

Karakterisering av strømning gjennom en
forkastning med fault facies- og standardmodell
ved bruk av reservoarsimulator

Mastergradsoppgave i reservoarmekanikk

Carl-Martin Carstensen

Centre for Integrated Petroleum Research



Matematisk institutt
Universitetet i Bergen



November 2011

Anerkjennelse

Jeg vil først og fremst takke Øystein Pettersen som har vært min veileder i arbeidet med masteroppgaven. Hans tilgjengelighet, hjelp og innspill har vært uvurderlig.

Jeg vil takke mine foreldre, Kjersti og Helge, for motiverende ord og innspill under alle mine år som student. Jeg vil også takke min søster, Helene, for korrekturlesing og innspill.

Til sist vil jeg takke min samboer og kjæreste, Ranja. Takk for støtte, hjelp og forståelse under arbeidet med oppgaven.

Carl-Martin Carstensen,

Bergen, november 2011.

Sammendrag

Forkastninger har en betydelig innvirkning på strømnings i et reservoar. Hittil har forkastninger blitt modellert som en flate eller et plan i vanlige reservoarsimulatorer, men studier har vist at forkastninger ofte må regnes for å være volumer og ikke flater. En fault facies-modell tar høyde for dette ved å modellere forkastningene som volumer med facies som inneholder forkastningsegenskapene, men numerisk løsning av denne modellen er svært tidkrevende og i enkelte tilfeller umulig.

I dette studiet har forkastningsstrømmene blitt studert i reservoarsimulatoren ECLIPSE. To modeller har blitt modellert, en standardmodell hvor forkastningen er modellert som en flate, og en fault facies-modell der forkastningen er modellert som et volum.

Formålet med studiet var å undersøke hvordan forkastningsstrømmene var, om standardmodellen simulerte forkastningsstrømmene tilstrekkelig nøyaktig og om resultatene fra fault facies-modellen kunne reproduseres i en ekvivalent standardmodell (utvidet standardmodell).

Det ble gjort mange ulike kjøring med forskjellige forkastningsegenskaper. Barrierer ble implementert i både reservoaret og forkastningen. Resultatene fra studiet indikerte at standardmodellen ikke var tilstrekkelig nøyaktig. Det lyktes å gjenskape metningsbildet fra fault facies-modellen på en utvidet standardmodell, men trykkbildet var forskjellig mellom modellene. Det ble derfor konkludert med at fault facies-modellen bør anvendes når forkastningsmodeller skal simuleres.

Innhold

Anerkjennelse	i
Sammendrag	iii
I – TEORI	1
Kapittel 1 – Introduksjon	3
1.1 Petroleumsreservoar	3
1.1.1 Feller.....	4
1.2 Strømning og simulering	5
Kapittel 2 – Grunnleggende begrep og definisjoner	7
2.1 Porøsitet.....	7
2.2 Metning	7
2.3 Permeabilitet.....	7
2.4 Viskositet.....	8
2.5 Darcy-hastighet	8
2.6 Mobilitet og spesifikk tyngde.....	9
2.7 Fukt.....	9
2.8 Kapillartrykk	10
2.9 Oppløselighetsfaktor	11
2.10 Volumfaktorer	12
Kapittel 3 – Beta-modellen (black oil model).....	13
3.1 Antagelser for beta-modellen	13
3.2 Ligningssett for beta-modellen.....	13
3.2.1 Konserveringslover	13
3.2.2 Darcy-hastigheter	13
3.2.3 Bergart- og fluidparametre	14
Kapittel 4 – Hjørnepunktgeometri i reservoarsimulering.....	15
4.1 Strukturerte gitre	15
4.1.1 Hjørnepunktgitter	16
4.1.1.1 Koordinatlinjer	16

Kapittel 5 – Transmissibilitetsberegning	17
5.1 Kartesisk transmissibilitetsberegning.....	18
5.1.1 Blokkcentertransmissibilitet (OLDTRAN)	18
5.1.1.1 X-transmissibilitet	18
5.1.1.2 Y-transmissibilitet	19
5.1.1.3 Z-transmissibilitet.....	19
5.1.2 OLDTRANR-transmissibilitet	19
5.1.2.1 X-transmissibilitet	20
5.1.2.2 Y-transmissibilitet	20
5.1.2.3 Z-transmissibilitet.....	20
5.1.3 Hjørnepunkttransmissibilitet (NEWTRAN)	20
5.1.3.1 X-transmissibilitet	20
5.1.3.2 Y- og Z-transmissibilitet	21
5.1.4 HALFTRAN-transmissibilitet.....	21
5.2 Alternativ transmissibilitetsberegning.....	22
5.2.1 LINKPERM	22
5.2.2 PERMAVE.....	22
5.2.2.1 OLDTRAN	23
5.2.2.2 OLDTRANR	23
5.2.2.3 NEWTRAN	24
Kapittel 6 – Forkastninger	25
6.1 Hjørnepunktgeometri	25
6.2 Syvpunktstensilen.....	26
6.3 Ikke-naboforbindelser	27
6.4 Geologisk vinkling	28
6.4.1 Geometrisk karakterisering	28
6.4.2 Forflytning og separasjon.....	29
6.4.3 Oppbygning av forkastninger.....	30
Kapittel 7 – Forkastningsfacies	31
7.1 Modellering av forkastningsfacies	32
7.1.1 Eksempel	33
7.2 Fault facies-prosjektet ved CIPR.....	33

II – EKSPERIMENTELL BESKRIVELSE	37
Kapittel 8 – Metode	39
8.1 Modellene	39
8.1.1 FILL	41
8.1.1.1 Eksempel	41
8.1.2 Standardmodell.....	42
8.1.2.1 Utvidet standardmodell	43
8.1.3 Fault facies-modell	43
8.2 Simulering	44
8.2.1 Gouge ratio	46
8.2.1.1 Gouge ratio med fault facies-modell.....	46
8.2.1.2 Gouge ratio med standardmodell	47
8.2.2 Gouge ratio og barrierer	49
8.2.2.1 Gouge ratio og barrierer med fault facies-modell	50
8.2.2.2 Gouge ratio og barrierer med standardmodell.....	51
8.2.3 Shale smear	53
8.2.3.1 Shale smear med fault facies-modell	54
8.2.3.2 Shale smear med utvidet standardmodell.....	55
Kapittel 9 – Resultater og diskusjon.....	63
9.1 Gouge ratio	63
9.1.1 Kjøring 1	63
9.1.2 Kjøring 3	66
9.1.3 Resterende kjøring for gouge ratio.....	68
9.1.4 Sammendrag og diskusjon for gouge ratio.....	69
9.2 Gouge ratio og barrierer	70
9.2.1 Kjøring 1, BAR 1	70
9.2.2 Resterende kjøring for BAR 1.....	74
9.2.3 Kjøring 4, BAR 2	75
9.2.3.1 Perforering 1	76
9.2.3.2 Perforering 2.....	78
9.2.3.3 Sammendrag for kjøring 4, BAR 2	78
9.2.4 Resterende kjøring for BAR 2.....	79
9.2.5 Kjøring 1, BAR 3	82

9.2.6 Kjøring 1, BAR 4	83
9.2.7 Kjøring 1, BAR 5	83
9.2.8 Sammendrag og diskusjon for gouge ratio og barrierer	85
9.3 Shale smear	87
9.3.1 Shale smear med fault facies-modell	87
9.3.1.1 Kjøring 1	87
9.3.1.2 Kjøring 2	88
9.3.1.3 Kjøring 3	89
9.3.1.4 Kjøring 4	91
9.3.1.5 Kjøring 5	91
9.3.1.6 Kjøring 6	92
9.3.1.7 Kjøring 8	93
9.3.1.8 Kjøring 7	93
9.3.2 Shale smear med utvidet standardmodell for kjøring 7.....	96
9.3.2.1 NNC 1	97
9.3.2.2 NNC 2	101
9.3.3 Sammendrag og diskusjon for shale smear	110
9.4 Oppsummerende resultater og diskusjon	113
Kapittel 10 – Konklusjoner	117
Kapittel 11 – Videre arbeid	119
Nomenklatur	121
Referanser	125
III – APPENDIKS	129
Appendiks A – Transmissibilitetsberegning	131
Appendiks B – Inndatafiler til ECLIPSE	133
B1 – Inndatafil for fault facies-modellen	133
B2 – Inndatafil for forkastningsvolumet i fault facies-modellen	137
B3 – Inndatafil for forkastningen i standardmodellen.....	139
B4 – Utdrag av inndatafilen for ikke-naboforbindelsene i utvidet standardmodell.....	140

I – TEORI

Kapittel 1 – Introduksjon

En forkastning¹ er en bruddflate i et reservoar, og den har stor innflytelse på strømningsveier og hvordan produksjonen av reservoaret utarter seg. Forkastninger har i de seinere år blitt viet mye mer oppmerksomhet enn tidligere. Dette skyldes i hovedsak deres betydning innen petroleumsleting og produksjon. I vanlige reservoarsimulatorer modelleres en forkastning som en overflate eller et plan. Men studier har vist at forkastninger ofte må regnes for å være volumer og ikke flater. For å kunne simulere forkastningsstrømninger på en presis måte trengs det da mer enn hva som er tilgjengelig i de tradisjonelle simuleringsmodellene. Innføring av fault facies-modeller har gitt et mer korrekt bilde av strømmingene i en forkastning, men numerisk løsning av denne modellen er svært tidkrevende.

I dette prosjektet har strømningsmønsteret i en forkastning blitt studert med reservoarsimulatoren ECLIPSE. Det er blitt modellert to modeller, en standardmodell og en fault facies-modell. Forsøk har blitt gjort for å undersøke om standardmodellen er tilstrekkelig nøyaktig, hvordan strømmingene egentlig er og om disse kan karakteriseres med et standardgitter. Det har også blitt undersøkt om fault facies-gitter kan bli brukt til å konstruere resultat som seinere kan brukes til å konstruere et ekvivalent standardgitter.

For å få en dypere forståelse for de prosesser og hendelser som finner sted i et reservoar er det nødvendig å forklare noen begrep og definere en del viktige parametre.

1.1 Petroleumsreservoar

Et petroleumsreservoar er en underjordisk ansamling av hydrokarboner som befinner seg i porøse medier eller oppsprukne bergartsformasjoner. Hydrokarboner som råolje eller gass er fanget av overliggende bergartsformasjoner med lavere permeabilitet. Råoljen som man finner i oljereservoarer ble dannet i jordskorpen av rester fra levninger. Millioner av år med varme og trykk forandret restene av mikroskopiske planter og dyr til olje og naturgass [14].

Det er en del faktorer som er nødvendig for dannelse av et oljereservoar. Først kreves det et akvatisk miljø; døde levninger synker til bunns og blir med tiden begravd under flere lag av sedimenter². Når temperaturen har steget til rundt 50 til 70 °C på grunn av overliggende sedimenter, begynner organismene å koke. De omdannes til flytende hydrokarboner og

¹ For detaljert beskrivelse, se kapittel 6.4.

² Sedimenter er små partikler som kan bli transportert av vann eller et annet medium, og som med tiden legger seg ned på bunnen til et lag med faste partikler, i vann eller annen væske [23].

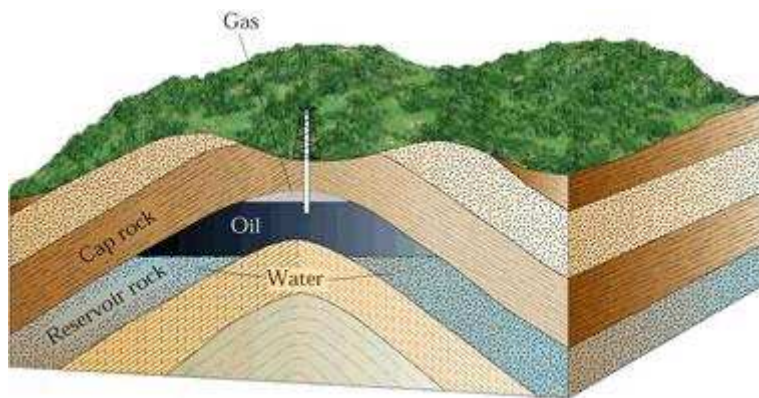
migrerer så videre inn i reservoarbergarten. For at dannelsen av oljereservoaret skal kunne skje er det til sist nødvendig at hydrokarbonene blir fanget i reservoarbergarten av overliggende impermeabel bergart [14].

Reservoarer finnes overalt fra jordoverflaten til 9000 meter under overflaten og forekommer i en rekke former, størrelser og aldre [14].

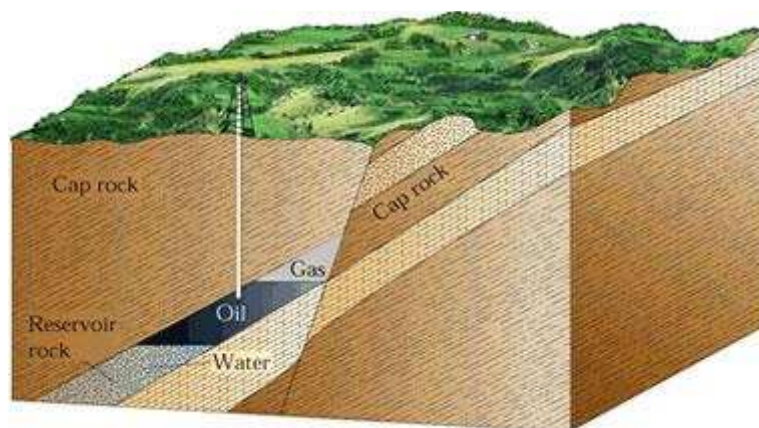
1.1.1 Feller

Fellene som kreves i det siste trinnet i reservoardannelsen klassifiseres i hovedsak inn i to typer; strukturelle og stratigrafiske feller. Et reservoar kan dannes ved hjelp av én type felle eller en kombinasjon av begge [14].

Strukturelle feller blir dannet ved en deformasjon i bergarten som inneholder hydrokarboner. Deformasjonen kan enten være folding³ eller forkastning [24].



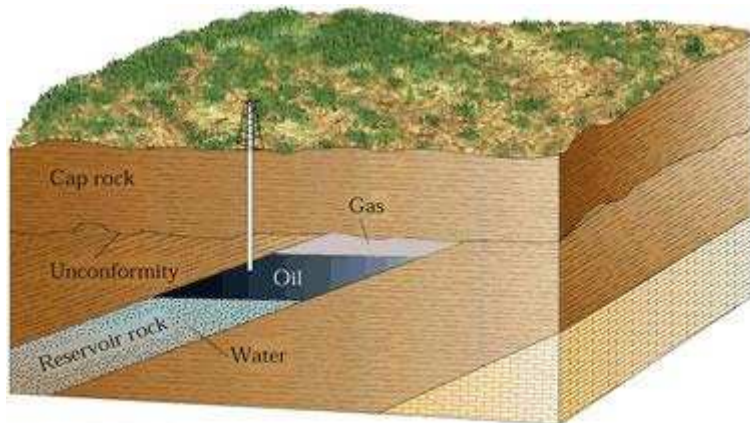
Figur 1.1 – Strukturell felle (folding) [15].



Figur 1.2 – Strukturell felle (forkastning) [15].

³ Folding er en geologisk prosess der bergarter blir utsatt for høyt trykk og temperatur slik at de blir plastiske (bøyelige) [3].

Stratigrafiske feller er de fellene som har en geometri som er formet av forandringer i litologien⁴ [24].



Figur 1.3 – Stratigrafisk felle [15].

1.2 Strømning og simulering

Forståelsen bak prosessene relatert til reservoarteknikk bygger på de fysiske konseptene innenfor kontinuumsmekanikk⁵. I henhold til disse konseptene vil en porøs bergart mettet med fluider danne et kontinuum. Det betyr at alle komponentene som er involvert (bergart, vann, olje og/eller gass) er tilstedeværende i ethvert element, eller volumetrisk del av reservoaret, selv om volumet er veldig lite og tilnærmet lik null. Dette gir grunnlaget for *filtreringsteorien* som beskriver strømmingen for fluider gjennom et porøst medium. De mest brukte numeriske simuleringsprogrammene for fluidstrøm i reservoarer baserer seg på denne teorien [30].

Reservoarsimulatorer brukes for å simulere nyttiggjøringen av et reelt reservoar uten å måtte ta omkostningene ved prøving og feiling i virkeligheten. For eksempel ved å teste forskjellige produksjonsstrategier for å finne den optimale før reservoaret blir satt i produksjon. Dessverre kan man ikke forvente at reservoarsimulatorer gir en eksakt beskrivelse av strømning og produksjon av et reservoar. Dette skyldes mange faktorer, men den viktigste er at beskrivelsen av et reservoar og randbetingelsene for ligningene for strømning i en porøs bergart er kun kjent med en stor usikkerhet. Poresystemet og strømmingen i dette systemet foregår på et så detaljert nivå at det er umulig å beskrive eller modellere. Hvis det skulle vise seg å være gjennomførbart vil det resulterende problemet bli for stort til å kunne løse med dagens datateknologi. Så problemene rundt simulering av strømning er et resultat av:

⁴ Litologi, et faguttrykk innen geologi, er en beskrivelse av en sedimentær bergart [10].

⁵ Kontinuumsmekanikk er grenen av mekanikk som tar for seg analyse av kinematikk og den mekaniske atferden til materialer modellert som sammenhengende masse fremfor partikler [8].

- Generalisering av reelle mikroskaladata fra makroskalaobservasjoner (seismikk og brønndata)
- Oppskalering av reservoaroppførsel på et detaljert nivå til et håndterlig omfang/størrelse.
- Usikkerhet i den beskrivende modellen (ligningene for flerfasestrøm i porøse media).

Med disse usikkerhetene i både inndata og rundt løsningsmetoden er det forståelig at eksakte svar ikke kan gis. Noe som kommer fram ved å sammenligne simulerte data med reelle felldata etter at feltet har vært i produksjon en viss tid. Men reservoarsimulering gir likevel en god beskrivelse av strøm, og er ofte beste kilde til forståelse av strøm i reservoaret. Det brukes mye med stor suksess, og ansees veldig viktig når beslutninger rundt planlegging av feltutvikling og operasjoner skal tas. Simuleringer kan avdekke verdifull informasjon rundt reservoarstrømninger og kan peke ut områder som kan representere en risiko for produksjonen eller som kan trenge nærmere undersøkelse [17].

Kapittel 2 – Grunnleggende begrep og definisjoner

2.1 Porøsitet

Et porøst medium er satt sammen av et fast stoff, kalt matrisen, og tomrom(porer) kalt porevolumet. Volumet av disse vil betegne henholdsvis V_M og V_P . Totalvolumet $V_B = V_M + V_P$ kalles bulkvolumet [16]. Porøsiteten til mediet er gitt ved;

$$\varphi = \frac{V_P}{V_B} \quad (2.1)$$

Porøsitet er dermed et mål på kapasiteten en bergart har til å lagre ett eller flere fluid.

2.2 Metning

Et porøst medium inneholder vanligvis flere fluider samtidig: vann, olje og gass. Metningen er den brøkdelen av det totale porevolumet V_p som inneholder vedkommende fluid [9].

Definisjonene blir da:

- Vannmetning: $S_w = \frac{V_w}{V_p}$ (2.2)

- Oljemetning: $S_o = \frac{V_o}{V_p}$ (2.3)

- Gassmetning: $S_g = \frac{V_g}{V_p}$ (2.4)

Når porevolumet er fylt med disse tre fluidene vil vi da ha;

$$S_w + S_o + S_g = 1 \quad (2.5)$$

2.3 Permeabilitet

Permeabilitet defineres innenfor geologien som et mål for hvor lett fluider strømmer gjennom et nettverk av porer og sprekker [11]. Darcys lov er en matematisk lov som sier at et volum av væske som passerer gjennom et spesifikt areal av et permeabelt materiale til en viss tid, er avhengig av materialets permeabilitet og hydrauliske gradient [11]. Ligningen til Darcys lov er gitt i (2.6). Hvis væskens strømningsrate er kjent, kan ligningen løses med hensyn på permeabiliteten, K .

$$Q = \frac{KA}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \Rightarrow K = \frac{QL\mu}{A\Delta p} \quad (2.6)$$

Q strømningsraten, A er arealet av tverrsnittet, μ er viskositeten til fluidet, L er lengden av det porøse mediet og Δp er trykkdifferansen over lengden L .

Et oljereservoar er ofte mettet av mer enn én fase. Den effektive permeabiliteten definerer da permeabiliteten for hvert fluid i det porøse mediet. For praktiske formål har man definert den såkalte relative permeabilitet for hver fluid fase. Denne er forholdet mellom den effektive permeabilitet for vedkommende fase og den absolutte permeabiliteten til mediet [9]. Det gir følgende ligninger:

- Relativ permeabilitet for vann: $k_{rw} = \frac{K_w}{K}$ (2.7)

- Relativ permeabilitet for olje: $k_{ro} = \frac{K_o}{K}$ (2.8)

- Relativ permeabilitet for gass: $k_{rg} = \frac{K_g}{K}$ (2.9)

Den relative permeabiliteten avhenger ikke bare av det porøse mediet, men av den relative mengden av de enkelte fasene som er til stede i mediet, dvs. metningene S_i og av vekselvirkningen mellom fasene [9].

2.4 Viskositet

Viskositet defineres som den egenskap ved et fluid at det motsetter seg at forskjellige lag i fluidet beveger seg med forskjellige hastigheter. Motstanden ytrer seg som en spenning i strømrretningen (skjærspenning) mellom lag som beveger seg i forhold til hverandre [7]. Det er altså en indre friksjon i fluidet. For en newtonsk⁶ væske er viskositet definert på følgende vis:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.10)$$

Der τ er skjærkraft mellom væskelagene, μ er viskositeten til fluidet og $\frac{\partial u}{\partial y}$ er hastighetsgradienten.

2.5 Darcy-hastighet

Darcy-hastigheten eller filtreringshastigheten er en makroskopisk "hastighet", og er beskrevet som (den virtuelle) farten en væskepartikkel har når den bruker tiden t for å traversere avstanden h laminært. Dette er ikke et mål for den fart partikkelen virkelig har hatt i porene,

⁶ En væske hvor flyte-hastigheten (skjærhastigheten) er proporsjonal med den kraft (skjærspenning) som virker på den. De fleste vanlige (lavmolekylære) væsker er newtonske [13].

siden den egentlige veien partikkelen har strømmet gjennom det tortuøse kanalsystemet vil være mye større enn lengden av prøven [16].

Darcys lov på differensialform (2.11) inkluderer tyngden. Det er en generalisering av ligning (2.6) og er den som er mest brukt i praksis.

$$\mathbf{u} = -\frac{K}{\mu}(\nabla p + \rho g \mathbf{k}) \quad (2.11)$$

\mathbf{u} er Darcy-hastigheten, K er permeabiliteten, μ er fluidets viskositet, ∇p er trykkgradienten til fluidet, ρ er tettheten til fluidet, g er tyngdeakselerasjonen og \mathbf{k} er enhetsvektoren i z-retning.

2.6 Mobilitet og spesifikk tyngde

- Mobilitet: $\lambda_l \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k_{rl}}{\mu_l}; l = o, w, g.$ (2.12)

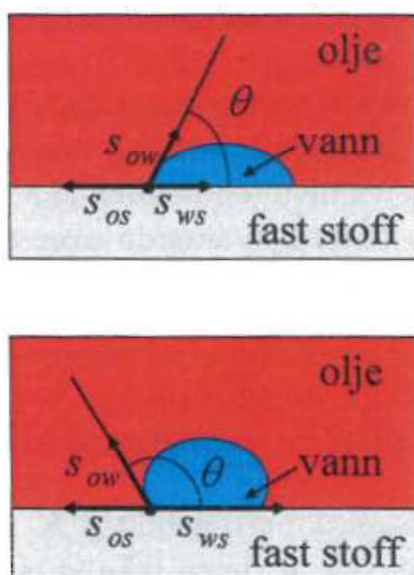
der μ_l er viskositeten til fluidet.

- Spesifikk tyngde: $\gamma_l \stackrel{\text{def}}{=} \rho_l g; l = o, w, g.$ (2.13)

der ρ_l er tettheten til fluidet og g er tyngdeakselerasjonen.

2.7 Fukt

Når to ikke-blandbare væsker er til stede samtidig nær en overflate av et fast stoff, vil det være en kohesiv kraft mellom væskemolekylene og molekylene i overflaten. Imidlertid kan denne kraften være større for den ene av væskene enn for den andre. Vi sier da at denne er den vætende væsken, mens den andre er ikke-vættende [9].



Figur 2.1 – Øverst er en vannvættende flate og nederst er en oljevættende flate. S representerer σ [9].

På grenseflatene mellom væskene og mellom væskene og fast stoff virker det krefter; grenseflatespenninger (σ). Disse kan defineres som kraft per lengdeenhet langs grenseflatene. I figur 2.1 er σ_{os} og σ_{ws} grenseflatespenningen mellom henholdsvis olje og fast stoff, og mellom vann og fast stoff. σ_{ow} er grenseflatespenningen mellom olje og vann. For statisk likevekt i horisontal retning har vi

$$\sigma_{ow} \cos \theta + \sigma_{ws} = \sigma_{os} \quad (2.14)$$

der θ er vætningsvinkelen (kontaktvinkelen) [9].

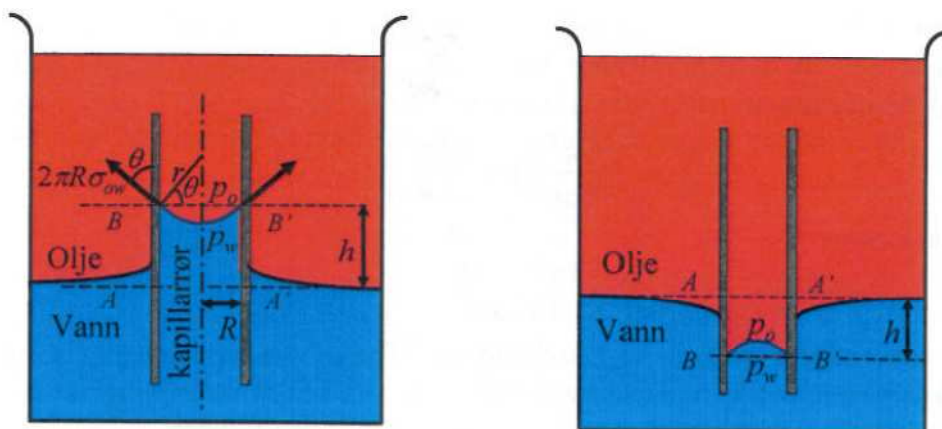
2.8 Kapillartrykk

Kapillartrykk (P_c) kan defineres som (den molekylære) trykkdifferansen på tvers av grenseflaten mellom to fluider. Trykkdifferansen er et resultat av differansen i både de interne (kohesjon) og de ytre (adhesjon) elektrostatiske kreftene som virker på de to fluidene. Kort kan man si at P_c er den molekylære trykkdifferansen mellom den vætende og den ikke-vættende væsken [30].

$$P_c = p_{nw} - p_w \quad (2.15)$$

I ligning (2.15) er kapillartrykket uttrykt som trykkdifferansen mellom ikke-vættende (p_{nw} , eng. non wetting) og vætende (p_w , eng. wetting) fase.

Kapillaritet kan observeres hvis man stikker et tynt kapillarrør med radius R ned i et kar med vann med et tynt oljesjikt på toppen. Vann vil suges opp eller presses ned i røret avhengig av om kapillarrøret er vann- eller oljevættende. Dette kalles kapillarrørseffekten. De krumme grenseflatene mellom vann og olje inne i rørene kalles meniskus [9].

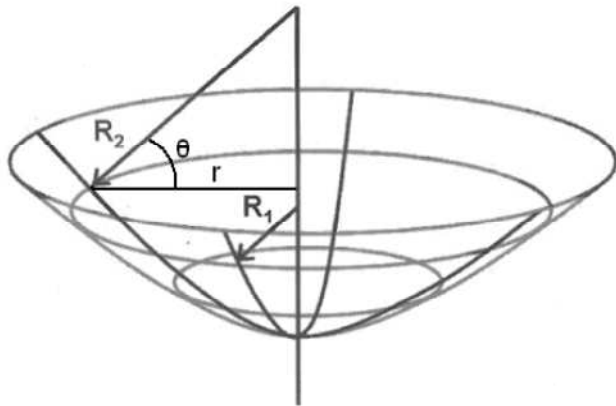


Figur 2.2 – Kapillarrør stukket ned i et kar med vann og olje. Til venstre er glasset vannvættende. Til høyre er glasset oljevættende. Rørenes dimensjoner er overdrevet på figuren [9].

Årsaken for krumningen er trykkdifferansen mellom de to fluidene, og overflaten vil alltid være konveks mot den vætende fasen. Krumningen på meniskusoverflaten kan karakteriseres med to radier (se figur 2.3). Trykkdifferansen er da gitt ved Laplace-ligningen [30]:

$$P_c = \sigma_{ow} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.16)$$

R_1 og R_2 beskriver radien til kurven og σ er overflatespenningen.



Figur 2.3 – En meniskusoverflate med radiene R_1 og R_2 [30].

Fra geometrien vet vi at $R_2 = \frac{r}{\cos \theta}$. Hvis formen på menisken er sirkulær vil $R_1=R_2$, og da kan ligning (2.16) skrives om til ligning (2.17), der r er poreradien.

$$P_c = \sigma_{ow} \left(\frac{2}{R} \right) = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta}{r} \quad (2.17)$$

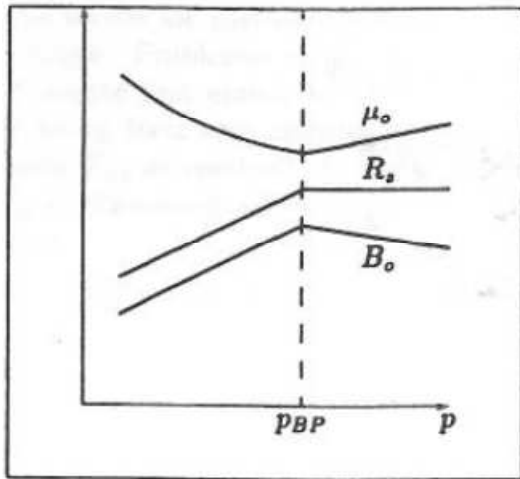
2.9 Oppløselighetsfaktor

Oppløselighetsfaktoren (R_s) er forholdet mellom det gassvolum som kan oppløses i et enhetsvolum olje, og dette enhetsvolumet (begge volum målt ved standardbetingelser⁷), når begge volum bringes til reservoarbetingelser (RC, eng. reservoir conditions) [16].

R_s er opplagt konstant for trykkverdier over kokepunktet, mens den for $p < p_{bp}$ ⁸ ofte er proporsjonal med trykket (lineær) [16]. Typisk R_s -kurve er vist i figur 2.4.

⁷ Standardbetingelser (STC, eng. Stock Tank Conditions) er definert som verdiene variablene har ved et trykk på 1 atm. og temperatur 15,5 °C [16].

⁸ p_{bp} er en kritisk trykkverdi for olje der de første gassboblene frigjøres fra oljen. Kalles kokepunkt for oljen og betegnes p_{bp} (eng. bubble point pressure) [16].



Figur 2.4 – Kvalitativt bilde av volumfaktor, oppløselighet og viskositet for olje [16].

2.10 Volumfaktorer

Volumfaktorer (B_w , B_o og B_g) er variabler som beskriver transformasjonen mellom overflate- og reservoarbetingelser. De er definert som forholdet mellom volumet av fluidene målt ved reservoarbetingelser og standardbetingelser [16]:

$$B_l = \frac{V_{L,RC}}{V_{L,STC}}; \quad l = o, w, g. \quad (2.18)$$

Uttrykt ved tettheter er definisjonen for vann og gass lik, mens vi for olje må ta hensyn til at oljevolumet vil inneholde en viss mengde oppløst gass ved reservoarbetingelser.

- Volumfaktor for olje: $B_o = \frac{\rho_{o,STC} + R_s \rho_{g,STC}}{\rho_{o,RC}} \quad (2.19)$

- Volumfaktor for vann: $B_w = \frac{\rho_{w,STC}}{\rho_{w,RC}} \quad (2.20)$

- Volumfaktor for gass: $B_g = \frac{\rho_{g,STC}}{\rho_{g,RC}} \quad (2.21)$

De inverse volumfaktorene $b_l = 1/B_l$ er mye brukt, og disse benyttes i beta-modellen i neste avsnitt.

Kapittel 3 – Beta-modellen (black oil model)

Beta-modellen er en trefasemodell for numerisk simulering av strømming for olje, vann og gass i et porøst medium. Olje er satt sammen av en rekke kjemiske komponenter, typisk flere hundre. Hver av disse komponentene vil ha sine egne strømningsregimer og vekselvirke med hverandre. I beta-modellen ser en bort fra sammensetningen av oljen, og definerer den som en fase i systemet, vann og gass er de to andre fasene [16].

3.1 Antagelser for beta-modellen

- Tre faser (olje, vann og gass).
- Fasene består av tre komponenter: olje, vann og gass.
- Oljekomponenten opptrer i oljefasen.
- Vannkomponenten opptrer i vannfasen.
- Gasskomponenten opptrer i gass- og oljefasen.
- Alle variablene er gitt i standardbetingelser.

3.2 Ligningssett for beta-modellen

3.2.1 Konserveringslover⁹

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi b_o S_o) + \nabla \cdot (b_o \mathbf{u}_o) = q_o \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi b_w S_w) + \nabla \cdot (b_w \mathbf{u}_w) = q_w \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi b_g S_g + \varphi R_s b_o S_o) + \nabla \cdot (b_g \mathbf{u}_g + R_s b_o \mathbf{u}_o) = q_g \quad (3.3)$$

3.2.2 Darcy-hastigheter

$$\mathbf{u}_o = -K\lambda_o\{\nabla p_o + b_o(\gamma_o + R_s\gamma_g)\mathbf{k}\} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{u}_w = -K\lambda_w\{\nabla p_w + b_o\gamma_w\mathbf{k}\} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{u}_g = -K\lambda_g\{\nabla p_g + b_g\gamma_g\mathbf{k}\} \quad (3.6)$$

⁹ En lov som beskriver hvordan en fysisk størrelse (masse, bevegelsesmengde, ladning,...) er bevart innenfor et lukket system kalles en konserveringslov, eller en kontinuitetsligning [16].

3.2.3 Bergart- og fluidparametre

$$S_w + S_o = S_L; \quad S_L + S_g = 1 \quad (3.7)$$

$$\varphi = \varphi(p_w) \quad (3.8)$$

$$\mu = \mu(p_w) \quad (3.9)$$

$$k_{ro} = k_{ro}(S_w, S_L) \quad (3.10)$$

$$k_{rw} = k_{rw}(S_w) \quad (3.11)$$

$$k_{rg} = k_{rg}(S_g) \quad (3.12)$$

$$P_{cwo} = P_{cwo}(S_w) = p_o - p_w \quad (3.13)$$

$$P_{cgo} = P_{cgo}(S_L) = p_g - p_o \quad (3.14)$$

Se kapittel 2.1-2.10 for beskrivelse av symboler.

Kapittel 4 – Hjørnepunktgeometri i reservoarsimulering

4.1 Strukturerte gitre

Kontinuerlige reservoarer med form, utstrekning og fordeling av petrofysiske¹⁰ egenskaper diskretiseres til celler der egenskapene er konstant i hver celle. Cellemengden (gitteret) utgjør til sammen en diskret tilnærming til reservoaret. Gitteret er en innretning for å kunne beregne strømmingene i reservoaret ved hjelp av numeriske metoder.

Det ideelle gitteret for numerisk beregning er kartesisk og regulært. Kartesisk betyr at alle celledene møtes i rette vinkler. Med regulært menes det som oftest at lengdene DX , DY og DZ er kompatible. Hvis komponentene for strømningsraten er lik i alle tre retninger vil kompatibel bety at $DX=DY=DZ$. Men for et reservoar er det vanlig at den vertikale strømmingen er mye mindre enn den horisontale strømmingen. Aspektforholdet (forholdet mellom de forskjellige cellelengdene) er slik at tiden en strømningspartikkel bruker på å bevege seg på tvers av en celle er omtrentlig lik for alle cellelengder. Dette betyr at man kan forvente at for de fleste gitterceller er DX og DY i samme størrelsesorden, mens DZ er mye mindre [17].

Hovedgrunnen til at kartesiske gitter ofte ikke brukes i simulering har tilknytning til geologien, representert av forkastninger. Forkastninger er bruddflater i et reservoar som ofte har en veldig kompleks geometri. Ofte er det ønskelig med et gitter som nøyaktig definerer geometrien til en forkastning, og dette er umulig ved å kun benytte et regulært gitter. En alternativ løsning er å benytte seg av *ustrukturerte gitre*. Disse tillater hvilket som helst antall sider på cellene og dermed kan alle geometrier modelleres. Men denne metoden er fortsatt under utvikling, derfor benyttes i hovedsak de tradisjonelle gitrene fortsatt [17].

Et strukturert gitter er karakterisert ved:

1. Alle cellene er sekssidet med åtte knutepunkt. Dvs. at de har utseendet som en kube.
2. Cellene er organisert slik at hver celle har en posisjon i gitteret som kan bestemmes unikt ved dens (i, j, k) -indeks [17].

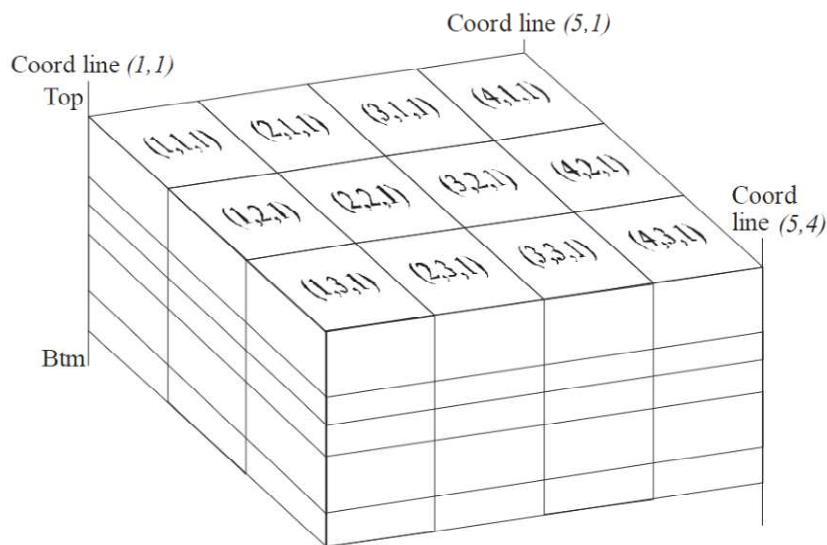
¹⁰ Bergartens fysiske egenskaper, som for eksempel porøsitet og permeabilitet.

4.1.1 Hjørnepunktgitter

Når alle åtte hjørnene av cellene er definert har man et strukturert gitter. I ECLIPSE er hjørnene til cellene begrenset til koordinatlinjer.

4.1.1.1 Koordinatlinjer

En koordinatlinje er en rett ikke-horisontal linje som er definert av to koordinater $(x, y, z)_{topp}$ og $(x, y, z)_{bunn}$. I de enkleste og mest vanlige tilfeller er koordinatlinjene vertikale. For det regulære og kartesiske gitteret er koordinatlinjene de vertikale linjene i xy-planet som kan sees ved knutepunktene mellom fire og fire celler. Koordinatlinjene danner et skjellett av linjer, der hver linje identifiseres av dens indeks (i, j) . Med unntak av kantcellene er alle koordinatlinjene forbundet med fire kolonner av celler. Det betyr at koordinatlinjen (i, j) er forbundet med de fire cellekolonnene $(i-1, j-1, k)$, $(i, j-1, k)$, $(i-1, j, k)$ og (i, j, k) . K tar alle verdier mellom $1, \dots, NZ$. I hver forbundet celle er det to hjørner som er på koordinatlinjen. Ett hjørne fra toppen og ett fra bunnen av cellen (se figur 4.1) [17].



Figur 4.1 – Celleindekser og koordinatindekser i et strukturert gitter [17].

Cellehjørnene ligger dermed på koordinatlinjene for alle lag i gitteret, og hjørnepunktene kan flyttes langs med tilhørende koordinatlinje. Koordinatlinjene må være rette linjer.

Kapittel 5 – Transmissibilitetsberegning

Permeabilitet er et mål for ledeevne. Man snakker aldri om ledeevne i ett bestemt punkt.

Ledeevne gir kun mening hvis den er beskrevet mellom to punkter, og den blir da en egenskap for strømning. Hvis man tar for seg permeabiliteten for et cellevolum, så blir det naturlig å tenke at permeabiliteten er en strømningssegenskap gjennom cellen. Men simulatorer løser strømningsligninger ved å benytte seg av verdiene som er definert i punkter. Og da blir det kun interessant å bruke permeabilitetene som mål for ledeevne mellom forskjellige punkter.

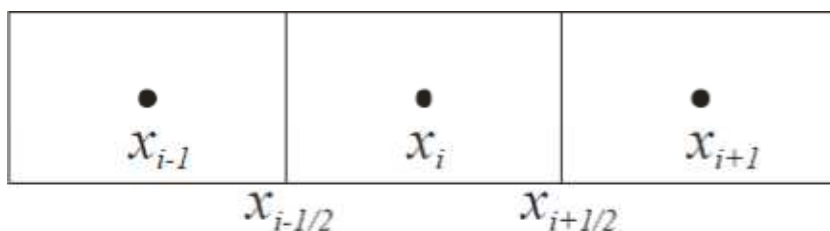
Pettersen (2006) [17] definerer transmissibilitet som permeabiliteten mellom to cellemidtpunkt. Det brukes et harmonisk gjennomsnitt av permeabiliteten mellom to celsenter for å uttrykke transmissibiliteten. Et harmonisk gjennomsnitt er et sentralitetsmål¹¹ for en tallrekke og er gitt ved [6]:

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i} = \frac{n \cdot \prod_{i=1}^n x_i}{\sum_{j=1}^n \frac{\prod_{i=1}^n x_i}{x_j}} \quad (5.1)$$

H er det harmoniske gjennomsnittet, n er antall tall i tallrekken og x_n står for verdien av tall n i tallrekken.

Når simulatoren beregner transmissibilitetene mellom to celler benytter den seg av halvpunkter (se figur 5.1). Men den generelle tolkningen er at transmissibiliteten beskriver ledeevnen mellom to cellemidtpunkt. Permeabiliteten i et halvpunkt er gitt under:

$$\frac{x_{i+1} - x_i}{K_{i+1/2}} = \frac{x_{i+1/2} - x_i}{K_i} + \frac{x_{i+1} - x_{i+1/2}}{K_{i+1}} \quad (5.2)$$



Figur 5.1 – Celler med midt- og halvpunkter [17].

¹¹ Sentralitetsmål er et matematisk mål på sentralitet i en tallrekke. Det mest brukte målet er aritmetisk gjennomsnitt, ofte referert til som gjennomsnitt [25].

5.1 Kartesisk transmissibilitetsberegning

Transmissibiliteten kan beregnes på fire måter i ECLIPSE:

1. Blokkcentertransmissibilitet (OLDTRAN).
2. OLDTRANR-transmissibilitet.
3. Hjørnepunkttransmissibilitet (NEWTRAN).
4. HALFTRAN-transmissibilitet.

