Eindrapport van TKI Gas project TKIG01019

(Upstream Gas, ToughGas programmalijn)

1. Gegevens project

- Projectnummer: TKIG01019
- Projecttitel: Modellering van scheuren en spanningen over meerdere lengteschalen: van bekken naar boorgat
 - (Fractures from basin to well scale: numerical stress-strain modelling of fracture networks)
 - Penvoerder en medeaanvragers: G. Bertotti en N.J. Hardebol
- Projectperiode: 1 maart 2013 tot 1 maart 2014

2. Inhoudelijk eindrapport

• Samenvatting:

Dit project heeft tot doel om beter inzicht te krijgen in het natuurlijk scheur-en-breuk netwerk voor gaswinning uit laag-permeabele zandstenen en schaliegesteenten. We richten ons op de bestudering van gesteentelagen die aan het oppervlak liggen langs de Engelse Yorkshire oostkust. Deze gesteente vertonen voldoende overeenkomsten qua gesteente type en geologische geschiedenis met de Nederlandse Posidonia schaliegesteenten van Jura ouderdom; een van de gesteentepakketten die mogelijk relevant zijn voor schaliegas winning. Door natuurlijke scheurnetwerk patronen in gesteentelagen in Yorkshire te bestuderen kunnen we betere interpretaties verschaffen voor vergelijkbare netwerken in de Nederlandse ondergrond die mogelijk schaliegas bevatten. Beter begrip van de mechanische interactie tussen scheurnetwerken (10⁻¹-10² m) en gemiddeld grote breuken (10²-10⁴ m) hebben verschillende implicaties voor zowel laag-poreuze zandsteen reservoirs in de Nederlandse Noord Zee waar momenteel gas uit wordt gewonnen en voor mogelijk toekomstige winning uit schaliegas.

De geometrie van een natuurlijke scheurnetwerk in Yorkshire, in combinatie met andere observaties, voorzien in deterministische beschrijvingen op basis waarvan basisprincipes worden vastgesteld die helpen bij inschatten van natuurlijk scheurnetwerk in de Nederlandse ondergrond. Naast de deterministische beschrijvingen zijn stochastische modellen gegeneerd op basis van de vastgestelde basisprincipes. Met deze modellen kan een vertaling worden gemaakt naar de Nederlandse ondergrond en kunnen onzekerheden in de netwerk beschrijvingen worden gekwantificeerd. Zowel de deterministische als stochastische scheurnetwerk beschrijvingen vormen input in toekomstige geomechanische simulatie studies.

Het scheurpatroon in Yorkshire kan worden beschreven in termen van een hiërarchisch netwerk over een lengteschaal bereik van 10⁻²-10³ m. Dit omvat qua schaalbereik zowel de kleine scheurtjes waardoor eventueel ingevangen gas zou moeten kunnen worden aangezogen en enkele breuken die, in geval daarlangs schuifbeweging zou optreden. Hiermee biedt deze studie een meer geïntegreerde wijze van netwerkbeschrijving.

De resultaten van dit project na 1 jaar tonen voor de Yorkshire schalielagen een zeer duidelijk geïntegreerd scheur-breuk system. Vergaande data integratie en analyse van oriëntatie en lengte verdelingen van scheuren in combinatie met topologische relaties die zijn vastgesteld van elkaar snijdende scheuren vormen de ingrediënten van de scheur-breuk netwerk beschrijvingen. Kleine sub-meter tot tientallen meter grote scheuren lijnen uit zowel parallel als orthogonaal aan de breuken van minimaal een paar honderd meter. De geometrische basisprincipes zijn vastgesteld voor de geometrische relaties, o.a. tussen N-S strekkende niveau 1 en 2 scheuren van minimaal 10 m en veel voorkomende E-W strekkende scheuren op een lengteschaal van niveau 3 van 1-3 m. Deze laatste scheuren lopen dood op de grotere N-S scheuren.

Dezelfde N-S en E-W hoofdrichtingen in scheur oriëntaties zijn ook terug te vinden op veel grotere 10-100 km schaal met E-W lopende randbreuken van de Yorkshire Cleveland bekken en orthogonaal daarop een reeks N-S breuken die vorm geven aan een serie horsten en grabens. De hiermee vastgestelde principes van het netwerk verschaffen de basis voor het bouwen van representatieve discrete scheur-breuk modellen en de vertaling naar de Nederlandse ondergrond

Het 'moeilijk winbare' gas in de Nederlandse ondergrond betreft gas in schalielagen in o.a. het West Nederlandse Bekken (WNB) en in laag-permeabele zandsteenlagen van de Rotliegend formatie waar momenteel in o.a. het Broad Fourteens Bekken gas gewonnen wordt (BFB) (zie Figuur 2). Naast de grote NW-SE georiënteerde randbreuken, verschaffen boorkern gegevens inzicht in de in de reservoir aanwezige scheuren. In de noordelijke BFB zijn scheuren aanwezig met eenNW-SE, NE-SW, N-S en E-W oriëntatie. Hoewel de topologische relaties niet op basis van deze boorkern gegevens kunnen worden bepaald, sluiten de oriëntaties wel aan op onze hiërarchische netwerk beschrijving.

Het Nederlandse Noord Zee blok P6 is geselecteerd als een voorbeeld locatie om onze bevindingen en implicaties t.a.v. scheur-breuk netwerk beschrijvingen op te testen. In de vertaling van scheurpatronen van Yorkshire naar WNB en BFB dient te worden opgemerkt dat de hoofbreuk richtingen i.p.v. E-W respectievelijk ENE-WSE en NE-SW lopen. Relatief ten opzichte van deze hoofdbreukrichtingen kunnen op basis van vastgestelde topologische regels voor scheurnetwerken een veel betere inschatting worden gemaakt voor de Nederlandse ondergrond. De industrie kan bepalen in hoeverre de modellen aansluiten op waargenomen scheuren in hun boorput gegevens en onze modellen kunnen daarmee verder worden gekalibreerd. De geometrische beschrijvingen van scheurnetwerk als input in grootschaliger geo-mechanische berekeningen. Een eerste referentie geo-model is gebouwd van de structuur in het P6 blok wat de basis voor toekomstige simulaties vormt. Dit helpen bij het beter begrijpen van hoe nieuwe en door fraccing geïnduceerde scheuren zich kunnen ontwikkelen en levert daarbij antwoorden op vragen rond van schaliegas winning zoals hoe de connectiviteit van een netwerk kan worden verbeterd of de condities waaronder schuifbeweging langs grotere breuken zou kunnen optreden.

