüche

zum einen optisch (OPTV) in trockenen und mit klarem Fluid gefüllten Bohrungen, als auch akustisch (ABF) in Wasser, auch trüben Fluid gefüllten Bohrlöchern funktionieren. Beiden Verfahren gemein ist die eindeutige Zuordnung der aufgenommenen Bildpunkte mit deren realer Lage an der Bohrlochwand. Hinzu kommen Neigung/Azimut der Bohrung um die wahre Raumlage der Bohrung zu bestimmen. Sonst für die Geometrie essentielle Daten wie das Bohrlochkaliber (CAL) können separat gemessen (beim Einsatz der OPTV) oder anhand der Laufzeit (ABF) simultan mit der Scannermessung selbst aufgenommen werden. Das Messergebnis stellt immer eine Nordorientierte 360°-Abwicklung der Bohrlochwand dar.

Die Datenverarbeitung erfolgt mit spezieller Software, welche die gesammel-

ten Gefügedaten sowohl in graphischer (z.B. Schmidt'sches Netz, Rosediagramme) als auch in tabellarischer Form auszugeben vermag. Die eigentliche Aufnahme der Trennflächendaten erfolgt stets im scheinbaren Einfallen der Bohrlochachse. In einem nachfolgenden Arbeitsschritt werden die gewonnenen Strukturdaten entsprechend der Bohrlochneigung und -richtung in Bezug zur wahren Raumlage korrigiert.

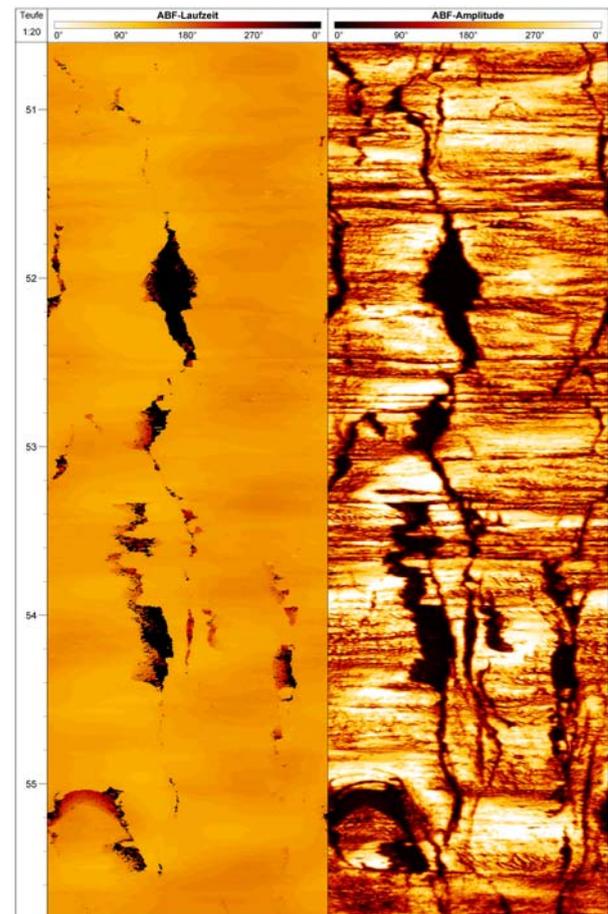


Abb. 2: Messbeispiel ABF, induzierte Brüche, Pseudo-Breakouts im Bereich der centerline-fractures (S_{Hmax})

2.2. Differenzierung der verschiedenen Trennflächentypen

Der Interpretation der erkennbaren Bohrlochwandstrukturen liegt, wie eingangs erwähnt, prinzipiell der Versuch zu Grunde, natürliche, im ungestörten Gebirge bereits angelegte und ausgebildete Trennflächen von jenen zu unterscheiden, die sich erst als Folge der abgeteufte Bohrung im gestörten Gebirge ausbilden.