5.1.1 Blokkcentertransmissibilitet (OLDTRAN)

Denne metoden baserer seg på avstanden mellom to celledentrum. Transmissibiliteten i x- og y-retning beregnes ved hjelp av avstanden mellom celledentre og tverrsnittsarealet fra DX , DY og DZ . En fallkorreksjon inngår også [21].

5.1.1.1 X-transmissibilitet

$$Tx_i = \frac{D \cdot TMx_i \cdot A \cdot L_{DIP}}{B} \quad (5.3)$$

Der Tx_i er transmissibiliteten mellom celle i og j (nabocellen i positiv x-retning). D er Darcy's konstant. TMx_i er transmissibilitetsmultiplikatoren for celle i . A er arealet av kontaktflaten mellom celle i og j . L_{DIP} er fallkorreksjonen. A , B og L_{DIP} er gitt ved følgende formler:

$$A = \frac{Dx_j \cdot Dy_i \cdot Dz_i \cdot NTG_i + Dx_i \cdot Dy_j \cdot Dz_j \cdot NTG_j}{Dx_i + Dx_j} \quad (5.4)$$

$$B = \frac{\left(\frac{Dx_i}{Kx_i} + \frac{Dx_j}{Kx_j} \right)}{2} \quad (5.5)$$

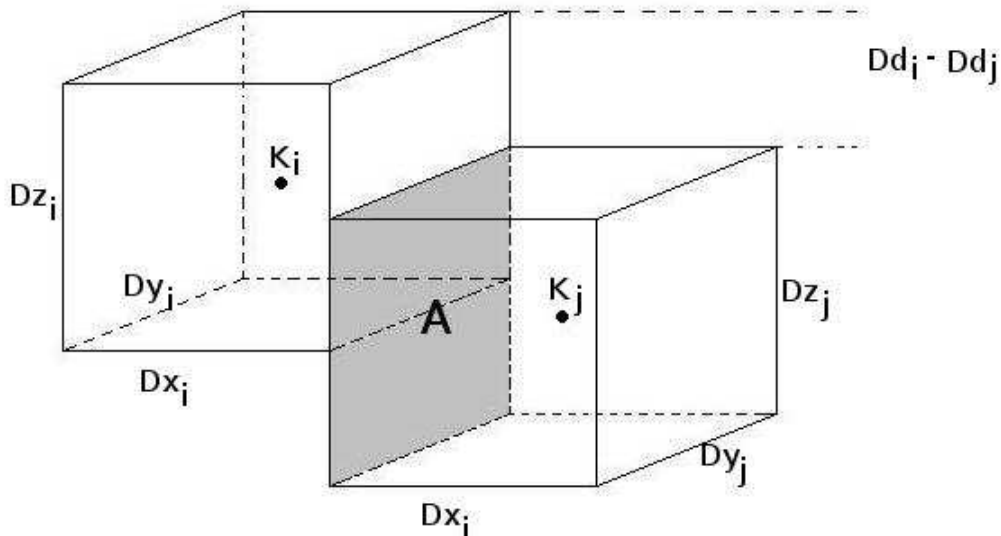
$$L_{DIP} = \frac{DHS}{DHS + DVS} \quad (5.6)$$

Der utrykkene for DHS og DVS er gitt under:

$$DHS = \left(\frac{Dx_i + Dx_j}{2} \right)^2 \quad (5.7)$$

$$DVS = (Dd_i - Dd_j)^2 \quad (5.8)$$

Dx er cellens lengde i x-retning, Kx er cellens permeabilitet, Dd er dybden cellen befinner seg på og NTG er netto-brutto-forholdet¹². Netto-brutto-forholdet inngår i formlene for x- og y-transmissibilitet, men ikke for z.



Figur 5.2 – To celler med tilhørende lengder, permeabilitet og felles kontaktflate.

5.1.1.2 Y-transmissibilitet

Utrykket for y-transmissibiliteten er på samme form som x-transmissibiliteten med passende ombyttinger for x og y.

5.1.1.3 Z-transmissibilitet

Z-transmissibiliteten er på samme form som x og y, men her inngår ikke fallkorreksjonen og netto-brutto-forholdet.

$$T_{Zi} = \frac{D \cdot TM_{Zi} \cdot A}{B} \quad (5.9)$$

$$A = \frac{Dz_j \cdot Dx_i \cdot Dy_i + Dz_i \cdot Dx_j \cdot Dy_j}{Dz_i + Dz_j} \quad (5.10)$$

5.1.2 OLDTRANR-transmissibilitet

Denne metoden baserer seg også på avstanden mellom to cellesentrum, men benytter en annen kombinasjon for tverrsnittsarealet og permeabiliteten [21].

¹² Netto-brutto-forholdet er en viktig parameter som indikerer den produktive brøkdelen av en reservoarbergart [30].

5.1.2.1 X-transmissibilitet

$$Tx_i = \frac{D \cdot TMx_i \cdot LDIP}{B} \quad (5.11)$$

Variablene i formelen har samme betydning som for OLDTRAN. B er gitt ved følgende formel:

$$B = \frac{\left(\frac{Dx_i}{A_i \cdot Kx_i} + \frac{Dx_j}{A_j \cdot Kx_j} \right)}{2} \quad (5.12)$$

Der A er gitt ved:

$$A_i = Dy_i \cdot Dz_i \cdot NTG_i \quad (5.13)$$

$$A_j = Dy_j \cdot Dz_j \cdot NTG_j \quad (5.14)$$

5.1.2.2 Y-transmissibilitet

Utrykket for y-transmissibiliteten er på samme form som x-transmissibiliteten med passende ombyttinger for x og y.

5.1.2.3 Z-transmissibilitet

Fallkorreksjonen og netto-brutto-forholdet inngår ikke i formlene for z-transmissibilitet.

$$Tz_i = \frac{D \cdot TMz_i}{B} \quad (5.15)$$

5.1.3 Hjørnepunkttransmissibilitet (NEWTRAN)

Denne metoden baserer seg på bruken av hjørnepunktene til cellene. Dette gjør det mulig å skille mellom cellefall og forkastningsforskyvning. Metoden beregner også forkastningstransmissibiliteter automatisk. Transmissibilitetene beregnes ut fra arealet av felles kontaktflate mellom to celler. For å inkludere fallkorreksjonen tas et indre produkt på vektoravstanden fra cellesentrum til cellesiden [21].

5.1.3.1 X-transmissibilitet

$$Tx_i = \frac{D \cdot TMx_i}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j}} \quad (5.16)$$

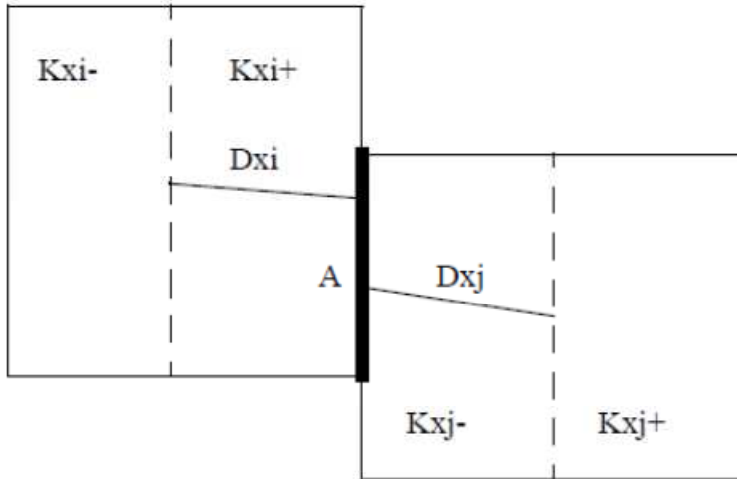
$$T_i = Kx_i \cdot NTG_i \cdot \frac{A \cdot D_i}{D_i \cdot D_i} \quad (5.17)$$

$$(A \cdot D_i) = A_X \cdot D_{iX} + A_Y \cdot D_{iY} + A_Z \cdot D_{iZ} \quad (5.18)$$

$$(D_i \cdot D_i) = D_{iX}^2 + D_{iY}^2 + D_{iZ}^2 \quad (5.19)$$

A_X , A_Y og A_Z er x-, y- og z-projeksjonsarealet av felles kontaktflate mellom celle i og j . D_{iX} , D_{iY} og D_{iZ} er x-, y- og z-komponentene av avstanden mellom cellesentrum og sentrum av respektiv cellediagon for celle i .

Utrykket for T_j er tilsvarende.



Figur 5.3 – Illustrasjon av x-transmissibilitet [21].

5.1.3.2 Y- og Z-transmissibilitet

Utrykkene for y- og z-transmissibilitet er tilsvarende som for x-transmissibilitet, med unntak av at netto-brutto-forholdet ikke inngår i z-transmissibiliteten.

5.1.4 HALFTRAN-transmissibilitet

Hjørnepunkttransmissibiliteten (NEWTRAN) mellom celle i og j blir utarbeidet av et harmonisk gjennomsnitt av halve celletransmissibiliteter (T_i og T_j). Dette gir oss muligheten til å bruke flere permeabiliteter innad i én celle. For celle i vil halvcelletransmissibilitet gi permeabilitetene Kx_{ir} og Kx_{il} for x-retning. Tilsvarende Ky_{ir} , Ky_{il} , Kz_{ir} og Kz_{il} for y- og z-retning. Dette gir oss seks permeabiliteter i én celle som kan gi seks transmissibiliteter mellom to celler [21].

Bruk av halvcellepermeabilitetene gir en mer nøyaktig oppskalering av permeabilitet uten å måtte endre på gitteret [21].

$$\bar{T}_{ir} = Kx_{ir} \cdot NTG_i \cdot \frac{A \cdot D_i}{D_i \cdot D_i} \quad (5.20)$$

$$\bar{T}_{jl} = Kx_{jl} \cdot NTG_j \cdot \frac{A \cdot D_j}{D_j \cdot D_j} \quad (5.21)$$

Ut fra vanlig NEWTRAN-beregninger blir da uttrykkene som følger:

$$\bar{T}_{ir} = \lambda_{ir} T_i \quad (5.22)$$

$$\bar{T}_{jl} = \lambda_{jl} T_j \quad (5.23)$$

Der λ er gitt som:

$$\lambda_{ir} = Kx_{ir} / Kx_i \quad (5.24)$$

$$\lambda_{jl} = Kx_{jl} / Kx_j \quad (5.25)$$

Når HALFTRAN anvendes i ECLIPSE må verdien på nøkkelordene MULTX og MULTX-være lik λ_{ir} og λ_{jl} .

5.2 Alternativ transmissibilitetsberegning

Transmissibilitetsberegningene OLDTRAN, OLDTRANR og NEWTRAN gir en effektiv gjennomsnittlig permeabilitet for kontaktflaten mellom to celler ut fra cellenes permeabilitet og dimensjon. Men man kan benytte seg av metoder som gir mer kontroll over gjennomsnittspereabilitetene som beregnes [21].

5.2.1 LINKPERM

LINKPERM-nøkkelordet gir muligheten til å bestemme gjennomsnittspereabiliteten og bruke den som inndata. Den instruerer ECLIPSE til å bestemme at cellepermeabiliteten skal virke fra cellesiden istedenfor cellesentrum. Istedenfor å beregne permeabiliteten mellom to naboceller som den gjennomsnittlige verdien av cellepermeabilitetene, så bruker ECLIPSE LINKPERM-permeabiliteten direkte som den forbindende permeabiliteten mellom to celler i transmissibilitetsberegningen. For eksempel hvis Kx_i blir valgt som den forbindende permeabiliteten i x-retning mellom celle i og j , da vil den erstatte både Kx_i og Kx_j i transmissibilitetsberegningene for OLDTRAN, OLDTRANR og NEWTRAN [21].

5.2.2 PERMAVE

Dette nøkkelordet brukes for å benytte alternative formler for å beregne gjennomsnittspereabilitet for cellesidene i transmissibilitetsberegningene [21]. Dette vises best med eksempler:

5.2.2.1 OLDTRAN

X-transmissibiliteten kan uttrykkes som:

$$Tx_i = \frac{D \cdot TMx_i \cdot A \cdot LDIP}{B} \quad (5.26)$$

B er nå på formen:

$$B = \frac{Dx_i + Dx_j}{2 \cdot Kx_{av}} \quad (5.27)$$

Der Kx_{av} er gjennomsnittspereabiliteten gitt ved et harmonisk gjennomsnitt:

$$Kx_{av} = \frac{(W_i + W_j)}{\left(\frac{W_i}{Kx_i} + \frac{W_j}{Kx_j}\right)} \quad (5.28)$$

Med vektene:

$$W_i = Dx_i \quad (5.29)$$

$$W_j = Dx_j \quad (5.30)$$

Kx_{av} er et spesialtilfelle av den gjennomsnittlige kraftloven som er gitt ved:

$$Kx_{av} = \left[\frac{W_i \cdot Kx_i^{POW} + W_j \cdot Kx_j^{POW}}{W_i + W_j} \right]^{\frac{1}{POW}} \quad (5.31)$$

med $POW = -1$.

Man kan få andre former for gjennomsnitt ved å endre verdien for POW . Man får et aritmetisk gjennomsnitt med $POW = 1$, og et geometrisk gjennomsnitt resulterer i en grenseverdi når $POW \rightarrow 0$ [21].

5.2.2.2 OLDTRANR

Formuleringen for OLDTRANR er på samme form som for OLDTRAN, men nå er vektene på formen:

$$W_i = \frac{Dx_i}{A_i} = \frac{Dx_i}{Dy_i \cdot Dz_i \cdot NTG_i} \quad (5.32)$$

$$W_j = \frac{Dx_j}{A_j} = \frac{Dx_j}{Dy_j \cdot Dz_j \cdot NTG_j} \quad (5.33)$$

5.2.2.3 NEWTRAN

Formuleringen for NEWTRAN er på samme form som de to andre, men nå er vektene på formen:

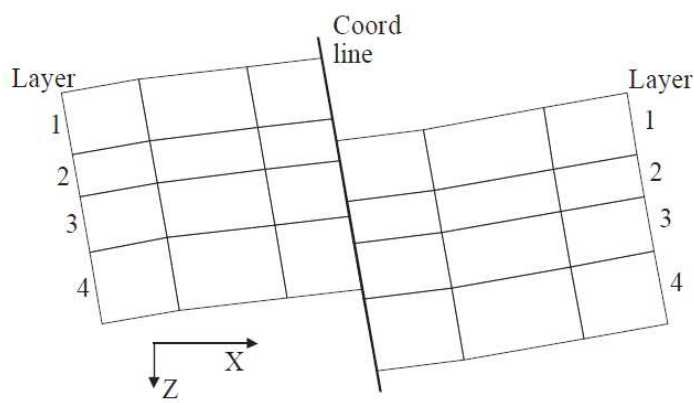
$$\frac{1}{w_i} = NTG_i \times \frac{A \cdot D_i}{D_i \cdot D_i} \quad (5.34)$$

$$\frac{1}{w_j} = NTG_j \times \frac{A \cdot D_j}{D_j \cdot D_j} \quad (5.35)$$

Kapittel 6 – Forkastninger

6.1 Hjørnepunktgeometri

Hjørnepunktgeometri er velegnet for modellering av forkastninger. Man benytter seg av muligheten cellene har til å forflytte seg langs med tilhørende koordinatlinje. Hvis en i utgangspunktet har et kontinuerlig gitter med en koordinatlinje gjennom midten av dette gitteret kan man forflytte cellene til høyre for koordinatlinjen. Da vil gitteret dele seg opp i en liggende og hengende side (se figur 6.1).

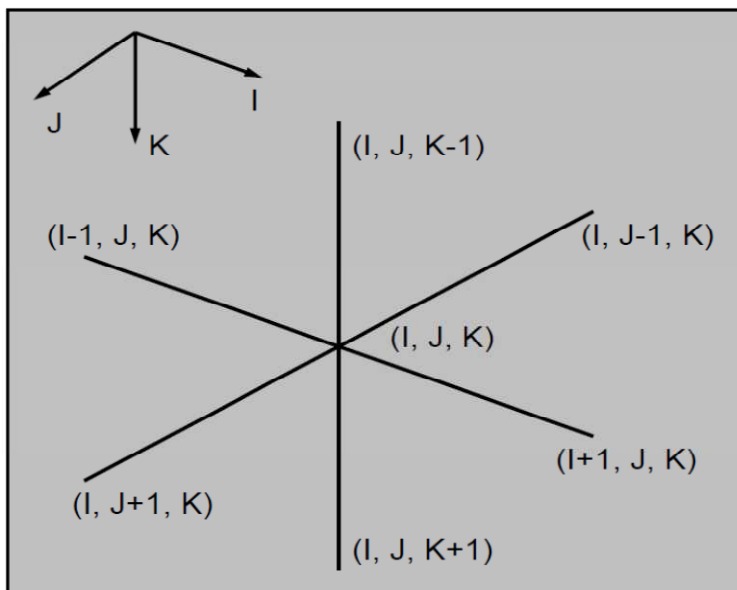


Figur 6.1 – Tverrsnitt av en forkastning i et hjørnepunktgitter [17].

Siden koordinatlinjene må være rette linjer kan man ikke modellere kurvede forkastninger. I et gitter vil koordinatlinjene danne et skjellelt av linjer. Dermed kan man ikke modellere y-forkastninger, siden dette vil medføre til kryssende koordinatlinjer [17].

6.2 Syvpunktstensilen

Syvpunktstensilen er den grunnleggende tensilen ECLIPSE benytter seg av for beregninger.



Figur 6.2 – Syvpunktstensilen [17].

Ved å bruke sentral differanse blir den numeriske approksimasjonen til differensialet $\frac{\partial f}{\partial x}$ i celle (i, j, k) :

$$\frac{\partial f}{\partial x}(i, j, k) \approx \frac{f(i+1, j, k) - f(i-1, j, k)}{C(i+1, j, k) - C(i-1, j, k)} \quad (6.1)$$

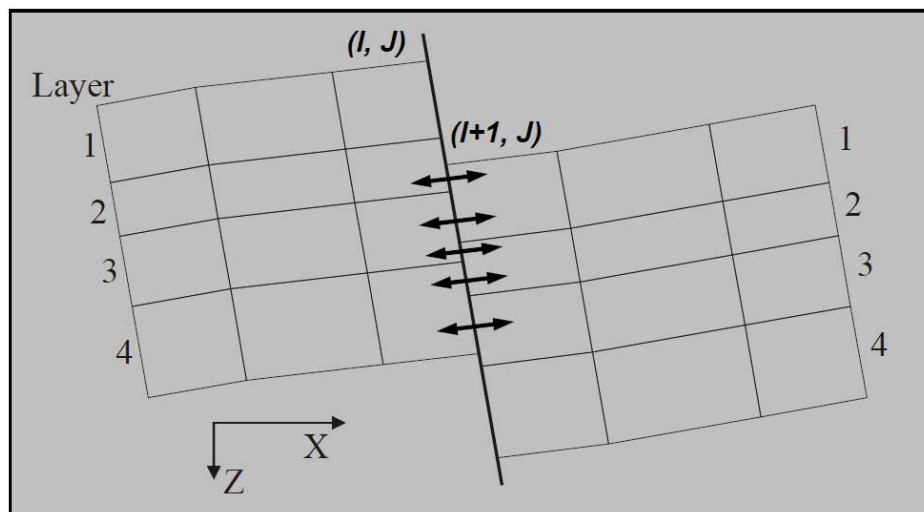
$C(i, j, k)$ er cellesenterkoordinaten for celle (i, j, k) . $f(i, j, k)$ betyr; f evaluert i sentrum av celle (i, j, k) [17].

Dette innebærer at $\frac{\partial f}{\partial x}(i, j, k)$ involverer cellene $(i-1, j, k)$ og $(i+1, j, k)$. På samme måte involverer $\frac{\partial f}{\partial y}(i, j, k)$ cellene $(i, j-1, k)$ og $(i, j+1, k)$, og $\frac{\partial f}{\partial z}(i, j, k)$ cellene $(i, j, k-1)$ og $(i, j, k+1)$. Så hvis man evaluerer f og dens differensialer i alle tre dimensjoner for celle (i, j, k) , så involverer dette cellen og de direkte naboene ($(i\pm 1, j, k)$, $(i, j\pm 1, k)$, $(i, j, k\pm 1)$) til cellen. De diagonale cellene involveres ikke [17].

De seks cellene omkring celle (i, j, k) i syvpunktstensilen kalles logiske naboceller [17].

6.3 Ikke-naboforbindelser

ECLIPSE beregner automatisk transmissibiliteter mellom celler med permeabilitet som inndata. Dette gjøres mellom cellepar som er naboer i syvpunktstensilen. Men hvis gitteret inneholder en forkastning må noen modifikasjoner gjøres.



Figur 6.3 – Sand-mot-sand-kommunikasjon i en forkastning [17].

I figur 6.3 er cellekolonnene (i, j) og $(i+1, j)$ separert av en forkastning. En følge av dette er at cellene $(i, j, 1)$ og $(i+1, j, 1)$ ikke lenger er i kontakt med hverandre, og da skal følgelig transmissibiliteten mellom dem være null. Samtidig er det nå en direkte strømningsvei mellom cellene $(i, j, 3)$ og $(i+1, j, 1)$, slik at transmissibiliteten mellom disse skal være forskjellig fra null. Pilene i figur 6.3 viser alle mulige strømningsveier mellom celler som har fysisk kontakt på tvers av forkastningen. Celler som er i kontakt på denne måten sies å være i sand-mot-sand-kontakt på tvers av en forkastning [17]. Sand-mot-sand-kontaktene i figur 6.3 er gitt i tabell 6.1.

Tabell 6.1 – Sand-mot-sand-kontakter for figur 6.3.

	Liggende side	Hengende side
Lag	2	1
	3	1
	3	2
	4	2
	4	3

Transmissibiliteter kan bli beregnet mellom ethvert cellepar og ikke bare mellom celler som er logiske naboer. Det mest vanlige tilfellet er for celler som er i sand-mot-sand-kontakt, men det er ingen restriksjoner på hvilke cellepar transmissibiliteter kan beregnes mellom [17].

Under en initialiseringsfase vil ECLIPSE automatisk oppdage alle sand-mot-sand-kontakter og forandre de nødvendige transmissibilitetene automatisk. For tilfellet over vil transmissibilitetene i syvpunktstensilen $((i, j, k)$ til $(i+1, j, k)$, for $k=1, 2, 3, 4)$ bli satt til null, og transmissibilitetene for sand-mot-sand-kontakt vil bli beregnet for alle cellepar i tabell 6.1 [17].

ECLIPSE bruker betegnelsen *non-neighbour connection*, eller ikke-naboforbindelse for tilfeller der celler ikke er logiske naboer og samtidig har transmissibilitet mellom seg. Et eksempel på en ikke-naboforbindelse fra figur 6.3 er celleparet $(i, j, 2)$ og $(i+1, j, 1)$.

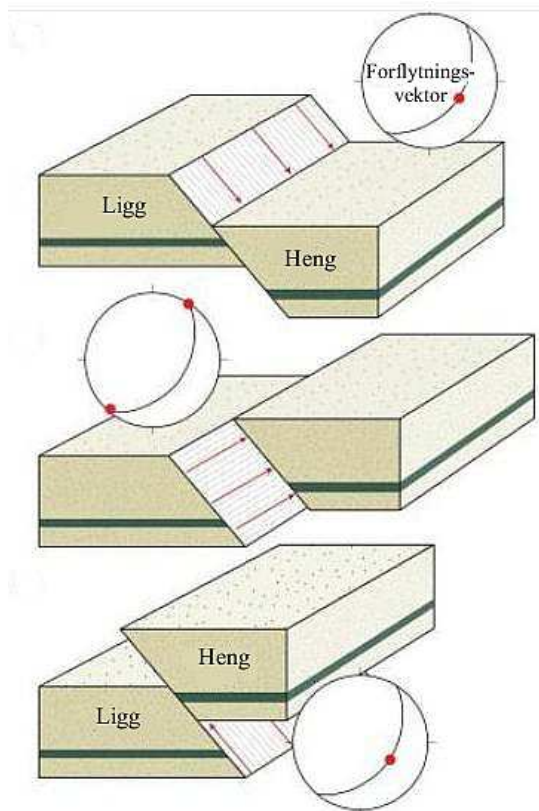
6.4 Geologisk vinkling

Forkastninger har i de seinere år blitt viet mye mer oppmerksomhet enn tidligere. Dette skyldes i hovedsak deres betydning innen petroleumsleting og produksjon. De kan hindre væskestrøm i noen tilfeller, men også lede væske i andre sammenhenger. Forkastninger kan forsegle reservoarer, men de kan også bedre kommunikasjonen ved å bringe tidligere isolerte sandlag i kontakt med hverandre [4].

En forkastning kan defineres generelt som enhver flate eller relativt smal sone der det har skjedd en parallellforskyvning av den ene siden i forhold til den andre. Med smal menes det at sonen er betydelig smalere enn forkastningens laterale og vertikale utstrekning [4].

6.4.1 Geometrisk karakterisering

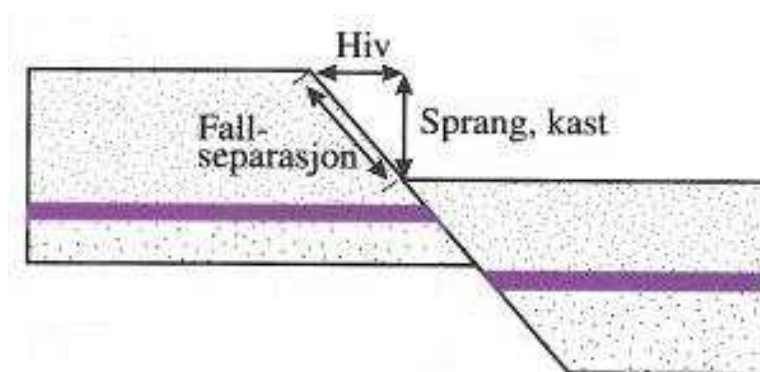
Forkastninger som ikke er fullstendig vertikale, separerer den overliggende hengblokken fra den underliggende liggblokken (se figur 6.4). Flatene over og under forkastningen kalles tilsvarende for *hengen* og *liggen*. Når hengblokken er nedsenket relativt til liggen, har man en *normalforkastning*. Dersom hengblokken er løftet opp over liggen, kalles forkastningen en *reversforkastning*. Ved lateralforskyvning er forkastningen en *sidelengsforkastning*, som enten er *sinistral* (venstrelateral) eller *dekstral* (høyrelateral) [4].



Figur 6.4 – Normal-, sidelengs- (sinistral) og reversforkastning [4].

6.4.2 Forflytning og separasjon

For å kunne forstå den strukturelle oppbyggingen av en forkastning er det viktig å vite om de forskjellige betegnelse for forflytning og separasjon. Innenfor kartlegging i petroleumsindustrien er *hiv*, *sprang/kast* og *fallseparasjon* de som er mest brukt.



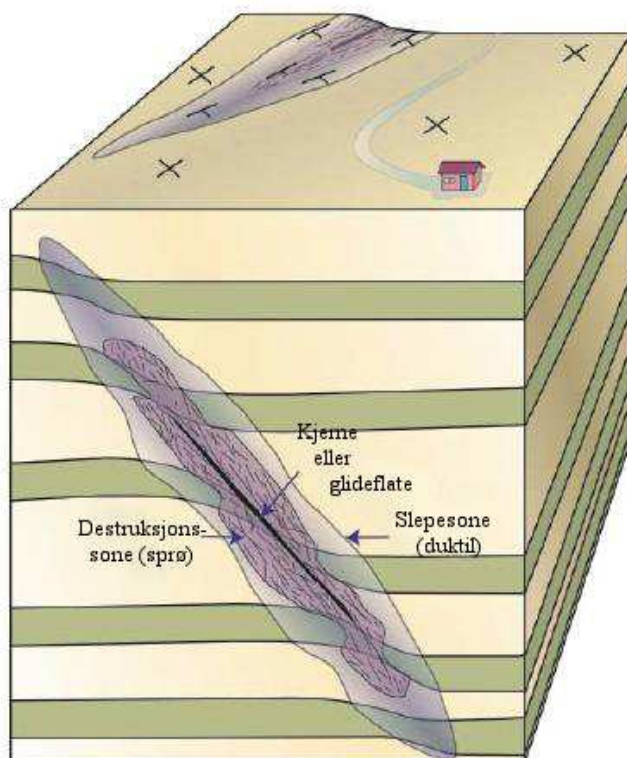
Figur 6.5 – Illustrasjon av forkastningskomponenter når profilen er normalt på forkastningens strøkretning (i fallretningen) [4].

Dersom vi tar for oss en profil normalt på forkastningens strøkretning (se figur 6.5), kaller vi den tilsynelatende forflytningen langs forkastningens fallretning for fallseparasjon, mens de tilsynelatende forflytningene horisontalt og vertikalt er henholdsvis hiv og sprang/kast [4].

6.4.3 Oppbygning av forkastninger

I seismiske og geologiske profiler på kart blir forkastninger ofte fremstilt som enkle linjer. De blir framstilt på samme måte som overflater og horisonter. I virkeligheten er forkastninger mye mer kompleks enn disse beskrivelsene.

Vanligvis er forkastninger kompliserte strukturer med opphopninger av brudd av forskjellig karakter. En forkastning kan deles inn i en *forkastningskjerne* eller glideflate, der det meste av spranget er lokalisert, og en omkringende *destruksjonssone* av mindre brudd eller deformasjonsbånd (se figur 6.6). Kjernen kan variere fra en enkel glideflate til en kompleks sone med deformasjon. Destruksjonssonen er karakterisert av en høyere tetthet av tensjonsbrudd, skjærbrudd og/eller deformasjonsbånd enn bergarten rundt. Destruksjonssonen finnes på hver side av forkastningen, men også rundt enden av forkastningskjernen. Bredden på destruksjonssonen kan variere både langs enkeltforkastninger og fra én forkastning til en annen. En typisk destruksjonssone rundt forkastninger i oljefelt på norsk sokkel har en bredde fra noen få meter opp til titalls meter [4]. Ofte finnes det en *slepesone* i tillegg til destruksjonssonen. Den kjennetegnes ved at lagene omkring forkastningen er bøyd. Slepesonen kan være både bredere og smalere enn destruksjonssonen og defineres ofte som en duktil deformasjon.



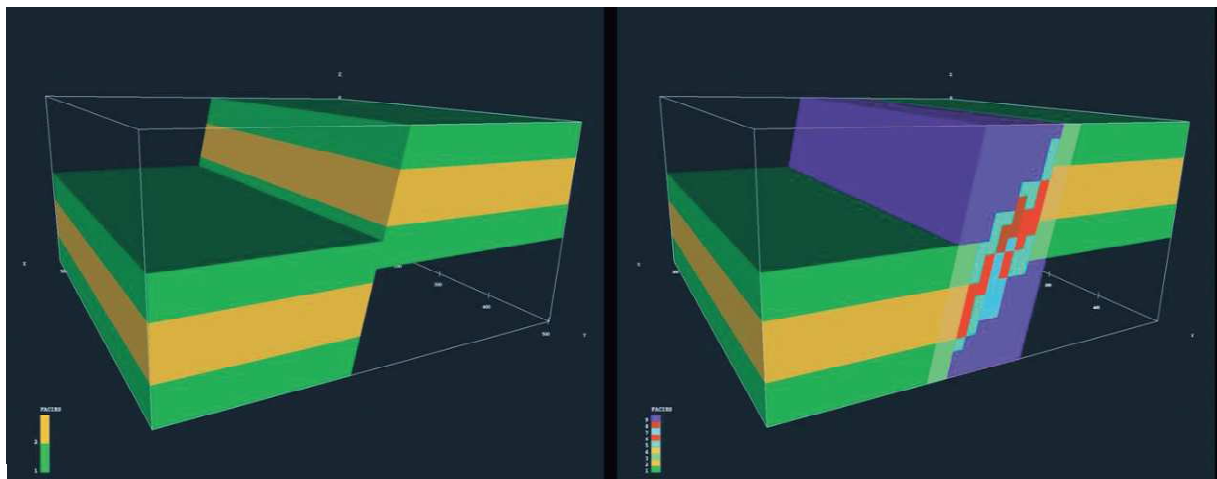
Figur 6.6 – Illustrasjon av en forkastning med glideflate, slepesone og destruksjonssone [4].

Kapittel 7 – Forkastningsfacies

Forkastningsfacies eller fault facies¹³ kan uformelt defineres som enhver bestanddel av en bergart med egenskaper som kommer fra tektonisk deformasjon [29].

Vi vet at forkastninger har en betydelig innvirkning på strømminger i et reservoar. I vanlige reservoarsimulatorer modelleres en forkastning som en overflate eller et plan. Normalt sett utgjør forkastningene en ubetydelig andel av det totale reservoarvolumet, og tykkelsen på forkastningene er ofte mye mindre enn dimensjonen på cellene som brukes i reservoarmodellen. Av denne grunn er det mest naturlig å modellere forkastningene som todimensjonale glideflater med transmissibilitetsmultiplikatorer og ikke-naboforbindelser for kommunikasjon og strømming gjennom forkastningene [26].

Men studier har vist at forkastninger ofte må regnes for å være volumer og ikke flater. Fordi inni slike forkastningsområder er karakteristikken helt annerledes enn for resten av reservoaret. En forkastningszone er et komplekst tredimensjonalt område der facies fra ulike deler av bergarten er blandet sammen og transformert til nye tektoniske facies. Dermed trengs det en egen stokastisk modell som baserer seg på oppbygningen av en forkastning for å kunne bestemme og kalkulere strømmingene korrekt. En fault facies-reservoarmodell tar høyde for disse faktorene. Forkastningene blir modellert som volumer med facies som inneholder forkastningsegenskapene [26].



Figur 7.1 – En tradisjonell forkastningsmodell (venstre) vs. en fault facies-modell (høyre) [29].

¹³Facies er et uttrykk brukt i geologien for å angi eiendommeligheter eller fellestrekk hos bergarter [1].

For å finne ut i hvilken grad en forkastning påvirker et reservoar kan fault facies-modellering være nyttig å bruke hvis følgende krav kan stilles:

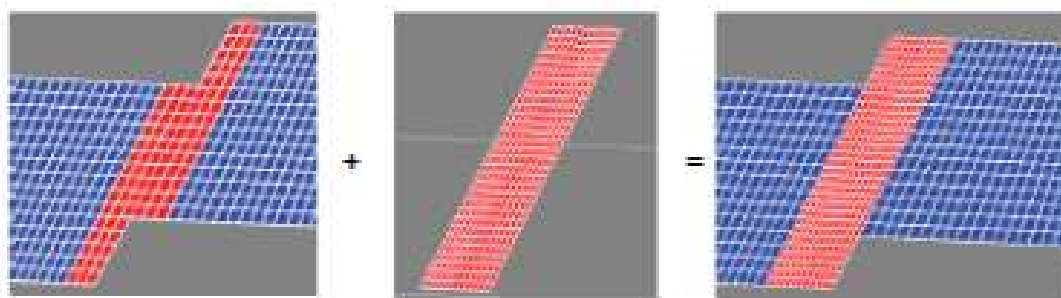
1. Volumet som er påvirket av deformasjon kan modelleres på en naturtro måte i et grid.
2. De belastede tredimensjonale feltene kan telles og kartlegges.
3. Belastningen i matriksbergarten produserer forutsigbare strukturer med karakteristiske størrelser, geometrier og petrofysiske egenskaper i sammenheng med omfanget av belastningen [29].

7.1 Modellering av forkastningsfacies

Modellering av forkastningsfacies kan oppsummeres i følgende hovedtrinn:

1. Modellering av et tradisjonelt gitter.
2. Modellering av facies i det tradisjonelle gitteret.
3. Petrofysisk modellering i det tradisjonelle gitteret.
4. Forbedring av gitteret i forkastningssonen.
5. Modellering av forkastningsfacies.
6. Modellering av petrofysikken i forkastningssonen.
7. Oppskalering av gitteret for forkastningssonen.
8. Sammenslåing av det tradisjonelle gitteret og gitteret for forkastningssonen [26].

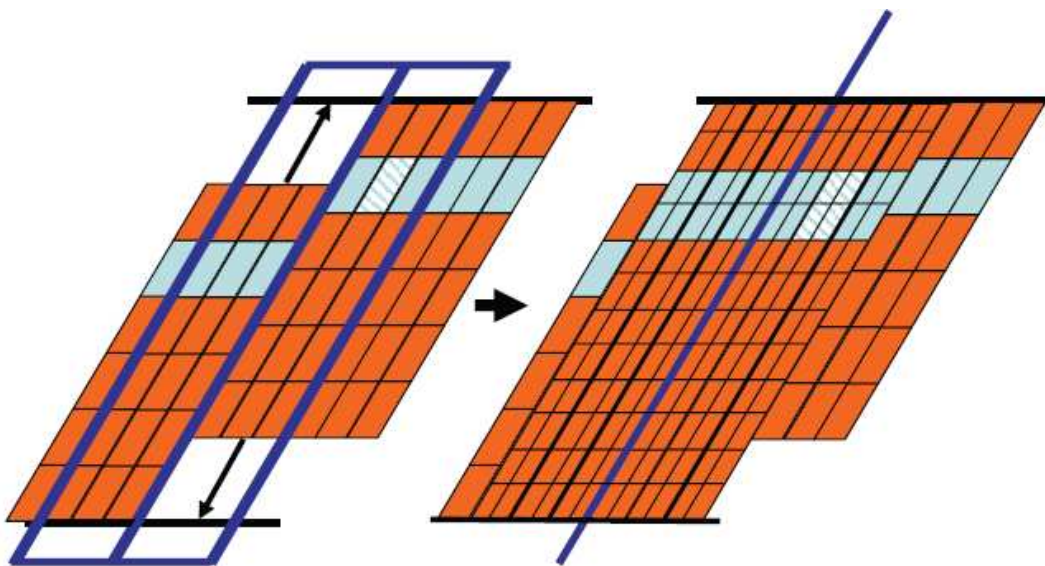
Forkastningen blir først definert i gitteret på den tradisjonelle måten (som en flate). Man trekker så forkastningssonen ut fra reservoarmodellen og behandler den alene med en finere gitteropløsning. Den lokale gitterdefineringen av forkastningssonen vil senere erstatte den grovere gitterdefineringen i forkastningsregionen (se figur 7.2) [27].



Figur 7.2 – Sammenslåing av grovt og fint gitter ved å erstatte de grove forkastningssonecellene med fault facies-celler [27].

7.1.1 Eksempel

For å illustrere metoden kan vi benytte oss av et eksempel hentet fra Soleng et al., (2007) [26] der forkastningssonen strekker seg med en bredde på tre celler inn i både liggen og hengen på forkastningen. Man tar for seg de grove cellene i forkastningssonen og gjør hver enkelt celle om til mindre celler med en faktor på to i x-, y- og z-retning. Deretter strekkes hver celle i z-retning for å forsikre at gitteret har den samme høyden på hver side av forkastningsplanet. Dette vises tydelig i figur 7.3. Hver av de markerte cellene i den venstre figuren har blitt til fire celler i den høyre figuren, og disse er strekt i z-retning sammenlignet med utgangspunktet.



Figur 7.3 – Strekking av celler i forkastningssonegitteret [27].

7.2 Fault facies-prosjektet ved CIPR

I fault facies-prosjektet (forkastningsfacies-prosjektet) ble forkastningsstrømmingene modellert nøyaktigere ved å bruke et forkastningsgitter (volum) som tar høyde for de lokale heterogenitetene som finnes i en forkastning. Dette gir forbedrede kalkuleringer for strømminger gjennom forkastningen og for interne strømminger innad i forkastningen.

Et preliminært og kvalitativt sensitivitetsstudie på modelleringsparametrene ved forkastningsfacies ble gjort som en del av FF-prosjektet ved CIPR. Fachri et al. (2011) [2] følger opp dette arbeidet ved å blant annet studere modellert fluidstrømning og reservoarresponser ved innføring av forkastningsfacies.

Et utdrag av resultatene fra dette arbeidet er gitt under:

- Simuleringen viste at det forekom ulike strømningskarakteristikker inni forkastningen. Som for eksempel varierende hastigheter for vannfronten, endring av form på vannfronten, kanalisering og diversjon av fluidstrøm, dannelse og utvinning av fanget olje.
- Modelleringsfaktorene kan rangeres i følgende grad av innvirkning på utfallet av modelleringen og på reservoarresponser:
 1. Tykkelse på forkastningskjernen.
 2. Hvilken forregningsfunksjon som benyttes.
 3. Konfigurasjonen av sedimentære facies.
 4. Prosentandelen av forkastningsspranget som befinner seg i forkastningskjernen.
 5. Konfigurasjonen av forkastningssystem.
 6. Maksimal bredde av destruksjonssonen.
- Reservoarresponsene for de simulerte reservoarene avhenger hovedsakelig av hvor mye rom som er tilgjengelig for strømming i helningsretningen til forkastningen.

Fault facies-prosjektet viste at konseptet med forkastningsfacies var noe som fungerte. Følger av resultatene over kan være svingete strømningsbaner og at tidsavhengige prosesser som vannmetningsoppbygning som følge av ulike fronthastigheter kan forekomme. Slike vannmetningsoppbygninger kan frembringe midlertidige strømningsbarrierer [18]. Det kommer dermed klart fram at strømninger gjennom forkastninger er mye mer kompleks enn den enkle metoden simuleringsprogrammene benytter. For å kunne simulere forkastningsstrømninger på en presis måte trengs det da mer enn hva som er tilgjengelig i de tradisjonelle simuleringsmetodene.

Selv om konseptet med forkastningsfacies fungerer så er det vanskelig å benytte seg av dette på et reelt reservoar. Et reservoar har vanligvis mange kryssende forkastninger og da vil det endelige gitteret til slutt inneholde millioner av celler og forbindelser. Numerisk løsning av den endelige koeffisientmatrisen vil da være ekstremt tidkrevende og kanskje umulig [18].

En alternativ metode for å løse overnevnte problem er presentert i et internt notat av Pettersen (2010) [18]. Idéen går ut på å konstruere forkastningsfaciesgitrene som separate uavhengige innretninger som kan løses individuelt og isolert. For deretter å koble de opp mot det grovere

gitteret og andre forkastningsfaciesgitre. Dette gjøres ved hjelp av beskjedutveksling¹⁴ på en parallell datamaskin eller på en nettverksgruppe med datamaskiner. Men det kan også gjøres sekvensielt.

¹⁴ Form for kommunikasjon innenfor informatikk som brukes i parallell databehandling, objektorientert programmering og som kommunikasjon mellom prosesser [12].

II – EKSPERIMENTELL BESKRIVELSE

Kapittel 8 – Metode

Denne delen av oppgaven tar for seg arbeidet rundt simuleringene som er blitt gjort. Modellene vil bli definert og det vil bli forklart hvordan disse er blitt konstruert. Det er blitt gjort en rekke simuleringer, motivene og tankene bak de forskjellige simuleringene vil bli forklart inngående.

Formålet med simuleringene er å studere hvordan strømmingene er gjennom en forkastning. Videre er det ønskelig å karakterisere strømmingene i en standardmodell og undersøke om fault facies-gitter kan brukes til å konstruere resultat som seinere kan brukes til å lage et ekvivalent standardgitter.

