

Прогнозирование поля тектонического напряжения до бурения на основе геомеханических моделей

Pre-drilling prediction of the tectonic stress field with geomechanical models

Andreas Henk*

Предисловие

Знание поля тектонического напряжения в коллекторе существенно для оптимизации бурения и добычи. Устойчивость ствола скважины, ориентации естественных и гидравлически вызванных разломов, анизотропия потока жидкости, наряду с другими, все это сильно зависит от текущего распределения напряжений. Несколько методов от инклинометрического анализа ответвлений ствола скважины до восстановления неупругих деформаций и сдвигового акустического анализа анизотропии кернов (например, Yale, 2003; Sperner и др., 2003) могут использоваться для определения ориентаций и относительных величин напряжений в естественном залегании, но, очевидно, эта ценная информация станет доступной только после бурения скважины.

Однако есть также многочисленные случаи, где ориентация напряжения должна быть известна до бурения. Например, если планируется применение множества гидроразрывов в горизонтальной скважине, то ориентация области напряжения должна быть известна заранее, потому что для оптимального проектирования гидроразрывов ствол горизонтальной скважины должен быть параллелен направлению минимального главного напряжения.

Точно так же планирование траектории скважины для устойчивости ее ствола, так же как и проектирование вторичных и третичных мероприятий по добыче (например, нагнетание воды в пласт, применение гидроразрывов) значительно улучшаются за счет знания полей напряжений среды.

Информация относительно региональных ориентаций напряжения может быть получена из крупномасштабных сборов данных, таких как, например, проект всемирной карты напряжений (Zoback, 1992; Sperner и др., 2003). Ориентация и величина области напряжения в осадочных бассейнах, однако, могут быть очень переменными и, особенно вблизи разломов, местные ориентации напряжения могут отличаться от направления регионального простирания вплоть до 90° (например, Yale, 2003). В таких случаях, получение ориентаций напряжений, действующих конкретно в резервуаре, из карт регионального масштаба неизбежно привело бы к неправильному предсказанию до бурения.

В этой статье используется численный подход моделирования для определения величины и ориентации тектонических напряжений в коллекторе и, особенно, локальных изменений напряжения вблизи разломов. Модель основана на конфигурациях коллектора и разломов, полученных по сейсмическим данным, и на граничных условиях, представляющих поле региональных напряжений. Таким образом, этот инструмент также применим к случаям, где скважинные данные отсутствуют. Вслед за краткой схемой подхода моделирования, приводится пример ее применения, чтобы

оценить практическую ценность таких геомеханических моделей для предсказания поля тектонических напряжений в тектонически экранированных коллекторах до бурения.

Факторы, влияющие на переориентацию напряжений вблизи разломов

Используя массивы данных, полученных на нескольких типах осадочных бассейнов, распространенных по всему миру, Yale (2003) обсуждает качественные характеристики некоторых факторов, влияющих на изменения ориентаций напряжений в естественном залегании, и утверждает, что величина избыточного горизонтального напряжения, расстояние до разломов, и структура разломов — ключевые параметры. Он обнаружил, что локальные отклонения в области напряжения наиболее характерны для районов, где разница между наибольшим и наименьшим горизонтальными напряжениями небольшая. Но даже в условиях больших тектонических напряжений, то есть в районах с большим избыточным горизонтальным напряжением, ориентации полей напряжений могут сильно изменяться, если разломы делят коллектор на отдельные, замкнутые блоки, ограниченные сбросами.

Некоторое количественное понимание отклонений локальных напряжений было достигнуто при помощи двумерных (2D) численных моделей разломов простых конфигураций (например, Pollard и Segall, 1987; Ohlmacher и Aydin, 1997; Sassi и Faure, 1997). Они отмечают, что ориентации локальных напряжений вблизи разломов зависят от фрикционных свойств пород и разлома (сцепление, коэффициент трения) так же как и угол между плоскостью разлома и осью наибольшего регионального главного напряжения. Тектоническая обстановка, которая удостоилась большого внимания в этом отношении, представляет собой ограниченную надвиговую область между двумя сбросо-сдвиговыми разломами, где горизонтальные движения могут привести к формированию тектонически экранированного поднятия или воздымающейся структуры. Ориентации и величины напряжений в таких структурах при сжимающих условиях также зависят от специфических характеристик разломов, таких как амплитуда смещения и перекрытие сдвиговых разломов (Ohlmacher и Aydin, 1997).