Figuur 1: schematische weergave van 1^e orde breuken en 2^e orde scheuren op lokale druk variaties.



Doelstelling:

Met deze studie wordt gestreefd naar het kwantificeren van de rol van in de ondergrond bestaande scheur en breuk patronen op de lokale gesteente druk variaties in ondergrondse gas reservoirs. Voor de winning van gas uit laag-permeabel gesteente is het van belang dat bestaande scheuren voldoende openstaan. Dit is mogelijk wanneer de gesteentedruk orthogonaal op de scheuren klein genoeg is, dat vloeistofdruk de wanden van bestaande scheuren open drukt. Daarnaast biedt bestaande technologie de mogelijkheid om vanuit een boorput onder hoge vloeistofdruk nieuwe scheuren te vormen (i.e. fraccing).

Deze studie richt zich vooral op het reeds bestaande scheur-en-breuk netwerk dat in de geologische geschiedenis door natuurlijke processen is ontstaan. De vraag is hoe de ruimtelijke drukverdelingen en veranderingen door de tijd inwerken op de vorming van het netwerk. Ook het omgekeerde is mogelijk het geval; een bestaand scheurnetwerk beïnvloedt de lokale drukverdeling zodanig dat dit de vorming van nieuwe scheuren bepaald. Hierbij zouden we vanuit het oogpunt van het winnen van gas uit laag-permeabel gesteente graag willen dat lokale drukverdeling kleine scheurtjes doet openen, terwijl schuifbewegingen langs grotere breuken dient te worden vermeden. Van belang is daarom het verkrijgen van meer inzicht in hoe kleine scheurtjes kunnen worden geactiveerd lang voordat grotere breuken in beweging komen.

In het eerste jaar van dit meerjarig onderzoeksproject richten we ons vooral op de geometrische co-genetische relaties tussen natuurlijke gevormde scheurtjes en breuken. Een mogelijk vergelijkbare relatie bestaat tussen nieuw te vormen scheuren middels fraccing en het bestaande netwerk op basis van lokale druk variaties.

Inleiding:

Moeilijk winbaar gas (bijv. schaliegas) bevindt zich in laag-permeabele reservoirs. Het gas zit opgesloten in de fijne poriën van schalie of fijne-korrelige gecementeerde zandstenen waaruit het gas moet worden vrijgemaakt. Gas moet vervolgens naar de productie put kunnen stromen, wat kan worden vergemakkelijkt door bestaande, natuurlijk gevormde en hydraulisch, nieuw gevormde netwerk van scheuren. Het verhogen van de vloeistofdruk om gesteente te breken en de permeabiliteit te vergroten is cruciaal voor de exploitatie van voorraden moeilijk winbaar gas.

Voor dit onderzoek hebben we twee fundamentele vragen geformuleerd:

- a) Wat wordt de ruimtelijke verdeling van nieuw gevormde scheurtjes en hoe staan deze in verbinding met het al bestaande netwerk van grotere schaal breuken?
- b) Leidt verhoging van de vloeistofdruk tot reactivering van al bestaande grootschalige breuken of wordt de spanning afgevoerd door kleinere en nieuw gevormde scheuren?

Voor het vergroten van de opbrengst van een schaliegas reservoir moeten we weten hoe we kunnen zorgen voor meer verbindingen tussen de scheuren. Het doel van het injecteren van vloeistof onder hoge druk in de boorput is om daarmee de effectieve spanning in het reservoir rond het boorgat op diepte te verlagen en daarmee bestaande scheurtjes te laten groeien, nieuwe scheurtjes te doen vormen en dwarsverbindingen in het scheurnetwerk te creëren. Wat dient te worden vermeden is het activeren van grotere breuken wat een risico op zou kunnen leveren voor aardbevingen.

In hoeverre de gaswinning kan worden verbeterd met vloeistofinjectie hangt in hoge mate af van de eigenschappen van het al bestaande netwerk van breuken en de wijze waarop dat netwerk reageert op veranderingen van de effectieve spanning in de zin van activering van bestaande breuken en het ontstaan van nieuwe breuken. Het doel van dit project is het kunnen voorspellen van de mechanische gedrag van gesteentelagen op basis van 'Discrete Surface Netwerk' modellen waarin netwerken uit scheuren van gemiddelde afmeting (10⁰-10² m) tot grotere breuken (10²-10⁴ m). De breuken van gemiddelde afmeting vormen de verbinding tussen kleinschalige breuken gevormd rond boorgaten en grootschalige breuken zonder die laatste te activeren.





Het onderzoek is opgedeeld in een drietal werkpakketten:

- WP1.1: Gedetailleerde karakterisatie van een scheur-breuk netwerk met expliciete beschrijving van geometrieën op basis van zowel veldstudies in Yorkshire en van een grootschalig breuk netwerk in het Broad Fourteens Bekken op basis van bestaande literatuurgegevens uit o.a. de Jager (2003, 2007). Op basis hiervan dienen geologische regels vastgesteld te worden met betrekking tot de vorm, oriëntatie, ruimtelijke afstand en intersectie relaties tussen de kleinere scheuren (10¹-10² m) en grootschalige breuken (> 10² m).
- WP1.2: Een algemene studie van bekkenschaal geologische ontwikkeling van de zuidoostelijke Noord Zee bekkens met special aandacht voor structurele ontwikkeling met het doel om mogelijke dwarsverbanden te vinden tussen het Cleveland Bekken (Yorkshire) en de Broad Fourteens Bekken en West Nederland Bekken.
- WP1.3: Het bouwen van een grootschalig 3D geo-model van het Noord Zee P6 blok in het Broad Fourteens Bekken met eerste orde breuken en lithostratigrafische eenheden waarvan verschil in mechanisch gedrag te verwachten valt. Dit verschaft de basis voor de eerste benchmark modelering die beschrijven hoe gesteentedruk opgelegd aan de randen van het geologisch model zich propageren door de geologische structuur heen en langs de eerste-orde breuken.

