



# Свойства горных пород

Eurock 2018

24 May 2018

Ian Gray

[ian@sigra.com.au](mailto:ian@sigra.com.au)

[www.sigra.com.au](http://www.sigra.com.au)

# Анализ механики горных пород

Исходя из **Based on limit(of failure) state design**

– скольжение, опрокид, и т.д

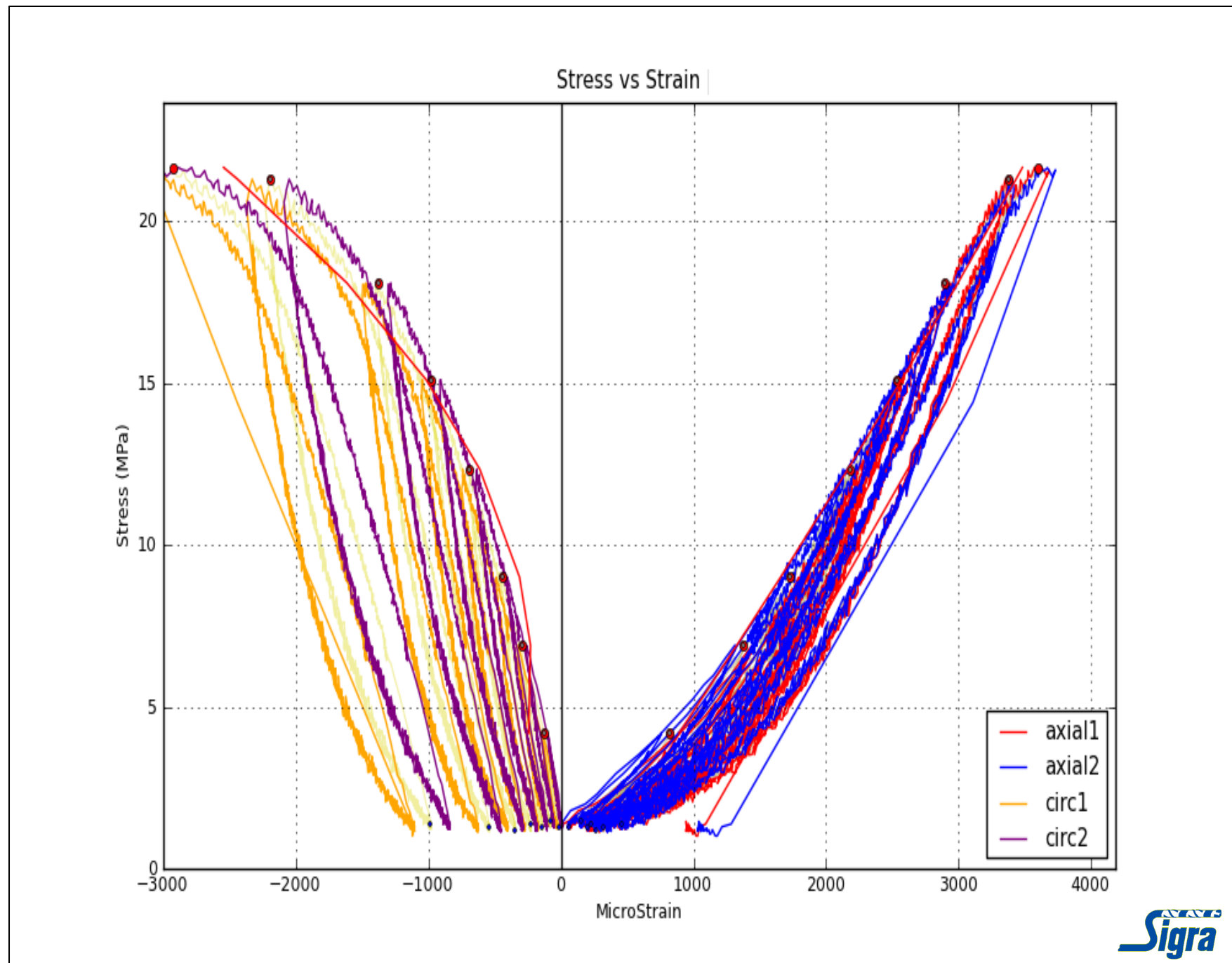
По результатам анализа эластичности – с поправками на обрушение

Большинство аналитических работ - числовые модели  
- нужны реальные свойства горных пород

Какие свойства горных пород обычно используются в числовых моделях?

- Изотропия
- Линейная эластичность
- Обрушение по Мор-Кулону или критерий обрушения Ноек-Brown
- Фрикционное скольжение после обрушения

Циклические  
одноосные  
испытания  
для обычных  
слабых  
песчаников  
нелинейный  
Проявляет  
постоянную  
деформацию



# Реальная порода обладает комплексными свойствами

- ИДЕАЛЬНАЯ модель предназначена для крепких кристаллических пород
- Много видов пород обладают гораздо более сложными свойствами
- Эластичная нелинейность
- Анизотропия
- Прогрессирующая потеря сцепления по мере разрушения
- Прогрессирующее нарастание сцепления если деформация прекращается
- Давление жидкости **effects** может быть пороэластичным или связано с трещинами
- Усадка или вспучивание с потерей/адсорбцией воды или газа

# Общее уравнение деформации в эластичном теле

- $\{\varepsilon_{ij}\} = [C_{ijkl}]\{\sigma_{kl}\}$
- $C_{ijkl}$  - 36 условий матрицы соответствия
- Благодаря симметрии их число сводится к 21
- Моделировать такие характеристики как расширение или сжатие – последовательностью линейных эластичных шагов
- И все равно очень трудно измерить 21 параметр и умножить на разнообразие напряженных состояний

Ортотропическое упрощение поведения материала – симметрическая матрица где 9  
 неизвестных

$$\bullet \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

Допуски и наблюдаемые параметры могут найти неизвестные в матрице соответствия

- Найдите в приведенном примере ось симметрии

- $\frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j}$  - из симметрии -

- $v_{ij}v_{ji} = v_a^2$

- $v_{ji} = \sqrt{\frac{E_j}{E_i}} v_a$



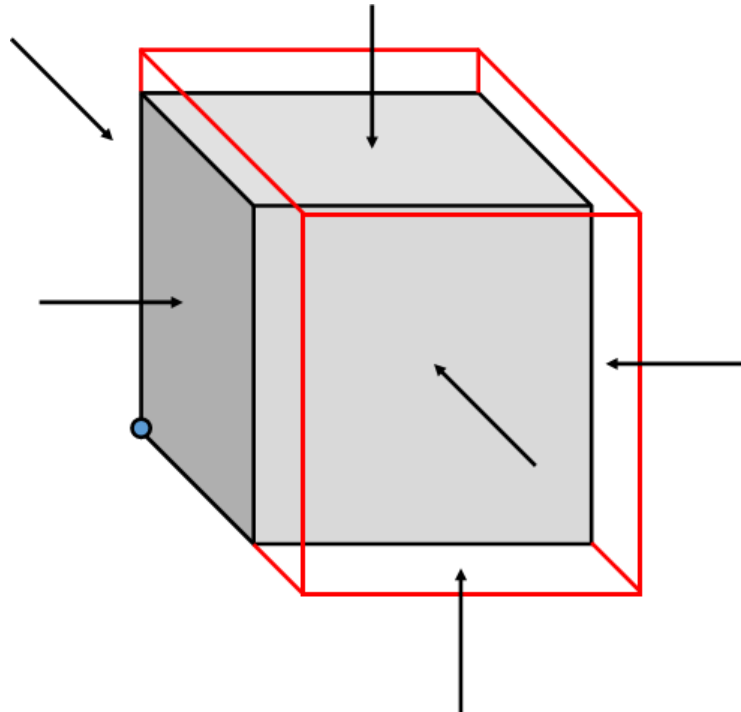
# Решение для ортотропического эластического свойства

- $$\Delta \varepsilon_{ii} = \frac{1}{E_i} \Delta \sigma_{ii} - \frac{\nu_{ji}}{E_j} \Delta \sigma_{jj} - \frac{\nu_{ki}}{E_k} \Delta \sigma_{kk}$$

