

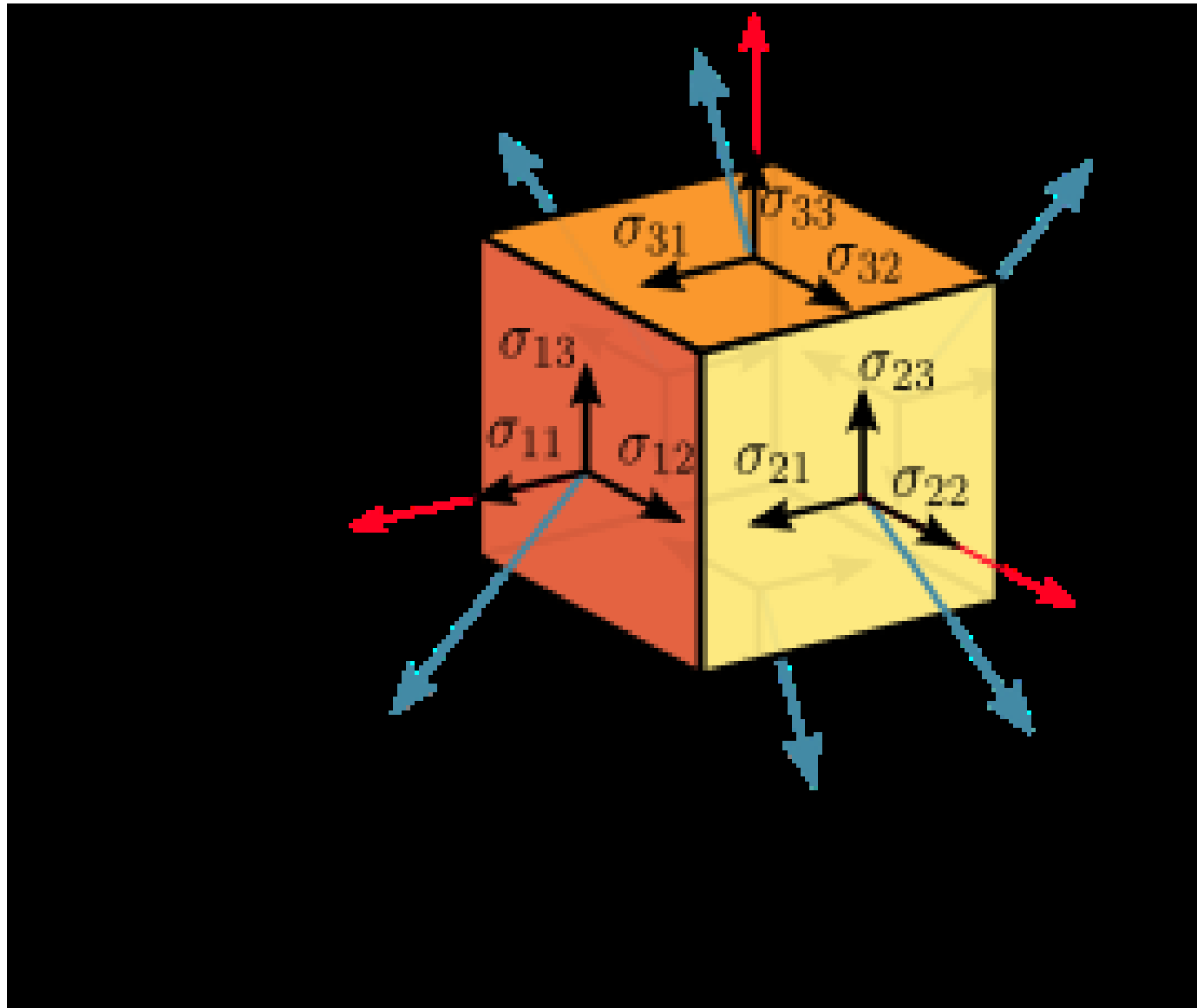


# Напряженность породного массива

Йен Грей

EUROROCK 2018 - 22 мая

# Что такое напряжение?



# Напряжение – это не давление

- Напряжение действует по направлениям и описывается тензором
- Давление действует во всех направлениях и является скалярной величиной

# Почему важно напряжение?

- Если напряжение превышает прочность, происходит обрушение
- Если напряжение слишком мало, все равно может произойти обрушение

Представьте как выглядит стопка книг, стиснутая с боков.

- Напряжение влияет на проницаемость породы, особенно угля

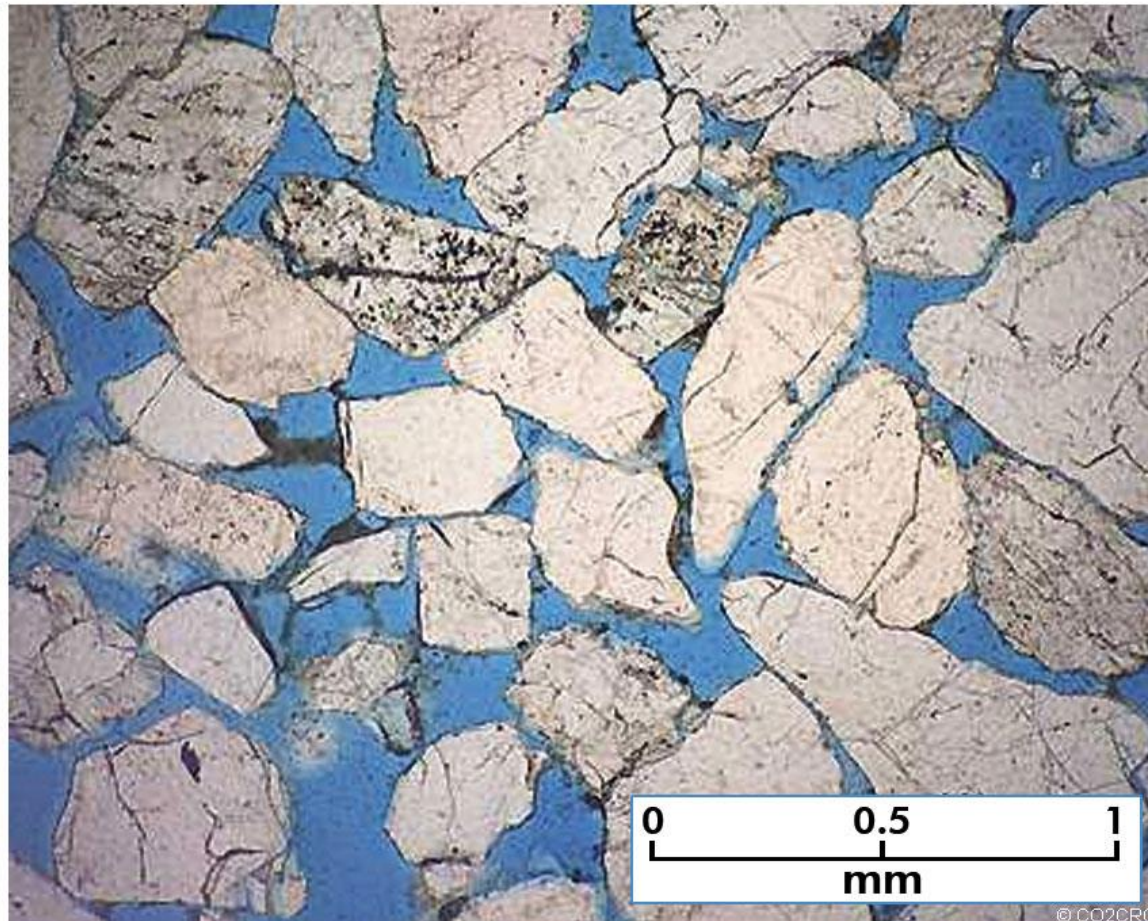
# Отложение осадков

- Морская или озерная среда
- Обычно процесс низко-энергетичный
- В почве напряженные состояния
  - Отвердевание – особенно вследствие землетрясений
  - Пределы активного и пассивного состояний

# Действительное напряжение в почве

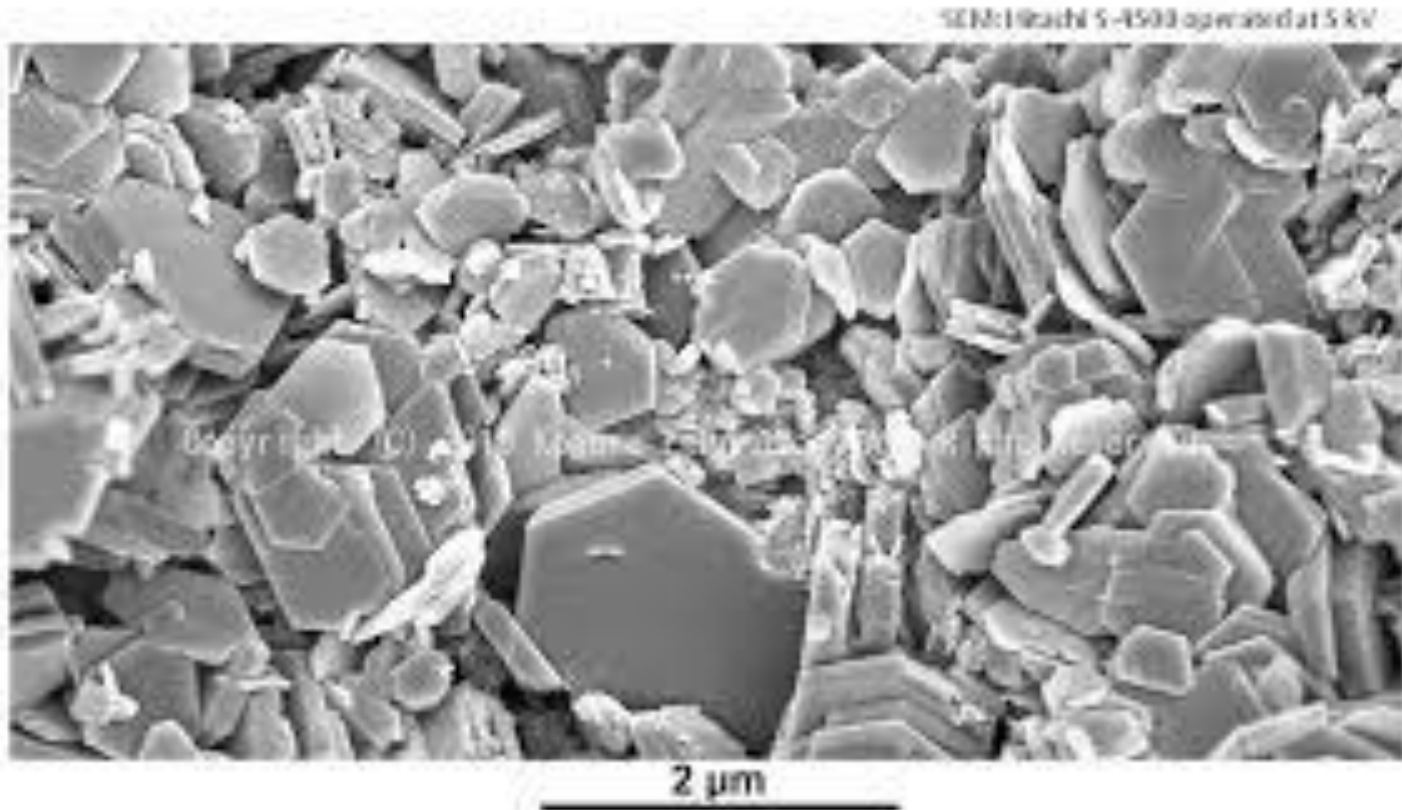
$$\sigma' = \sigma - P$$

# Концепция действительного напряжения: точечный контакт – жидкость воздействует на все поверхности



© CO2CRC

# Действительное напряжение применимо и к глинистым породам

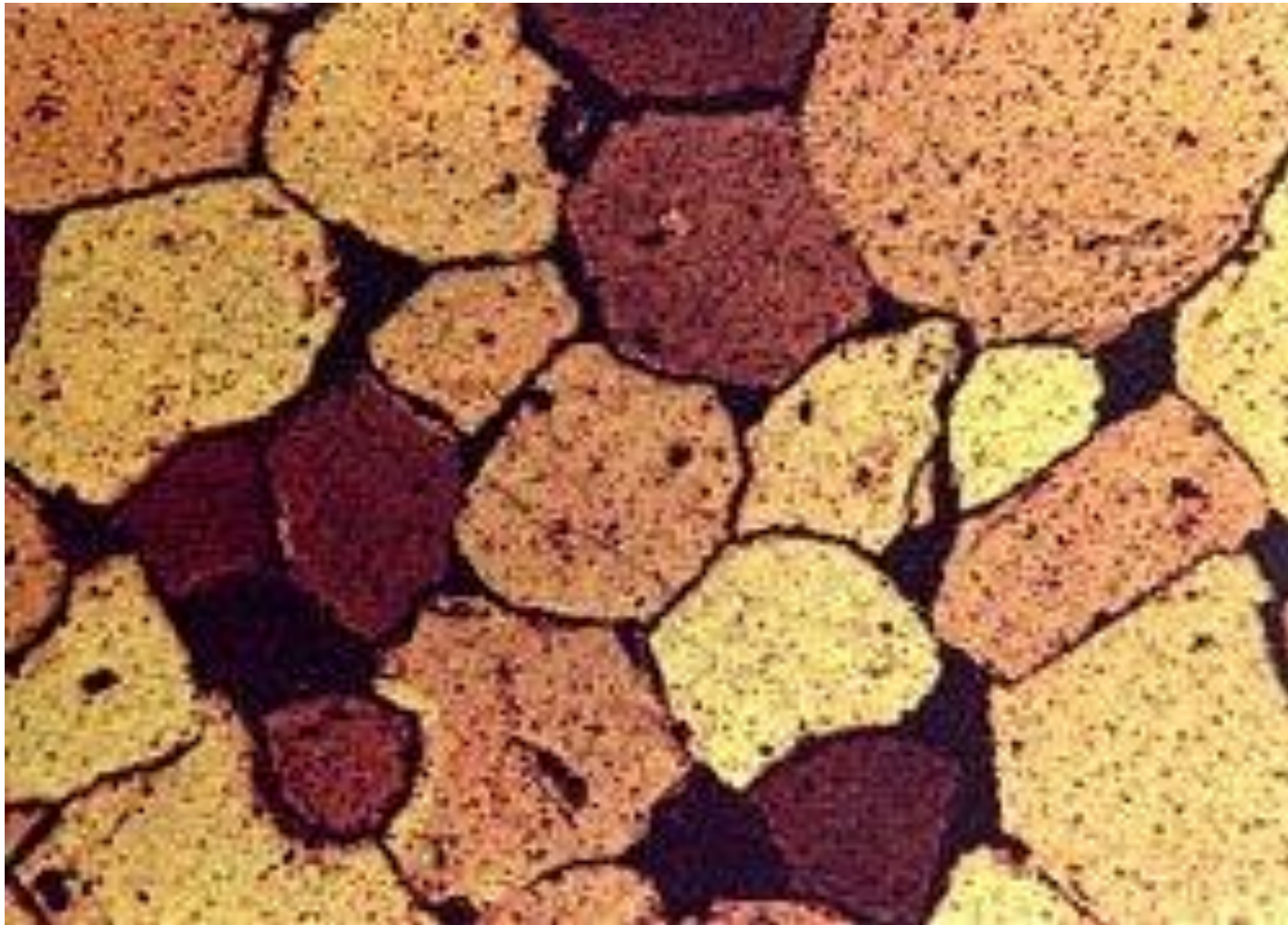




# Происходит литификация

- Цементация и увеличение размера кристаллов
- Почва превращается в породу... напряжения сохраняются?
- Более жесткие и более эластичные