Zu den natürlichen Gefügeelementen werden zum einen die Schichtungsanzeiger im Bereich von Materialwechseln gezählt, auch als primär zu bezeichnende Strukturen, die z.B. den sedimentären Aufbau des Untersuchungsfeldes widerspiegeln und zum anderen sekundäre Strukturen, die sich in Folge tektonischer Belastungen in geologischen Zeiträumen auf den Gesteinskörper ausgebildet haben. Die dabei entstehenden Richtungsmuster können im Zuge einer Gefügeanalyse

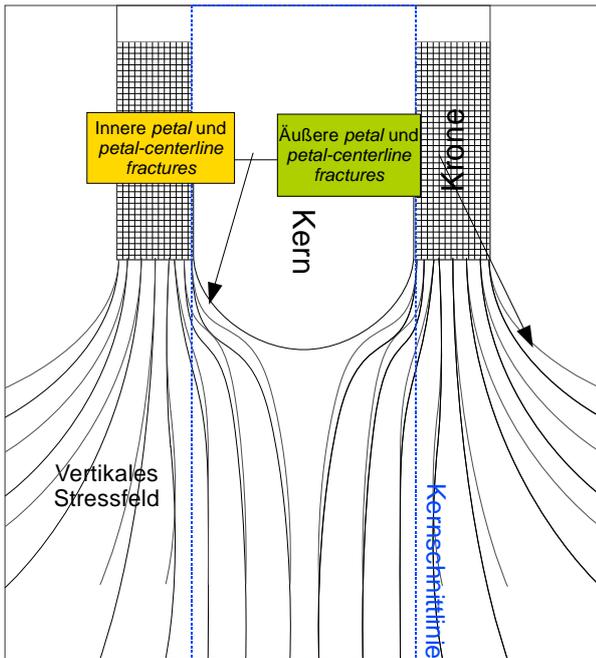


Abb. 4: Schematische Darstellung des vertikalen Stressfeldes als Wirkung der nach unten propagierenden Bohrkrone. Innere *Petal- und petal-centerline fractures* folgen der idealen Lastabtragung hin zur Mitte des Bohrkerns. Die lateralen Brüche bleiben als induzierte Brüche an der Bohrlochwand überliefert (frei nach Lorenz).

unter Umständen einem oder mehrerer voneinander separierter tektonischer Phasen zugeordnet werden und lassen Diskordanzen innerhalb der sedimentären Abfolge erkennen.

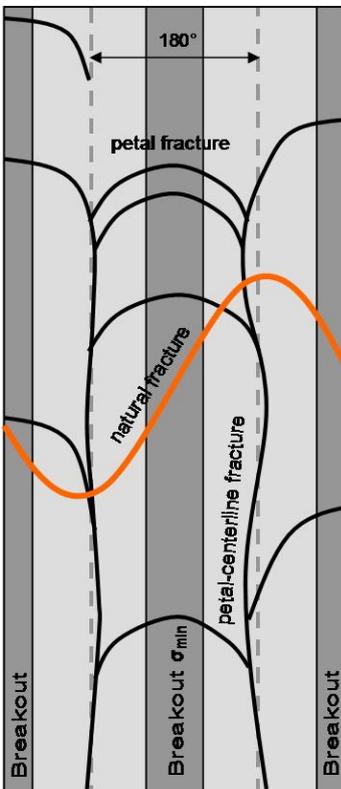


Abb. 5: 360° Bohrlochwand-Abwicklung. Ausbildung charakteristischer Brüche im Spannungskreis einer Bohrung (frei nach Lacazette).

Jene Trennflächenmuster, die erst als Folge der mechanischen Belastung durch Bohrmeißel- bzw. Krone und der nachfolgenden lateralen Entlastung durch das nurmehr Fluid gestützte Bohrloch entstehen, werden als induzierte Brüche bezeichnet und müssen im strukturellen Sinne separat betrachtet werden. Dieses in der Regel streng geometrisch und charakteristisch angelegte Gefüge bleibt weitestgehend auf den bohrlochnahen Bereich beschränkt und orientiert sich ausschließlich an der rezenten Gebirgsspannung.