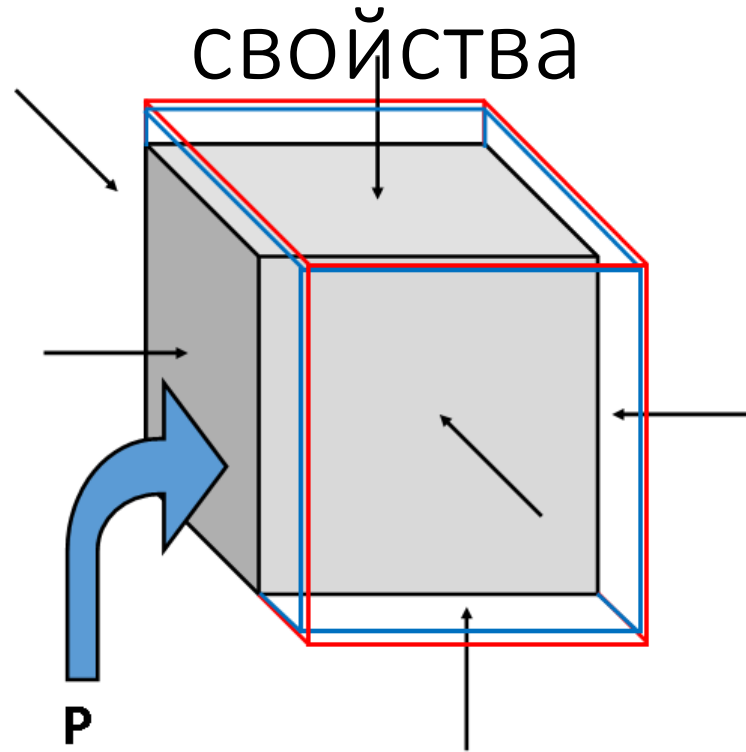
- $$E_i = \frac{1}{\Delta \varepsilon_{ii}} (\Delta \sigma_{ii} - \nu_{ij} \Delta \sigma_{jj} - \nu_{ik} \Delta \sigma_{kk})$$

- $$residual = fn(E_i) = \frac{1}{\Delta \varepsilon_{ii}} \left( \Delta \sigma_{ii} - \sqrt{\frac{E_i}{E_j}} \nu_a \Delta \sigma_{jj} - \sqrt{\frac{E_i}{E_k}} \nu_a \Delta \sigma_{kk} \right) - E_i$$

# Деформация под воздействием удельного напряжения



# Восстановление под воздействием удельного давления жидкости. Пороэластические свойства



# Решение для порозэластического поведения

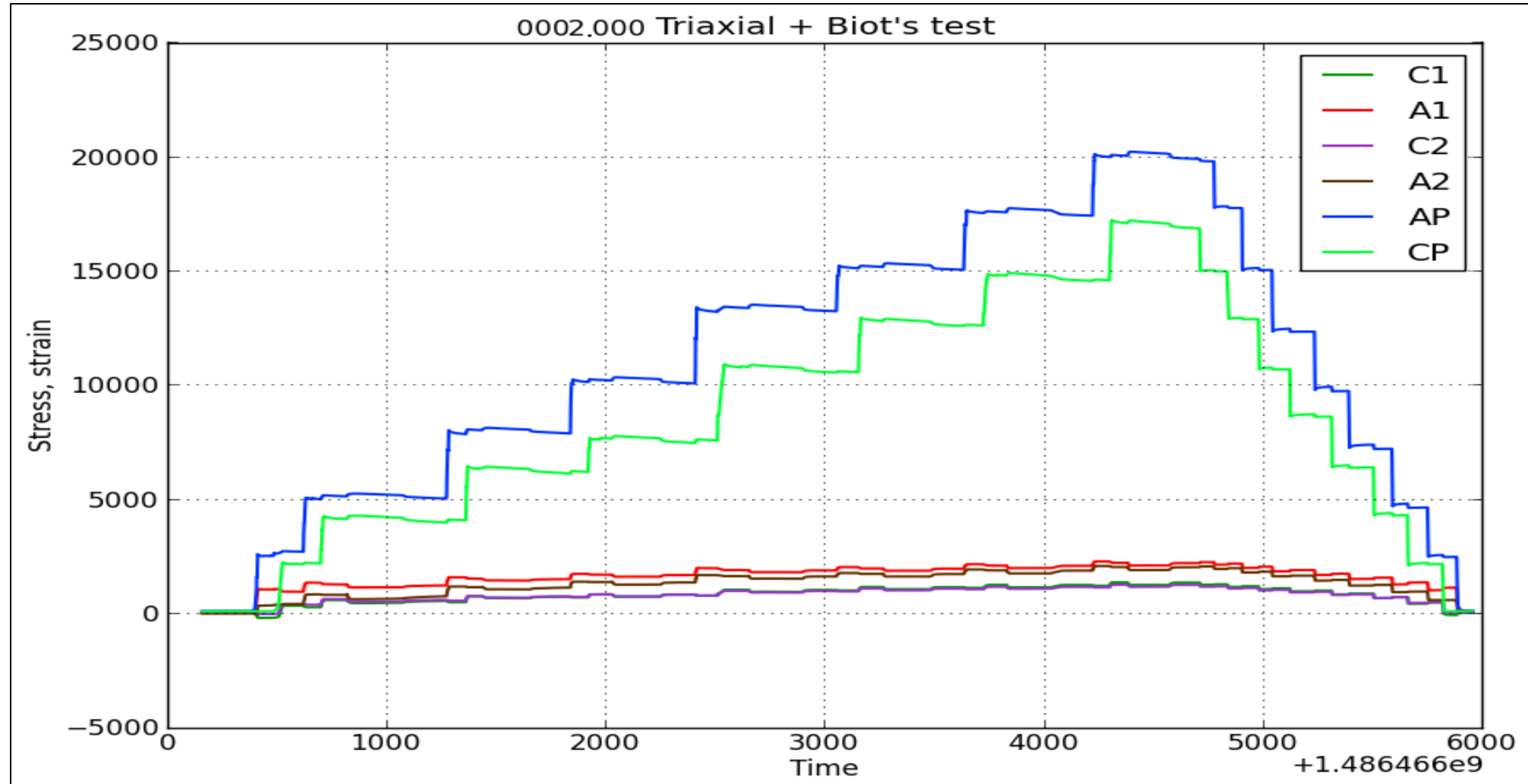
$$\bullet \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left( \frac{1}{E_1} \Delta\sigma_{11} - \frac{\nu_{21}}{E_2} \Delta\sigma_{22} - \frac{\nu_{31}}{E_3} \Delta\sigma_{33} - \Delta\varepsilon_{11} \right) / \Delta P \\ \left( -\frac{\nu_{12}}{E_1} \Delta\sigma_{11} + \frac{1}{E_2} \Delta\sigma_{22} - \frac{\nu_{32}}{E_3} \Delta\sigma_{33} - \Delta\varepsilon_{22} \right) / \Delta P \\ \left( -\frac{\nu_{13}}{E_1} \Delta\sigma_{11} - \frac{\nu_{23}}{E_2} \Delta\sigma_{22} + \frac{1}{E_3} \Delta\sigma_{33} - \Delta\varepsilon_{33} \right) / \Delta P \end{Bmatrix}$$