Dit rapport bevat als extra bijlagen:

- Appendix A: een presentatie in het Engels met recente bevindingen gepresenteerd tijdens de European Geoscience Union meeting (EGU) in Wenen in April 2014.
- Appendix B: een voortgangsrapport dat Februari 2014 aan industrie sponsors is voorgelegd.



Figuur 3: Overzichtskaart van de belangrijkste zuidelijke Noord Zee structuur elementen met voor dit project vooral van belang: Broad Fourteens Bekken (BFB), het Cleveland Bekken (CLB) en West Nederlands Bekken (WNB).

Werkwijze:

Met het doel beter inzicht te krijgen in het natuurlijk scheur-breuk netwerk in de Nederlandse ondergrond richten we ons met dit project tot gesteentelagen die aan het oppervlakte ontsloten zijn van een vergelijkbare lithologie en een geologische begravings en deformatie geschiedenis die voldoende overeenkomstig is aan de Nederlandse Jura schalievoorkomens (relevant voor eventueel schaliegas winning). De onder Jura schaliegesteenten in Yorkshire (Lias) vertonen voldoende overeenkomsten met de Nederlandse Posidonia gesteenten om zo'n vertaling mogelijk te maken (voor verdere details qua regionaal geologische context zie Appendix B).

We hebben een werkschema ontwikkeld op basis van verschillende voorgaande (PhD) projecten die, weliswaar gericht op een andere probleemstelling, een vergelijkbare noodzaak hadden voor scheurnetwerk karakterisatie van aan het oppervlak ontsloten gesteenten om daarmee beter begrip te krijgen van scheurnetwerken in de ondergrond (Boro et al., 2013; Strijker et al., 2012). Daartoe maken wij voor wat betreft werkpakketten WP1.1 en WP1.3 gebruik van onze DigiFract veld acquisitie en fracture data verwerkings software (Figure 1b) (Hardebol en Bertotti, 2013). DigiFract helpt bij het expliciet beschrijven van scheur netwerk geometrieen in het veld en op basis van luchtfoto en 3D LiDAR scans. Recente, mede door de industrie gefinancierde ontwikkelingen aan ons FractDataModel biedt ons mogelijkheden tot een meer rigide en tegelijk flexibele manier van scheur-en-breuk netwerk beschrijvingen middels CAD functionaliteit.

Figuur 4 toont het werkschema waarbij op basis van outcrop observaties, 3D LiDAR scans en luchtfoto's expliciet scheurnetwerk beschrijvingen worden verkregen als basis voor deterministische en stochastische netwerk modellen. Zeer relevant in het werkschema is het verkrijgen van de '*spelregels*' die de ruimtelijke verdeling van het scheurnetwerk beschrijven. Deze regels worden verkregen op basis van de deterministische netwerk beschrijvingen en vormen de basis voor stochastische scheur netwerk simulaties (i.e. Discrete Fracture Netwerk - DFN modellen).



Figuur 4: Schema van structuur data verwerking en input model constructie, met het doel om bijv. vloeistof stroming, of zoals voor de huidige studie de mechanische response van een scheurnetwerk te berekenen. ders dan in veel standaard procedures, blijven deze spelregels niet beperkt tot kansdichtheids functies voor de oriëntatie en lengte verdelingen van de scheuren. De op onze FractDataModel gebaseerde stochastische simulatie tool houdt tevens rekening met de topologische en hiërarchische netwerk structuur.

Aangezien individuele scheuren veelal als (sub) vertikale vlakken door gesteentelagen snijden, biedt een bovenaanzicht van een scheurnetwerk de beste kijk op aan het oppervlak ontsloten scheurnetwerken. Daar komt voor ons studiegebied als extra voordeel bij dat de schaliegesteenten langs de Yorkshire kust door golfwerking zeer zeer vlak zijn afgeërodeerd. Middels een door ons aangeschafte drone (ofwel een UAV – unmanned aerial vehicle) hebben wij een grote collectie foto's van de scheurnetwerken kunnen verkrijgen.





Inzichten naar natuurlijke scheurnetwerk patronen worden vervolgens vertaald naar input modellen voor numerieke experimenten (Figuur 4). Het vaststellen van de juiste '*spelregels*' en het construeren van scheurnetwerk patronen die voldoende overeenkomen met natuurlijke netwerken vormt een belangrijke basisconditie voor relevante numerieke experimenten. De vraag in hoeverre bestaande scheurnetwerken van invloed zijn om eventuele vorming van nieuwe scheuren middels het beïnvloeden van lokale drukverdeling kan alleen goed worden beantwoord wanneer de netwerken, die in de geomechanische berekeningen worden gebruikt, voldoende overeenkomen met natuurlijke netwerken. Veel huidige stochastisch netwerken missen de juiste overeenstemming met natuurlijke netwerken vooral voor wat betreft de mogelijke relevante doorsnijdingsrelaties tussen scheuren.

In lijn met het onderzoeksvoorstel zijn de eerste orde breuken in het P6 studiegebied gedefinieerd op basis de door de industrie geleverde seismische interpretaties. De kleinere schaal scheuren worden vervolgens ingevuld met behulp van de door ons vastgestelde en naar de Nederlandse ondergrond vertaalde '*spelregels*'.