8.1 Modellene

I dette studiet har det blitt benyttet en rektangulær reservoarmodell med et konstant forkastningsprang som opptrer midt i modellen. Det er benyttet to forskjellige modeller, en standard- og en fault facies-modell. I standardmodellen er forkastningen modellert som et plan eller flate med ikke-naboforbindelser med transmissibilitetsmultiplikatorer. I fault facies-modellen er forkastningssonen et volum med facies som inneholder særegne forkastningsegenskaper. Petrofysikken og geometrien utenfor forkastningssonen er lik for begge modellene.

Gitteret er bygget opp av $40 \times 30 \times 15$ celler. Blokkstørrelsene er konstant i x-, y- og z-retning for alle celler utenom cellene som utgjør forkastningsvolumet (cellene $(i, j, k = 20, 1-30, 1-15)$ og cellene $(i, j, k = 21, 1-30, 1-15)$) i fault facies-modellen. Lengden av forkastningscellene ble halvert i x-retning for å unngå en veldig bred forkastningssone. For at standardmodellen og fault facies-modellen skal stemme overens geometrimessig ble cellene også halvert i standardmodellen, selv om de her ikke vil opptre som et forkastningsvolum. Lengden av cellene i reservoaret er $\Delta x = \Delta y = 50$ meter og $\Delta z = 15$ meter. Forkastningscellenes utstrekning i x-retning er $\Delta x = 25$ meter.

Reservoaret består av 15 geologiske lag av sander med høy porøsitet og permeabilitet øverst, og med gradvis dårligere kvalitet nedover. Porøsiteten og permeabiliteten er konstant i hvert lag. Permeabiliteten er lik i x- og y-retning for hvert lag, mens permeabiliteten i z-retning utgjør 15 % av x og y. Se tabell 8.1 for porøsiteter og permeabiliteter for alle lag.

Tabell 8.1 – Porøsiteter og permeabiliteter for alle lag.

Lag (k -indeks)	ϕ	K_x og K_y [mD]	K_z [mD]
1	0,340	12000	1800
2	0,340	11000	1650
3	0,320	8000	1200
4	0,310	7200	1080
5	0,310	6800	1020
6	0,305	6300	945
7	0,290	5500	825
8	0,285	4500	675
9	0,275	3900	585
10	0,260	3300	495
11	0,260	2500	375
12	0,255	2000	300
13	0,250	1500	225
14	0,245	500	75
15	0,240	200	37,5

Reservoaret består av kun to faser; olje og vann. Dette fordi det er ønskelig å holde reservoarmodellen enklest mulig for å unngå komplikasjoner som ikke er direkte i sammenheng med det som skal studeres.

Alle fluid- og bergartsegenskaper, samt likevektsinitialisering er hentet fra oppgave fire i kurset mat255 av Øystein Pettersen [19]. Det som inngår for fluidene og bergarten er to-fase relativ permeabilitetskurver, PVT^{15} for vann, PVT for olje, reservoarkompressibilitet, overflatetettheter og boblepunkt for olje. I likevektsinitialiseringen inngår datumdyp, referansetrykk ved datumdyp, olje-vann-kontakt (OWC), gass-olje-kontakt (GOC) og kapillartrykk ved olje-vann-kontakt ($P_{cow}(OWC)$). Datumdyp for et reelt reservoar bestemmes ofte på et dyp der tidlige målinger av trykk ble gjort. Alle celletrykk vil bli kalkulert ut fra fluidtrykkgradienten og det supplerte trykket ved datumdyp [17]. OWC (eng. oil-water contact) er dybden der skilleflaten mellom oljesone og vannsone opptrer. Under OWC finnes det normalt sett ikke olje [30]. GOC (eng. gas-oil contact) er dybden der skilleflaten mellom

¹⁵ PVT (eng. pressure, volume, temperature). Termodynamisk tilstandsligning som beskriver tilstanden til et stoff ved visse fysiske forhold [28]. I dette tilfellet; trykk, volum og temperatur.

oljesonen og gasskappen opptrer. Under GOC kan gass bare eksistere som oppløst gass i oljen [30].

Forkastningen har et sprang på 105 meter og er mellom celle 20 og 21 i x-retning.

Det er blitt implementert to brønner i modellen, én injeksjonsbrønn og én produksjonsbrønn. Se tabell 8.2 for spesifikasjoner for brønnene. Hvilke lag som er perforert av brønnene varierer gjennom studiet og vil bli spesifisert seinere.

Tabell 8.2 – Brønnsesifikasjoner.

Brønnnavn	Brønntype	Plassering (<i>i, j</i>)	Prod./inj.-rate [Sm^3/D]	Bhp ¹⁶ maks/min [bar]	Brønndiameter [m]
I1	Injektor	(10,15)	7000	500 (maks)	0,31
P1	Produsent	(31,16)	6000	227 (min)	0,31

Injeksjon av vann starter et halvt år etter produksjonsstart. Varigheten på simuleringene er 14 år (5114 dager), fra januar 2011 til januar 2025. Geometrien med tilhørende petrofysiske størrelser ble for begge modellene modellert i FILL.

8.1.1 FILL

FILL er program som lar deg enkelt produsere geometrien av reservoargitteret med tilhørende petrofysiske egenskaper, og bruke dette som inndata i ECLIPSE. Hovedpoenget med FILL er å generere hjørnepunktsdata som definerer formen og posisjonen til cellene i gitteret ved interpolasjon fra et redusert datasett. FILL er fordelaktig å bruke når forkastninger skal modelleres. Den inneholder et sett av smarte teknikker for definering av vertikale og skrå forkastninger [20]. Under følger en rask gjennomgang av kommandoene som ble benyttet i datafilen i FILL. De blir forklart gjennom et enkelt eksempel.

8.1.1.1 Eksempel

```
SPECCGRID
4 4 4 1 F /
DXV
4*50 /
DYV
4*50 /
TOPS
16*2000 48* /
DZ
```

¹⁶ Bhp (eng. bottom hole pressure). Bunnhullstrykket i brønnen.

64*15 /
FILL

Kommandoen SPECCGRID definerer type gitter. I eksempelet over er det fire blokker i x-retning, fire blokker i y-retning, fire blokker i z-retning, ett reservoar og det radielle valget er falskt, hvilket betyr at gitteret er kartesisk. Kommandoene DXV og DYV definerer et ortogonalt gittersystem av fire steg med lengde 50 meter i både x- og y-retning. Kommandoen TOPS definerer dybden på toppen av de 16 cellene i topplaget på reservoaret til å være på 2000 meter. DZ-nøkkelordet definerer tykkelsen på de 64 cellene i reservoaret til å være 15 meter. Avslutningsvis brukes nøkkelordet FILL for å generere gitteret på en slik form at det kan anvendes i ECLIPSE.

ZCORN S

```
-- Operator Verdi Ih1 Ih2 I1 I2 Jh1 Jh2 J1 J2 Kh1 Kh2 K1 K2  
'+' 10 1 2 3 5 1 2 1 5 1 2 1 5 /
```

Kommandoen ZCORN definerer hjørnene i grid-cellene. Den er velegnet for å spesifisere forkastninger. S-en markerer at én eller flere linjer med data følger etter nøkkelordet. '+' markerer at vi tilfører noe nytt til modellen, altså en forkastning med forflytning på 10 meter, gjeldene for celler ($i, j, k = 3-5, 1-5, 1-5$), der *h1 og *h2 definerer hvilke hjørner i cellene som skal flyttes. Verdien 1 markerer venstre hjørne, mens 2 markerer høyre hjørne.

PORO S

```
-- Operator Verdi I1 I2 J1 J2 K1 K2  
'=' 0.25 1 5 1 5 1 5 /
```

Kommandoen PORO definerer porøsiteten for cellene. '=' markerer at vi angir eller erstatter en verdi, i dette tilfellet en porøsitet på 0,25 for cellene ($i, j, k = 1-5, 1-5, 1-5$).

PERMI S, PERMJ S og PERMK S er kommandoene for definering av permeabilitet i henholdsvis x-, y- og z-retning. Disse kommandoene brukes på akkurat samme måte som PORO S.

8.1.2 Standardmodell

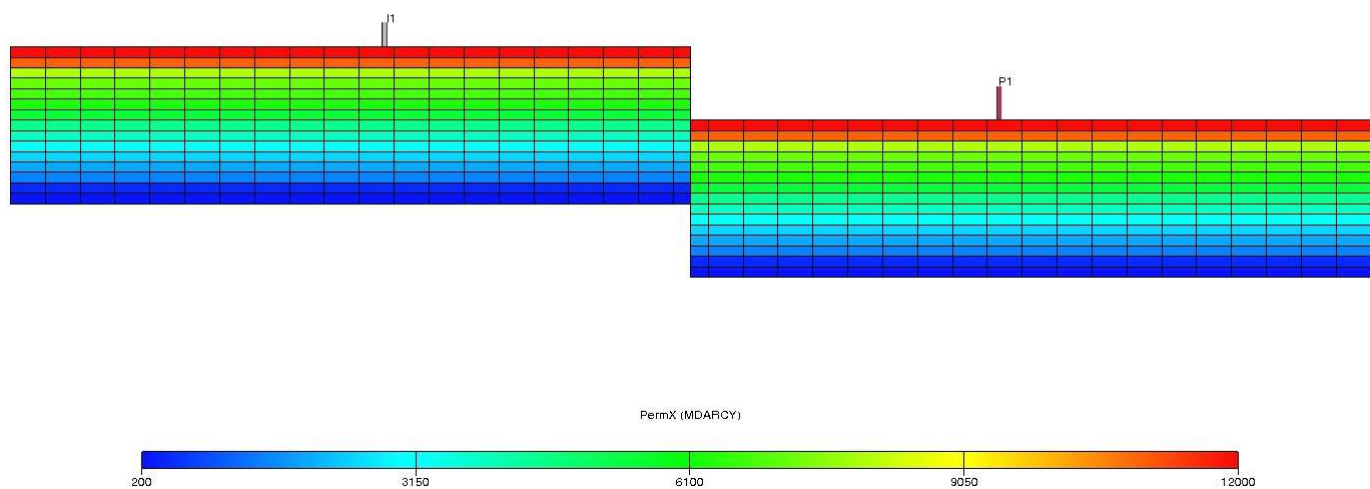
Med standardmodell menes reservoarmodeller der forkastninger blir modellert som enkle plan eller flater med transmissibilitetsmultiplikatorer. Geometrien for standardmodellen er veldig enkel og ble laget i FILL. Oppbyggingen av .fill-filen er på samme måte som beskrevet i kapittel 8.1.1.1. Foruten forskjellene i verdier og antall celler er DXV eneste kommando som er definert på en annen måte enn i eksempelet i 8.1.1.1. Som nevnt i kapittel 8.1 er

forkastningscellenes utstrekning i x-retning halvert i forhold til resten av reservoaret. Det ble gjort på følgende måte:

DXV

19*50 25 25 19*50 /

Cellene med indeks $i = 1-19$ og $21-40$ blir definert med en utstrekning $\Delta x = 50$ meter, mens cellene med indeks $i = 20-21$ blir definert med en utstrekning $\Delta x = 25$ meter.



Figur 8.1 – Standardmodellen sett fra siden. Fargene representerer x-permeabilitet.

8.1.2.1 Utvidet standardmodell

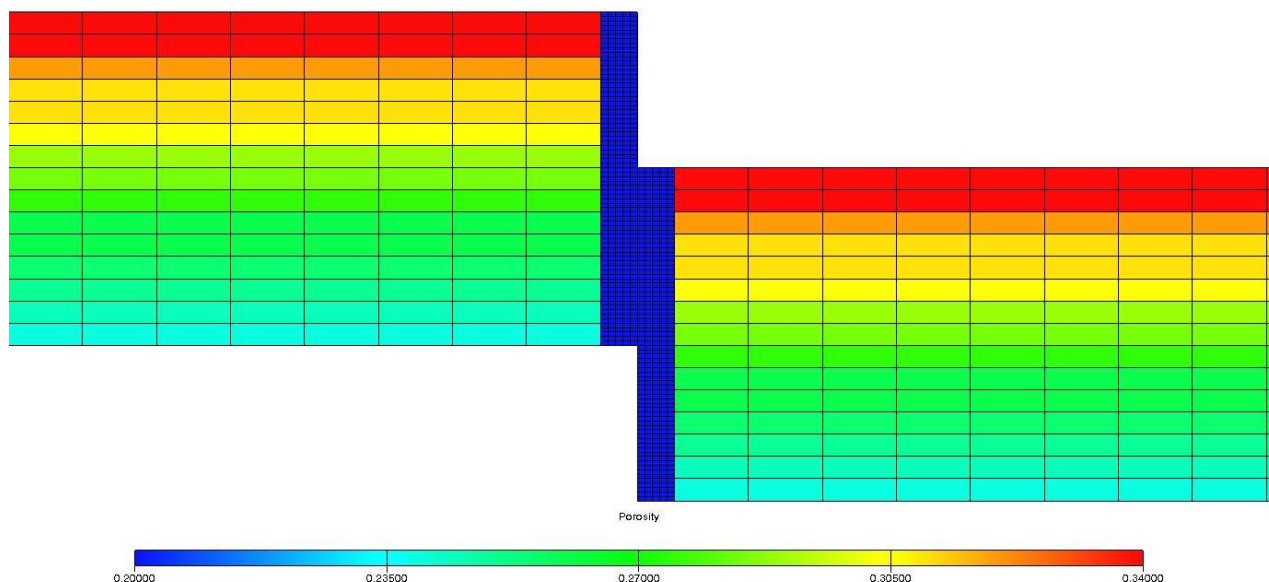
Utvidet standardmodell beskriver en modell med egendefinerte strømningsbaner med tilhørende transmissibiliteter mellom ikke-naboforbindelser. De egendefinerte strømningsbanene defineres med nøkkelordet NNC (eng. non-neighbour connection) under grid-seksjonen i .data-filen (se appendiks B4 for et utdrag av ikke-naboforbindelsene som ble definert).

8.1.3 Fault facies-modell

Med fault facies-modell menes reservoarmodeller der forkastningen modelleres som et volum med facies som inneholder særegne forkastningsegenskaper. Geometrien for fault facies-modellen er noe mer avansert enn for standardmodellen. Gitteret ble også her konstruert ved hjelp av FILL, men selve forkastningen ble modellert på en annen måte. Det ble modellert et rektangulært reservoar med 22 lag, der cellene ($i, j, k = 1-20, 1-30, 16-22$) og ($i, j, k = 21-40,$

1-30, 1-7) ble gjort inaktiv ved å definere porøsiteten til å være null. Deretter ble de grove cellene med indeks $i = 20-21$ gjort om til mange mindre celler med en faktor på fem i alle retninger. Dette gjøres med kommandoen CARFIN under grid-seksjonen i .data-filen. Dette medfører at hver grov celle blir gjort om til 125 mindre celler med lengder på $\Delta x = 25/5 = 5$ meter, $\Delta y = 50/5 = 10$ meter og $\Delta z = 15/5 = 3$ meter.

Under kommandoen CARFIN blir også petrofysikken til lokalgriddet (forkastningscellene) definert (se appendiks B2 for inndatafilen til forkastningsvolumet). Petrofysikken (porøsiteten og permeabiliteten) i forkastningsvolumet er forskjellig fra resten av reservoaret, og forkastningssonen blir da bestående av 112500 små celler med porøsitet og permeabilitet forskjellig fra resten av modellen.



Figur 8.2 – Utsnitt av fault facies-modellen sett fra siden. Fargene representerer porøsitet.

8.2 Simulering

Simuleringene har blitt gjort i ECLIPSE Black Oil Simulator v.2009.1. Det er blitt gjort mange forskjellige simuleringer. Dette kapittelet vil gi en oversikt og gjøre rede for karakteristikken for alle simuleringene.

Simuleringene ble studert i to dimensjoner (x og z), men modellen er tredimensjonal. Alle egenskaper er konstant i y-retning. Med det menes at alt er likt for alle celler med indeks $i, j, k = (i, 1-30, k)$. Det ble bevisst modellert slik for å kunne studere problemet i to dimensjoner uten å måtte ta hensyn til siste dimensjon. En slik metode beskrives ofte som en studie i 2.5-D.

Simuleringene kan deles inn i tre deler; gouge ratio¹⁷, gouge ratio og barrierer, og shale smear¹⁸. Hver av disse delene inneholder mange forskjellige kjøring der forkastningspermeabilitetene varierer, samt at perforeringen av brønnene er forskjellig. Shale smear er den simuleringsdelen det vil bli viet mest arbeid til.

Det er definert to oppsett for hvordan brønnene er blitt perforert; perforering 1 og 2. I simuleringene gjort under perforering 1 er injeksjonsbrønnen perforert forholdsvis høyt i reservoaret og produksjonsbrønnen lavt. Dette ble gjort for å konstruere en strømningsbane som går skrått gjennom reservoaret og på denne måten konstatere at den intuitive tanken om hvordan strømmingene er, stemmer overens med simuleringene.

Tanken bak perforering 2 var å gjenspeile et mer realistisk bilde av hvordan brønnene implementeres. Her blir injeksjonsbrønnen perforert lavt i reservoaret og produksjonsbrønnen høyt. Vann har høyere massetetthet enn olje og vil dermed få et større vertikalt bidrag på grunn av gravitasjonsleddet i Darcys lov (se ligning 2.11). I et reservoar vil da vann kunne akkumuleres under oljen å presse den oppover i reservoaret. Produksjonsbrønnen perforeres derfor høyt i reservoaret (langt fra OWC) for å unngå tidlig vannproduksjon. I reservoarer med tre faser er det og ønskelig å perforere produksjonsbrønner langt fra GOC, for å unngå tidlig gassproduksjon. Dette er ikke nødvendig for dette studiet fordi det bare er olje og gass i modellen.

Det som også var et viktig poeng med perforering 2 var å undersøke om det var likheter i forkastningsstrømmingene mellom perforering 1 og 2. Da kan man med større sikkerhet fastslå om det er en gjeldene forkastningsegenskap eller et unntak.

Den eneste forskjellen mellom kjøringene gjort med perforering 1 og 2 er hvilke lag som er perforert av brønnene. Permeabiliteter, porøsiteter og transmissibilitetsmultiplikatorer er helt lik for begge perforeringene.

¹⁷ Se kapittel 8.2.1.

¹⁸ Se kapittel 8.2.3.

8.2.1 Gouge ratio

Med gouge ratio menes det at det har blitt brukt en form for homogene gjennomsnittsverdier i hele forkastningsvolumet. Permeabilitetene for x-, y- og z-retning er da konstant for alle celler i forkastningssonen. I disse kjøringene ble brønnene perforert midt i reservoaret for perforering 1, men på grunn av forkastningspranget vil produksjonsbrønnen ligge på et lavere dyp enn injeksjonsbrønnen. For perforering 2 ble injeksjonsbrønnen perforert lavt og produksjonsbrønnen høyt.

Hovedpoenget med disse kjøringene var å simulere modellen med mange ulike permeabiliteter for å opparbeide kunnskap om hvordan strømmingene oppførte seg i forkastningssonen.

8.2.1.1 Gouge ratio med fault facies-modell

Tabell 8.3 viser kjøringene gjort med fault facies-modellen. Porøsiteten og permeabilitetene angir verdiene inni forkastningssonen.

Tabell 8.3 – Oversikt av kjøringene gjort med fault facies-modellen.

Kjøring #	1	2	3	4	5	6	7
I (perf. 1)	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$
P (perf. 1)	$k = 12-17$	$k = 12-17$	$k = 12-17$	$k = 12-17$	$k = 12-17$	$k = 12-17$	$k = 12-17$
I (perf. 2)	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$
P (perf. 2)	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$
φ	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
K_x [mD]	5000	500	50	5	50	50	50
K_y [mD]	5000	500	50	5	50	50	50
K_z [mD]	750	75	7,5	0,75	50	100	500

I og P står for henholdsvis perforering av injeksjonsbrønn og perforering av produksjonsbrønn. Det er verdt å merke seg at perforeringen for produksjonsbrønnen er på nedforkastet del (hengen). På grunn av måten fault facies-modellen er modellert er hengblokken definert i lag 8-22. Derfor blir perforering i lag 12-17 tilsvarende lag 5-10 i standardmodellen.

Det ble tatt utgangspunkt i en forkastningspermeabilitet tilsvarende gjennomsnittpermeabiliteten for reservoaret ($K_{av} \approx 5000$ mD for x- og y-retning. Z-

permeabiliteten 15 % av dette). Denne permeabiliteten ble endret ned til 1/1000 for å simulere et vidt spekter av permeabiliteter. Både høy horisontal og vertikal permeabilitet (kjøring 1-2) ga interessante resultater, der det ble observert store vertikale strømminger inni forkastningen. Kjøring 6-7 med høyere vertikal enn horisontal permeabilitet ble implementert for å studere disse forkastningsstrømmene ytterligere.

8.2.1.2 Gouge ratio med standardmodell

Tabell 8.4 viser kjøringene gjort med standardmodellen.

Tabell 8.4 – Oversikt av kjøringene gjort med standardmodellen.

Kjøring #	1	2	3	4
I (perf. 1)	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$
P (perf. 1)	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$
I (perf. 2)	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$	$k = 5-10$
P (perf. 2)	$k = 1-5$	$k = 1-5$	$k = 1-5$	$k = 1-5$
$GR-K_x^{19}$ [mD]	5000	500	50	5
Tmult F1	0,76	0,076	0,008	0,001
Tmult F2	0,87	0,087	0,009	0,001
Tmult F3	1,07	0,107	0,011	0,001
Tmult F4	1,35	0,135	0,013	0,001
Tmult F5	1,62	0,162	0,016	0,002
Tmult F6	2,06	0,206	0,021	0,002
Tmult F7	5,45	0,545	0,055	0,005
Tmult F8	13,06	1,306	0,131	0,013

I standardmodellen er det som kjent ikke noe forkastningsvolum, og da må transmissibiliteten defineres manuelt på tvers av forkastningen. Dette gjøres med transmissibilitetsmultiplikatorer (tmult). Hvis disse ikke angis setter ECLIPSE verdien til 1. Forkastningene som ble definert er gitt i tabell 8.5 (se appendiks B3 for inndatafilen til forkastningen).

¹⁹ Gouge ratio- K_x : Forkastningspermeabiliteten som ble brukt i tilsvarende kjøringene for fault facies-modellen.

Tabell 8.5 – Defineret forkastningskommunikasjon i standardmodell.

	Lag (liggblokk)	Lag (hengblokk)	K_x (ligg) [mD]	K_x (heng) [mD]	K_{harm} [mD]
F1	8	1	4500	12000	6545
F2	9	2	3900	11000	5758
F3	10	3	3300	8000	4673
F4	11	4	2500	7200	3711
F5	12	5	2000	6800	3091
F6	13	6	1500	6300	2423
F7	14	7	500	5500	917
F8	15	8	200	4500	383

En enkel metode for å beregne transmissibilitetsmultiplikatorene er å dividere den ønskede forkastningspermeabiliteten ($GR-K_x$ i tabell 8.4) med den harmoniske gjennomsnittpermeabiliteten på tvers av forkastningen. Se ligning 5.1 for harmonisk gjennomsnitt.

På grunn av manglende forkastningsvolum i standardmodellen utgår den vertikale permeabiliteten i forkastningen. Kjøring 5-7 i fault facies-modellen blir dermed lik kjøring nummer tre i standardmodellen.

8.2.2 Gouge ratio og barrierer

Det ble implementert barrierer i reservoaret for å studere hvilke effekter dette framprovoserer i forkastningssonen, og på den måten øke kunnskapen rundt strømmingene. De ble i tillegg innført fordi de illustrerer tydelig begrensningene med standardmodellen. Barrierene vil i standardmodellen ligge helt inn mot forkastningen og vertikal kommunikasjon blir fraværende når barrierene er isolerende. Det ble gjort simuleringer med fem forskjellige oppsett av barrierer.

1. BAR 1: Barriere mellom lag syv og åtte, og mellom 15 og 16 (åtte og ni i standardmodellen).
2. BAR 2: Barrierer mellom alle lag.
3. BAR 3: Barrierer mellom annethvert lag.
4. BAR 4: Barrierer mellom hvert femte lag.
5. BAR 5: Barrierer mellom annethvert lag definert i tabell 8.5, der barrierene ikke korrelerer på tvers av forkastningen. Dette for å oppnå krysstrømning i standardmodellen (se figur 8.3).

Det er gjort dobbelt sett med simuleringer der barrierene er implementert. Det ene paret tar for seg strømminger når barrierene er fullstendig isolerende, det andre når barrierene har en transmissibilitetsmultiplikator på 0,05. Dette er for å undersøke hvordan barrierene påvirker forkastningsstrømmingene. I fault facies-modellen er det ønskelig å se om forskjellen mellom tette og åpne barrierer er stor, mens for standardmodellen er det et klart formål. Tette barrierer vil i enkelte av tilfellene føre til fravær av vertikal kommunikasjon. Det vil da gi gode bilder på begrensningene til en standardmodell når forkastninger skal simuleres.

Perforeringen av brønnene er litt varierende for perforering 1 på grunn av implementering av forskjellige barriereoppsett. Men tanken med produsenten var å kun perforere den i en del av reservoaret. For da "vet" vi at lagene uten perforering ikke produseres grunnet ingen, eventuelt lav vertikal strøm. Da må nødvendigvis all vertikal kommunikasjon skje i forkastningssonen.

Samme tankegang gjelder for perforering 2. Men her perforeres injeksjonsbrønnen lavt og produksjonsbrønnen høyt i kjøringene med åpne barrierer. For kjøringene med isolerende barrierer perforeres injeksjons- og produksjonsbrønnen i alle lag.

8.2.2.1 Gouge ratio og barrierer med fault facies-modell

Tabell 8.6 gir en oversikt over kjøringene som er gjort med de forskjellige barriereoppsettene i fault facies-modellen.

Tabell 8.6 – Oversikt av kjøringer gjort med fault facies-modellen.

	Kjøring #	1	2	3	4	5
BAR 1	φ	0,20	0,20	0,20	0,20	-
	K_{x1} [mD]	5000	500	50	5	-
	K_{y1} [mD]	5000	500	50	5	-
	K_{z1} [mD]	750	75	7,5	0,75	-
BAR 2	φ	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	K_{x2} [mD]	500	500	500	50	5
	K_{y2} [mD]	500	500	500	50	5
	K_{z2} [mD]	500	50	5	50	5
BAR 3	φ	0,20	-	-	-	-
	K_{x3} [mD]	500	-	-	-	-
	K_{y3} [mD]	500	-	-	-	-
	K_{z3} [mD]	500	-	-	-	-
BAR 4	φ	0,20	-	-	-	-
	K_{x4} [mD]	500	-	-	-	-
	K_{y4} [mD]	500	-	-	-	-
	K_{z4} [mD]	500	-	-	-	-
BAR 5	φ	0,20	-	-	-	-
	K_{x5} [mD]	500	-	-	-	-
	K_{y5} [mD]	500	-	-	-	-
	K_{z5} [mD]	500	-	-	-	-

Tabell 8.7 gir en oversikt av hvilke lag som er perforert for de ulike kjøringene gjort med fault facies-modellen.

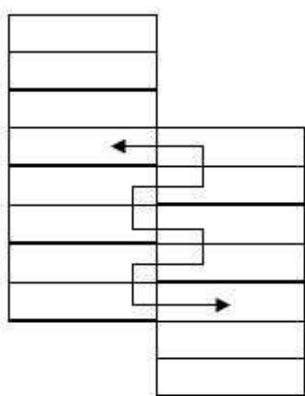
Tabell 8.7 – Oversikt av perforeringer for fault facies-modellen.

		BAR 1	BAR 2	BAR 3	BAR 4	BAR 5
Tette barrierer	I (perf. 1)	$k = 8-13$	$k = 5-8$	$k = 5-8$	$k = 6-9$	$k = 5-8$
	P (perf. 1)	$k = 12-17$	$k = 18-21$	$k = 18-21$	$k = 18-21$	$k = 19-22$
	I (perf. 2)	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$
	P (perf. 2)	$k = 8-22$	$k = 8-22$	$k = 8-22$	$k = 8-22$	$k = 8-22$
Åpne barrierer	I (perf. 1)	$k = 8-13$	$k = 5-8$	$k = 5-8$	$k = 6-9$	$k = 5-8$
	P (perf. 1)	$k = 12-17$	$k = 18-21$	$k = 18-21$	$k = 18-21$	$k = 19-22$
	I (perf. 2)	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$
	P (perf. 2)	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$

8.2.2.2 Gouge ratio og barrierer med standardmodell

I standardmodellen er det en del kjøringar som utgår på grunn av begrensninger i modellen. Når det ikke finnes en forkastningssone vil barrierene ligge helt inn mot forkastningen og vertikal kommunikasjon blir fraværende når barrierene er isolerende.

Kjøringene med isolerende barrierer er svært lite interessant å studere fordi produksjonsbrønnen er perforert i lag som ikke mottar trykkstøtte fra injeksjonsbrønnen på grunn av barrierene. Men de har likevel et formål; de viser helt klart at standardmodellen ikke er tilstrekkelig i simuleringer med forkastninger. Kjøringen for BAR 5 ble inkludert som en alternativ løsning for vertikal kommunikasjon i en standardmodell med barrierer. Her er barrierene modellert slik at krysstrømning er mulig (se figur 8.3).



Figur 8.3 – Illustrasjon av krysstrømning. De tykke svarte strekene representerer barrierene.

For å gjenspeile kommunikasjonen fra fault facies-modellen på tvers av forkastningen ble samme metode som i tabell 8.5 benyttet i simuleringene med barrierer. Tabell 8.8 gir en oversikt over kjøringene som er gjort med de forskjellige barriereoppsettene i standardmodellen. For åpne barrierer utgår kjøring 2-3 for BAR 2. Dette fordi vertikal permeabilitet i forkastningssonen ikke er mulig å modellere i standardmodellen.

Tabell 8.8 – Oversikt av kjøringene gjort med standardmodellen.

Åpne barrierer	Kjøring #	1	2	3	4	5
BAR 1	$GR-K_x$ [mD]	5000	500	50	5	-
BAR 2	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	50	5
BAR 3	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	-	-
BAR 4	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	-	-
BAR 5	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	-	-
Tette barrierer						
BAR 1	$GR-K_x$ [mD]	5000	500	50	5	-
BAR 2	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	50	5
BAR 3	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	-	-
BAR 4	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	-	-
BAR 5	$GR-K_x$ [mD]	500	-	-	-	-

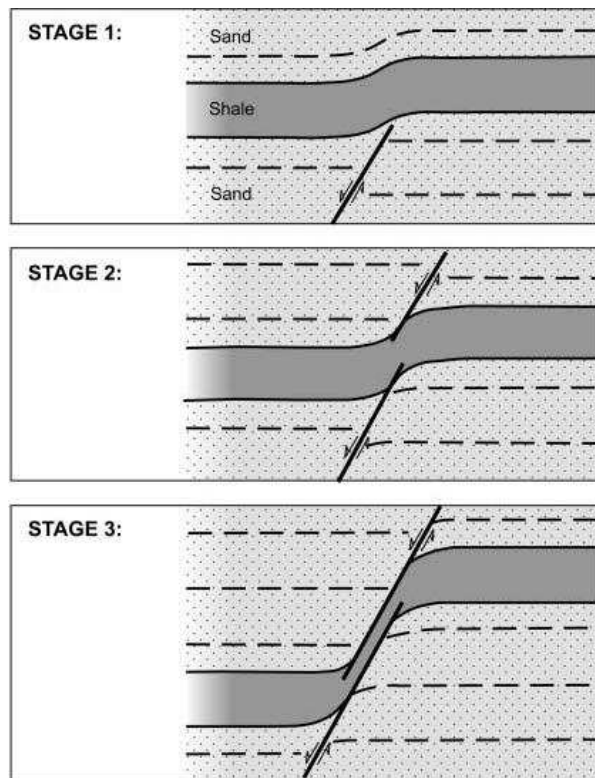
Tabell 8.9 gir en oversikt av hvilke lag som er perforert for de ulike kjøringene gjort med standardmodellen. Det er verdt å merke seg at de perforerte lagene er helt lik mellom fault facies- og standardmodellen, selv om indeksene er forskjellige. Det skyldes ulike metoder mellom modellene for modellering av hengblokken.

Tabell 8.9 – Oversikt av perforeringer for standardmodellen.

		BAR 1	BAR 2	BAR 3	BAR 4	BAR5
Tette barrierer	I (perf. 1)	$k = 8-13$	$k = 5-8$	$k = 5-8$	$k = 6-9$	$k = 5-8$
	P (perf. 1)	$k = 5-10$	$k = 11-14$	$k = 11-14$	$k = 11-14$	$k = 12-15$
	I (perf. 2)	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$
	P (perf. 2)	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$	$k = 1-15$
Åpne barrierer	I (perf. 1)	$k = 8-13$	$k = 5-8$	$k = 5-8$	$k = 6-9$	$k = 5-8$
	P (perf. 1)	$k = 5-10$	$k = 11-14$	$k = 11-14$	$k = 11-14$	$k = 12-15$
	I (perf. 2)	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$	$k = 11-15$
	P (perf. 2)	$k = 1-5$	$k = 1-5$	$k = 1-5$	$k = 1-5$	$k = 1-5$

8.2.3 Shale smear

Shale smear er et tilfelle hvor et skiferlag i et reservoar blir delt av en forkastning. Én del av skiferlaget opptrer i liggblokken, mens den andre delen opptrer i hengblokken. Mellom dem vil skiferlaget bli ”smurt” utover på grunn av forkastnings-spranget. På store forkastninger kan shale smear fungere som en barriere, der den vil hindre strømminger av hydrokarboner på tvers og langs med en forkastning [5].



Figur 8.4 – Shale smear i en forkastningssone [5].

Figur 8.4 illustrerer steg for steg hvordan utviklingen av en shale smear utarter seg i en forkastningssone. Hvis forkastningsspranget øker ytterligere vil shale smear kunne bli diskontinuerlig i området halvveis mellom ligg- og hengblokk. En slik modell vil åpne for større strømminger på tvers i forkastningssonen.

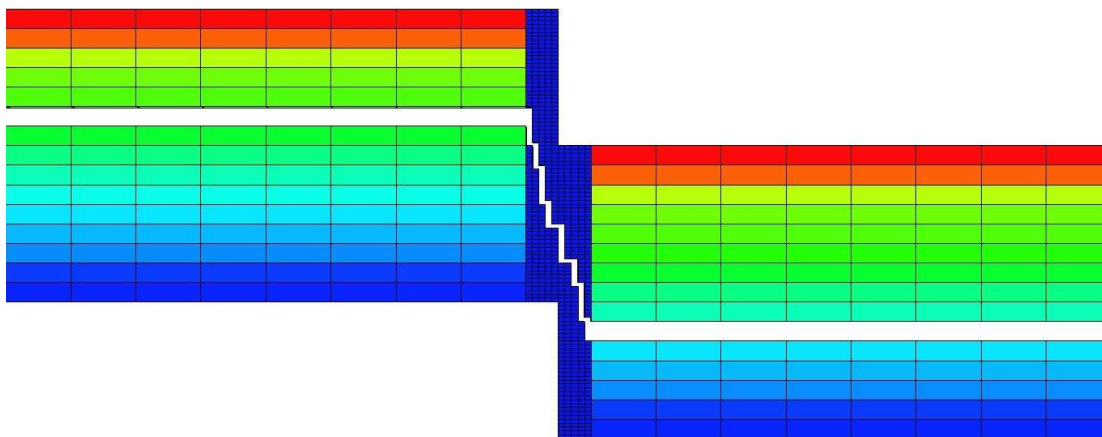
I kjøringene ble det modellert en kontinuerlig shale smear-modell med større sprang enn den geologiske modellen. Med dette menes det at forskjellige lag på tvers av forkastningen er definert som shale smear (se figur 8.5). Dette ble gjort for å lettere kunne skille mellom strømmingene over og under barrieren. Med en geologisk riktig shale smear-modell vil strømmingene ligge nærmere hverandre og dermed blande/krysse hverandre raskere enn tilfellet med større sprang. Med større sprang vil det også være lettere å studere store vertikale strømminger fra høytliggende lag i liggblokk.

Det ble gjort ett forsøk med en totalt isolerende shale smear. Resten av kjøringene tok for seg en modell der delen mellom ligg- og hengblokk hadde x-, y- og z-permeabilitet på 1 mD.

Formålet med å studere en shale smear-modell er at den vil fremprovosere strømningsbaner i forkastningssonen som er meget vanskelig å gjenspeile med en standardmodell. Det er klart at når en barriere implementeres i forkastningssonen, uansett om den er isolerende eller ikke, så vil fluidstrømmen som treffer denne bli manipulert til å velge lettere veier å strømme. Man kan tenke seg at man får strømningsbaner fra høytliggende lag i liggblokk til lavtliggende lag i hengblokk. Med andre ord; store vertikale strømninger mellom blokker som ikke er i sand-mot-sand-kontakt. Slike strømningsbaner kan ikke oppnås uten å måtte definere dem på egen hånd i en standardmodell (utvidet standardmodell). Tanken bak kjøringene med shale smear var da å undersøke effekten av innføringen av en barriere i forkastningssonen, samt å anvende denne kunnskapen for å prøve og reprodusere samme resultat i en standardmodell.

8.2.3.1 Shale smear med fault facies-modell

I liggblokken ble lag nummer seks definert som et leirskiferlag der permeabiliteten i alle retninger ble definert til å være null. I hengblokken var lag nummer 17 tilsvarende. Barrieren som opptrer mellom ligg- og hengblokk ble definert inni forkastningsvolumet. Figur 8.5 illustrerer hvordan shale smear-modellen ser ut fra siden. Man ser at den ”utsmurte” delen av barrieren er mye smalere enn for lag seks og 17.



Figur 8.5 – Fault facies-modell med shale smear sett fra siden.

Kjøringene gjort med fault facies-modellen er gitt i tabell 8.10. K_{b6} er definert som permeabiliteten for alle retninger i lag nummer seks i liggblokken. K_{b6-17} er definert som permeabiliteten for alle retninger i den ”utsmurte” delen mellom lag seks og 17. K_{b17} er

definert som permeabiliteten for alle retninger i lag nummer 17 i hengblokken. Porøsiteten og de andre permeabilitetene gjelder inni forkastningssonen.

Tabell 8.10 – Oversikt av kjøring gjort med fault facies-modellen.

Kjøring #	1	2	3	4	5	6	7	8
I	$k = 7-12$	$k = 4-5$ & 11-15	$k = 4-5$ & 11-15	$k = 4-5$ & 11-15	$k = 4-5$ & 11-15	$k = 4-5$ & 11-15	$k = 4-5$ & 11-15	$k = 4-5$ & 11-15
P	$k = 18-22$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$	$k = 8-12$
φ	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
K_x [mD]	500	500	500	500	50	5	5	5
K_y [mD]	500	500	500	500	50	5	5	5
K_z [mD]	75	75	500	5	50	5	100	500
K_{b6} [mD]	0	0	0	0	0	0	0	0
K_{b6-17} [mD]	0	1	1	1	1	1	1	1
K_{b17} [mD]	0	0	0	0	0	0	0	0

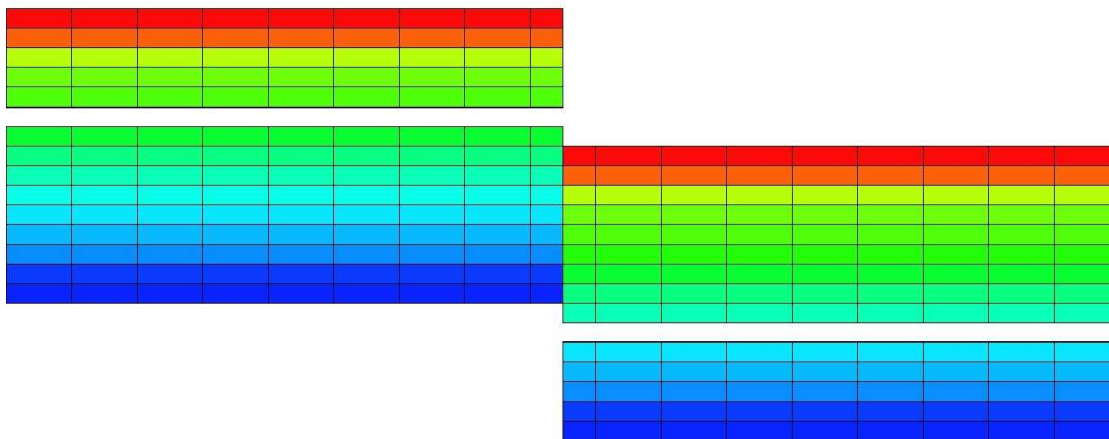
Den første kjøringen er ment som en test av selve shale smear-modellen. Barrieren er totalt isolerende og brønnene er perforert slik at strømmen kun har én vei å gå. Kjøringene 2-8 er for å studere hvordan strømningene oppfører seg i forkastningssonen. Det injiseres vann både over og under barrieren i liggblokken for at det skal være lett å studere strømninger fra begge områder. Injeksjonsbrønnen er perforert lavt i begge områdene. Produksjonsbrønnen er perforert høyt i hengblokken av samme grunn som beskrevet i kapittel 8.2, avsnitt fem. Kjøring 7-8 ble implementert fordi gjengangeren gjennom kjøringene, uansett modell, har vært at høy vertikal forkastningspermeabilitet gir interessante observasjoner. Kjøring nummer syv er den av simuleringene som ble benyttet når resultatene fra fault facies-modellen skulle konstrueres på standardmodellen.

8.2.3.2 Shale smear med utvidet standardmodell

Med utvidet standardmodell ble det kun gjort én kjøring tilsvarende kjøring nummer syv fra fault facies-modellen. (Det ble gjort mange simuleringer på kjøring syv i forsøk på å reprodusere resultatene fra fault facies-modellen.) Dette fordi det er svært tidkrevende å tilpasse resultater fra en fault facies-modell på en standardmodell. Kjøring nummer syv ble valgt fordi dette var en simulering med kompliserte og interessante strømningsbaner. Enklere kjøring kunne blitt valgt, men tanken var at om det var gjennomførbart å overføre

resultatene fra fault facies-modellen til standardmodellen for denne kjøringen, ville det lettere la seg gjøre for andre modeller.

Selve modellen er lik fault facies-modellen foruten forkastningssonen. Barrierene som utgjør shale smear er definert i samme lag som i fault facies-modellen. Altså lag seks for liggblokken og lag 10 (tilsvarende lag 17 i fault facies-modellen) for hengblokken. Injeksjonsbrønnen er perforert i lag 4-5 og 11-15 i liggblokken, mens produksjonsbrønnen er perforert i lag 1-5 (tilsvarende 8-12 i fault facies-modellen) i hengblokken.



Figur 8.6 – Utvidet standardmodell med shale smear sett fra siden.

Barrieren som opptrer inni forkastningsvolumet i fault facies-modellen må i standardmodellen defineres med ikke-standard transmissibiliteter. Den typen strøm som opptrer, og som er ønskelig å gjenskape i standardmodellen er ikke mulig i en standardmodell med bare sand-mot-sand-kontakt. Derfor må modellen utvides med ikke-naboforbindelser. ECLIPSE tillater egendefinert strømnings mellom to vilkårlige celler ved at en manuelt kan definere transmissibilitet mellom dem. Dette er et omfattende arbeid når transmissibilitet må defineres for hvert cellepar som har strømnings mellom seg.