# Что происходит, если есть небольшие пустоты?



# В породе уравнение действительного напряжения меняется

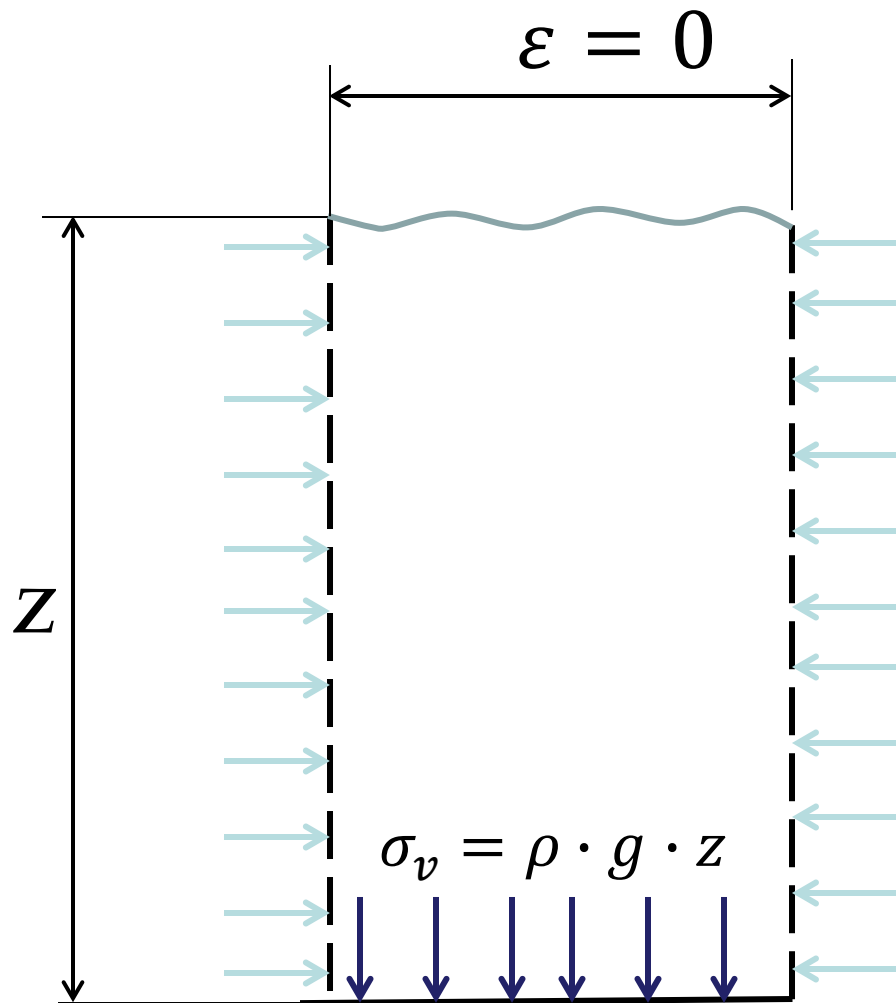
$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\alpha_i P$$

$\sigma'_{ii}$  = Главное действительное напряжение

$\delta_{ij}$  = дельта Кронекера

$\alpha_i$  = коэффициент Био(Биота)

$P$  = давление жидкости



Используя  
эту  
модель

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

# Порода как эластичная почва - большая разница

- Вертикальное эффективное напряжение

$$\sigma'_v = \rho g z - \alpha_v P$$

- Горизонтальное напряжение под нулевой латеральной деформацией

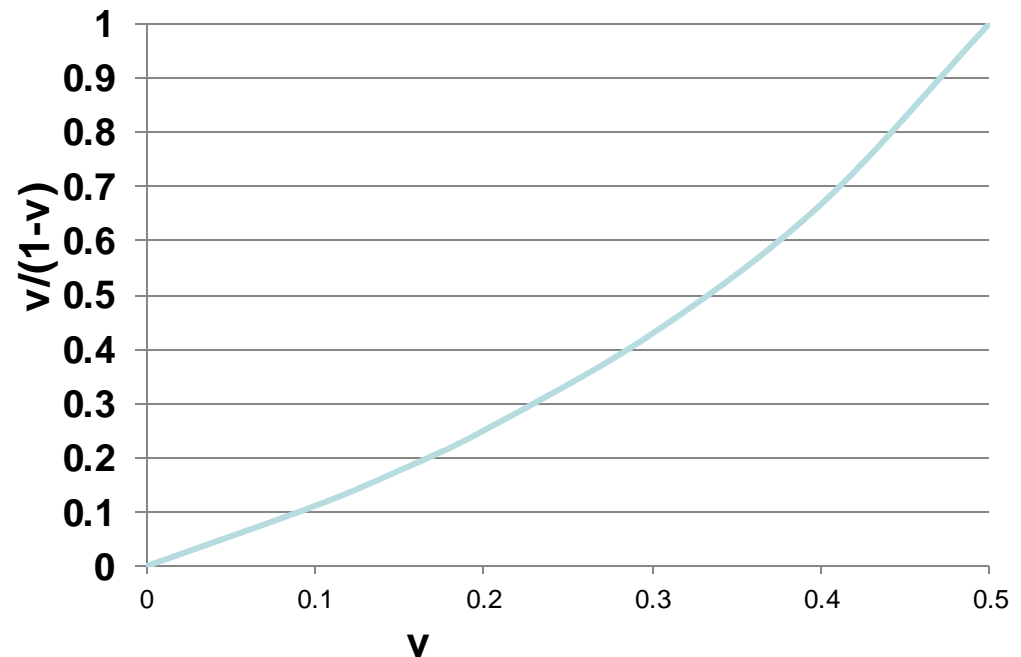
$$\sigma'_h = \sigma'_v \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right)$$

# Важность коэффициента Пуассона $\nu$

- Литостатическое горизонтальное напряжение

- $\sigma_h = \sigma_v \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right)$

Латеральное напряжение с учетом числа Пуассона



# Давление жидкости очень важно

- Давление жидкости может быть на минимальном уровне основного напряжения
- Но чаще на гидростатическом уровне, где оно связано с грунтовыми водами

Это указывает на вертикальную  
взаимосвязь

# Рассмотрим напряжение в условиях, где латеральная деформация не равна нулю

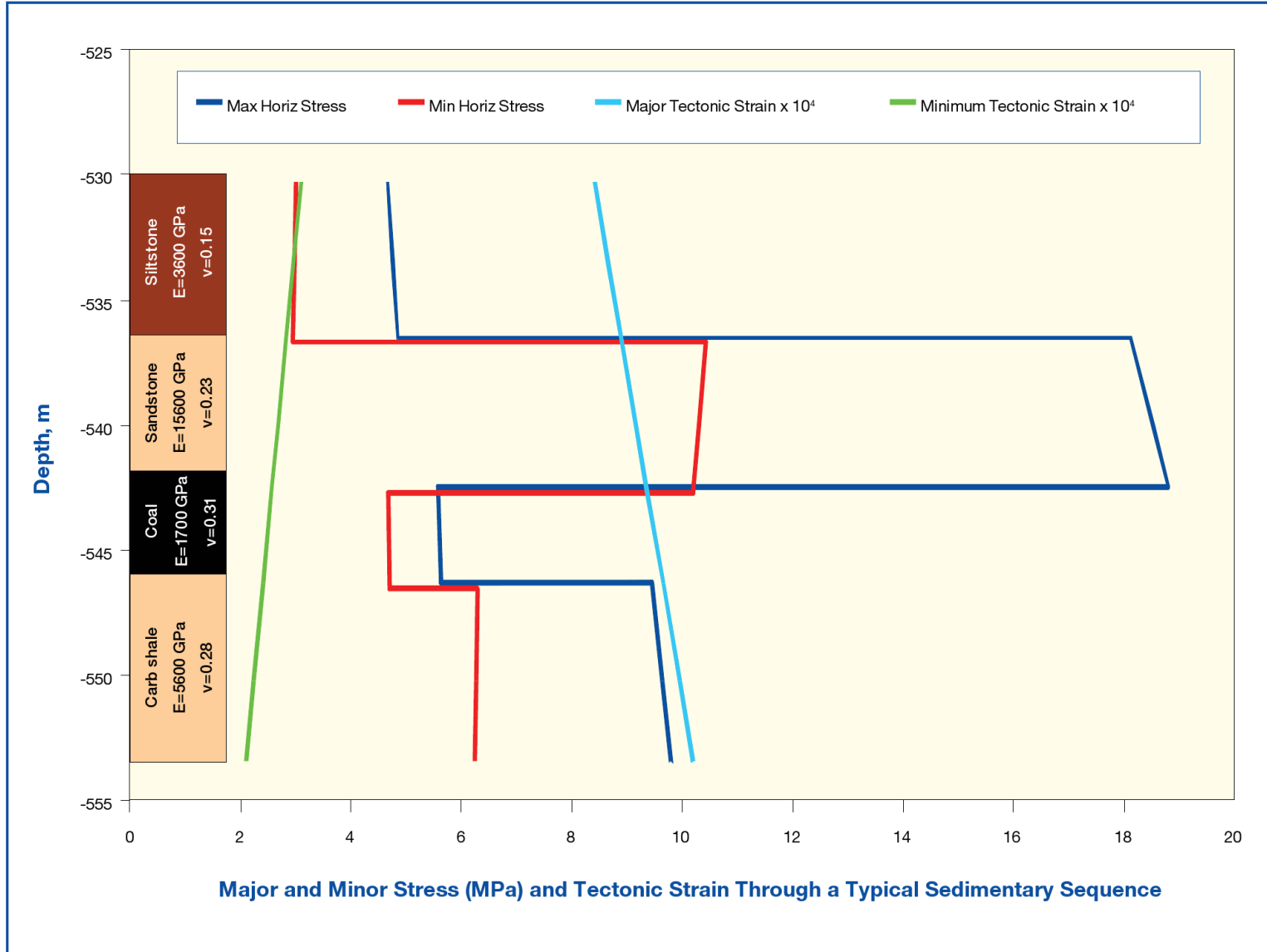
- Латеральный момент как результат тектонического воздействия
- Вследствие складок
  - Антиклинали Синклинали Моноклинали
- Влияние сверхконсолидации, диагенеза, литификация, охлаждения, да мало ли чего еще!
- Назовем это **ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ**

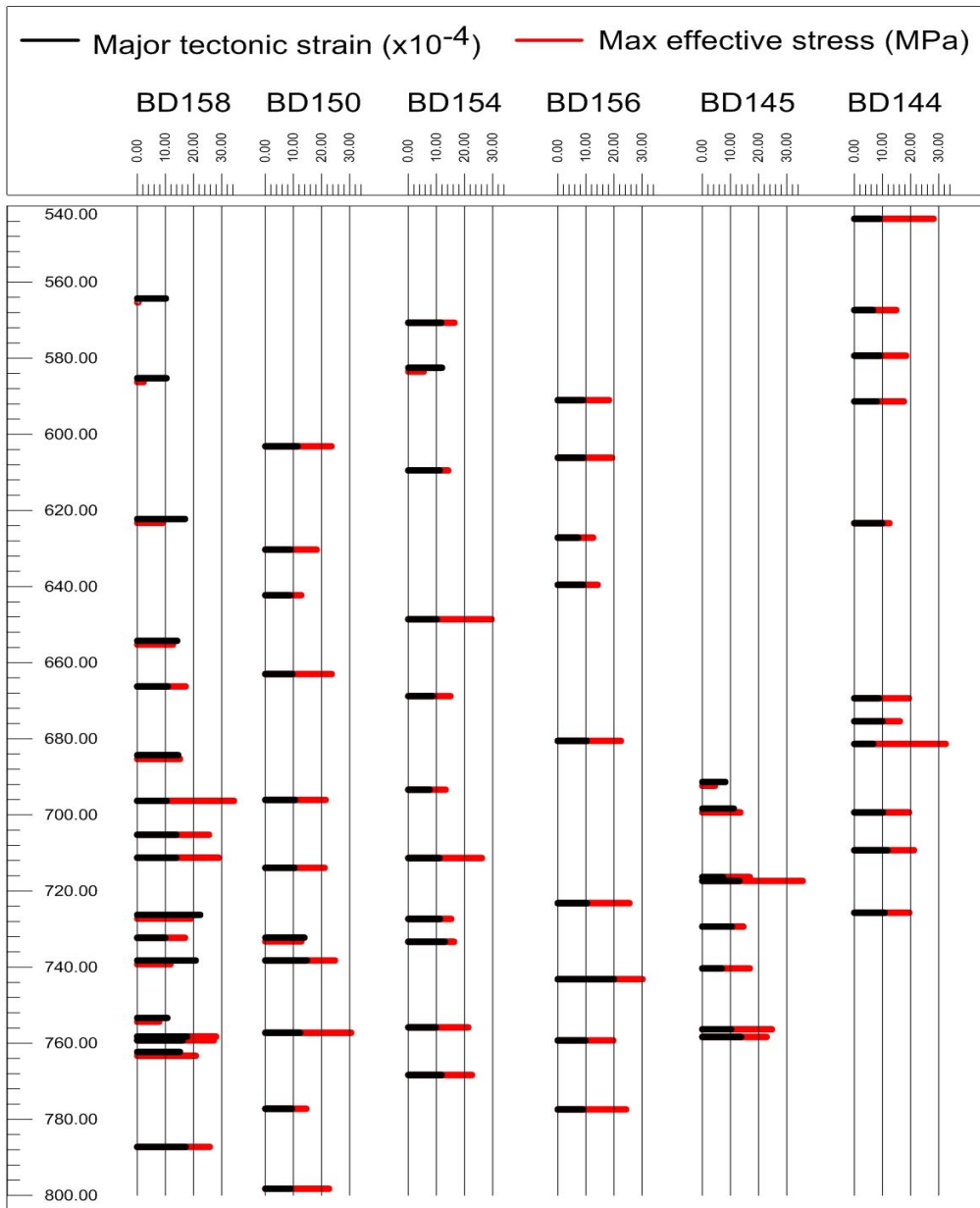


# Тектоническая деформация – когда латеральная деформация не равна нулю

- Осадочные породы обладают жесткостью, изменяющейся от слоя к слою (или интрузии)
- Напряжения меняются в зависимости от жесткости
- Тектоническая деформация – это деформация, вследствие которой возникает measurable напряжение
- Общее правило: тектонические деформации довольно равномерны по всей свите осадочных пород. Имеются исключения!