Мелкозернистый  
алевропесчаник  
подготовлен к  
трехосному  
испытанию



# Последовательные аксиальные и радиальные нагрузки, деформация, циклы вытеснения газом

## газом

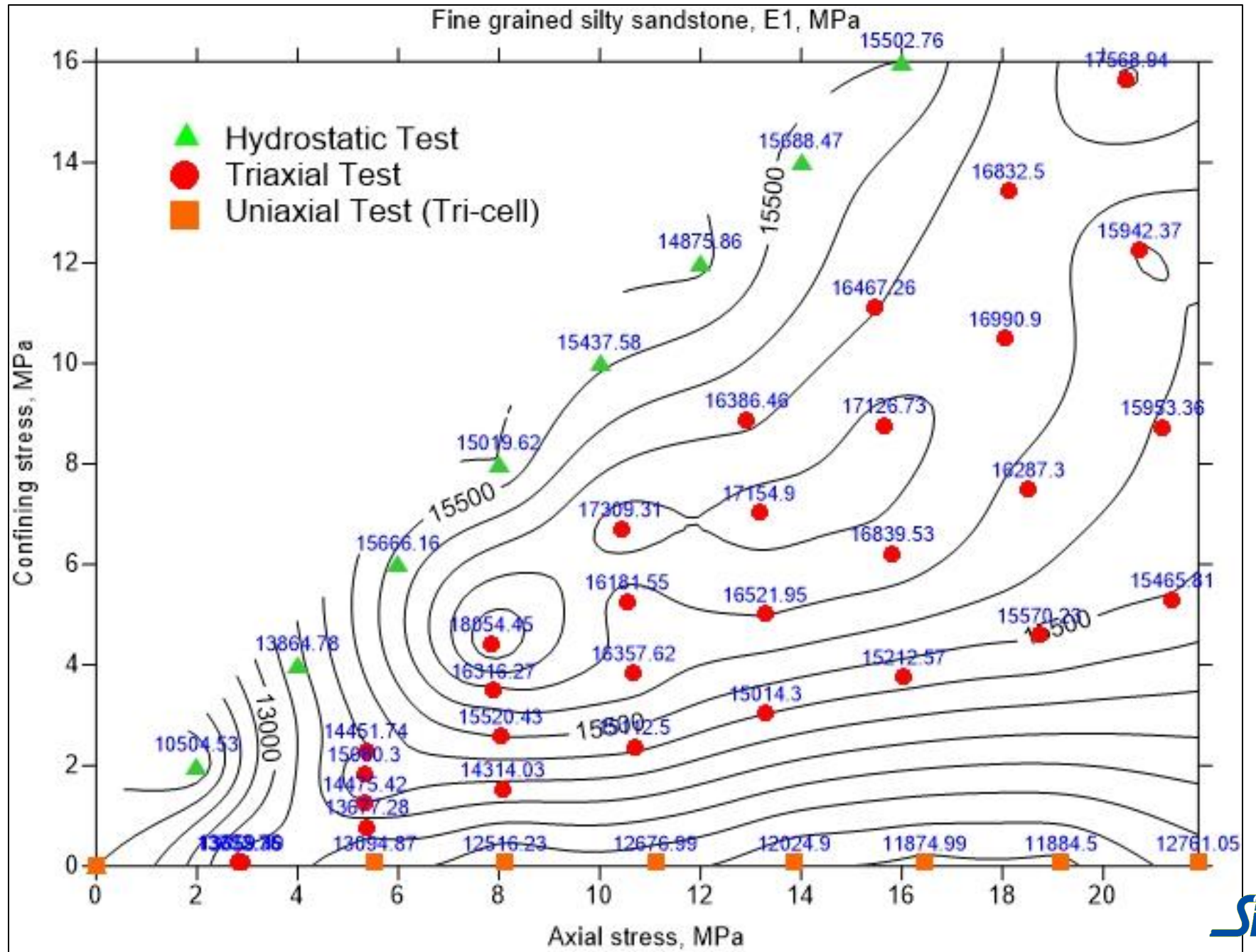


Гидростатиче  
ские  
испытания:  
филлитовый  
образец в  
силиконовой  
смоле



# Мелкозернистый алевропесчаник

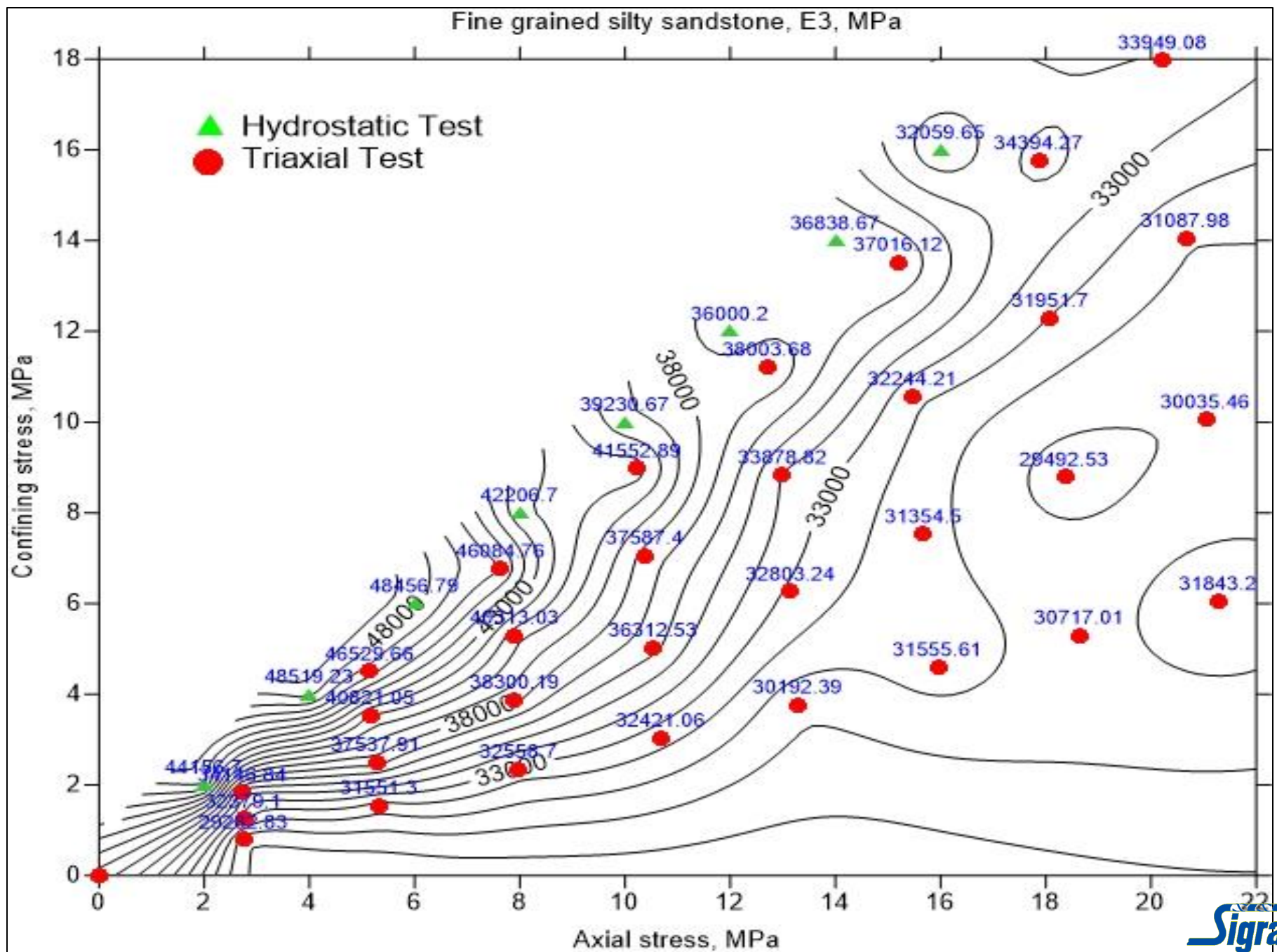
$E_1$