Det ble satt opp to forskjellige modeller med strømningsbaner fra hengblokk til liggblokk. Felles for begge modellene var at forkastningskommunikasjonen fra tidligere forsøk ble beholdt, men med mindre transmissibilitetsmultiplikatorer enn tidligere. Dette for å ta høyde for barrieren inni forkastningssonen. Tabell 8.11 viser transmissibilitetsmultiplikatorene for sand-mot-sand-kontaktene på tvers av forkastningen.

Tabell 8.11 – Egendefinerte transmissibilitetsmultiplikatorer for sand-mot-sand-kontakter.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
$GR-K_x$ [mD]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Tmult	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0005	0,0013

Hvilke sand-mot-sand-kontakter som er definert framgår av tabell 8.5. Hvordan transmissibilitetsmultiplikatorene beregnes er beskrevet i kapittel 8.2.1.2, avsnitt to.

Det ble definert to forskjellige oppsett for strømningsbaner mellom ikke-naboforbindelser på tvers av forkastningen. Grunnen til dette var at den første modellen ikke klarte å gjenskape oppførselen i reservoaret fra fault facies-modellen. Men det skal sies at endringene som ble gjort var minimal. Bakgrunnen for endringene og tankeprosessen rundt ikke-naboforbindelsene vil bli gjennomgått i kapittel 9.3.2. Tabell 8.12 og 8.13 gir en oversikt over ikke-naboforbindelsene som ble definert for de to oppsettene.

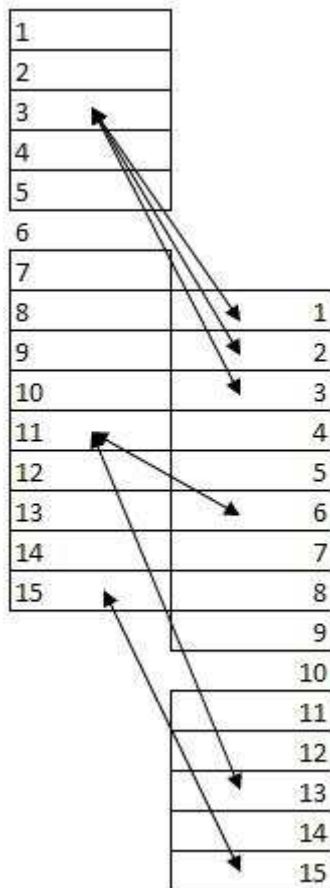
Tabell 8.12 – Egendefinerte ikke-naboforbindelser for NNC 1.

NNC 1	<i>k1 (i, j = 20, 1-30)</i>	<i>k2 (i, j = 21,1-30)</i>	Transmissibilitet [mD·m]
T1	3	1	0,12
T2	3	2	0,12
T3	3	3	0,10
T4	4	4	0,09
T5	4	5	0,09
T6	4	6	0,09
T7	5	7	0,08
T8	5	8	0,07
T9	5	9	0,06
T10	10	5	0,07
T11	10	13	2,11
T12	11	6	0,05
T13	11	13	1,92
T14	12	6	0,05
T15	12	14	0,82
T16	13	6	0,04
T17	13	14	0,77
T18	14	7	0,01
T19	14	15	0,29
T20	15	8	0,01
T21	15	15	0,20

Tabell 8.13 – Egendefinerte ikke-naboforbindelser for NNC 2.

NNC 2	$k1 (i, j = 20, 1-30)$	$k2 (i, j = 21, 1-30)$	Transmissibilitet [mD·m]
T1	3	1	0,172
T2	3	2	0,166
T3	3	3	0,143
T4	4	2	0,156
T5	4	3	0,136
T6	4	4	0,129
T7	5	3	0,132
T8	5	4	0,125
T9	5	5	0,122
T10	10	5	0,051
T11	10	13	0,092
T12	11	6	0,041
T13	11	13	0,084
T14	12	6	0,035
T15	12	14	0,036
T16	13	6	0,028
T17	13	15	0,016
T18	14	7	0,011
T19	14	15	0,013
T20	15	8	0,004
T21	15	15	0,009
	$k1 (i, j = 21, 1-30)$	$k2 (i, j = 21, 1-30)$	Transmissibilitet [mD·m]
T22	11	9	0,468

Transmissibilitetene som er definert for NNC 1 og NNC 2 er de siste kjøringene for hvert av oppsettene. Med andre ord, de kjøringene som ligger nærmest oppførselen til fault facies-modellen. Figur 8.7 viser noen eksempler på definerte ikke-naboforbindelser for NNC 2.



Figur 8.7 – Viser eksempler på strømningsbaner fra cellene med k -indeks 3, 11 og 15 i liggblokk.

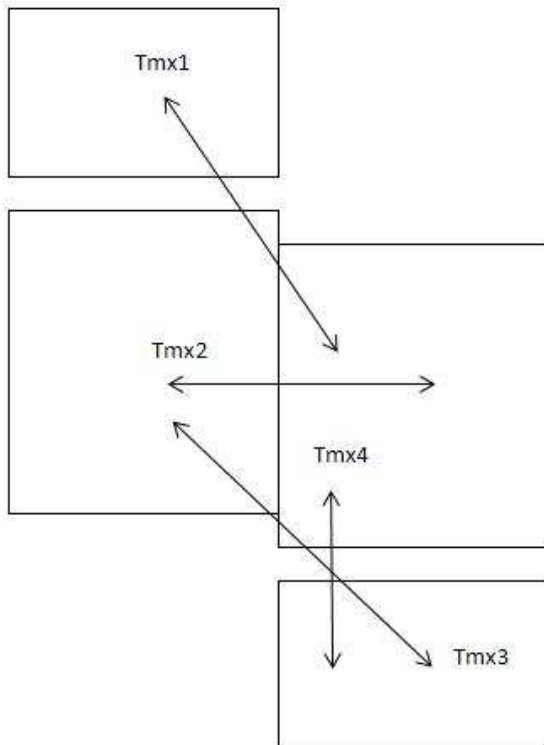
For transmissibilitetsberegningene ble hjørnepunktstransmissibilitet (NEWTRAN) benyttet (ligning 5.16-5.19). Hvis ikke noe annet er spesifisert vil ECLIPSE bruke NEWTRAN når transmissibiliteter beregnes. Det ble på forhånd gjort en kontroll der transmissibiliteter mellom alle cellepar ble skrevet ut fra ECLIPSE, og transmissibiliteten mellom ett av celleparene ble regnet ut for hånd. Transmissibilitet skrevet ut fra ECLIPSE mellom cellene $(i, j, k = 17, 30, 1)$ og $(i, j, k = 18, 30, 1)$ var 1534,9 mD·m. Den utregnede verdien stemte overens med verdien fra ECLIPSE og er gitt i appendiks A.

Det var nødvendig med flere transmissibilitetsmultiplikatorer for å gjenskape oppførselen fra fault facies-modellen. Det ble først benyttet én multiplikator for alle ikke-naboforbindelsene, men det viste seg raskt å ikke være nok. Under følger en tabell med transmissibilitetsmultiplikatorer og tilhørende ikke-naboforbindelser.

Tabell 8.14 – Transmissibilitetsmultiplikatorer (Tmx) og ikke-naboforbindelser.

$Tmx1$	$Tmx2$	$Tmx3$	$Tmx4$
T1	T10	T11	T22
T2	T12	T13	-
T3	T14	T15	-
T4	T16	T17	-
T5	T18	T19	-
T6	T20	T21	-
T7	-	-	-
T8	-	-	-
T9	-	-	-

$Tmx1$ definerer kommunikasjon mellom øvre lag i liggblokk over barrieren, og øvre lag i hengblokk over barrieren. $Tmx2$ definerer kommunikasjon mellom nedre lag i liggblokk under barrieren, og øvre lag i hengblokk over barrieren. $Tmx3$ definerer kommunikasjon mellom nedre lag i liggblokk under barrieren, og nedre lag i hengblokk under barrieren. $Tmx4$ definerer kommunikasjon mellom nedre lag i hengblokk under barrieren, og øvre lag i hengblokk over barrieren. Se figur 8.8 for illustrering.



Figur 8.8 – Illustrerer hvilke regioner transmissibilitetsmultiplikatorene definerer kommunikasjon mellom.

Kapittel 9 – Resultater og diskusjon

I dette kapittelet vil resultatene fra simuleringene bli gjennomgått og diskutert. Det vil bli redegjort for om standardmodellen er tilstrekkelig nøyaktig, hvordan strømningene egentlig er, og om disse kan karakteriseres med et standardgitter. Resultatene fra shale smear-modellen vil vektlegges.

Metningsforandringer har blitt studert for å analysere hvordan strømningene har oppført seg i forkastningssonen og reservoaret. FloViz 2009.1 har blitt benyttet i dette arbeidet. FloViz er et interaktivt 3D-visualiseringsprogram som kan brukes til å fremvise simuleringsdata for en reservoarmodell [22]. ECLIPSE Office 2009.1 har blitt benyttet for å fremlegge resultatdata i grafer.

Det er i hovedsak midtre del av reservoaret som har blitt studert ($i, j, k = 10-31, 15, 1-22$ (15)). Både injeksjons- og produksjonsbrønn er implementert her, dermed er det i disse områdene metningsforandringene først kan observeres. Bilder presentert i dette kapittelet er utelukkende for celler med indeks $j = 15$, hvis ikke annet er oppgitt. Resultatene vil bli presentert i samme rekkefølge som i kapittel 8.2; gouge ratio, gouge ratio og barrierer, og til sist shale smear.

9.1 Gouge ratio

Mange av observasjonene som er blitt gjort i forsøkene med gouge ratio går igjen for flere av kjøringene, derfor vil kun enkelte av simuleringene bli presentert. Forskjellige observasjoner gjort med ulike perforeringer og modeller vil bli gjennomgått og diskutert. Se kapittel 8.2.1 for kjøringsspesifikasjoner.

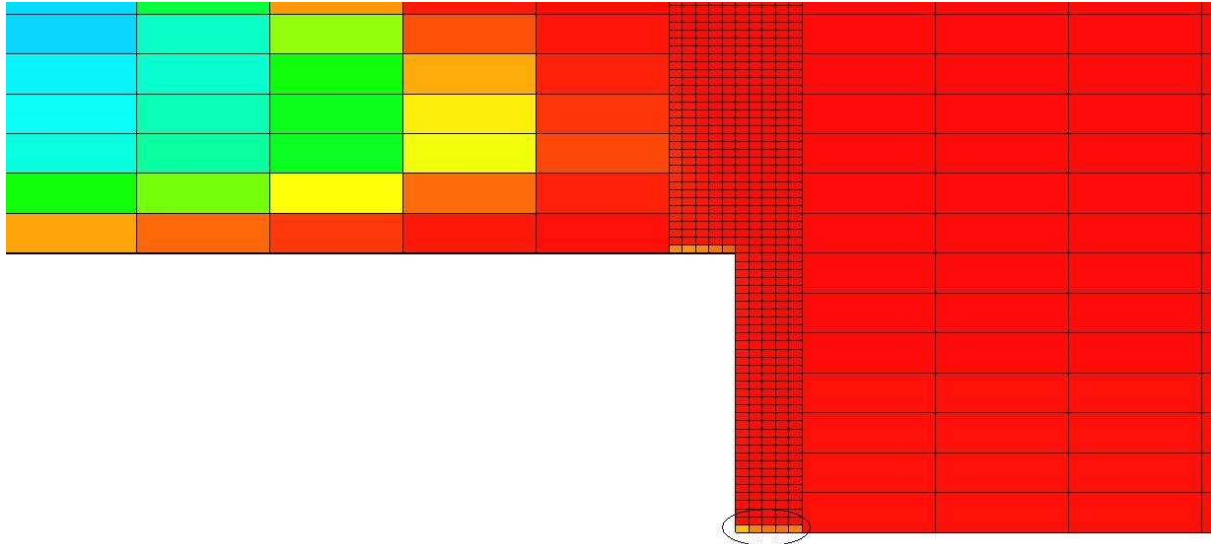
9.1.1 Kjøring 1

Denne kjøringen inneholdt høye forkastningspermeabiliteter ($K_x = K_y = 5000$ mD, $K_z = 750$ mD). Det ble gjort interessante observasjoner for denne forkastningsmodellen:

- Høy vertikal strømning i forkastningssone.
- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.

Idet vannfronten treffer forkastningssonen ble det observert vann i nederste lag i forkastningsvolumet (se figur 9.1). Dette ble observert for både perforering 1 og 2, og tyder da på at dette kan være en forkastningsegenskap som er uavhengig av hvordan brønnene er

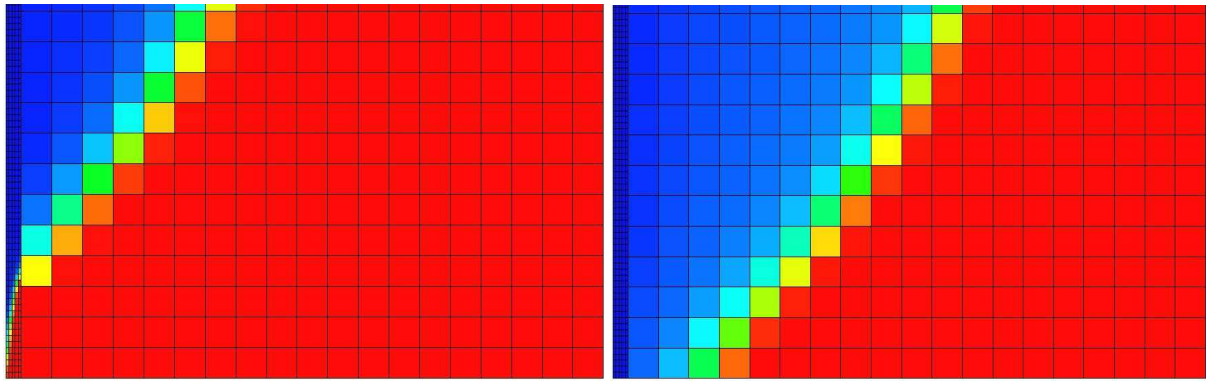
perforert. Denne observasjonen tyder på at det skjer ting i forkastningsvolumet helt uavhengig av sand-mot-sand-strømmen. Dette kan forklares med høy vertikal permeabilitet i forkastningssonen, men geometrien av cellene spiller og en vesentlig rolle.



Figur 9.1 – Utsnitt fra fault facies-modellen idet vannfronten treffer forkastningssonen. Ser tydelig at oljemetningen er redusert for nederste lag i forkastningsvolumet. (xz-snitt, $j = 15$)

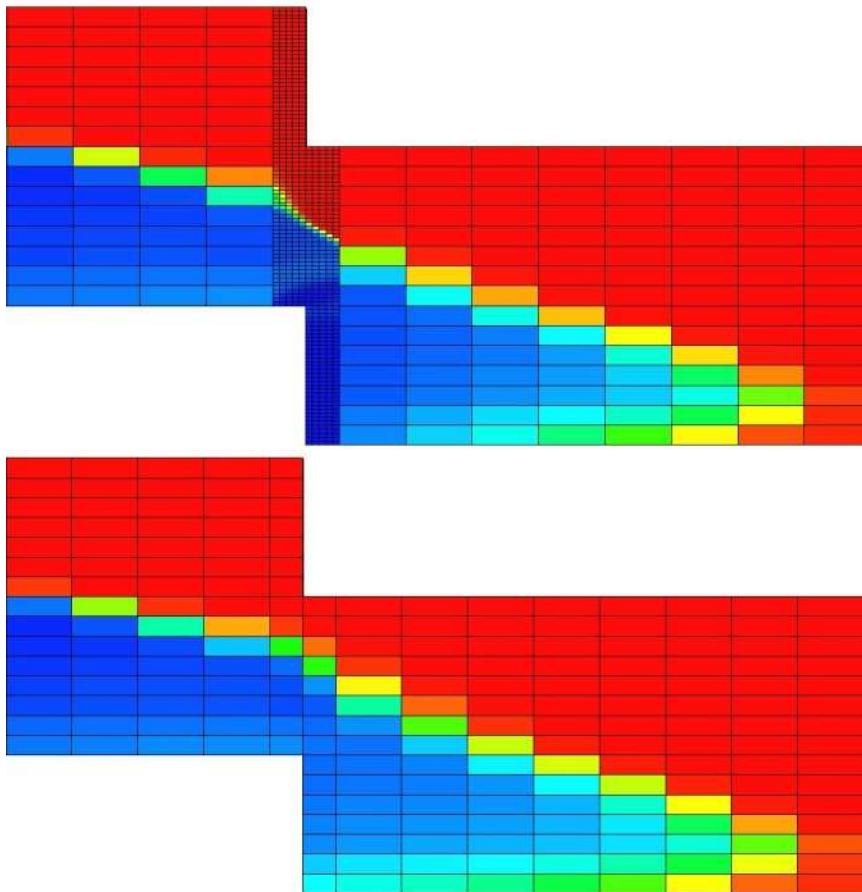
Det observeres høyere vertikal enn horisontal strømming, på tross av at den horisontale permeabiliteten er større enn den vertikale. Felles kontaktflate mellom cellene i z-retning er større enn x-retning, samtidig som strømmen har kortere vei å gå vertikalt (D_{iz} er mindre enn D_{ix}). Dette gir høyere transmissibilitet for celle i og j (ligning 5.17) som igjen gir høyere transmissibilitet mellom celle i og j (ligning 5.16).

På grunn av høy vertikal migrering av vann i forkastningssonen akkumuleres det vann i de nederste lagene i forkastningsvolumet. Tendensen er at vannet strømmer raskt til nederste lag, for så og spres i x- og y-retning. Det observeres dermed størst spredning av vann for de nederste lagene (18-22) i forkastningsvolumet ved endt simulering (se figur 9.2).



Figur 9.2 – Viser forskjell i spredning mellom lag 16 (venstre) og 19 (høyre) ved endt simulering (sett ovenfra). I lag 19 er hele forkastningssonen mettet med vann, mens for lag 16 er det fortsatt utvinnbar olje igjen i sonen.

En vannbank i forkastningssonen kan muligens være en kompliserende strømningsfaktor i fault facies-modellen som ikke vil kunne skildres med en standardmodell.



Figur 9.3 – Fault facies- (øverst) og standardmodell (nederst) for kjøring 1, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt). Bildene er tatt ved simuleringsdato 1. januar 2020. (xz-snitt, $j = 15$)

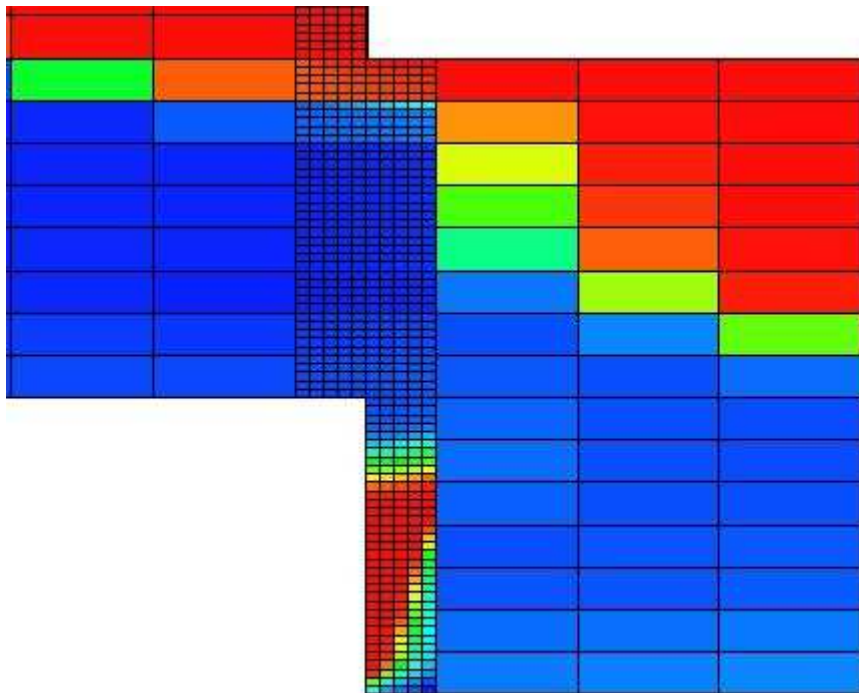
Forskjellene mellom fault facies- og standardmodellen kommer tydelig fram i figur 9.3, der man kan se vesentlig høyere vannmetning lavt i forkastningsvolumet for fault facies-modellen.

9.1.2 Kjøring 3

Denne kjøringen inneholder forholdsvis lave forkastningspermeabiliteter ($K_x = K_y = 50$ mD, $K_z = 7,5$ mD). Viktige observasjoner gjort for denne kjøringen:

- Tilbakestrømning av vann fra reservoar til forkastning i lave lag for hengblokk.
- Dannelse av uproduserbar oljeregion (fanget olje) i forkastningssone.

I denne kjøringen er den vertikale permeabiliteten så lav at det i hovedsak observeres horisontal spredning på tvers av forkastningen. Vannet migrerer raskt gjennom forkastningen og får tidlig vanngjennombrudd i hengblokk. Videre migrerer vannet vertikalt i reservoarcellene grunnet høyere vertikal permeabilitet for disse cellene. Deretter ser vi tilbakestrømning av vann fra reservoarcellene i hengblokk til lavtliggende forkastningsceller (se figur 9.4).

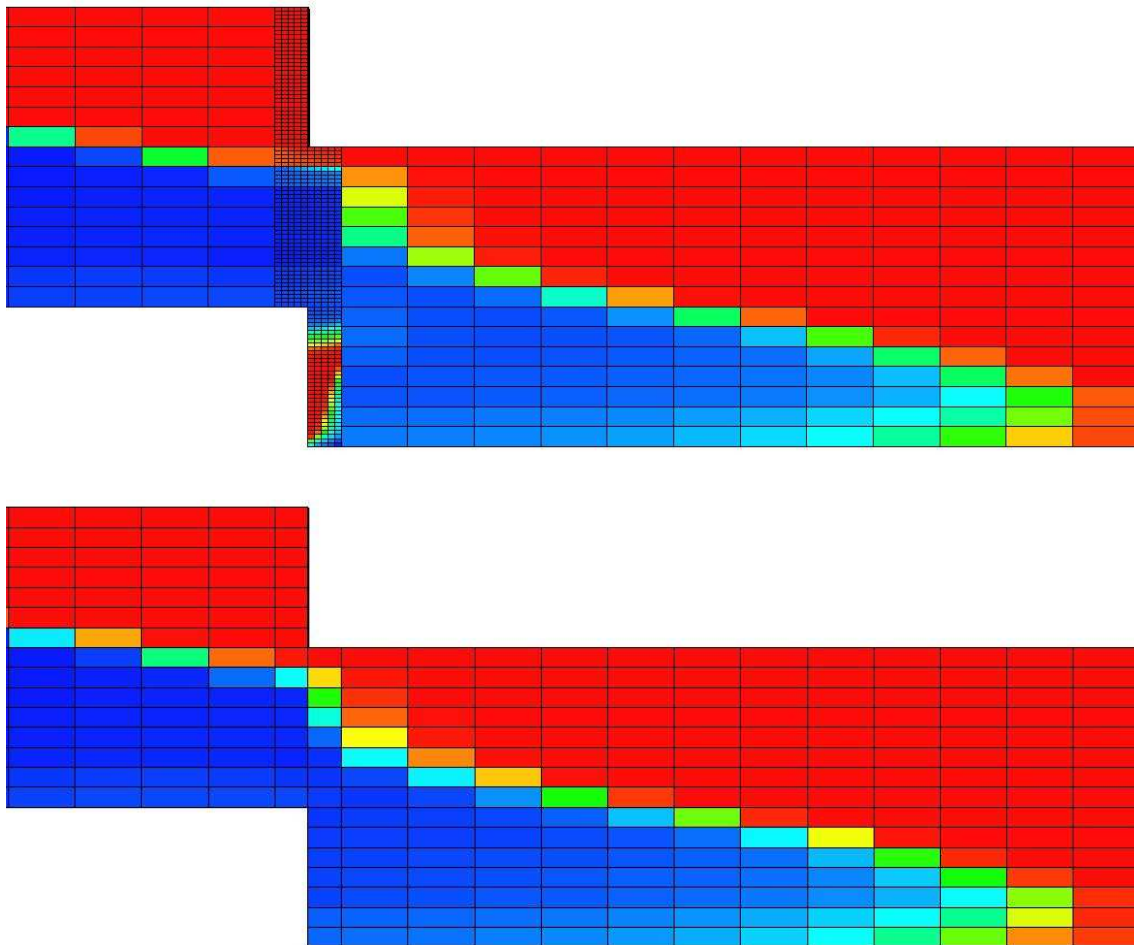


Figur 9.4 – Utsnitt fra fault facies-modellen ved endt simulering. Illustrerer en uproduserbar oljeregion samt tilbakestrømning av vann fra reservoarceller til forkastningsceller. (xz-snitt, $j = 15$)

Grunnet den lave vertikale permeabiliteten i forkastningssonen er det liten vertikal strømning i forkastningsvolumet. Dette fører til dannelse av en uproduserbar oljeregion i

forkastningssonen (se figur 9.4). Vannet velger letteste vei å strømme (horisontalt), og dermed blir det liggende mye olje igjen. Figur 9.4 viser et utsnitt fra midten av reservoaret ($j = 15$). Spredningen av vann vil være mindre for celler som har større avstand fra vanninjektor ($j = 1-14$ og $16-30$), da vil følgelig den uproduserbare oljeregionen øke i størrelse mot randene.

Tilbakestrømningen av vann og dannelsen av den uproduserbare oljeregionen ble observert for begge perforeringer, hvilket indikerer at dette er prosesser som antakelig oppstår uavhengig av hvordan brønnene perforeres.



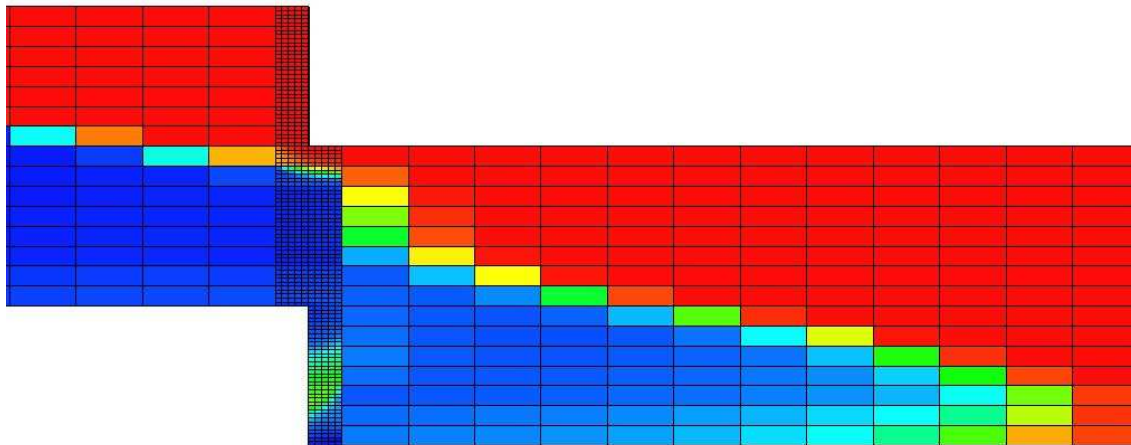
Figur 9.5 – Fault facies- (øverst) og standardmodell (nederst) for kjøring 3, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt), ved endt simulering. (xz-snitt, $j = 15$)

Tilsvarende kjøring gjort med standardmodellen er meget lik fault facies-kjøringen, foruten den uproduserbare oljeregionen (se figur 9.5).

9.1.3 Resterende kjøring for gouge ratio

Resultatene presentert i kapittel 9.1.1 og 9.1.2 er resultater som går igjen for flere av kjøringene. Likt for dem alle er at perforeringen av brønnene har omtrent ingen innvirkning på hvordan strømningene opptrer i forkastningssonen.

- Kjøring 2 ($K_x = K_y = 500 \text{ mD}$, $K_z = 75 \text{ mD}$): Observasjonene gjort her er meget lik dem som ble gjort for kjøring 3 (kapittel 9.1.2). Både den horisontale og den vertikale strømningen er litt større, men oppførselen er lignende. På grunn av større permeabiliteter er ikke observasjonene like tydelig som for kjøring 3. Dette fordi strømningene beveger seg fortere. Og når samme tidssteg blir benyttet i kjøringene skjer det mer på samme tid for kjøring 2 enn for 3.
- Kjøring 4 ($K_x = K_y = 5 \text{ mD}$, $K_z = 0,75 \text{ mD}$): I likhet med kjøring 2 har de samme observasjonene blitt gjort for kjøring 4. Her er tendensen den motsatte av kjøring 2; skjer mindre på samme tid, på grunn av lavere permeabiliteter. Vanngjennombrudd i hengblokk tar lengre tid, og tilbakestrømningen er mindre tydelig på grunn av lave permeabiliteter i forkastningssonen. Lavere vertikal permeabilitet i forkastningssonen gir og større uproduserbar oljeregion.
- Kjøring 5 ($K_x = K_y = K_z = 50 \text{ mD}$) og kjøring 6 ($K_x = K_y = 50 \text{ mD}$, $K_z = 100 \text{ mD}$): I disse kjøringene ble det observert tilbakestrømning, dannelse av uproduserbar oljeregion og vannbank. Den vertikale permeabiliteten i forkastningssonen er ikke stor nok til å utvinne all oljen som befinner seg i forkastningsvolumet (fanget olje). Samtidig er den stor nok til å la nok vann strømme vertikalt i forkastningssonen, samtidig som vann strømmer tilbake fra reservoarcellene i hengblokken. Dette fører til akkumulering av vann i de nederste lagene i forkastningssonen. Figur 9.6 illustrerer dette.
- Kjøring 7 ($K_x = K_y = 50 \text{ mD}$, $K_z = 500 \text{ mD}$): Observasjonene gjort for denne kjøringen er meget lik dem gjort for kjøring 1; høy vertikal strømning og dannelse av vannbank i forkastningssonen.



Figur 9.6 – Fault facies-modell for kjøring 5, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt) ved endt simulering. I nedre del av forkastningsvolumet er det et område hvor det fortsatt befinner seg en del olje. Under dette området har vann akkumulert. (xz-snitt, $j = 15$)

9.1.4 Sammendrag og diskusjon for gouge ratio

Viktige observasjoner gjort i forsøkene med gouge ratio:

1. Høy vertikal strømming i forkastningssone.
2. Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.
3. Tilbakestrømming av vann fra reservoar til forkastning i lave lag for hengblokk.
4. Dannelse av uproduserbar oljeregion i forkastningssone.

Alle de overnevnte punktene er spesielle egenskaper som ikke kan vises med en standardmodell. Standardmodellen har ikke noe forkastningsvolum, hvilket gjør det umulig å simulere tilsvarende prosesser. (Punkt 1 kan modelleres med en utvidet standardmodell.)

Den høye vertikale strømmingen som ble observert for kjøring 1 og 7 gir en klar indikasjon på at det skjer strømminger i forkastningssonen helt uavhengig av sand-mot-sand-strømmen. Karakteristikken for strømmingene i forkastningssonen så ut til å være uavhengig av perforeringen av brønnene, noe som underbygger påstanden om at sand-mot-sand-strøm ikke er tilstrekkelig for simulering av forkastninger. Det vil være nødvendig å definere ikke-naboforbindelser (NNC) i en utvidet standardmodell for å ta høyde for de store vertikale strømmingene i forkastningssonen.

Dannelse av vannbank og uproduserbar oljeregion, samt tilbakestrømming fra reservoar til forkastningssone er forkastningseffekter som ikke lar seg modellere med en standardmodell. Dette fordi det er prosesser som kun kan skje i et volum, og standardmodellen har kun en forkastningsflate.

Simuleringene gjort for gouge ratio har vist at standardmodellen ikke er tilstrekkelig nøyaktig for simulering av forkastninger. For alle kjøringene er det gjort observasjoner som underbygger dette. Strøm mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt kan modelleres i en utvidet standardmodell. Dette er i hovedsak et behov for modeller med høy vertikal forkastningspermeabilitet ($> 50-100$ mD), uavhengig av størrelsen på den horisontale forkastningspermeabiliteten. Utenom forkastningssonen er oppførselen i reservoaret veldig lik for modellene (se figur 9.3 og 9.5), hvilket betyr at observasjonene gjort i fault facies-modellen ikke har stor innvirkning på produksjon og oppførsel i en enkel reservoarmodell. Dette kan forsvare bruken av standardmodellen på enkle reservoarmodeller.

9.2 Gouge ratio og barrierer

I kjøringene med barrierer er det mange av simuleringene som viser samme type resultat, og av denne grunn vil kun enkelte av kjøringene bli presentert i helhet. Resultatene for fault facies- og standardmodellen vil bli sammenlignet og diskutert for åpne og tette barrierer, samt ulike perforeringer. Se kapittel 8.2.2 for kjøringsspesifikasjoner.

9.2.1 Kjøring 1, BAR 1

Denne kjøringen inneholder én barriere på hver side av forkastningen. I liggblokken er den mellom lag syv og åtte, mens i hengblokken er den mellom lag 15 og 16.

Forkastningspermeabilitetene er høy ($K_x = K_y = 5000$ mD, $K_z = 750$ mD).

Det er gjort fire forskjellige kjøringene med disse forkastningspermeabilitetene for fault facies-modellen; to forskjellige perforeringer med både isolerende og ikke-isolerende barriere.

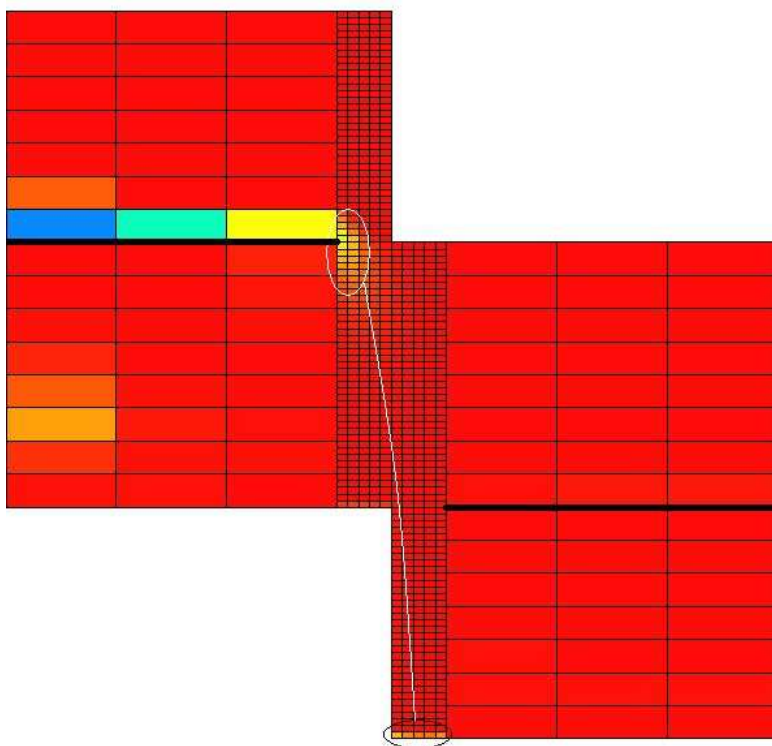
Tanken med barrieren var å undersøke hvordan den påvirket forkastningsstrømmene. Med perforering av produksjonsbrønnen lavt i hengblokk under en isolerende barriere, må den vertikale kommunikasjonen på tvers av barrieren skje i forkastningssonen. Samme kjøring ble gjort med åpen barriere for å undersøke om andelen av vertikal strømming i forkastningssonen var betydelig mindre når strømming på tvers av barrieren var mulig. Med åpen barriere menes det ikke at det er helt åpent, men at barrieren ikke er totalt isolerende. Den vertikale transmissibiliteten gjennom barrieren er redusert kraftig (transmissibilitetsmultiplikatoren er 0,05).

Med isolerende barriere er det gitt at standardmodellen ikke er tilstrekkelig for mange av kjøringene. I mangel av en forkastningssone vil barrierene ligge helt inn mot forkastningen og blokkere all vertikal strøm når barrieren er isolerende.

Viktige observasjoner gjort for denne kjøringen:

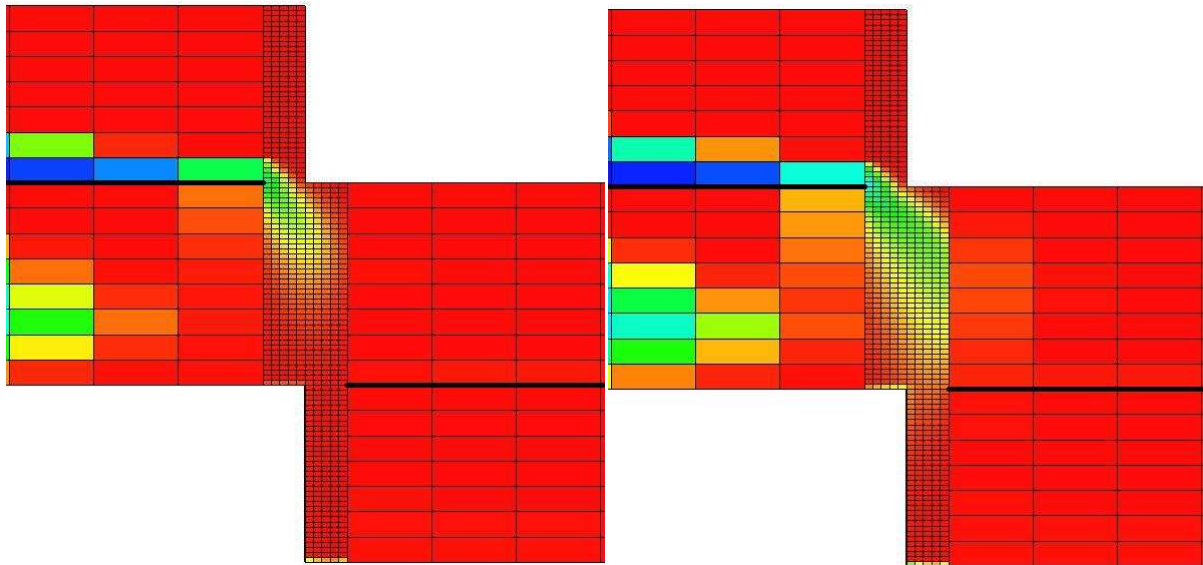
- Høy vertikal strømning i forkastningssone.
- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.

Gjengangeren for alle simuleringene gjort for kjøring 1, uansett perforering og barriereegenskap, er at det registreres store vertikale strømninger og dannelse av vannbank i forkastningssonen. Den vertikale strømningen er mer merkbar enn for tilsvarende kjøring uten barriere (kapittel 9.1.1: gouge ratio, kjøring 1). Det observeres strømning fra høye lag i liggblokk til nederste lag i forkastningssonen (se figur 9.7).



Figur 9.7 – Utsnitt fra fault facies-modellen idet vannfronten over barrieren i liggblokk treffer forkastningssonen for tett barriere, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert i alle lag). Ser tydelig at oljemetningen er redusert i nederste lag i forkastningsvolumet. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, j = 15)

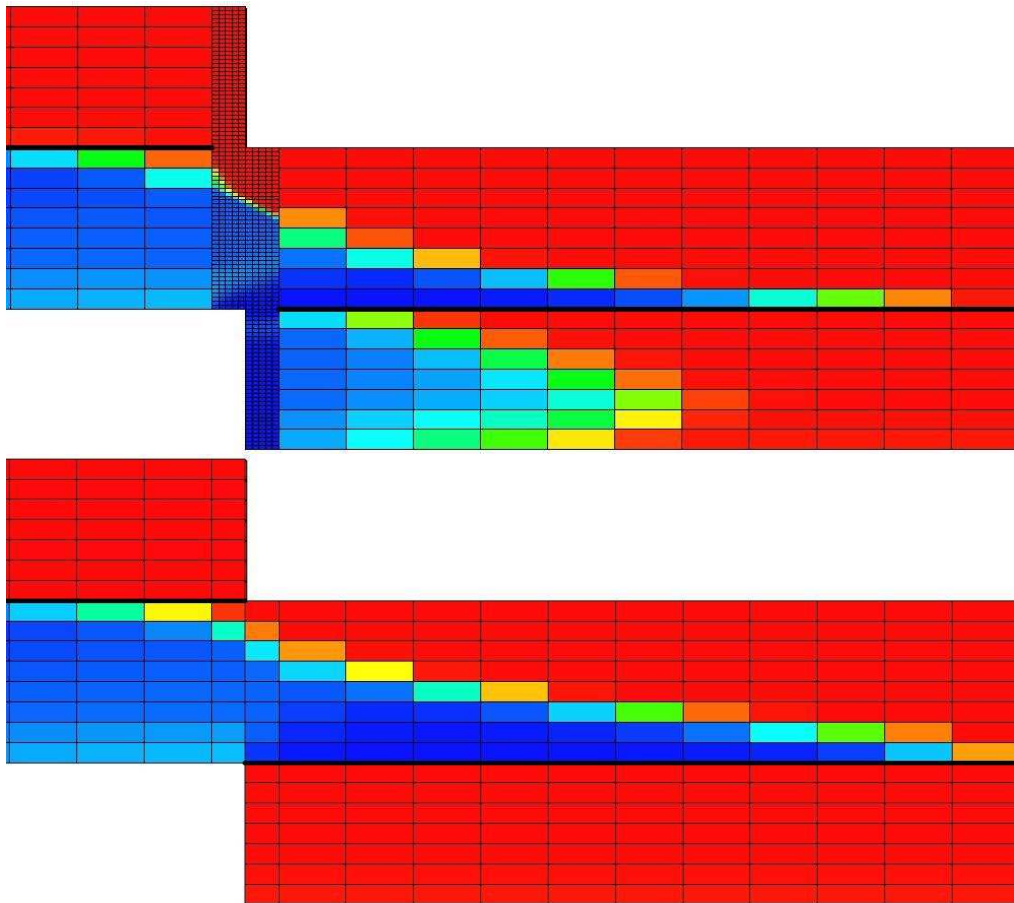
For perforering 2 med tett barriere har det blitt injisert vann både over og under barrieren i liggblokk. Vannet over barrieren treffer forkastningssonen før vannet under barrieren i liggblokk (se figur 9.7), noe som gjorde det lettere å observere strømningsmønsteret fra høye lag i liggblokk.



Figur 9.8 – Utsnitt av fault facies-modellen for tett barriere, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert i alle lag). Viser strømningsbaner fra høyt lag i liggblokk til lavere liggende lag i hengblokk i tidsrommet 1. januar 2014 (venstre) til 1. juli 2014 (høyre). De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

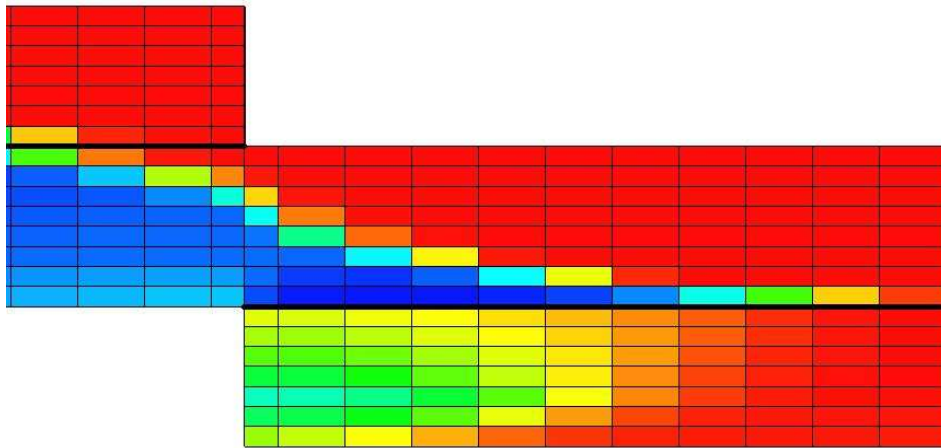
Det ble i hovedsak observert strømning til lag som ikke er i sand-mot-sand-kontakt over barrieren i hengblokk (se figur 9.8). Noe vann migrerte tilbake inn i lag under barrieren i liggblokk (se figur 9.8), og noe vann ble registrert i nederste lag i forkastningssonen (figur 9.7).

