

Scherungstendenzanalyse für das Störungssystem an der Bohrung Geretsried GEN-1ST-A1 im südlichen Bayerischen Molassebecken



Dussel, M.¹⁾, Budach, I.²⁾, Moeck, I.¹⁾

¹⁾ Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover

²⁾ GTN Neubrandenburg

Michael.Dussel@leibniz-liag.de

↓ Geretsried



- *Exploration, Test und Analyse des ersten kluftdominierten dolomitischen Aquifers im tiefen Malm: Explorationskonzept Störungsverschnitt („Zwickel“)*
> Permeabilitätsstruktur

Projektpartner

- Enex (Betreiber, *Koordination bis Ende 2017*)
- **LIAG (Koordination seit 2018, Bohrlochseismik, Kernbohren, Reservoircharakterisierung, Scherungstendenz-Analyse)**
- TUM Ingenieurgeologie (*Geomechanik, Fazies, Diagenese*) und Hydrogeologie (*Labor: Poro-Perm, TH-Modellierung*), 3 PhDs
- GEOS (*Seismik Interpretation, Auswertung hydraulische Tests*)
- GTN (*hydraulische Tests, Mud log (Petrographie)*)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Motivation

Sidetrack Geretsried GEN-1ST-A1 nicht fündig

- Plan B: Säure-Stimulation + Stützmittel

Hydrotektonik (Larson, 1972) – Störungs-Reaktivierungspotential

- positiv: Wasserwegsamkeiten / negativ: induzierte Seismizität im Betrieb
- Erstmals traten mikroseismische Ereignisse im Großraum München kurz nach Inbetriebnahme der Geothermieanlage Unterhaching im Jahr 2008 auf.
- Im Dezember 2016 kam es bei Poing zu mikroseismischen Ereignissen - in der Nachbarschaft einer geothermischen Anlage, die schon mehrere Jahre in Betrieb war.
- Mit der Bohrung Geretsried nähert man sich nun weiter der Faltenmolasse an, was bedeutet dies für das Spannungsregime?

Gliederung

- ✓ Motivation
- ❖ Grundlagen
- ❖ Regionales Spannungsfeld
- ❖ Spannungsregime am Standort Geretsried
- ❖ Neuinterpretation der Störungszone im Raum Geretsried nach VSP (Gartenbergstörungssystem)
- ❖ Scherungstendenzanalyse für das Gartenberg-Störungssystem im Reservoir (Malm)
- ❖ Schlussfolgerung

Spannungsfeld und Trennflächen

Im Gebirge treten durch aktuelle oder fossile Plattenbewegungen Kräfte auf, die zu Spannungen in der Erdkruste führen. Das derzeitige Spannungsfeld setzt sich dabei aus rezenten und fossilen Spannungen zusammen. Zudem kann das regionale Spannungsfeld lokal durch Heterogenitäten wie Störungsflächen, Festigkeitsänderungen und Lagerungsverhältnissen in Magnitude, Verhältnis und Richtung verändert sein.

Anderson'sche Theorie über optimal orientierte Trennflächen in Bezug auf das Spannungsfeld

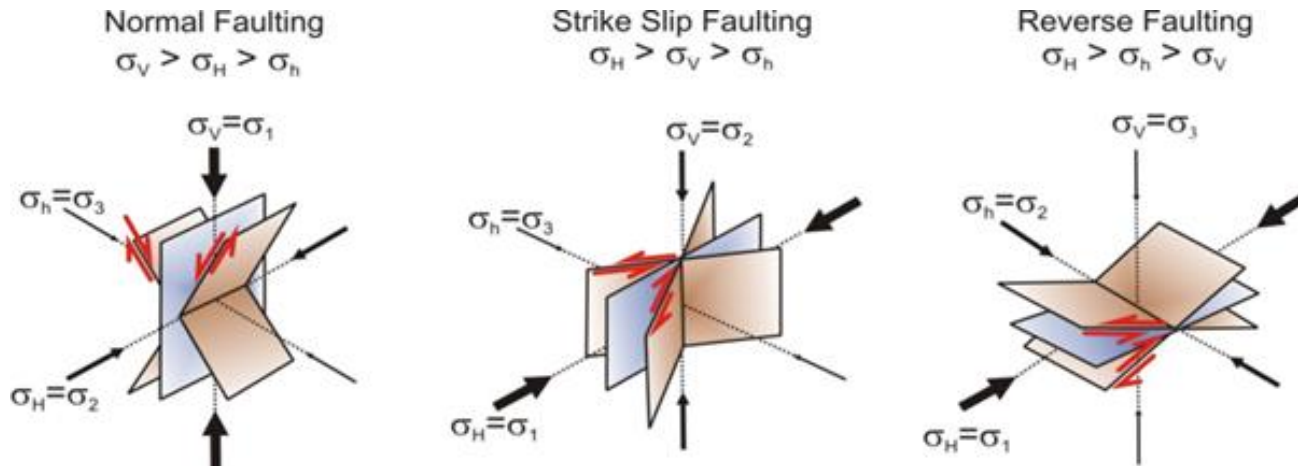
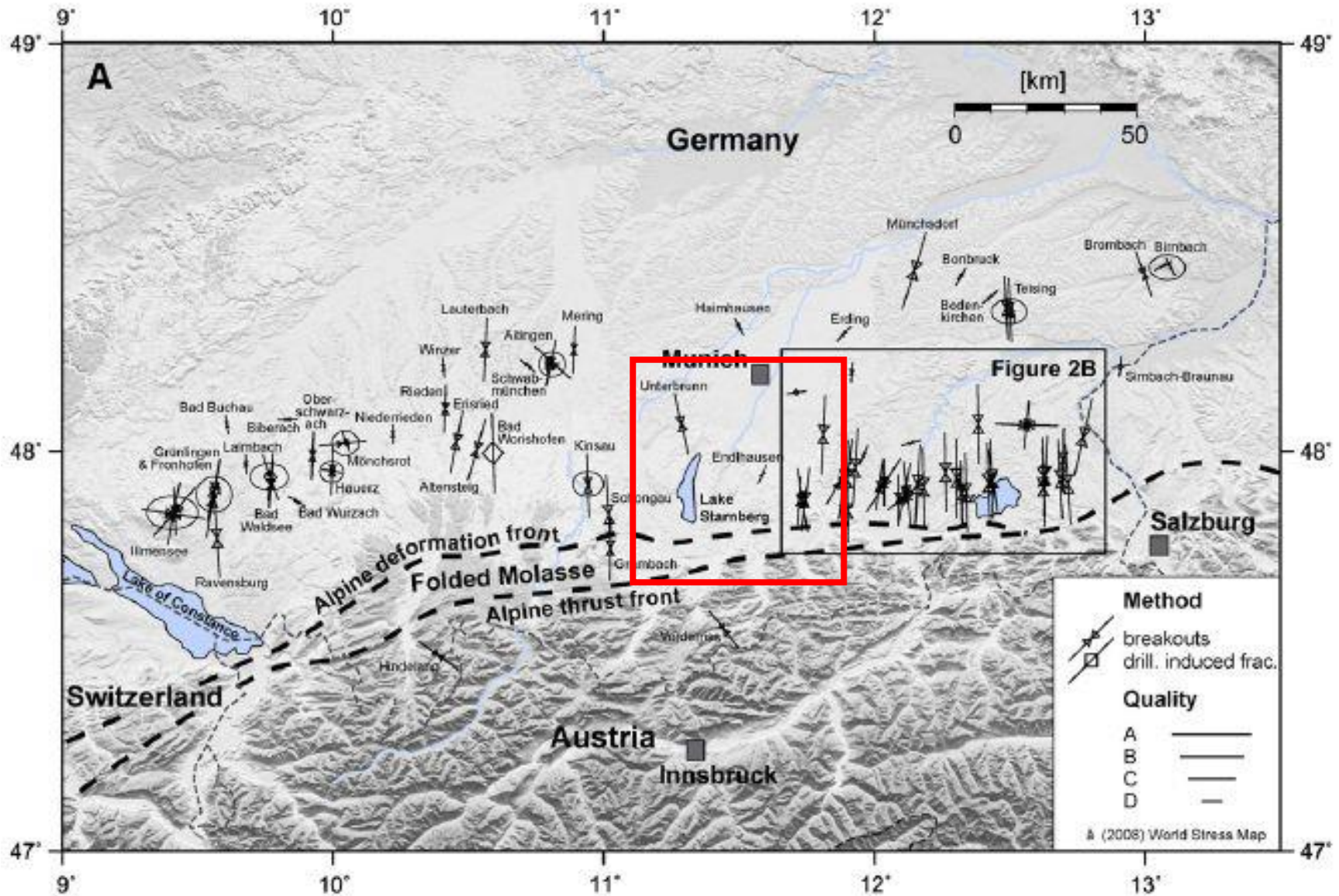


Abb. 1
Trennflächenorientierung
in Bezug auf das
Spannungsfeld. **Braun:**
Scherflächen, **blau:**
Dehnungsklüfte.
(aus Moeck et al., 2010)

- Scherungstendenzenanalyse: Abschätzung des Trennflächenverhaltens im rezenten Spannungsfeld

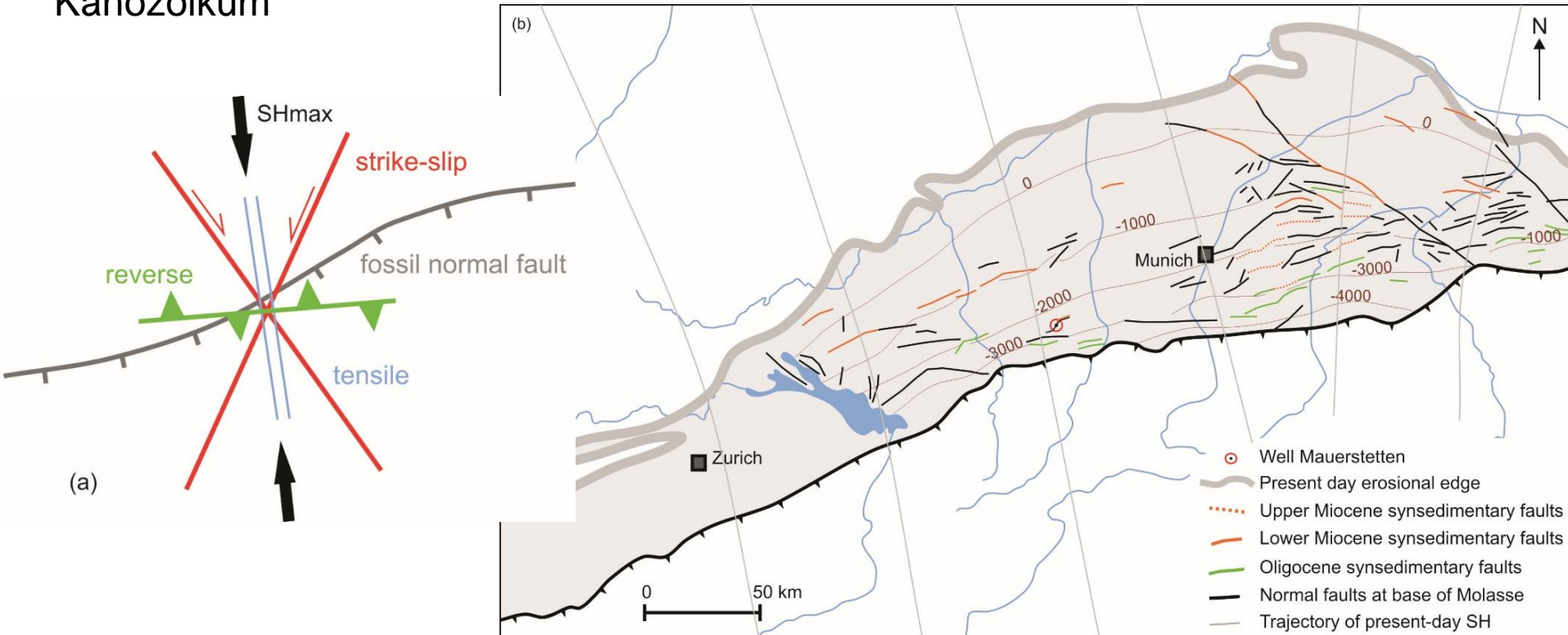
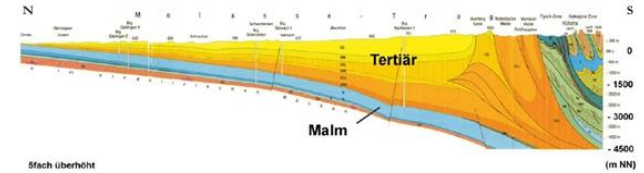
Süddeutsches Molassebecken – Richtung von S_H

J. Reinecker et al. / Tectonophysics 482 (2010) 129–138



Störungs- und Spannungsregime in Geretsried/ MB

Das Störungsregime im Mesozoikum (interpretiert aus seismischen Messungen) spiegelt nicht das rezente Spannungsregime wieder und ist zur Frontalstörung der Alpen hin entkoppelt vom Känozoikum



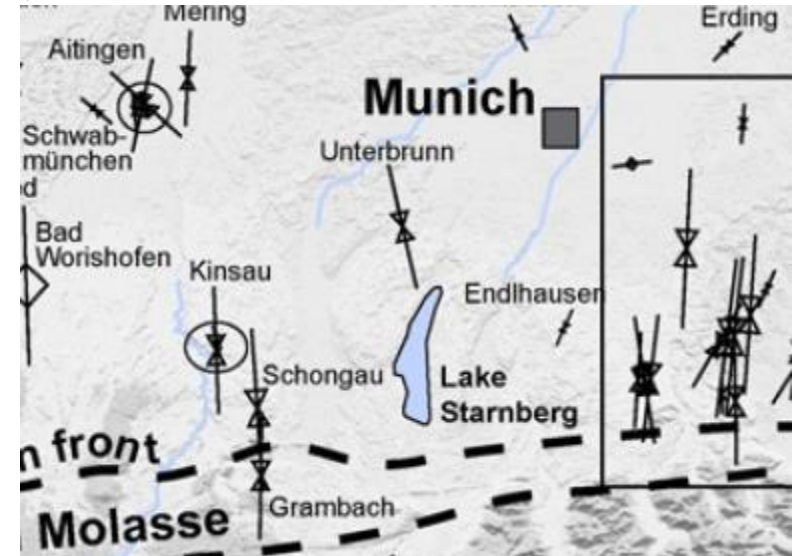
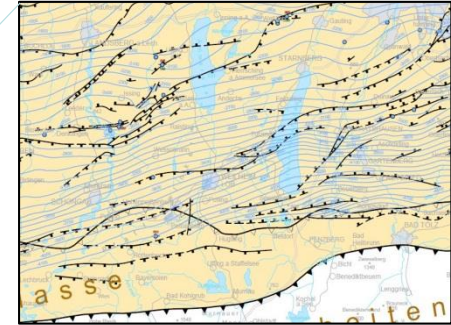
Mraz et al., 2018: Multiphase fossil normal faults...- ZDGG, Sonderband Geothermie, 2018

Regionales Spannungsfeld Geretsried – Richtung von S_H

Richtung von S_H gemittelt aus Nachbarbohrungen:

- Höhenrain 4 –
 S_H in $007^\circ \pm 4^\circ$ (20 borehole breakouts in 1.2 km depth)
- Höhenrain A5 –
 S_H in $30^\circ \pm 17^\circ$ (4 borehole breakouts in 0.7 km depth)
- Höhenrain 6 –
 S_H in $6^\circ \pm 8^\circ$ (27 borehole breakout in 2.8 km depth)
- Endlhausen 1 –
 S_H in $24^\circ \pm 11^\circ$ (5 borehole breakouts in 3.8 km depth)
- Vagen 1 –
 S_H in $000^\circ \pm 0^\circ$ (2 borehole breakouts in 4.2 km depth)
- Holzkirchen 3 –
 S_H in $4^\circ \pm 11^\circ$ (6 borehole breakouts in 2.0 km depth)

(aus Bayerischer Geothermieatlas, 2010)



(from Reinecker et al., 2010)

Aus Bericht Geomecon (2013): Gebirgsspannungsfeldanalyse für die Bohrung GEN1 Geretsried unter Einbeziehung des Trennflächenmusters - Erweiterung: Höffigkeitsprognose für das nahe Umfeld der Stammbohrung GEN1, Geothermie-Feld Wolfratshausen, Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Inga S. Moeck

World Stress Map

Geretsried:
 S_H in $2^\circ \pm 12^\circ$

Lernkurve

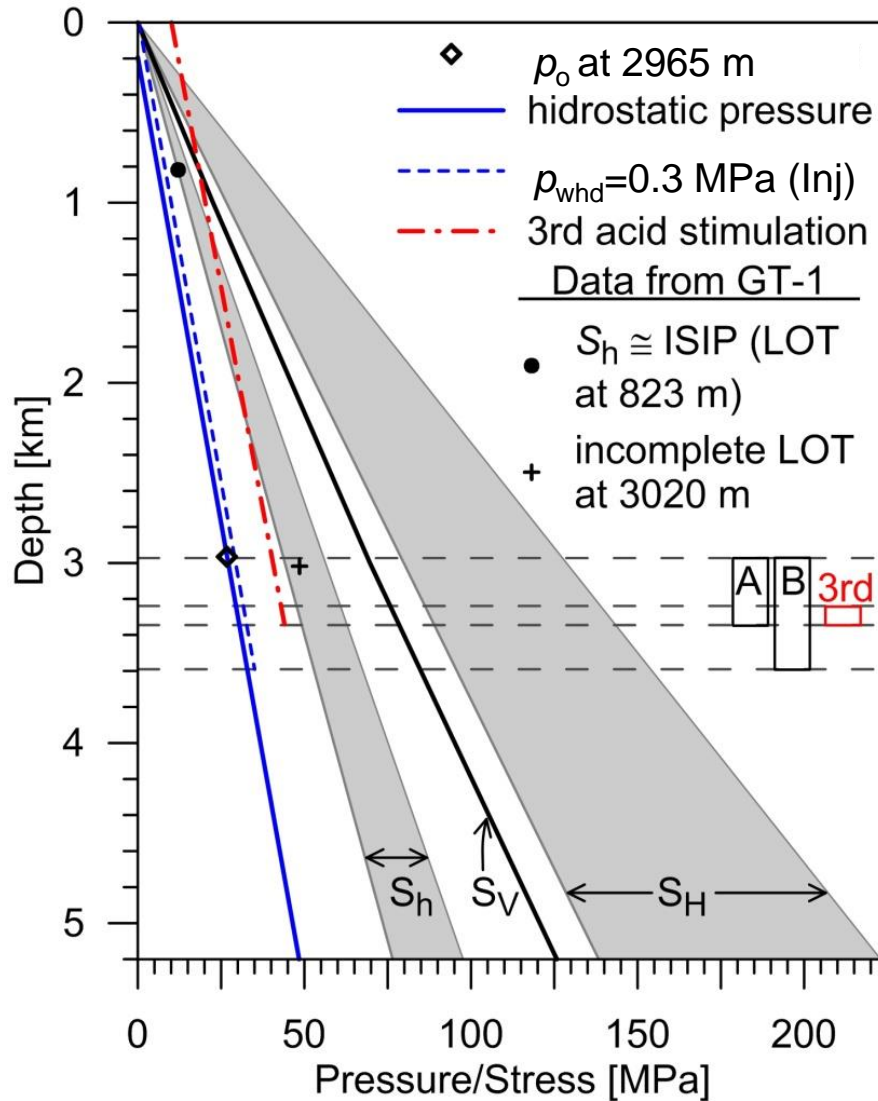
❖ Poing

Das Spannungsfeld wurde aus **Herdflächenlösungen** (Megies & Wassermann, 2016) eines seismischen Ereignisses ermittelt (⇒ sinistrale, linksseitige Schrägabschiebung + **geringfügige räumliche Änderung des Spannungsfeldes an der Störungsfläche**).