В то время как такие 2D модели являются полезными инструментами для достижения некоторого общего понимания факторов, регулирующих ориентации напряжения, при применении к реальной среде требуется трехмерный (3D) подход для расчета характерных конфигураций разломов и коллектора, а также их механических свойств. Последние достижения в численных методах и вычислительной мощи позволяют

*Geologisches Institut, Universität Freiburg, Albertstr. 23b, D-79104 Freiburg, Germany.
E-mail:henk@uni-freiburg.de.

строить такие детальные трехмерные модели для получения поля напряжений и анализа деформации напряжения и анализа деформации быть настроенными (например, Maerten и др., 2002; Longuemare и др., 2002; Wees и др., 2003).

Геомеханические модели коллекторов — количественный подход

Способ трехмерного (3D) моделирования, использованный в данном исследовании использует метод конечных элементов (Finite Element — FE) и соответственно коммерческий код FE: ANSYS. Данный численный метод был выбран по причине того, что он обеспечивает точный расчет напряжений и деформаций для неоднородных структур со сложным строением и составом, обладающим нелинейными свойствами. Последовательность процедур включает в себя построение модели по интерпретированным сейсмическим данным, дискретизацию (выбор сетки), а также введение граничных условий для представления окружающего поля напряжения и воспроизведения наблюдаемых напряженных состояний в пунктах калибровки (если возможно).

Модель конечных элементов описывает упругую и пластичную деформацию породы. Механическое поведение в упругой области описывает закон Гука, связывающий деформации с напряжениями через модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Пластичная деформация с хрупким разрушением определена по закону Мора-Кулона, где используются удельные литологические величины сцепления и угла внутреннего трения. Увеличение объема из-за перераспределения зерен в течение начальных стадий трещинообразования регулируется углом дилатации. Если в процесс вовлечены материалы с пластичными реологическими свойствами, например соль, то пластичная деформация таких материалов может быть описана температурным законом и/или зависящим от скорости деформации законом крипа.

Конфигурация 3D модели может быть взята из данных сейсмической интерпретации посредством программных пакетов CAD, таких как AutoCAD, где задаются отдельные блоки коллектора, ограниченные разломами, и поверхности разломов. Такое построение модели конечного элемента по надежным методам

моделирования облегчает дальнейшее построение сети и ее уточнение в ANSYS. Дискретизация делит среду на многочисленные элементы с формами призмы и/или кирпича, в то время как так называемые элементы контакта задаются на противоположных сторонах существующих разломов. Эти элементы контакта могут рассматриваться как пружины, помещенные между блоками, ограниченными разломами. Сила контакта зависит от жесткости контакта (k) и проницаемости между этими двумя телами. В идеале, здесь не должно быть проницаемости, но это подразумевает, что k бесконечен, что приведет к неустойчивости численного решения. Значение k , используемого в практике, зависит, между прочим, от модуля Юнга пород в контакте, и минимизирует проницаемость, поддерживая устойчивое решение. Вдобавок, коэффициенты трения разломов могут быть присвоены элементам контакта, которые начнут скользить, если предел прочности при сдвиге, описанный законом Мора-Кулона, будет превышен. Это допускается для различных смещений между независимо дискретизированными блоками модели, ограниченными разломами.

Граничные условия смещения или напряжения введены для торцов модели, чтобы имитировать региональное поле напряжений. Количественный анализ локальных переориентаций напряжения в пределах тектонически экранированного коллектора может базироваться исключительно на конфигурациях коллектора и разломов, полученных из сейсмических данных и некоторой информации относительно напряжения окружающей области, взятой их крупномасштабных массивов данных, хотя они обычно содержат только ориентации, но не величины. Однако качество прогноза сильно растет, если имеются данные калибровки, например, имеется скважина, в которой производились измерения ориентаций и величин напряжений. В этом случае смещения или напряжения применительно к вертикальным границам модели, постепенно увеличивают, пока расчетные напряжения не будут соответствовать наблюдениям в локальной скважине, так же как и региональные ориентации напряжения. Эта откалиброванная модель конечного элемента лежит в основе прогнозов поля напряжения в частях бассейна, где не бурились скважины.