Voor de uiteindelijke numeriek mechanische simulaties maken we gebruik van JewelSuite[™] voor het buowen van 3D geo-models en Abaqus CAE voor de mechanische simulaties. Hierbij richten we ons in beperkte mate tot volledige 3D simulaties omdat dat ten koste gaat van de gedetailleerdheid waarmee het scheurnetwerk kan worden gesimuleerd. Op dit moment ondervinden we aantal technische uitdagingen (die overigens waren voorzien) en die we gedeeltelijk omzeilen door ingewikkelde topologische netwerk relaties in 2D te simuleren. Voor 3D simulaties zijn we afhankelijk van updates in de laatste 2014 JewelSuite[™] software editie waarin het verwerken van een 3D complexe geometrieën verder is verbeterd.

<u>Resultaten:</u>

De hieronder beschreven resultaten richten zich vooral op de beschrijving van natuurlijke scheurnetwerken op basis interpretaties van de met drone verkregen foto's. Deze unieke dataset biedt ons de gelegenheid om gedetailleerde expliciete netwerk beschrijvingen te verkrijgen zoals getoond in Figuur 6.



Figuur 6: Een bovenaanzicht van een 10x10 meter schalielaag van onder Jura ten oosten van Port Mulgrave met interpretatie van een natuurlijk scheurnetwerk

Het scheurnetwerk toont een aantal grote noord-zuid georiënteerde scheuren die lateraal te vervolgen zijn over enkele tientallen meters. Deze zones bestaan uit meerdere scheuren die vlak naast elkaar liggen en in elkaar overgaan. Meerdere zones van scheuren zijn zichtbaar in de foto's (o.a. in Figuur 6) met tussenliggende afstand van zo'n 3-8 meter. Sommige van deze scheurzones zijn lateraal over meer dan 100 m vervolgbaar en tevens zichtbaar op lagere resolutie satellietbeelden zoals Google Earth Landsat. Deze grotere scheurzones vormen feitelijk breukzones waarbij ieder van de individuele scheuren een klein aandeel levert in verplaatsing parallel aan het breukoppervlak. Breuken van deze grootte kunnen ook in seismiek worden waargenomen. Breuken met mogelijke vergelijkbare karakteristieken zijn aanwezig in de Nederlandse ondergrond, zoals de netwerken beschreven door de Jager (2003, 2007).

Naast deze 1^e en 2^e orde scheuren (c.q. breuken) bevat het scheurnetwerk een grote hoeveelheid oost-west georiënteerde scheuren. Deze 3^e orde scheuren zijn zo'n 2-7 meter lang en lopen veelal dood tegen de grotere N-S scheuren. Ook op kleinere 0.1- 3m schaal van 4^e en 5^e orde scheuren herhaalt deze structuur van op elkaar doodlopende scheuren zich.



Figuur 7: de scheur oriëntatie verdeling geplot in Rose diagrammen voor oplopende lengteschalen.

Figuur 7 visualiseert de hiërarchische netwerk structuur van N-S en E-W georiënteerde scheuren op verschillende lengteschalen die aanwezig is in het netwerk van Figuur 6. Doordat de daadwerkelijke lengte van scheuren langer dan het studiedomein niet exact kunnen worden bepaald, toont Figuur 7 slechts scheuren kleiner dan 10 m. Voor langere lengteschalen richten we ons op grotere domeinen. Scheuren met een lengte van 3-10 meter zijn hoofzakelijk N-S georiënteerd. Daarentegen zijn scheuren met een E-W oriëntatie met gelijke frequentie aanwezig op een lengteschaal van 1-3 m. Dit patroon herhaalt zich voor scheuren van 0.3-1 m. en kleinere scheuren.



Figuur 8 toont de lengteverdeling van alle geïnterpreteerde scheuren in een histogram plot. De meest korte scheuren komen veruit het meest voor en de frequentie neemt af met toenemende lengte. In veel studies naar scheurlengte verdelingen wordt uitgebreid ingegaan op mogelijke lognormale, exponentiele en power-law distributie verdelingen als gestandaardiseerde beschrijvingen van de waargenomen lengtes (Baecher, 1983; Bonnet et al., 2001; Nicol et al., 1996). De lengte van lagere orde scheuren wordt in sterke mate bepaald door de topologische relaties met hogere orde scheuren. Immers, kortere scheuren lopen veelal dood op langere scheuren. Toch lijkt de lengte verdeling van de scheuren in een histogram plot overeen te komen met een power law verdeling (Figuur 8).

De meest belangrijke bevindingen die worden gebruikt voor de stochastische netwerk simulaties worden gevormd door de hiërarchisch gedefinieerde oriëntatie sets op basis van lengte schalen zoals aangegeven in Figuur 9. Figuur 9a toont de netwerk topologie van een pavement ten noorden van Kettleness. Figuur 9b toont de voorgestelde netwerk topologische regels voorgesteld op basis van de ontsloten netwerk geometrie uit Figuur 6.



geval L2-A scheuren die doodlopen tegen L2-B scheuren en met een kleinere kans op een doodlopen van scheuren tegen hogere orde scheuren (i.e. pAbt = 0.7). Figuur 10 toont de resultaten van 2D stochastische simulaties op basis van de in Figuur 9 gespecificeerde topologische regels.