# Слоистые осадочные пласты различной жесткости и с различным коэффициентом Пуассона

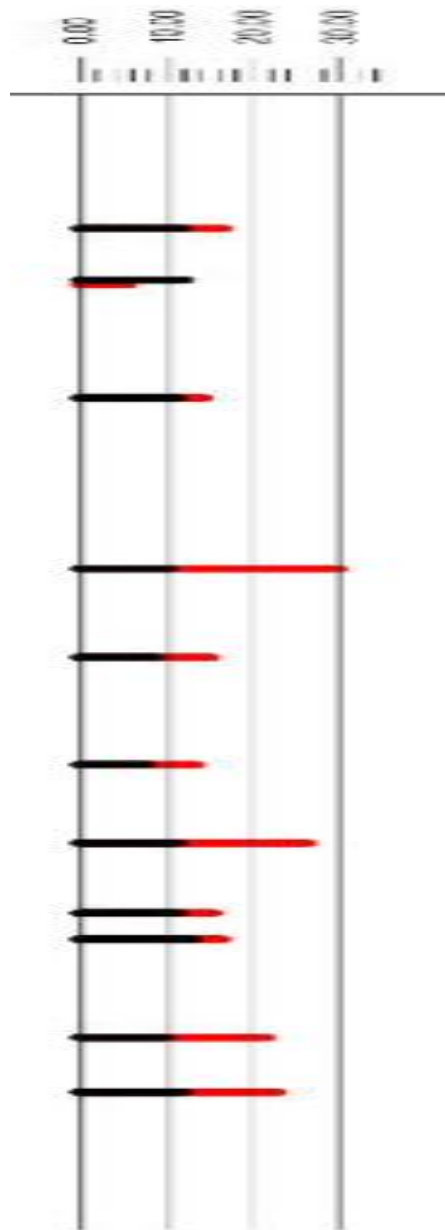




Объект в  
Куинслэнде

Напряжение

Тектоническая  
деформация\_



Объект в  
Куинслэнде

Напряжение \_\_\_\_\_

Тектоническая  
деформация \_\_\_\_\_

# Магматическая порода

- Дайки и силлы (интрузивы)- показатель напряжений, существовавших в период инъекции. Являются гигантскими гидротрещинами
- Магматические тела охлаждаются и ослабляют деформацию, но могут развивать высокое поверхностное напряжение при неравномерном охлаждении
- Жесткие породы принимают на себя гораздо большие напряжения, поэтому жесткая прочная порода может быть сильно напряженной или разгруженной.

# Пороэластические свойства

- Деформация выраженная через действительное напряжение

- $$\Delta \varepsilon_i = \frac{1}{E_i} \Delta \sigma'_i - \frac{\nu_{ji}}{E_j} \Delta \sigma'_j - \frac{\nu_{ki}}{E_k} \Delta \sigma'_k$$

- $$\varepsilon_i = \frac{1}{E_i} \left( \Delta \sigma_i - \frac{\nu_{ji}}{E_j} \Delta \sigma_j - \frac{\nu_{ki}}{E_k} \Delta \sigma_k \right) - \Delta P \left( \frac{1}{E_i} \alpha_i - \frac{\nu_{ji}}{E_j} \alpha_j - \frac{\nu_{ki}}{E_k} \alpha_k \right)$$

# Большая губка

- Уравнения описывают породный блок который, как губка, расширяется под воздействием давления внутренней жидкости.
- Для того, чтобы определить порозластические коэффициент (коэффициент Биота), нужно замерить параметры эластичности, а затем закачать в образец жидкость и отслеживать деформацию.







# Действительное напряжение и трещина

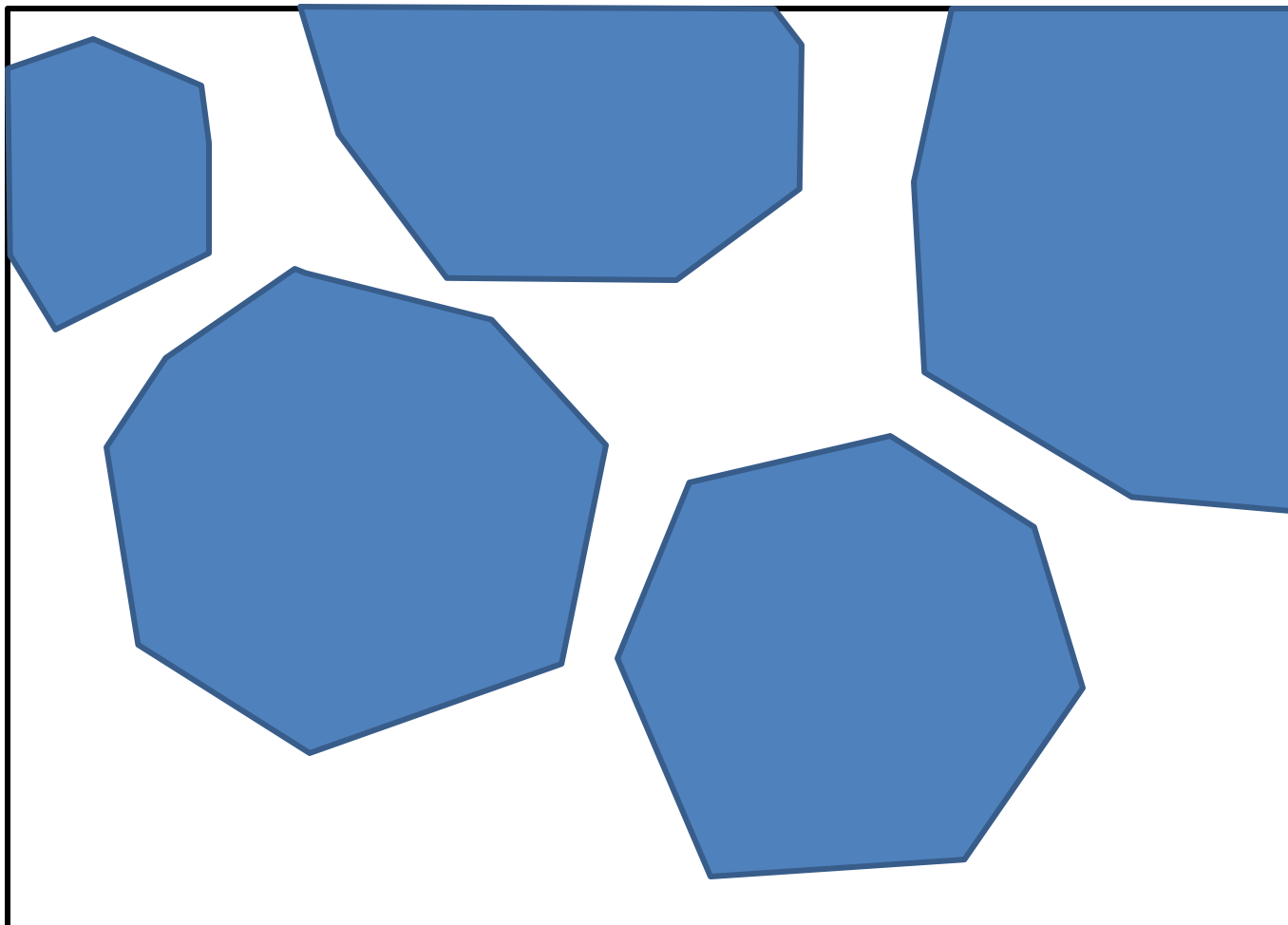
- Концепция действительного напряжения применима только к направлению перпендикулярному к рассматриваемой поверхности.

$$\sigma'_n = \sigma_n - \alpha P$$

- Где  $\sigma'_n$  – действительное напряжение по нормали вкрест определенной плоскости
  - $\sigma_n$  - общее напряжение вкрест плоскости
  - $\alpha$  - соотношение площади поверхности разрушения
  - $P$  - давление жидкости

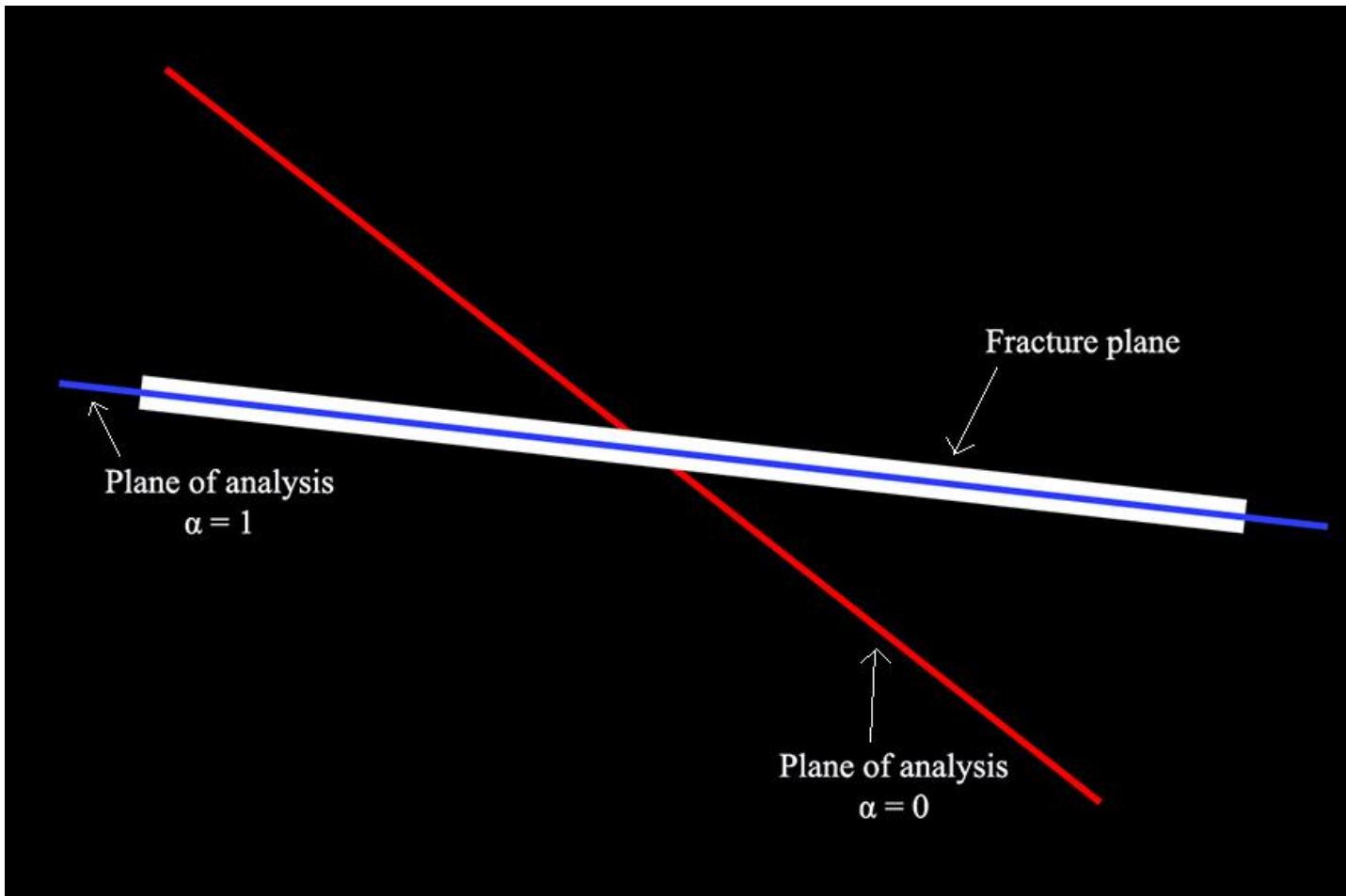
# Действительное напряжение в трещинах

- Вместо коэффициента Био лучше использовать термин 'пороэластичность, относительная площадь трещины' или 'степень расширения трещины'