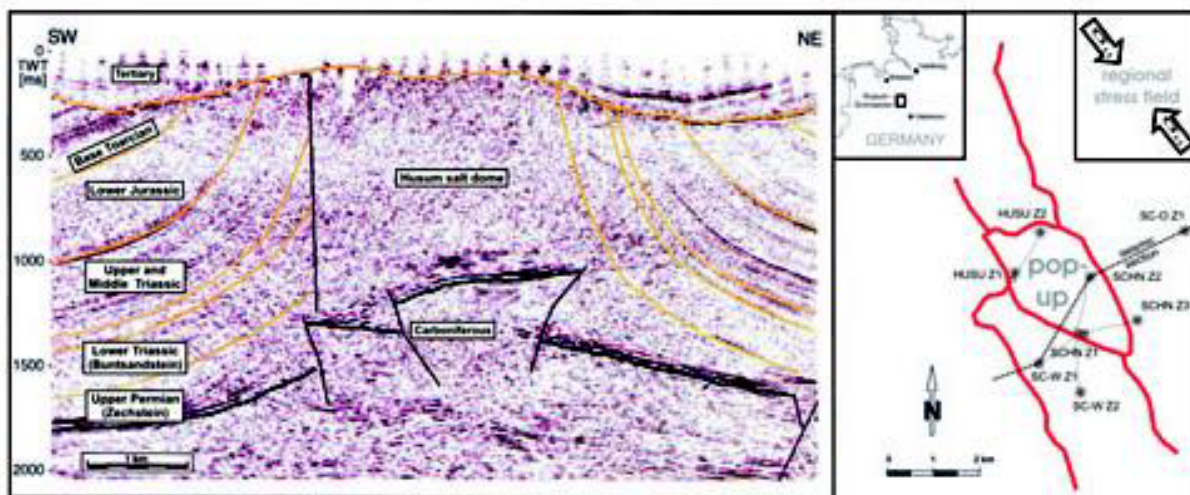


Рис. 1 Месторождение газа Husum-Schneeren в северной Германии (см. вкладку по расположению). Слева: мигрированный сейсмический разрез (измененный по Hollmann и др., 1997). Справа: вид главных разломов, регулирующих воздымающуюся структуру коллектора, в плане (Hollmann и др., 1997) и ориентация регионального поля напряжений (Roth и Fleckenstein, 2001); стрелки указывают ориентацию оси наибольшего горизонтального напряжения.

Практический пример применения метода

Для оценки практической ценности этого метода геомеханического моделирования он был применен к массиву данных реальной среды и прогнозы, сделанные на основе модели, сравнивались с полевыми наблюдениями. Данные, использованные для данного исследования, получены на газовом месторождении Husum-Schneeren (Hollmann и др., 1997) северной Германии, которое расположено приблизительно в 40 км северо-западнее Ганновера (рис. 1). Разработкой месторождения занимаются две компании: частично Gaz de France, Production Exploration Germany и частично ExxonMobil Production Germany.

Бассейн расположен в ограниченном разломами блоке горста (поднятия), между двумя сбросо-сдвиговыми разломами. Формирование этой структуры связано с поздне меловой деформацией сжатия северного Альпийского мыса (Ziegler, 1987). Газ содержится в песчаниках позднего каменноугольного периода и экранирован солями Zechstein. Породы коллектора уверенно характеризуются вторичной пористостью, но низкой проницаемостью минерального скелета. Таким образом, естественная трещиноватость, так же как и трещины, полученные в результате гидроразрыва, очень важны для поведения скважины. Обобщение региональных данных (Roth и Fleckenstein, 2001) показывает, что наименьшее главное напряжение в этой части северо-германского бассейна имеет направление ЗЮЗ-ВСЗ, в то время как наибольшее главное напряжение ориентировано вертикально. Таким образом, наибольшее горизонтальное напряжение является средним главным напряжением и имеет направление ССЗ-ЮЮВ. Однако данные керн и каротажа восьми скважин газового месторождения Husum-Schneeren всюду по бассейну дают совсем разные ориентации напряжения (Hollmann и др., 1997). Ориентация открытых трещин (плоскости под прямым углом) говорят о том, что ориентации локальных горизонтальных напряжений от регионального направления отличаются до 45°.