Het referentie model Mdl0 toont een drie-niveaus hiërarchische netwerk waarbij de twee lagere orde scheuren precies ophouden tegen de hogere orde scheuren en daarmee perfecte connecties maken (i.e. *p*Abt = 1.0). Voor de twee model variaties Mdl1 and Mdl2 tonen ieder drie stochastische realisaties op basis van dezelfde stochastische parameters. Mdl1 heeft de NNW-SSE georiënteerde scheuren van niveau 2 (i.e. L2-A) die doodlopen tegen NNE-SSW georiënteerde scheuren (i.e. L2-B). In Mdl2 lopen zowel L2-B scheuren dood tegen L2-A scheuren als ookL2-A scheuren die doodlopen tegen L2-B. Zowel Mdl1 en Mdl2 tonen dat niet alle scheuren zijn verbonden met hogere orde scheuren. Dit in tegenstelling tot het referentie model waar alle scheuren met elkaar verbonden zijn. Bijvoorbeeld in Mdl1 lopen niet alle L2-A scheuren dood tegen L2-B scheuren en ontbreken verbindingen op meerdere plaatsen. Het aantallen verbroken verbindingen in Mdl2 is veel groter aangezien voor alle scheuren stochastische plaatsing regels zijn gedefinieerd met een lagere *p*Abt. waarde (0.7 in vergelijking tot 1.0 voor de voorgaande modellen) waardoor 30% van de verbindingen verbroken zijn.

De drie stochastische netwerk scenario's geven een beeld van de mogelijke variaties in scheur netwerk verdeling die kunnen worden verwacht. Dit voorbeeld biedt een basis voor het aanpassen van de spelregels voor de simulatie van scheurnetwerk geometrieën voor de Nederlandse ondergrond. De topologische structuur, bijvoorbeeld in relatie met de grotere breuken, kan worden gespecifieerd middels de opgestelde spelregels op basis van observaties van netwerk in aan het oppervlak ontsloten gesteentelagen. Het voorbeeld toont tevens hoe mogelijke variaties in netwerk verdeling kunnen worden verkend middels kleine aanpassingen in stochastische netwerk parameters.

De intensiteit van het scheurnetwerk wordt in de netwerkbeschrijving bepaald middels de spatiering van scheuren. In de stochastische simulaties wordt de scheurintensiteit uitgedrukt met een P21 waarde. P21 beschrijft de totale bij-elkaar-opgetelde scheurlengte genormaliseerd over de grootte van het 2D domein. Een spatiering van 0.2 m voor een serie parallel lopende scheuren die een 1 m² domein geheel doorsnijden komt overeen met een P21 = 5.0 (i.e. 5x 1 m scheur lengte per 1 m²).

De mate waarin de intensiteit van het scheurnetwerk (P21) is gevormd door de begraving van gesteente versus het opheffen en aan het oppervlak komen van gesteente vormt een grote uitdaging in het vertalen van scheurnetwerk observaties naar vergelijkbare scheurnetwerken in de Nederlandse ondergrond. Verschillende stochastische netwerken worden gerealiseerd met verschillende P21 waarden en daarmee verschillende mate van scheurintensiteit en hoeveelheid doorsnijdingen tussen oriëntatiesets.

B) mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten

Onze onderzoeksactiviteiten van dit moment richten zich op het inlezen van onze meer-schalige netwerk geometrieën in JewelSuite-Abaqus geomechanische modelleer software om daarmee de lokale drukvariaties t.o.v. de aanwezige scheuren te berekenen.

Figuur 11 toont een 3D geo-model van het P6 blok in het Broad Fourteens Bekken in de Noord Zee. De belangrijkste stratigrafische intervallen (o.a. het Perm Rotliegend in bruin, eventuele Zechstein zoutvoorkomens, Trias in roze en Jura in blauw met onderin de Posidonia schalies) zijn daarin gespecificeerd. Het structurele skelet van het 3D model wordt gevormd door de twee grote randbreuken. Daaromheen worden kleinere orde breuken en scheuren gespecifieerd.

De gevolgen voor lokale drukverdelingen kunnen het best worden bepaald wanneer voldoende nuances in netwerk geometrieën kunnen worden opgenomen in de inputmodellen voor mechanische simulaties. Echter, de grote hoeveelheid van scheuren die in deze mechanische simulaties dient te worden meegenomen levert de nodige uitdagingen op met het genereren van de meshes. Daarom richten we ons voor de gedetailleerde netwerk beschrijvingen op 2D domein studies en passen we de bevindingen daarvan toe op grotere 3D schaal waarin vooral de grotere randbreuken van het Broad Fourteens bekken worden gespecificeerd. Vervolgactiviteiten concentreren zich op het doorrekenen van de mechanische response van een reeks van 2D stochastische netwerken. De netwerk parameters die de grootste invloed hebben op veranderingen in lokale drukverdeling zullen hiermee worden bepaald. De lokale drukverdelingen berekend voor de verschillende stochastische netwerk modellen worden niet alleen onderling vergeleken, maar tevens met de mechanische simulaties op basis van de deterministische scheurnetwerk beschrijvingen uit het veld.

Dit onderzoek biedt mogelijke spin-off op het terrein van verbetering van stochastische netwerk simulatie tools. De meerjarige uitvoering van dit project biedt de gelegenheid om de cirkel te sluiten tussen gedetailleerde veldbeschrijvingen, de vertaalslag naar stochastische netwerkbeschrijvingen en het testen van de mechanische implicaties. Aandacht kan vervolgens worden gericht op de aspecten die de grootste invloed op mechanisch response leveren. Als spin-off willen we stochastische netwerk beschrijvingen verder verbeteren door het inbouwen van netwerk groei-imitatie modellen. Het proces van iteratief plaatsen van scheuren wordt dan zodanig geïmplementeerd dat deze de geometrische netwerk ontwikkeling door de tijd beschrijft. Groei-imitatie werkt op basis van geometrische beschrijvingen zonder dat geprobeerd wordt om daarmee het daadwerkelijk fysische groeiproces van scheuren te implementeren. Hiermee kan relatief snel een serie netwerk beschrijvingen worden verkregen. Het gaat ons in de eerste plaats om het kunnen voorspellen van de mechanische effecten van fraccing gegeven bestaande natuurlijke netwerken, niet om een volledige fysische beschrijving van het groeiproces van het natuurlijke netwerk in de geologische geschiedenis. In beide gevallen helpt wel goed begrip van geometrische netwerk relaties en de mechanische interactie tussen meerdere scheuren.