Begrensningene til standardmodellen kommer klart fram i denne kjøringen, spesielt for isolerende barrierer. Vann blir hindret å strømme inn i regionen under barrieren i hengblokken, og strømningsbildet blir da totalt forskjellig fra fault facies-modellen (se figur 9.9). Det vil være nødvendig med en utvidet standardmodell med ikke-naboforbindelser for å gjenskape strømningene fra fault facies-modellen.



Figur 9.9 – Fault facies- (øverst) og standardmodell (nederst) for kjøring 1, tett barriere, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert i midtre del av reservoar) ved dato 1. juli 2018. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

Forskjellen mellom modellene er illustrert i figur 9.9. Vannet som ligger i regionen under barrieren i hengblokk i fault facies-modellen har måttet strømme inn i regionen over barrieren i standardmodellen på grunn av den isolerende barrieren. Dette registreres for begge perforeringer med tette barrierer. Med åpne barrierer er tendensen den samme, men noe vann migrerer her gjennom barrieren i hengblokken (se figur 9.10).



Figur 9.10 – Utsnitt fra standardmodell for kjøring 1, åpen barriere, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert i midtre del av reservoar) ved dato 1. juli 2018. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

9.2.2 Resterende kjøringene for BAR 1

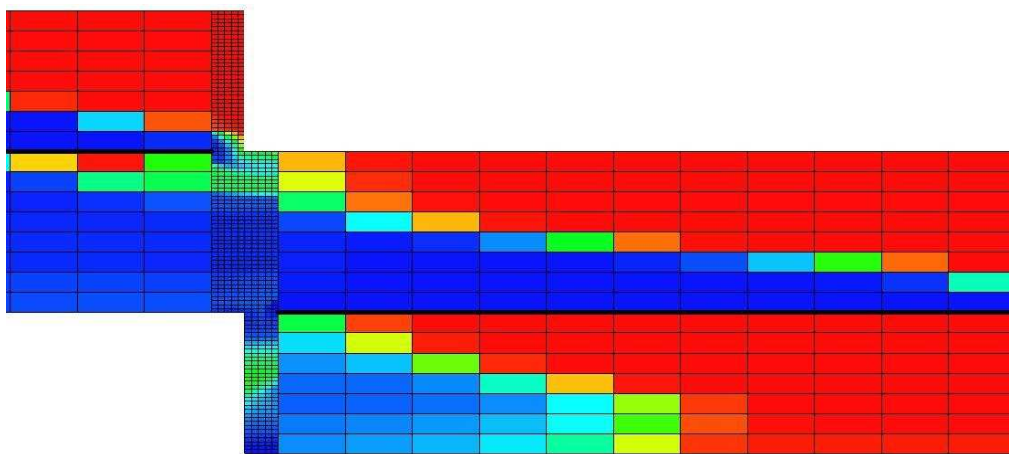
De resterende kjøringene gjort med BAR 1 viste i likhet med kjøring 1, prosesser tidligere registrert (kapittel 9.1.4).

- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.
- Tilbakestrømning av vann fra reservoar til forkastning i lave lag for hengblokk.
- Dannelse av uproduserbar oljeregion i forkastningssone.

Observasjonene som ble gjort er tilnærmet lik for begge perforeringer med isolerende/ikke-isolerende barrierer. Det som skiller dem er hvor tydelig prosessene opptrer.

- Kjøring 2, BAR 1 ($K_x = K_y = 500$ mD, $K_z = 75$ mD): Den horisontale strømmingen dominerer i forkastningssonen. Etter vanngjennombrudd under barrieren i hengblokk migrerer vannet vertikalt i reservoaret og fører til tilbakestrømning i nederste lag i forkastningsvolumet. Den vertikale forkastningspermeabiliteten er stor nok for betydelig vertikal migrering i forkastningssonen, dermed observeres det akkumulasjon av vann i nedre deler av forkastningsvolumet. Noe olje blir liggende igjen i forkastningssonen (uproduserbar oljeregion) (se figur 9.11). Disse prosessene registreres for begge perforeringer med både åpne og tette barrierer.
- Kjøring 3, BAR 1 ($K_x = K_y = 50$ mD, $K_z = 7,5$ mD) og kjøring 4, BAR 1 ($K_x = K_y = 5$ mD, $K_z = 0,75$ mD): I likhet med kjøring 2 dominerer den horisontale strømmingen i forkastningssonen. Men for disse kjøringene er ikke den vertikale forkastningspermeabiliteten stor nok for å utvinne all oljen som befinner seg i

forkastningsvolumet (fanget olje). Vanngjennombrudd under barrieren i hengblokk sørger for migrering av vann vertikalt i reservoaret, som igjen fører til tilbakestrømning i nederste lag i forkastningsvolumet. Den uproduserbare oljeregionen og tilbakestrømningen er henholdsvis større og mindre for kjøring 4. Dette fordi den vertikale forkastningspermeabiliteten er mindre. Da vil den vertikale fortregningen i forkastningssonen være mindre og andelen vann tilgjengelig for tilbakestrømning (vann som har fått gjennombrudd under barrieren i hengblokk) vil være mindre. Samt at forkastningspermeabiliteten i kjøring 4 er mindre gunstig for tilbakestrømning generelt.



Figur 9.11 – Fault facies-modell for kjøring 2, tett barriere, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert i alle lag) ved endt simulering. Under barrieren i hengblokken har vann migrert vertikalt i reservoarcellene inn mot forkastningssonen og forårsaket tilbakestrømning i nedre del av forkastningsvolumet. Vann har akkumulert i dette området, med en uproduserbar oljeregion liggende over. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

De samme begrensningene i standardmodellen redegjort for i kjøring 1 (kapittel 9.2.1, avsnitt 8-9) gjelder for kjøringene 2-4: Vann blir hindret å strømme inn i regionen under barrieren i hengblokken, og strømningsbildet blir totalt forskjellig fra fault facies-modellen.

9.2.3 Kjøring 4, BAR 2

Denne kjøringen inneholder barrierer mellom alle lag i reservoaret. Dette gjør det lett å konstruere strømningsbaner fra ligg- til hengblokk, spesielt hvis barrierene er isolerende. Med isolerende barrierer vil strømmen kun trekkes mot lag som produseres, og strømmen vil da skje i forkastningsvolumet. Med ikke-isolerende barrierer vil de og trekkes mot produserende lag, men strømmen kan da alternativt gå vertikalt på tvers av barrierene i reservoaret.

Forkastningspermeabilitetene for denne kjøringen er lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 50$ mD). Observasjoner som er verdt å merke seg for denne kjøringen:

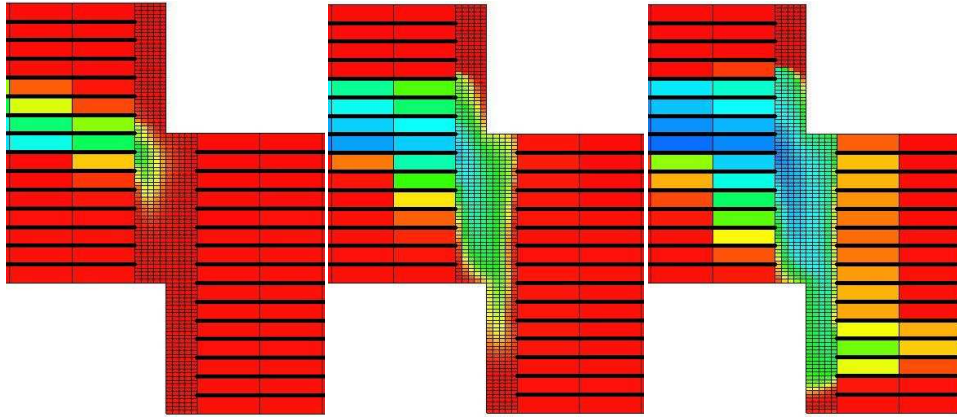
- Høy vertikal strømming i forkastningssone.
- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i nedre lag av forkastningsvolumet.
- Tilbakestrømming av vann fra forkastningssone til liggblokk.
- Strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk.

9.2.3.1 Perforering 1

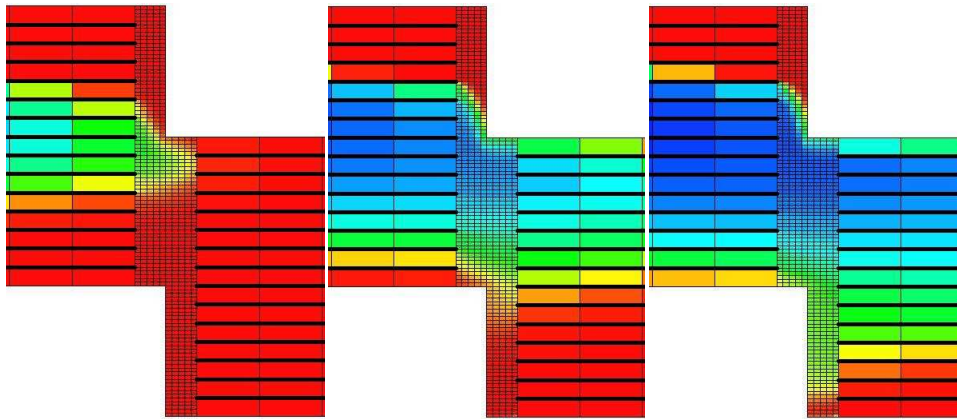
Med perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt, se tabell 8.7) er strømningsforløpet litt forskjellig for åpne og tette barrierer. Med tette barrierer migrerer vannet vertikalt mot produserende lag inni forkastningsvolumet (se figur 9.12). Mens for åpne barrierer migrerer vannet vertikalt både i forkastningsvolumet og i reservoaret (se figur 9.13). Vannet migrerer da naturlig nok ikke like langt vertikalt på samme tid for åpne som tette barrierer.

I kjøringen med de tette barrierene observeres det at det forekommer tilbakestrømming av vann fra forkastningssonen til nærliggende celler i liggblokken (se figur 9.12). Det registreres også at noe vann strømmer inn i ikke-produserende lag i hengblokken. For begge disse tilfellene vil det være nødvendig i en utvidet standardmodell å definere ikke-naboforbindelser til disse lagene med lave transmissibilitetsmultiplikatorer. Ikke-naboforbindelser må selvsagt også defineres til produserende lag, men her må transmissibilitetsmultiplikatorene være betydelig større.

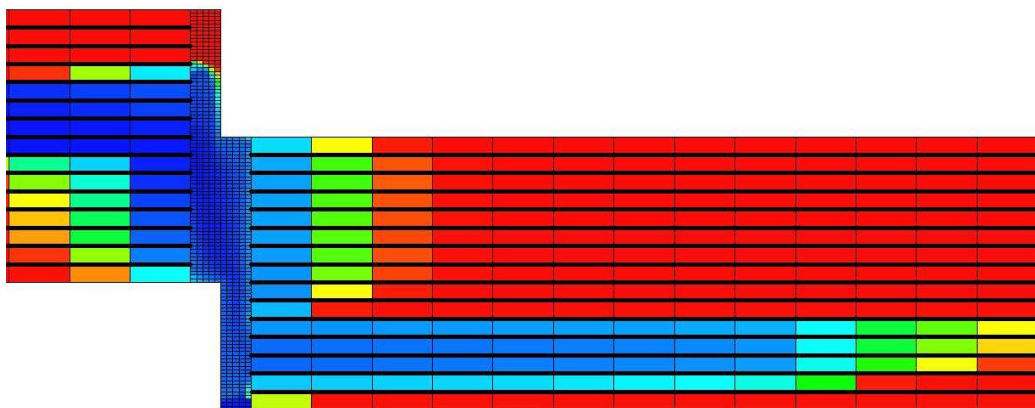
For kjøringen med tette barrierer registreres det akkumulering av vann for de nederste lagene i forkastningsvolumet sent i simuleringen. Dannelsen av vannbanken er ikke like tydelig som for tidligere kjøringer (for eksempel kjøring 1 (BAR 1), kapittel 9.2.1), noe som kan forklares med at mye av vannet som normalt sett ville samlet seg her, har strømmet inn i overliggende lag i reservoaret i både ligg- og hengblokk. Når det kun er få lag i hengblokk som produseres kan ikke alt vannet strømme mot, og inn i disse lagene. Da må vannet nødvendigvis akkumuleres i reservoaret, og det er dette som observeres (se figur 9.14).



Figur 9.12 – Utsnitt av fault facies-modellen for tette barrierer, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt). Viser hvordan strømmen migrerer vertikalt i forkastningssonen ved datoene 1. januar 2013 (venstre), 1. januar 2014 (midten) og 1. januar 2015 (høyre). De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)



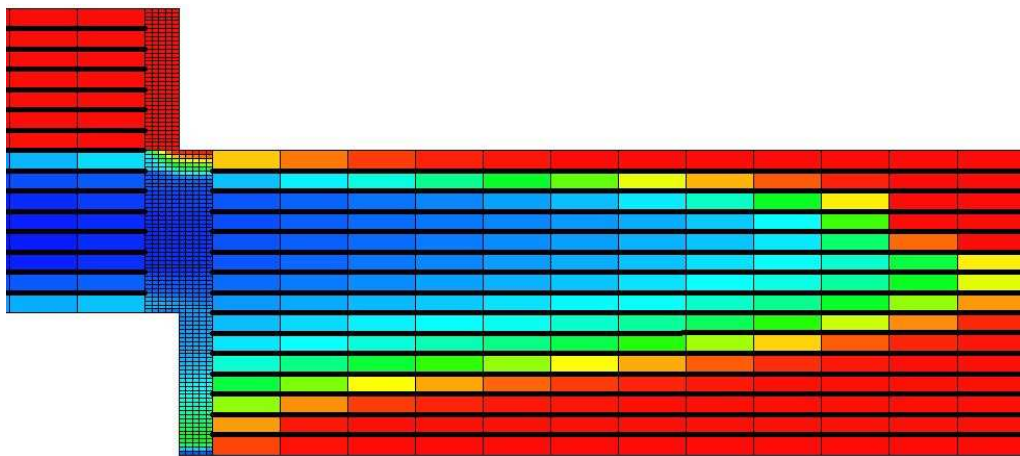
Figur 9.13 – Utsnitt av fault facies-modellen for åpne barrierer, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt). Viser hvordan strømmen migrerer vertikalt både i forkastningssonen og reservoaret ved datoene 1. juli 2014 (venstre), 1. juli 2019 (midten) og 1. juli 2024 (høyre). De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)



Figur 9.14 – Utsnitt av fault facies-modellen for tett barriere, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) ved endt simulering. Viser hvordan det akkumuleres vann i reservoarblokker og i de nederste lagene i forkastningsvolumet. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

9.2.3.2 Perforering 2

Med perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt for åpne barrierer og i alle lag for isolerende barrierer, se tabell 8.7) er strømningsforløpet omtrentlig likt for åpne og tette barrierer. Den horisontale strømmingen dominerer i forkastningssonen. Vertikal migrering foregår tregt, men det vil like fullt være nødvendig med ikke-naboforbindelser i en utvidet standardmodell for å ta høyde for den vertikale strømmingen mot lavtliggende lag i hengblokken. Det interessante er at vannet strømmer mot lavtliggende lag gjennom forkastningssonen på tross av at produksjonsbrønnen er perforert høyt i hengblokken for åpne barrierer (se figur 9.15).



Figur 9.15 – Utsnitt av fault facies-modellen for åpne barrierer, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt) ved endt simulering. Viser hvordan vann har migrert vertikalt i forkastningsvolumet på tross av høyt perforert produksjonsbrønn. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

9.2.3.3 Sammendrag for kjøring 4, BAR 2

Strømningsforløpet utarter seg forskjellige for perforering 1 og 2. Perforering 1 (høyt perforert injeksjonsbrønn og lavt perforert produksjonsbrønn) ga som ventet store vertikale strømninger med akkumulering av vann i nedre del av forkastningsvolumet.

Tilbakestrømningen av vann fra forkastningssonen, samt strøm av vann inn i ikke-produserende lag var nye interessante prosesser som ga større forståelse for mekanismene som skjer i forkastningssonen og området rundt. Disse prosessene vil ikke kunne sees i en standardmodell. Standardmodellen er omtrent ubrukelig for kjøring 1 der barrierene er isolerende. Dette fordi vannet kun kan strømme mellom lag i sand-mot-sand-kontakt. Når produksjonsbrønnen er perforert lavt, og det ikke er noen vertikal kommunikasjon mellom lagene, vil ikke perforerte lag motta noen trykkstøtte fra injeksjonsbrønnen. Da faller trykket raskt under boblepunktstrykket og simuleringen stoppes.

En utvidet standardmodell med ikke-naboforbindelser må benyttes for å ta høyde for disse prosessene.

Perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt for åpne barrierer og i alle lag for isolerende barrierer) ga mindre vertikale strømminger enn perforering 1. Men selv om produksjonsbrønnen var perforert høyt i hengblokk ble det registrert at vann strømmet vertikalt i forkastningssonen mot ikke-produserende lag (se figur 9.15). Dette er en interessant observasjon som ikke vil bli tatt høyde for i en standardmodell på grunn av manglende forkastningsvolum.

9.2.4 Resterende kjøring for BAR 2

De resterende kjøringene gjort med BAR 2 viste prosesser tidligere registrert:

- Høy vertikal strømning i forkastningssone.
- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i nedre lag av forkastningsvolumet.
- Dannelse av uproduserbar oljeregion (fanget olje) i forkastningssone.
- Tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk.
- Strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk.

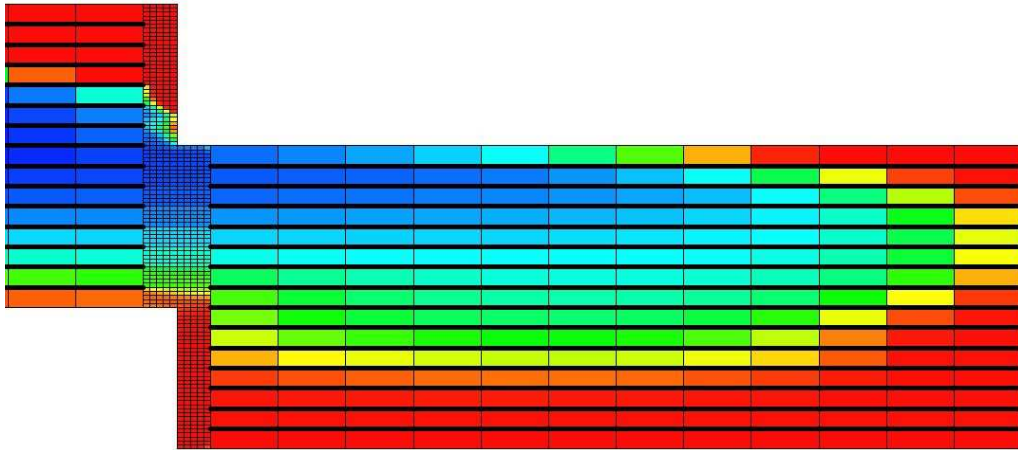
Hvordan brønnene er perforert påvirker oppførselen til strømmingene i forkastningssonen og reservoaret. Prosessene blir enten mer fremtredende eller mindre tydelig.

- Kjøring 1, BAR 2 ($K_x = K_y = K_z = 500$ mD): Den vertikale strømmingen dominerer i forkastningssonen. Vannet treffer forkastningssonen, migrerer raskt vertikalt og akkumuleres i nedre del av forkastningsvolumet. Dette er felles for begge perforeringer uavhengig av om barrierene er isolerende eller ikke, og skyldes den høye vertikale forkastningspermeabiliteten. For perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) registreres det også tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk. Noe vann migrerer også inn i ikke-produserende lag i hengblokk.
- Kjøring 2, BAR 2 ($K_x = K_y = 500$ mD, $K_z = 50$ mD): Lavere vertikal forkastningspermeabilitet medfører tregere vertikal migrering av vann i forkastningssonen. For perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) observeres det tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk, og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk. De vertikale strømningsbanene i forkastningsvolumet er mindre tydelig for

åpne enn for tette barrierer. Dette skyldes at mye vann migrerer vertikalt i reservoaret for åpne barrierer. Med isolerende barrierer akkumuleres det noe vann i de nederste lagene i forkastningsvolumet. For perforering 2 med åpne barrierer (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt) dominerer den horisontale strømmingen i forkastningssonen. Vann migrerer også vertikalt i forkastningsvolumet, men strømmingene er ikke stor nok for å utvinne all oljen fra de nederste lagene (fanget olje).

- Kjøring 3, BAR 2 ($K_x = K_y = 500$ mD, $K_z = 5$ mD): For denne kjøringen har perforeringen en betydelig innvirkning på strømningsoppførselen. Den vertikale forkastningspermeabiliteten er lav, samt barrierene utgjør en begrensende faktor for vertikal kommunikasjon. For at det skal observeres en merkbar vertikal migrering av vann i forkastningsvolumet og reservoaret må produksjonsbrønnen være perforert lavt i hengblokken. For perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) observeres det treg vertikal migrering av vann i forkastningsvolumet. For tette barrierer registreres det tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk, og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk. For åpne barrierer er tendensen at vannet migrerer horisontalt gjennom forkastningssonen for så å migrere vertikalt mot produksjonsbrønnen i reservoarblokkene. Dermed blir det liggende mye fanget olje igjen i nedre del av forkastningsvolumet (se figur 9.16). For perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt for åpne barrierer, og i alle lag for isolerende barrierer, se tabell 8.7) er den horisontale strømmingen dominerende i forkastningssonen. Det blir da liggende mye olje igjen i forkastningsvolumet (fanget olje) for både kjøringene med åpne og tette barrierer.
- Kjøring 5, BAR 2 ($K_x = K_y = K_z = 5$ mD): Denne kjøringen utarter seg omtrentlig likt som kjøring 4, BAR 2 (kapittel 9.2.3). Forskjellen er at forkastningspermeabilitetene i alle retninger er mindre, noe som medfører lavere hastighet på vannfronten og tregere vertikal migrering. For perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) med isolerende barrierer måtte injeksjonsraten reduseres til $1000 \text{ Sm}^3/\text{D}$. Dette på grunn av de lave forkastningspermeabilitetene. Strøm av fluid gjennom forkastningssonen går sent. Dermed trengs det en lavere injeksjonsrate, ellers vil mye vann akkumuleres i et lite område i liggblokk og trykket vil øke kraftig i denne regionen. For perforering 1 med tette barrierer observeres det vertikal migrering av vann i forkastningssonen mot produserende lag i hengblokk. Det observeres også

tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk, og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk. For åpne barrierer registreres det vertikal migrering av vann i både forkastningssonen og i reservoaret. Det blir liggende igjen mye olje i de nederste lagene i forkastningsvolumet (fanget olje) for både åpne og tette barrierer. For perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt for åpne barrierer, og i alle lag for isolerende barrierer, se tabell 8.7) ble det observert vertikal migrering i forkastningssonen for både åpne og tette barrierer.



Figur 9.16 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 3, åpen barriere, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) ved endt simulering. Viser fanget olje (ikke-produserbar oljeregion) i nedre del av forkastningsvolumet. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

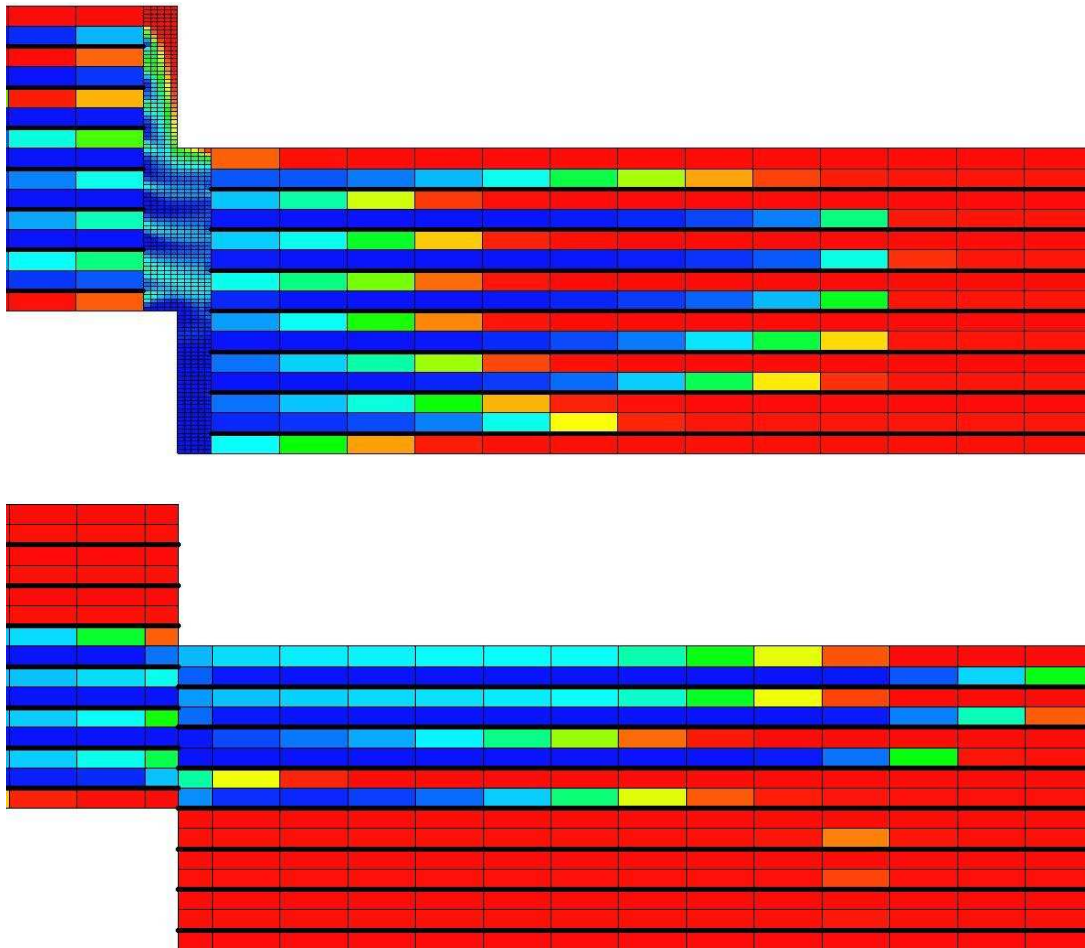
For kjøring 1-3 og 5 for BAR 2 gjelder de samme begrensningene med standardmodellen som beskrevet for kjøring 4 (kapittel 9.2.3.3): Kjøringene med isolerende barrierer er tilnærmet ubrukelig. Produksjonsbrønnen mottar ingen trykkstøtte fra injeksjonsbrønnen grunnet fraværende vertikal kommunikasjon mellom lagene. Trykket faller da raskt under boblepunktstrykket rundt produksjonsbrønnen og simuleringen stoppes.

Med åpne barrierer skjer det vertikal migrering i reservoarblokkene, men strømningsbanene fra fault facies-modellen i forkastningssonen blir ikke gjengitt fordi strømmen kun går mellom sand-mot-sand-kontakter på tvers av forkastningen. For å ta høyde for de vertikale forkastningsstrømmene observert i kjøringene gjort med fault facies-modellen vil det være nødvendig med en utvidet standardmodell for hver av kjøringene med egendefinerte ikke-naboforbindelser.

9.2.5 Kjøring 1, BAR 3

Denne kjøringen inneholder barrierer mellom annethvert lag i reservoaret.

Forkastningspermeabilitetene for denne kjøringen er lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 500$ mD). De samme observasjonene gjort for kjøring 1, BAR 2 (kapittel 9.2.4) gjøres for denne kjøringen: Den vertikale strømmingen dominerer i forkastningssonen, uavhengig av perforeringer og barriereegenskaper. Det observeres store vertikale strømninger og akkumulering av vann i nedre del av forkastningsvolumet. For perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) registreres det også tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk. Noe vann migrerer også inn i ikke-produserende lag i hengblokk.



Figur 9.17 – Utsnitt fra fault facies-modellen (øverst) og standardmodellen (nederst) for tette barrierer, perforering 2 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis lavt og høyt) ved endt simulering. Viser forskjellene mellom modellene. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

I figur 9.17 ser man at tyngdeeffekter gjør at vannfronten akkumuleres i de nederste av lagene mellom hver barriere. Figuren illustrerer også tydelig forskjellen mellom simuleringene gjort i

fault facies- og standardmodellen. I fault facies-modellen har vann migrert til nedre del av hengblokk gjennom forkastningssonen. På grunn av manglende forkastningsvolum og isolerende barrierer blir vertikal migrering til dette området utelatt i standardmodellen. For å oppnå strømminger til nedre del av hengblokk i standardmodellen er det nødvendig å definere ikke-naboforbindelser til celler i dette området (utvidet standardmodell).

9.2.6 Kjøring 1, BAR 4

Denne kjøringen inneholder barrierer mellom hvert femte lag i reservoaret.

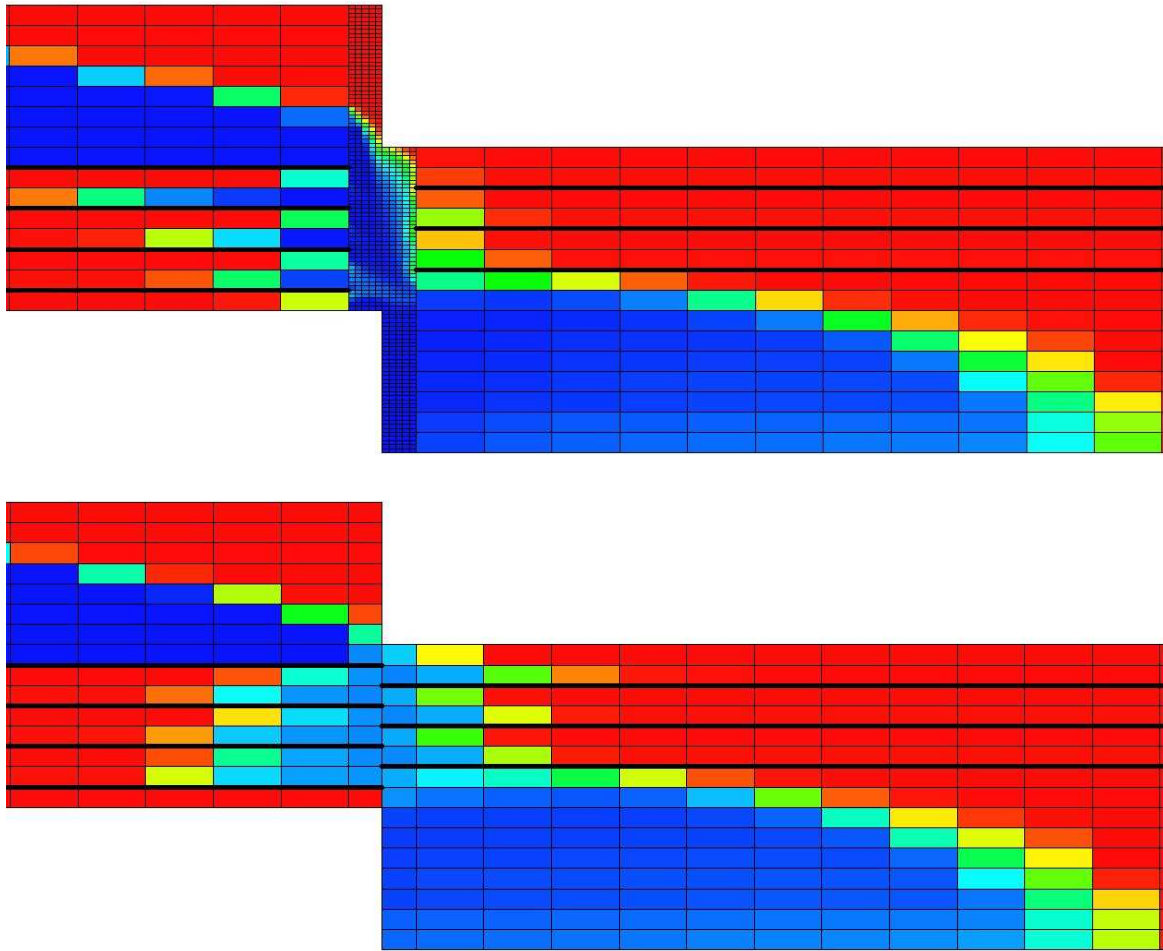
Forkastningspermeabilitetene for denne kjøringen er lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 500$ mD). Oppførselen til denne kjøringen er meget lik den som ble gjort for BAR 3 (kapittel 9.2.5): Store vertikale strømminger, akkumulering av vann i nedre del av forkastningsvolumet, tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk.

På grunn av manglende forkastningsvolum i standardmodellen blir strømning mot nedre del av hengblokk fraværende for isolerende barrierer. For åpne barrierer skjer den vertikale kommunikasjonen på tvers av barrierene, men strømningsbildet blir forskjellig fra fault facies-modellen. Det trengs en utvidet standardmodell for å gjenskape strømmingene fra fault facies-modellen.

9.2.7 Kjøring 1, BAR 5

Denne kjøringen inneholder barrierer mellom annethvert lag definert i tabell 8.5, der barrierene ikke korrelerer på tvers av forkastningen. Dette for å oppnå krysstrømning i standardmodellen (se figur 8.3). I øvre del av liggblokk og nedre del av hengblokk er det ikke implementert barrierer. Kjøringen ble inkludert som en alternativ løsning for vertikal kommunikasjon i en standardmodell med barrierer. Forkastningspermeabilitetene for denne kjøringen er lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 500$ mD).

I fault facies-modellen ble det observert, i likhet med tidligere kjøringer, store vertikale strømminger, akkumulasjon av vann i nedre del av forkastningsvolum, tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk.



Figur 9.18 – Utsnitt fra fault facies-modellen (øverst) og standardmodellen (nederst) for tette barrierer, perforering 1 (injeksjons- og produksjonsbrønn perforert henholdsvis høyt og lavt) ved endt simulering. De tykke svarte strekene representerer barrierene. (xz-snitt, $j = 15$)

I standardmodellen ble det i likhet med fault facies-modellen observert tilbakestrømning av vann inn i liggblokk og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk. Ved å modellere barrierene slik at krysstrømning på tvers av forkastningen er mulig, ble strømningsoppførselen omtrentlig lik fault facies-modellen. Akkumuleringen av vann i forkastningsvolumet er en prosess som ikke vil kunne skildres i standardmodellen på grunn av manglende forkastningsvolum. Men de store vertikale strømmingene i forkastningssonen (strøm mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt) blir i standardmodellen kompensert for gjennom krysstrøm på tvers av forkastningen ("sik-sak-strøm"). I stedet for en direkte forbindelse (ikke-naboforbindelse) mellom to celler, så går strømmen innom flere celler før den når "målet".

De samme observasjonene ble gjort med begge perforeringer og barriereegenskaper for fault facies- og standardmodellen.

9.2.8 Sammendrag og diskusjon for gouge ratio og barrierer

Viktige observasjoner gjort i forsøkene med gouge ratio og barrierer:

1. Høy vertikal strømming i forkastningssone.
2. Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.
3. Tilbakestrømming av vann fra reservoar til forkastning i lave lag for hengblokk.
4. Dannelse av uproduserbar oljeregion i forkastningssone.
5. Tilbakestrømming av vann fra forkastningssone til liggblokk.
6. Strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk.

Punktene 1-6 er spesielle prosesser som ikke kan vises med en standardmodell uten modifikasjoner. Punktene 2, 3 og 4 kan umulig vises i en standardmodell på grunn av manglende forkastningsvolum. Punkt 1, 5 og 6 kan vises i en utvidet standardmodell der det er definert ikke-naboforbindelser (NNC) mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt.

I kjøringene med BAR 1 ble de samme observasjonene som for gouge ratio observert. Med høye forkastningspermeabiliteter (fortrinnsvis i z-retning) ble det observert stor vertikal strømming i forkastningssonen og akkumulering av vann i forkastningsvolumet. Med lavere forkastningspermeabiliteter ble det observert tilbakestrømming av vann fra reservoar til forkastning i lave lag for hengblokk, og dannelse av uproduserbar oljeregion i forkastningssonen. Barrierene ga og klare indikasjoner på at strømningsbildet ble veldig forskjellig mellom fault facies- og standardmodellen.

Kjøringene med BAR 2 viste de samme prosessene som for BAR 1. Høy vertikal forkastningspermeabilitet ga store vertikale strømninger og akkumulering av vann i forkastningsvolumet. Det ble i tillegg observert tilbakestrømming av vann fra forkastningssone til liggblokk og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk. Forskjellen mellom fault facies- og standardmodellen var meget lett påviselig for kjøringene med BAR 2. Enkelte av kjøringene var umulig å gjennomføre med standardmodellen fordi den vertikale kommunikasjonen i reservoaret var fraværende grunnet barrierene. Trykket falt dermed raskt rundt produksjonsbrønnen og simuleringen ble stoppet.

Forskjellen mellom fault facies- og standardmodellen kom også klart frem for kjøringene med BAR 3 og 4: Standardmodellen inneholder ikke noe forkastningsvolum, dermed modelleres barrierene helt inn mot forkastningsflaten og vertikal kommunikasjon blir umulig hvis barrierene er isolerende. Strømningsbildet blir da totalt forskjellig mellom modellene (se figur

9.17). I fault facies-modellen strømmer vannet gjennom forkastningsvolumet mot nedre del av hengblokk. I standardmodellen er dette umulig fordi strømmen kun går mellom sand-mot-sand-kontakter.

Kjøring 5 var et tilfelle der barrierene var modellert fordelaktig for krysstrømning i standardmodellen. I virkelige reservoar vil en slik konfigurasjon være typisk. (Bare unntaksvis vil barrierer opptre på samme dyp på begge sider av forkastningen.) Resultatene fra standardmodellen stemte godt med strømningsoppførselen i fault facies-modellen (se figur 9.18). Tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk ble observert for begge modeller. (Standardmodellen har ikke noe forkastningssone, så der var tilbakestrømningen en del av vannet som migrerte vertikalt i krysstrømningen.) Det vannet som akkumulerte i forkastningsvolumet i fault facies-modellen ble jevnt fordelt i reservoaret i standardmodellen.

Forsøkene med barrierer har vist mange av de samme observasjonene som for gouge ratio. Høy vertikal forkastningspermeabilitet (> 100 mD) gir store vertikale strømninger inni forkastningssonen og akkumulering av vann i nedre del av forkastningsvolumet. Dette ble observert selv for forsøk der produksjonsbrønnen var perforert høyt i hengblokk. Det kan dermed tyde på at det er en forkastningsegenskap som opptre uavhengig av brønnperforering.

Akkumuleringen av vann i forkastningsvolumet er en viktig forkastningsegenskap som ikke vil vises med en standardmodell på grunn av manglende forkastningsvolum. Vannbanken kan muligens med tiden endre strømningsmønsteret, og dette vil da ikke bli tatt høyde for i en standardmodell. De store vertikale strømningene i forkastningssonen kan derimot modelleres med ikke-naboforbindelser i en utvidet standardmodell. Dette er også gjeldende for tilbakestrømning av vann fra forkastningssone til liggblokk, og strøm av vann inn i ikke-produserende lag i hengblokk.

Dannelse av uproduserbar oljeregion, samt tilbakestrømning fra reservoar til forkastningssone er forkastningsprosesser som ikke lar seg modellere med en standardmodell. Dette fordi det er prosesser som kun kan skje i et volum, og standardmodellen innehar kun en forkastningsflate.

Simuleringene gjort med barrierer har vist at standardmodellen på langt nær er tilstrekkelig. I tillegg til at standardmodellen utelukker viktige forkastningsegenskaper, så hindrer barrierene strøm mot underliggende lag for mange av tilfellene. Strømmen mot disse lagene går gjennom forkastningsvolumet, og når standardmodellen kun innehar en forkastningsflate blir det

umulig. Det er da nødvendig med en utvidet standardmodell med ikke-naboforbindelser til blokker som ligger under barrieren(-e). En alternativ måte å løse dette på kan være å benytte seg av krysstrømning (kapittel 9.2.7). I virkelige reservoar vil omtrent aldri barrierene korrelere på tvers av forkastningen, noe som gjør "sik-sak-strøm" mulig. Metoden ga omtrentlig likt strømningsbilde mellom fault facies- og standardmodellen.

I forsøkene med barrierer må det anvendes en fault facies-modell eller en utvidet standardmodell for å simulere strømmingene korrekt.

9.3 Shale smear

I kjøringene med shale smear vil resultatene fra fault facies-modellen bli presentert først. Kjøring nummer syv vil bli nøye gjennomgått, da det er denne kjøringen som ble brukt for å reproducere resultat i standardmodellen (utvidet standardmodell). Deretter vil kjøring nummer syv for den utvidede standardmodellen bli presentert.

Det vil ikke bli sammenlignet resultater mellom fault facies- og standardmodellen for andre kjøringene enn nummer syv. Dette fordi arbeidet med å konstruere resultat i en utvidet standardmodell er svært tidkrevende, og ble derfor kun gjort for kjøring nummer syv.