❖ Unterhaching

Richtung der horizontalen Hauptspannung: N-S. Die Scherungstendenz wurde auf die aus dem Image-Log der Unterhaching Gt2 interpretierten Störungen **und** Klüfte angewendet.

Lernkurve: Spannungsfeld bei Unterhaching



Ortiz, A., Dussel, M., Moeck, I.:
 Borehole geophysical characterization of a major
 fault zone in the geothermal Unterhaching Gt 2 well,
 South German Molasse Basin.
 - ZDGG, Sonderband Geothermie, 2018.

Spannungsmagnituden? - Messdaten Geretsried

Teufenbezogene Spannungsdaten

	pressure (MPa)	Depth (m) TVD	Datum
Formation integrity tests GEN-1¹⁾	FIT 61.34*	2922	07.04.2012
	<i>* Spülungsverluste 177.7 lts deuten auf Infiltration in existierende oder neu generierte Klüfte oder in sehr poröse Sandsteinschicht hin.</i>		
	FIT 53.38	2941	08.04.2012
Formation integrity tests GEN-1ST-A1²⁾	FIT 58, $S_h \gg 58$	4148 (Lithokalk)	14.06.2017
	FIT 61,6, $S_h \gg 61,6$	4338	27.07.2017

¹⁾ Quelle: Geomecon, 2013

²⁾ Quelle: Geologischer Bericht GTN, 2017

Spannungsfeld in situ (2941 m TVD Kalibrationstiefe)

Spannungslimits in MPa

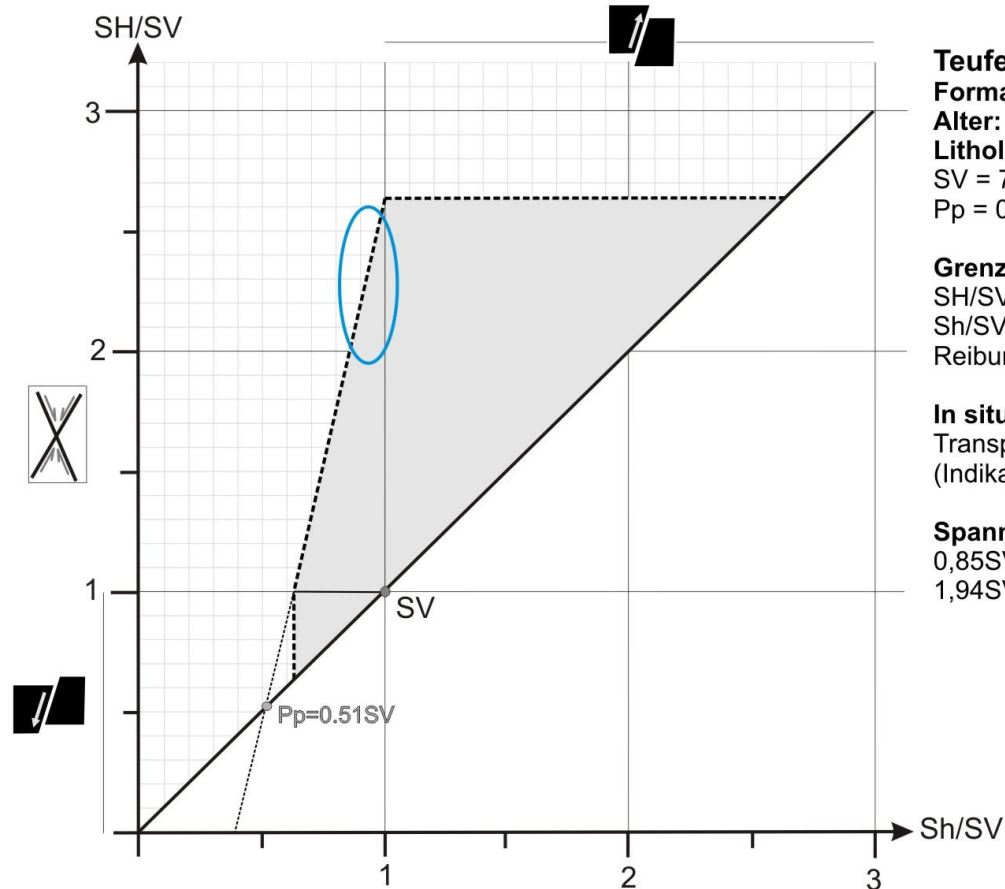
$$60.09 < S_h < 74.22$$

$$S_h = 67 \pm 7 \text{ MPa}$$

(bestätigt aus FIT mit
Spülverlusten (wahrscheinlich LOT) in 2898 m
TVD)

$$137.14 < S_H < 183.8$$

$$S_H = 161 \pm 23 \text{ MPa}$$



Teufe: 2941 m TVD

Formation: Chatt Bausteinschichten

Alter: Unt. Eger (Ob. Oligozän)

Lithologie: Kalksandstein (FIT)

SV = 70,69 MPa

$P_p = 0,51SV = 30,06 \text{ MPa}$

Grenzbedingungen

$SH/SV = 2,63SV = 185,98 \text{ MPa}$

$Sh/SV = 0,62SV = 44,06 \text{ MPa}$

Reibungsbeiwert: $\mu=0,8$

In situ Spannungsregime

Transpression

(Indikation aus Seismik)

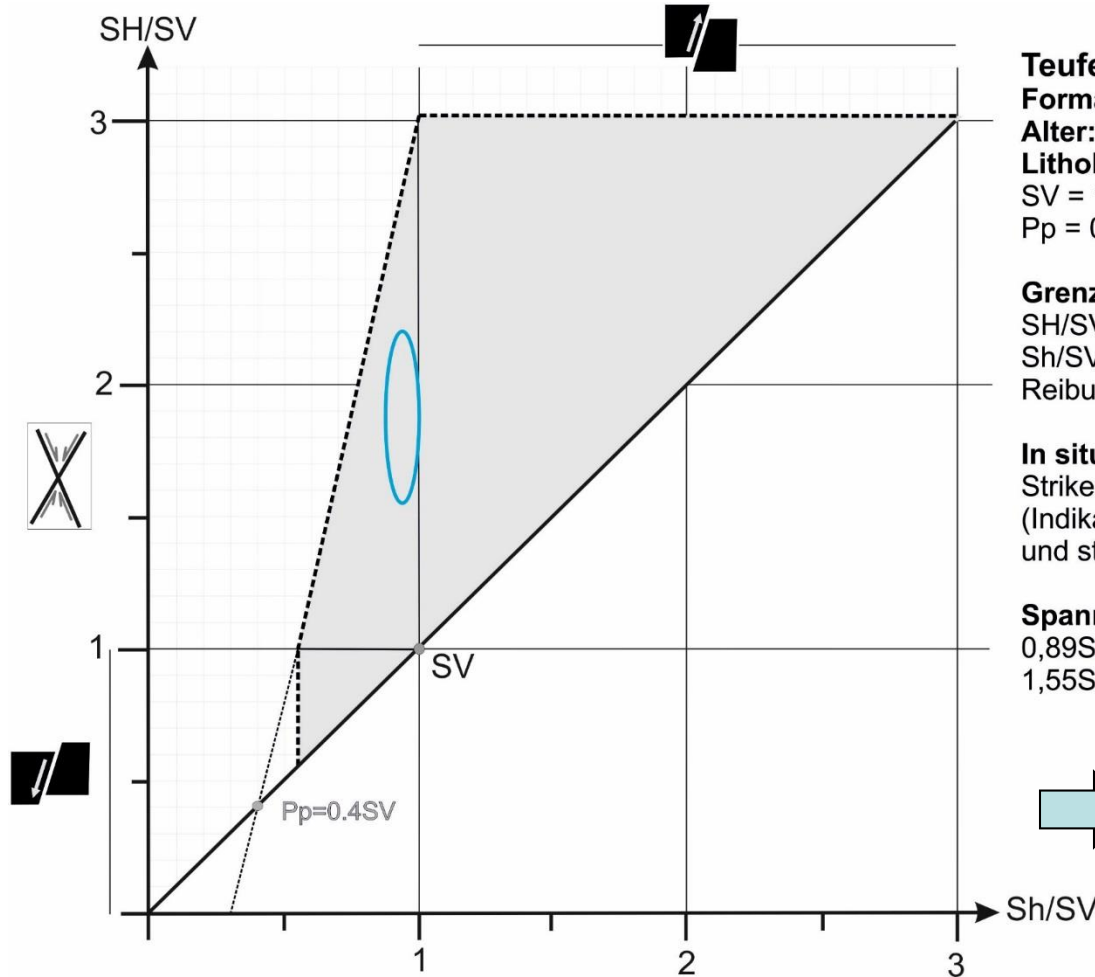
Spannungsmagnituden

$0,85SV < S_h < 1,05SV$

$1,94SV < S_H < 2,6SV$

(Geomecon, 2013, Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Inga S. Moeck)

Spannungsfeld in situ Reservoir (4500 m TVD)



Teufe: 4500 m TVD
Formation: Purbeck/Malm Kalk
Alter: Oberer Jura - 150 Mio
Lithologie: Kalk / Dolomit
 $SV = 108,16 \text{ MPa}$
 $Pp = 0,40SV = 42,82 \text{ MPa}$

Grenzbedingungen
 $SH/SV = 3,01SV = 325,72 \text{ MPa}$
 $Sh/SV = 0,54SV = 57,91 \text{ MPa}$
 Reibungsbeiwert: $\mu=0,8$

In situ Spannungsregime
 Strike Slip
 (Indikation aus Seismik.Bohrkern
 und stress relaxation monitor)

Spannungsmagnituden
 $0,89SV < Sh < 1SV$
 $1,55SV < SH < 2,2SV$

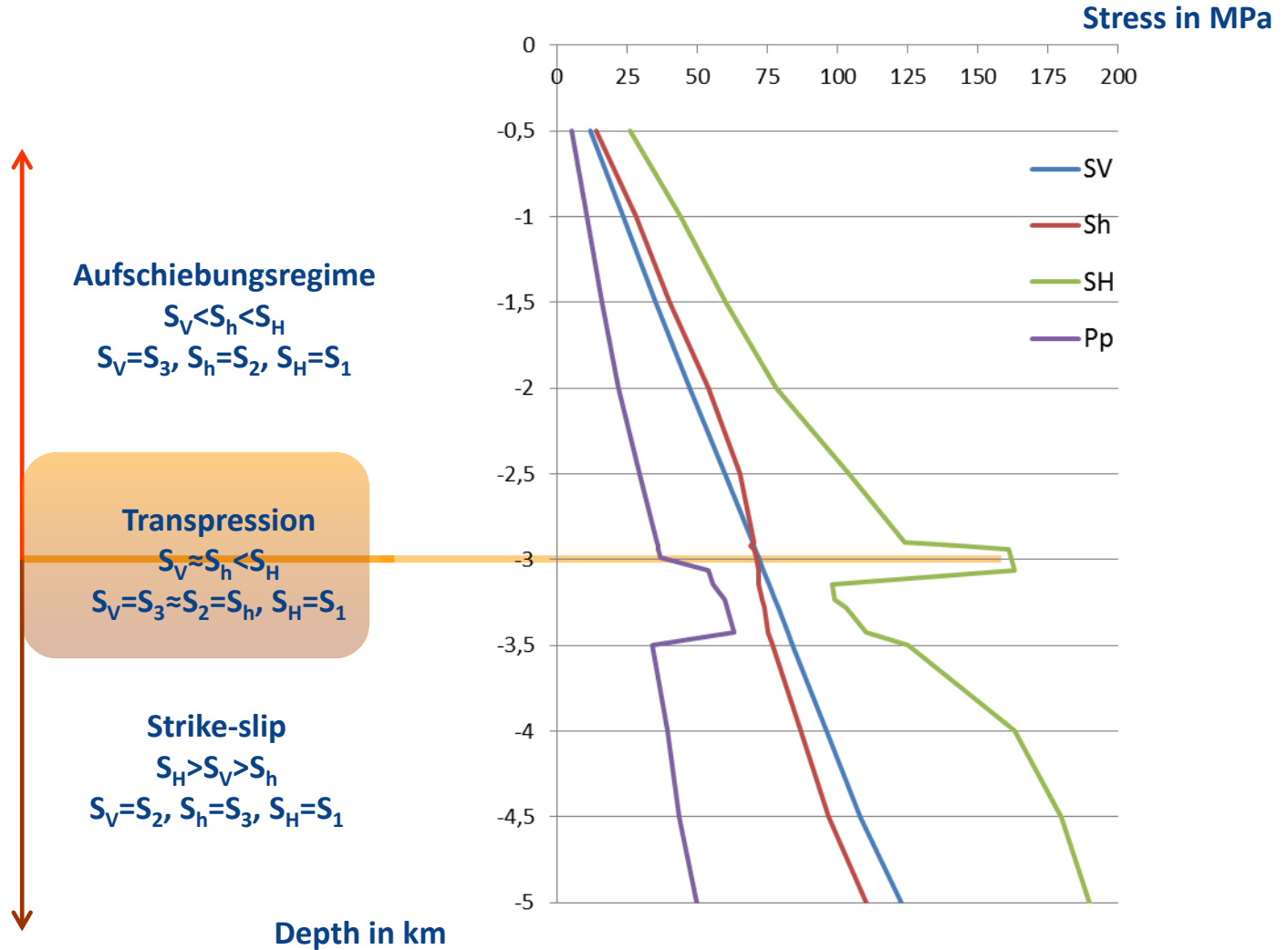


$S_H : 167,65 - 237,95 \text{ MPa}$
 $S_h : 96,26 - 108,16 \text{ MPa}$
 $S_V : 108,16 \text{ MPa}$
 $P_p : 42,82 \text{ MPa}$