Figuur 11: Het 3D referentie geo-model van de P6 case studie in het Broad Fourteens Bekken als input voor mechanische simulaties. (a) Geologische context van onze studie met special interesse voor de Posidonia schalies en de Rotliegend laag-permeabele zandsteen intervallen. (b) dwarsdoorsnede door het input model. (c) Bovenaanzicht van de 1^e orde structuren van het input model met de twee randbreuken van de horst in rood en monocline assen van de getilde lagen naar het NE. (d) Conceptueel scheurnetwerk model van 2^e orde scheuren in de horst. (e) en (f) tonen de twee randbreuken en laagdefinities in JewelSuite™ modelleer software. Uitdaging op dit moment is het zodanig discretiseren van het 3D model dat het een valide 3D mesh oplevert voor de mechanische simulaties.

Discussie:

De structurele context van de Nederlandse Broad Fourteens Bekken (BFB) en West Nederlands Bekken (WNB) is bepaald in relatie tot de ontsloten schaliegesteenten langs de Yorkshire kust (zie appendix B). De grootste, eerste orde breuken in het van de BFB en WNB hebben een NW-SE oriëntatie met lagere orde breuken die daarvan afsplitsen en afbuigen (zie bijv. de Jager 2003 en 2007). Boorputgegevens tonen ook de aanwezigheid van in de reservoirs aanwezige scheuren en studie door Gauthier et al (2000) wijzen voor de noordelijke BFB op de aanwezigheid van NW-SE, NE-SW, N-S en E-W georiënteerde scheuren.

De topologische relaties op basis van deze boorputgegevens niet kunnen worden bepaald, sluiten de aanwezigheid van scheuren in twee paren van haaks op elkaar staande richtingen wel aan op de observaties van de hiërarchisch bepaalde oriëntatiesets in Yorkshire. De schalielagen van vroeg Jura ouderdom in Yorkshire zijn ingebed in het Cleveland bekken. De vorming van dit bekken in het vroeg Jura toont enige overeenkomsten met de eerste ontwikkelingsfase van andere zuidelijk Noord Zee bekkens tijdens het Jura.

De NW-SE georiënteerde scheuren in de boorputgegevens van het BFB zijn dilationeel, zijn relatief kort en komen relatief grote aantallen voor . Doordat ze ook onder de huidige reservoir drukcondities in het Rotliegend interval openstaan, versterken deze natuurlijke scheuren de permeabiliteit van het Rotliegend gesteente. Weliswaar betreffen dit boorgat gegevens voor het Rotliegend interval en zijn vergelijkbare gegevens voor de ~600 m hoger liggende Onder Jura Posidonia schalies (Figuur 11b) niet voorhanden. Dezelfde regionale condities. Wel tonen deze gegevens de relatie tussen aanwezige grotere breuken en scheurpatronen in verschillende oriëntaties. Voorzichtige vergelijkingen met onze veldstudies kunnen helpen bij het inschatten van de scheurpatronen in de bovenliggende Posidonia schalies.

De stochastische modellen helpen bij het verkennen van de entwerkvariatie die wordt aangetroffen in onze vergelijkingsstudies tussen gesteentelagen die zich op dit moment aan het oppervlak bevind (Yorkshire) en twee stratigrafische intervallen in het Broad Fourteens Bekken (Rotliegend en Posidonia gesteentelagen). De verschillende gesteentelagen kennen enige mate van overeenkomsten in Jura-Tertiaire deformatie geschiedenis; verschillen in netwerkkarakteristieken kunnen mogelijk aan verschillen in geologische context worden toegeschreven. Door de stochastische modelleer parameters van het netwerk te wijzigen kunnen verschillende netwerken worden gecreëerd die ieder als input kunnen dienen in mechanische simulaties. Vergelijking van de mechanische voorspellingen zullen laten zien in hoeverre de vastgestelde scheurnetwerk regels de essentiële aspecten van het netwerk beschrijven die van invloed zijn om het mechanische gedrag van een natuurlijk scheurnetwerk. Bovendien bieden de berekeningen van de mechanische response van de verschillende netwerk configuraties aanknopingspunten voor het maken van voorspellingen van over de effecten van fraccing van reservoir gesteente waarin reeds een bestaand natuurlijk scheurnetwerk aanwezig is.

Beter begrip van de mechanische interactie tussen scheurnetwerken (10⁻¹-10² m) en gemiddeld grote breuken (10²-10⁴ m) hebben verschillende implicaties voor zowel laag-poreuze zandsteen reservoirs (zoals in het Rotliegend) en voor winning uit schaliegas. Allereerst kan onze studie helpen bij het maken van betere voorspellingen van de reeds in het ondergrond aanwezige natuurlijke scheurnetwerk op basis van de grotere breuken die op seismiek zichtbaar zijn. Ten tweede kan een beter begrip van de drukverdeling en lokale afwijkingen ten gevolge van het bestaande scheur-en-breuk netwerk helpen bij het inschatten hoe nieuwe scheuren zouden vormen ingeval onder hoge druk vloeistof vanuit het boorgat wordt geïnjecteerd (i.e. fraccing). In hoeverre zouden bestaande scheuren kunnen worden geopend en nieuwe scheuren worden gecreëerd om daarmee gas te ontsluiten. Bovendien hoe kunnen eventuele risico's op aardbevingen door beweging langs grotere breuken worden voorkomen.

De resultaten van dit eerste jaar (van de meerjarige studie) bieden met een grondige karakterisatie van natuurlijke scheurnetwerk systemen de basis voor mechanische simulaties en daarop gebaseerde berekeningen van lokale variaties in drukverdeling van het reservoir gesteente.