9.3.1 Shale smear med fault facies-modell

Alle kjøringene for fault facies-modellen vil bli presentert, noen mer inngående enn andre. Observasjonene som ble gjort er prosesser tidligere registrert (kapittel 9.1 og 9.2):

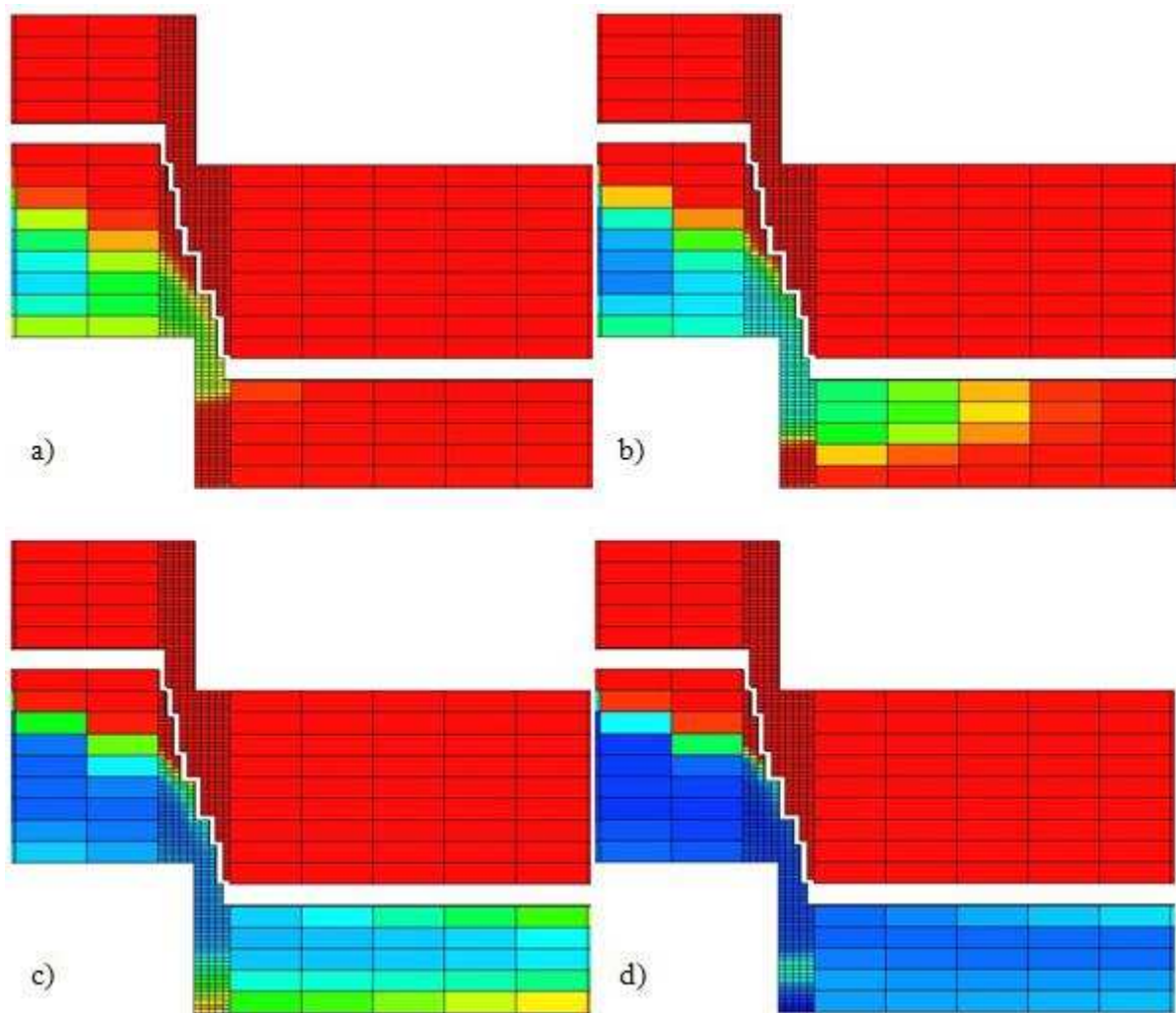
- Høy vertikal strømning i forkastningssone.
- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.
- Dannelse av uproduserbar oljeregion i forkastningssone.

9.3.1.1 Kjøring 1

Denne kjøringen ble gjort som en test av shale smear-modellen. Barrieren er totalt isolerende ($K_{b6} = K_{b17} = K_{b6-17} = 0$ mD) og brønnene er perforert lavt i ligg- og hengblokk, slik at strømmen kun har én vei å gå. Kjøringen ble gjort for å bekrefte at dette skjedde.

Forkastningspermeabilitetene er relativt høy for denne kjøringen ($K_x = K_y = 500$ mD, $K_z = 75$ mD).

Vannfronten treffer forkastningssonen og migrerer både horisontalt og vertikalt i forkastningsvolumet. Den "utsmurte" delen av shale smear er isolerende og tvinger vannet mot nedre del av hengblokk (se figur 9.19). Kjøringen var dermed som ventet.



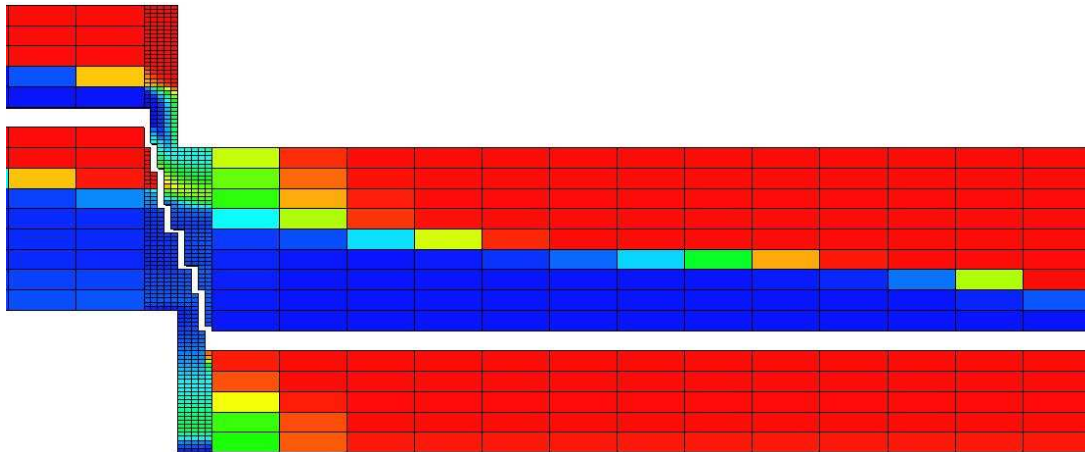
Figur 9.19 – Utsnitt av fault facies-modellen ved forskjellige tidssteg for kjøring 1, shale smear. a) 1. januar 2014. b) 1. januar 2015. c) 1. januar 2017. d) 1. januar 2021. Brønnene er perforert lavt i ligg- og hengblokk for å konstruere strømning mellom disse områdene. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.2 Kjøring 2

I denne og resten av kjøringene gjort med fault facies-modellen er brønnene perforert lavt i begge regionene i liggblokk. Det vil si i lagene rett over barrieren, og i lagene nederst i liggblokk. Produksjonsbrønnen er perforert høyt i hengblokk. Det medfører at strøm fra regionen under barrieren i liggblokk må migrere gjennom shale smear for å utvinnes. For denne kjøringen er forkastningspermeabilitetene relativt høy ($K_x = K_y = 500$ mD, $K_z = 75$ mD). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0$ mD, $K_{b6-17} = 1$ mD).

Vannfronten over barrieren treffer forkastningssonen først, og det observeres strøm mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt på tvers av forkastningen. Vannfronten under barrieren migrerer både gjennom smear og vertikalt i forkastningsvolumet. Det akkumuleres noe vann i nedre del av forkastningsvolumet (se figur 9.20). For denne kjøringen ville det

vært nødvendig å definere ikke-naboforbindelser mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt i en standardmodell. Dette for å ta høyde for de vertikale strømmingene i forkastningssonen.

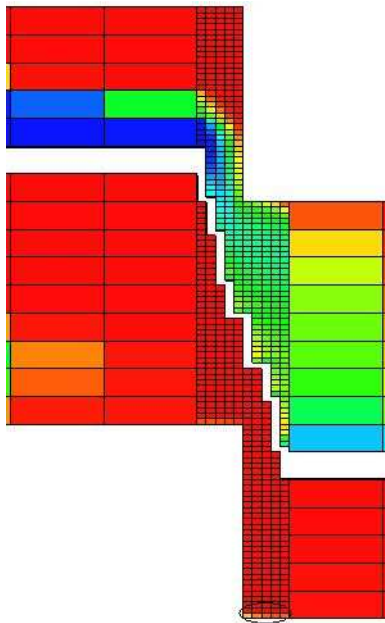


Figur 9.20 – Utsnitt av fault facies-modell for kjøring 2, shale smear ved endt simulering. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.3 Kjøring 3

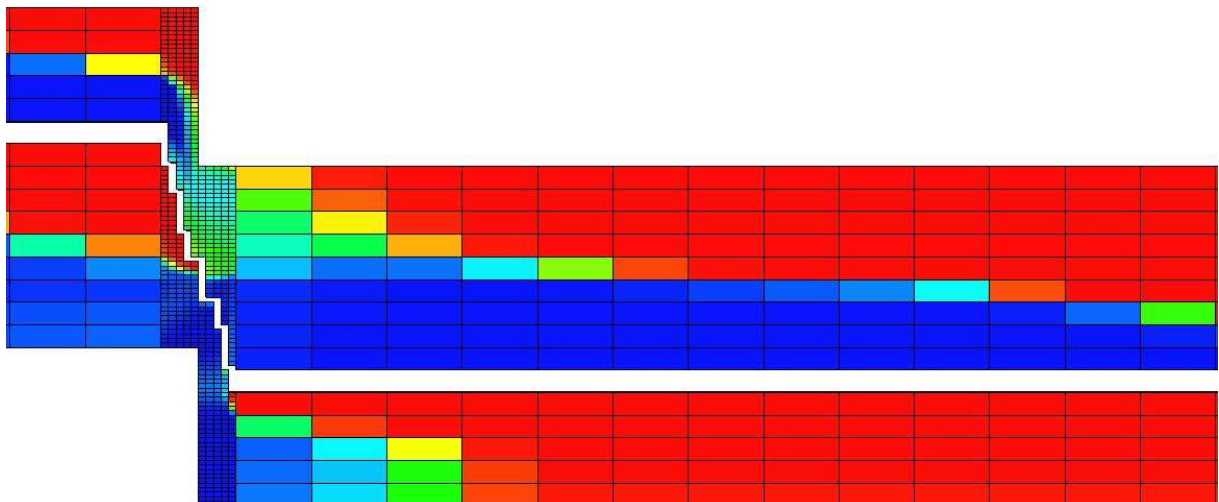
Forkastningspermeabilitetene for denne kjøringen er lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 500$ mD). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0$ mD, $K_{b6-17} = 1$ mD). Det ble observert store vertikale strømminger i forkastningssonen og akkumulasjon av vann i nedre del av forkastningsvolumet.

Før vannfronten under barrieren i liggblokk hadde nådd forkastningssonen ble det registrert vann i nederste lag i forkastningsvolumet (se figur 9.21). Det kan bety at vannfronten over barrieren i liggblokk har migrert gjennom smear til de nederste lagene i forkastningsvolumet.



Figur 9.21 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 3, shale smear ved dato 1. juli 2015. Viser hvordan vann har migrert fra toppen av liggblokk, gjennom smear og til bunns i forkastningsvolumet. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

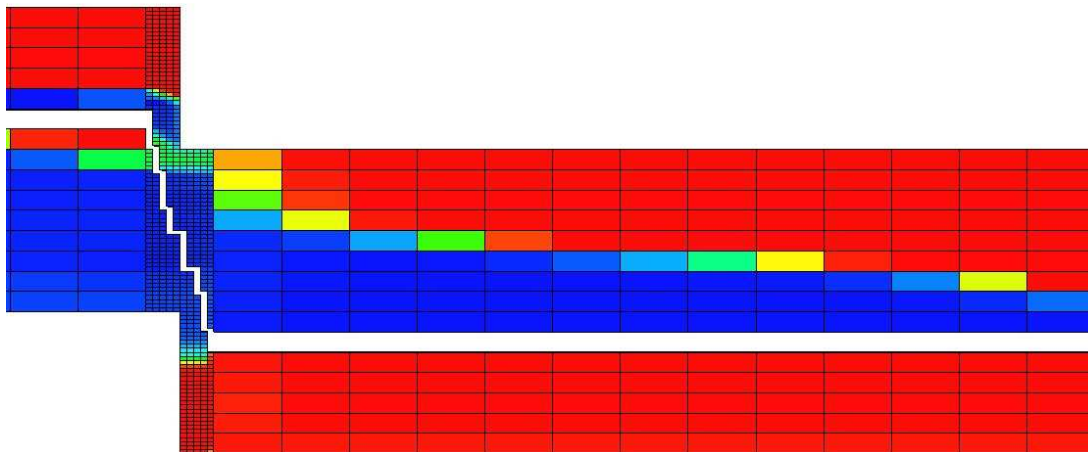
Når vannfronten under barrieren i liggblokk treffer forkastningssonen observeres det store vertikale strømnings i forkastningsvolumet. Mye vann akkumuleres i de nedre lagene i forkastningsvolumet (se figur 9.22). En utvidet standardmodell ville vært nødvendig for å gjenskape strømningsene fra fault facies-modellen.



Figur 9.22 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 3, shale smear ved endt simulering. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.4 Kjøring 4

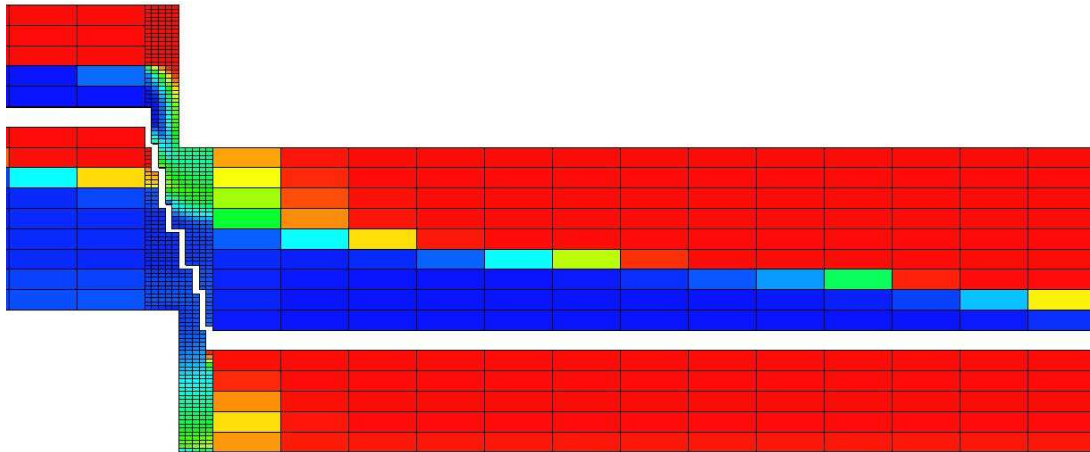
For denne kjøringen er den horisontale og den vertikale forkastningspermeabiliteten henholdsvis høy og lav ($K_x = K_y = 500$ mD, $K_z = 5$ mD). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0$ mD, $K_{b6-17} = 1$ mD). Det ble observert lite vertikal strømming i forkastningssonen for denne kjøringen. På grunn av lav vertikal forkastningspermeabilitet og høyt perforert produksjonsbrønn migrerer ikke vannet mot nedre del av forkastningsvolumet. Dermed blir det liggende mye olje igjen her (fanget olje). Vannfronten over barrieren i liggblokk migrerer vertikalt i forkastningssonen på grunn av geometrien. For å strøømme fra øvre del av liggblokk mot produksjonsbrønn, må vannet migrere vertikalt i forkastningssonen på grunn av forkastningsspranget (se figur 9.23). I en standardmodell ville det vært nødvendig å definere ikke-naboforbindelser mellom øvre del av liggblokk over barrieren, til øverste lag i hengblokk for å ta høyde for de vertikale strømmingene.



Figur 9.23 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 4, shale smear ved endt simulering. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.5 Kjøring 5

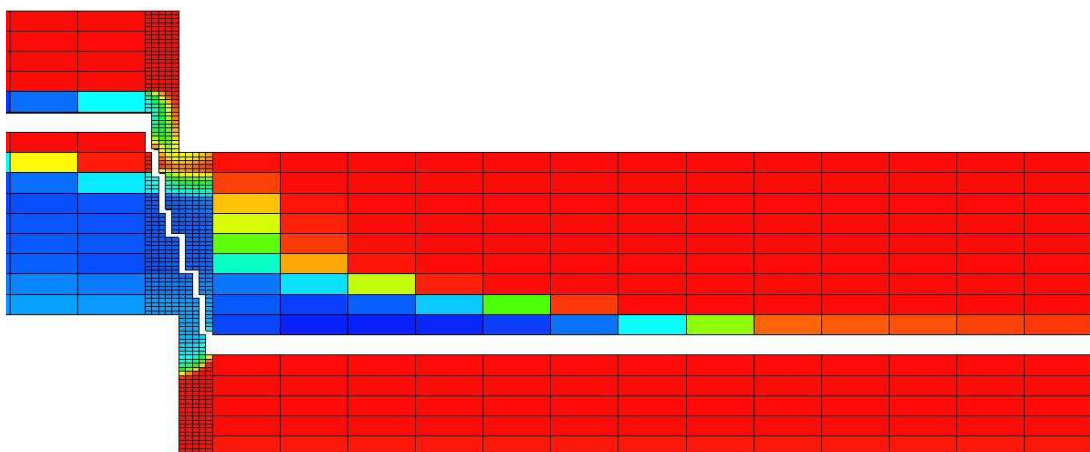
Forkastningspermeabilitetene er for denne kjøringen lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 50$ mD). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0$ mD, $K_{b6-17} = 1$ mD). Det ble observert omtrentlig lik vertikal og horisontal strømming for denne kjøringen. På tross av den høye perforeringen av produksjonsbrønnen (øvre del av hengblokk) ble det registrert at noe av vannet strømmet mot nedre del av forkastningsvolumet. I en standardmodell ville det vært nødvendig å definere ikke-naboforbindelser mellom celler fra øvre del av liggblokk til øvre del av hengblokk, og fra nedre/midtre del av liggblokk til nedre del av hengblokk.



Figur 9.24 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 5, shale smear ved endt simulering. Ser tydelige strømningsbaner fra øvre og nedre del av liggblokk. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.6 Kjøring 6

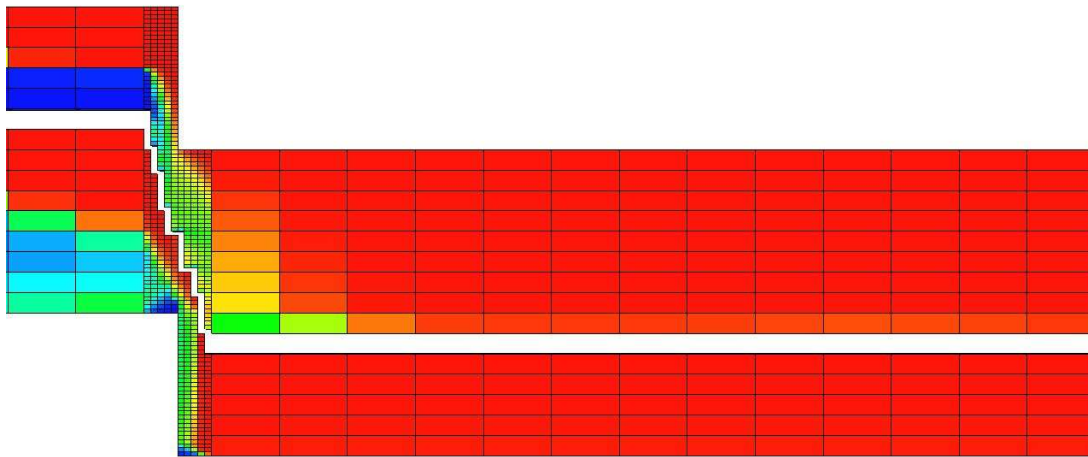
I denne kjøringen er forkastningspermeabilitetene lave og lik i alle retninger ($K_x = K_y = K_z = 5$ mD). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0$ mD, $K_{b6-17} = 1$ mD). Det ble observert vertikal strømming i forkastningssonen mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt. Den vertikale forkastningspermeabiliteten var ikke høy nok for strøm til nedre del av forkastningsvolumet. Dermed ble det liggende igjen en del olje i dette området (fanget olje). De vertikale strømmingene har ikke stort sprang (se figur 9.25), men det vil likevel være nødvendig med en utvidet standardmodell for å ta høyde for den vertikale strømmingen i forkastningssonen. Dette gjelder i hovedsak strøm fra øvre del av liggblokk (over barrieren) til øvre del av hengblokk.



Figur 9.25 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 6, shale smear ved dato 1. januar 2019. Illustrerer hvordan strømmen fra øvre del av liggblokk migrerer vertikalt mot hengblokk. Strøm fra nedre del av liggblokk migrerer i hovedsak horisontalt gjennom forkastningssonen mot produksjonsbrønnen. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.7 Kjøring 8

For denne kjøringen er den vertikale forkastningspermeabiliteten høy ($K_x = K_y = 5 \text{ mD}$, $K_z = 500 \text{ mD}$). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0 \text{ mD}$, $K_{b6-17} = 1 \text{ mD}$). Det observeres store vertikale strømninger og akkumulasjon av vann i forkastningsvolumet (se figur 9.26). I likhet med kjøring 3 (kapittel 9.3.1.3) ble det observert vann i nederste lag i forkastningsvolumet idet vannfronten over barrieren i liggblokk traff forkastningssonen. En utvidet standardmodell ville vært nødvendig for å gjenspeile strømningsmønsteret fra fault facies-modellen. Akkumulasjonen av vann i forkastningsvolumet kan dog ikke gjenspeiles med en utvidet standardmodell på grunn av manglende forkastningsvolum.



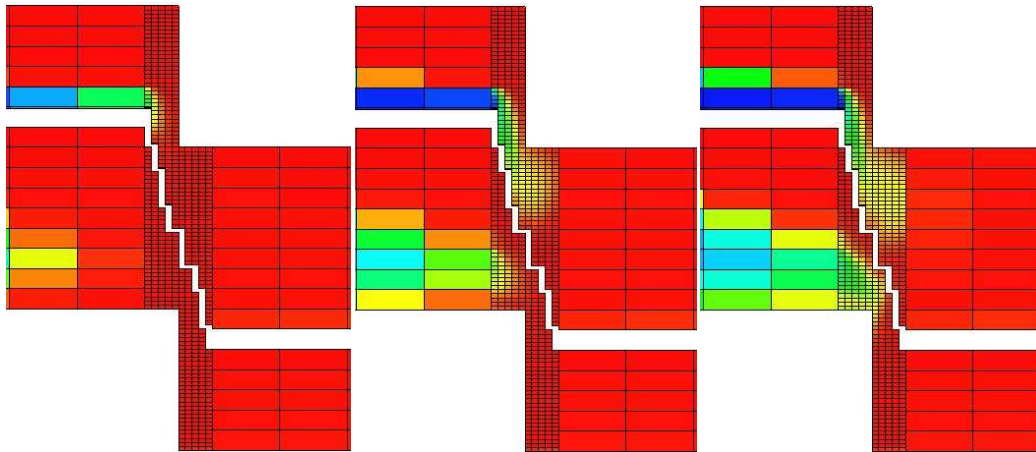
Figur 9.26 – Utsnitt av fault facies-modell for kjøring 8, shale smear ved dato 1. januar 2017. Illustrerer de store vertikale strømmingene i forkastningsvolumet. Ser og starten på akkumulasjon av vann i nedre del av forkastningsvolumet. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.1.8 Kjøring 7

Denne kjøringen var utgangspunktet når resultatene fra fault facies-modellen skulle reproduseres i en utvidet standardmodell. Den horisontale forkastningspermeabiliteten er lav, mens den vertikale er høy ($K_x = K_y = 5 \text{ mD}$, $K_z = 100 \text{ mD}$). I shale smear er permeabiliteten lik i alle retninger ($K_{b6} = K_{b17} = 0 \text{ mD}$, $K_{b6-17} = 1 \text{ mD}$).

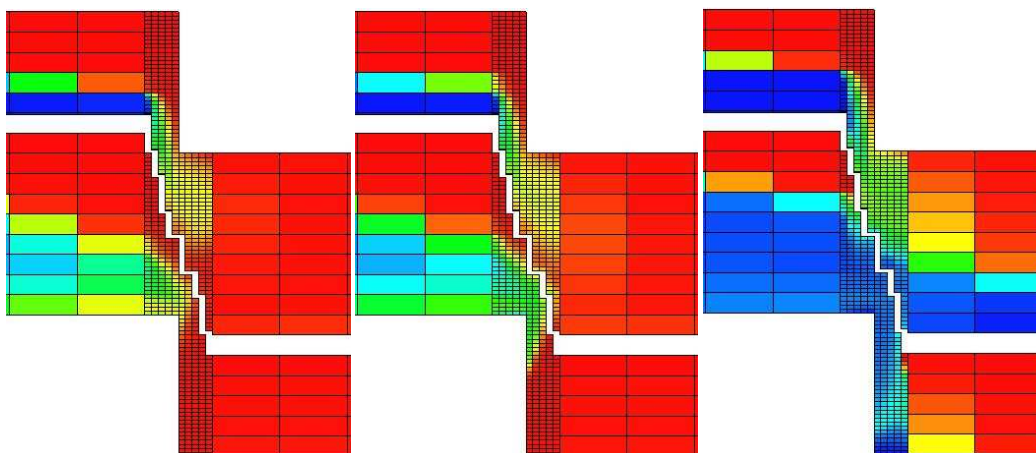
Gjengangeren gjennom kjøringene som har blitt gjort var at høye vertikale forkastningspermeabiliteter ($> 50 \text{ mD}$) ga interessante resultater. Da kan man blant annet forvente store vertikale strømninger mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt. Nettopp dette aspektet var interessant å undersøke om var mulig å gjenskape med en utvidet standardmodell.

Vannfronten over barrieren i liggblokk treffer forkastningssonen først. Den migrerer raskt vertikalt og horisontalt i forkastningsvolumet mot celler som i en standardmodell ikke vil ha sand-mot-sand-kontakt. Man kan se av figur 9.27 at det vil være nødvendig med ikke-naboforbindelser mellom celler over barrieren i liggblokk til de første fem cellene i z-retning i hengblokk. Det ser ikke ut til at vannet migrerer vertikalt gjennom smear.



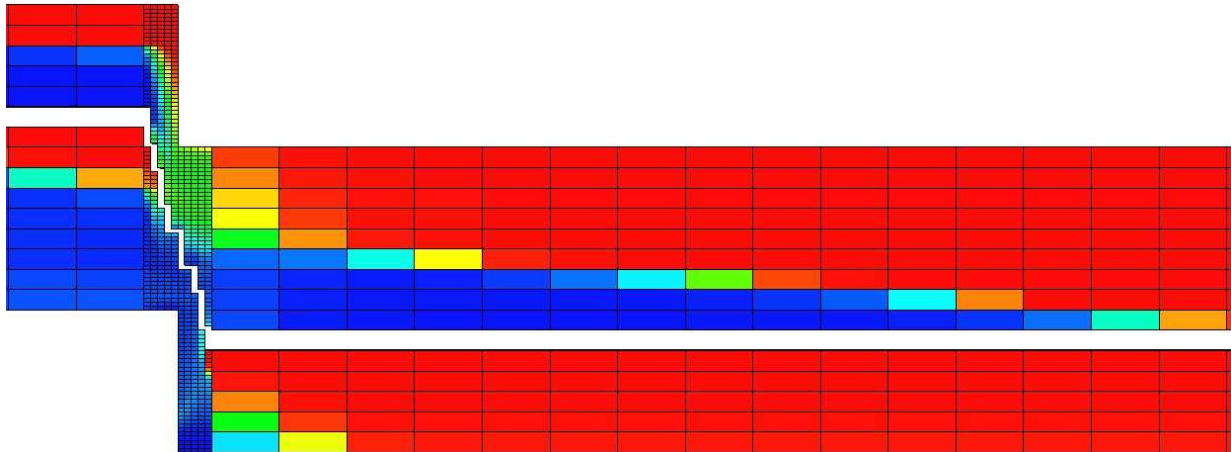
Figur 9.27 – Utsnitt av fault facies-modeller for kjøring 7, shale smear ved datoene 1. januar 2014 (venstre), 1. januar 2015 (midten) og 1. juli 2015 (høyre). Illustrerer hvordan strømmen migrerer vertikalt fra øvre del av liggblokk mot hengblokk. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

Vannfronten under barrierene i liggblokk treffer forkastningssonen og migrerer både gjennom smear til hengblokk og vertikalt i forkastningsvolumet (se figur 9.28). Det vil være nødvendig med ikke-naboforbindelser til hengblokk både over og under barrieren. Produksjonsbrønnen er ikke perforert i nedre del av hengblokk, så transmissibilitetsmultiplikatorene mot disse lagene må være mindre.



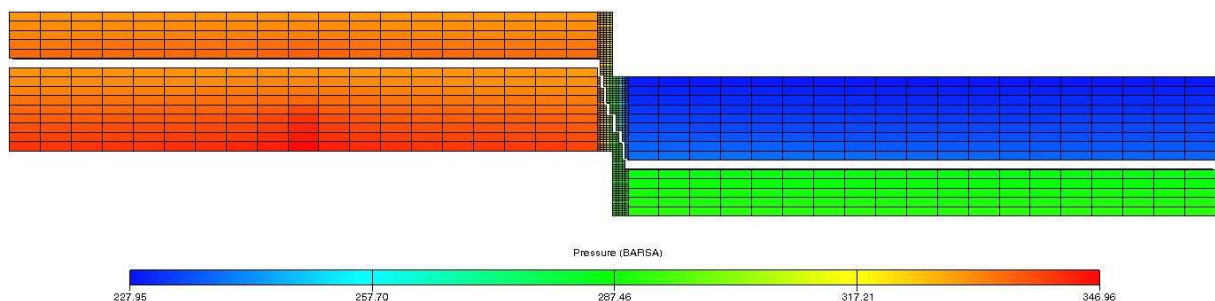
Figur 9.28 – Utsnitt av fault facies-modeller for kjøring 7, shale smear ved datoene 1. juli 2015 (venstre), 1. januar 2016 (midten) og 1. januar 2021 (høyre). Illustrerer hvordan vannet strømmer fra nedre del av liggblokk mot øvre og nedre del av hengblokk. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

Ved endt simulering ble det notert at det må defineres ikke-naboforbindelser mellom celler som ikke er i sand-mot-sand-kontakt i den utvidede standardmodellen. I nedre del av forkastningsvolumet var det akkumulasjon av vann (se figur 9.29), dette er noe som ikke vil kunne vises med en utvidet standardmodell grunnet manglende forkastningsvolum.



Figur 9.29 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 7, shale smear ved endt simulering. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

Når resultater fra fault facies-modellen skal reproduseres i en utvidet standardmodell er det i tillegg til strømmingene, nødvendig å undersøke trykkforskjeller mellom modellene. For denne kjøringen vil trykket normalt være høyere i liggblokk på grunn av at injeksjonsbrønnen er perforert her. I hengblokk vil normalt trykket i regionen under barrieren være høyere enn i regionen over. Produksjonsbrønnen er perforert høyt i hengblokk (over barrieren) og trykkfallet vil dermed være størst her. Figur 9.30 illustrerer hvordan trykket er i reservoaret ved endt simulering. Rødt representerer høyt trykk, grønt mellomhøyt trykk og blått lavt trykk.



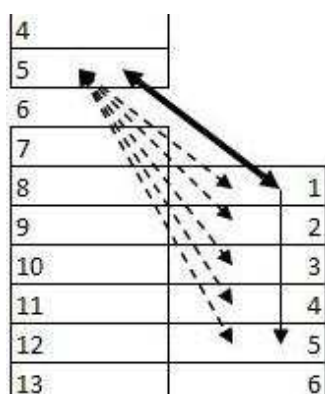
Figur 9.30 – Utsnitt av fault facies-modellen for kjøring 7, shale smear ved endt simulering. Illustrerer hvordan trykket er i reservoaret. De hvite områdene representerer shale smear. (xz-snitt, $j = 15$)

9.3.2 Shale smear med utvidet standardmodell for kjøring 7

Kjøring 7 ble valgt i forsøket med å gjenskape resultatene fra fault facies-modellen i en utvidet standardmodell. Den ble valgt fordi den vertikale forkastningspermeabiliteten var høy, noe som gir store vertikale strømningsbaner i forkastningsvolumet.

Forsøket med utvidet standardmodell kunne blitt gjort på en enklere modell, for eksempel en reservoarmodell uten barriere(-r) i forkastningssone og reservoar. Men tanken var at om resultatene fra fault facies-modellen kunne reproduseres på en komplisert modell vil det lett la seg gjøre på enklere modeller. Når resultatene mellom modellene ble sammenlignet var det tilsvarende celler i modellene som ble undersøkt. I den utvidede standardmodellen ble dermed cellene nærliggende forkastningen ikke betraktet fordi de var en del av forkastningsvolumet i fault facies-modellen.

Resultatene fra fault facies-modellen indikerte at det forekom strømningsbaner i forkastningssonen uavhengig av sand-mot-sand-kontaktene. Det ble observert at én celle kunne ha strømming til mange celler som ikke var i sand-mot-sand-kontakt. I en utvidet standardmodell må ikke-naboforbindelser defineres for alle celler som har strøm mellom seg. Her ble det gjort noen forenklinger for å lette arbeidet. Hvis én celle i liggblokk hadde strømming mot flere celler i hengblokk, ble det gjerne kun definert transmissibilitet mellom cellen i liggblokk og den øverstliggende cellen i hengblokk. Tanken var at den vertikale permeabiliteten i hengblokkcellen førte til vertikal migrering mot de underliggende cellene som egentlig skulle hatt direkte kontakt med cellen i liggblokk (se figur 9.31).

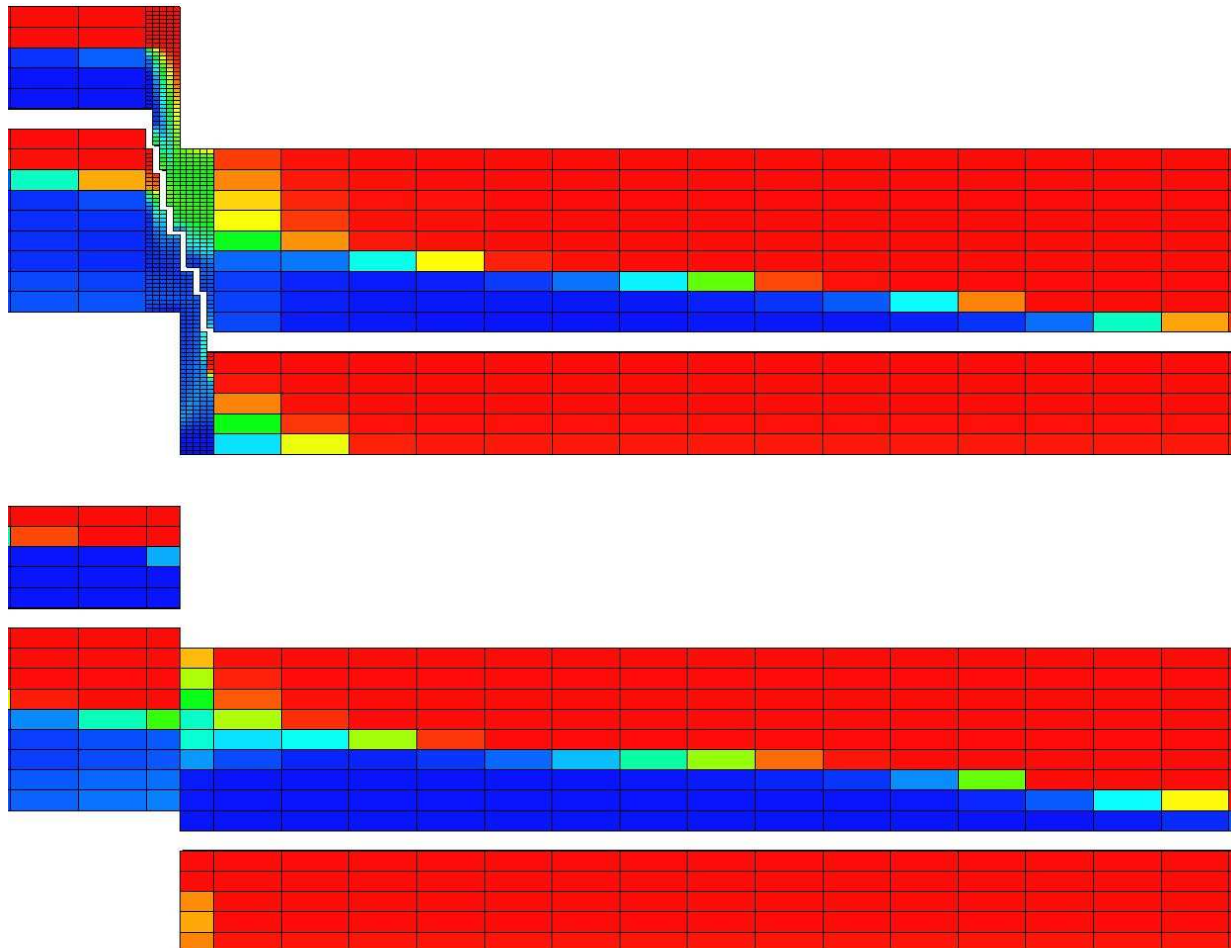


Figur 9.31 – Utsnitt av strømningsbaner mellom celle i liggblokk mot celle(-r) i hengblokk. De stiplede pilene representerer resultatene fra fault facies-modellen (lag 5 i liggblokk har strømming til lagene 1, 2, 3, 4 og 5 i hengblokk). Den tykke pilen representerer et eksempel på hvordan en ikke-naboforbindelse kunne bli definert i den utvidede standardmodellen. Den tynne pilen representerer den vertikale migreringen mellom reservoarblokkene i hengblokken.

9.3.2.1 NNC 1

For fullstendig oversikt av definerte ikke-naboforbindelser, se tabell 8.12.

Det ble først gjort et forsøk med kun én transmissibilitetsmultiplikator for alle forbindelsene. Dette var som ventet ikke nok for å oppnå et korrekt strømningsbilde (se figur 9.32).

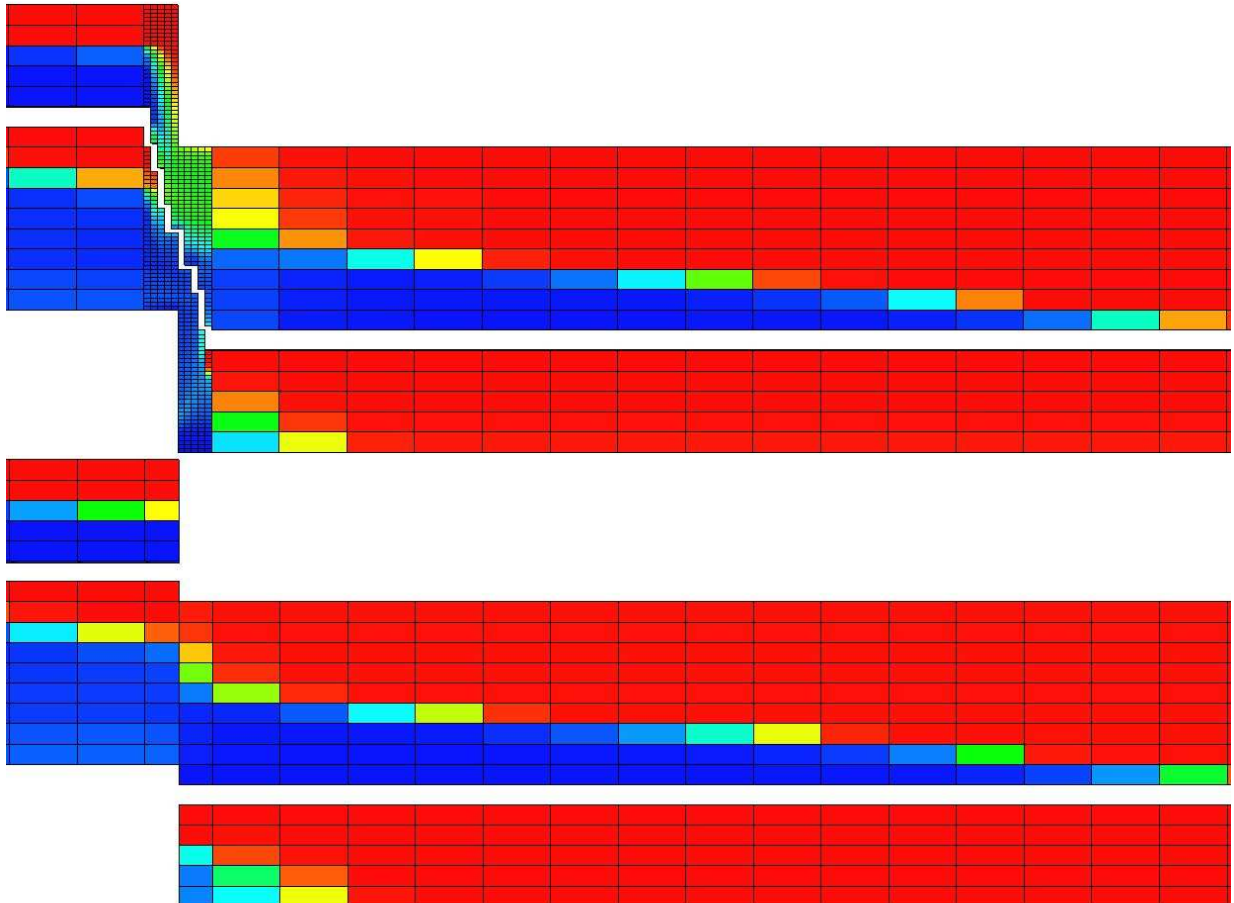


Figur 9.32 – Illustrerer forskjellene mellom fault facies-(øverst) og standardmodellen (nederst) for kjøring 7, shale smear, NNC 1 ved endt simulering. Én transmissibilitetsmultiplikator er blitt benyttet. I standardmodellen er for mye vann strømmet gjennom smear mot produksjonsbrønnen. For lite vann har samtidig strømmet til nederste lag i hengblokk. (xz-snitt, $j = 15$)

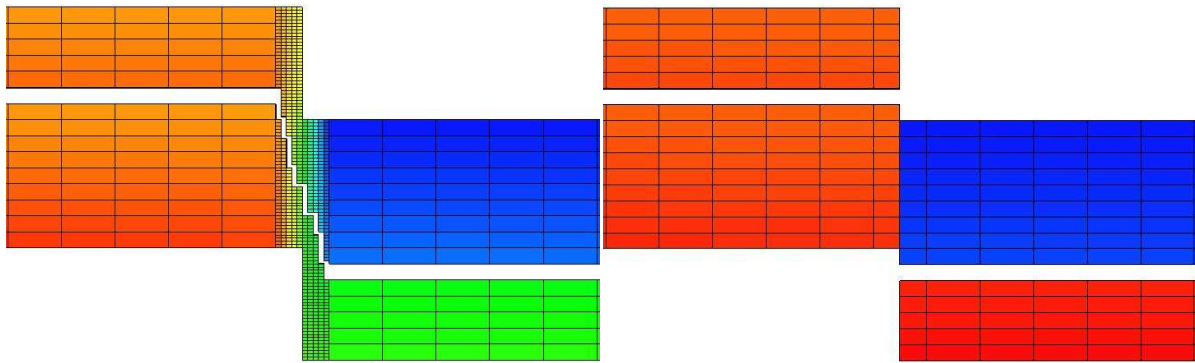
På grunn av høyt perforert produksjonsbrønn i hengblokken vil ikke strømmingene mot nedre del av hengblokken under barrieren være like stor. Følgelig må transmissibiliteten mot disse lagene være mindre. Samtidig vil det injiserte vannet over barrieren i liggblokk ha en lettere vei å strømme enn det som er injisert under barrieren. Det følger av geometrien til shale smear-modellen: Vannet over barrieren har fri vei mot produksjonsbrønnen, mens vannet under barrieren må migrere gjennom smear mot produksjonsbrønnen. Det ble dermed definert

ikke-naboforbindelser mellom øvre del av liggblokk til øvre del av hengblokk, nedre del av liggblokk til øvre del av hengblokk, og nedre del av liggblokk til nedre del av hengblokk.