Änderung des Spannungsregimes mit der Tiefe

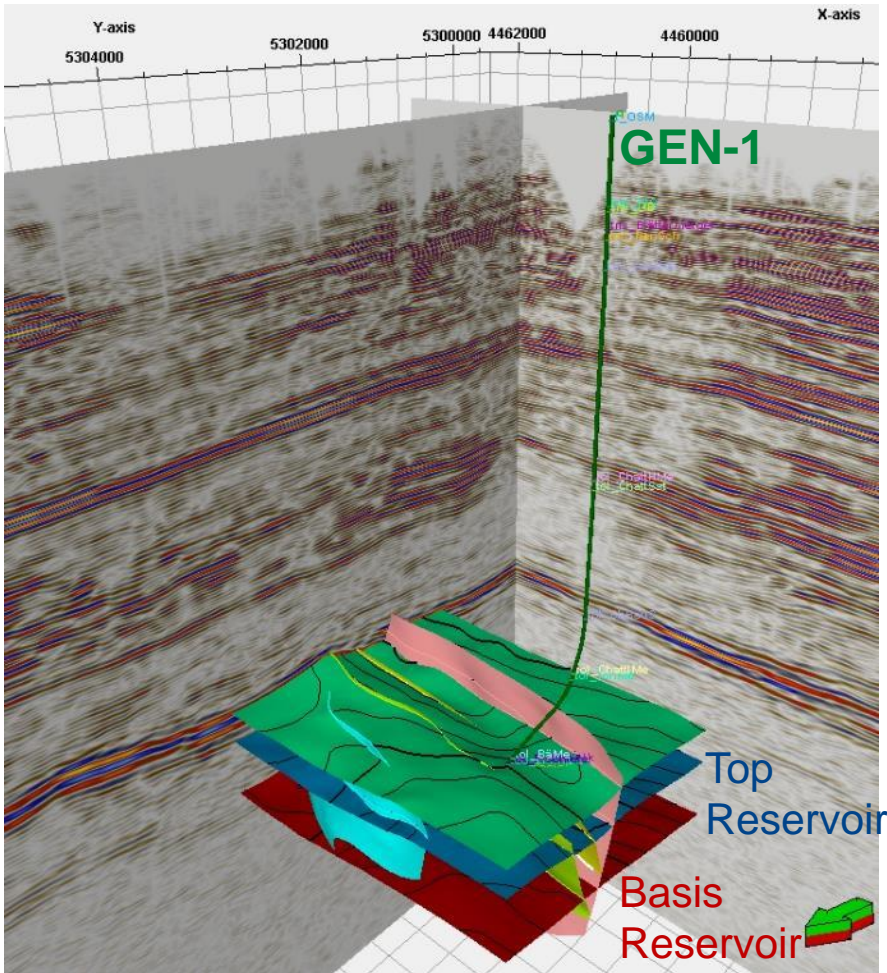
Abschätzung der lokalen Spannungsgradienten

(basierend auf Reibungskoeffizienten und 3D Seismikinterpretation)

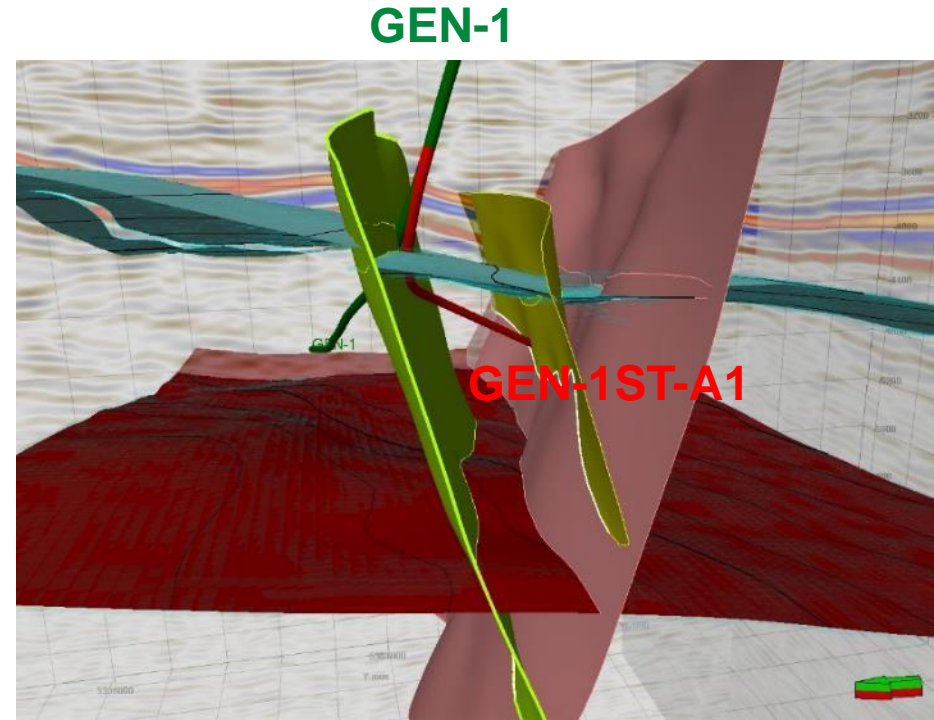


(Geomecon, 2013, Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Inga S. Moeck)

Re-Interpretation des Gartenberg-Störungssystems



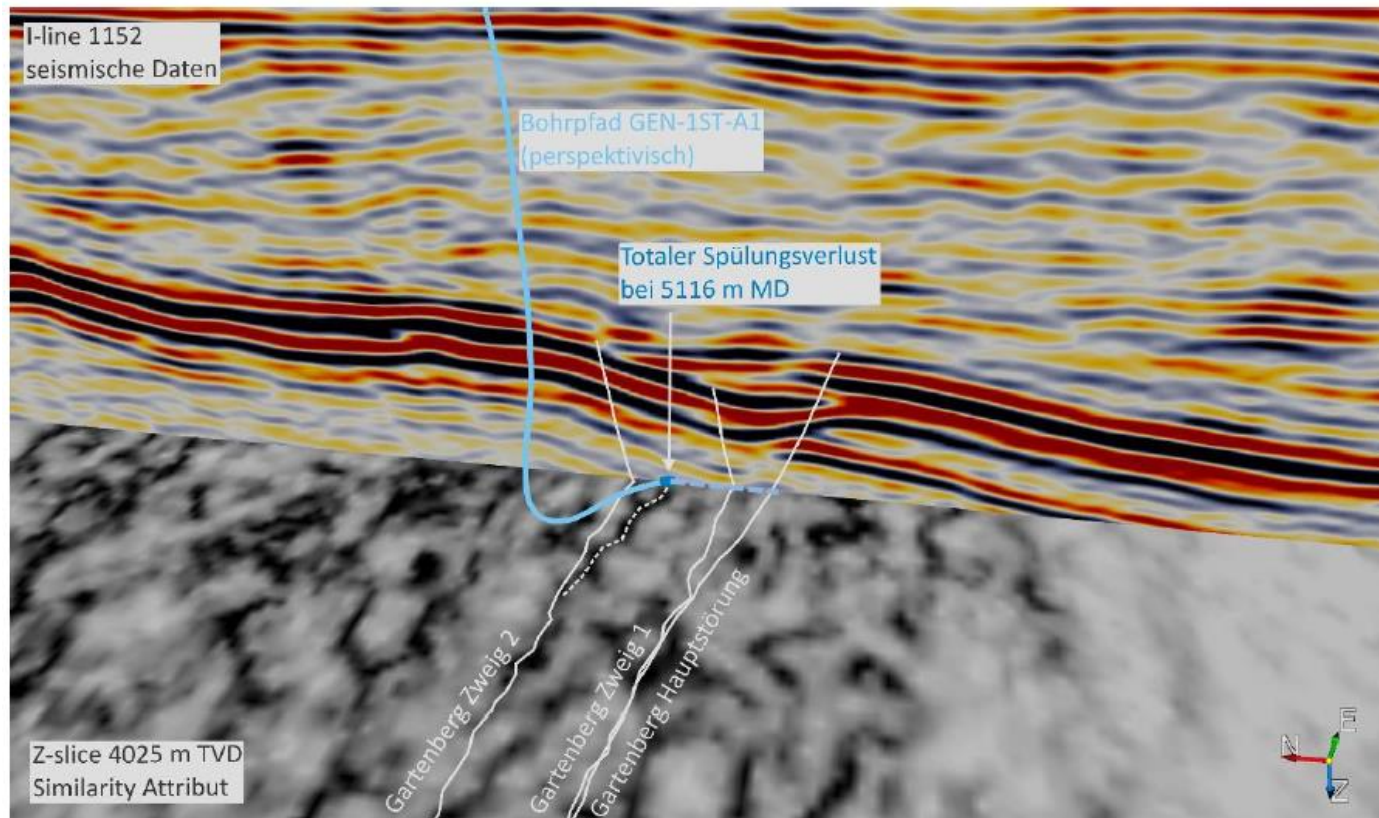
Störungssystem in 4- 5 km Tiefe mit seismischem Datenvolumen (DMT GmbH & Co. KG)



Störungszone mit geplantem Sidetrack GEN-1ST (rot)

„(There is not such a thing as a definitive model)“

Similarity-Tiefenscheibe 4626 mTVD mit Störungsspuren

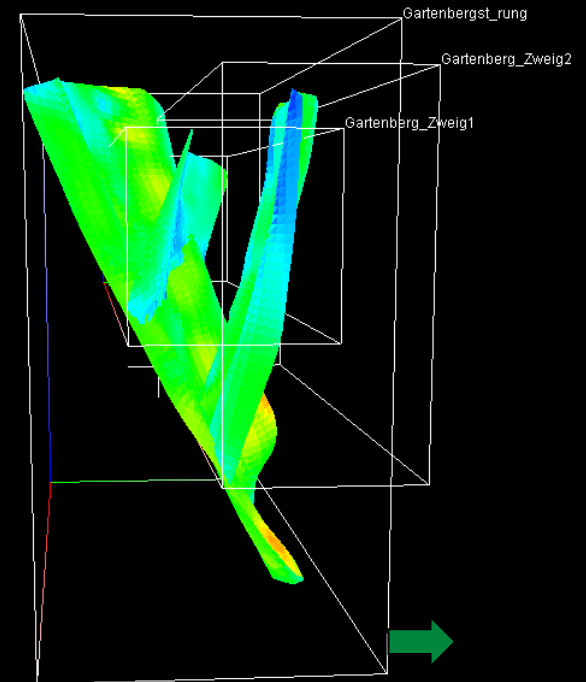
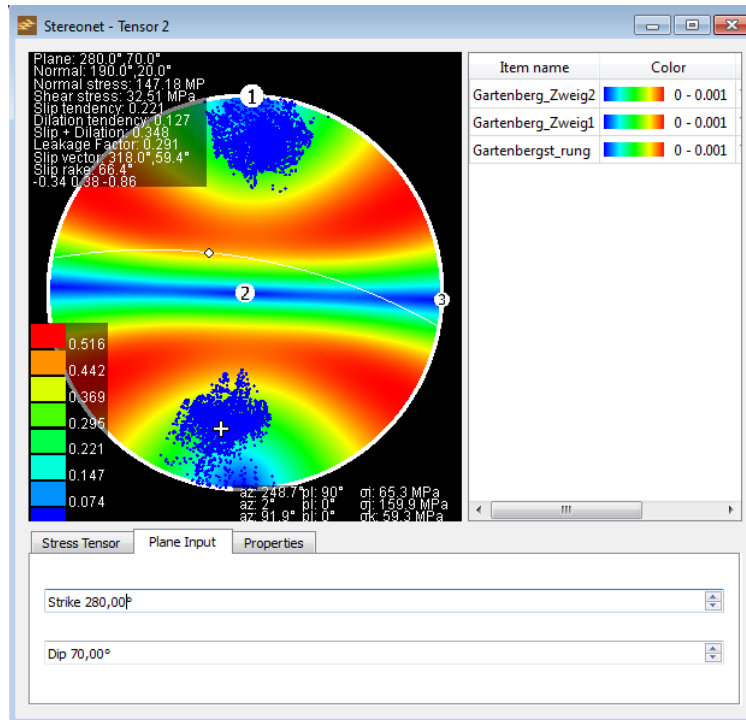


Bohrpfad Gen-1ST-A1 (hellblau) mit totalem Spülungsverlust bei 5116 m MD (dunkelblau). In 3D-Seismik interpretierte Störungen als weiße, durchgezogene Linien. Seismische Amplitudendarstellung auf I-line 1152, similarity Attribut auf Z-Slice 40 25 m TVD. Das Similarity Attribut auf 4025 m TVD deutet eine Störung an, die von der Gartenberg-Zweigstörung 2 abgeht (gestrichelte weiße Linie)

Quelle: Geologischer Bericht GTN

Scherungstendenz Gartenbergstörung (100/70°N), 4500 m

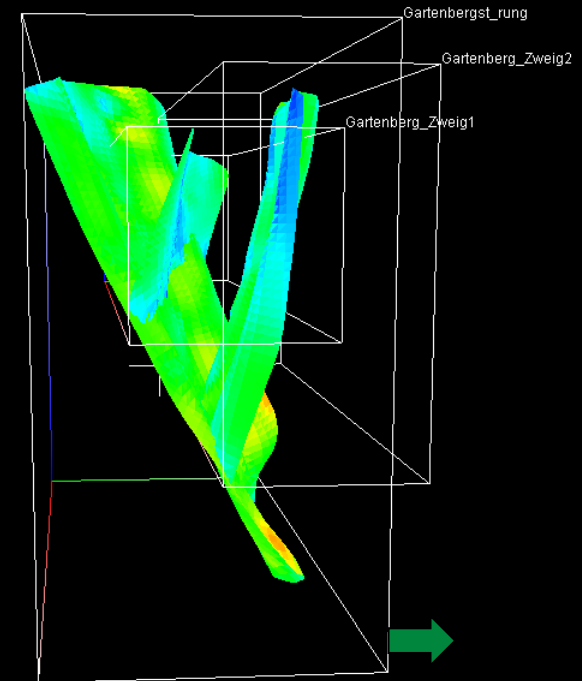
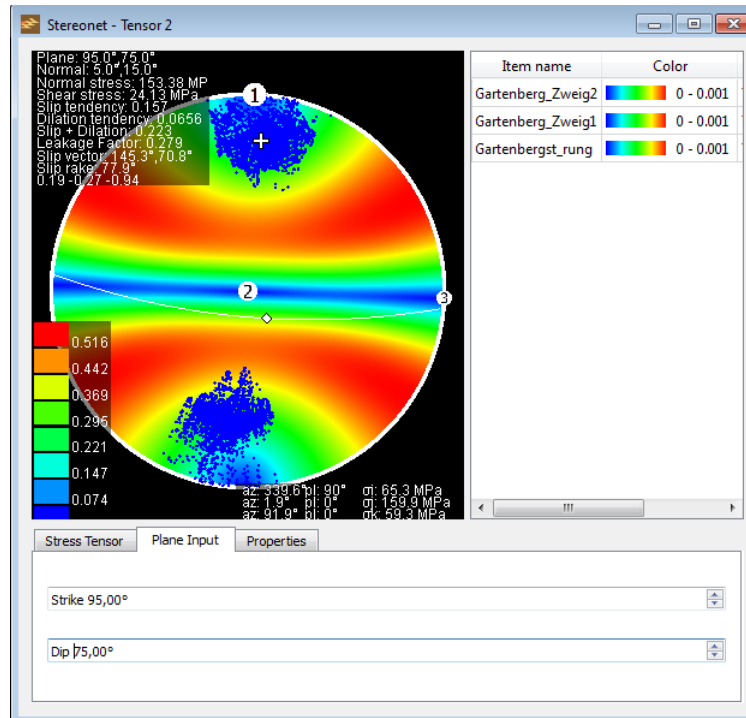
S_H : 202,8 MPa
 S_h : 102,21 MPa
 S_V : 108,16 MPa
 P_p : 42,82 MPa



Scherungstendenz: 0,221

Scherungstendenz Zweigstörungen (95/75°S), 4500 m

S_H : 202,8 MPa
 S_h : 102,21 MPa
 S_V : 108,16 MPa
 P_p : 42,82 MPa



Scherungstendenz: 0,157

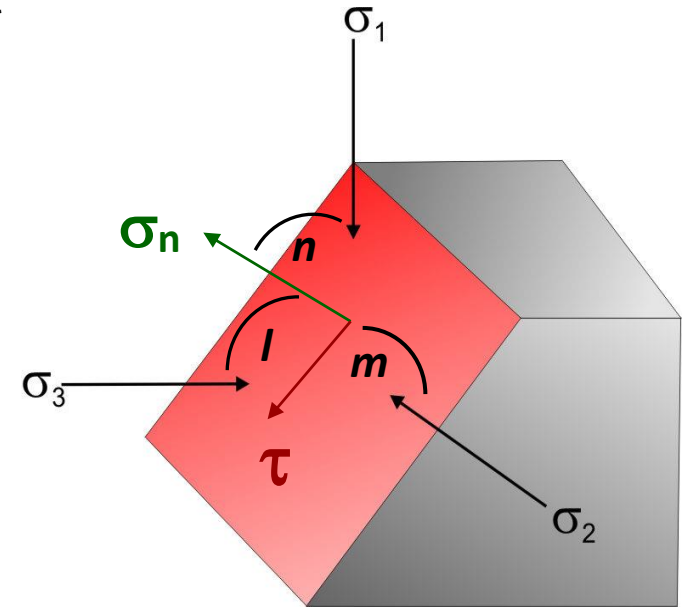
Scherungstendenz und Reibungskoeffizient

Für die Einschätzung des Reaktivierungspotentials ist der Vergleich der Scherungstendenz mit plausiblen Gesteinsfestigkeiten von dolomitischen Karbonaten notwendig:

Scherung erfolgt, wenn das Verhältnis Scher- zu Normalspannung die Reibungsfestigkeit erreicht oder überschreitet (Amonton's Law).