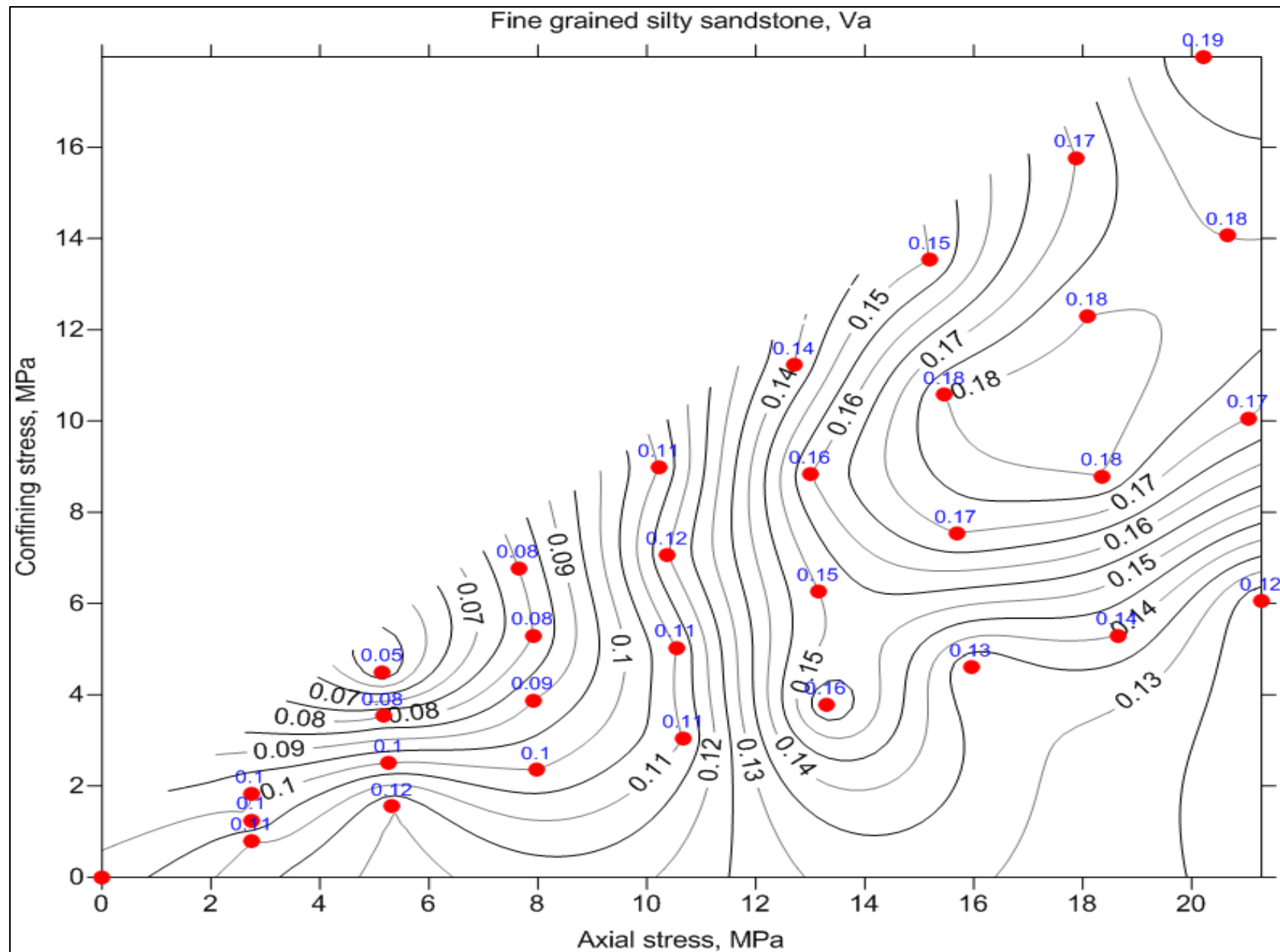
Мелкозернистый алевропесчаник

$E_3$



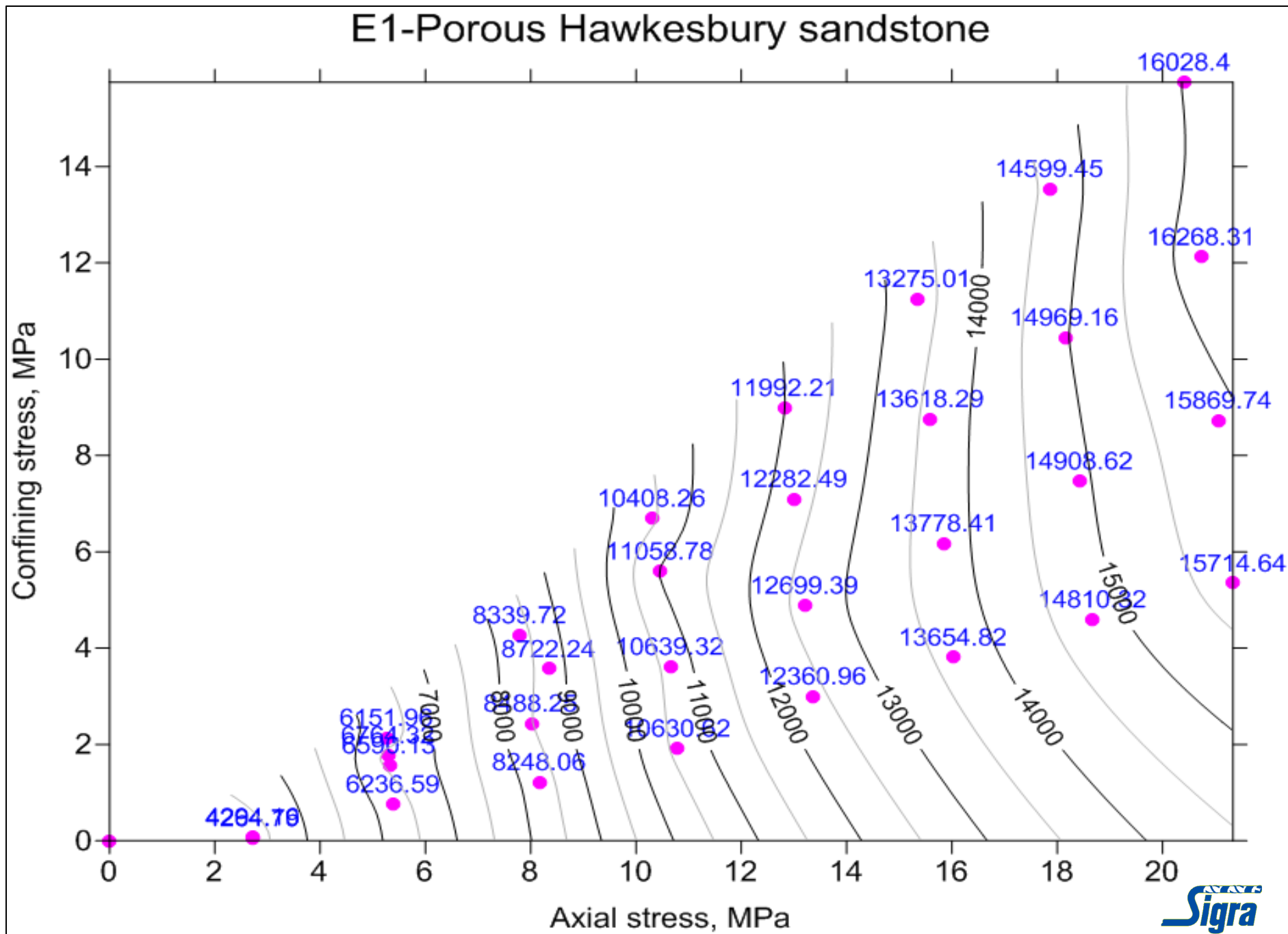
# Мелкозернистый алевропесчаник

$V_a$



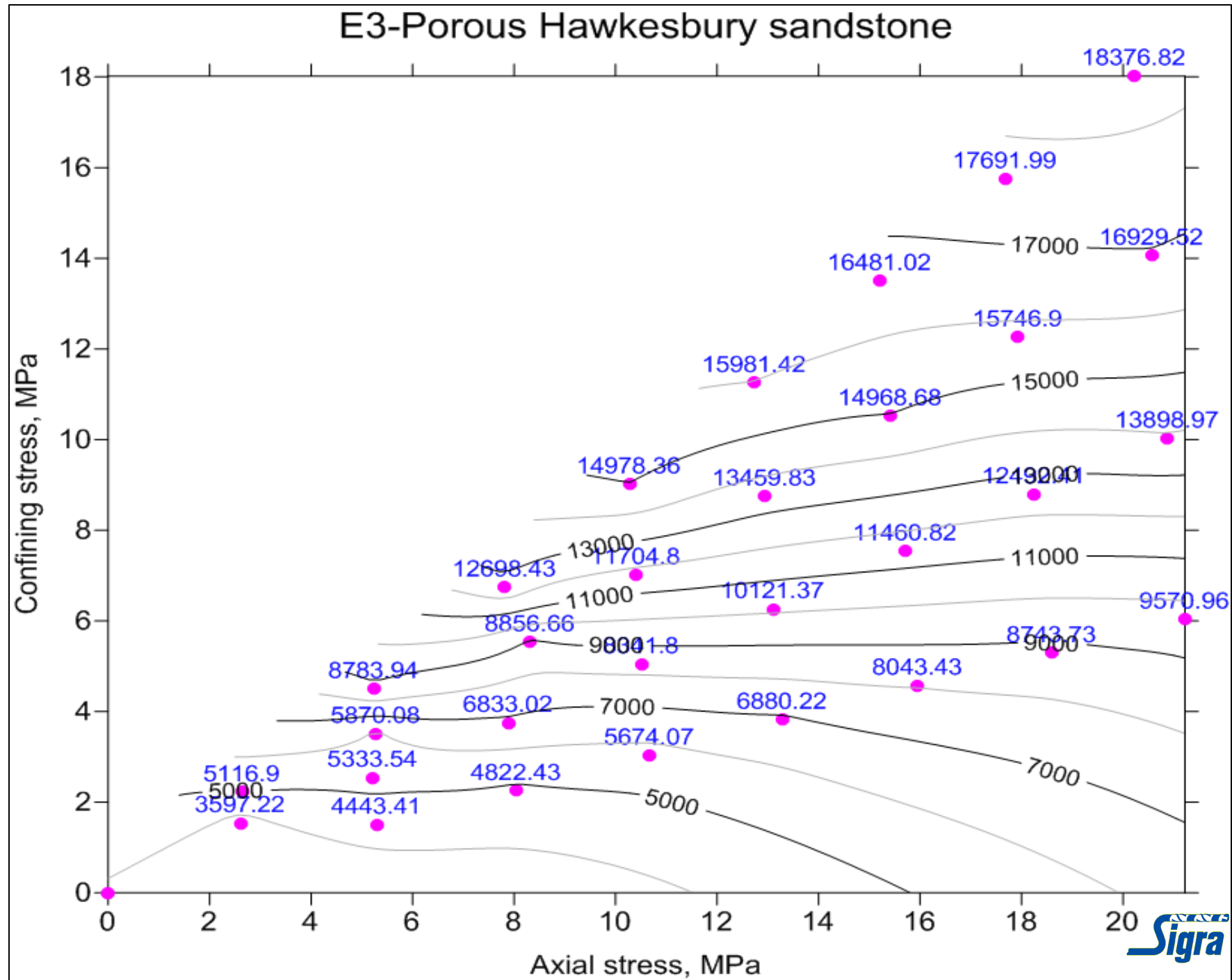
# Пористый песчаник Hawkesbury

$E_1$



# Пористый песчаник Hawkesbury

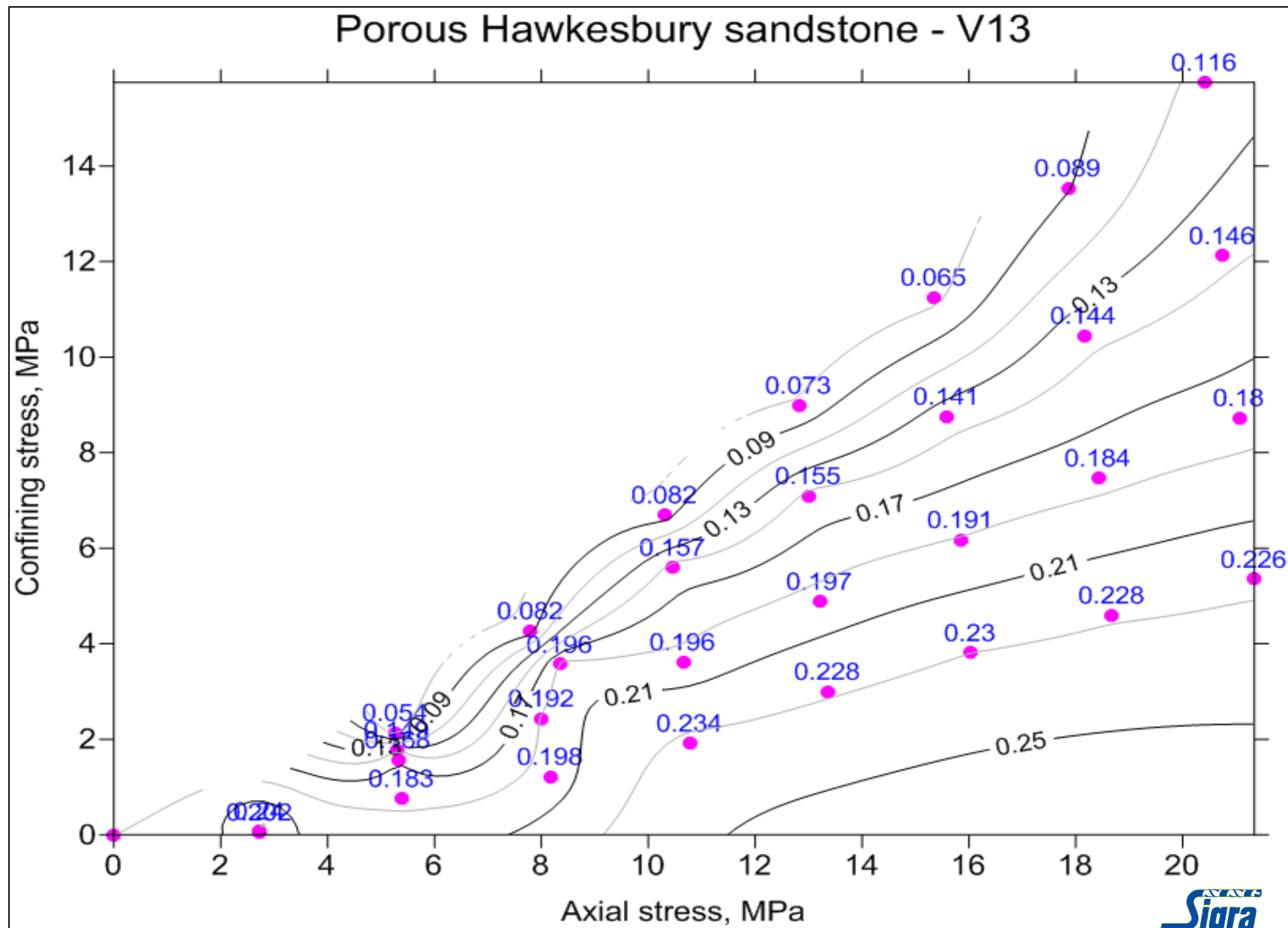
$E_3$



Пористый  
песчаник  
Hawkesbury

число  
Пуассона

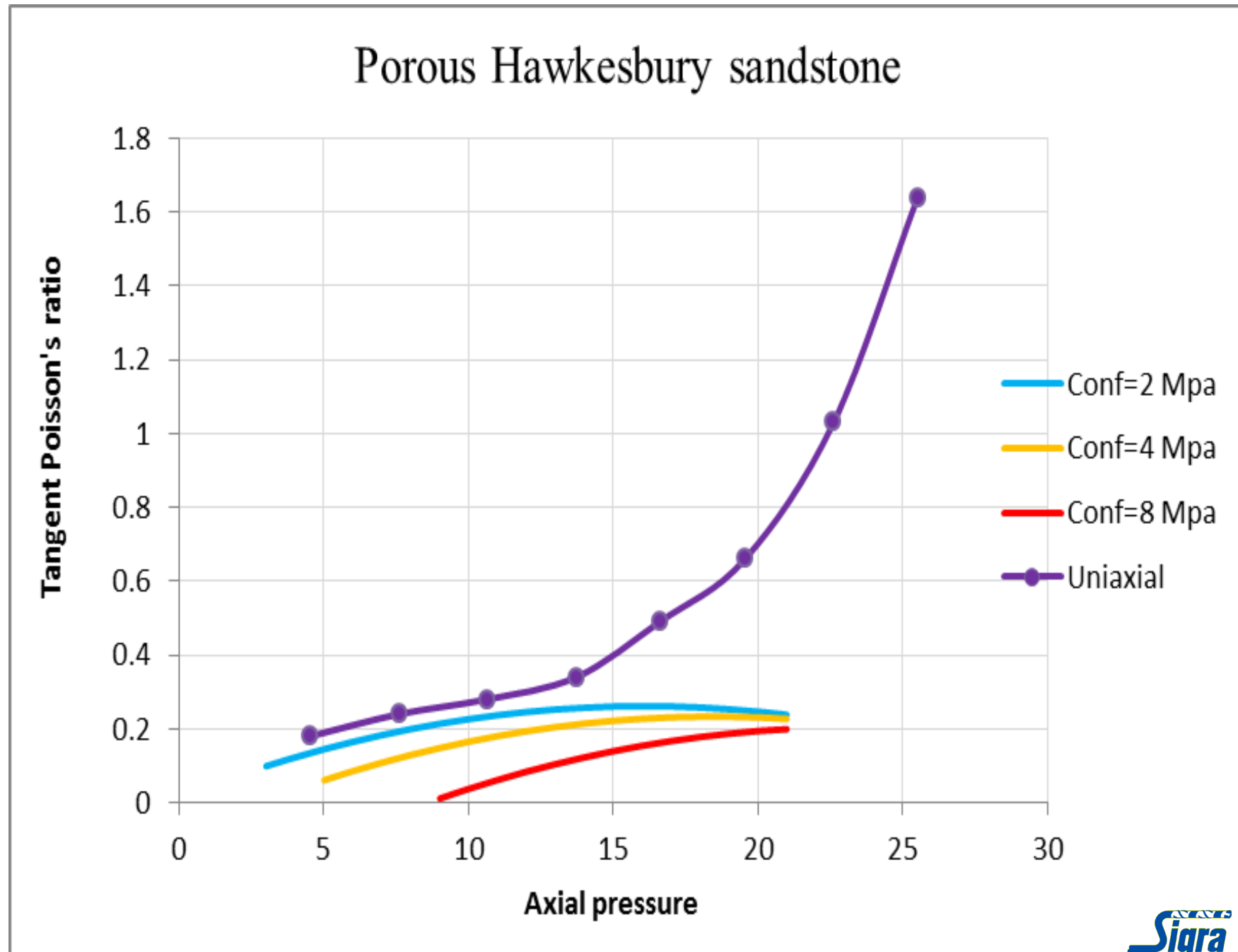