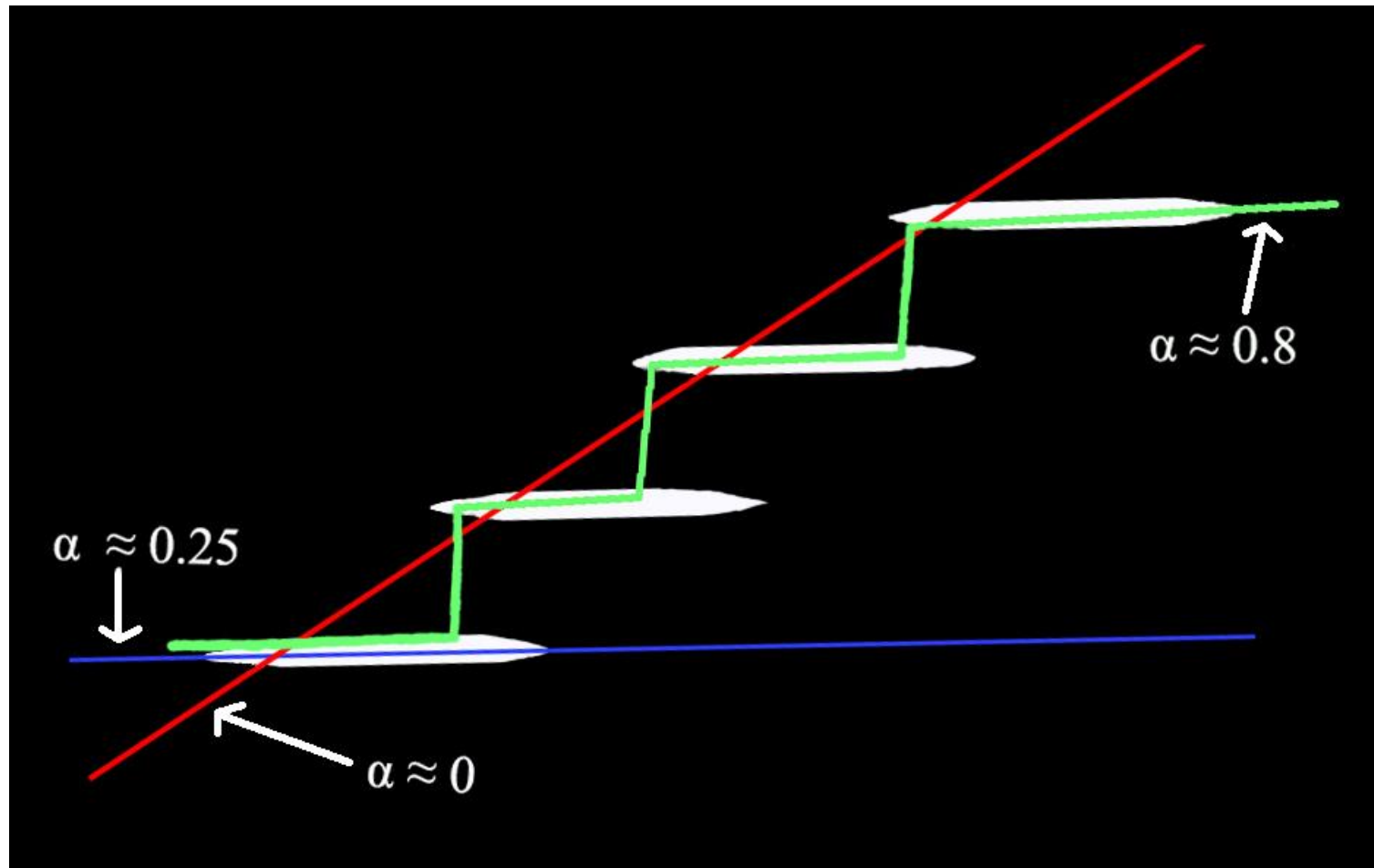


$\alpha$  = площадь трещин (голубой)/общая площадь

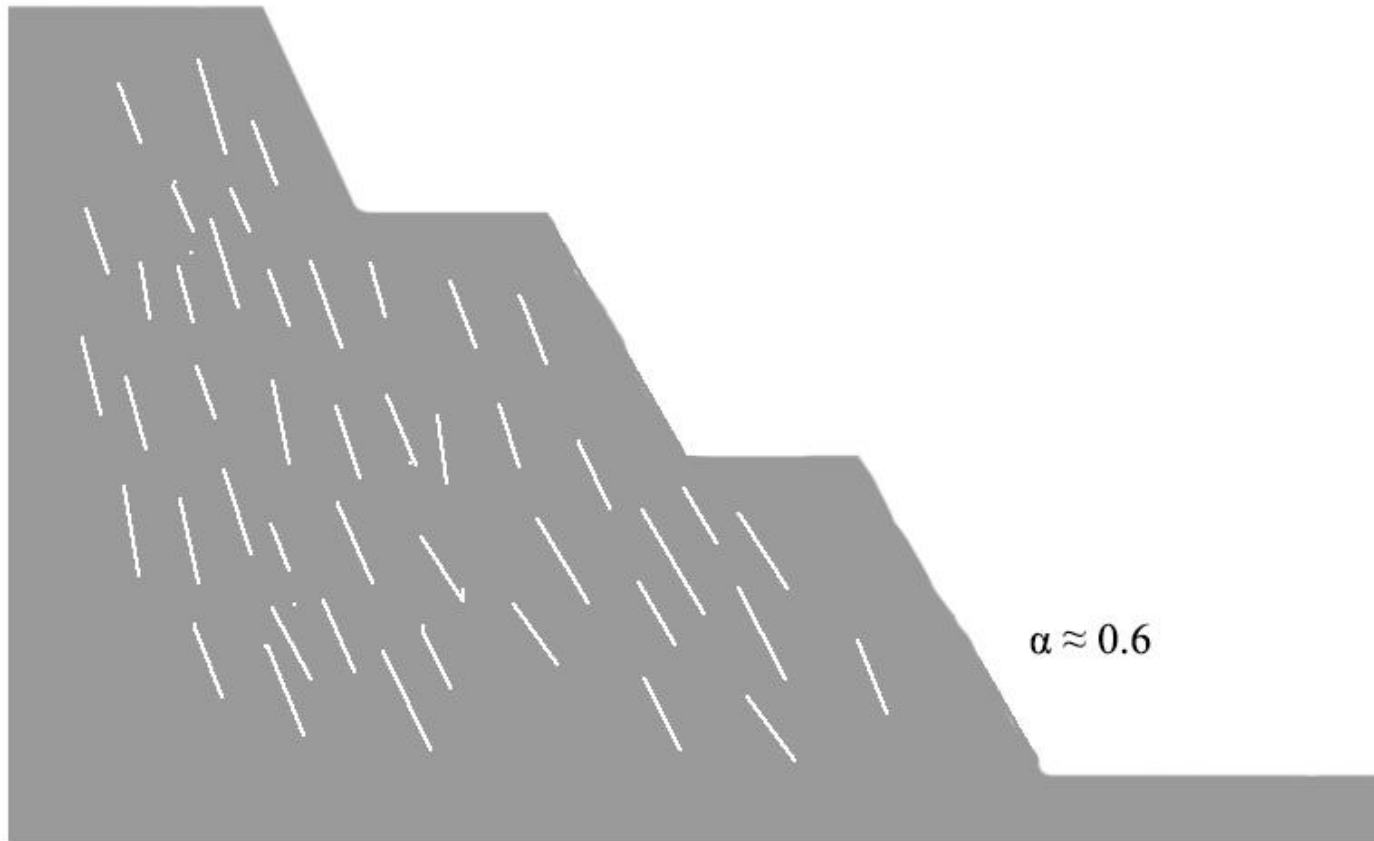
# Рассмотрим блок обсидиана где есть одна трещина



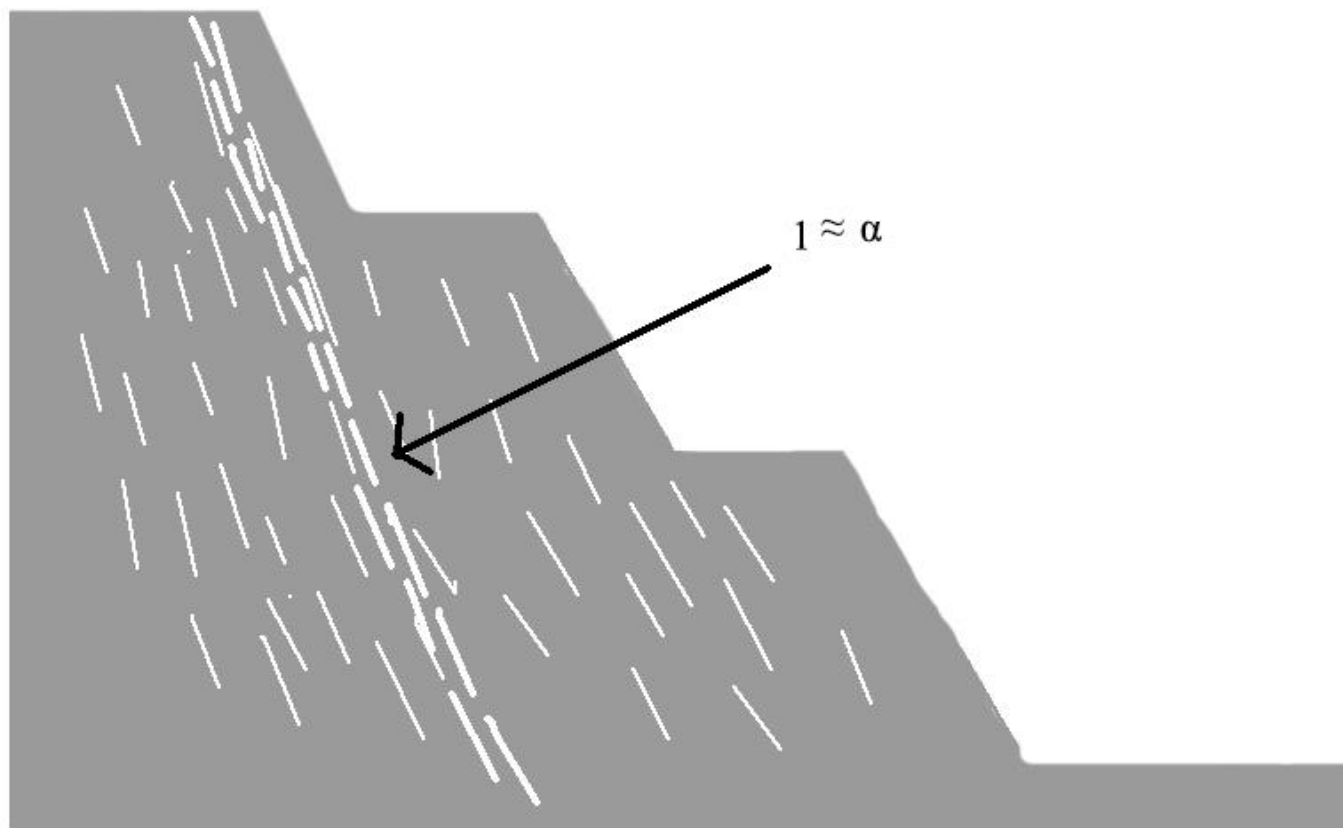
# Кулисообразное расположение трещин



# Откос где трещины не полностью соединены



Откос где последовательность трещин полностью сформирована





# Соотношение площади открытой трещины к общей площади

- Очень изменчиво
- Трещина открыта или закрытая?
- Чем заполнена?
- Истинный порозластичный коэффициент Биота для кристаллического наполнения = 0
- Рассмотрим тальк в его первоначальном состоянии, когда Биот=0
- Если состояние меняется, будет ли Биот =1
- По разному
- В трещиноватой системе этот коэффициент сильно зависит от выбранной для рассмотрения плоскости
- Нужна подходящая система картирования и интерполяции, чтобы определить отдельности и взаимосвязанность

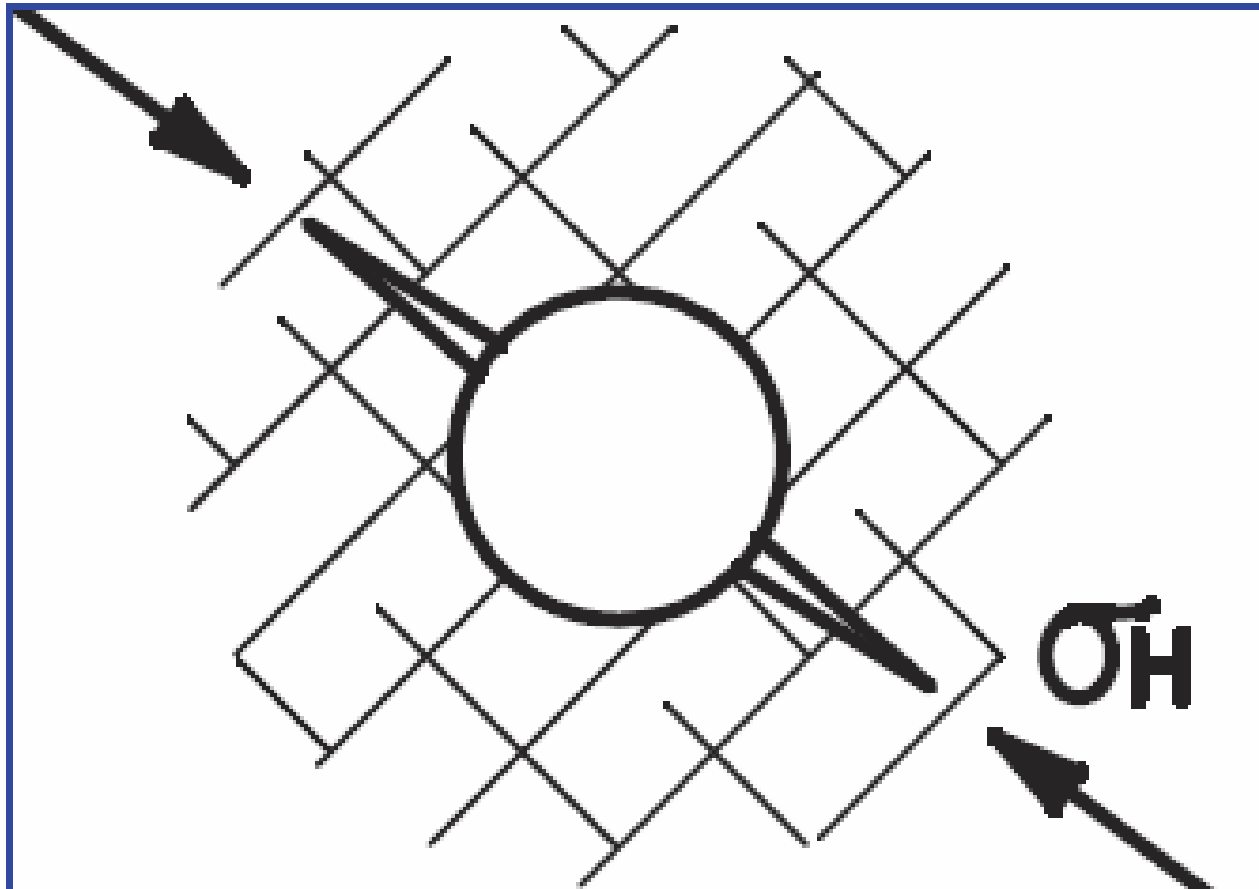
# Разрушение вызванное меняющимся истинным напряжением

Истинное напряжение изменяется вследствие изменения давления жидкости

- Изменение системы трещин ведет к изменению коэффициента площади поверхности излома
  - Фактически это означает, что трещины прогрессируют и соединяются друг с другом

# Замеры напряжений в породном массиве

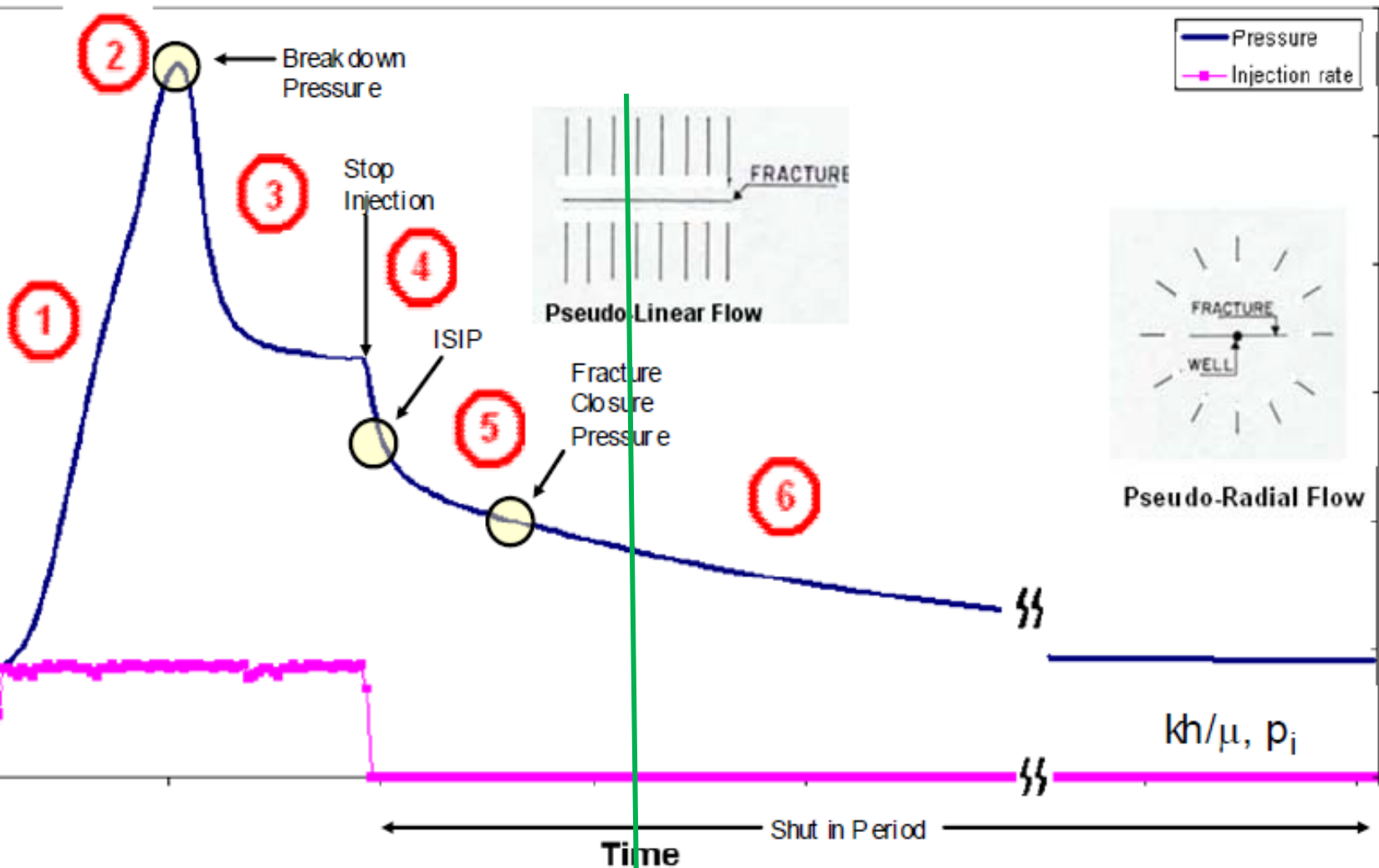
- Гидроразрыв
- Обрушение стенок скважины
- Обуривание
- Распор щели (сделана пилой)
- Восстановление квазиупругих характеристик
  - Ненадежно и трудно достижимо
- Эффект Кайзера
  - Разработан для металлов, не работает в породном массиве