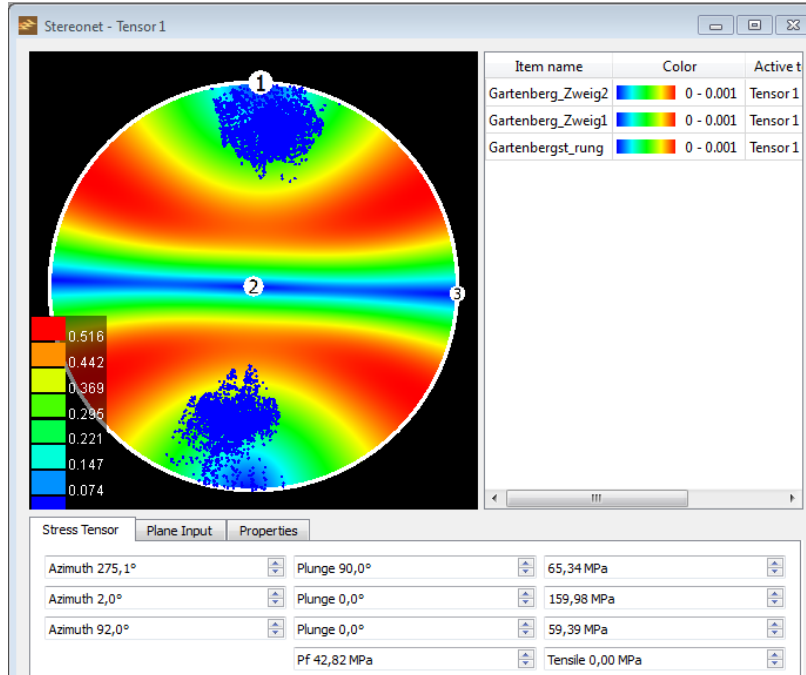
Reibungsfestigkeit für Kalk bei $\mu \sim 0,7$

- Reibungsbeiwert im Bereich 0,4 bis $< 1,0$ (Byerlee 1978). Triaxialtests an Seitenwandkernen Bohrung St. Gallen aus 4300 m Tiefe ergaben 0,6 bis 0,9 (Moeck 2016). Da die Störungen im Hangenden Tertiär auslaufen und sich beim Durchteufen keine Hinweise auf rezente Aktivität ergeben haben, können möglicherweise Reibungsbeiwerte von intakten Gesteine verwendet werden.
- Allerdings wie können Reibungskoeffizienten der z.T. stark beanspruchten Dolomite bewertet werden?

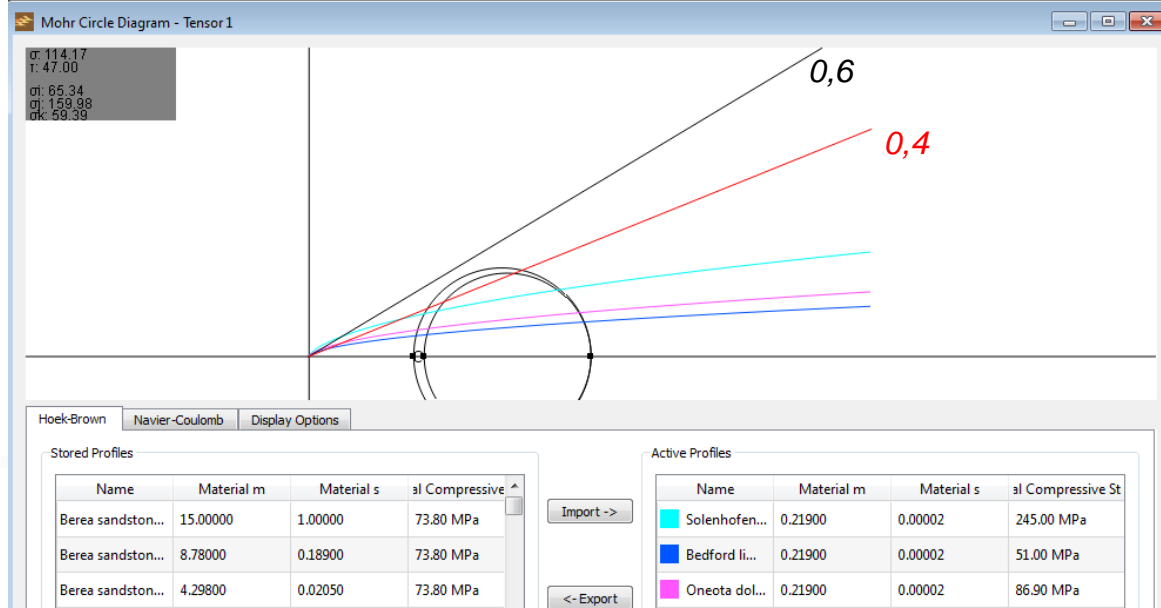
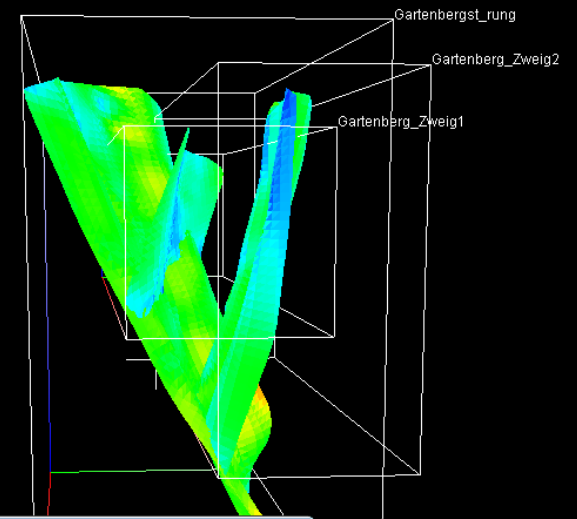


Mohr-Coulomb Versagenskriterium 4500 m (Mittelw. Sp.)

S_H : 202,8 MPa
 S_h : 102,21 MPa
 S_V : 108,16 MPa
 P_p : 42,82 MPa



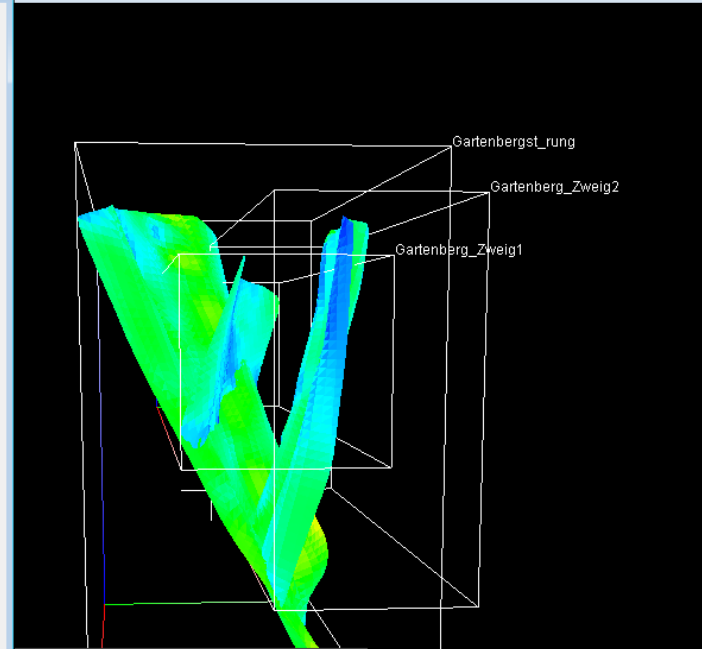
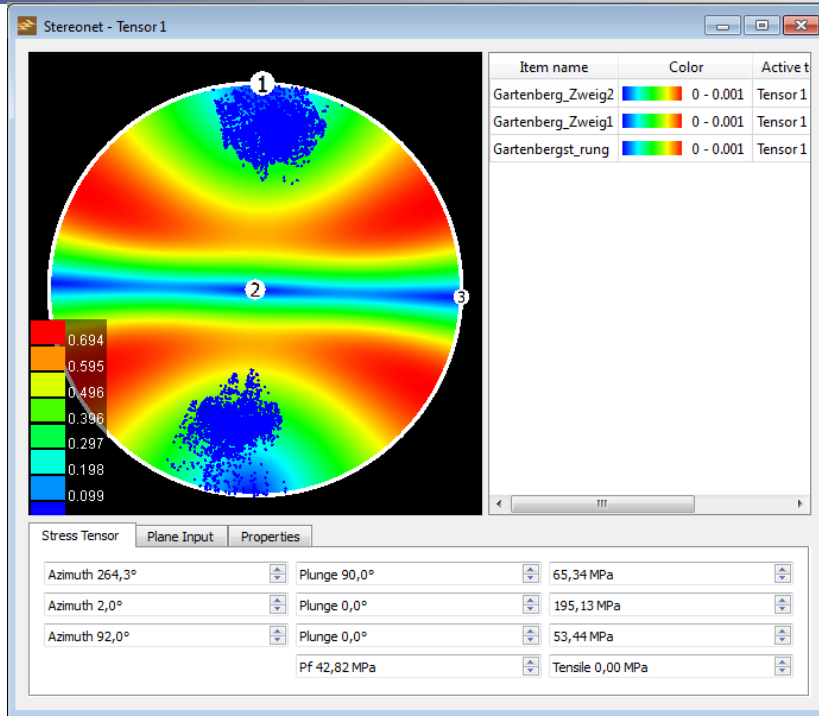
Scherungstendenz
0,157-0,221



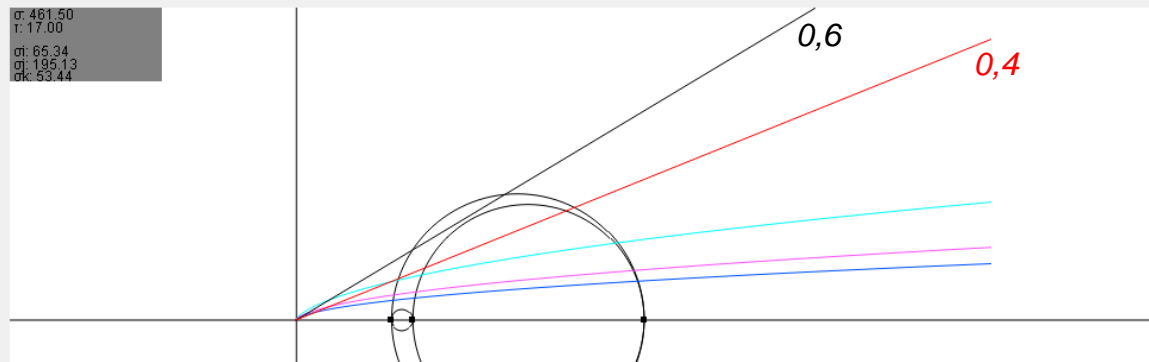
(Hoek-Brown für geklüftete Karbonate)

Mohr-Coulomb Versagenskriterium 4500 m Hmax, hmin

„Worst-case Betrachtung“



σ: 461,50
τ: 17,00
σ: 65,34
σ: 195,13
σk: 53,44



Hoek-Brown | Navier-Coulomb | Display Options

Stored Profiles

Name	Material m	Material s	al Compressive
Berea sandston...	15.00000	1.00000	73.80 MPa
Berea sandston...	8.78000	0.18900	73.80 MPa
Berea sandston...	4.29800	0.02050	73.80 MPa

Import ->

<- Export

Active Profiles

Name	Material m	Material s	al Compressive St
Solenhofen...	0.21900	0.00002	245.00 MPa
Bedford li...	0.21900	0.00002	51.00 MPa
Oneota dol...	0.21900	0.00002	86.90 MPa

(Hoek-Brown für geklüftete Karbonate)

Bohrkernen



Kerngewinn Geretsried GEN 1ST-A1 (rd. 20m)

Kalzitfüllungen



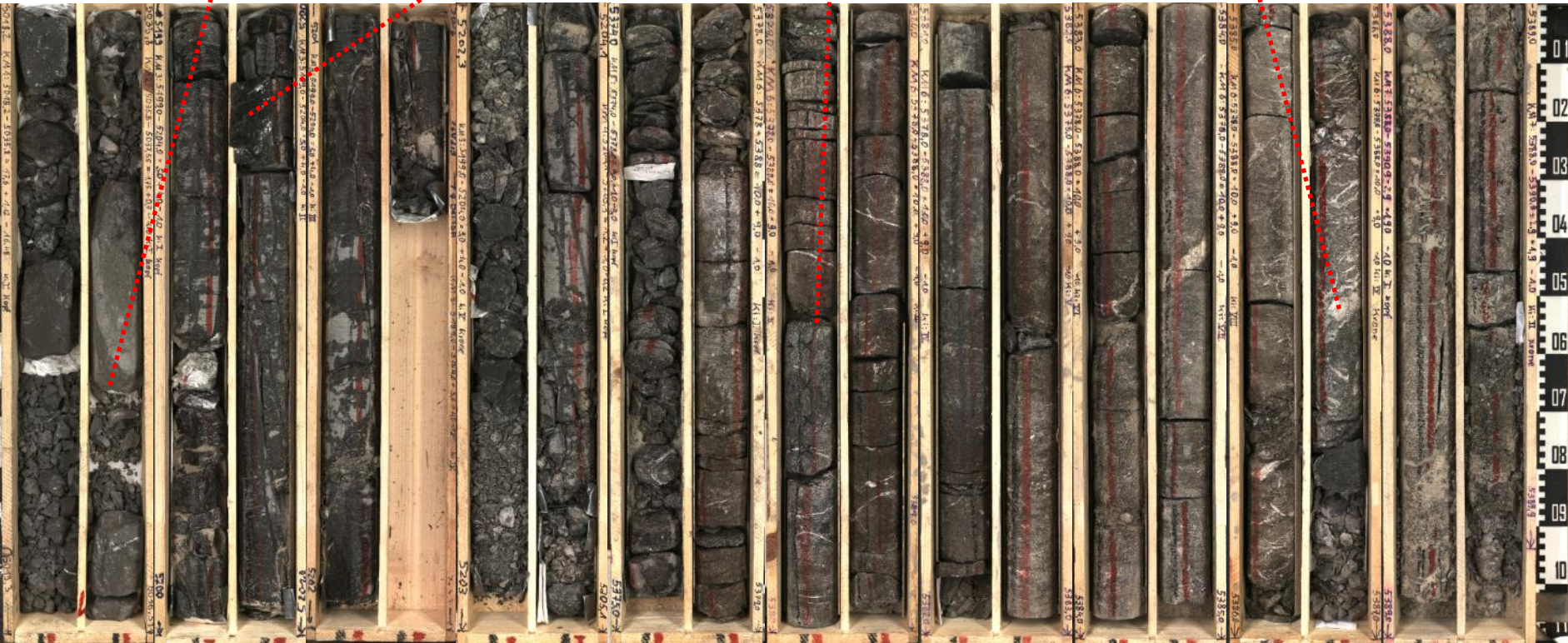
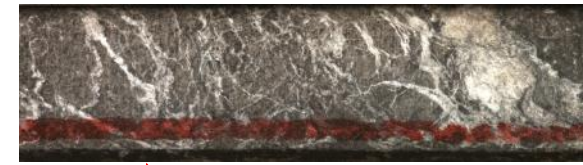
Bituminöse Spiegelharnische



Farbübergänge
braungrau zu grau



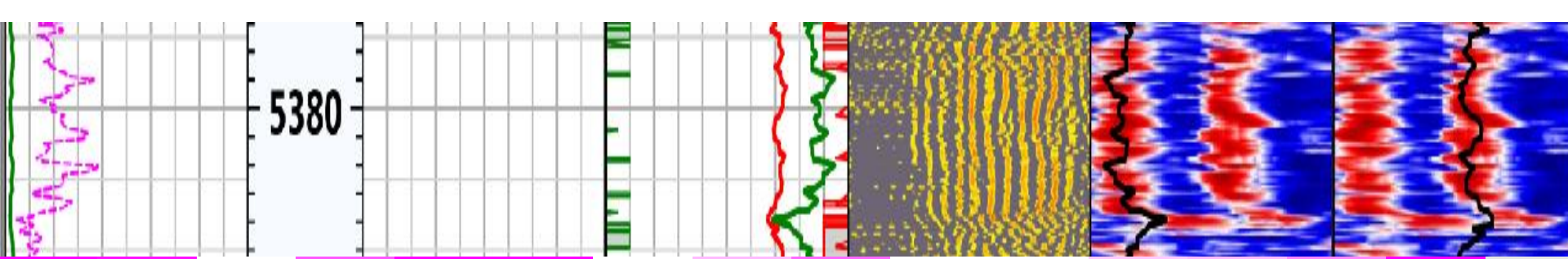
Stark gestört und verheilt



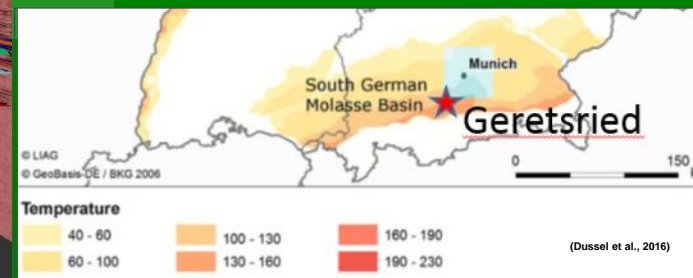
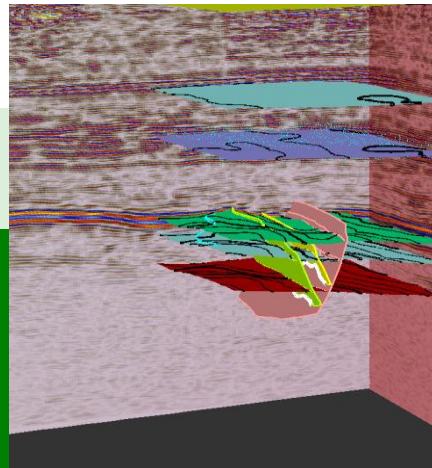
Kalksteine und Dolomite über einen Bereich von ca. 370 m
(sequentiellles Kernen 5035.8 – 5389.9 m MD)