Uitvoering van het project

<u>Uitdagingen in projectuitvoering</u>: In de uitvoering van het 1e jaar van dit meerjarig onderzoek is wederom de grote uitdaging bevestigd van het gebruik van realistische scheur-netwerken in numeriek mechanische experimenten (werkpakket 1.3). Het bouwen van meshes voor complexe netwerk geometrieën kent de nodige uitdagingen, ook voor quasi-statische mechanische experimenten gericht op het bepalen van mate van opening van scheuren en de potentie tot schuifbeweging (zonder dat scheuren daadwerkelijk groeien). Ondanks dat hebben we het gebruik van zulke netwerkbeschrijvingen voor het maken mechanische voorspellingen van lokale druk verdelingen opgenomen als doelstelling. In het vooruitzicht dat de uitvoering van deze onderzoekambitie over twee jaar kan worden verdeeld, hebben we deze doelstelling gehandhaafd. We hebben tijdens het eerste jaar niet alle energie gestoken in technische ontwikkeling om complexe netwerk geometrieën als input te kunnen gebruiken. In plaats daarvan hebben we tijdens het eerste jaar geïnvesteerd in het verkrijgen van de juiste deterministische netwerk beschrijving en het definiëren van de topologische netwerk regels. Het investeren in verbetering van topologische netwerk regels helpt ook bij het bouwen van stochastische netwerkmodellen met aanpassingen die bouwen van meshes vergemakkelijkt.

Wijzigingen t.o.v. projectplan: In de uitvoering van werkpakket 1.3 richten we ons op:

- (1) een simpel 3D geo-model met 1e orde onderverdeling van de mechano-stratigrafische lagen en 1^e orde randbreuken (Figuur 11). Door technische moeilijkheden bij het meshen van meerdere intersectie-lijnen tussen breuken en horizonten is besloten hiermee te wachten tot de verbeterde versie van de JewelSuite™ software (verzorgd door onze industriepartner Baker Hughes). Vanaf september 2014 zullen de eerste simulatie studies worden uitgevoerd om daarmee grootschalige druk variaties in het P6 blok te bepalen.
- (2) We zetten vooral in op 2D modelering van de meest relevante stratigrafische intervallen. Hiermee zijn de meshing vereisten simpeler en kan daardoor met meer ingewikkelde 2D netwerk geometrieën worden gerekend. De druk berekeningen uit het 3D model fungeren hierbij als randvoorwaarden voor de meer gedetailleerde 2D simulaties.
- (3) We hebben dit 1e jaar geïnvesteerd in DigiFract software ontwikkeling voor meer controle op geometrische beschrijving van scheurnetwerken als basis voor numerieke simulaties.
- <u>Gemaakte kosten</u>: We hebben 20k€ minder uitgegeven dan was begroot doordat geen 'consumables' uitgaven zijn gemaakt. Vooralsnog voldeed de beschikbare hardware voor simulaties. Vervolgsimulaties worden veeleisend met noodzaak voor upgrade numerieke hardware met daaraan verbonden kosten. Bovendien waren uitgaven voor technische veld hulpmiddelen (drone en toebehoren) reeds gemaakt en stonden tot onze beschikking.
- Kennisverspreiding: Nieuwe inzichten uit dit onderzoek zijn in de eerste plaats gedeeld met de shareholders van het project. Naast de twee-jaarlijkse TKI-Gas meetings onder initiatief van TNO, hebben wij het afgelopen jaar kwartaal meetings met industriesponsors gehouden waarin onze onderzoek voortgang werd besproken. Dit bood tevens een zeer geschikt, platform voor veel inhoudelijke discussie met betrekking tot methodologie en toepassingsgebieden tussen de industrie en vijf nauw betrokken universiteit's TKI-Gas projecten.
- **PR gelegenheden:** De eerste resultaten uit dit project zijn op 30 April 2014 gepresenteerd op het *European Geoscience Union* (EGU) meeting in Wenen. Bovendien is een extended-abstract geaccepteerd voor een presentatie op 18 Juni op het congres in Amsterdam van de *European Association of Geoscientists and Engineers* (EAGE). Met deze presentaties op de twee grootste fundamenteel en toegepaste geo-meetings in Europa wordt dit onderzoek goed onder de aandacht van wetenschappelijke collega's gebracht. Deze bijdragen kunnen worden gevonden:
 - EGU abstract: Hardebol, N., G. Bertotti, and G. J. Weltje 2014, Quantifying rock's structural fabric: a multi-scale hierarchical approach to natural fracture systems and stochastic modelling. http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-9937.pdf
 - EAGE abstract: N.J. Hardebol and G. Bertotti, 2014. Fracture-fault Networks and Role of Nested Topology on the Mechanical Response and Connectivity for Tight Gas Extraction. http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=75945

Bovendien streven we naar een publicatie van de eigenschappen en onderliggende basisprincipes van scheur-en-breuk-netwerk verdeling in Yorkshire in een fundamenteel Structureel Geologisch onderzoekstijdschrift.

Openbaar eindrapport

Dit project heeft tot doel om beter inzicht te krijgen in het natuurlijk scheur-en-breuk netwerk verdeling voor gaswinning uit laag-permeabele zandstenen en schaliegesteenten. We richten ons op de bestudering van gesteentelagen die aan het oppervlak liggen langs de Engelse Yorkshire oostkust. Deze gesteente vertonen voldoende overeenkomsten qua gesteentetype en geologische geschiedenis met de Nederlandse Posidonia schaliegesteenten van Jura ouderdom; een van de gesteentepakketten die mogelijk relevant zijn voor schaliegas winning. Door natuurlijke scheurnetwerk patronen in gesteentelagen in Yorkshire te bestuderen kunnen we betere interpretaties verschaffen voor vergelijkbare netwerken in de Nederlandse ondergrond die mogelijk schaliegas bevatten.