So stehen die azimutalen Winkel der Extrempunkte (Fall- bzw. Steigrichtung) der sinusoidalen Trennflächenabbildung senkrecht zur maximalen Horizontalspannungsrichtung (SH_{max} bzw. σ_{max}) und definieren somit SH_{min} bzw. σ_{min} (vgl. Abb. 7). Die Literatur beschreibt hier sog. *petal* oder blütenblattförmige, gebogene / geknickte Strukturen mit Minima/Maxima im Dilatationsfeld (SH_{min} bzw. σ_{min}) des Spannungskreises bzw. *petal-centerline fractures*, die unter Einnahme variabel einsteilender Einfallswinkel und Ausbildung von praktisch senkrechten, sich der Theorie nach 180° gegenüberstehenden Brüchen die Hauptspannungsrichtung (SH_{max} bzw. σ_{max}) definieren (vgl. Abb. 7).

Da sich diese bohrinduzierten Strukturen sowohl im Bohrkern als auch an der Bohrlochwand abbilden (vgl. Abb.4), werden diese in der allgemeinen Kernansprache und/oder der unvollkommenen Interpretation von Bohrlochscannermessungen (z.B. optisch oder akustisch) mit aufgenommen, was letztlich zu einer falschen Einschätzung des tatsächlichen Zerlegungsgrads führt. Dieser kann jedoch für geotechnische oder auch hydraulische Fragestellungen von enormer Bedeutung sein.

Entscheidungsmerkmale für die Bestimmung von induzierten Trennflächen: **Induzierte Brüche (DIF)**...

- ... bilden sich nur in spröden / elastischen, also kompetenten Gebirgen, in den max. kompressiven Quadranten (SH_{max} bzw. σ_{max}) einer Bohrung aus.
- ...entstehen durch lokale Extension in den max. kompressiven Quadranten (SH_{max} bzw. σ_{max}) einer Bohrung.
- ... sind schichttreu, d. h. sie schneiden die Bohrung nicht vollständig, sondern enden i.d.R. an der Grenzfläche einer sedimentären Diskontinuität. Dahingegen schneiden natürliche Klüfte, die im gewachsenen, allseitig unter Spannung stehenden



Abb. 6: Kernaufnahme (Triassischer Kalkstein) mit ~vertikalen, natürlichen Klüften. Eindeutige Ansprache als natürlichen Ursprungs belegt durch die Anwesenheit von Calcitkristallen in der Kluftöffnung (BLM)

Gesteinsverband (kein zur Verfügung stehender Expansionsraum durch eine Bohrung) entstehen, unabhängig vom Schichtmaterial das ganze Bohrloch.

- ...treten meist, in Abhängigkeit von der Lithologie, in Scharen auf und sind in ihrer azimutalen Orientierung weitgehend winkeltreu.
- ...sind häufig nur an ihren Extremata in der sinusoidalen Darstellung ausgebildet.
- ...umfassen *petal fractures*, also im Bereich der Extremata (meist Maximum des Sinus) gebogene, Flächen, deren Wendepunkt in der Mitte des min. kompressiven Teil (SH_{min} bzw. σ_{min}) liegt.
- ...umfassen *petal-centerline fractures* deren Schenkel sich in die beiden max. kompressiven Quadranten (SH_{max} bzw. σ_{max}) des Spannungskreises verlängern und dort mitunter sehr lange ~vertikale Risse ausbildet
- ... sind immer offene Strukturen, d.h. es darf dort keine Remineralisation stattgefunden haben, sonst sind diese Strukturen klar natürlichen Ursprungs.
- ...haben obwohl sie geöffnete Strukturen ausbilden, primär keine größere Reichweite ins Gebirge sondern sind auf den Bohrlochnahen Bereich (wenige cm bis dm) beschränkt.
- ...können entlang der *centerline fracture* ausbrechen und sog. Pseudo-Breakouts (vgl. Abb. 3) ausbilden, die nicht mit den nachfolgend beschriebenen echten *Breakouts* verwechselt werden dürfen.