Schlussfolgerung

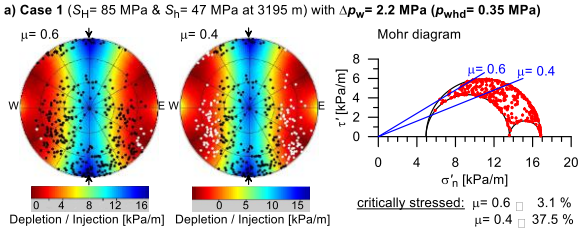
- ✓ **Die Scherungstendenz der interpretierten Störungssegmente der Gartenbergstörungszone ist gering**
 - ✓ Unsicherheiten in der Spannungsfeldanalyse basieren auf den Problemen bei der Datenerhebung in großen Tiefen und bei der herausfordernden Kernentnahme in fast horizontalen Bohrungen
 - ✓ **Explizite Werte für Reibungskoeffizienten in tiefen Störungszonen sind nach wie vor schwer zu bestimmen, unter anderem auch auf Grund von Entlastungsvorgängen bei der Kernentnahme**
- ➡ Forschungsbedarf für die in-situ Bestimmung von Spannungsfeld und Scherungstendenz in tiefen Störungssystemen zur Erhöhung der Vorhersagbarkeit mechanischen Versagens



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**



Ausblick/ Diskussion

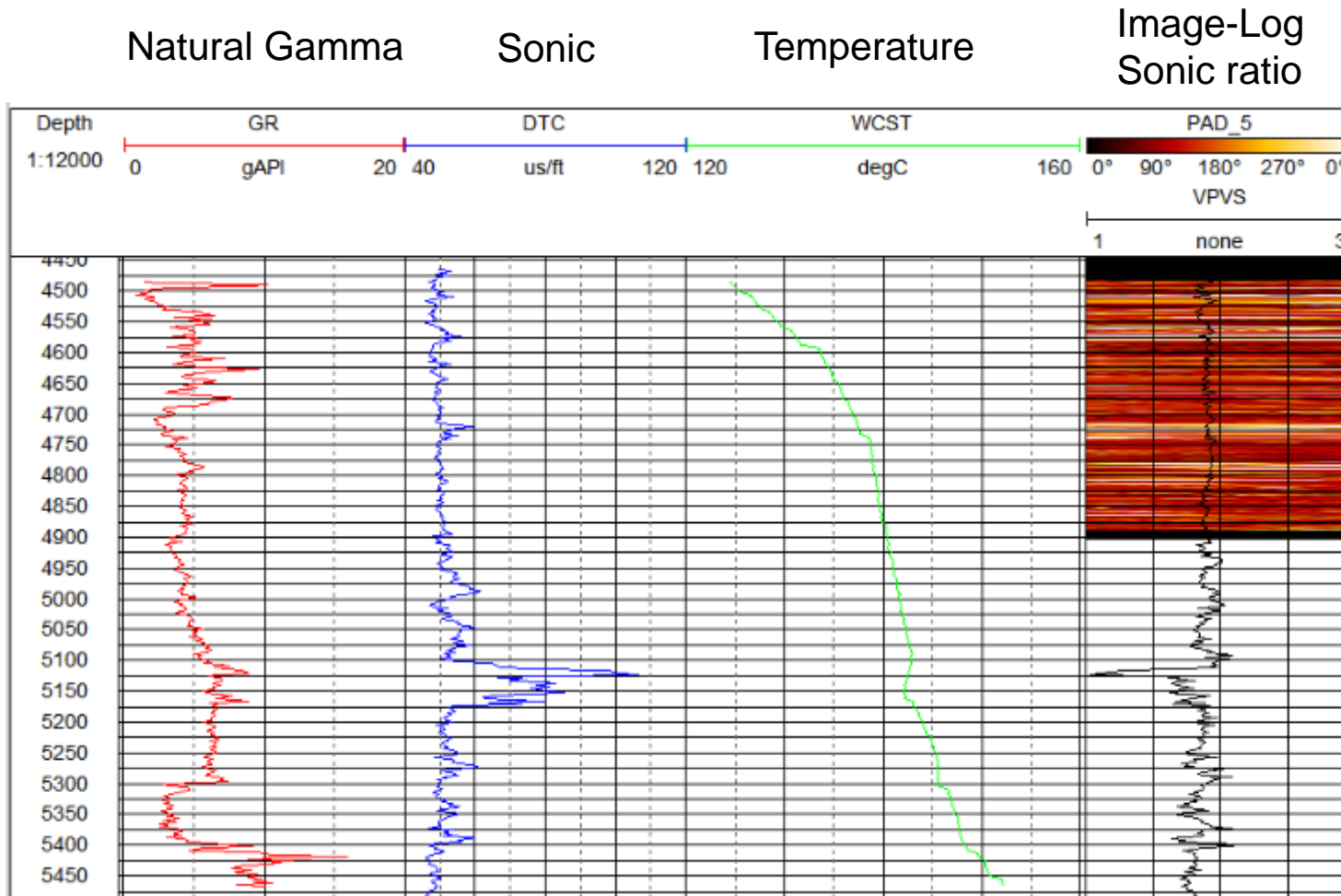
- ✓ Auswertung HMI-Log (BO, DIF), Kaliper > Verifizierung/
Falsifizierung der Richtung der max. horizontalen Hauptspannung
Korrelierung v_p , v_s , v_p/v_s -Verhältnisse an den Störungszonen
(erste Betrachtung Erniedrigung von 1,8/ 1,9 auf 1,7 > eher qualitativ)
- ✓ Erweiterung der Scherungstendenzanalyse auf Klüfte
(Reorientierung, CT), vgl. Unterhaching:


a) Case 1 ($S_H = 85$ MPa & $S_h = 47$ MPa at 3195 m) with $\Delta p_w = 2.2$ MPa ($p_{whd} = 0.35$ MPa)

Mohr diagram

critically stressed: $\mu = 0.6$ □ 3.1 %
 $\mu = 0.4$ □ 37.5 %
- ✓ Weitere Labormessungen an den Kernen zur Verbesserung der mechanischen Input-Parameter: Triaxialzelle (aber: Gesteinsmechanik - Gebirgsmechanik)
- ✓ Reorientierung der Kerne (CT?, Paläomagnetik?)

Borlochmessungen (Reservoirtiefe)



Bohrmeister-
teufe (MD)

Vp/vs-Verhältnis nimmt unterhalb der Störung in rd. 5100 mMD von ca. 1,9 auf 1,8 ab, im Bereich der Störungszone bei 5100 mMD auf rd. 1,7.

Reserve

Labormessungen

Aus Analog-Aufschlüssen: (Mraz, TUM):

Porosität eff 2-8%

P-Wellengeschwindigkeit Längs, quer rd 3750-5530

Dynamischer E-Modul 40-70 GPa

Querdehnungszahl (Poissonzahl) 0,28-0,34

Spaltzugfestigkeit (tensile strength) 5,6-11,7 MPa

> Mechanische Parameter aus Analogaufschlüssen liegen größenordnungsmäßig im Bereich der Werte, die bereits für die Berechnungen Unterhaching aus der Literatur recherchiert wurden.

Kerne Geretsried GEN-1ST-A1 (Stockinger, TUM):

E=68,5 Poisson-Zahl: 0,31

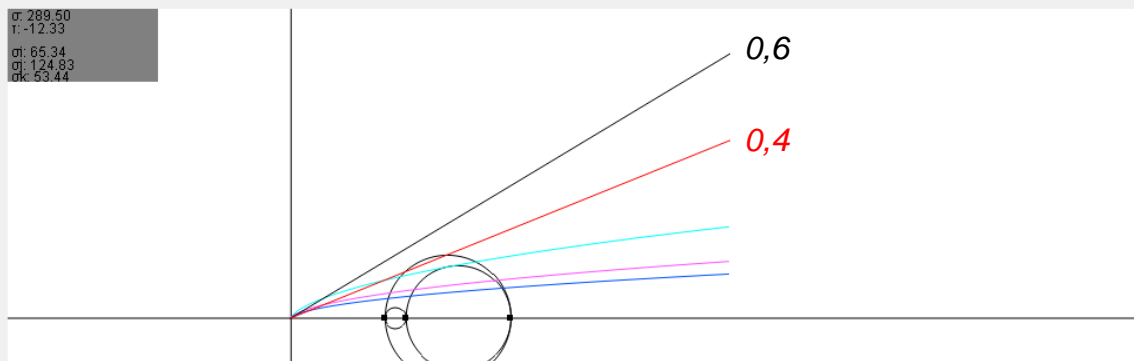
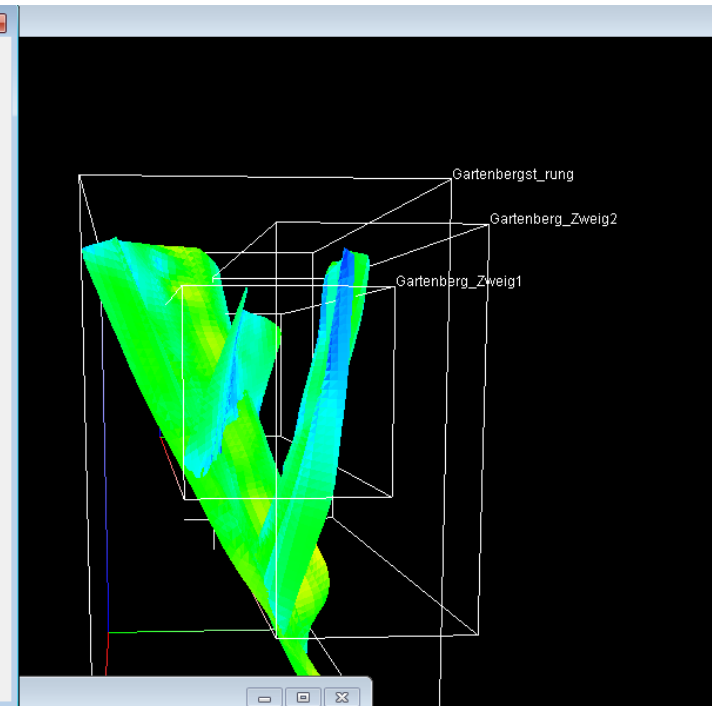
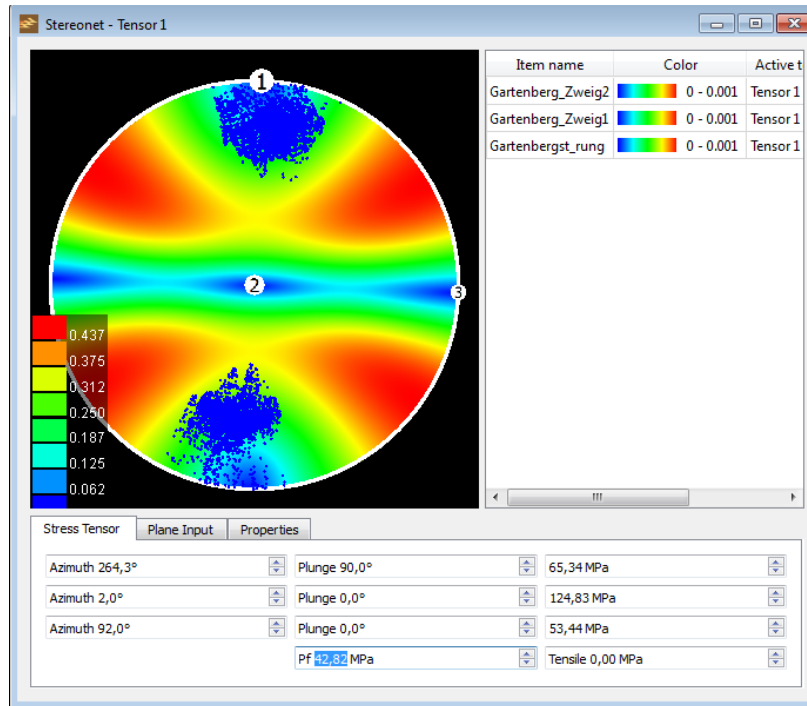
Vp=5955 m/s

Vs=3090 m/s

➤ Vp/vs=1,93

➤ Dynamischer Kompressionsmodul=60

Mohr-Coulomb Versagenskriterium 4500 m (min. Sp.)



Hoek-Brown Navier-Coulomb Display Options

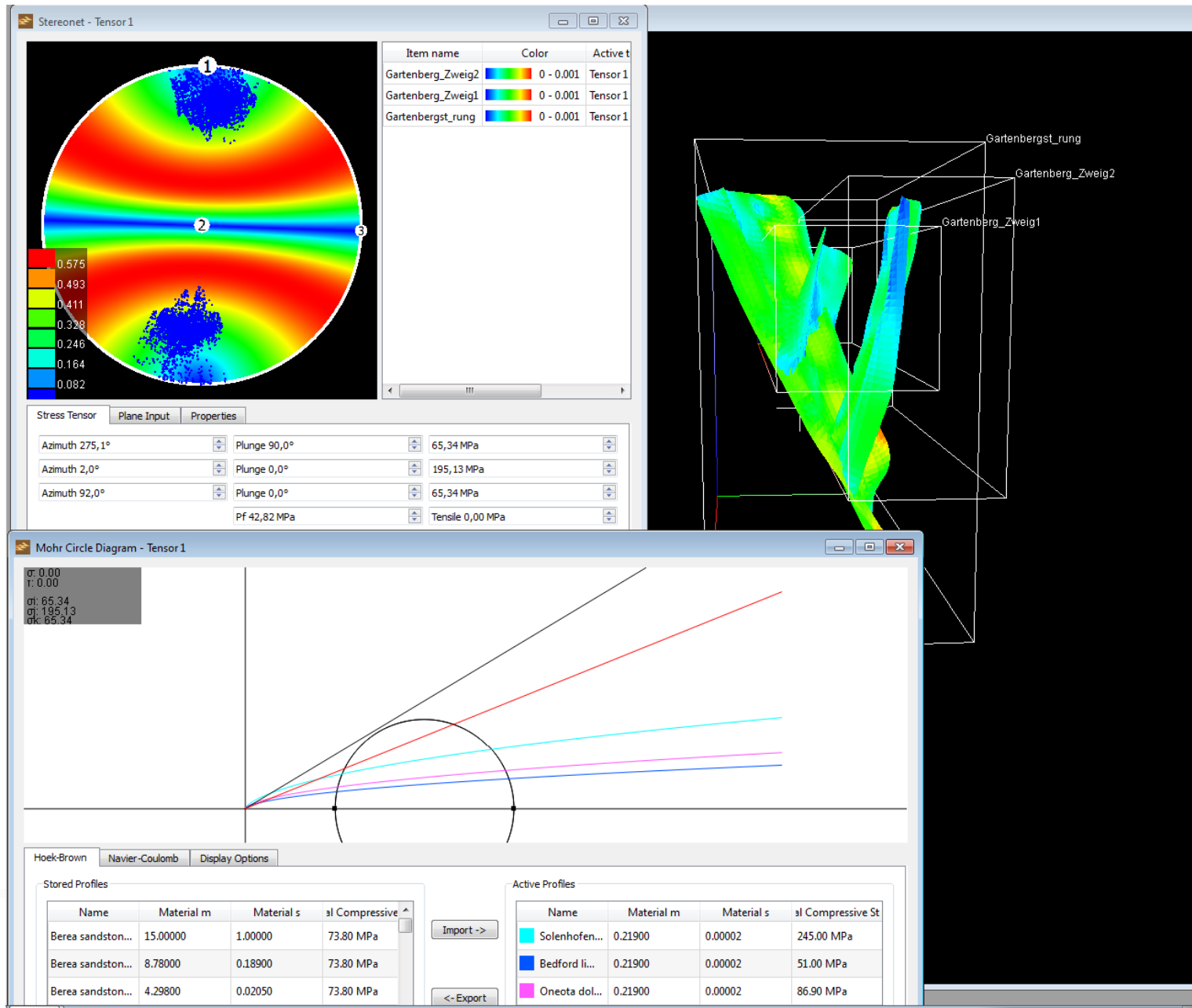
Name	Material m	Material s	al Compressive
Berea sandston...	15.00000	1.00000	73.80 MPa
Berea sandston...	8.78000	0.18900	73.80 MPa
Berea sandston...	4.29800	0.02050	73.80 MPa

Active Profiles

Name	Material m	Material s	al Compressive St
Solenhofen...	0.21900	0.00002	245.00 MPa
Bedford li...	0.21900	0.00002	51.00 MPa
Oneonta dol...	0.21900	0.00002	86.90 MPa