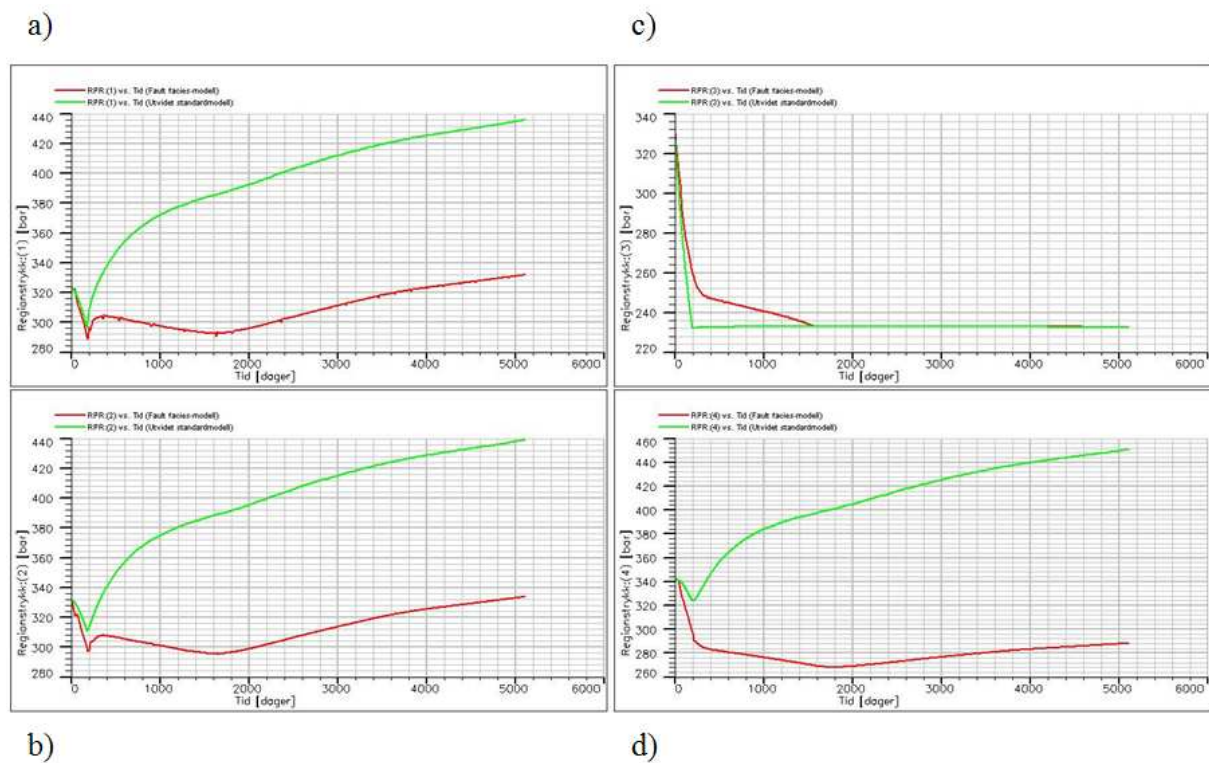
Tre transmissibilitetsmultiplikatorer gjorde det lettere å konstruere strømningsbildet fra fault facies-modellen (se figur 9.33), men det var samtidig ikke nok. Det ble observert store trykkforskjeller mellom modellene. Spesielt utsatt var regionen under barrieren i hengblokk (se figur 9.34 og 9.35d) og regionene i liggblokk (se figur 9.35a, b).



Figur 9.33 – Illustrerer forskjellene mellom fault facies- (øverst) og standardmodellen (nederst) for kjøring 7, shale smear, NNC 1 ved endt simulering. Tre transmissibilitetsmultiplikatorer er blitt benyttet. Strømningsbildet er tilnærmet likt mellom modellene. (xz-snitt, $j = 15$)



Figur 9.34 – Illustrerer forskjellene i trykk mellom fault facies- (venstre) og standardmodellen (høyre) for kjøring 7, shale smear ved endt simulering. De nederste lagene i hengblokk i utvidet standardmodell har drastisk høyere trykk (rødt) enn tilsvarende lag i fault facies-modellen (grønt). (xz-snitt, $j = 15$)

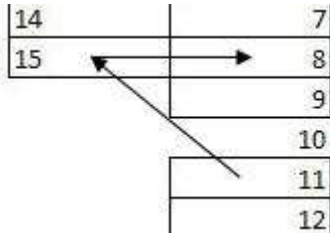


Figur 9.35 – Grafer som viser forskjeller mellom regionstrykkene [bar] mot tid [dager] for fault facies- (rød) og utvidet standardmodell (grønn) for NNC 1. a) representerer øvre del av liggblokk (region 1), b) representerer nedre del av liggblokk (region 2), c) representerer øvre del av hengblokk (region 3), d) representerer nedre del av hengblokk (region 4).

Trykkforskjellene mellom modellene i liggblokken vil bli gjennomgått i kapittel 9.3.2.2.

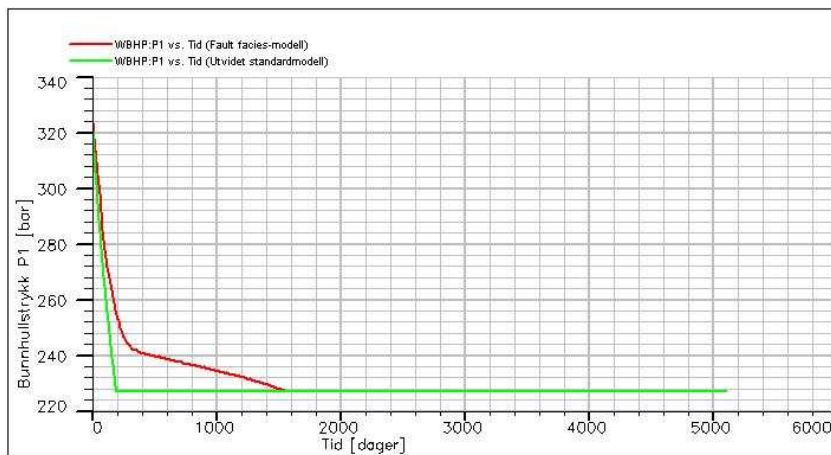
Det høye trykket i regionen under barrieren i hengblokken for den utvidede standardmodellen tydet på at ikke-naboforbindelsene som ble definert mot dette området ikke var tilstrekkelig. I forsøket var det definert kommunikasjon mellom nedre del av liggblokk til nedre lag i hengblokk. Når det defineres transmissibilitet mellom to celler innebærer det at

kommunikasjon/strømning kan skje begge veier. Med andre ord skal det være mulig at fluid fra nedre del av hengblokk kan strøkke mot produksjonsbrønnen via nedre lag i liggblokk (se figur 9.36).

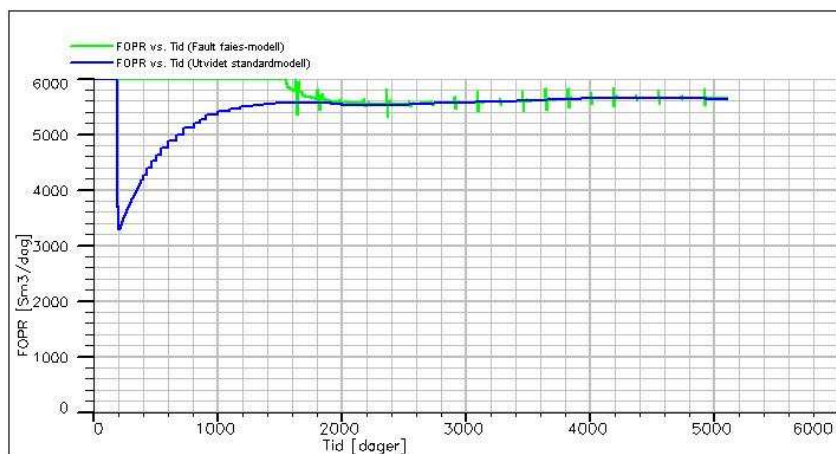


Figur 9.36 – Utsnitt av tenkt strømningsbane fra nedre del av hengblokk til øvre del av hengblokk.

Dette skjedde åpenbart ikke for den utvidede standardmodellen. Ikke-naboforbindelsen som ble definert førte kun til strøm av vann inn i dette området. Det førte til en trykkoppbygging i denne regionen langt utover det som ble observert i fault facies-modellen. Det kom også tydelig fram at trykkstøtten til øvre del av hengblokk var mindre i den utvidede standardmodellen (se figur 9.35c). Bunnhullstrykket i produksjonsbrønnen utartet seg omtrentlig likt regionstrykket: Det falt raskt (se figur 9.37), noe som førte til lavere produksjonsrate (se figur 9.38).



Figur 9.37 – Grafer som viser forskjellene mellom bunnhullstrykket [bar] mot tiden [dager] for fault facies- (rød) og utvidet standardmodell (grønn) for NNC 1.



Figur 9.38 – Grafer som viser forskjellene mellom FOPR²⁰ [Sm³/dag] mot tiden [dager] for fault facies- (grønn) og utvidet standardmodell (blå) for NNC 1.

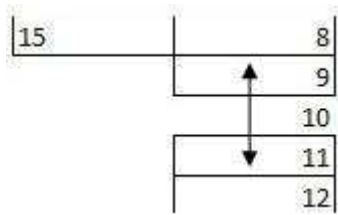
Av figur 9.37 og 9.38 ser man sammenhengen mellom bunnhullstrykket og produksjonsraten i brønnen. For den utvidede standardmodellen kan man etter om lag 200 dager se at bunnhullstrykket har falt ned til boblepunktstrykket for oljen, og dermed må produksjonsraten justeres for å hindre ytterligere trykkfall. Dette skjer først ved om lag 1500 dager i fault facies-modellen. Produksjonsraten har her vært konstant inntil bunnhullstrykket i brønnen nådde boblepunktstrykket.

9.3.2.2 NNC 2

For fullstendig oversikt av definerte ikke-naboforbindelser, se tabell 8.13.

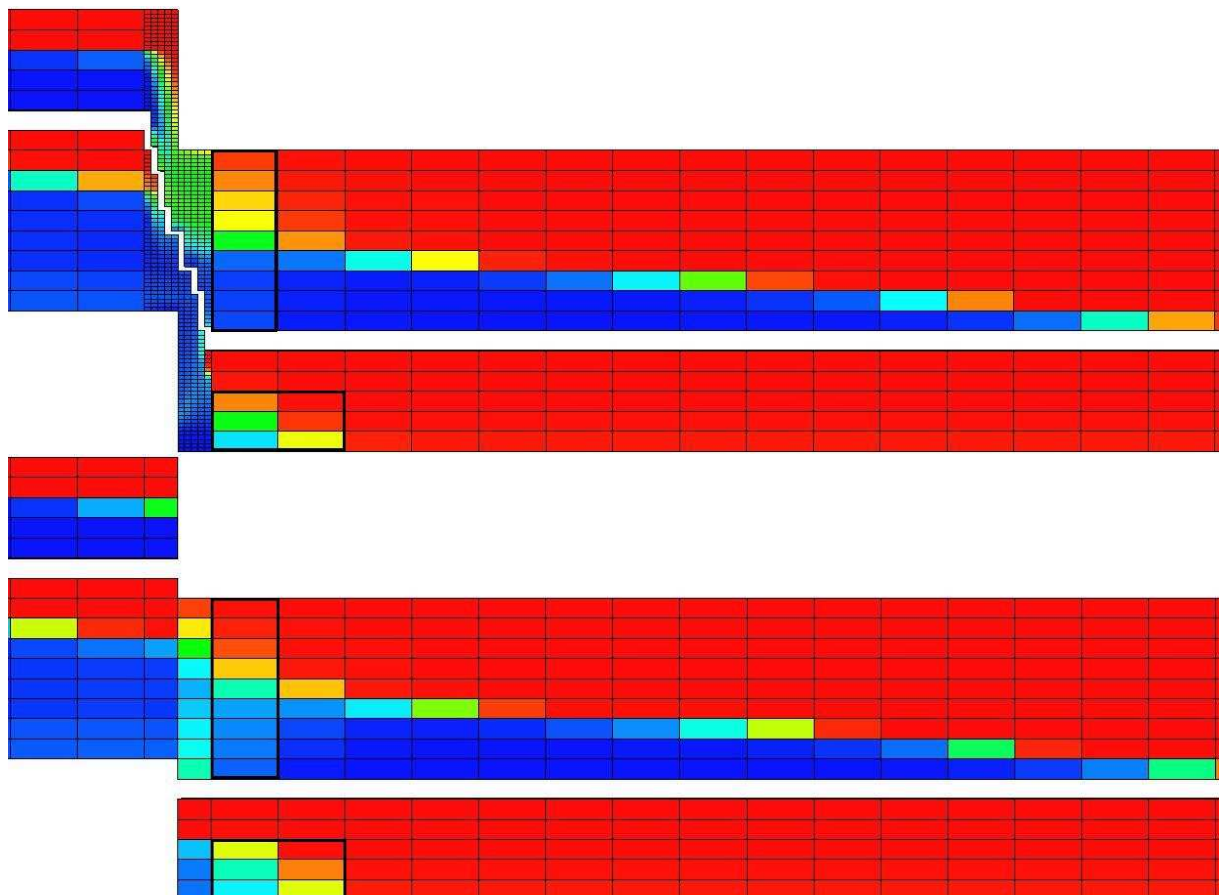
For å endre trykkbildet i nedre del av hengblokk i den utvidede standardmodellen ble det definert en ny ikke-naboforbindelse med tilhørende transmissibilitetsmultiplikator fra nedre til øvre del av hengblokk (se figur 9.39). Tanken med denne var å avlaste noe av trykket i nedre del, samt tilføre strømning mellom nedre og øvre del av hengblokk. Samtidig ble noen av ikke-naboforbindelsene mellom øvre del av hengblokk til øvre del av liggblokk endret. Dette var for å oppnå større vannmetning i cellene mot forkastningen høyt i hengblokken. Det ble observert at vannmetningen var større for disse cellene i fault facies-modellen enn i den utvidede standardmodellen for NNC 1 (se figur 9.33).

²⁰ FOPR (eng. field oil production rate) er produksjonsraten til brønnen. Målt i standard kubikkmeter per dag (Sm³/dag).



Figur 9.39 – Utsnitt av ikke-naboforbindelse mellom nedre og øvre del av hengblokk.

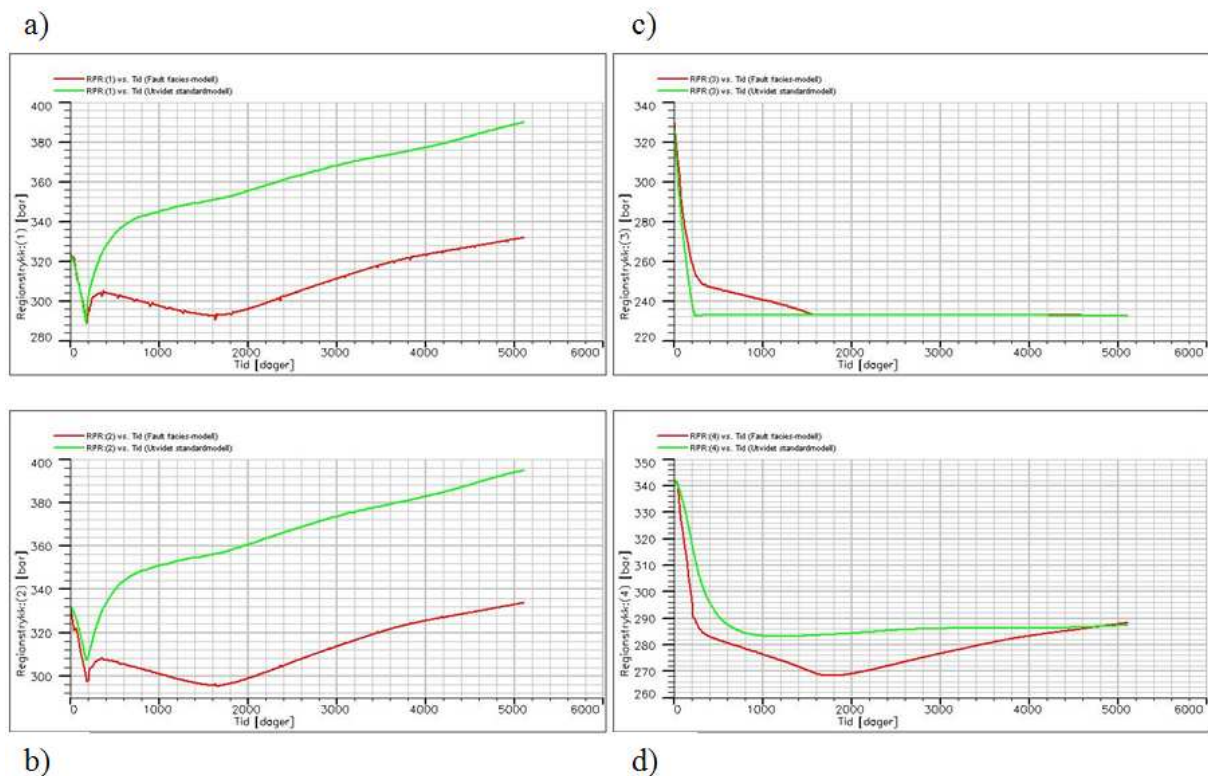
Det ble som for NNC 1 gjort mange simuleringer for å tilpasse strømningsmønsteret fra fault facies-modellen på den utvidede standardmodellen. Disse kjøringene presenteres ikke, grunnet den eneste forskjellen mellom dem er transmissibilitetsmultiplikatorene. Metninger i ulike celler i reservoaret har blitt studert, og transmissibilitetsmultiplikatorene har blitt justert for å best mulig etterligne strømningsmønsteret fra fault facies-modellen. Siste kjøring for NNC 2 er den som blir presentert og drøftet.



Figur 9.40 – Illustrerer forskjellene mellom fault facies- (øverst) og standardmodellen (nederst) for kjøring 7, shale smear, NNC 2 ved endt simulering. Fire transmissibilitetsmultiplikatorer er blitt benyttet. Strømningsbildet er tilnærmet likt mellom modellene. De tykke omrissene representerer områdene som i hovedsak har blitt studert i arbeidet med å tilpasse den utvidede standardmodellen. (xz-snitt, $j = 15$)

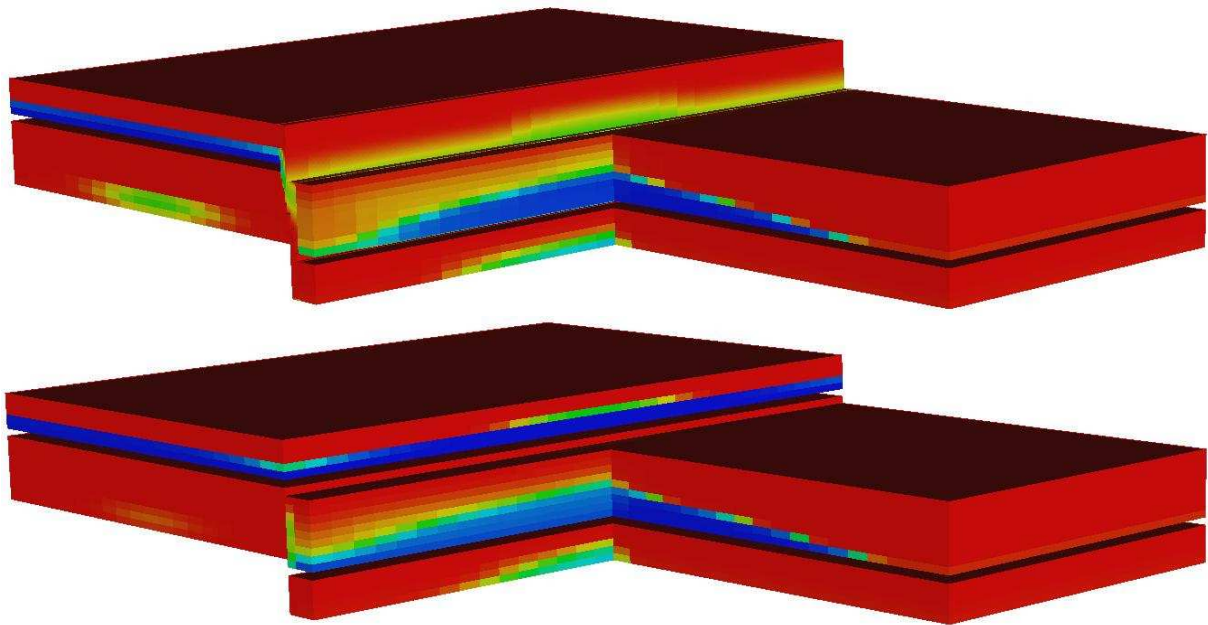
Endringen av ikke-naboforbindelsene høyt i hengblokken har ført til større vannmetninger i disse områdene. I øvre del av hengblokk ligger det noe mer vann i den utvidede standardmodellen enn for fault facies-modellen. Men grovt sett er strømningsbildet mellom modellene likt (se figur 9.40).

Innføringen av en ny ikke-naboforbindelse førte til trykkavlastning i nedre del av hengblokk (se figur 9.41d). Trykkbildet i denne regionen er nå mye mer likt fault facies-modellen enn hva tilfellet var for NNC 1. Trykket i øvre del av hengblokken utarter seg veldig likt bunnhullstrykket i produksjonsbrønnen: stort trykkfall på kort tid (se figur 9.41c). I liggblokken kan man se en trykkoppbygging for både øvre og nedre del idet bunnhullstrykket i produksjonsbrønnen har nådd boblepunktstrykket (se figur 9.41a, b).



Figur 9.41 – Grafer som viser forskjeller mellom regionstrykkene [bar] mot tid [dager] for fault facies- (rød) og utvidet standardmodell (grønn) for NNC 2. a) representerer øvre del av liggblokk (region 1), b) representerer nedre del av liggblokk (region 2), c) representerer øvre del av hengblokk (region 3), d) representerer nedre del av hengblokk (region 4).

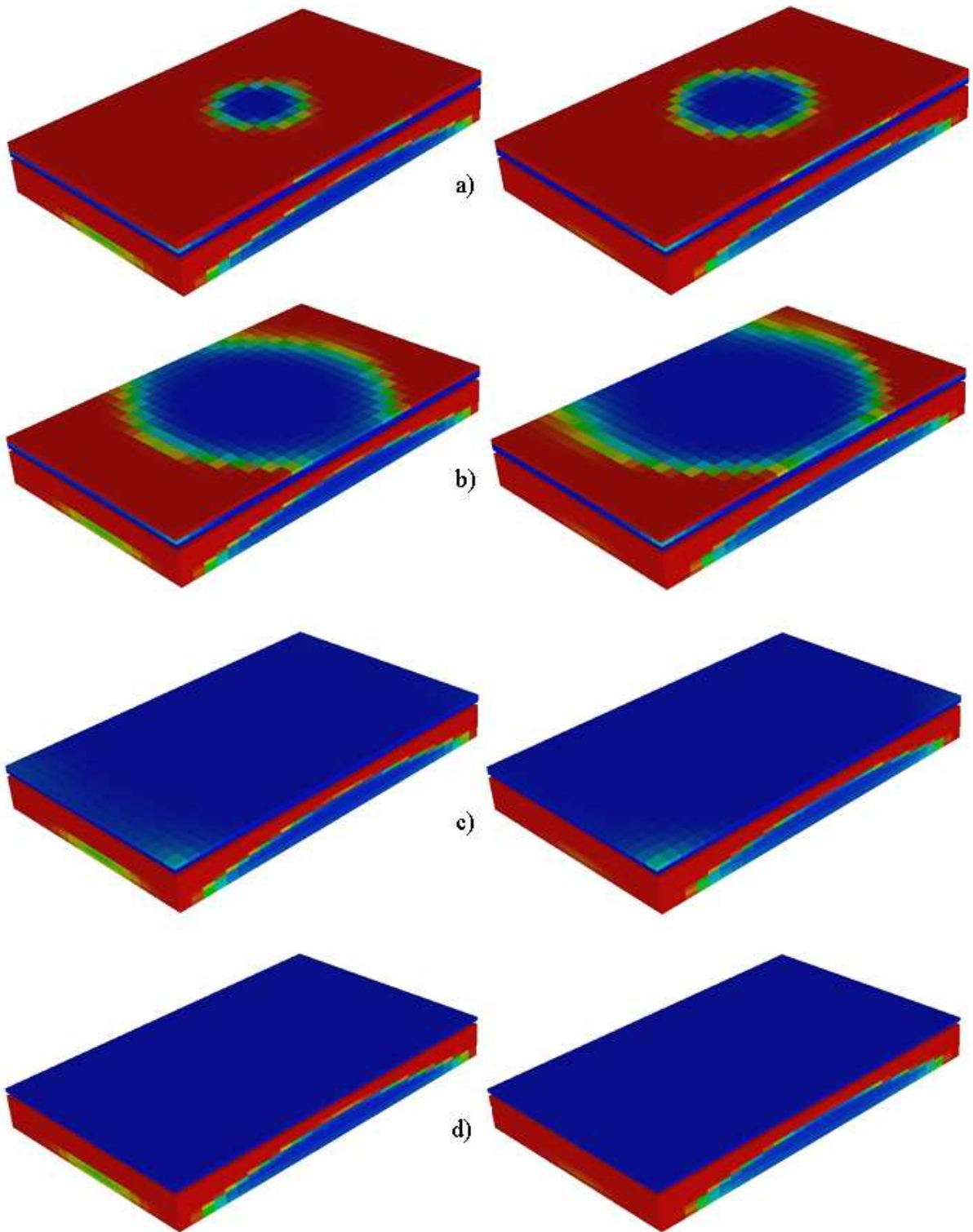
En naturlig forklaring på trykkoppbyggingen i liggblokken for den utvidede standardmodellen er at det ligger mer fluid lagret i dette området enn i fault facies-modellen, fordi mindre har migrert gjennom forkastningen. Dette er tilsynelatende ikke tilfellet. Tredimensjonale bilder for begge modellene har blitt studert og metningsbildet mellom modellene er omtrentlig likt (se figur 9.42).



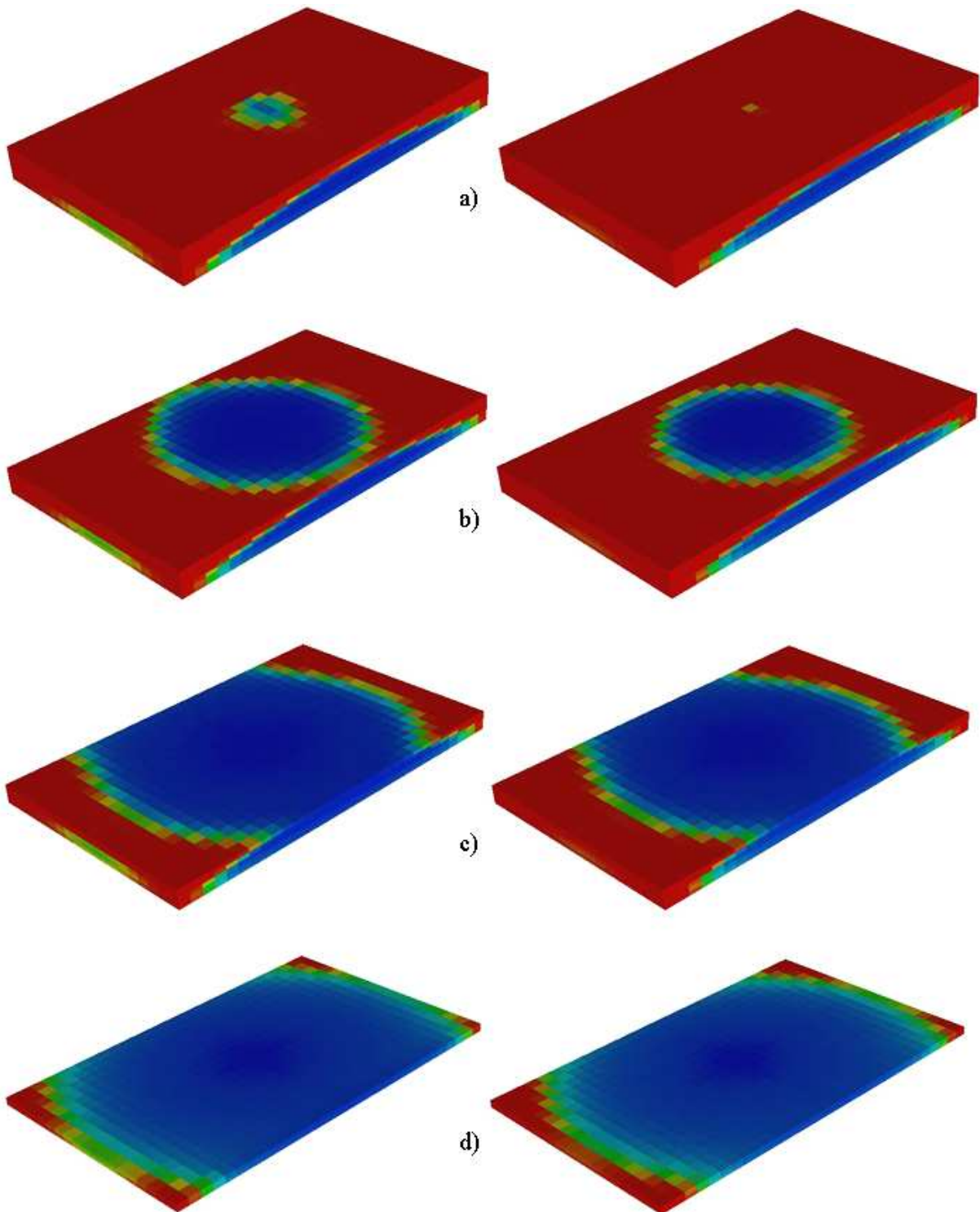
Figur 9.42 – Tredimensjonalt utsnitt som viser forskjellene mellom fault facies- (øverst) og utvidet standardmodell (nederst) ved endt simulering. Cellene med indeks $i, j, k = (23-40, 16-30, 1-15)$ er tatt vekk for å kunne studere mengden vann som er strømmet inn i de første cellene etter forkastningen i hengblokken.

I figur 9.42 ser man ved endt simulering at mengden vann som har strømmet inn i de første cellene i hengblokken ($i = 22$) er omtrentlig lik mellom modellene. I fault facies-modellene er vannmetningen noe større i høyereliggende blokker, men forskjellen er ikke stor. Man kan også se at det femte laget i øvre del av liggblokk er fullstendig mettet med vann for begge modellene. I cellene som vender mot hengblokken for det femte laget ($i = 20$) er vannmetningen høyere i den utvidede standardmodellen. Dette skyldes modelleringen av modellen. (I fault facies-modellen er cellene med indeks $i = 20$ en del av forkastningsvolumet.) Det registreres også at vannmetningen er noe større langs randen til nedre del av liggblokk i fault facies-modellen.

Det ble observert noe mer vann i øvre del av liggblokk i utvidet standardmodell enn det ble gjort i fault facies-modellen (se figur 9.43). I nedre del ble det motsatte observert (se figur 9.44).

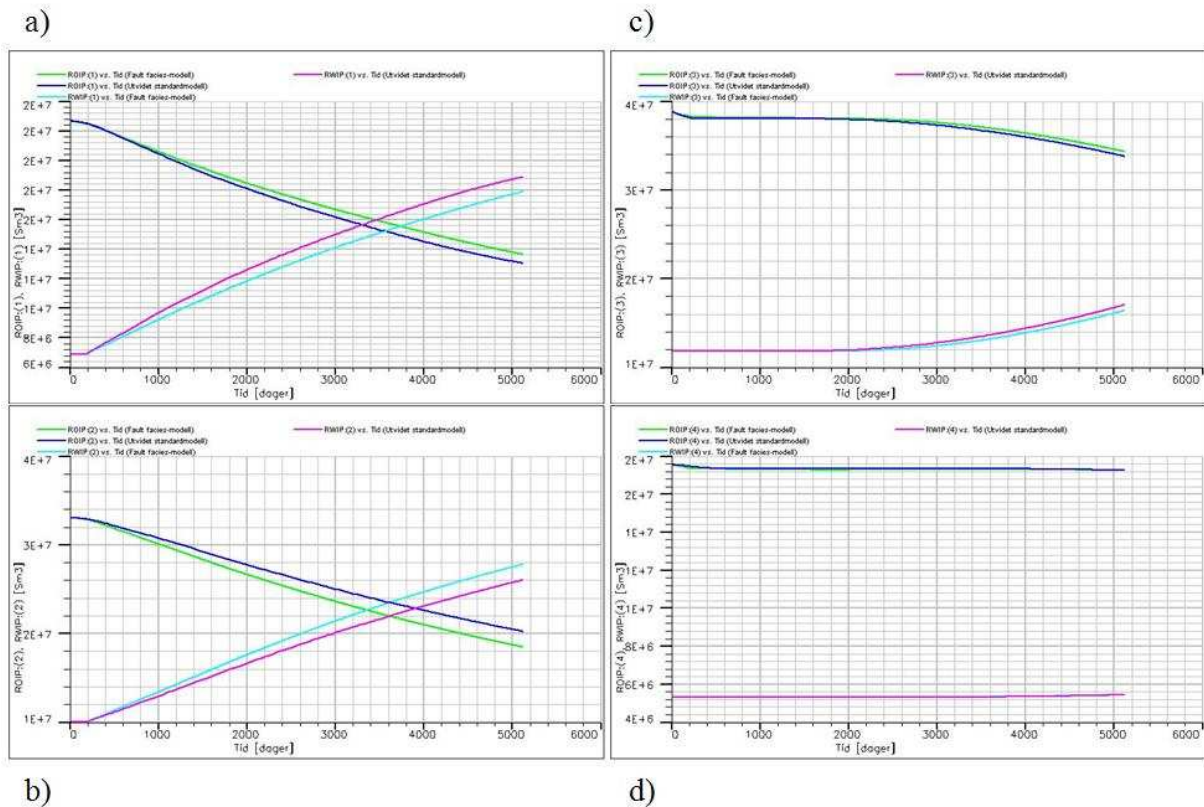


Figur 9.43 – Illustrerer forskjellen i vannmetningen for fault facies- (venstre) og utvidet standardmodell (høyre) for lagene i øvre del av liggblokken ved endt simulering. a) $k = 2$, b) $k = 3$, c) $k = 4$, d) $k = 5$.



Figur 9.44 – Illustrerer forskjellen i vannmetningen for fault facies- (venstre) og utvidet standardmodell (høyre) for lagene i nedre del av liggblokken ved endt simulering. a) $k = 7$, b) $k = 9$, c) $k = 11$, d) $k = 14$.

Av figur 9.43 og 9.44 ser man at det ligger tilsynelatende like mye vann i liggblokken for de to modellene ved endt simulering. Dette kan underbygges med en oversikt av mengden vann og olje som befinner seg i de ulike regionene i fault facies- og utvidet standardmodell (se figur 9.45).



Figur 9.45 – Grafer som viser ROIP²¹ og RWIP²² [Sm^3] mot tiden [dager]. Grønn og turkis representerer henholdsvis ROIP og RWIP for fault facies-modellen. Blå og rosa representerer henholdsvis ROIP og RWIP for utvidet standardmodell. a) Øvre del av liggblokk (region 1), b) nedre del av liggblokk (region 2), c) øvre del av hengblokk (region 3), d) nedre del av hengblokk (region 4).

Man ser av figur 9.45 at i hengblokken (c og d) er mengden olje og vann omtrent helt lik gjennom hele simuleringen for modellene. I liggblokken (a og b) er det litt større forskjeller. I øvre del er andelen olje større for fault facies- enn for den utvidede standardmodellen ved endt simulering. Men samtidig er andelen vann mindre, så den totale mengden fluid i denne regionen er omtrentlig lik mellom modellene.

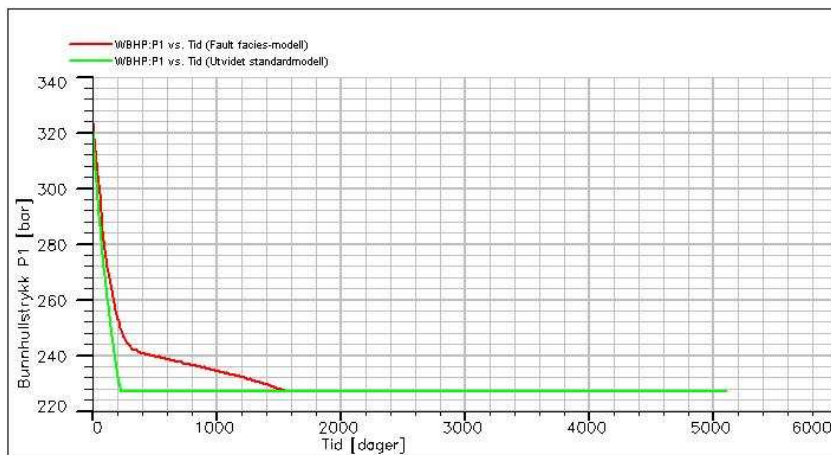
I nedre del av liggblokk er tilfellet motsatt, og mengden fluid blir dermed omtrentlig lik her også. Det kan dermed ikke konkluderes med at en større opphopning av fluid i den utvidede standardmodellen har forårsaket de store trykkforskjellene mellom modellene.

²¹ ROIP (eng. region oil in place) Mengde olje som befinner seg i regionen, målt i standard kubikkmeter.

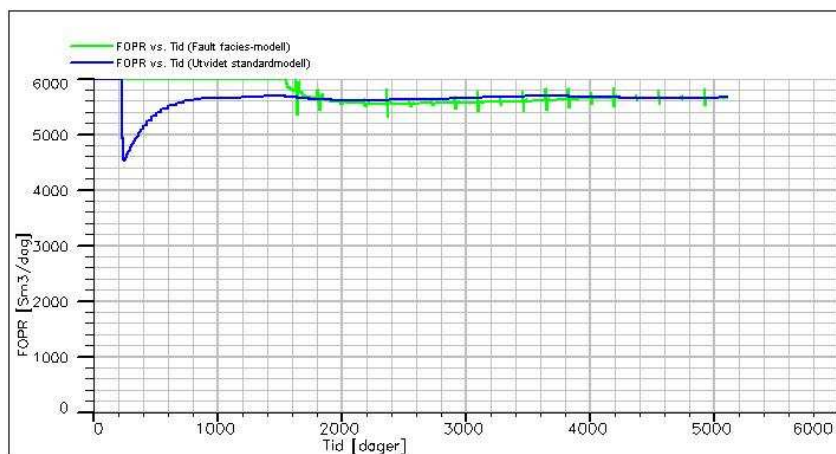
²² RWIP (eng. region water in place) Mengde vann som befinner seg i regionen, målt i standard kubikkmeter.

Det store trykkfallet som observeres før 200 dager er gått skyldes at injeksjonen ikke starter før etter 181 dager. I den utvidede standardmodellen medfører dette at injeksjonen ikke klarer å forhindre at bunnhullstrykket i produksjonsbrønnen faller til boblepunktstrykket. Dette skjer etter 233 dager (se figur 9.46). Dermed nedjusteres produksjonsraten for å hindre ytterligere trykkfall (se figur 9.47). Dette skjer først etter 1558 dager i fault facies-modellen (se figur 9.46 og 9.47), noe som gir en klar indikasjon på at kommunikasjonen ikke er tilstrekkelig definert i den utvidede standardmodellen.

Trykkoppbyggingen i liggblokken starter når injeksjonen settes i gang (ved 181 dager). Av figur 9.47 kan man se at produksjonsraten er omtrentlig lik mellom modellene etter om lag 1800 dager. I tidsrommet fra ca. 200 – 1800 dager vil den utvidede standardmodellen oppleve en større trykkøkning enn fault facies-modellen uavhengig av andre faktorer. Dette skyldes at produksjonsraten er lavere i den utvidede standardmodellen enn hva tilfellet er i fault facies-modellen. Mindre fluid strømmer fra liggblokken, gjennom forkastningen, til produksjonsbrønnen. Dermed øker trykket. (Injeksjonsraten er konstant gjennom hele forsøket.) Det følger direkte av Darcy's lov for væskestrøm (ligning 2.6). Strømningsraten Q (i dette tilfellet $\Delta Q = Q_{inj} - Q_{prod}$) er proporsjonal med trykkforskjellen Δp . Med lavere produksjonsrate i den utvidede standardmodellen vil ΔQ bli større, og da må også Δp bli større når de andre verdiene som inngår i ligningen (K , L , A og μ) er konstant.

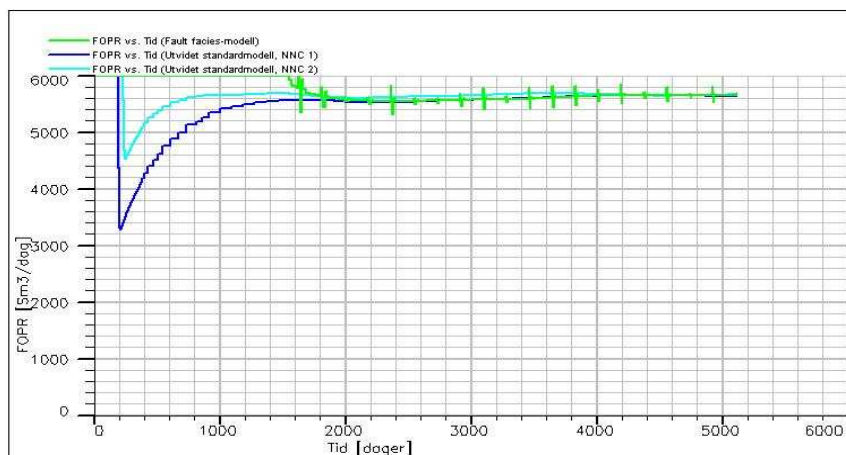


Figur 9.46 – Grafer som viser forskjellene mellom bunnhullstrykket [bar] mot tiden [dager] for fault facies- (rød) og utvidet standardmodell (grønn) for NNC 2.

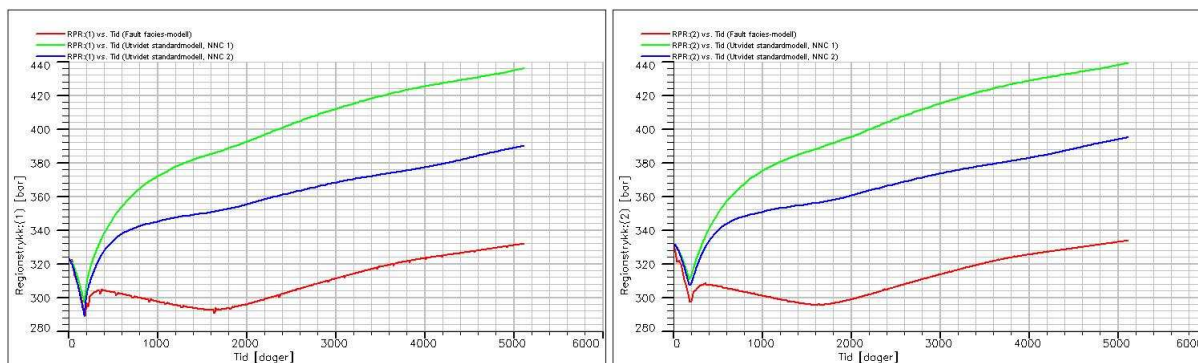


Figur 9.47 – Grafer som viser forskjellene mellom FOPR [Sm^3/dag] mot tiden [dager] for fault facies- (grønn) og utvidet standardmodell (blå) for NNC 2.

Ved innføringen av en ny ikke-naboforbindelse i NNC 2 (fra nedre til øvre del av hengblokk) ble det registrert at produksjonsraten ikke ble redusert like mye som for NNC 1 (se figur 9.48). Dette ga utslag på regionstrykkene i liggblokken. Ved endt simulering er trykkene lavere for NNC 2 enn for NNC 1 (se figur 9.49).