2.3. Breakout Analyse

Die ursprünglich aus der Explorationsgeologie bekannte Methode der Breakout-Analyse bietet zusätzlich die Möglichkeit, neben den vorgenannten induzierten, mittels Zuordnung über eine Sinuskurve definierten Trennflächen, auch häufig noch weitere Merkmale, die in einem Bohrloch zu finden sind, zu klassifizieren und

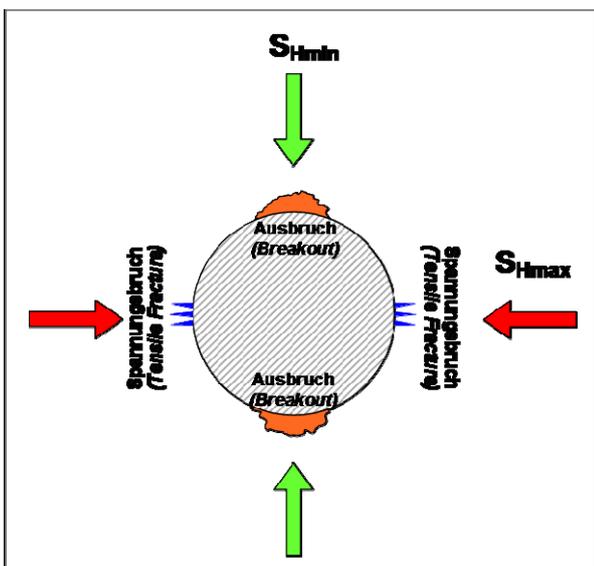


Abb. 7: Der Horizontalschnitt durch eine Bohrung verdeutlicht die Zusammenhänge der Horizontalspannungsrichtung mit den charakteristischen *Breakout* Merkmalen (frei nach Lacazette)

interpretieren. Zu diesen zählen Spannungsbrüche (*Tensile Fractures = centerline fractures*), die sich per definitionem parallel zur maximalen Horizontalspannungsrichtung (SH_{max} bzw. σ_{max}) ausbilden und Ausbrüche (*Breakouts*), die senkrecht dazu die Richtung der minimalen Horizontalspannungsrichtung (SH_{min} bzw. σ_{min}) anzeigen. Letztlich reflektieren diese charakteristischen Ausbruchsmerkmale den rezenten, aber auch den im Gesteinskörper konservierten Spannungszustand.

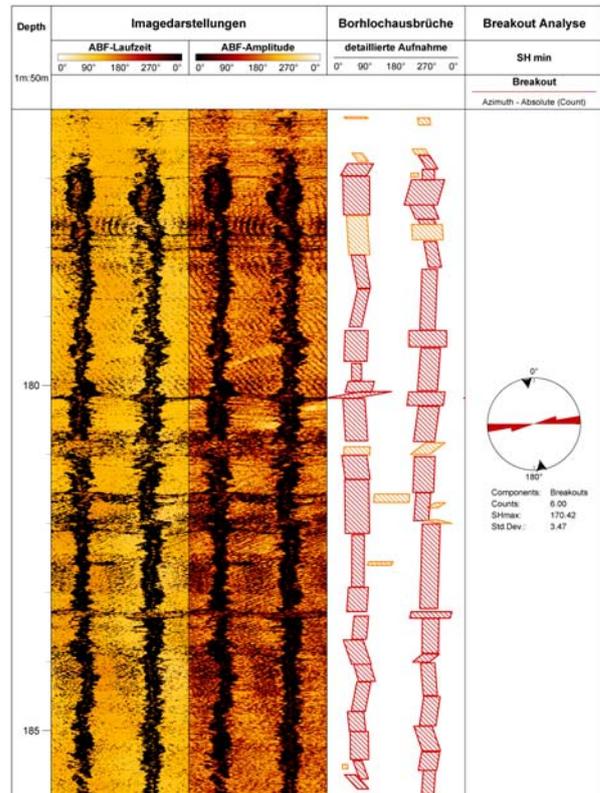


Abb. 8: Mess- und Auswertebispiel einer Breakout-Analyse in plastisch deformierbaren Tonsteinen (Opalinuston). Die vertikal verlaufenden *Breakouts* sind hier besonders regelrecht ausgeprägt. Die Berechnung der Haupthorizontalspannungsrichtung erfolgt stets in der Mitte der *Breakouts*. Im oberen Drittel des Ausschnitts kann man erkennen, dass der Ausbruch, der sich immer von außen ins Zentrum von SH_{min} ausbreitet nicht immer symmetrisch propagiert.