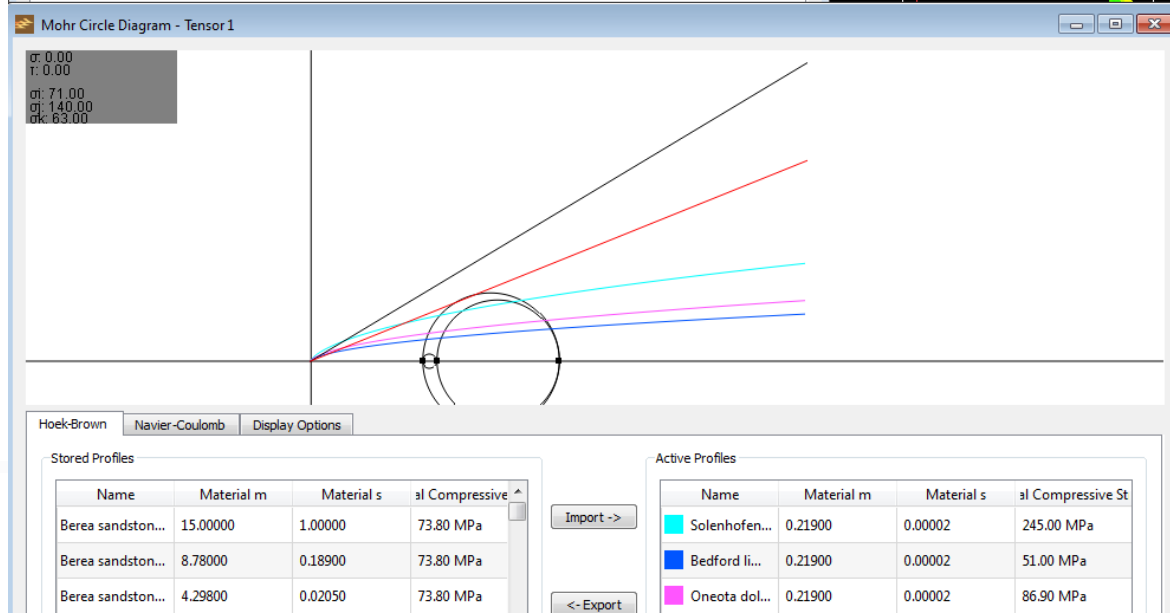
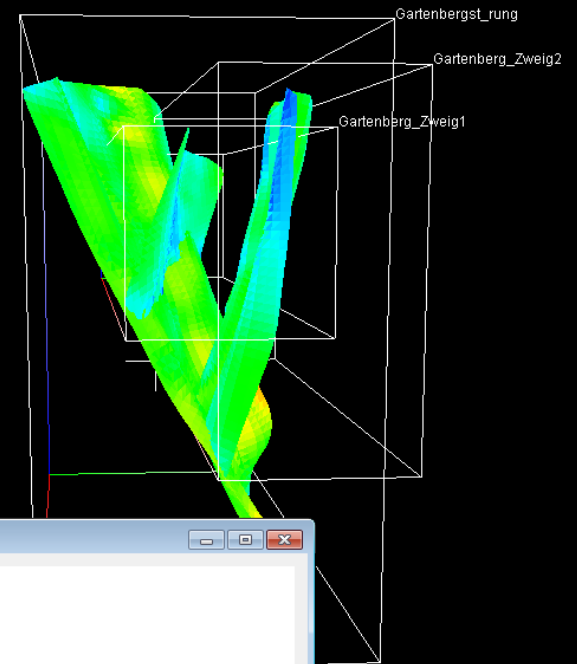
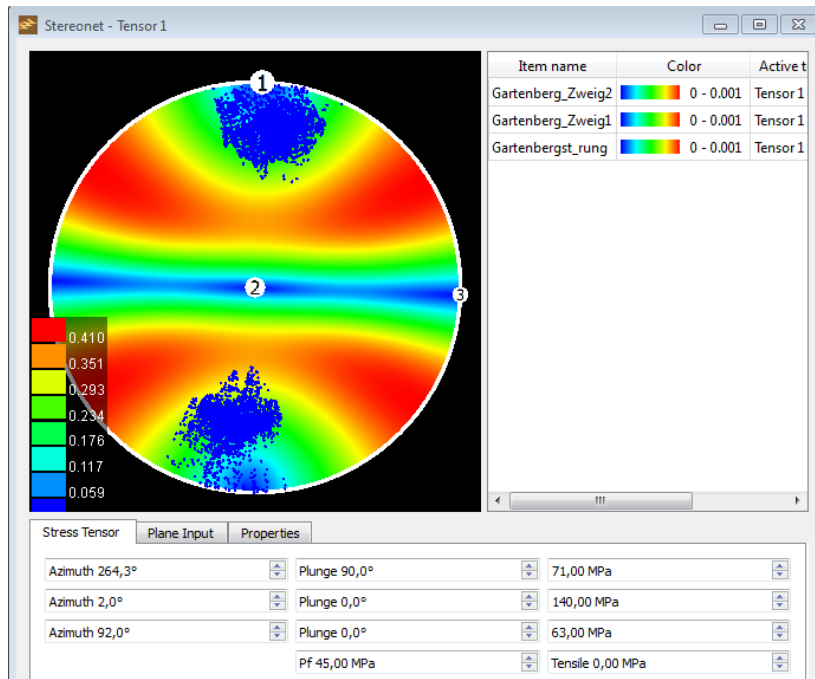
(Hoek-Brown für stark geklüftete Karbonate)

Mohr-Coulomb Versagenskriterium 4500 m (max. Sp.)

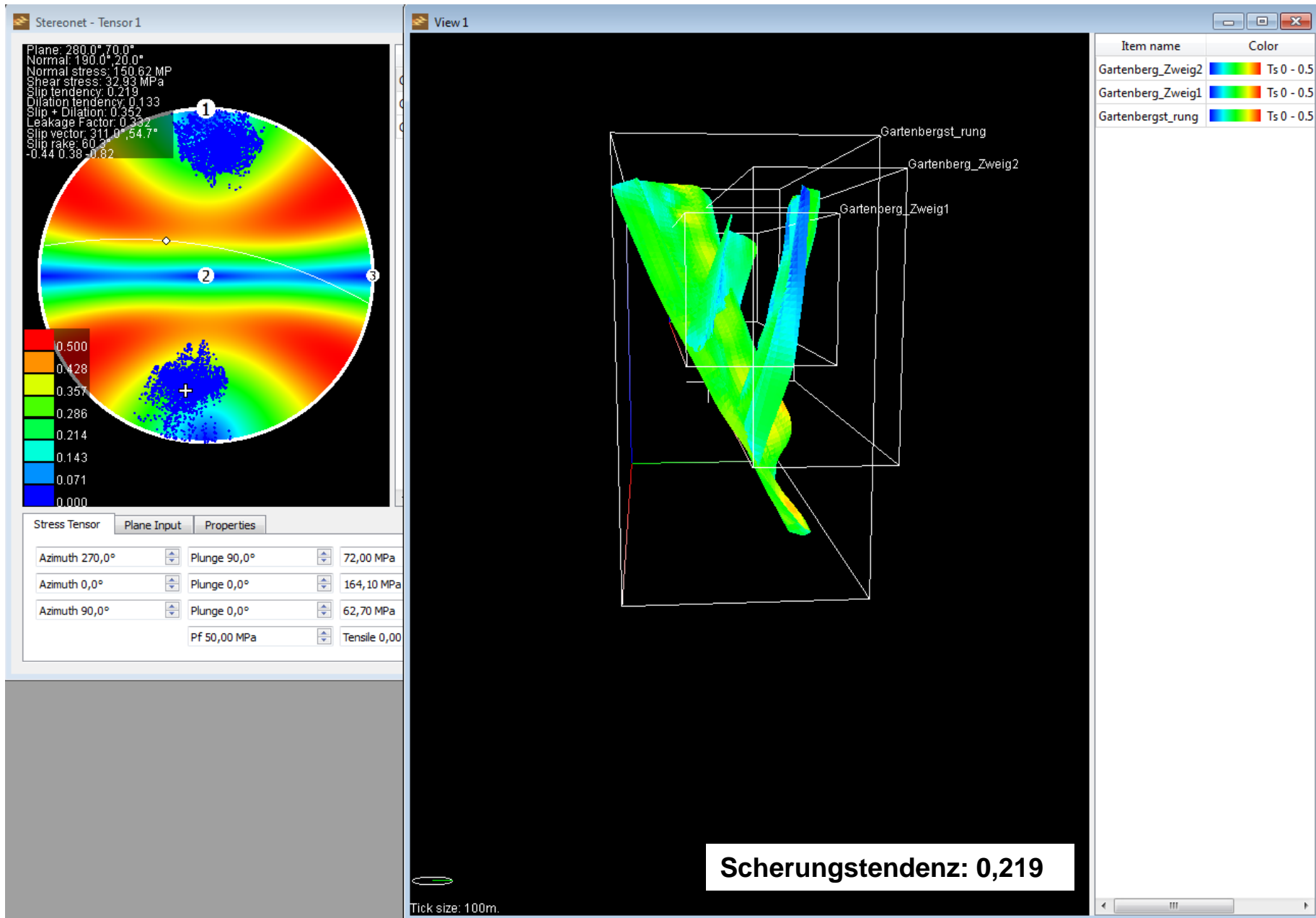


(Hoek-Brown für stark geklüftete Karbonate)

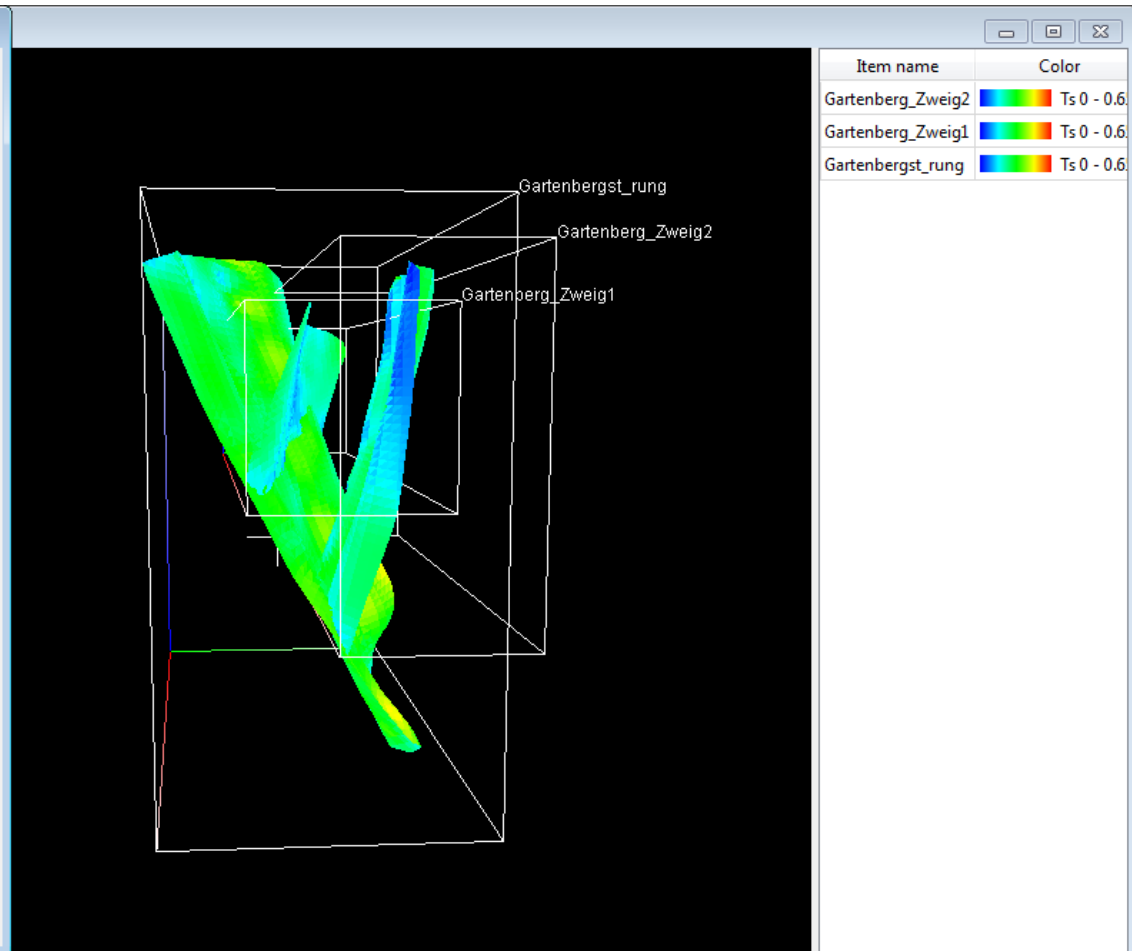
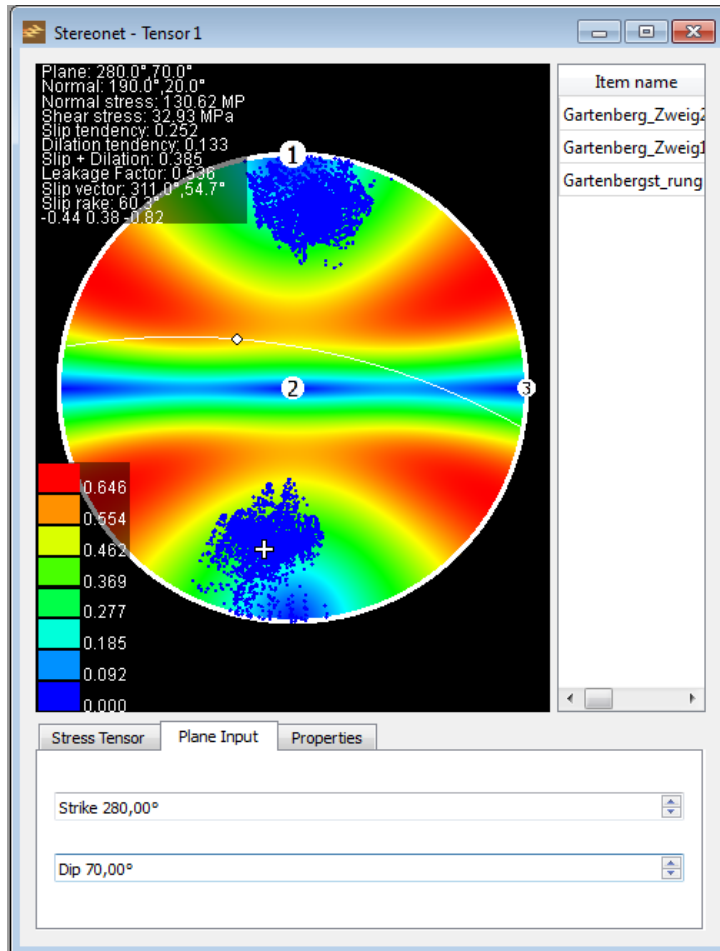
Mohr-Coulomb Versagenskriterium 5000 m



Scherungstendenz Gartenbergstörung (rd. 100/70°N), > 5 km



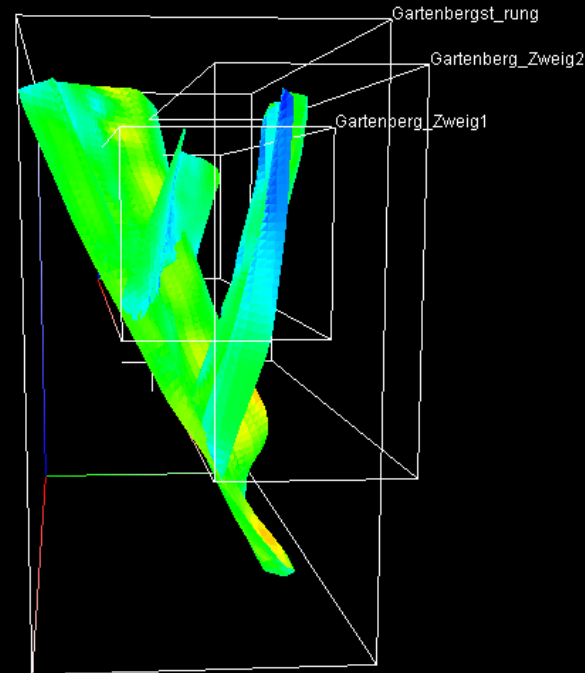
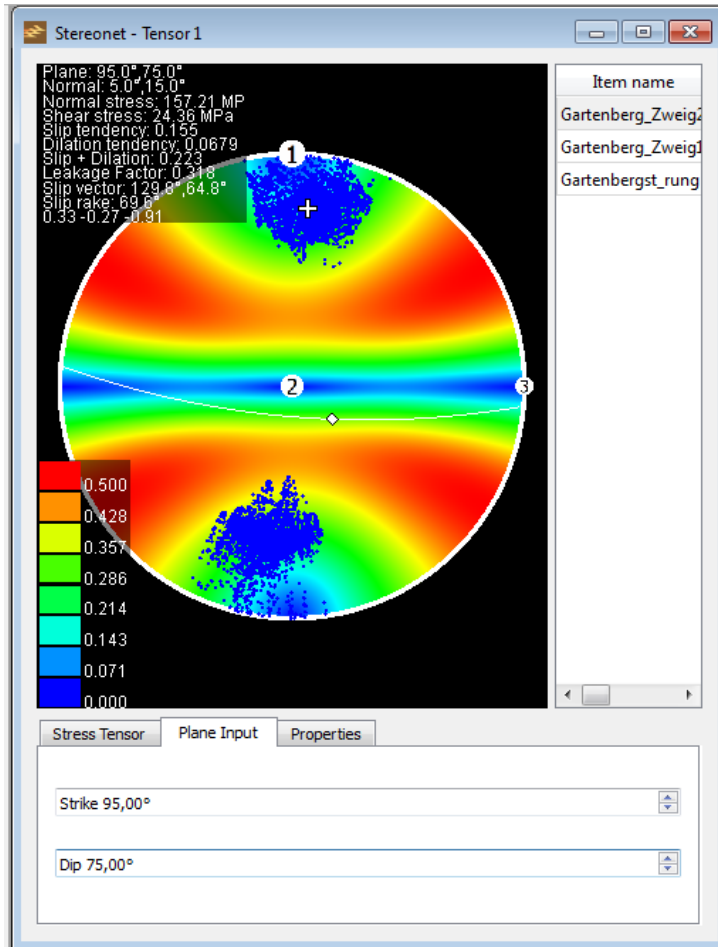
Ausblick: Erhöhung Pp um 30 MPa (4,5 km TVD, Reservoirteufe) Scherungstendenz Gartenbergstörung (rd. 100/70°N), > 5 km