Строение коллектора и покрывающего пласта с основными разломами и литологическими границами взято из интерпретированных сейсмических данных Hollmann и др. (1997) (рис. 1). Используются две различных литологии с изотропическими материальными свойствами, представляющими обломочный кремнистый материал (кулон-моровское фрикционное поведение) и

соль Zechstein (температурно-зависимый крип). Соответствующая модель конечного элемента включает блок с параметрами 9 x 5.5 x 2 км (рис. 2, слева). Он состоит приблизительно из 16 000 элементов (кирпичи с 8 узлами), а также из 14 000 контактных элементов, представляющих основные существующие разломы. Оси геомеханической модели ориентированы параллельно направлениям главных напряжений региональных полей. В модели коллектора учтены силы тяготения и давление, эквивалентное давлению покрывающих пластов, действующему сверху модели (рис. 2, справа). Для нижней границы модели не учтены никакие вертикальные смещения. Скважина SCHN Z₃, пробуренная через восточный основной разлом (рис. 3), использовалась для калибровки численной модели. Измерения напряжения (ориентация и величина) доступны от лежащего крыла до расстояний, в несколько сотен метров от разлома. Ориентация поля горизонтальных напряжений там идентична региональному полю напряжений, а что касается вертикальных напряжений, то они наклонены субпараллельно смежному разлому. Граничные условия смещения введены для вертикальных стенок модели и пошагово увеличены, пока расчетные напряжения не совпадут с ориентациями и величинами главных напряжений данного пункта калибровки, так же как и ориентация регионального поля напряжений вне ограниченного разломами коллектора. Эти смещения обычно вводятся для вертикальных границ (не тангенциальные смещения) и считаются постоянными вдоль каждой границы. Ориентации напряжений, выведенные из системы трещин в отмеченных семи скважинах, не использованы в геомеханическом моделировании, однако служат контрольными данными для проверки адекватности прогнозов, сделанных на основе модели.

Для каждого элемента геомеханической модели, численное моделирование обеспечивает, между прочим, полный тензор напряжения с ориентациями и величинами главных напряжений. Результаты моделирования показывают, что ориентации напряжений в коллекторе значительно изменяются, особенно в области горста, ограниченного разломами. Детальный обзор полей напряжений, вычисленных для элементов, пересекаемых скважинами, показывает хорошее совпадение результатов моделирования и реальности: сравнение ориентаций наблюдаемых открытых трещин с ориентациями