# HYDROFRACTURE STRESS MEASUREMENT

# Гидроразрыв

- При малых напряжениях не совпадает с осью скважины, и это создает проблему
- Давление, распирающее скважину зависит от скорости потока
- По определению давление между пакером и стенкой скважины должно быть выше чем давление жидкости – следовательно, пакеры часто являются причиной обрушение.
- Нужна очень грамотная интерпретация

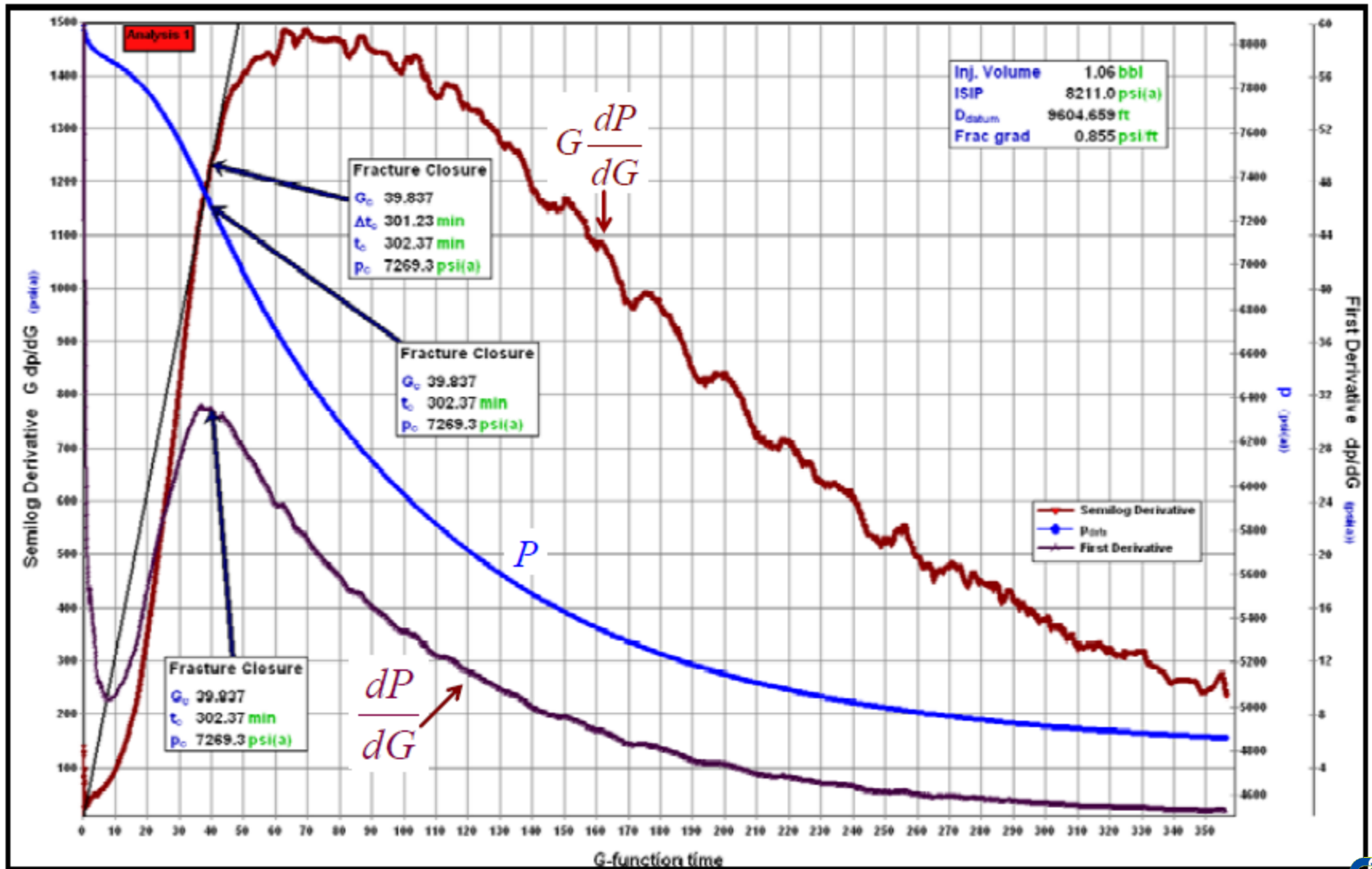


**Анализ  
ДоСмыкания  
(РСА): давление  
смыкания**

Typical DFIT pressure response

**Анализ  
После Смыкания  
(АСА):  
kh/ μ, P<sub>i</sub>**

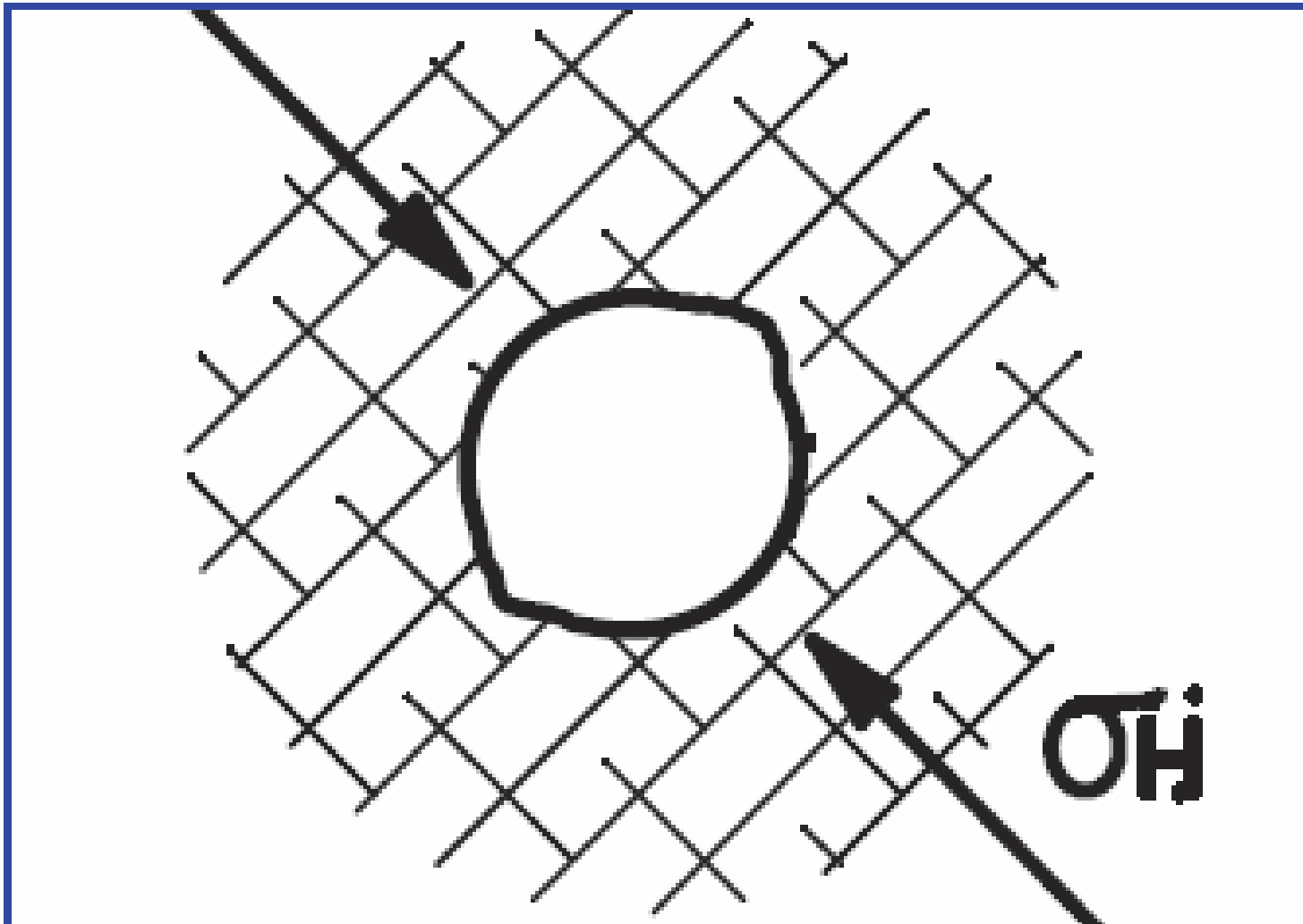
# График G-функции



# Гидроразрыв может ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ

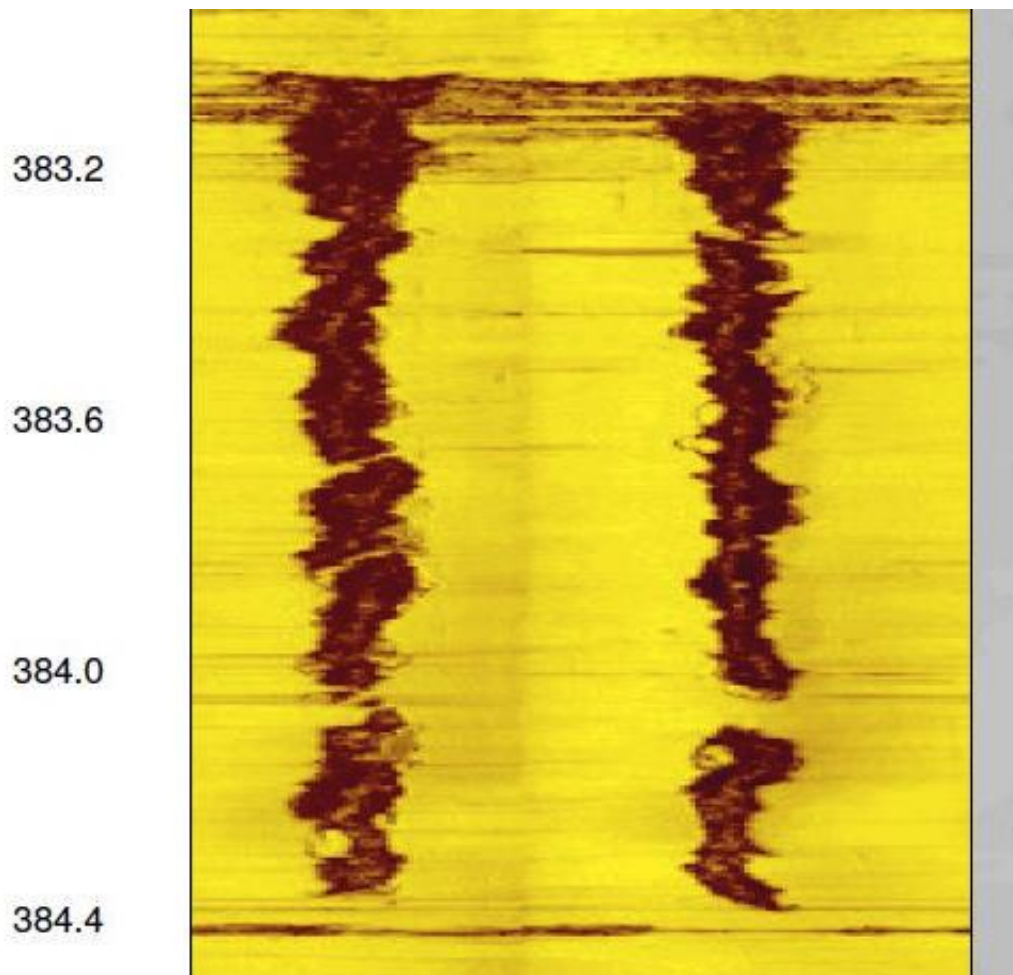
- Для определения минимального напряжения вследствие смыкания
- Как элемент опытной закачки когда фаза смыкания используется еще и для замера проницаемости/фильтрации
- Для определения давления жидкости в природном массиве когда завершается период утечек
- Для определения напряжения по нормали через трещину
- Для замера напряжения в пробуренной скважине