Scherungstendenz: 0,252

> Geringe Erhöhung

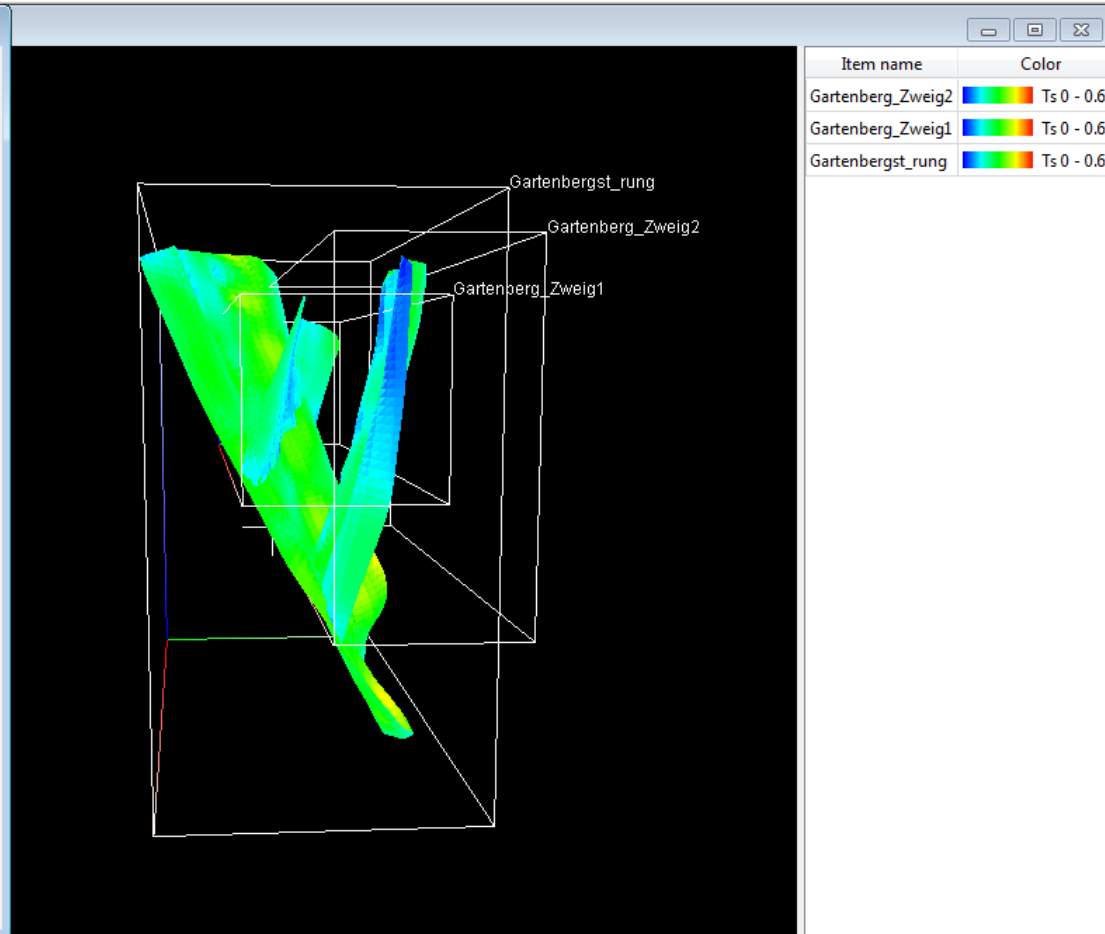
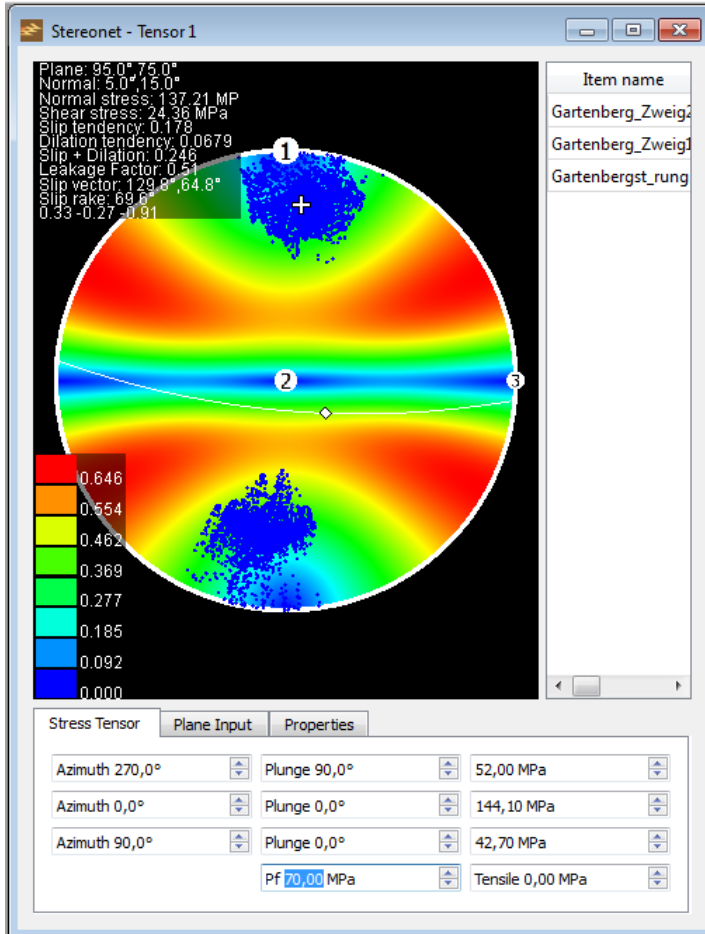
Scherungstendenz Zweigstörungen (rd. 95/75°S), > 5 km



Item name	Color
Gartenberg_Zweig2	Ts 0 - 0.5
Gartenberg_Zweig1	Ts 0 - 0.5
Gartenbergst_rung	Ts 0 - 0.5

Scherungstendenz: 0,155

Ausblick: Erhöhung Pp um 30 MPa (4,5 km TVD, Reservoirteufe) Scherungstendenz Zweigstörungen (rd. 95/75°S), > 5 km

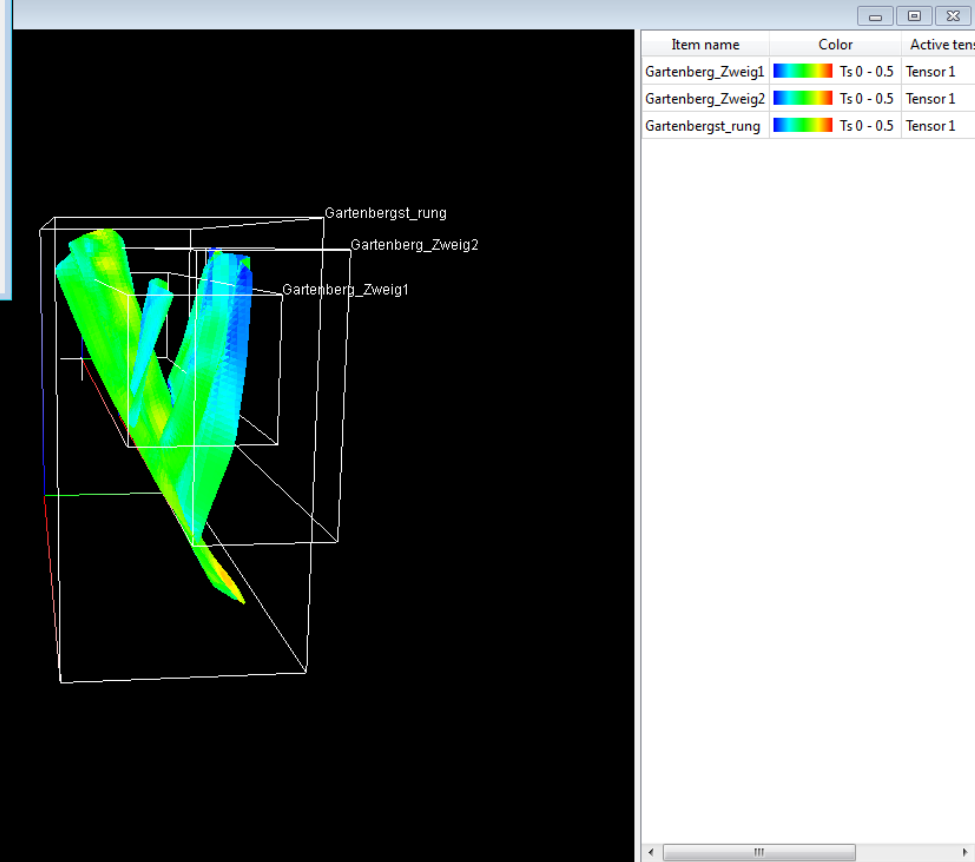
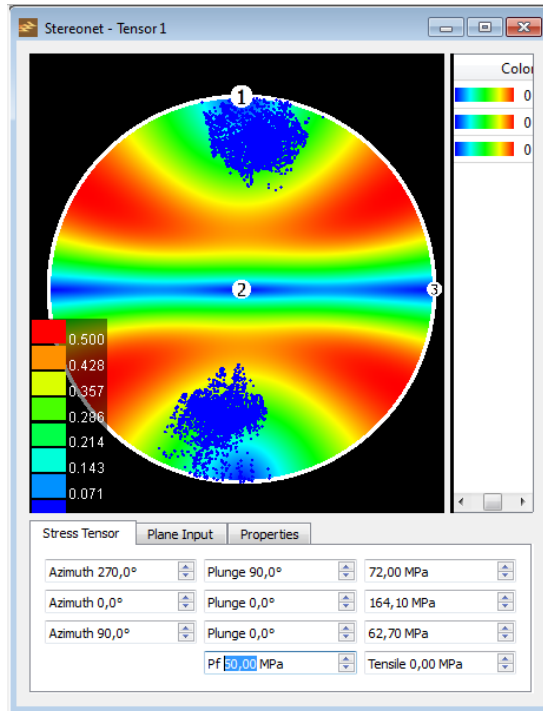


Scherungstendenz: 0,178

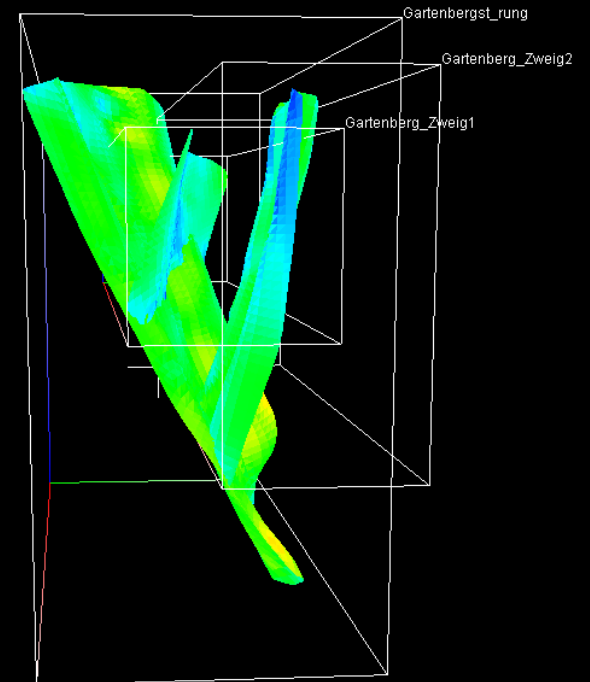
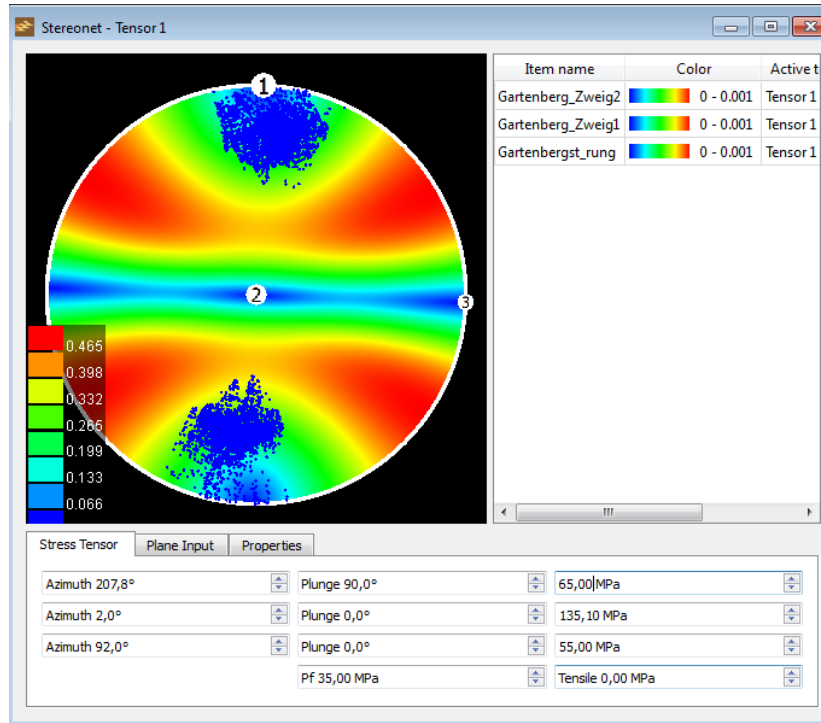
> Geringe Erhöhung

Reserve 2

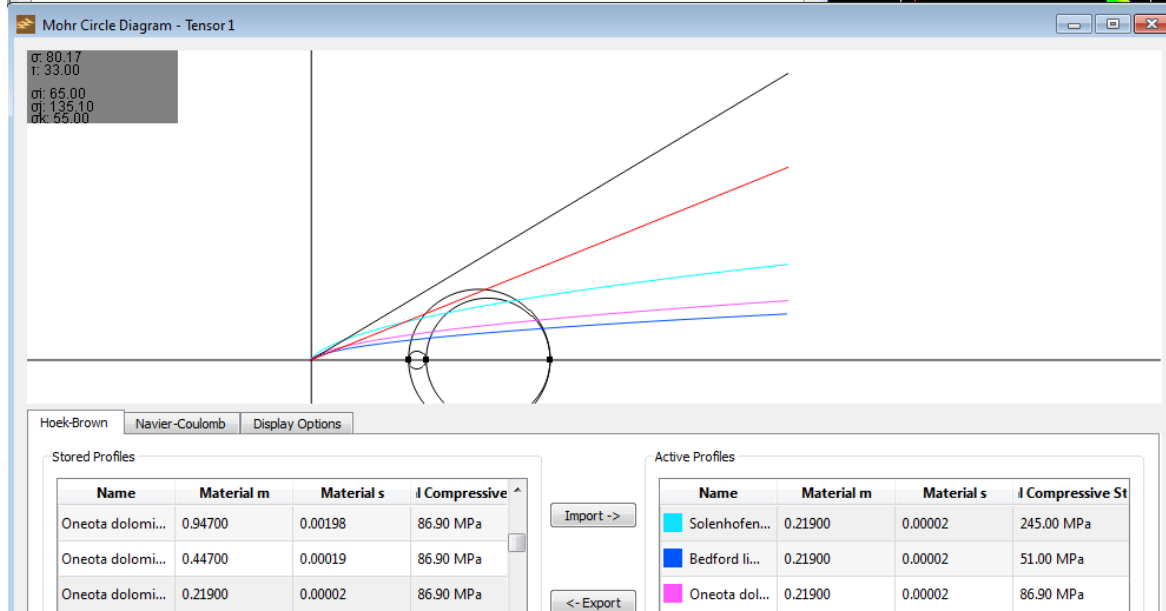
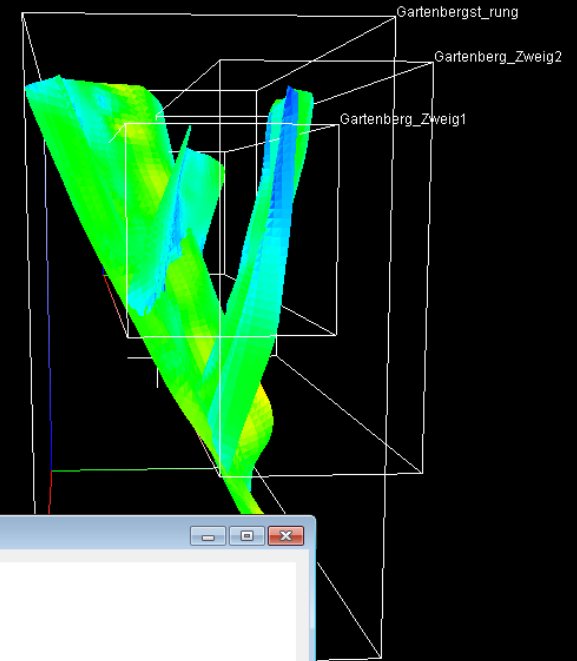
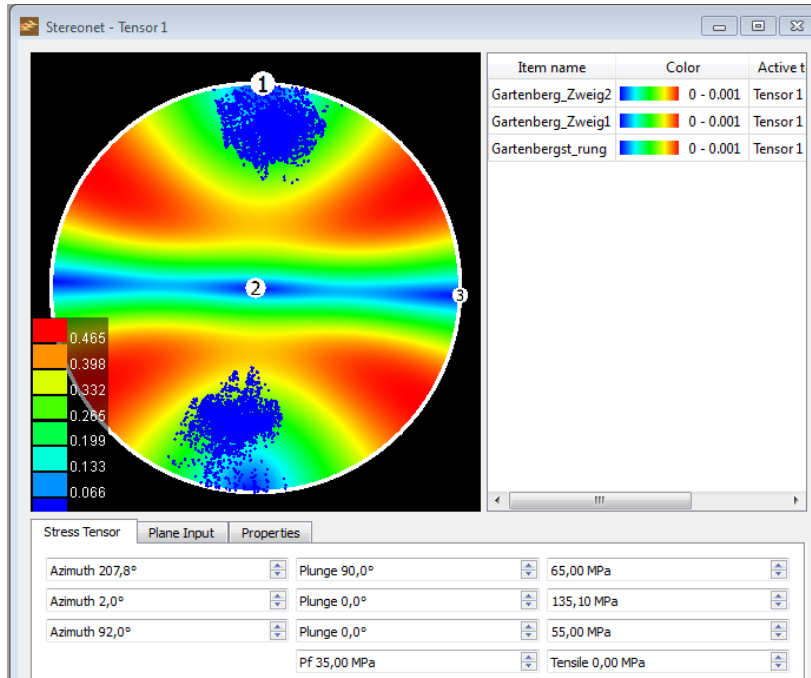
Scherungstendenzanalyse für das Gartenberg-Störungssystem – Allg.