$\nu_{13}$



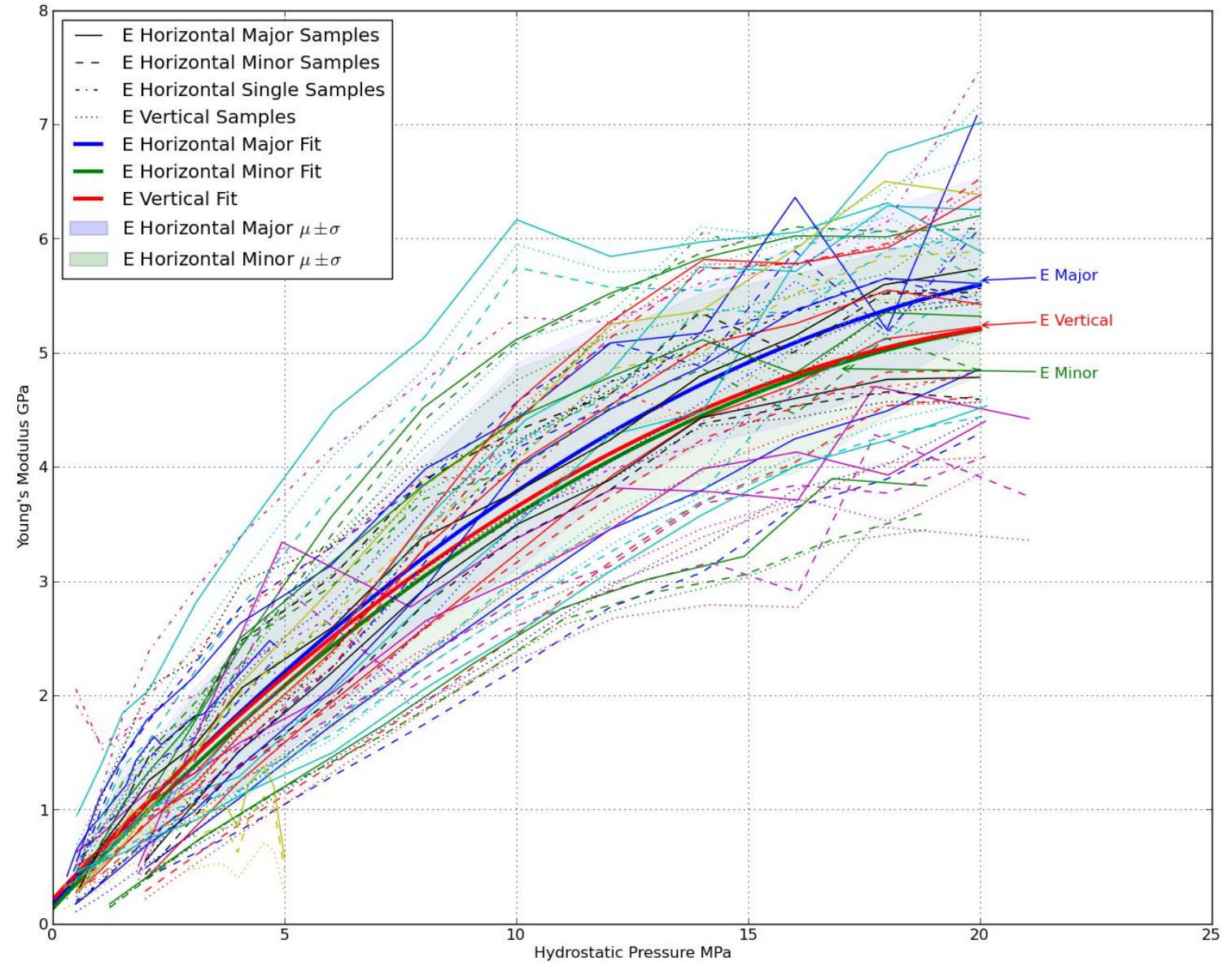


Пористый  
песчаник  
Hawkesbury

Влияние  
радиального  
напряжения  
на число  
Пуассона  $\nu_{12}$



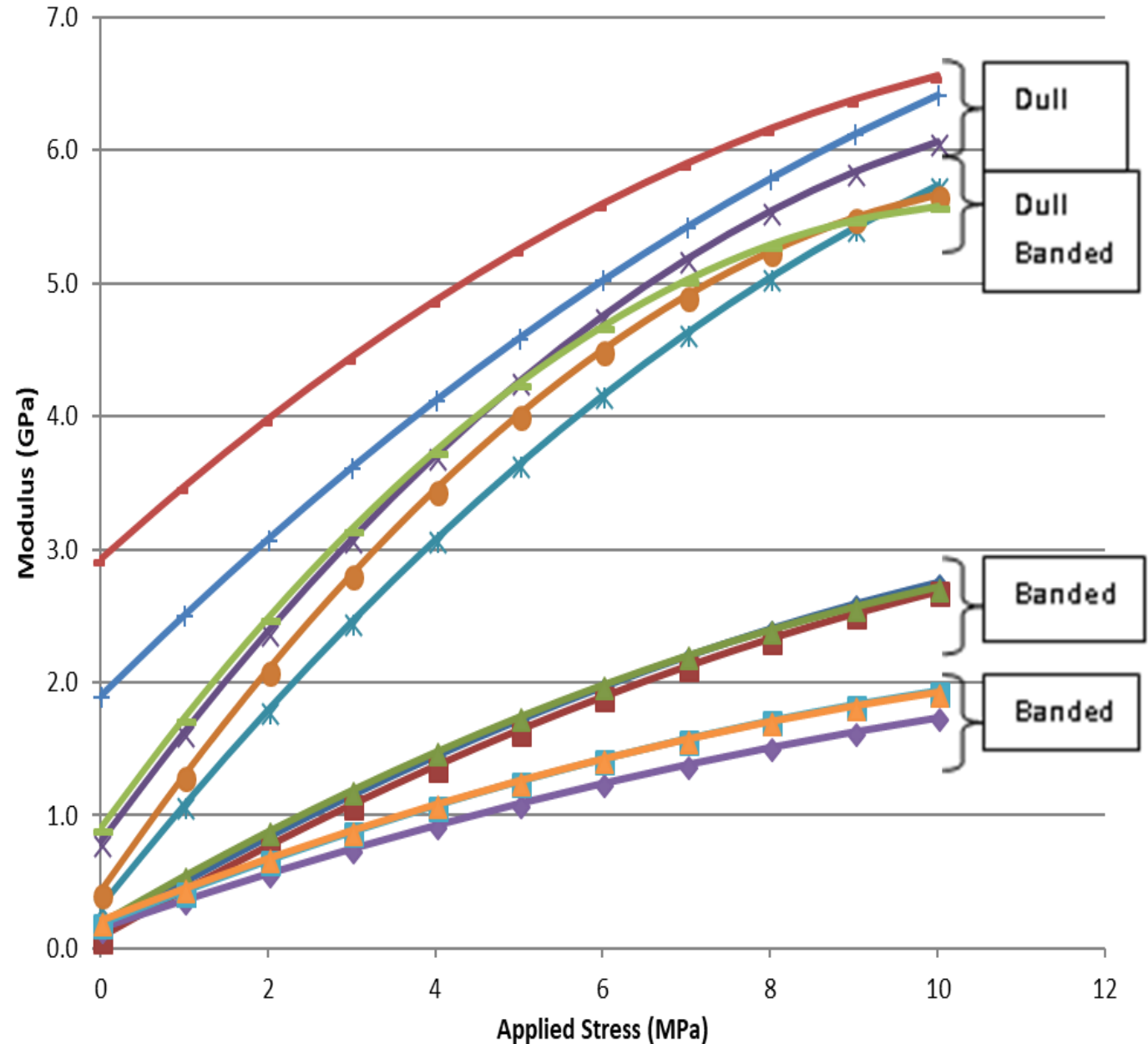
# Модуль Юнга для угольных фрагмента X





Разные типы  
угля - разная  
жесткость

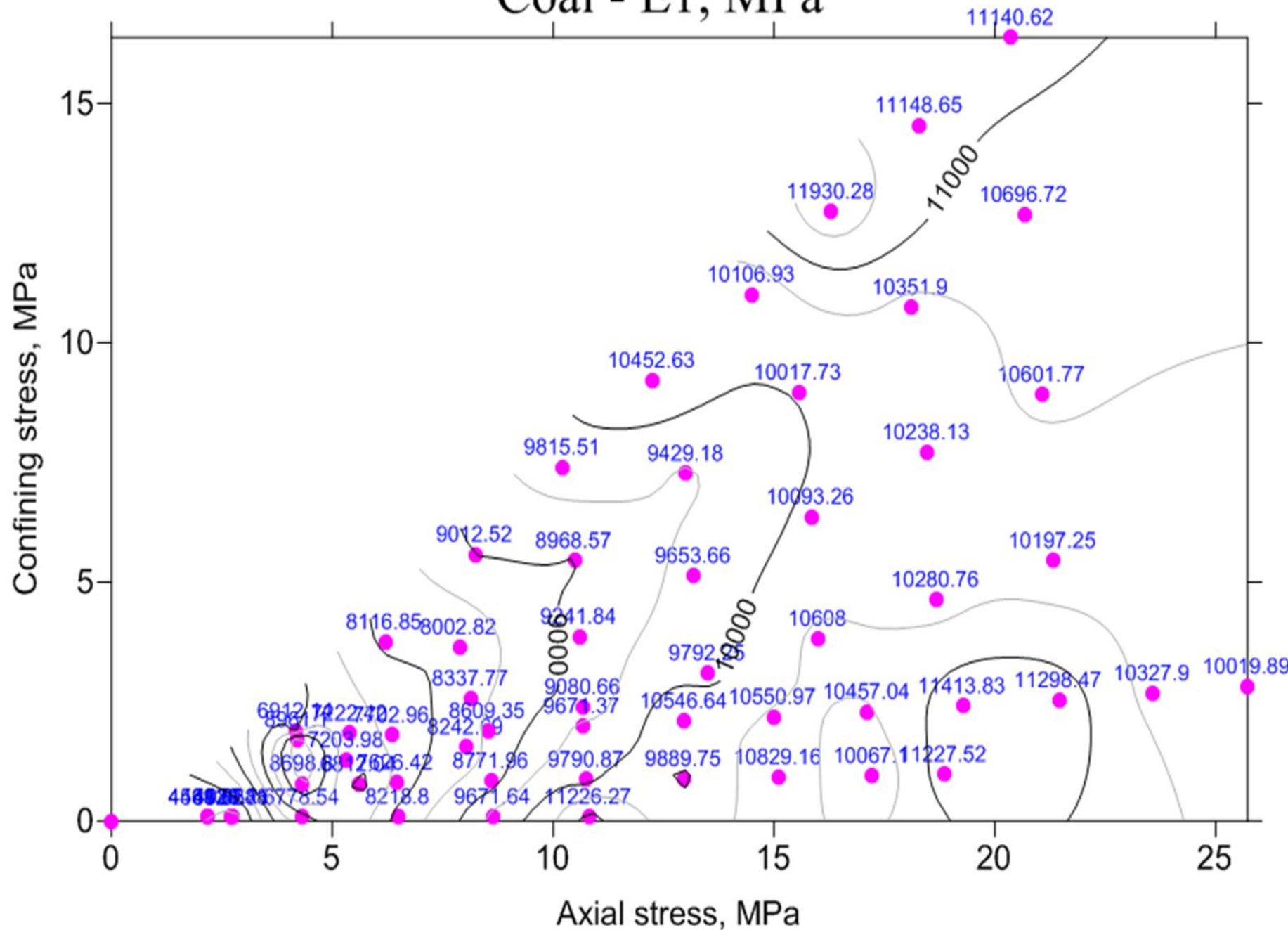
Гидростатиче  
ские  
испытания



Как будто  
слабый  
(мягкий)  