In kompetenten Gesteinen treten klassische *Breakouts* nur bei extrem starken Horizontalspannungen, z.B. in Orogenzonen auf. Auch große Tiefen über mehrere 1000 m begünstigen das Auftreten dieser Strukturen nicht. So ist das gleichzeitige Auftreten von *Tensile Fractures* und *Breakouts* nicht zwingend, vielmehr entscheidet der heterogene lithologische Aufbau des erbohrten und vermessenen Untergrundes über deren Ausprägung. So sind die *Tensile Fractures* oder induzierten Brüche im Allgemeinen, wie bereits zuvor erwähnt, auf spröde/elastische Gesteine wie z.B. Kalksteine/Tonschiefer oder das Grundgebirge s.l. beschränkt. Damit sich die charakteristischen *Breakouts* entwickeln können bedarf es neben einer ausreichend hohen Horizontalspannung vor allem ein weniger festes, plastisch deformierbares Gebirge, wie es z.B. Mer-

gel oder manche Tonsteine (z.B. Opalinuston, vgl. Abb. 8) aufweisen. In der Regel weisen auch diese Ausbrüche keine laterale Reichweite ins Gebirge auf. Ebenso wie die Trennflächenanalyse kann die Auswertung der Breakout-Analyse graphisch und nach statistischen Gesichtspunkten erfolgen (vgl. Abb. 8) Im Ergebnis finden sich die Angaben zu den Richtungen von SH_{\max} bzw. SH_{\min} . Erweitert werden kann die Interpretation hinsichtlich der Ausbruchfläche prozentual zum Bohrlochumfang um ggf. nach einer zwischenzeitlichen Stimulation des Bohrlochs (*hydro fracking*) und Wiederholung der Scannerbefahrung die Bohrlochentwicklung zu dokumentieren und quantitativ zu bewerten.

3. Zusammenfassung

Die heute zur Verfügung stehenden geophysikalischen Messmittel erlauben in Festgesteinsbohrungen u.a eine präzise Abbildung von Bohrlochwänden unabhängig vom gewählten Bohrverfahren. Mit Kenntnis der Genese von natürlichen Trennflächen im Allgemeinen und von induzierten Brüchen und *Breakouts* im Speziellen kann nicht nur der allgemeine struktureologische Informationsgewinn gesteigert sondern auch die Aussagequalität für struktur- und hydrogeologische Aufgabenstellungen wesentlich verbessert werden.

4. Literatur

- [1] **Brudy M., Zoback M. D.** (1993) Compressive and tensile failure of boreholes arbitrarily inclined to principal stress axes: application to the KTB boreholes, Germany. *Int JRock Mech MinSci* 1993;30:1035–8.
- [2] **Lacazette A.**, (2000) Natural Fracture Nomenclature, Disk 1, 13 pages, in L.B. Thompson (editor) *Atlas of Borehole Images*, AAPG Datapages Discovery Series 4, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa (2 compact disks).
- [3] **Madritsch H., Hertrich M., Heyn T., Scheck E.**, (2014) Project Report NPB, Auswertung & Interpretation geophysikalischer Bohrlochmessungen im Oberen Muschelkalk der Geothermiebohrung Schlattingen-2, nicht veröffentl. Bericht, Nagra (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) Schweiz
- [4] **Engelder T., Lacazette A.**, (1990), Natural hydraulic fracturing: p. 35 - 43 in N. Barton and O. Stephansson (editors): *Rock Joints: Proceedings of the international symposium on rock joints*. Loen, Norway. June 4-6, 1990: A.A. Balkema, Brookfield.
- [5] **Corias - Core Interpretation Assistance**
www.corias.com
- [6] **Zoback M D, Moos D, Mastin L.** Wellbore breakouts and in situ stress. *J Geophys Res*, 1985; 90 (B7): 5523–30.
- [7] **Lorenz J. C., Finley S. J, Warpinski N. R.** (1989) Significance of Coring-Induced Fractures in Mesa-verde Core, Northwestern Colorado, Society of Petroleum Engineers, SPE-19517-MS