Scherungstendenzanalyse 4338 m – Sz. 1: Rohrschuh? Top Reservoir



Mohr-Coulomb Versagenskriterium (4338 m TVD) – Sz. 1



Glossar Spannungen

Grundlegende Annahmen

Spannungsfeld ist orthogonal mit einer vertikalen Hauptspannungsachse und zwei horizontalen Hauptspannungsachsen

S_H oder S_{Hmax} : maximale Horizontalspannung

S_h oder S_{hmin} : minimale Horizontalspannung

S_V : Vertikalspannung

S_1 : maximale Hauptspannung

S_2 : mittlere Hauptspannung

S_3 : minimale Hauptspannung

σ_n : Normalspannung

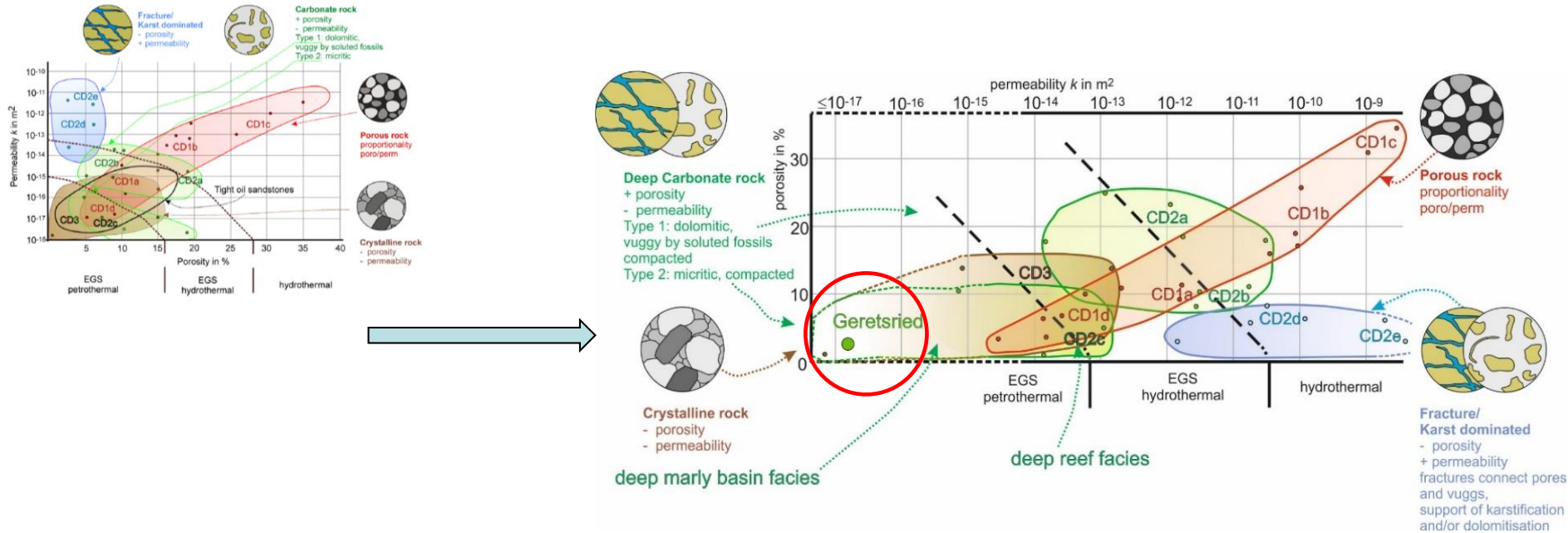
τ : Scherspannung

P_p : Porenfluiddruck, auch bekannt als Porendruck oder Formationsdruck

Index **eff**: effektive Spannungen, d.h. Hauptspannung minus Porenfluiddruck. Effektivspannungen sind die Spannungen, die tatsächlich im Gestein wirken und daher wichtig für geomechanische Betrachtungen.

Kernmessungen – Gesteinsparameter (TUM)

LS. Moeck / Renewable and Sustainable Energy Reviews 37 (2014) 867–882



Porosität Helium Pyknometer (TUM):

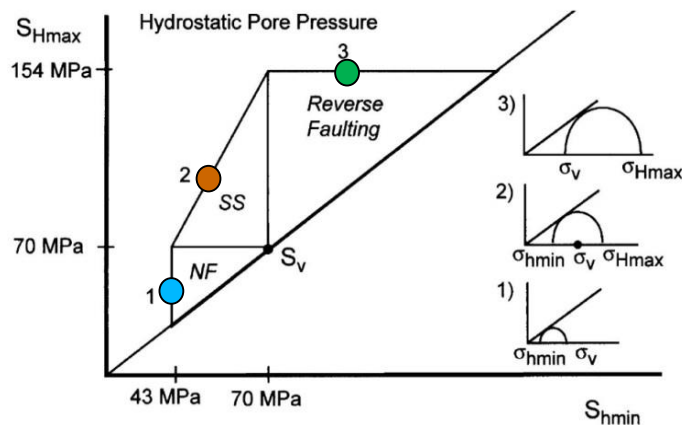
ID	Teufe (m)		Rohdicht e (g/cm ³)	Reindicht e (g/cm ³)	Rohvolume n (cm ³)	Porenvolum en (cm ³)	Porosität (%)
	von	bis					
GEN-1ST-5036_L	5036,20	5036,31	2,52	2,73	218,72	17,07	7,63
GEN-1ST-5036_S	5036,32	5036,35	2,51	2,78	52,93	5,14	9,7
GEN-1ST-A1	5384,17	5384,20	2,69	2,71	51,67	0,43	0,8

Darstellung des Spannungsregimes - Spannungspolygone

Spannungsregime:

- Abschiebungsregime: $S_V=S_1$; $S_H=S_2$; $S_h=S_3$
- Strike-slip Regime: $S_V=S_2$; $S_H=S_1$; $S_h=S_3$
- Auf-/Überschiebungsregime: $S_V=S_3$; $S_H=S_1$; $S_h=S_2$

Konzept der limitierenden Spannungsgesetze nach dem Reibungsgleichgewicht für Geothermieprojekte (Moeck 2009)



$$\sigma_1/\sigma_3 = (\sigma_{Hmax}-P_p)/(\sigma_V-P_p) \leq [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2$$

$$\sigma_1/\sigma_3 = (\sigma_{Hmax}-P_p)/(\sigma_{hmin}-P_p) \leq [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2$$

$$\sigma_1/\sigma_3 = (\sigma_V-P_p)/(\sigma_{hmin}-P_p) \leq [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2$$

(modified after Zoback, 2007: Reservoir geomechanics)

Spannungsfeld in situ (3143 m TVD)

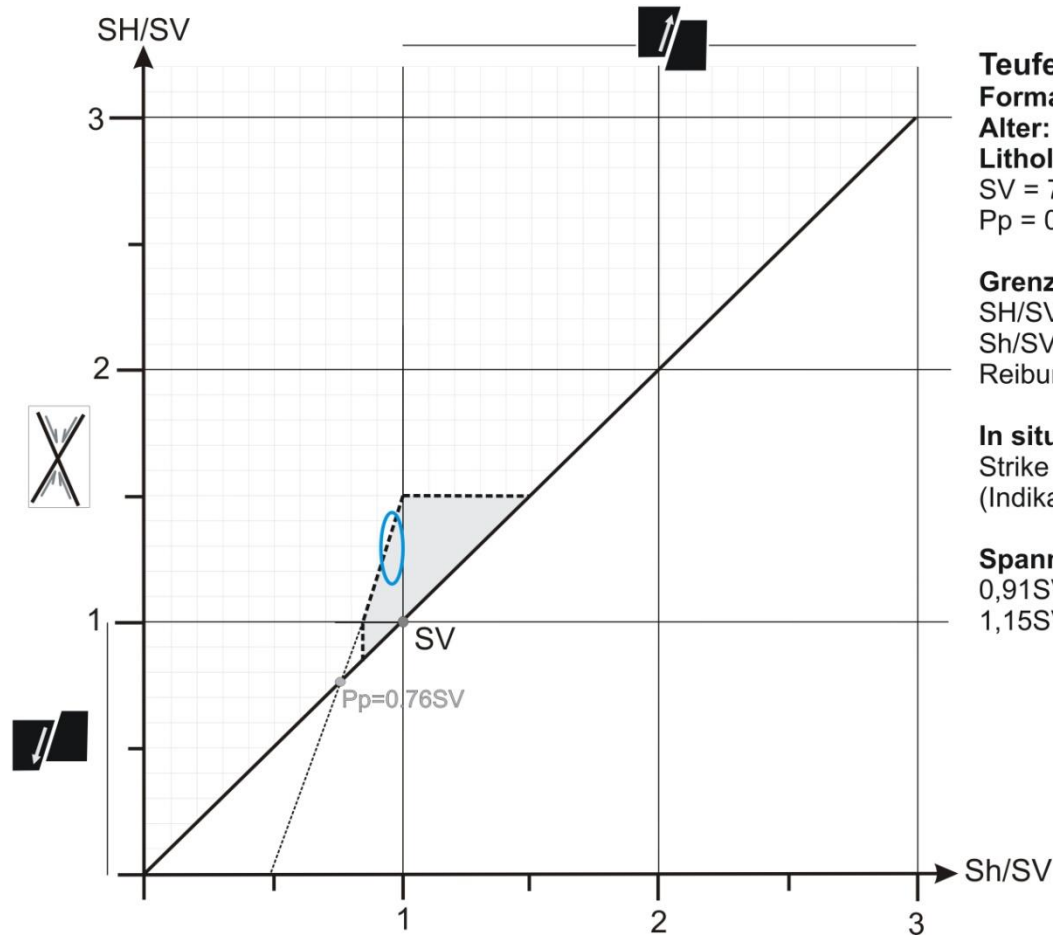
Spannungslimits in MPa

$$68.74 < S_h < 75.54$$

$$S_h = 72 \pm 3 \text{ MPa}$$

$$86.87 < S_H < 108.78$$

$$S_H = 98 \pm 11 \text{ MPa}$$



Teufe: 3143 m TVD

Formation: Chatt Bausteinschichten

Alter: Unt. Eger (Ob. Oligozän)

Lithologie: Kalksandstein (FIT)

SV = 75,54 MPa

Pp = 0,76SV = 57,66 MPa

Grenzbedingungen

SH/SV = 1,5SV = 113,45 MPa

Sh/SV = 0,84SV = 63,39 MPa

Reibungsbeiwert: u=0,6

In situ Spannungsregime

Strike Slip

(Indikation aus Seismik)

Spannungsmagnituden

0,91SV < Sh < 1SV

1,15SV < SH < 1,44SV

(Geomecon, 2013, Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Inga S. Moeck)

Spannungsfeld in situ (4000 m TVD)

Spannungsfeld
in situ

4000 m TVD

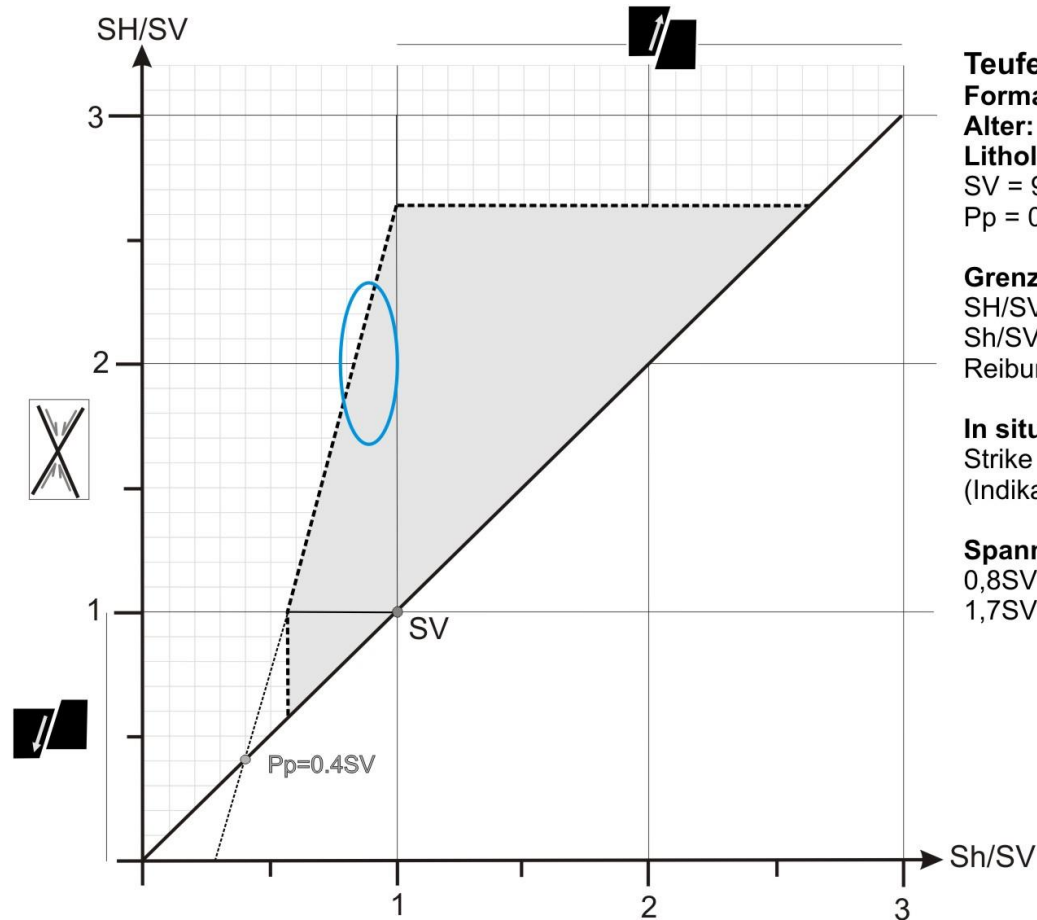
Spannungslimits in MPa

$76.91 < S_h < 96.14$

$S_h = 87 \pm 10$ MPa

$163.44 < S_H < 223$

$S_H = 193 \pm 30$ MPa



Teufe: 4000 m TVD
Formation: Rupel Tonmergel
Alter: Rupel (Unt. Oligozän)
Lithologie: kalkiger Mergelstein
 $S_V = 96,14$ MPa
 $P_p = 0,40S_V = 38,06$ MPa

Grenzbedingungen
 $S_H/S_V = 2,63S_V = 252,63$ MPa
 $S_h/S_V = 0,56S_V = 53,8$ MPa
 Reibungsbeiwert: $\mu=0,7$

In situ Spannungsregime
 Strike Slip
 (Indikation aus Seismik)

Spannungsmagnituden
 $0,8S_V < S_h < 1S_V$
 $1,7S_V < S_H < 2,32S_V$

(Geomecon, 2013, Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Inga S. Moeck)

Spannungsregime am Standort Geretsried

- Das Spannungsfeld ändert sich entlang des Bohrpfad
- Das rezente Spannungsfeld spiegelt nicht die Störungskinetik im Malm wieder. Es handelt sich damit um fossile um E-W anastomisierende Abschiebungen, die unter rezent hohen Normal- und Scherspannungen stehen.
- Das Spannungsregime wechselt ab etwa 2,8 km Tiefe TVD von Aufschiebung über Transpression zu Strike-Slip.
- Mit zunehmender Teufe wird das Spannungsregime ein reines Strike-slip Regime.
- Ein Strike-slip Spannungsregime ist durch den FIT mit Spülungsverlust in 2898 m TVD mit 60 MPa für S_h bestätigt.

(Geomecon, 2013, Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Inga S. Moeck)

Leak-off test