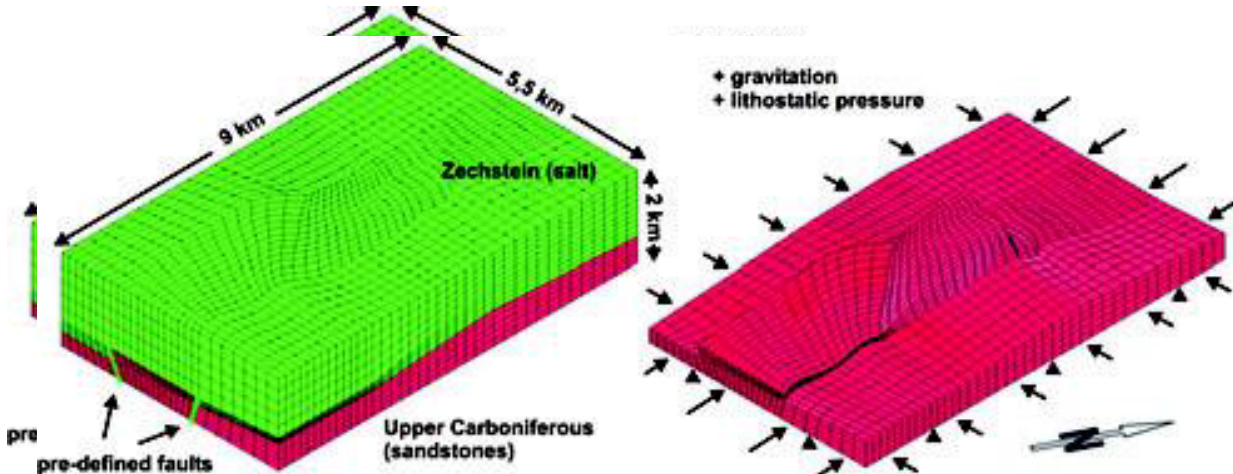


Рис. 2 Модель газового месторождения Husum-Schneeren, построенная по методу конечных элементов (вид с Востока). Слева: первичное строение модели с элементами объема, представляющими соль Zechstein и каменноугольные песчаники. Основные разломы описаны контактными элементами. Справа: введены граничные условия для моделирования современного регионального поля напряжений (элементы, представляющие соль Zechstein удалены, чтобы визуализировать структуру на уровне позднего каменноугольного периода; сбросовый уступ в центре модели — восточный разлом поднятой структуры, показанной на рис. 1).

плоскостей, перпендикулярных расчетным направлениям подтверждает, что в семи из восьми выбранных местоположений скважины, геомеханическая модель коллектора может предсказать фактическое поле напряжений с точностью меньше чем 10° (рис. 3).

Большее несовпадение, обнаружено только в тех частях скважины SCHN Z₃, которые пересекают плоскость разлома: в то время как совпадение все еще удовлетворительное в лежачем и висячем крыльях на большом расстоянии от разлома, в непосредственной близости (десятки метров) от плоскости разлома, модель не соответствует полевым наблюдениям. Можно ожидать, что более высокая пространственная разрешенность в этой области, или детальная подмодель, решили бы вопрос с сильной изменчивостью локальных полей напряжения и системой трещин вблизи разлома.

Выводы

3D методы конечных элементов используются для предсказания современных ориентаций и величин напряжений в тектонически экранированных коллекторах. Применение к массиву данных, полученных на месторождении газа Husum-Schneeren в северной Германии, иллюстрирует потенциал геомеханического моделирования.

Исследование показывает, что ориентации напряжений в коллекторе могут быть предсказаны со значительной

точностью, особенно на основе строения коллектора и разломов, взятых из сейсмических данных, и ограниченных скважинных данных. Методы моделирования, таким образом, являются инструментом оценки 3D распределения напряжения в коллекторе до бурения. Такая информация очень важна для оптимального проектирования горизонтальных скважин и соответственно для проектирования гидроразрывов в горизонтальных скважинах. Точно так же может быть предсказано распространение гидравлических трещин от субвертикальных скважин, пересекающих разломы.

Если в программе для моделирования коллектора есть возможность построения таких геомеханических моделей, то можно перейти к чувствительным к напряжению эффектам течения жидкости (например, Longuemare, 2002; Minkoff, 2003). Среди других, стоит исследовать анизотропный перепад давления, приводящий к переориентации поля напряжений вблизи эксплуатационных скважин, которая в свою очередь приводит к появлению новых трещин (Master и Weijers, 2001), проекты по нагнетанию воды (Heffer, 2002), а также и изменяющаяся плоскость разлома и тенденции расширения в течение истощения коллектора. Другая интересная перспектива — применение подхода геомеханического моделирования ко всему структурному