# BOREHOLE BREAKOUT

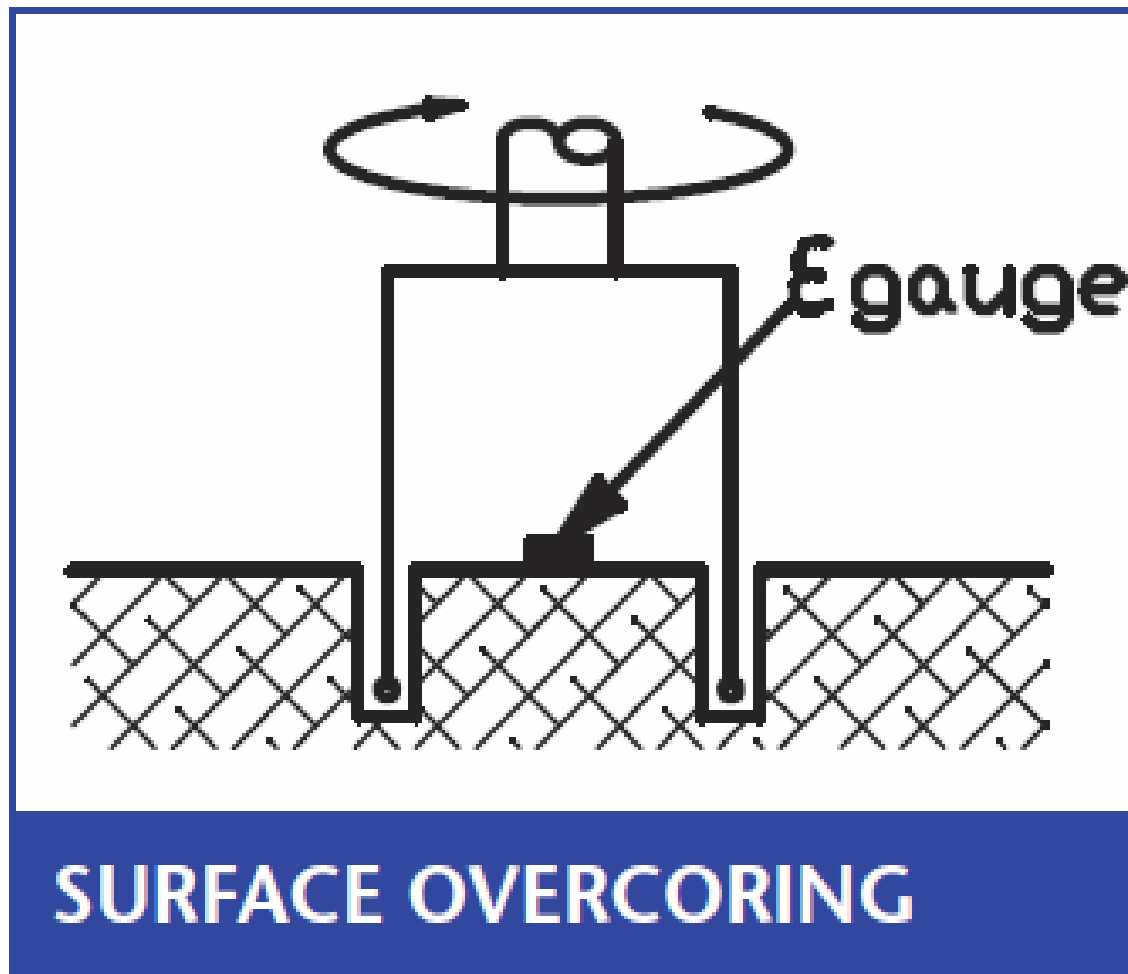
# Акустическая сканограмма обрушения



# Вывал стенок скважины

- Прежде всего индикатор направления двусосного напряжения
- Можно анализировать величину главного напряжения если известна прочность породы при одноосном сжатии (ПОС) и минимальное напряжение (вызванное смыканием при гидроразрыве)
- Соотношение между показаниями акустического каротажа и прочностью при одноосном сжатии не достаточно достоверно для количественного анализа обрушения

# Обуривание с поверхности



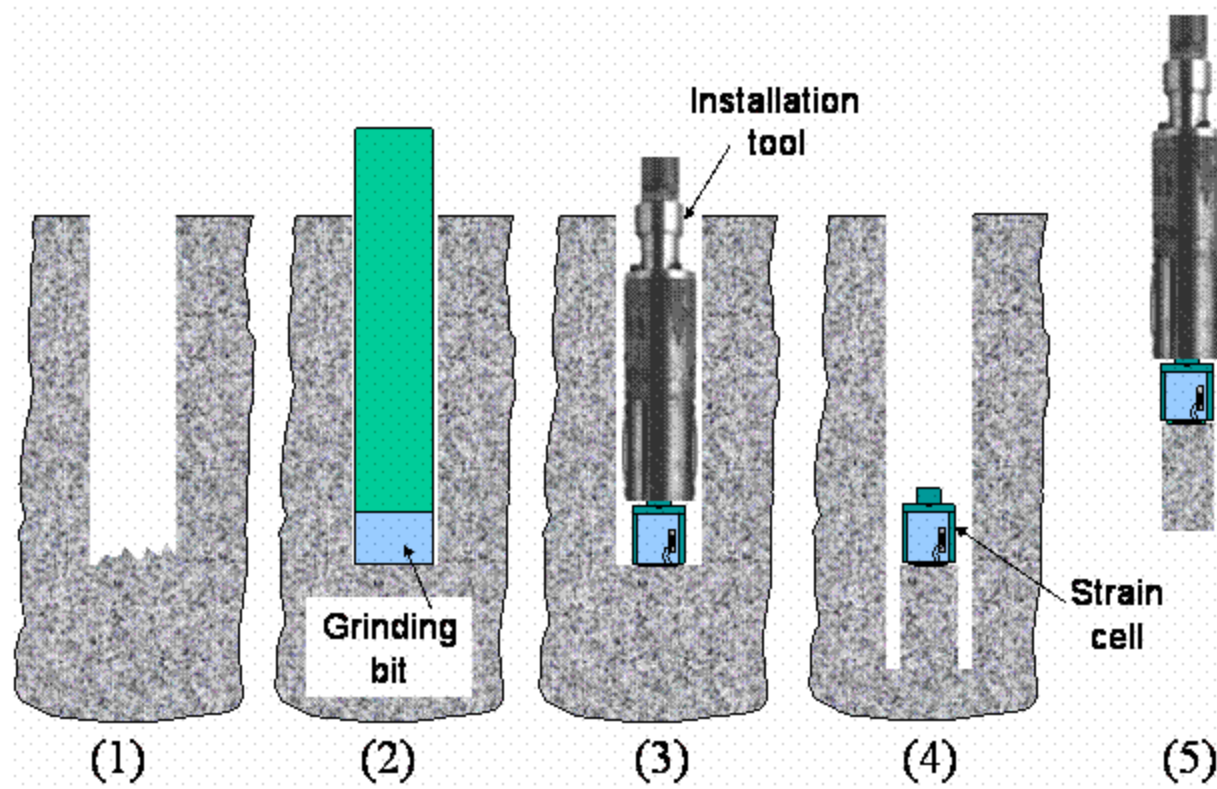
# Обуривание

- Самая удобная непрямая система
- Требуется эластичная, но не обязательно линейно эластичная реакция для анализа
- Это означает, что обрушение стенки скажины является проблемой, так как если главное напряжение составляет  $1/3 - 1/2$  от ПОС, может произойти обрушение

# Инструменты / Обуривание

- Инструменты-стикеры – ненадежны во влажных скважинах
  - Скважинный датчик похож на плоскую пробку
  - Трёхосный модуль Лимана/Leeman Triaxial Cell
  - Модуль ANZSI cell
  - Модуль CSIRO HI Cell
  - Датчик Borre
  - Конический элемент/Cone cell
- Механические инструменты
  - Датчик деформации USBM (US Bureau of Mines)
  - Инструмент Sibra IST (in-situ stress tool)

# Скважинный датчик (Doorstopper)



# CSIRO HI Cell



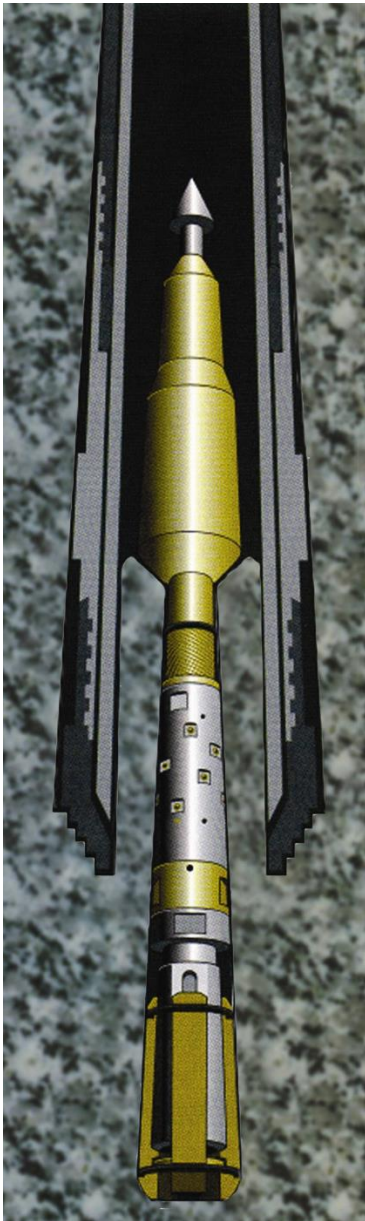


# Конический элемент Cone Cell



# Sigra IST

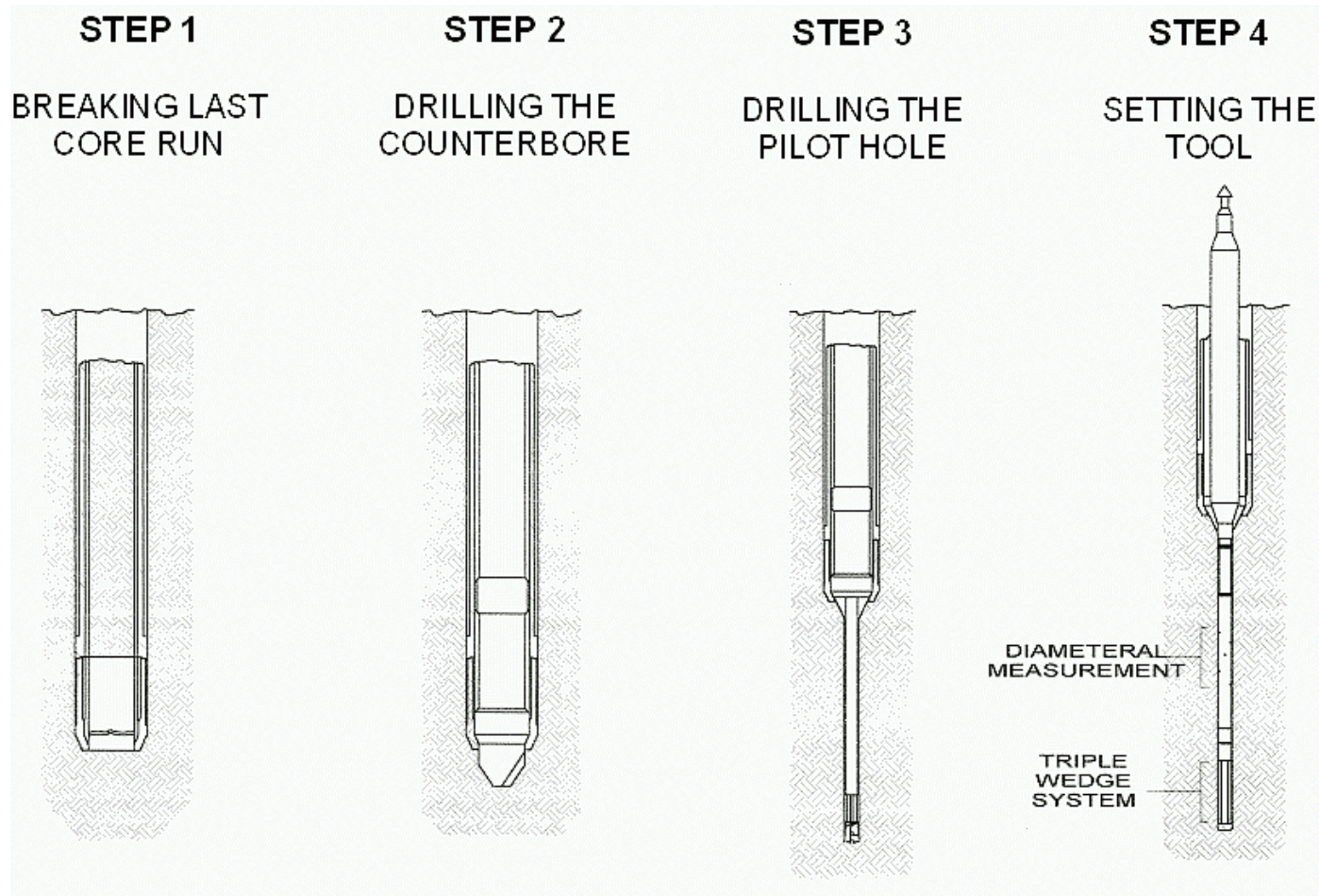
- Быстрое двухосное обуривание
  - Обуривание 100м скважины за 1 ½ часа
  - Обуривание 500м скважины за 3 часа
  - Обуривание 800м скважины за 4 часа
- Используется в основном при бурении со съёмным керноприёмником HQ
- Используется в основном в вертикальных скважинах
- Может применяться на глубинах до 1500 метров по вертикали



# Siga – инструмент для замера напряжений

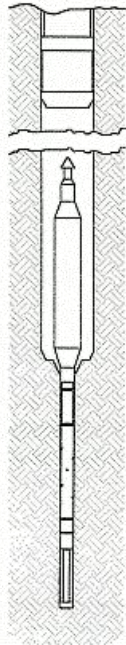


# Инструмент для замера напряжений в породном массиве

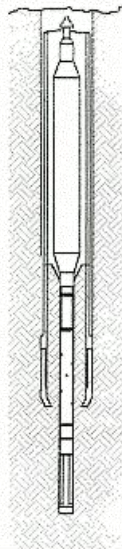


# Инструмент для замера напряжений в породном массиве

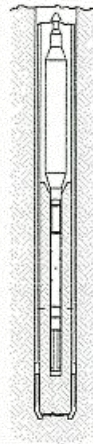
**STEP 5**  
PULLING BACK THE  
RODS FOR A  
COMPASS READING