Figur 9.48 – Grafer som viser forskjellen mellom FOPR [Sm^3/dag] mot tiden [dager] for fault facies-modellen (grønn), utvidet standardmodell med NNC 1 (blå) og utvidet standardmodell med NNC 2 (turkis).



Figur 9.49 – Grafer som viser forskjellene mellom regionstrykk [bar] mot tiden [dager] for fault facies-modellen (rød), utvidet standardmodell med NNC 1 (grønn) og utvidet standardmodell med NNC 2 (blå). Venstre bilde representerer øvre del av liggblokk (region 1). Høyre bilde representerer nedre del av liggblokk (region 2).

Tiltaket med den nye ikke-naboforbindelsen i NNC 2 forbedret trykkbildet mellom modellene, men forskjellen mellom dem er fortsatt stor (≈ 60 bar). Men det faktum at en ny forbindelse forbedret trykkbildet, underbygger påstanden om at kommunikasjonen (ikke-naboforbindelsene) ikke er tilstrekkelig definert for å reprodusere resultatene fra fault facies-modellen.

9.3.3 Sammendrag og diskusjon for shale smear

Viktige observasjoner gjort i forsøkene med fault facies-modellen:

- Høy vertikal strømming i forkastningssone.
- Akkumulering av vann (dannelse av vannbank) i forkastningsvolumet.
- Dannelse av uproduserbar oljeregion i forkastningssone.

Viktige resultater fra forsøkene med utvidet standardmodell:

- Metningsbildet fra fault facies-modellen kan reproduseres med ikke-naboforbindelser.
- Trykkbildet fra fault facies-modellen er vanskelig å reprodusere.

Det var ingen nye observasjoner i fault facies-modellen med shale smear. Prosessene som ble observert var alle blitt gjort tidligere. Som nevnt i tidligere kapitler vil akkumuleringen av vann og dannelse av uproduserbare oljeregioner i forkastningssonen være prosesser som ikke vil kunne vises i en utvidet standardmodell, grunnet dens manglende forkastningsvolum. Dette er to aspekt med fault facies-modellen som vil tale i mot bruken av standardmodellen. Den vertikale strømmingen i forkastningssonen kan derimot gjenskapes med ikke-naboforbindelser, noe som ble gjort for kjøring 7.

Det ble først benyttet et oppsett med én transmissibilitetsmultiplikator for å reprodusere strømningsbildet fra fault facies-modellen. Dette var som ventet ikke tilstrekkelig. Det var ikke mulig å oppnå korrekte strømninger fordi transmissibiliteten er forskjellig mellom ulike deler av reservoaret på tvers av forkastningen. Brønnperforering og shale smear er eksempelvis noe som påvirker hvordan transmissibiliteten er mellom ulike områder i reservoaret.

Dermed ble det benyttet tre transmissibilitetsmultiplikatorer. Dette var tilstrekkelig for å reprodusere metningsbildet fra fault facies-modellen, men det ble observert store trykkforskjeller mellom modellene. Trykket i liggblokken og nedre del av hengblokk var mye høyere i den utvidede standardmodellen. En ikke-naboforbindelse mellom nedre og øvre del av hengblokk ble definert for å avlaste trykket, fortrinnsvis i nedre del av hengblokk. Dette var vellykket, men trykkene i liggblokken var fremdeles for høy (de ble noe redusert fra NNC 1 til NNC 2).

En naturlig forklaring på de høye trykkforskjellene mellom modellene ville være at det ligger lagret større mengder fluid i liggblokken i den utvidede standardmodellen. Dette ble undersøkt, men kunne ikke påvises. Alle metningsbilder og grafer viste at mengden fluid var omtrentlig lik mellom modellene.

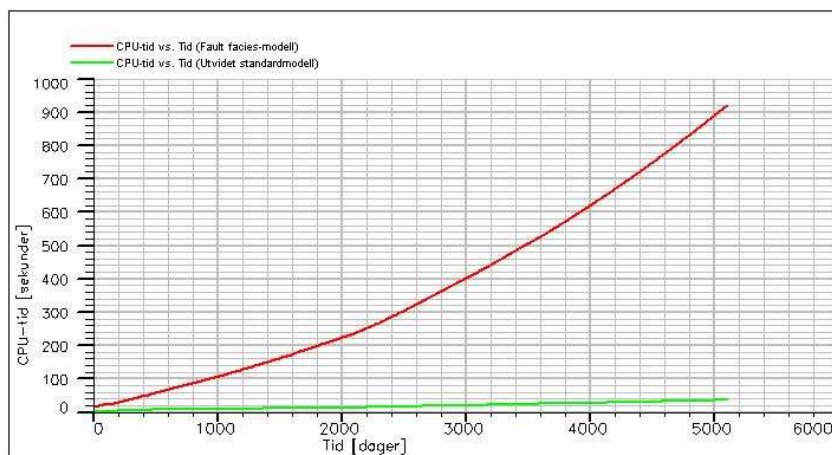
Trykkstøtten til øvre del av hengblokk var dårligere i den utvidede standardmodellen. Dette førte til at injeksjonsbrønnen ikke klarte å forhindre at bunnhullstrykket i produksjonsbrønnen falt til boblepunktstrykket. Produksjonsraten ble dermed nedjustert tidligere for den utvidede standardmodellen, og dette bidro til større netto-rate ($\Delta Q = Q_{inj} - Q_{prod}$) i tidsrommet fra om lag 200 til 1600 dager. Større rate fører til høyere trykk (følger av Darcy's lov for væskestrøm, ligning 2.6). Men dette er ikke nok for å forklare de store trykkforskjellene mellom modellene.

Etter ca. 1600 dager nedjusteres produksjonsraten i fault facies-modellen. Når 1800 dager er gått ble det observert at raten var omtrentlig lik mellom modellene. Fra dette tidspunktet var trykkene omtrent parallele mellom modellene. Dette kan være en indikasjon på at kommunikasjonen (ikke-naboforbindelsene) i den utvidede standardmodellen ikke er tilstrekkelig definert for å gjenskape trykkbildet fra fault facies-modellen. Det kreves større trykkforskjeller på tvers av forkastningen for å se de samme strømningene som i fault facies-modellen. Det kan dermed virke som forkastningsvolumet fungerer som en trykkavlastende sone i fault facies-modellen.

Flere ikke-naboforbindelser kunne blitt definert for å bedre kommunikasjonen på tvers av forkastningen. Rent hypotetisk kan man si at det ville vært nødvendig at hver celle i liggblokken har kommunikasjon med hver celle i hengblokken for å gjenskape kommunikasjonen fra fault facies-modellen. Dette blir $15 \cdot 15 \cdot 30 = 6750$ forbindelser. Når svært mange av disse forbindelsene ville trengt forskjellige transmissibilitetsmultiplikatorer for å oppnå et riktig metningsbilde, innser man fort at dette arbeidet er omfattende.

Det er mulig trykkbildet kunne blitt forbedret ved å definere ytterligere ikke-naboforbindelser (modifikasjonen fra NNC 1 til NNC 2 antyder dette), men dette kan fort bli svært omfattende og ble ikke mulig innenfor rammene av dette studiet. Det var heller ikke ønskelig å lage en komplisert utvidet standardmodell. Poenget var at den skulle være tidsbesparende og enkel å ta i bruk. Derfor ble studiet avsluttet her.

Målet med den utvidede standardmodellen var å oppnå resultatene fra fault facies-modellen med en forenklet modell. Den utvidede standardmodellen bruker vesentlig kortere tid på å simulere strømmingene (se figur 9.50), og det vil derfor være ønskelig å bruke denne.



Figur 9.50 – Illustrerer forskjellen i CPU-tid mellom fault facies- (rød) og utvidet standardmodell (grønn).

Av figur 9.50 ser man at den utvidede standardmodellen har brukt 36 sekunder på å simulere forsøket, mot fault facies-modellens 921 sekunder. Det fine gitteret i forkastningsvolumet gjør at det endelige gitteret inneholder mange flere celler og forbindelser i fault facies-modellen. Derfor tar det betydelig lengre tid å simulere denne modellen. Men hvis arbeidet med å konstruere et ekvivalent standardgitter viser seg å være like omfattende og komplisert som antatt, vil det ha lite for seg å anvende dette. Poenget med den utvidede standardmodellen er at den skal være tidsbesparende og enklere å ta i bruk.

I forsøket med å reprodusere resultatene fra fault facies-modellen var innføringen av ikke-naboforbindelser delvis vellykket. Metningsbildet og strømmingene var tilnærmet lik mellom modellene. Derimot var trykkforskjellene store, noe som trolig var et resultat av dårligere definerte forbindelser på tvers av forkastningen i den utvidede standardmodellen. Det krevdes større trykkforskjeller på tvers av forkastningen for å kunne se det samme strømningsmønsteret som i fault facies-modellen. Denne problemstillingen kan muligens løses med å definere flere forbindelser på tvers av forkastningen, men dette arbeidet kan være svært omfattende og komplisert. Sluttresultatet vil heller aldri være fullkomment. Mange viktige forkastningsegenskaper, som vannakkumulasjon og uproduserbare oljeregioner, vil gå tapt med en standardmodell.

9.4 Oppsummerende resultater og diskusjon

I studiet ble det observert forkastningsegenskaper som tilsier at standardmodellen ikke er tilstrekkelig nøyaktig i simulering med forkastninger. Store vertikale strømningsbaner, dannelse av vannbank, dannelse av uproduserbare oljeregioner og tilbakestrømning av vann til forkastning/reservoar ble registrert.

Det ble for flertallet av kjøringene observert at det forekom strømninger i forkastningsvolumet uavhengig av sand-mot-sand-kontaktene. I forsøket med å reprodusere resultatene fra fault facies-modellen ble det vist at de vertikale strømningsbanene kan gjenskapes med ikke-naboforbindelser i en utvidet standardmodell. Dette vil i hovedsak være nødvendig i reservoarmodeller med vertikal forkastningspermeabilitet større enn 50 mD, da disse ga størst vertikal utstrekning i strømmingene. Det vil også være nødvendig i reservoarmodeller som inneholder barriere(-r).

For de aller fleste forsøkene ble det registrert at vann hadde en tendens til å akkumuleres i de nederste lagene i forkastningsvolumet. Dette var særskilt gjeldene for reservoarmodeller med stor vertikal forkastningspermeabilitet (>50 mD). Selv for reservoarmodeller med lav vertikal forkastningspermeabilitet (≈ 5 mD) ble det observert vannakkumulasjon. Vann migrerte ofte vertikalt i reservoaret i disse modellene, for deretter å strømme tilbake inn i nedre del av forkastningsvolumet og lagres der.

Vannakkumulasjonen er en viktig tidsavhengig forkastningsegenskap som taler i mot bruken av standardmodellen. Denne prosessen kan kun skje i et volum og kan dermed ikke skildres i en standardmodell. En slik vannmetningsoppbygning kan frembringe midlertidige strømningsbarrierer.

I mange av forsøkene ble det observert at mye olje ble fanget i forkastningssonen. Slike uproduserbare oljeregioner vil ikke vises i en standardmodell på grunn av manglende forkastningsvolum. Den fangende oljen vil sannsynligvis ikke ha noen betydelig innvirkning på utvinningen av reservoaret som helhet, men det er en prosess som tydeliggjør begrensningene til standardmodellen.

I mange av forsøkene med forkastningspermeabiliteter lavere enn 100 mD, ble det observert tilbakestrømning av vann fra reservoar til nedre lag i forkastningsvolumet. Dette er en forkastningsegenskap som ikke vil vises med en standardmodell grunnet manglende forkastningsvolum. Denne prosessen har trolig en sammenheng med akkumuleringen av vann i nedre del av forkastningsvolumet. Vannet har en tendens til å ville samles i dette området. Denne prosessen har ikke særlig stor betydning, men gir bedre forståelse rundt strømningene i, og rundt forkastningen.

I forsøkene med barrierer ble det registrert at vann strømmet fra forkastningssonen og tilbake til liggblokk, samt inn i ikke-produserende lag i hengblokk. Disse egenskapene kan gjenskapes med ikke-naboforbindelser med lave transmissibilitetsmultiplikatorer.

Resultatene fra den utvidede standardmodellen viste at det er mulig å gjenskape strømningene og det totale metningsbildet fra fault facies-modellen, men det ble observert store trykkforskjeller mellom modellene. Det krevdes større trykkforskjeller på tvers av forkastningen i den utvidede standardmodellen for å kunne se det samme strømningsmønsteret som i fault facies-modellen. Det er naturlig å tro at dette kunne vært løst med flere ikke-naboforbindelser for å gjenskape den gode kommunikasjonen fra fault facies-modellen, men dette er et omfattende arbeid og kan resultere i en uhåndterlig modell.

Forsøket med den utvidede standardmodellen ble gjort på en komplisert reservoarmodell. Det kan dermed ikke utelukkes at en utvidet standardmodell lettere kan reprodusere korrekte resultater fra en fault facies-modell på enklere reservoarmodeller.

Dette studiet har vist at standardmodellen ikke er tilstrekkelig nøyaktig i simulering med forkastninger. Dette gjelder særskilt for reservoarmodeller som inneholder høye forkastningspermeabiliteter (fortrinnsvis i z-retning) og/eller barrierer. I en utvidet standardmodell viste det seg å være umulig å oppnå et korrekt metningsbilde samtidig som trykkene stemte overens med fault facies-modellen. Transmissibilitetsmultiplikatorene kunne tilpasses slik at trykkbildene stemte, men da var metningsbildene forskjellige. Det vil derfor

være nødvendig å anvende fault facies-modeller for å simulere forkastningsstrømmene korrekt. Dette vil være en utfordring på et reelt reservoar som gjerne har mange kryssende forkastninger. Gitteret vil da inneholde millioner av celler og forbindelser, og numerisk løsning av den endelige koeffisientmatrisen vil da være ekstremt tidkrevende og kanskje umulig. Derfor må standardmodellen anvendes av praktiske årsaker i enkelte tilfeller, og feil må medregnes. Bruk av standardmodellen kan derimot forsvares for enkle reservoarmodeller.

Kapittel 10 – Konklusjoner

Dette studiet viste at det skjedde strømninger i forkastningssonen utover det som var gitt av sand-mot-sand-kontaktene.

Standardmodellen var ikke tilstrekkelig nøyaktig for å simulere forkastningsstrømningene i dette studiet.

Studiet viste at vann hadde en tendens til å akkumuleres i nedre del av forkastningsvolumet, særs for reservoarmodeller med vertikal forkastningspermeabilitet større enn 50 mD.

Studiet viste at det oppstod uproduserbare oljeregioner i forkastningssonen, særlig for reservoarmodeller med vertikal forkastningspermeabilitet mindre enn 50 mD.

For dette studiet kunne en utvidet standardmodell benyttes for å gjenskape metningsbildet fra en fault facies-modell. Dette er ikke tilstrekkelig, da det selv med et likt metningsbilde kan være store forskjeller mellom simulert trykk, som vil være en utfordring å løse.

Det var store trykkforskjeller mellom den utvidede standardmodellen og fault facies-modellen i dette studiet. Dette betyr at det kan være svært arbeidskrevende å lage en utvidet standardmodell som reproducerer både metning og trykk, hvis det i det hele tatt er mulig.

Trykkforskjellene mellom fault facies-modellen og den utvidede standardmodellen skyldes sannsynligvis dårligere definert kommunikasjon på tvers av forkastningen i den utvidede standardmodellen.

Dette studiet viste at den utvidede standardmodellen ikke klarte å gjengi resultatene fra fault facies-modellen på en korrekt måte.

Fault facies-modeller bør benyttes i simulering av forkastningsmodeller.

Kapittel 11 – Videre arbeid

Ved endt studie er det mange områder hvor det vil være nødvendig med videre arbeid. Først og fremst kan det være interessant å undersøke hvorvidt formen på forkastningsvolumet utgjør en forskjell. Om man vil se de samme forkastningsegenskapene hvis for eksempel øvre og nedre rand av forkastningsvolumet endres til skråplan for en mer realistisk geologisk gjengivelse. Det vil være naturlig å tro at de vertikale strømmingene vil være lik, men det er ikke gitt at man vil se den samme tendensen til vannakkumulasjon i nedre del av forkastningsvolumet. Det kan også være interessant å undersøke om størrelsen av forkastningsvolumet er en viktig faktor for at de ulike forkastningsegenskapene skal opptre.

Det bør også undersøkes om utvidede standardmodeller kan benyttes på enklere reservoarmodeller uten barrierer. Det kan tenkes at i dette studiet har barrieren komplisert trykkbildet for den utvidede standardmodellen, noe som kanskje ikke vil være realiteten for enklere reservoarmodeller.

Det ble konkludert med at fault facies-modeller bør benyttes i simulering av forkastningsmodeller, men numerisk løsning av denne modellen er svært tidkrevende og kanskje umulig. Det bør, som i et internt notat presentert av Pettersen (2010) [18], undersøkes om fault facies-gitre kan konstrueres som separate uavhengige innretninger som kan løses individuelt og isolert. For deretter kobles opp mot det grovere gitteret og andre fault facies-gitre.

Nomenklatur

Latinske bokstaver

A	-	Tverrsnittsareal [m^2]
A_x	-	x-projeksjonsarealet av felles kontaktflate mellom celle i og j [m^2]
A_y	-	y-projeksjonsarealet av felles kontaktflate mellom celle i og j [m^2]
A_z	-	z-projeksjonsarealet av felles kontaktflate mellom celle i og j [m^2]
b	-	Invers volumfaktor [fraksjon]
B_g	-	Volumfaktor for gass [fraksjon]
B_o	-	Volumfaktor for olje [fraksjon]
B_w	-	Volumfaktor for vann [fraksjon]
Bhp	-	Bunnhullstrykk (bhp, eng. bottom hole pressure)
D	-	Darcy's konstant [$0,008527 \text{ m}^2$]
Dd	-	Celledybde [m]
D_x	-	Cellelengde i x-retning [m]
D_y	-	Cellelengde i y-retning [m]
D_z	-	Cellelengde i z-retning [m]
D_x	-	x-komponent av avstanden mellom sellesentrum og respektiv selleside [m]
D_y	-	y-komponent av avstanden mellom sellesentrum og respektiv selleside [m]
D_z	-	z-komponent av avstanden mellom sellesentrum og respektiv selleside [m]
FOPR	-	Produksjonsrate for feltet (FOPR, eng. field oil production rate) [Sm^3/dag]
g	-	Tyngdeakselerasjonen [$9,81 \text{ m/s}^2$]
GOC	-	Gass-olje-kontakt (GOC, eng. gas-oil-contact)
h	-	Avstand [m]
H	-	Harmonisk gjennomsnitt
K	-	Absolutt permeabilitet [mD]

K_g	-	Effektiv permeabilitet for gass [mD]
K_o	-	Effektiv permeabilitet for olje [mD]
K_w	-	Effektiv permeabilitet for vann [mD]
k_{rg}	-	Relativ permeabilitet for gass [fraksjon]
k_{ro}	-	Relativ permeabilitet for olje [fraksjon]
k_{rw}	-	Relativ permeabilitet for vann [fraksjon]
L	-	Lengde [m]
L_{DIP}	-	Fallkorreksjon
n	-	Antall tall i tallrekken
NNC	-	Ikke-naboforbindelse (nnc, eng. non neighbour connection)
NTG	-	Netto-brutto-forholdet (NTG, eng. net-to-gross ratio) [fraksjon]
OWC	-	Olje-vann-kontakt (OWC, eng. oil-water-contact)
Δp	-	Trykkforskjell [bar]
∇p	-	Trykkgradient [bar/m]
p_{bp}	-	Kokepunktstrykket for olje [bar]
P_c	-	Kapillartrykk [bar]
P_{cgo}	-	Kapillartrykk mellom olje og gass [bar]
P_{cwo}	-	Kapillartrykk mellom olje og vann [bar]
p_{nw}	-	Trykket i den ikke-vættende fasen [bar]
p_w	-	Trykket i den vættende fasen [bar]
PVT	-	Termodynamisk tilstandsligning (PVT, eng. pressure, volume, temperature)
Q	-	Strømningsrate [volum/tid]
r	-	Poreradien [cm]
R	-	Radius [cm]
RC	-	Reservoarbetingelser (RC, eng. reservoir conditions)
R_s	-	Oppløselighetsfaktor [fraksjon]
ROIP	-	Mengde olje i region (ROIP, eng. region oil in place) [Sm ³]
RWIP	-	Mengde vann i region (RWIP, eng. region water in place) [Sm ³]
S_g	-	Gassmetning [fraksjon]
S_L	-	Væskemetning (olje og vann) [fraksjon]
S_o	-	Oljemetning [fraksjon]
S_w	-	Vannmetning [fraksjon]
STC	-	Standardbetingelser (STC, eng. standard conditions)

t	-	Tid [s]
T	-	Transmissibilitet [mD·m]
\bar{T}_l	-	Halvcelletransmissibilitet for venstre del av cellen [mD·m]
\bar{T}_r	-	Halvcelletransmissibilitet for høyre del av cellen [mD·m]
Tm	-	Transmissibilitetsmultiplikator
\mathbf{u}	-	Darcy-hastighet på vektorform [m/s]
V_B	-	Bulkvolum [m ³]
V_M	-	Matriksvolum [m ³]
V_P	-	Porevolum [m ³]
V_g	-	Gassvolum [m ³]
V_o	-	Oljevolum [m ³]
V_w	-	Vannvolum [m ³]
x_n	-	Verdien av tall n i tallrekken

Greske bokstaver

γ_g	-	Spesifikk tyngde for gass [kg/(ms) ²]
γ_o	-	Spesifikk tyngde for olje [kg/(ms) ²]
γ_w	-	Spesifikk tyngde for vann [kg/(ms) ²]
θ	-	Kontaktvinkel [grader]
λ_g	-	Gassmobilitet [1/cP]
λ_o	-	Oljemobilitet [1/cP]
λ_w	-	Vannmobilitet [1/cP]
ρ	-	Tetthet [kg/m ³]
σ	-	Grenseflatespenning [mN/m]
σ_{os}	-	Grenseflatespenning mellom olje og fast stoff [mN/m]
σ_{ow}	-	Grenseflatespenning mellom olje og vann [mN/m]
σ_{ws}	-	Grenseflatespenning mellom vann og fast stoff [mN/m]
τ	-	Skjærkraft [N/m ²]
φ	-	Porøsitet [fraksjon]
μ	-	Viskositet [cP]

Referanser

- [1] Brynhi, I. (14. februar 2009) *Facies* [Internett] Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <<http://snl.no/facies>> [Nedlastet 4. september 2011].
- [2] Fachri, M., Cardozo, N., Espedal, M., Pettersen, Ø., Tveranger, J. (2011) The impact of fault envelope structure on fluid flow. *AAPG Bulletin.*, v. 95, no. 4, april, s. 619-648.
- [3] Folding (8. september 2011). *Wikipedia* [Internett] Tilgjengelig fra: <<http://nn.wikipedia.org/wiki/Folding>> [Nedlastet 15. november 2011].
- [4] Fossen, H. & Gabrielsen, R.H. (2005) *Strukturgeologi*. Bergen, Fagbokforlaget.
- [5] Færseth, R. B. (2006) Shale smear along large faults: continuity of smear and the fault seal capacity. *Journal of the Geological Society*, vol. 163, 2006, s. 741-751.
- [6] Harmonisk gjennomsnitt (19. juli 2011). *Wikipedia* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://no.wikipedia.org/wiki/Harmonisk_gjennomsnitt> [Nedlastet 5. september 2011].
- [7] Holtebekk, T. (15. februar 2009) *Viskositet* [Internett] Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <<http://snl.no/viskositet>> [Nedlastet 4. september 2011].
- [8] Kontinuumsmekanikk (7. november 2011). *Wikipedia* [Internett] Tilgjengelig fra: <<http://no.wikipedia.org/wiki/Kontinuumsmekanikk>> [Nedlastet 15. november 2011].
- [9] Lien, J.R. (2009) *PTEK 212 Reservoarteknikk I*. Institutt for fysikk og teknologi Universitetet i Bergen, Universitas Bergensis.
- [10] Litologi (7. september 2011). *Wikipedia* [Internett] Tilgjengelig fra: <<http://no.wikipedia.org/wiki/Litologi>> [Nedlastet 15. november 2011].
- [11] Marshak, S. (2008) *Earth Portrait of a Planet*. 3rd ed. New York, W. W. Norton & Company, Inc.
- [12] Message passing (7. september 2011). *Wikipedia* [Internett] Tilgjengelig fra: <http://en.wikipedia.org/wiki/Message_passing> [Nedlastet 15. november 2011].

- [13] Newtonsk væske (14. februar 2009). *Store Norske Leksikon* [Internett] Tilgjengelig fra: < http://snl.no/newtonsk_vaeske > [Nedlastet 4. september 2011].
- [14] Petroleum reservoir (17. juli 2011). *Wikipedia* [Internett]. Tilgjengelig fra: < http://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum_reservoir > [Nedlastet 4. september 2011].
- [15] Petroleum traps (2003). *MPG Petroleum, Inc.* [Internett]. Tilgjengelig fra: < <http://www.mpgpetroleum.com/fundamentals.html#Petroleum%20Traps> > [Nedlastet 5. september 2011].
- [16] Pettersen, Ø. (1990) *Grunnkurs i reservoarmekanikk*. Matematisk institutt Universitetet i Bergen.
- [17] Pettersen, Ø. (2006) *Basics of Reservoir Simulation with the Eclipse Reservoir Simulator, Lecture Notes*. Dept. of Mathematics, University of Bergen.
- [18] Pettersen, Ø. (2010) Project description: Fault Facies (FF) grids using Domain Decomposition and Multiscale Modelling methods, aug. 2010.
- [19] Pettersen, Ø. (2011) *EX4B.DATA* [Internett], Øystein Pettersen's home page. Tilgjengelig fra: < http://www.uib.no/People/fciop/solutions_to_exercises.htm > [Nedlastet 12. oktober 2011].
- [20] Schlumberger (2006) *FILL Reference Manual 2006.1*.
- [21] Schlumberger (2009) *ECLIPSE Technical Description 2009.2*.
- [22] Schlumberger (2009) *FloViz User Guide 2009.1*.
- [23] Sediment (18. august 2011). *Wikipedia* [Internett]. Tilgjengelig fra: < <http://no.wikipedia.org/wiki/Sediment> > [Nedlastet 19. september 2011].
- [24] Selley, R.C. (1998) *Elements of Petroleum Geology*. 2nd ed. San Diego, Academic Press.
- [25] Sentralitetsmål (27. februar 2011). *Wikipedia* [Internett]. Tilgjengelig fra: < <http://no.wikipedia.org/wiki/Sentralitetsmål> > [Nedlastet 5. september 2011].

- [26] Soleng, H.H., Røe, P., Skorstad, A., SPE, Syversveen, A.R., Tveranger, J. (2007) Flow Through Inhomogeneous Fault Zones. *Prepared for presentation at the 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Anaheim, California, U.S.A.*, 11-14 November 2007.
- [27] Syversveen, A.R., Røe, P., Skorstad, A., Soleng, H.H., Tveranger, J. (2006) Facies Modelling in Fault Zones. *10th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery – Amsterdam*, The Netherlands 4-7 September 2006.
- [28] Tilstandsligning (25. august 2011). *Wikipedia* [Internett] Tilgjengelig fra: <<http://no.wikipedia.org/wiki/Tilstandsligning>> [Nedlastet 12. oktober 2011].
- [29] Tveranger, J., Braathen, A., Skar, T., Skauge, A. (2005) Centre for Integrated Petroleum Research – Research activities with emphasis on fluid flow in fault zones. *Norwegian Journal of Geology*, 85, s. 63-72.
- [30] Zolotukhin, A. B. & Ursin, J.R. (2000) *Introduction to Petroleum Reservoir Engineering*. Printed in Norway 2000, Høyskoleforlaget AS – Norwegian Academic Press.

III – APPENDIKS

Appendiks A – Transmissibilitetsberegning

$$(D_{17} \cdot D_{17}) = D_{17X}^2 + D_{17Y}^2 + D_{17Z}^2 = 25^2 + 0^2 + 0^2 = 625 \text{ m}^2$$

$$(D_{18} \cdot D_{18}) = D_{18X}^2 + D_{18Y}^2 + D_{18Z}^2 = 25^2 + 0^2 + 0^2 = 625 \text{ m}^2$$

$$(A \cdot D_{17}) = A_X \cdot D_{17X} + A_Y \cdot D_{17Y} + A_Z \cdot D_{17Z} = 50 \times 15 \cdot 25 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 18750 \text{ m}^3$$

$$(A \cdot D_{18}) = A_X \cdot D_{18X} + A_Y \cdot D_{18Y} + A_Z \cdot D_{18Z} = 50 \times 15 \cdot 25 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 18750 \text{ m}^3$$

$$T_{17} = Kx_{17} \cdot NTG_{17} \cdot \frac{A \cdot D_{17}}{D_{17} \cdot D_{17}} = 12000 \cdot 1 \cdot \frac{18750}{625} = 360000 \text{ mD} \cdot \text{m}$$

$$T_{18} = Kx_{18} \cdot NTG_{18} \cdot \frac{A \cdot D_{18}}{D_{18} \cdot D_{18}} = 12000 \cdot 1 \cdot \frac{18750}{625} = 360000 \text{ mD} \cdot \text{m}$$

$$Tx_{17} = \frac{D \cdot TMx_{17}}{\frac{1}{T_{17}} + \frac{1}{T_{18}}} = \frac{0,008527 \cdot 1}{\frac{1}{360000} + \frac{1}{360000}} = 1534,86 = \underline{\underline{1534,9 \text{ mD} \cdot \text{m}}}$$

Appendiks B – Inndatafiler til ECLIPSE

B1 – Inndatafil for fault facies-modellen

```
NOECHO

RUNSPEC
=====

TITLE
PTEK399 - Master

DIMENS
40 30 22 /

OIL
WATER

METRIC

-- Dim-nøkkelord definerer tabeller og andre størrelser

TABDIMS
-- NTSFUN NTPVT NSSFUN NPPVT NTFIP NRPVT NTENDP
   1      1    40    28    6    15 /

WELLDIMS
-- Max#Wells MaxConn/well MaxGrp MaxWell/Grp BS
   2          15         2     1 /

EQLDIMS
-- Max#equi/reg Depth-N Max/Depth-N Max/tab Max/DN/tab
   1          100        10     1    20 /

FAULTDIM
-- Definerer maks # linjer i forkastningsbeskrivelsen
32 /

GRIDOPTS
-- Nødvendig når MULTX- eller MULTY- blir brukt
YES /

LGR
-- Dimensjoner for LGR
-- Max#LGRs MaxCellsInEach - (LCS) Max#LGRamlgs Max#LGRinAnAmalg (..) -
Pressure interpolation
   2          56250        1*     1     2     1*
'INTERP'      1* /

NSTACK
-- NSTACK bør være =< LITMAX. LITMAX er definert under TUNING
100 /

START
1 'JAN' 2011 /

UNIFOUT
-- Samler utdatafilene
```

GRID

=====
INCLUDE
'FILL_FF.FILLED' /

INCLUDE
'LGR7.INC' /

INIT
-- Ber om at eclipse skriver ut en initial datafil for
-- visualisering av inndataene for petrofysikken

RPTGRID
TRANX ALLNNC /

PROPS

=====
INCLUDE
'PROPS.INC' /

REGIONS

=====
INCLUDE
'REGIONS.INC' /

SOLUTION

=====
EQUIL
-- Likevektsinitialisering (PS. Nacc=0 gir celledentrert initialisering av
metninger)
-- Datumdepth P(DD) OWC Pcow(OWC) GOC Pcog Nlive RvN Nacc.
 1900 320 2250 0 1400 3* 0 /

RPTSOL
-- Skriver initial restartfil
-- FIP=1: Gir utdata av fip-volumer for feltet
-- FIP=2: Gir utdata av fip-volumer for feltet og for regioner
FIP=1 RESTART=2 /

SUMMARY

=====
INCLUDE
'SUMMARY.INC' /

SCHEDULE

=====

RPTRST

-- Ber om restartfil for petrofysiske størrelser og grafikk
 BASIC=5 NORST=1 /

WELSPECS

-- Brønnsesifikasjon
 -- wname grp iwh jwh Z(bhp) prefPhase rPI/II sp.Infl AutoShut X-flow Ptab
 densCalc FIPnr
 'P1' 'P' 31 16 1* 'OIL' /
 'I1' 'I' 10 15 1* 'WATER' /
 /

COMPDAT

-- Data for ferdigstilling
 -- wname ic jc k_hi k_lo open/shut satnum tfac wdiam Kh skin Dfac
 penDir r0
 'P1' 31 16 8 12 'OPEN' 2* 0.31 1* 0 0 'Z'
 /
 'I1' 10 15 11 15 'OPEN' 2* 0.31 1* 0 0 'Z'
 /
 'I1' 10 15 4 5 'OPEN' 2* 0.31 1* 0 0 'Z'
 /
 /

WCONPROD

-- Produksjonsspesifikasjoner
 -- wname open/shut ctrlmode orat wrat grat lrat rvol bhpmin thpmin
 vfptab artlift ...
 'P1' 'OPEN' 'ORAT' 6000 4* 227 3* /
 /

WCONINJE

-- Injeksjonsspesifikasjoner
 -- wname injtype open/shut ctrlmode rate resv BHP(max) THP(max)
 'I1' 'WATER' 'SHUT' 'RATE' 7000 1* 500 1* /
 /

TUNING

/

/

-- NEWTMX NEWTMN LITMAX LITMIN MXWSIT ...
 1* 1* 100 1* 15 /

DATES

1 'JUL' 2011 /
 /

WCONINJE

-- Injeksjonsspesifikasjoner
 -- wname injtype open/shut ctrlmode rate resv BHP(max) THP(max)
 'I1' 'WATER' 'OPEN' 'RATE' 7000 1* 500 1* /
 /

DATES

1 'JAN' 2012 /
 1 'JUL' 2012 /

1 'JAN' 2013 /
1 'JUL' 2013 /
1 'JAN' 2014 /
1 'JUL' 2014 /
1 'JAN' 2015 /
1 'JUL' 2015 /
1 'JAN' 2016 /
1 'JUL' 2016 /
1 'JAN' 2017 /
1 'JUL' 2017 /
1 'JAN' 2018 /
1 'JUL' 2018 /
1 'JAN' 2019 /
1 'JUL' 2019 /
1 'JAN' 2020 /
1 'JUL' 2020 /
1 'JAN' 2021 /
1 'JUL' 2021 /
1 'JAN' 2022 /
1 'JUL' 2022 /
1 'JAN' 2023 /
1 'JUL' 2023 /
1 'JAN' 2024 /
1 'JUL' 2024 /
1 'JAN' 2025 /
/

END

ECHO

B2 – Inndatafil for forkastningsvolumet i fault facies-modellen

Under følger inndatafilen for forkastningsvolumet til kjøring 7, shale smear, i fault facies-modellen. CARFIN-nøkkelordet defineres i grid-seksjonen i .data-filen.

```
CARFIN
-- Definerer cellene som skal deles inn i LGR
-- LGRname   i1   i2   j1   j2   k1   k2   NX   NY   NZ   Max#WellsInLgr
      'LGR1'  20   20   1   30   1   15   5   150  75           1   /

PORO
-- Porøsitet
56250*0.2 /

EQUALS
'PERMX'      5 /
'PERMY'      5 /
'PERMZ'     100 /
/

ADD
-- array      value   i1   i2   j1   j2   k1   k2
  PERMX       -4      1    1    1  150  26   35 /
  PERMX       -4      2    2    1  150  35   41 /
  PERMX       -4      3    3    1  150  41   50 /
  PERMX       -4      4    4    1  150  50   56 /
  PERMX       -4      5    5    1  150  56   56 /

  PERMY       -4      1    1    1  150  26   35 /
  PERMY       -4      2    2    1  150  35   41 /
  PERMY       -4      3    3    1  150  41   50 /
  PERMY       -4      4    4    1  150  50   56 /
  PERMY       -4      5    5    1  150  56   56 /

  PERMZ      -99      1    1    1  150  26   35 /
  PERMZ      -99      2    2    1  150  35   41 /
  PERMZ      -99      3    3    1  150  41   50 /
  PERMZ      -99      4    4    1  150  50   56 /
  PERMZ      -99      5    5    1  150  56   56 /
/
ENDFIN

CARFIN
-- Definerer cellene som skal deles inn i LGR
-- LGRname   i1   i2   j1   j2   k1   k2   NX   NY   NZ   Max#WellsInLgr
      'LGR2'  21   21   1   30   8   22   5   150  75           1   /

PORO
-- Porøsitet
56250*0.2 /

EQUALS
'PERMX'      5 /
'PERMY'      5 /
'PERMZ'     100 /
/

ADD
-- array      value   i1   i2   j1   j2   k1   k2
  PERMX       -4      1    1    1  150  21   30 /
```

PERMX	-4	2	2	1	150	30	30	/
PERMX	-4	3	3	1	150	30	36	/
PERMX	-4	4	4	1	150	36	45	/
PERMX	-4	5	5	1	150	45	50	/
PERMY	-4	1	1	1	150	21	30	/
PERMY	-4	2	2	1	150	30	30	/
PERMY	-4	3	3	1	150	30	36	/
PERMY	-4	4	4	1	150	36	45	/
PERMY	-4	5	5	1	150	45	50	/
PERMZ	-99	1	1	1	150	21	30	/
PERMZ	-99	2	2	1	150	30	30	/
PERMZ	-99	3	3	1	150	30	36	/
PERMZ	-99	4	4	1	150	36	45	/
PERMZ	-99	5	5	1	150	45	50	/

/

ENDFIN

AMALGAM

 'LGR*' /

/

B3 – Inndatafil for forkastningen i standardmodellen

Under følger inndatafilen for forkastningskommunikasjon mellom sand-mot-sand-kontakter i standardmodellen for kjøring 7, shale smear. FAULTS- og MULTFLT-nøkkelord defineres i grid-seksjonen i .data-filen.

FAULTS

-- Definerer forkastninger

-- fname	i1	i2	j1	j2	k1	k2	dir
'F1'	20	20	1	30	8	8	X /
'F2'	20	20	1	30	9	9	X /
'F3'	20	20	1	30	10	10	X /
'F4'	20	20	1	30	11	11	X /
'F5'	20	20	1	30	12	12	X /
'F6'	20	20	1	30	13	13	X /
'F7'	20	20	1	30	14	14	X /
'F8'	20	20	1	30	15	15	X /

/

MULTFLT

-- Definerer transmissibilitetsmultiplikatorer

-- fname	multiplier
F1	0.0001 /
F2	0.0001 /
F3	0.0001 /
F4	0.0001 /
F5	0.0002 /
F6	0.0002 /
F7	0.0005 /
F8	0.0013 /

/

B4 – Utdrag av inndatafilen for ikke-naboforbindelsene i utvidet standardmodell

Under følger et utdrag av ikke-naboforbindelsene som ble definert i kjøring 7, shale smear, i den utvidede standardmodellen. NNC-nøkkelordet defineres i grid-seksjonen i .data-filen.

NNC

```
-- Definerer transmissibiliteter for ikke-naboforbindelser  
-- IX IY IZ JX JY JZ TRAN
```

```
-- 3 --> 1  
20 1 3 21 1 1 0.12 /  
20 2 3 21 2 1 0.12 /  
20 3 3 21 3 1 0.12 /  
20 4 3 21 4 1 0.12 /  
20 5 3 21 5 1 0.12 /  
20 6 3 21 6 1 0.12 /  
20 7 3 21 7 1 0.12 /  
20 8 3 21 8 1 0.12 /  
20 9 3 21 9 1 0.12 /  
20 10 3 21 10 1 0.12 /  
20 11 3 21 11 1 0.12 /  
20 12 3 21 12 1 0.12 /  
20 13 3 21 13 1 0.12 /  
20 14 3 21 14 1 0.12 /  
20 15 3 21 15 1 0.12 /  
20 16 3 21 16 1 0.12 /  
20 17 3 21 17 1 0.12 /  
20 18 3 21 18 1 0.12 /  
20 19 3 21 19 1 0.12 /  
20 20 3 21 20 1 0.12 /  
20 21 3 21 21 1 0.12 /  
20 22 3 21 22 1 0.12 /  
20 23 3 21 23 1 0.12 /  
20 24 3 21 24 1 0.12 /  
20 25 3 21 25 1 0.12 /  
20 26 3 21 26 1 0.12 /  
20 27 3 21 27 1 0.12 /  
20 28 3 21 28 1 0.12 /  
20 29 3 21 29 1 0.12 /  
20 30 3 21 30 1 0.12 /
```

```
-- 3 --> 2  
20 1 3 21 1 2 0.12 /  
20 2 3 21 2 2 0.12 /  
20 3 3 21 3 2 0.12 /  
20 4 3 21 4 2 0.12 /  
20 5 3 21 5 2 0.12 /  
20 6 3 21 6 2 0.12 /  
20 7 3 21 7 2 0.12 /  
20 8 3 21 8 2 0.12 /  
20 9 3 21 9 2 0.12 /  
20 10 3 21 10 2 0.12 /  
20 11 3 21 11 2 0.12 /  
20 12 3 21 12 2 0.12 /  
20 13 3 21 13 2 0.12 /  
20 14 3 21 14 2 0.12 /  
20 15 3 21 15 2 0.12 /  
20 16 3 21 16 2 0.12 /
```

```
20 17 3 21 17 2 0.12 /
20 18 3 21 18 2 0.12 /
20 19 3 21 19 2 0.12 /
20 20 3 21 20 2 0.12 /
20 21 3 21 21 2 0.12 /
20 22 3 21 22 2 0.12 /
20 23 3 21 23 2 0.12 /
20 24 3 21 24 2 0.12 /
20 25 3 21 25 2 0.12 /
20 26 3 21 26 2 0.12 /
20 27 3 21 27 2 0.12 /
20 28 3 21 28 2 0.12 /
20 29 3 21 29 2 0.12 /
20 30 3 21 30 2 0.12 /
```

```
-- 3 --> 3
```

```
20 1 3 21 1 3 0.1 /
20 2 3 21 2 3 0.1 /
20 3 3 21 3 3 0.1 /
20 4 3 21 4 3 0.1 /
20 5 3 21 5 3 0.1 /
20 6 3 21 6 3 0.1 /
20 7 3 21 7 3 0.1 /
20 8 3 21 8 3 0.1 /
20 9 3 21 9 3 0.1 /
20 10 3 21 10 3 0.1 /
20 11 3 21 11 3 0.1 /
20 12 3 21 12 3 0.1 /
20 13 3 21 13 3 0.1 /
20 14 3 21 14 3 0.1 /
20 15 3 21 15 3 0.1 /
20 16 3 21 16 3 0.1 /
20 17 3 21 17 3 0.1 /
20 18 3 21 18 3 0.1 /
20 19 3 21 19 3 0.1 /
20 20 3 21 20 3 0.1 /
20 21 3 21 21 3 0.1 /
20 22 3 21 22 3 0.1 /
20 23 3 21 23 3 0.1 /
20 24 3 21 24 3 0.1 /
20 25 3 21 25 3 0.1 /
20 26 3 21 26 3 0.1 /
20 27 3 21 27 3 0.1 /
20 28 3 21 28 3 0.1 /
20 29 3 21 29 3 0.1 /
20 30 3 21 30 3 0.1 /
```