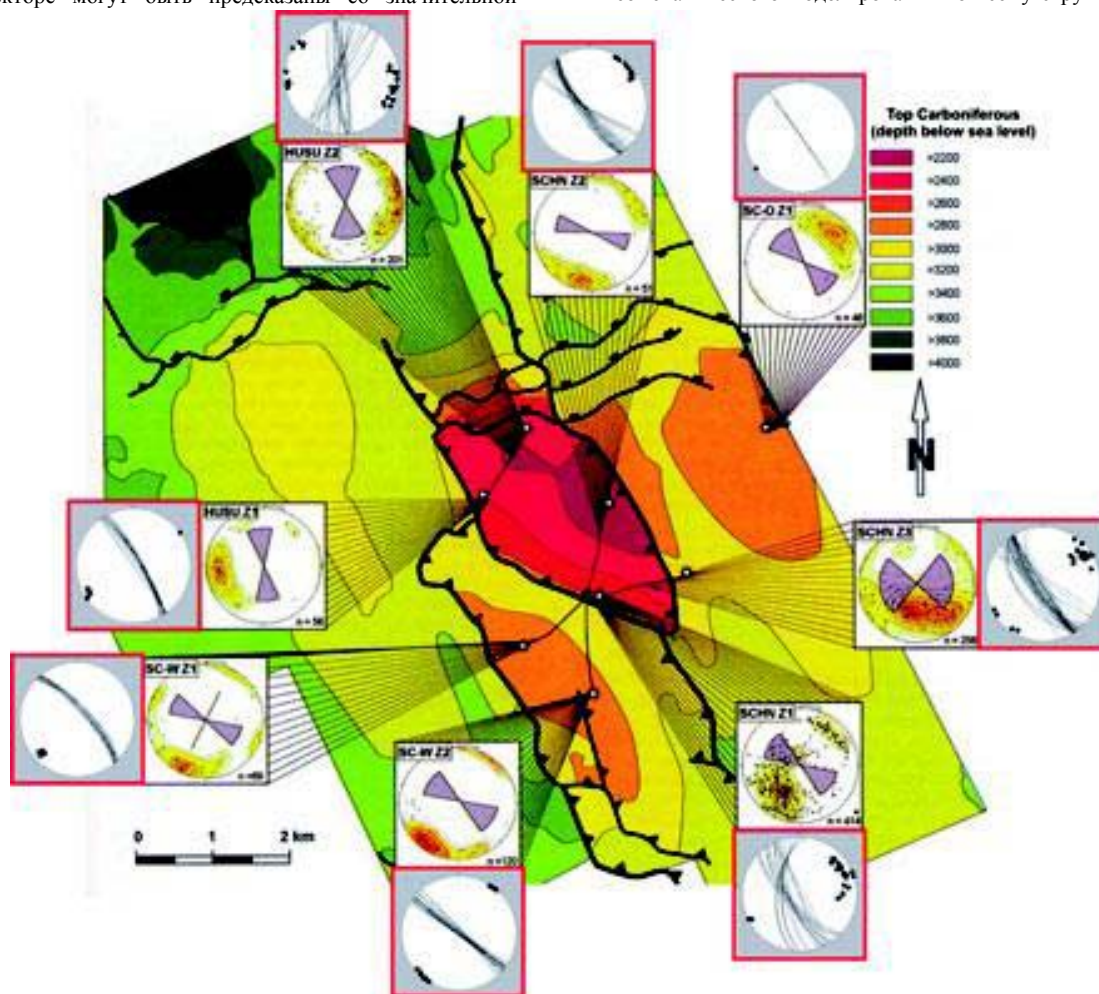


Рис. 3 Сравнение наблюдаемых открытых трещин и плоскостей, ориентированных перпендикулярно к наименьшему смоделированному главному напряжению в скважинах месторождения газа Husum-Schneeren. Карта изолиний показывает глубину верхней кромки отложений каменноугольного периода с тонкими черными линиями, указывающими траектории скважин и диапазон глубины данных о трещиноватости. Ячейки с черным контуром — полевые данные Hollmann и др. (1997; диаграммы Шмидта с полюсами плоскостей излома и розы-диаграммы, показывающие диапазон смещения ориентаций трещин), в то время как ячейки в красном контуре содержат результаты моделирования (диаграммы Шмидта, полюса плоскостей и большие круги).