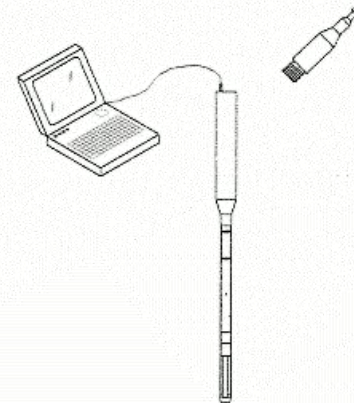
**STEP 6**  
OVERCORING



**STEP 7**  
PULLING THE CORE  
AND TOOL



**STEP 8**  
EXTRACTING THE  
DATA

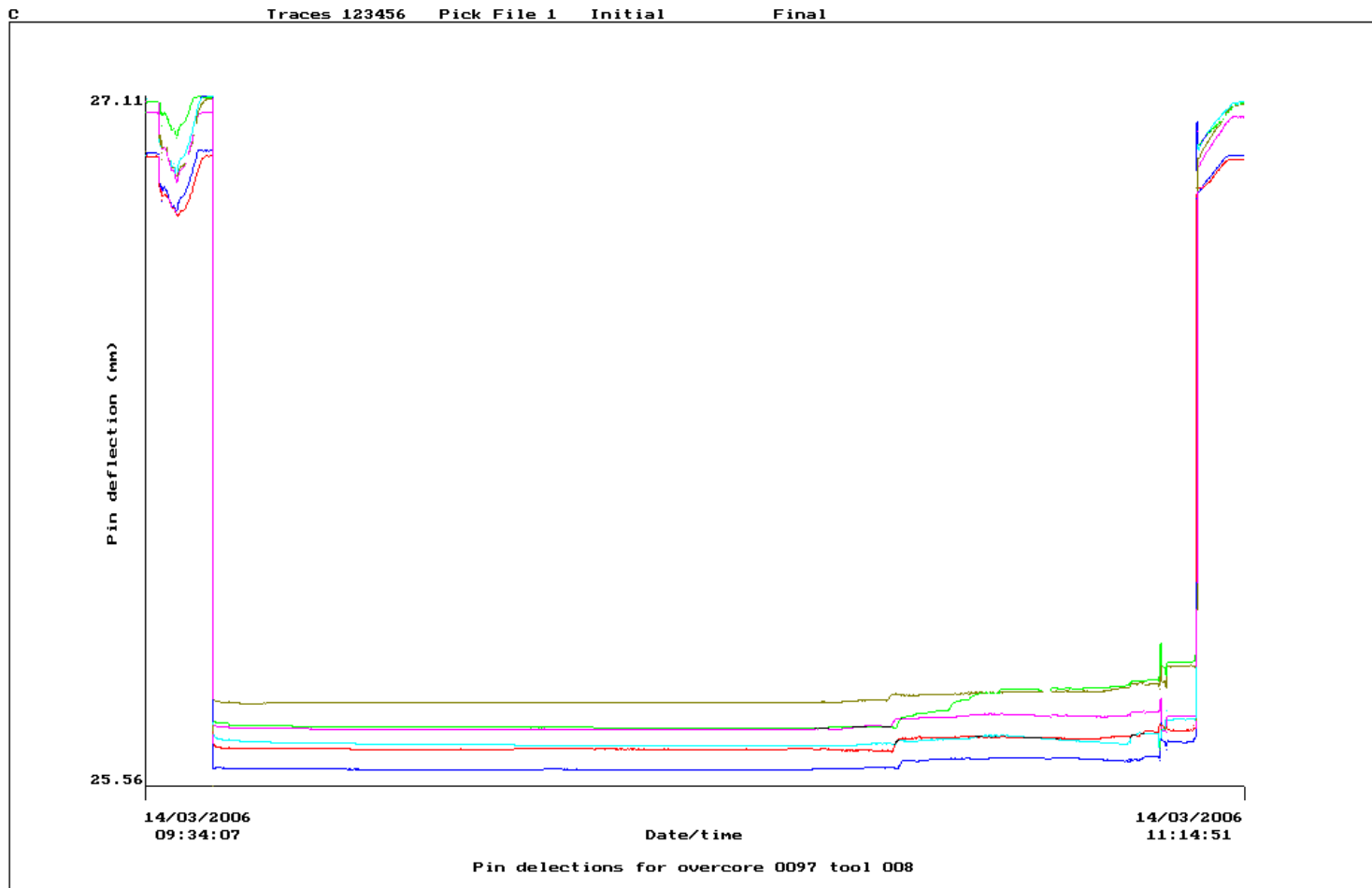




# Оборудование IST

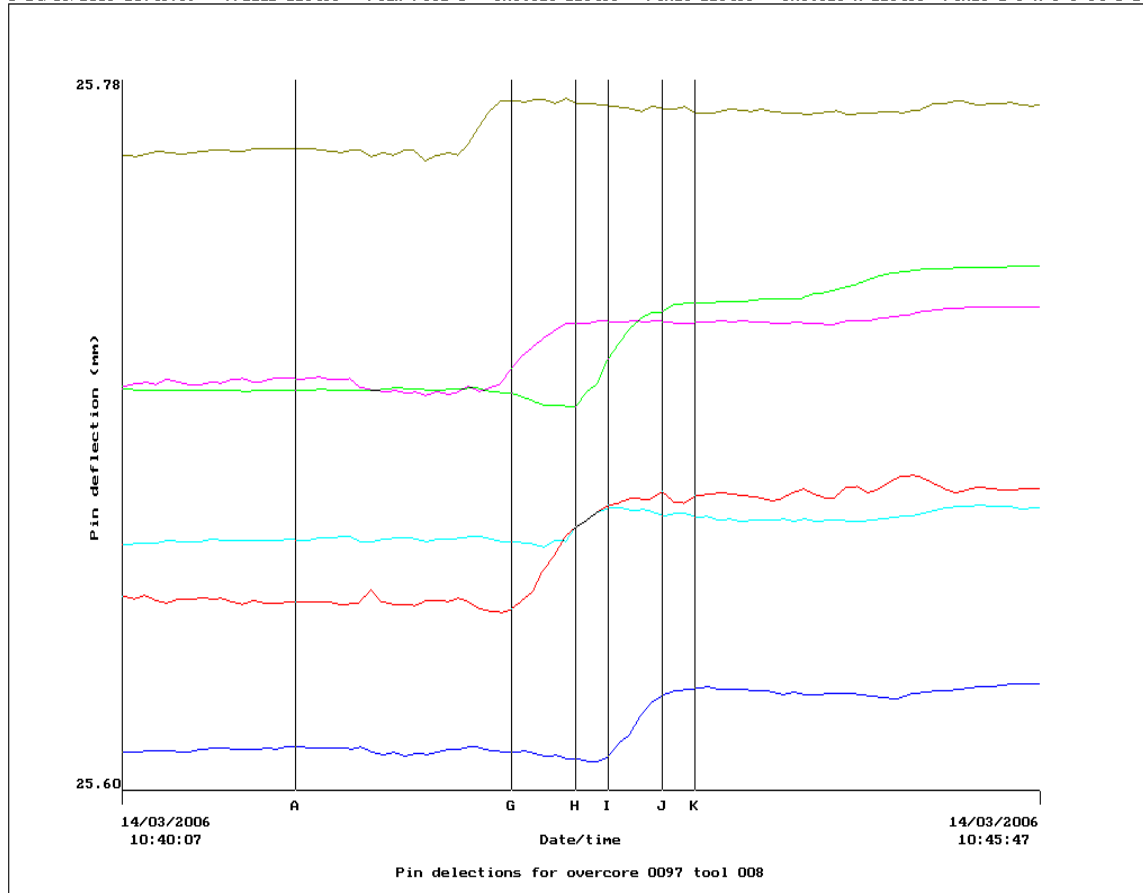


# IST – ПОЛНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ



# ІСТ – ДЕФОРМАЦІЯ ПРИ ОБУРИВАННІ

C 14/03/2006 10:43:39 Traces 123456 Pick File 0 Initial 123456 Final 123456 Initial A-123456 Final G-6 H-5 I-34 J-2 K



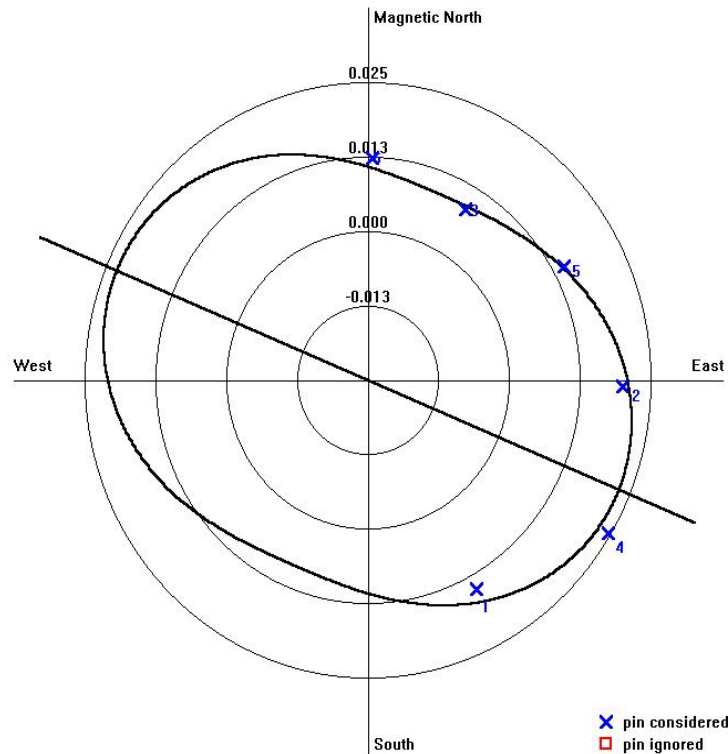


# IST РАДИАЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И НАИЛУЧШЕЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Sigra Stress Measurement  
<http://www.sigra.com.au/>  
IST-097.008  
F:\ISTDATA\SOLN0097008.TXT  
Date: 19/05/2006 09:46:14

Mag Field (nT): 57715  
Modulus (MPa): 13333  
Poisson: 0.196  
Depth (m): 264.50

STR MEAN (MPa): 4.491  
STR DEV (MPa): 0.962  
ANGLE (degrees): -67.46  
ERROR (%): 5.2846  
CASE: 1



# Возможные комбинации

- 1 x 6 пар контактный штырьков
- 6 x 5 пар контактный штырьков
- 15 x 4 пар контактный штырьков
- 20 x 3 пар контактный штырьков – не используем, т.к. нет возможности проконтролировать
- Можно работать с незначительными обрушениями или трещинами – просто не обращать внимания на показания штырьков

CLIENT: BELVEDERE

HOLE #: BD144

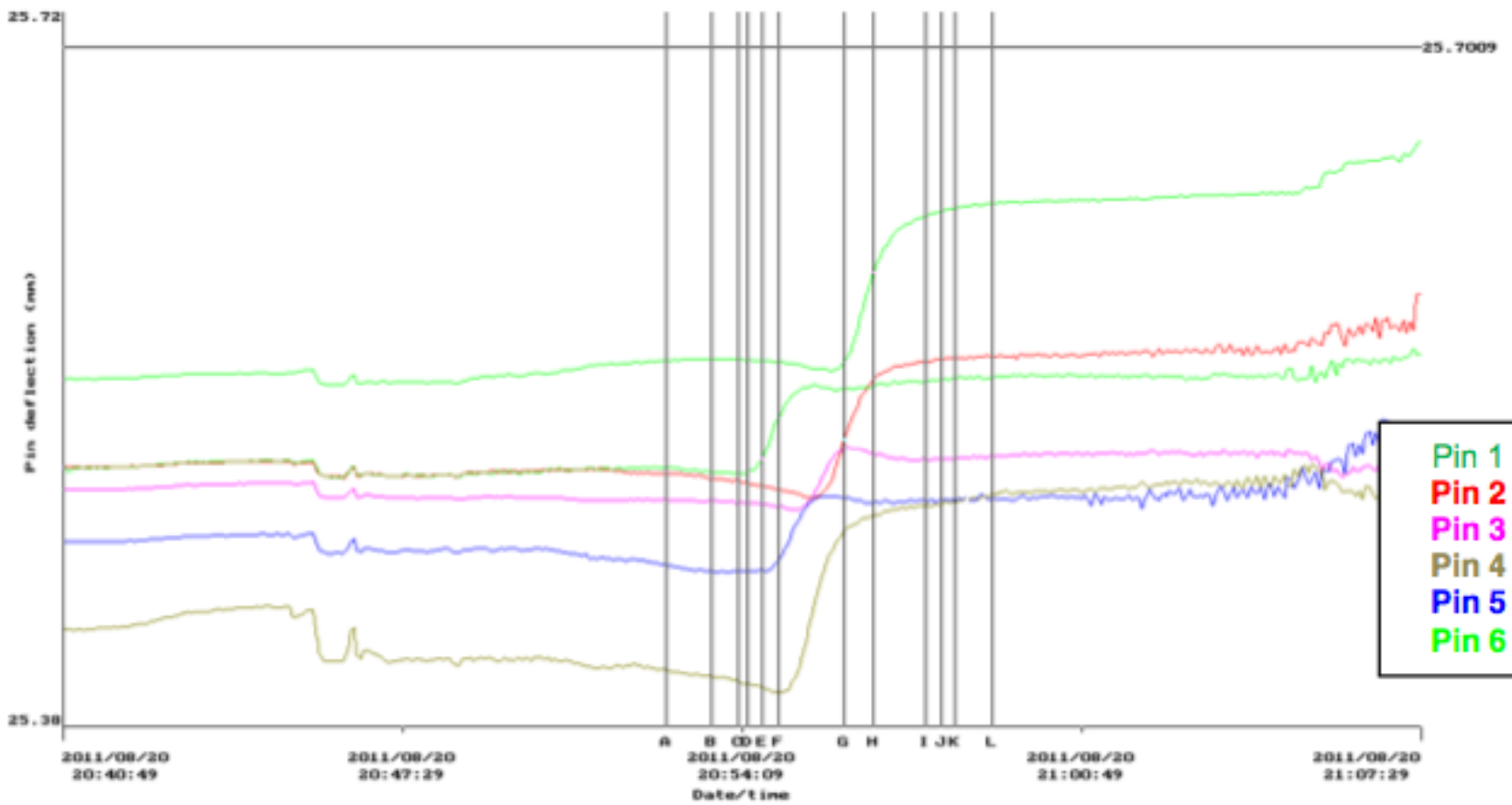
SEAM: E ROOF

DATE: 20-08-2011

DEPTH: 709.13

RUN #: 123.029

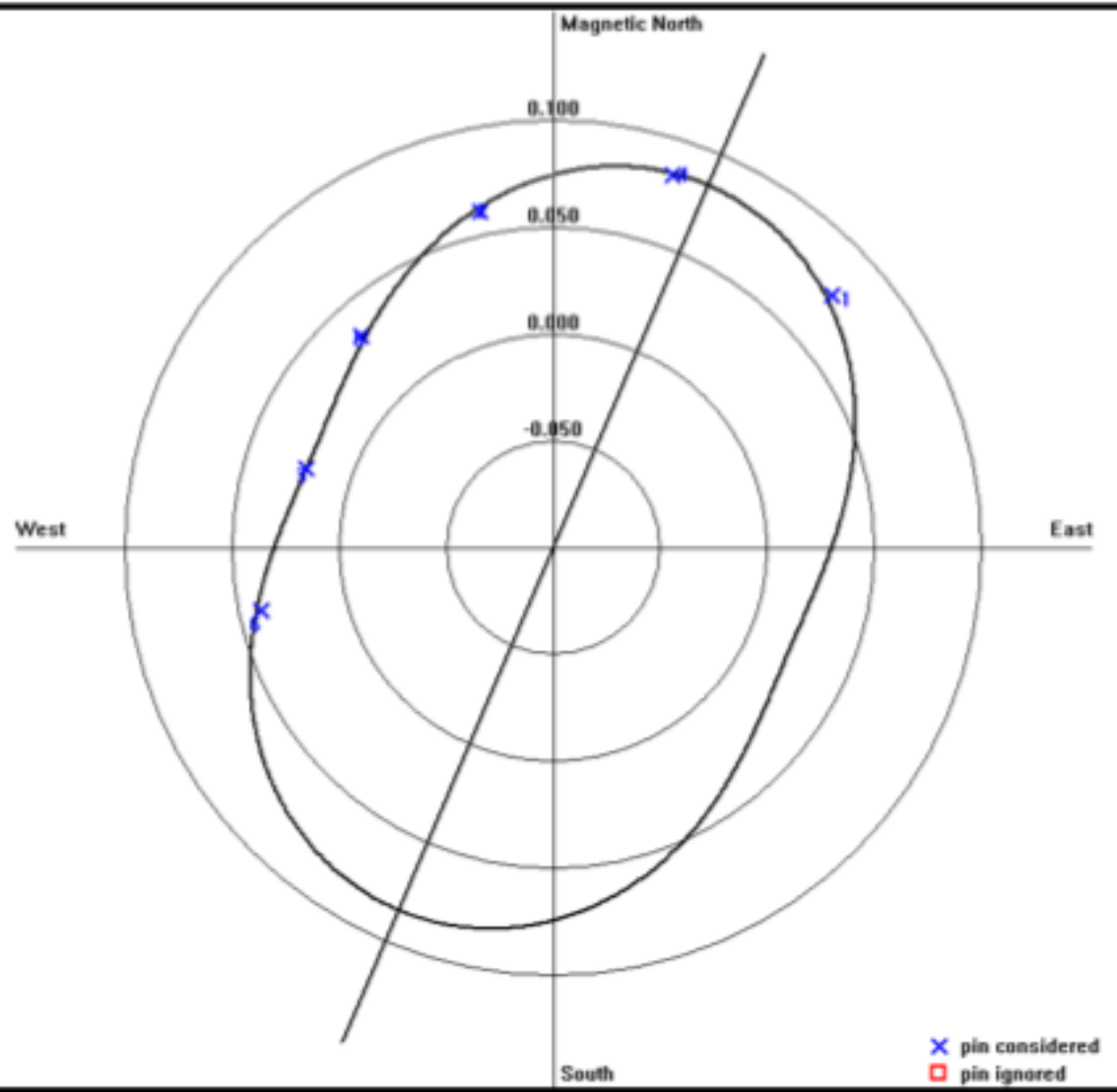
20/08/2011 21:31



Sigra Stress Measurement  
<http://www.sigra.com.au/>  
BD144  
E:\STRESS\JOBS\260\BD144\SOLN0124029.TXT  
Date: 20/10/2011 10:55:16