уголь

$E_1$   
перпендикул  
ярно к  
плоскости  
напластован  
ия

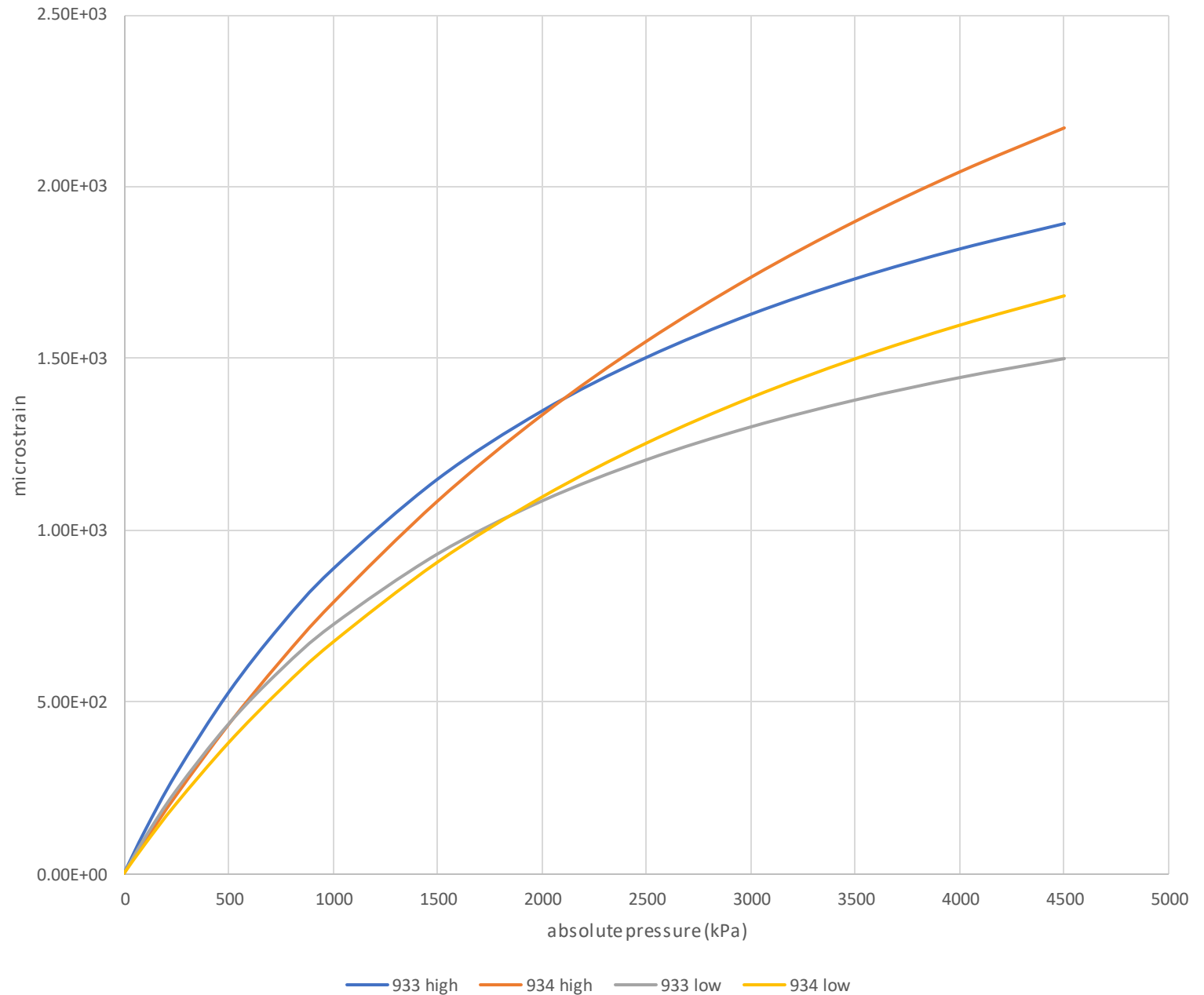
Coal - E1, MPa



# Усадка и вспучивание

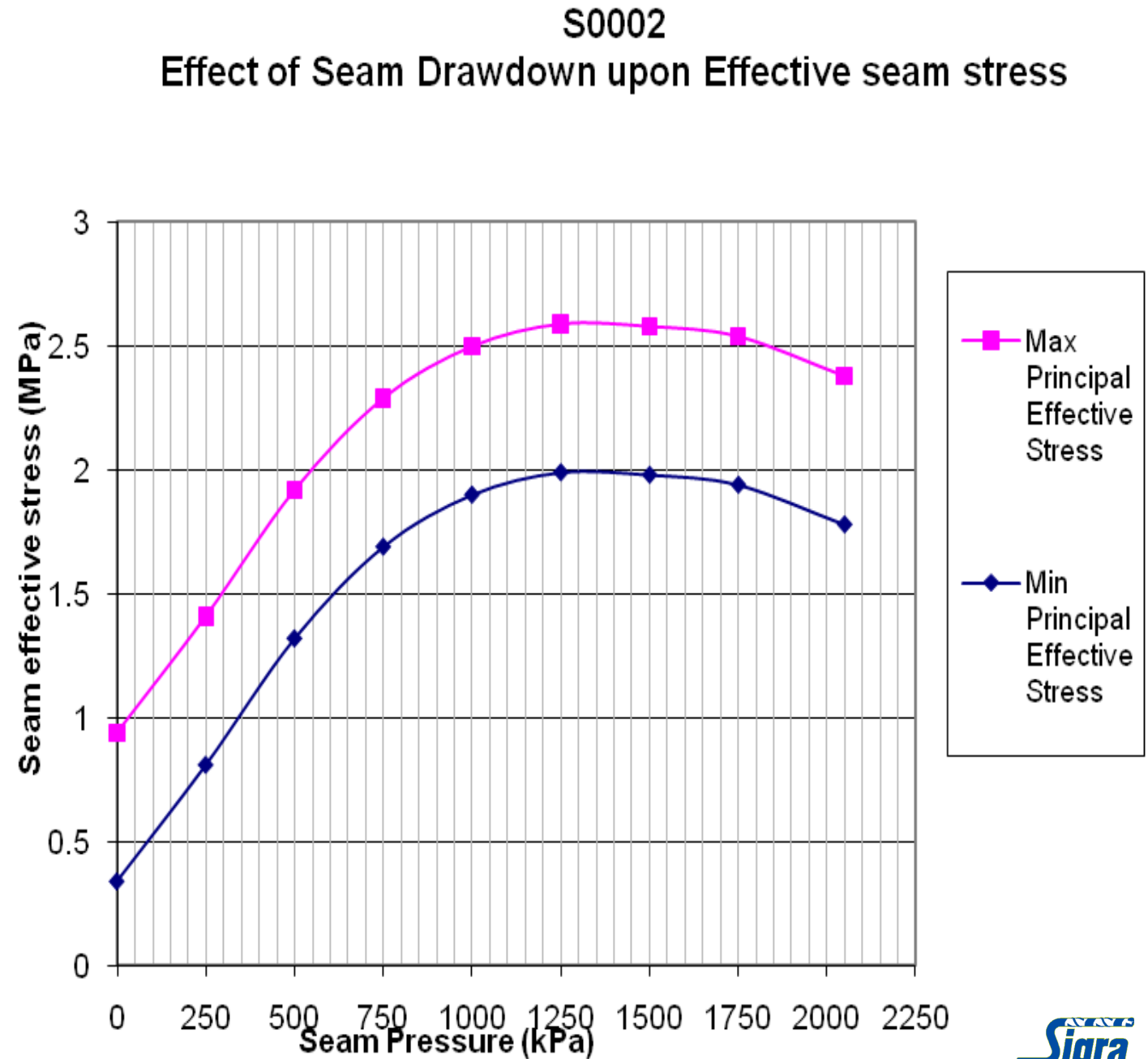
- Очень характерно для угля, который теряет объем в процессе десорбции газа
- В меньшей степени присущи углистым сланцам
- Имеет место в некоторых глинистых породах - теряют объем с потерей воды
- Сопутствующее изменение напряжения могут быть весьма значительны, в зависимости от жесткости породы

Напряжения в  
угле при  
усадке: метан  
– пластовый  
газ



# Траектория напряжения

- Эффективное напряжение изменяется при откачке воды и газа из угольного пласта



# Rock Joints

- Необходимо анализировать их свойства прежде чем произойдет обрушение
- Как ведет себя жидкость?
- Вероятность внезапного перехода от заполненных трещин где нет давления жидкости к состоянию, когда в них вдруг появляется жидкость.



**Благодарю за  
внимание**

**Это лишь часть того  
чем мы занимаемся.**

**Sigra Pty Ltd**

93 Colebard St West, Acacia Ridge, Brisbane Queensland 4110, Australia

Tel: +61 (7) 3216 6344

Fax: +61 (7) 3216 6988

<http://www.sigra.com.au>

[info@sigra.com.au](mailto:info@sigra.com.au)