Beter begrip van de mechanische interactie tussen scheurnetwerken (10⁻¹-10² m) en gemiddeld grote breuken (10²-10⁴ m) hebben verschillende implicaties voor zowel laag-poreuze zandsteen reservoirs in de Nederlandse Noord Zee waar momenteel gas uit wordt gewonnen en voor mogelijk toekomstige winning uit schaliegas. Onze studie kan helpen bij het maken van betere voorspellingen van de reeds in het ondergrond aanwezige natuurlijke scheurnetwerken. Ten tweede kan een beter begrip van de drukverdeling en lokale afwijkingen ten gevolge van het bestaande scheur-en-breuk netwerk helpen bij het inschatten hoe nieuwe scheuren zich zouden vormen ingeval onder hoge druk vloeistof vanuit het boorgat wordt geïnjecteerd. In hoeverre zouden bestaande scheuren kunnen worden geopend en nieuwe scheuren worden gecreëerd om daarmee gas te ontsluiten. Bovendien hoe kunnen eventuele risico's op aardbevingen door beweging langs grotere breuken worden voorkomen.

De uit Yorkshire geïnterpreteerde scheurnetwerken tonen een aantal grote noord-zuid georiënteerde zones bestaande uit meerdere in elkaar overgaande scheuren. Deze scheuren zijn lateraal over enkele tientallen tot honderden meters te vervolgen. Feitelijk vormen deze grotere scheurzones oude breuken die aan het oppervlak langs de Yorkshire kust op Google Earth foto's goed zichtbaar zijn. Breuken met mogelijke vergelijkbare karakteristieken zijn aanwezig in de Nederlandse Broad Fourteens bekken en zichtbaar in seismische profielen zoals beschreven in de literatuur (o.a. de Jager, 2003, 2007). Naast deze 1^e en 2^e orde breuken bevat het scheurnetwerk een grote hoeveelheid oost-west georiënteerde scheuren. Deze 3^e orde scheuren zijn zo'n 2-7 meter lang en lopen veelal dood tegen de grotere N-S scheuren. Op kleinere 0.1- 3m schaal van 4^e en 5^e orde scheuren herhaalt deze structuur van op elkaar doodlopende scheuren zich. De hiërarchisch gedefinieerde oriëntatie sets op basis van lengte schalen vormen nieuwe voor deze studie zeer relevante bevindingen. De hiërarchische netwerk regels worden namelijk gebruikt in stochastische netwerk simulaties.

Door de stochastische modelleerparameters van het netwerk te wijzigen worden verschillende netwerken gecreëerd die ieder als input dienen in mechanische simulaties. Vergelijking van de mechanische voorspellingen zullen laten zien in hoeverre de definitie de essentiële aspecten van het natuurlijk scheurnetwerk beschrijven die van invloed zijn om het mechanische gedrag. Bovendien bieden de berekeningen van de mechanische response van de verschillende netwerkconfiguraties aanknopingspunten voor het maken van voorspellingen over de effecten van fraccing van reservoirgesteente.

De gevolgen voor lokale drukverdelingen kunnen het best worden bepaald wanneer voldoende nuances in netwerk geometrieën als input worden opgenomen in de mechanische simulaties. Echter, een grote hoeveelheid scheuren in deze mechanische simulaties levert de nodige uitdagingen op bij het genereren van de meshes. Daarom richten we ons voor de gedetailleerde netwerkbeschrijvingen op 2D domein studies. De bevindingen daarvan worden vervolgens toegepast op grotere 3D schaal waarin vooral de grotere randbreuken van het Broad Fourteens bekken worden gespecificeerd.

De resultaten van dit eerste jaar bieden met een grondige karakterisatie van natuurlijke scheurnetwerk systemen de basis voor mechanische simulaties en daarop gebaseerde berekeningen van lokale variaties in drukverdeling van het reservoirgesteente in vervolg studies.

Voor meer informatie kunt u contact opnemen met de uitvoerend onderzoeker van dit project: Nico Hardebol (<u>N.J.Hardebol@tudelft.nl</u>).

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, voor het TKI project TKIG01019 uitgevoerd door Agentschap NL.

Referenties

- Baecher, G. B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 15(2), 329–348. doi:10.1007/BF01036074.
- Bonnet, E., O. Bour, N. E. Odling, P. Davy, I. Main, P. Cowie, and B. Berkowitz, 2001, Scaling of fracture systems in geological media: Reviews of Geophysics, v. 39, no. 3, p. 347–383, doi:10.1029/1999RG000074.

Bour, O., and P. Davy, 1997, fault length distribution: Water Resources, v. 33, no. 7, p. 1567–1583.

- Boro, H., G. Bertotti, and N. J. Hardebol, 2012, Distributed fracturing affecting isolated carbonate platforms, the Latemar Platform Natural Laboratory (Dolomites, North Italy): Marine and Petroleum Geology, doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.09.012.
- De Jager, J. (2003). Inverted basins in the Netherlands, similarities and differences. Netherlands Journal of Geosciences, 82(3), 355–366.
- De Jager, J. (2007). Geological development. In Th.E. Wong, D. A. J. Batjes, & J. de Jager (Eds.), Geology of the Netherlands (pp. 5–26). Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences.
- Hardebol, N. J., and G. Bertotti, 2013, DigiFract: A software and data model implementation for flexible acquisition and processing of fracture data from outcrops: Computers & Geosciences, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2011.03.031.
- Gauthier, B. D. M., Franssen, R. C. W. M., & Drei, S. (2000). Fracture Networks in Rotliegend Gas Reservoirs of the Dutch Offshore and their Impact on Field Development Planning and Infill Drilling: ABSTRACT. Netherlands Journal of Geosciences, 79(1), 45–57. doi:10.1306/8D2B27A9-171E-11D7-8645000102C1865D
- Nicol, A., J. J. Walsh, J. Watterson, and P. A. Gillespie, 1996, Fault size distribution are they really power-law?: Journal of Structural Geology, v. 18, no. 95, p. 191–197.
- Strijker, G., G. Bertotti, and S. M. Luthi, 2012, Multi-scale fracture network analysis from an outcrop analogue: A case study from the Cambro-Ordovician clastic succession in Petra, Jordan: Marine and Petroleum Geology, v. 38, no. 1, p. 104–116, doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.07.003.