Mag Field [nT]: 54158  
Modulus [MPa]: 15003  
Poisson: 0.138  
Depth [m]: 709.13

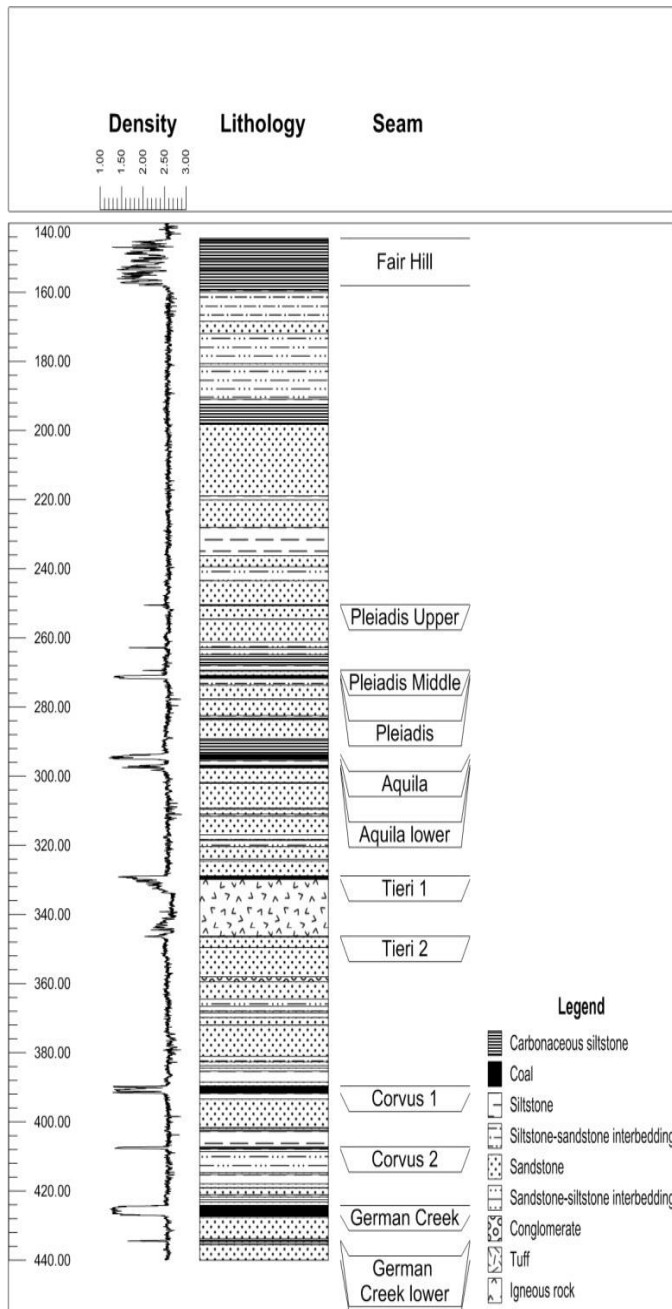
STRESS MEAN [MPa]: 16.02  
STRESS DEV [MPa]: 4.803  
MAJOR TECTONIC STRAIN: 1.18e-003  
MINOR TECTONIC STRAIN: 4.56e-004  
ANGLE [degrees]: 23.08  
ERROR  $\beta$ : 1.846  
CASE: 1



<b>Hole Reference</b>	BD144
<b>Sigra In-situ Stress Test (IST) Reference</b>	124.029
<b>Date of Test</b>	20 Aug 2011
<b>Material Description</b>	Sandstone
<b>Depth of Run</b>	709.13 m
<b>Young's Modulus</b>	15,083 MPa
<b>Poisson's Ratio</b>	0.14
<b>Unconfined Compressive Strength, UCS</b>	74.60 MPa
<b>Mean Effective Stress</b>	16.02 MPa
<b>Deviatoric Stress</b>	4.80 MPa
<b>Angle of Principal Effective Stress</b>	23.08 Degrees from Magnetic North
<b>RMS Error</b>	1.80 %
<b>Maximum Principal Effective Stress</b>	20.82 MPa
<b>Minimum Principal Effective Stress</b>	11.22 MPa
<b>Ratio of Maximum Effective Stress over UCS</b>	0.28
<b>Horizontal Effective Stress due to Self-weight</b>	1.70 MPa
<b>Maximum Tectonic Stress</b>	19.12 MPa
<b>Minimum Tectonic Stress</b>	9.51 MPa
<b>Maximum Tectonic Strain</b>	1.18E-03
<b>Minimum Tectonic Strain</b>	4.56E-04

# Используется в разных типах пород

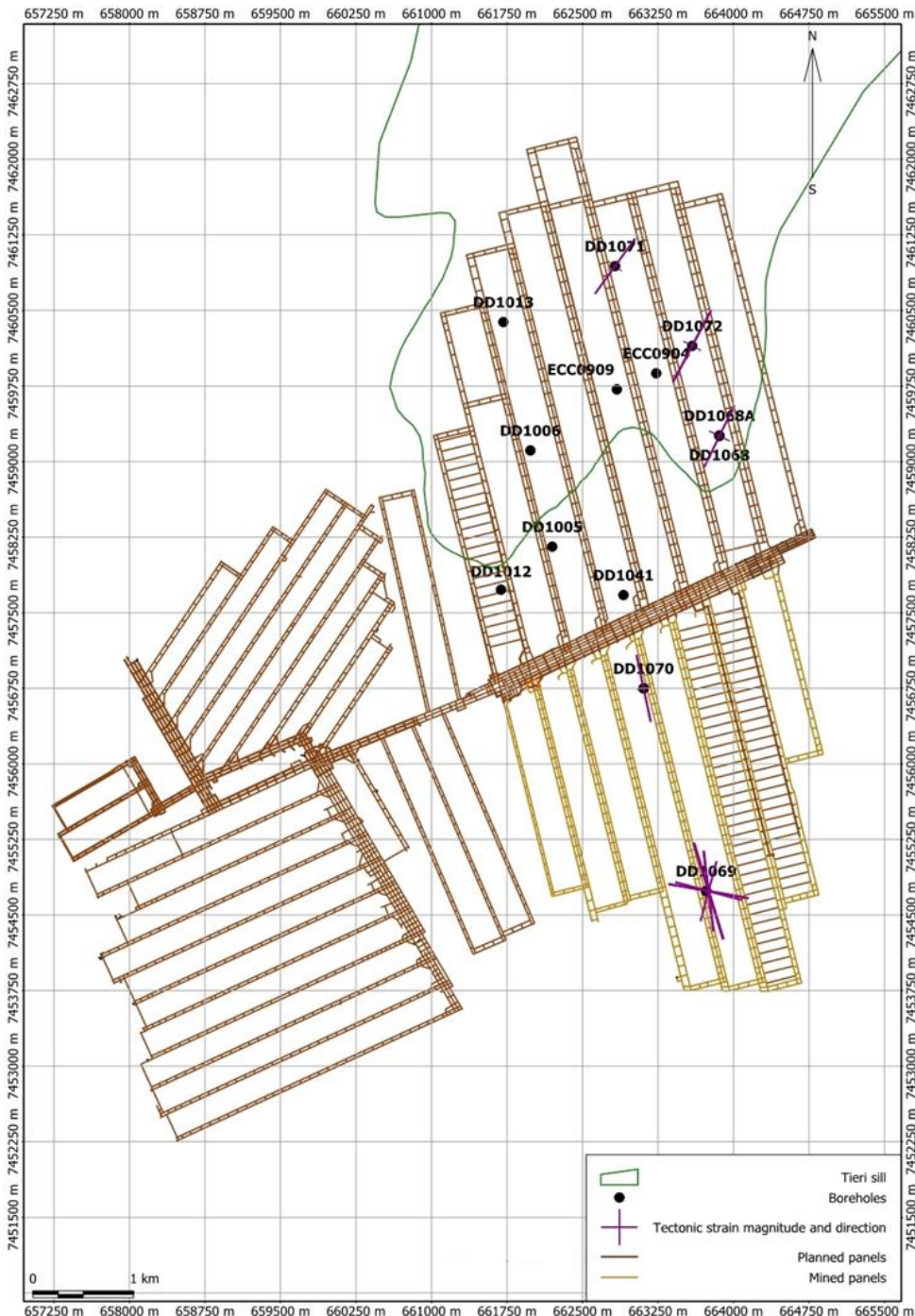
- Очень неустойчивые породы, ПОС 4 МПа – шахта Crinum
- Очень прочные породы ПОС 280 МПа и жесткость 80 Гпа - водоспускное сооружение дамбы Burdekin Falls



Осадочная свита  
шахты Grasstree  
- угольный пласт  
German Creek.  
Первоначально  
отработка  
велась под  
пластом Aquila

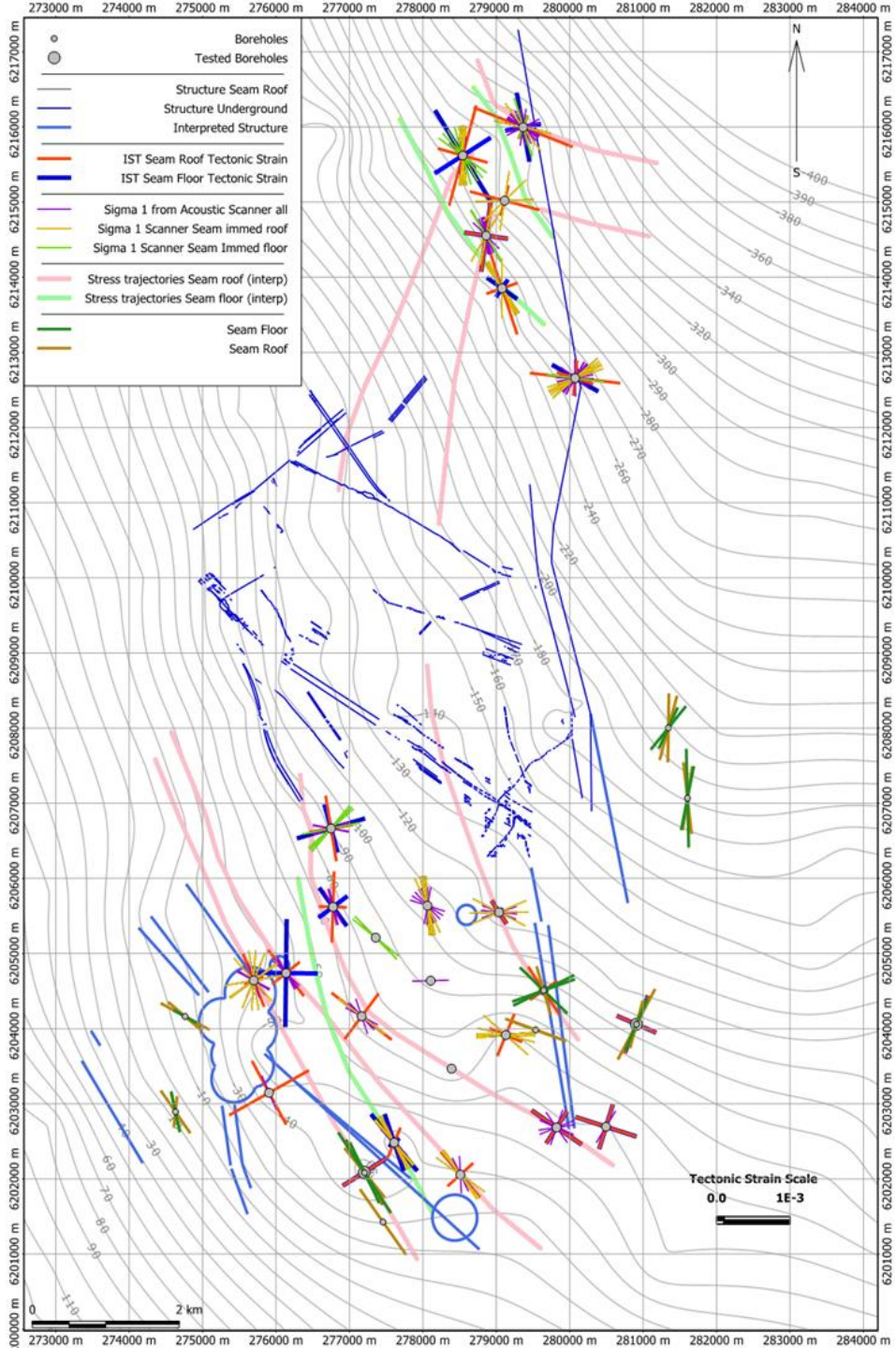


Шахта  
Grasstree:  
тектоническая  
деформация на  
неотработанном  
участке севернее  
и выше  
отработанного  
массива, где  
напряжения и  
лавы имеют  
одинаковое  
направление



# Шахта Grasstree - выводы

- На неотработанных участках равномерная тектоническая деформация через всю свиту
- Подобные вероятные тектонические деформации на расстоянии 120 м над отработанным пространством пласта German Creek, только в другом направлении
- Средний столб – соосный с лавой
- Верхняя часть целиков – по разному



# Промплощадка Illawarra: изменение интенсивности и направления напряжений

# Промплощадка Ilawarra

- Изначальное направление напряжений СВ-ЮЗ
- Очень сложный характер распределения напряжений
  - Для понимания необходимы **IST**, разрушение стенки скважины и сейсмический каротаж
- Направления главных напряжений поворачиваются до 90 градусов
  - Вследствие наличия сбросов по простиранию и взбросов которые ослабляют напряжения
  - Частые взбросы являются причиной внутрипластовых сдвигов