развитию коллектора. В дополнение к предсказанию современного поля напряжений, представленному здесь, такие эволюционные модели могли бы дать такую ценную информацию, как плотность трещин, расчет времени формирования трещин, и распределения напряжений в любой момент времени в течение формирования коллектора.

Благодарности

Благодарю Gaz de France Production Exploration Germany (ранее Preussag Energie) за предоставление данных механики горных пород и напряжений в области месторождения Husum-Schneeren. А также благодарю анонимного рецензента за комментарии к более ранней рукописной версии статьи.

Ссылки на литературу

Heffer, K. [2002] Geomechanical influences in water injection projects: an overview. *Oil & Gas Science and Technology Rev, IFP*, 57/5, 415-422.

Hollmann, G., Klug, B., Schmitz, J., Stahl, E., and Wellens, M. [1997] Schneeren-Husum - zur Geologie einer Erdgaslager- statte im Nordwestdeutschen Oberkarbon. *Nds. Akad. Geowiss. Veroffentl*, **13**, 33-43.

Longuemare, P., Mainguy, M., Lemonnier, P., Onaisi, A., Gerard, C., and Koutsabeloulis, N. [2002] Geomechanics in reservoir simulation: Overview of coupling methods and field case studies. *Oil & Gas Science and Technology Rev, IFP*, 57/5, 471-483.

Maerten, L., Gillespie, P., and Pollard, D.D. [2002]: Effects of local stress perturbations on secondary fault development. *Journal of Structural Geology*, **24/1**, 145-153.

Minkoff, S.E., Stone, C.M., Bryant, S., Peszynska, M., and Wheeler, M.F. [2003] Coupled fluid flow and geomechanical deformation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **38**, 37-56.

Ohlmacher, G.C. and Aydin, A. [1997] Mechanics of vein, fault and solution surface formation in the Appalachian Valley and Ridge, northeastern Tennessee, USA: implications for fault friction, state of stress and fluid pressure. *Journal of Structural Geology*, **19/7**, 927-944.

Pollard, D.D. and Segall, P. [1987] Theoretical displacements and stresses near fractures in rocks: with application to faults, joints, veins, dikes and solution surfaces. *In: Atkinson, B.K. (Ed.): Fracture Mechanics of Rock*. Academic Press, London, 277-349.

Roth, F. & Fleckenstein, P. [2001] Stress orientations found in north-east Germany differ from the West European trend. *Terra Nova*, **13**, 289-296.

Sassi, W. & Faure, J.-L. (1997): Role of faults and layer interfaces on the spatial variation of stress regimes in basins: inferences from numerical modelling. *Tectonophysics*, **266**, 101-119.

Sperner, B., Muller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J., and Fuchs, K. [2003] Tectonic stress in the Earth's crust: advances in the World Stress Map project. *In: Nieuwland, D.A. (Ed.): New Insights into Structural interpretation and modelling*. Geological Society, London, Special Publications, 212, 101-116.

Yale, D.P. (2003): Fault and stress magnitude controls on variations in the orientation of in situ stress. *In: Ameen, M. (Ed.) Fracture and In-Situ Stress Characterization of Hydrocarbon Reservoirs*. Geological Society, London, Special Publications, 209, 55-64.

van Wees, J.D., Orlic, B., van Eijs, R., Zijl, W., Jongerius, P., Schreppers, G.J., Hendriks, M., and Cornu, T. [2003] Integrated 3D geomechanical modelling for deep subsurface deformation: a case study of tectonic and human-induced deformation in the eastern Netherlands. - *In: Nieuwland, D.A. (Ed.) New*

Insights into Structural interpretation and modelling. Geological Society, London, Special Publications, 212, 313-328.

Wright, C.A. and Weijers, L. [2001] Hydraulic fracture reorientation. Does it occur? Does it matter? *The Leading Edge*, **20/10**, 1185-1189.

Ziegler, P.A. [1987] Late Cretaceous and Cenozoic intra-plate compressional deformations in the Alpine Foreland; a geodynamic model. *Tectonophysics*, **137**, 389-420.

Zoback, M.L. [1992]. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 11703-11728.